

ISBN 978-9984-45-510-5



9 789984 455105 >



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

ANNO 1919

R. Kasparinskis

Latvijas meža augšņu daudzveidība un to ietekmējošie faktori

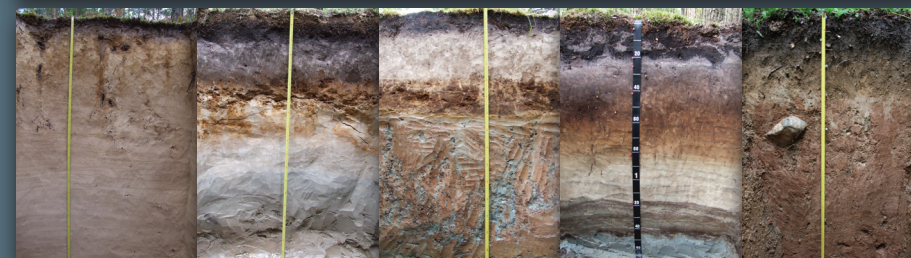
LATVIJAS UNIVERSITĀTE
ĢEOGRĀFIJAS UN ZEMES ZINĀTŅU FAKULTĀTE
VIDES ZINĀTNES NODAĻA

Raimonds Kasparinskis

Promocijas darbs

Latvijas meža augšņu daudzveidība un to ietekmējošie faktori

Diversity of Forest Soils and
Its Influencing Factors in Latvia



Rīga, 2012

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
GEOGRĀFIJAS UN ZEMES ZINĀTŅU FAKULTĀTE
VIDES ZINĀTNES NODAĻA

Raimonds Kasparinskis

Promocijas darbs

**Latvijas meža augšņu
daudzveidība un
to ietekmējošie faktori**

**Diversity of Forest Soils and
Its Influencing Factors in Latvia**

Doktora grāda iegūšanai ģeogrāfijā vides zinātnes nozarē
dabas aizsardzības apakšnozarē

Darba zinātniskie vadītāji:
prof. *Dr. geogr.* Oļģerts Nikodemus
prof. *Dr. habil. chem.* Māris Kļaviņš

Rīga, 2012

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes Vides zinātnes nodaļā. Darba izstrādāšanai saņemts Eiropas Sociālā fonda projekta „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē” Nr. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004, kā arī Latvijas Zinātnes padomes grantu „Lauksaimniecībā izmantojamo zemju apmežošanas ainavekoloģisks vērtējums (Nr. 09.1118)” un „Ģeogrāfisko un ģeoloģisko procesu un faktoru ietekme uz Latvijas dabas apstākļiem un sabiedrību (Nr. 09.1568)” finansiāls atbalsts.



EIROPAS SAVIENĪBA



LATVIJAS
UNIVERSITĀTE
ANNO 1919

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Darba zinātniskie vadītāji:

prof. Dr. *geogr.* **Olģerts Nikodemus**

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

Promocijas padomes sastāvs:

prof. Dr. *biol.* **Viesturs Melecis** (Latvijas Universitāte, LU Bioloģijas institūts),
padomes priekšsēdētājs

asoc. prof. Dr. *biol.* **Gunta Sprinģe** (Latvijas Universitāte), padomes sekretāre

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

prof. Dr. *geogr.* **Olģerts Nikodemus** (Latvijas Universitāte)

prof. Dr. *habil. geogr.* **Māris Laiviņš** (LU Bioloģijas institūts)

doc. Dr. *geogr.* **Zanda Penēze** (Latvijas Universitāte)

Recenzenti:

prof. Dr. *biol.* **Viesturs Melecis** (Latvijas Universitāte, LU Bioloģijas institūts)

prof. Dr. *habil. agr.* **Aldis Kārklīņš** (Latvijas Lauksaimniecības universitāte)

prof. Dr. *sc.* **Raimo Kōlli** (Igaunijas Dzīvības zinātņu universitāte)

Maketu veidojusi Andra Liepiņa

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2012. gada 18. maijā plkst. 10.00

Latvijas Universitātes Vides zinātnes promocijas padomes atklātā sēdē

LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē Rīgā, Alberta ielā 10, 313. telpā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkas Daudznozaru bibliotēkā: datorika, juridiskās zinātnes, teoloģija Rīgā, Raiņa bulv. 19.

© Latvijas Universitāte, 2012

© Raimonds Kasparinskis, 2012

ISBN 978-9984-45-510-5

SATURS

Ievads	4
1. Meža augšņu pētījumi Latvijā	12
2. Meža augšņu telpiskā mainība un to ietekmējošie faktori	14
2.1. Literatūras apskats	14
2.2. Pētījumu materiāli un metodes	18
2.2.1. Augšņu telpiskās izplatības izpēte	18
2.2.2. Datu statistiskā apstrāde	19
2.3. Rezultāti	20
2.4. Diskusija	30
2.5. Kopsavilkums	32
3. Meža augšņu ķīmiskais sastāvs un to īpašības	33
3.1. Literatūras apskats	33
3.1.1. Augsnes cilmiezis un ģeoloģiskie nogulumi	33
3.1.2. Augsne kā meža ekosistēmu komponents	36
3.2. Pētījumu materiāli un metodes	39
3.2.1. Lauka pētījumi un augsnes fizikālās un ķīmiskās analīzes	39
3.2.2. Datu statistiskā apstrāde	40
3.3. Rezultāti	42
3.3.1. Augšņu fizikālo un ķīmisko īpašību mainība saistībā ar ģeoloģiskajiem nogulumiem	42
3.3.2. Augsnes fizikālās un ķīmiskās īpašības un mežaudzes sastāvs	50
3.4. Diskusija	63
3.5. Kopsavilkums	79
4. Augšņu īpašību maiņa lauksaimniecības zemju apmežošanās rezultātā	81
4.1. Literatūras apskats	81
4.2. Pētījumu materiāli un metodes	83
4.2.1. Lauka pētījumi un augsnes analīzes	83
4.2.2. Datu statistiskā apstrāde	84
4.3. Rezultāti	84
4.4. Diskusija	94
4.5. Kopsavilkums	96
5. Pētījumu rezultātu kopsavilkums	97
Secinājumi	99
Priekšlikumi	101
Izmantotā literatūra	102
Summary of Doctoral Thesis	119

IEVADS

Darba aktualitāte

Pasaulē ir daudz pētījumu par augsnes telpiskās izplatības likumsakarībām (Jenny, 1941; Hudson, 1992; McBratney, 1998; Phillips, Marion, 2005). Tie parāda dažādu vides faktoru nozīmi augšņu procesu attīstībā, morfoloģijā un īpašībās. Tradicionāli par galvenajiem dabiskajiem augsnes veidošanās faktoriem tiek uzskatīti cilmiezis, klimats, reljefs, bioloģiskie faktori (augu un dzīvnieku valsts) un augsnes veidošanās ilgums (augšņu vecums). Svarīga nozīme augsnes veidošanās procesā ir antropogēnajai darbībai. Minētie faktori nosaka procesus augsnē un tās attīstību, piemēram, organisko vielu uzkrāšanos, podzolēšanos, lesivēšanos, glejošanos un citus procesus. Savukārt minēto procesu attīstība, kā arī mijiedarbība dažādos vides apstākļos ir ļoti atšķirīgas, un tās arī bieži nosaka augšņu daudzveidību (Targulian, Krasilnikov, 2007). Vienlaikus tiek atzīts, ka pastāv daudz problēmu saistībā ar konkrētas augsnes klasifikācijas lietošanu augsnes telpiskās izplatības likumsakarību noskaidrošanā, tāpēc daudzviet augsnes zinātnieki joprojām nav vienojušies par konkrētu vides apstākļu ietekmi uz augsnes telpisko izplatību reģionālā un lokālā aspektā (Gray et al., 2009). Nepilnīgas zināšanas par vides apstākļiem dažreiz noved pie augsnes veidošanās procesu pārvērtēšanas vai nenovērtēšanas, kas rada konkrētas augsnes klasifikācijas lietošanas un to savstarpējās salīdzināšanas problēmas (Reintam, 2002). A. Makbratnijs (McBratney et al., 2003) norāda, ka ir grūti atrast pētījumus, kuros ir skaidri aprakstītas likumsakarības starp dažādiem augsnes veidošanās faktoriem un to daudzveidīgo ietekmi uz augsni.

Latvijā līdz šim relatīvi maz ir pētītas tieši meža augsnes un to izplatības likumsakarības. Lielāko ieguldījumu meža augšņu izpētē ir devis Henrihs Mežals (Mežals, 1980), pētot brūnzemju veidošanās likumsakarības. Latvijā tikpat kā nav veikta meža zemju augšņu kartēšana. Padomju periodā, sadarbojoties institūtam „Zemes projekts” ar Leņingradas Vissavienības lauksaimniecības aerofotoģeodēzisko institūtu, mērogā 1 : 100 000 ir veikta 11 Latvijas rajonu meža zemju augšņu kartēšana (Nikodemus, 2001). Zemes izmantošanas un augsnes aizsardzības politikas dokumentos tiek uzsvērts, ka Latvijā tuvākajā laikā viens no nozīmīgākajiem uzdevumiem ir veikt meža augšņu kartēšanu (Zemes pārvaldības..., 2010).

Ne mazāk svarīga nozīme meža augšņu telpiskās izplatības likumsakarību noskaidrošanā ir oglekļa bilances aprēķināšanai, pētot meža ekosistēmu lomu oglekļa piesaistē, kā arī meža ekosistēmu kritiskā līmeņa aprēķināšanai, modelējot vides piesārņojuma risku. Iepriekš minēto likumsakarību izpēti ir svarīga arī, plānojot zemes izmantošanu un apsaimniekošanu. Tas viss kopumā nosaka pētījumu aktualitāti.

Latvijā līdz šim lielākajā daļā augsnes pētījumu tikusi izmantota nacionālā augsnes klasifikācija, kas rada zināmas problēmas augsnes informācijas apmaiņā Eiropā un pasaulē (Karklins, 2005). Tāpēc promocijas darbā, pētot savstarpējās izplatības likumsakarības starp augsni un ģeoloģiskajiem nogulumiem, reljefu un meža tipiem, tika lietota starptautiskā *FAO WRB (The international Food and Agricultural Organization soil classification system World Reference Base for Soil Resources)* augšņu klasifikācija.

Promocijas darbā liela uzmanība pievērsta augsnes attīstībai pēc lauksaimniecības zemju apmežošanās. Minētais jautājums ir aktuāls Latvijā, jo, līdzīgi kā daudzviet Eiropā, liela daļa meža zemju ir veidojušās uz bijušajām lauksaimniecības zemēm. No 1925. līdz 2007. gadam meža platības Latvijā ir palielinājušās no 25 līdz 54,7% (Kronītis, 1991; Vasiļevskis, 2007; Latvijas statistika, 2010). Aprēķini liecina, ka dabiski apmežojušos lauksaimniecības zemju platība Latvijā ir 298 tūkst. ha, turklāt visintensīvāk dabiskā apmežošanās notikusi valsts austrumu daļā (Lazdiņš, 2011). Tātad Latvijā meža zemju vecums ir dažāds, un tas atšķirīgi ietekmē augsnes ģenēzi (augšņu veidošanās procesus), morfoloģisko pazīmju un fizikālo un ķīmisko īpašību mainību.

Promocijas darba mērķis

Noskaidrot augšņu un to īpašību mainības likumsakarības Latvijas meža ekosistēmās un to ietekmējošos vides faktorus.

Promocijas darba uzdevumi

1. Apkopot zinātnisko literatūru par augšņu veidošanos, daudzveidību un tās ietekmējošajiem faktoriem meža ekosistēmās.
2. Izmantojot starptautiski akceptētas metodes, noskaidrot
 - 2.1. meža augšņu telpisko izplatību ietekmējošos vides faktorus;
 - 2.2. meža augšņu fizikālo un ķīmisko īpašību telpisko mainību atkarībā no ģeoloģiskajiem nogulumiem un meža tipiem.
3. Noskaidrot lauksaimniecības zemju apmežošanās ietekmi uz augšņu morfoloģiju un augšņu fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām glacigēnos nogulumos.

Darba novitāte

Promocijas darbā izpētīta nozīmīgāko vides faktoru (ģeoloģisko nogulumu, meža tipu) ietekme uz meža augšņu telpisko izplatību, ģenēzi un īpašībām. Iepriekš minētās izpētes rezultātus var uzskatīt par novitāti kā Latvijā, tā arī visā ledāja nogulumu akumulācijas apgabalā Eiropā un Ziemeļamerikā.

Starpdisciplināras zinātniskās izpētes rezultātā, izmantojot vides zinātnes, ģeogrāfijas, ģeoloģijas, bioloģijas un ķīmijas pētījumu metodes, iegūta informācija par Latvijas meža augšņu īpašību izmaiņām pēc lauksaimniecības zemju apmežošanas.

Pirmo reizi Latvijā ir novērtēta ne tikai meža augšņu daudzveidība atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai (IUSS Working Group, 2007; Kārkliņš, 2008) un Latvijas mērogā izpētīti to ietekmējošie faktori, bet arī iegūta informācija par augsnes ģenēzes, morfoloģijas un fizikālo un ķīmisko īpašību izmaiņām dažāda vecuma meža zemēs, kur parastās egles (*Picea abies* (L.) H. Karst.), āra bērza (*Betula pendula* Roth.), baltalkšņa (*Alnus incana* (L.) Moench) un parastās apses (*Populus tremula* L.) kokaudzes ir veidojušās uz bijušajām lauksaimniecības zemēm.

Praktiskā izmantošana

Promocijas darba izstrādes laikā iegūtos rezultātus, atziņas, ieteikumus, izstrādātos risinājumus un rekomendācijas iespējams izmantot vides pētījumos, samazinot pētījumu izmaksas, augšņu kartēšanā, to metožu uzlabošanā, atvieglojot augšņu ģeogrāfiskās

izplatības robežu noteikšanu un dziļrakumu profilu izvēli, kā arī vides procesu un augsnes tipu un īpašību (t. sk. granulometriskā un ķīmiskā sastāva) mainības modelēšanā un prognozēšanā, piemēram, oglekļa bilances aprēķināšanā, kā arī kartēšanā. Iegūtie rezultāti ir būtiski teritoriju racionālā un ilgtspējīgā apsaimniekošanā.

Iegūtā informācija un rezultāti ir nozīmīgi arī starptautiskā mērogā saistībā ar ainavu ekoloģiskās sukcesijas gaitas ietekmes izpēti uz augsnes ģenēzi, morfoloģiju un īpašībām, apmežojot lauksaimniecībā izmantojamās zemes.

Iegūtie rezultāti ir svarīgi tādu problēmu risināšanā, kas saistītas ar augšņu informācijas harmonizāciju starptautiskā mērogā. Viens no augšņu kartēšanas risinājumiem ir optimizēt Latvijas teritorijas augšņu kartēšanu mērogā 1 : 50 000, jo šajā mērogā ir pieejama pietiekoši detalizēta informācija par Latvijas dabas resursiem, ģeoloģiskajiem nogulumiem, vides problēmām, meža tipiemi un koku sugu sastāvu.

Promocijas darbā iegūtie rezultāti nākotnē uzlabos un atvieglos augšņu kartēšanu reģionālā mērogā (1 : 50 000) boreāli nemorālā reģionā, kur augsnes ir veidojušās uz vēlā Vislas apledojuma (glaciālajiem) nogulumiem, ko sedz postglaciālie eolie, jūras, ezeru, aluviālie un purvu nogulumi.

Pētījuma rezultātu aprobācija

Promocijas darba rezultāti ir apspriesti un atspoguļoti 10 zinātniskās publikācijās, 2 starptautiskos zinātniskos kongresos, 12 starptautiskās zinātniskās konferencēs, 13 Latvijas mēroga konferencēs.

Promocijas darba pētījumu rezultāti ir izmantoti akadēmiskos bakalaura un maģistra studijuursos Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē, kā arī vadot piecus bakalaura darbus un sniedzot konsultācijas divu maģistra darbu izstrādāšanā.

Publicētie pētījuma rezultāti

Zinātniskās publikācijas

1. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O. 2012. Influence of Environmental Factors on Forest Soil Spatial Distribution and Diversity in Latvia. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 61(1):48-64. (Žurnāls ir indeksēts šādās zinātnisko izdevumu datubāzēs: *Science Citation Index Expanded™ (Web of Science)*; *GEOBASE database (Elsevier/Geo Abstracts)*; *SCOPUS® database*; *EBSCO Publishing database (Academic Search Premier)*.)
2. **Kasparinskis R.**, Kukuļs I., Nikodemus O., Rolavs N., Tabors G. 2011. Lauksaimniecības zemju apmežošanās ilgtermiņa ietekme uz augsnes morfoloģiju un īpašībām. *Mežzinātne*. 24(57):17-40. (Rakstu krājums ir indeksēts šādās zinātnisko izdevumu datubāzēs: *CAB Abstracts*; *AGRIS*.)
3. Grantina L., Seile E., Kenigšvalde K., **Kasparinskis R.**, Tabors G., Nikolajeva V., Jungerius P., Muiznieks I. 2011. The Influence of the Land Use on Abundance and Diversity of Soil Fungi: Comparison of Conventional and Molecular Methods of Analysis. *Environmental and Experimental Biology*. 9:9-21. (Žurnāls ir indeksēts šādā zinātnisko izdevumu datubāzē: *Thomson Reuters*.)

4. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Kukuls I., Tabors G., Freimane A. 2011. Changes of Soil Properties and Processes Due to Afforestation of Agricultural Lands. *Book of proceedings „100 years Bulgarian Soil science, International Conference”*. 1:241-245.
5. Kukuļš I., **Kasparinskis R.**, Ansone L. 2010. Lauksaimniecības zemju apmežošanas ietekme uz augsnes humusu. *Latvijas Universitātes Raksti*, 767. sēj. *Zemes un vides zinātnes*. 93.-103. (Rakstu krājums ir indeksēts zinātnisko izdevumu datubāzē – *AGRIS*.)
6. Grantina L., Seile E., Malinovskis U., Tabors G., **Kasparinskis R.**, Nikolajeva V., Muiznieks I. 2009. Particular Characteristics of Soil Microbial Communities in Forest Stands Infected with *Heterobasidion Parviporum* and *Armillaria* spp. In: *Microorganisms in Industry and Environment From Scientific and Industrial Research to Consumer Products. Proceedings of BioMicroWorld2009 – III International Conference on Environmental, Industrial and Applied Microbiology*. World Scientific Publishing Company Pte Ltd. 86-91.
7. Nikodemus O., **Kasparinskis R.**, Tabors G. 2008. Soil Mapping in Latvia According to the International FAO WRB 2006 Soil Classification. Problems and Solutions. *Vagos*. 80(33):68-74. Lithuanian University of Agriculture. (Žurnāls ir indeksēts zinātnisko izdevumu datubāzē – *CAB Abstracts*.)
8. Nikodemus O., **Kasparinskis R.**, Kukuls I. 2012. Influence of Afforestation on Soil Genesis, Morphology and Properties in Glacial Till Deposits. *Archives of Agronomy and Soil Science*. In press. (Žurnāls ir indeksēts šādās zinātnisko izdevumu datubāzēs: *EBSCO*; *SCOPUS*.)
9. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinska Z., **Kasparinskis R.**, Brumelis G. 2012. Patterns of Afforestation on Abandoned Agriculture Land in Latvia. *Agroforestry systems*. In press. (Žurnāls ir indeksēts šādās zinātnisko izdevumu datubāzēs: *Science Citation Index Expanded (SciSearch)*; *SCOPUS*; *EBSCO*; *Elsevier Biobase*; *Geobase*; *VINITI - Russian Academy of Science*.)
10. Grantina L., Bondare G., Janberga A., Tabors G., **Kasparinskis R.**, Nikolajeva V., Muiznieks I. In press. Monitoring Seasonal Changes of Northern Temperate Zone Spruce Forest Soil Microbial Populations. *Estonian Journal of Ecology*. (Žurnāls ir indeksēts šādās zinātnisko izdevumu datubāzēs: *Cambridge Scientific Abstracts*; *IBIDS database*; *ISI® database*; *Scopus® database*; *Academic Search Premier (EBSCO Publishing database)*; *WilsonWeb*.)

Ziņojumi starptautiskajos kongresos un konferencēs, publicētās tēzes

1. Kukuls I., **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Ansone L. 2011. The accumulation of the organic matter and the change of humification process following afforestation of abandoned farmland. In: *Program and Abstracts Book “Soil Science in a Changing World”*. Wageningen, The Netherlands, 273.
2. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Kukuls I., Tabors G., Freimane A. 2011. Changes of Soil Properties and Processes Due to Afforestation of Agricultural Lands. In: *Book of proceedings „100 years Bulgarian Soil science, International Conference”*. Sofia, Bulgaria, 1:241-245.

3. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O. 2010. Environmental factors influence on forest soil spatial distribution and diversity in Latvia. In: *Book of Abstracts of geoENV 2010 // 8th International conference on Geostatistics for Environmental Applications*. Ghent University, Belgium, 188-191.
4. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinska Z., **Kasparinskis R.** 2010. Impacts of natural reforestation of abandoned agricultural land on structure of rural landscape in Latvia. In: *PECSRL the Permanent European Conference for the Study of the Rural Landscape, 24th Session – Living in Landscapes: Knowledge, Practice, Imagination*. University of Latvia, Faculty of Geography and Earth Sciences, 119.
5. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinska Z., **Kasparinskis R.** 2010. Paterns of afforestation process in abandoned agriculture land in Latvia. In: *Forest landscape and global change: New frontiers in Management, Conservation and restoration. Book of abstracts of the IUFRO Landscape Ecology Working Group International Conference, September 21-27*. Braganca, Portugal, 78.
6. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O. 2009. Soil degradation risk assessment opportunities in Latvia. In: *Proceedings of the International conference of Soil degradation, February 17-19*. Riga, Latvia, 98.
7. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Zelchs V. 2008. Influence of geological factors on soil forming and morphology in coastal Lowland, Latvia. In: *Proceedings of 33rd International Geological Congress, August 6-14*. Oslo, Norway.
8. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Zelchs V. 2008. Role of Geological Factors on Soil Forming and Morphology in Western Latvia Coastal Plains. In: *Book of Abstracts „EuroSoil 2008”*. Blum W. E. H., Gerzabek M. H., Vodrazka M. (Eds.) Europe Soil Congress, August 25-29, Vienna, Austria, 116.
9. Grantina L., Malinovskis U., Tabors G., **Kasparinskis R.**, Nikolajeva V., Muiznieks I. 2009. Particular Characteristics of Soil Microbial Communities in Forest Stands Infected with *Heterobasidion Parviporum* and *Armillaria* spp. In: *Program and Abstracts of the SNS PATHCAR Nordic/Baltic Forest Pathology Meeting, 28th of September – 2nd of October 2009*. Palanga, Lithuania, 44.
10. Nikodemus O., **Kasparinskis R.**, Tabors G. 2008. Soil Mapping in Latvia According to the International FAO WRB 2006 Soil Classification. Problems and Solutions. The international scientific conference to commemorate 50 years jubilee of Lithuanian Soils Science Society at the Lithuanian Academy of Sciences „Soil in sustainable environment”. September 24-26, Lithuanian University of Agriculture.
11. **Kasparinskis R.** 2007. Land degradation assessment challanges and Latvian perspective. International workshop on Land Degradation Risk Assessment and Criteria Development methodologies in Europe. 21.-22. septembris. Nīca, Latvija.
12. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O. 2007. Svētes pagasta augšņu kartēšanas rezultāti atbilstoši starptautiskajai FAO WRB 2006 augšņu klasifikācijai. Pasaules vides fonda, VSIA „Vides projekti” un ANO Attīstības programmas īstenotā projekta „Latvijas kapacitātes nodrošināšana ANO konvencijas „Par cīņu pret pārtuksnešošanas/zemes degradāciju” ieviešanai” seminārs „Augšņu informācijas izmantošana teritoriālpārveidībā”, 24. oktobris, Svēte, Latvija.

Ziņojumi konferencēs Latvijā un publicētās tēzes

1. **Kasparinskis R.**, Kukuļs I., Nikodemus O. 2011. Lauksaimniecības zemju aizaugšanas ietekme uz augšņu ģenēzi, morfoloģiju un īpašībām. Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku 3. kongress un letonikas 4. kongress. Sekcija „Vides kvalitāte Latvijā: esošais stāvoklis, izaicinājumi, risinājumi”, 50.-51.
2. Eglīte K., **Kasparinskis R.** 2011. Slāpekļa balance nitrātu jutīgajās teritorijās Latvijā. Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku 3. kongress un letonikas 4. kongress. Sekcija „Vides kvalitāte Latvijā: esošais stāvoklis, izaicinājumi, risinājumi”, 37.-38.
3. **Kasparinskis R.**, Kukuļs I., Nikodemus O., Tabors G., Liepiņš I. 2011. Augsnes morfoloģisko un fizikāli ķīmisko īpašību maiņa lauksaimniecības zemju apmežošanās rezultātā. Ģeogrāfija, ģeologija, vides zinātne. Referātu tēzes. Rīga: LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes 69. zinātniskā konference, 114.-115.
4. Rolavs N., Freimane A., **Kasparinskis R.** 2011. Podzolēšanās procesa raksturojums Zvārdes apkārtnē. Ģeogrāfija, ģeologija, vides zinātne. Referātu tēzes. Rīga: LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes 69. zinātniskā konference, 207.-209.
5. Kukuļs I., **Kasparinskis R.**, Ansone L. 2011. Lauksaimniecības zemju apmežošanas ietekme uz augšņu humusu. Ģeogrāfija, ģeologija, vides zinātne. Referātu tēzes. Rīga: LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes 69. zinātniskā konference, 136.
6. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Tabors G., Liepiņš I. 2010. Podzolēšanās procesa attīstība mežu augsnēs. Ģeogrāfija, ģeologija, vides zinātne. Referātu tēzes. Rīga: LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes 68. zinātniskā konference, 113.-114.
7. Zadiņa M., **Kasparinskis R.** 2010. Augsnes granulometriskā sastāva ietekme uz lauksaimniecības zemju augšņu virskārtas struktūragregātu stabilitāti. Ģeogrāfija, ģeologija, vides zinātne. Referātu tēzes. Rīga: LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes 68. zinātniskā konference, 254.-255.
8. Eglīte K., Stalīdžāns D., **Kasparinskis R.**, Timbare R. 2010. Augsnes granulometriskā sastāva nozīme nitrātu dinamikā nitrātu jutīgajās teritorijās Latvijā. Ģeogrāfija, ģeologija, vides zinātne. Referātu tēzes. Rīga: LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes 68. zinātniskā konference, 73.
9. Bondare G., Grantiņa L., Tabors G., **Kasparinskis R.**, Nikolajeva V., Muižnieks I. 2010. Augšņu mikroorganismu populāciju sezonālas izmaiņas. Referātu tēzes. Rīga: LU Bioloģijas fakultātes 68. zinātniskā konference.
10. **Kasparinskis R.**, Tabors G., Nikodemus O., Stalīdžāns D. 2009. Augšņu veidošanās un morfoloģija Piejūras zemienē. Ģeogrāfija, ģeologija, vides zinātne. Referātu tēzes. Rīga: LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes 67. zinātniskā konference, 66.-68.
11. Zadiņa M., **Kasparinskis R.**, Liepiņš I. 2009. Lauksaimniecībā izmantojamo augšņu struktūragregātu stabilitātes noteikšanas metodikas aprobācija Svētes pagastā. Ģeogrāfija, ģeologija, vides zinātne. Referātu tēzes. Rīga: LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes 67. zinātniskā konference, 153.-154.

12. Liepiņš I., **Kasparinskis R.**, Tabors G. 2007. Meža augšņu izpētes rezultāti Kurzemes mežu ekosistēmās 2006. gadā. Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne. Referātu tēzes. Rīga: LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes 65. zinātniskā konference, 235.-237.
13. **Kasparinskis R.** 2005. Ekoloģisko procesu telpiskās izpausmes Rīgas pilsētas dabas teritorijās. Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne. Referātu tēzes. Rīga: LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes 63. zinātniskā konference, 178.-179.

Autora ieguldījums

Promocijas darba autors lauka darbu apstākļos ir piedalījies vairāk nekā 80 augsnes parauglaukumu aprakstīšanā, nosakot novietojumu reljefā, ģeoloģisko nogulumu ģenētisko izcelsmi un sastāvu, mežaudzē dominējošās koku sugas, to vecumu un meža tipu; aprakstījis dziļrakumu profilus atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai; veicis fotofiksāciju un ievācis paraugus no augsnes ģenētiskajiem horizontiem; piedalījies šādu projektu īstenošanā, kas saistīti ar promocijas darba izstrādāšanu:

- LR Zemkopības ministrijas meža attīstības fonda, meža monitoringa *ICP Forest*, pētnieciskās programmas *Forest Focus* un Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” vadītais projekts „Meža augšņu inventarizācija un mežu bioloģiskās daudzveidības novērtēšana *BioSoil*”;
- ANO Attīstības programmas un Pasaules Vides fonda projekts „Latvijas kapacitātes nodrošināšana ANO konvencijas „Par cīņu pret pārtuksnešošanu/zemes degradāciju” ieviešanai” un LR Zemkopības ministrijas meža attīstības fonda un Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” vadītais izpētes projekts „Mežsaimniecības pielāgošana klimata izmaiņām”;
- Latvijas Zinātnes padomes grants „Lauksaimniecībā izmantojamo zemju apmežošanas ainavekoloģisks vērtējums (09.1118)”;
- Latvijas Zinātnes padomes grants „Ģeogrāfisko un ģeoloģisko procesu un faktoru ietekme uz Latvijas dabas apstākļiem un sabiedrību (09.1568)”.

Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes augšņu laboratorijā promocijas darba autors ir organizējis 208 augsnes paraugu sagatavošanu un piedalījies to (žāvēšanā līdz gaissausam stāvoklim, sijāšanā) turpmāko fizikālo (augšnes granulometriskā sastāva noteikšanā) un ķīmisko analīžu (pH_{KCl} ; apmaiņas elementu (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+}) 0,1M BaCl_2 šķīduma izvilkumā; nesilikātu jeb „brīvo” vai „amorfo” Al, Fe, Mn savienojumu 0,2M skābā amonija oksalāta šķīdumā) noteikšanā atbilstoši *USDA (The United States Department of Agriculture)* (2004) un *FSCC (Forest Soil Co-Ordinating Centre)* (2006) metodēm, izmantojot atomabsorbcijas spektrometru.

Promocijas darba autors ir statistiski analizējis iegūtos datus, kā arī interpretējis rezultātus.



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Pateicības

Promocijas darbs izstrādāts ar Latvijas Zinātnes padomes grantu „Lauksaimniecībā izmantojamo zemju apmežošanas ainavekoloģisks vērtējums (Nr. 09.1118)”, „Ģeogrāfisko un ģeoloģisko procesu un faktoru ietekme uz Latvijas dabas apstākļiem un sabiedrību (Nr. 09.1568)” un Eiropas Sociālā fonda projekta „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē” Nr. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004 finansiālu atbalstu.

Būtiska nozīme promocijas darba izstrādāšanā bija LR Zemkopības ministrijas Meža attīstības fonda, meža monitoringa *ICP Forest*, pētnieciskās programmas *Forest Focus* un Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” vadītajam projektam „Meža augšņu inventarizācija un mežu bioloģiskās daudzveidības novērtēšana *BioSoil*”, kā arī ANO Attīstības programmas un Pasaules Vides fonda projektam „Latvijas kapacitātes nodrošināšana ANO konvencijas „Par cīņu pret pārtuksnešošanu/zemes degradāciju” ieviešanai” un LR Zemkopības ministrijas Meža attīstības fonda un Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” vadītajam izpētes projektam „Mežsaimniecības pielāgošana klimata izmaiņām”.

Promocijas darba autors izsaka pateicību darba vadītājiem – Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes prof. *Dr. geogr.* Oļģertam Nikodemus, prof. *Dr. habil. chem.* Mārim Kļaviņam, kā arī visiem, kas palīdzējuši darba rezultātu sasniegšanā, īpaši *Dr. silv.* Andim Lazdiņam, prof. *Dr. geol.* Vitālijam Zelčam, prof. *Dr. biol.* Viesturam Melecim, prof. *Dr. biol.* Guntim Brūmelim, *Dr. biol.* Guntim Taboram, *Dr. biol.* Didzim Elfertam, *Dr. chem.* Lindai Eglītei, *Mg. biol.* Leldei Grantiņai, *Mg. sc. mundi amb.* Ingum Liepiņam, *Mg. geogr.* Mārtiņam Lūkinam, laborantam Konstantīnam Viliguram, doktorantam Imantam Kukuļam, kā arī Didzim Stalīdzānam, Naurim Rolavam, Juriņam Rakutam un Valtam Vīndedzim.

Īpaši sirsnīgu pateicību par atbalstu promocijas darba autors izsaka savai ģimenei – Ainaī, Zanei, Laurai Līvai un Ralfam Rūdolfam Kasparinskiem, kā arī Agrim Briedim.

1. MEŽA AUGŠŅU PĒTĪJUMI LATVIJĀ

Kartējot visu lauksaimniecības zemju augsnes mērogā 1 : 10 000, Latvijā ir uzkrāta relatīvi bagāta informācija par lauksaimniecības zemju augsnēm (Boruks u. c., 1967; Boruks u. c., 2001; Boruks u. c., 2002; Karklins, 2005). Latvijas 11 administratīvajiem rajoniem ir sastādītas lauksaimniecības un meža zemju augšņu kartes mērogā 1 : 100 000. Kartēšana veikta, balstoties uz ģenētisko augšņu klasifikāciju. Uz minētās augšņu informācijas bāzes 20. gs. vidū ir izstrādāta Latvijas augsnes karte mērogā 1 : 400 000 (Малдав, 1977; Mežals, 1980; Karklins, 2005), kuru joprojām izmanto dažādos augsnes resursu un vides pārskaatos. Tomēr šī kartogrāfiskā informācija ir relatīvi neprecīza, jo trūkst precīzu datu par meža zemju augsnēm (Nikodemus et al., 2008).

Latvijas meža augšņu izpētē nozīmīgāko ieguldījumu devis Henrihs Mežals (1980), kas pētījis brūnaugšņu veidošanos un Latvijas meža augšņu humusu. Atsevišķi pētījumi par skābaržu mežaudžu augsnēm ir Ādolfam Krauklim un Anitai Zariņai (2002), par atsevišķu augu sabiedrību izplatību – Mārim Laiviņam (1977, 1984, 1998, 2000, 2001). No 1990. līdz 1992. gadam reģionālā meža monitoringa laikā M. Laiviņa (Laiviņš u. c., 1993) vadībā ir izpētītas arī meža augšņu ķīmiskās īpašības. Ir zināms, ka veģetācijas mainība ir atkarīga no abiotiskajiem faktoriem, tomēr, kā secinājusi Solvita Rūsiņa (2007), informācija šajā ziņā Latvijā ir nepilnīga.

Nozīmīgu informāciju par augsnes ģeoķīmisko sastāvu sniedz Latvijas ģeoķīmiskās kartēšanas rezultāti mērogā 1 : 500 000 (Gilucis, Segliņš, 2003). Kartēšana veikta no 1999. līdz 2002. gadam. Pamatojoties uz šiem datiem, Aivars Gilucis (2007) ir pētījis mikroelementu un makroelementu satura un izplatības likumsakarības Latvijas augšņu virsējos horizontos, arī meža augsnēs. Minētajos pētījumos tika konstatēts, ka tradicionālā „ģenētiskā” augšņu klasifikācija reģionālos ģeoķīmiskos pētījumos nav piemērojama augšņu ģeoķīmisko analīžu datu sadalīšanai izlasēs un to turpmākajiem novērtējumiem. Ķīmiskie elementi ar identisku uzvedību hipergēnos apstākļos Aivara Giluča promocijas darbā ir grupēti 3 asociācijās: pelitofilā, fitofilā un karbonātiskā asociācijā.

Kartējot vides piesārņojumu, vairākos pētījumos par izpētes objektu izmantota augsne, kā arī pētīts smago metālu saturs meža augšņu horizontos (Brumelis, Nikodemus, 1995; Brūmelis et al., 2002). Integrālā monitoringa ietvaros ir veikti pētījumi par ķīmisko vielu plūsmām Latvijas priežu mežu ekosistēmās, arī augsnēs (Daņiļeviča u. c., 2004; Terauda, Nikodemus, 2006, 2007; Tērauda, 2008).

Apkopojot visus šos pētījumus, var secināt, ka kopumā Latvijā trūkst korektas informācijas par meža augsnēm, to izplatības likumsakarībām, veidošanās procesiem un īpašībām. Augšņu izpētē galvenokārt izmantota Latvijas augšņu klasifikācija, kas nedod iespēju nodrošināt starptautiskās institūcijas ar tām saprotamu informāciju (Karklins, 2002, 2005). Turklāt Latvijā tiek lietotas Padomju Savienībā standartizētās metodes un interpretācijas, kas būtiski atšķiras no starptautiski izmantotajām metodēm. Atsevišķus pētījumus saistībā ar datu transformāciju no Latvijā iepriekš izmantotajām uz starptautiski rekomendētajām metodēm, lietojot analītisko metožu savstarpēju salīdzināšanu, ir veicis Aldis Kārklīšs (Karklins, 1997; 2005).

Visaptveroša meža augšņu izpēte, kā arī aprakstīšana atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai Latvijā uzsākta 2005. gadā Eiropas pirmā līmeņa meža monitoringa, ES programmas Nr. 2152/2003 par mežu un vides mijiedarbības monitoringu Kopienā (*Forest Focus*) un starptautiskās sadarbības programmas (*ICP Forests*) starptautiskā projekta „Meža augšņu inventarizācija un bioloģiskās daudzveidības novērtēšana” (*BioSoil*) ietvaros. Minētajā projektā piedalījās arī šī promocijas darba autors. Pamatojoties uz monitoringa rezultātiem, ir sagatavoti vairāki pārskati (Zadeika, 2005, 2006; Lazdiņš, 2008) un atsevišķas publikācijas par Latvijas mežu augsniem un to īpašībām (Bārdule u. c., 2009; Kasparinskis, Nikodemus, 2012).

Izmantojot starptautisko *FAO WRB* augšņu klasifikāciju, 2007. gadā ir aprakstītas un kartētas Svētes un Nīcas pagasta augsnes (Nikodemus et al., 2008). Tas ir viens no pirmajiem mēģinājumiem Latvijā lietot iepriekš minēto klasifikāciju lauksaimniecības un meža zemju augšņu kartēšanā.

Latvijā līdz šim nozīmīgākos pētījumus par lauksaimniecības zemju apmežošanu speciālos stādījumos un to ietekmējošām augšņu īpašībām ir veikuši LVMI „Silava” zinātnieki (Kāposts, 2006; Daugaviete, 2004; Daugaviete u. c., 2008; Bārdule, Lazdiņš, 2010). M. Daugaviete (2004) ir noskaidrojusi arī Latvijā izplatītākajām koku sugām vispiemērotākos augšanas apstākļus, veicot lauksaimniecības zemju apmežošanu.

Savukārt L. Grantiņas vadībā (Grantina et al., 2009, 2011) ir veikti atsevišķi pētījumi, lietojot konvencionālās un molekulārās mikrobioloģijas metodes, lai noskaidrotu augsnes mikroorganismu sabiedrību mainību saistībā ar lauksaimniecības zemju aizaugšanu.

2. MEŽA AUGŠŅU TELPISKĀ MAINĪBA UN TO IETEKMĒJOŠIE FAKTORI

2.1. Literatūras apskats

Augsnes zinātne (angl. – *pedology*) tradicionāli ir saistīta ar augsnes morfoloģijas, veidošanās faktoru un procesu klasifikācijas, ģeogrāfijas un kartēšanas pētījumu virzieniem (Sokolov, 1996; Buol et al., 2003; Bockheim et al., 2005). Augsnes segas telpiskās likumsakarības saistībā ar vides apstākļu ietekmi uz augsnes veidošanos, augsnes procesiem un evolūciju pasaulē ir plaši pētīta (Fridland, 1976; Ibañez et al., 1995, 1998; McBratney, 1992, 1998; Phillips, Marion, 2005). Augsnes veidošanās faktoru izpēte ir cieši saistīta ar ģenētiskās augšņu klasifikācijas attīstību (Buol et al., 1973), kurā augsnes tiek grupētas jeb iedalītas pēc to ģenēzes, t. i., pēc augšņu veidošanās apstākļiem un procesiem, kā arī pēc augšņu svarīgākajām ārējām (morfoloģiskajām) un iekšējām (fizikālajām, ķīmiskajām) īpašībām (Skujāns, 1970).

Mūsdienās augsnes zinātnē populārākā pieeja ir balstīta uz izstrādāto augsnes veidošanās faktoru vienādojumu (aprakstīts turpmāk), kas ir augsnes veidošanās faktoru kompleksu likumsakarību vienkāršošanas līdzeklis matemātiskā izteiksmē un dod iespēju augsnes īpašību interpretāciju nodrošināt attiecībā uz tās ģenētisko vēsturi. Tomēr no pragmatiskā skatpunkta šis vienādojums nekad līdz šim nav atrisināts (Crowther, 1953; Kline, 1973; Phillips, 1998; Bockheim et al., 2005).

19. gs. otrajā pusē V. V. Dokučajevs pirmais atzina, ka augsne veidojas klimata, dzīvo organismu, reljefa un cilmieža mijiedarbības rezultātā (Bockheim et al., 2005). Dokučajevs un vēlāk Gļinka (Glinka, 1914), Džofijs (Joffe, 1936) un Marbut (Marbut, 1927) uzskatīja, ka augsnes evolūcijas faktori ir cēloņi, kas nosaka augsnes veidošanos un īpašības. Savukārt Džofijs (Joffe, 1936) paziņoja, ka augsnes veidošanās faktori veido apstākļu kopumu, kas nosaka augsnes veidošanās procesus. Šajā sakarā Šovs (Shaw, 1932) izstrādāja pirmo augsnes veidošanās faktoru vienādojumu:

$$S = M (C + V) T + D,$$

kur M = cilmiezis, C = klimats, V = dzīvie organismi, T = laiks, D = augsnes izmaiņas erozijas un uzkrāšanās procesu rezultātā.

Tomēr vēlāk Dženijs (Jenny, 1941) paziņoja, ka augsnes veidošanās cēloņu interpretācija ir atšķirīga, jo katru augsnes īpašību var aplūkot gan kā cēloni, gan kā ietekmi. Atbilstoši viņa viedoklim augsnes veidošanās faktori nav cēloņi, bet ir neatkarīgie mainīgie.

Līdz ar to viņš precizēja Šova (Shaw, 1932) augsnes veidošanās faktoru vienādojumu, izsakot to šādi:

$$S = f(k, o, r, c, t)$$

un saglabājot apgalvojumu, ka augsnes un augsnes īpašības ir funkcija, ko veido šādi ietekmējošie faktori: klimats (k), dzīvie organismi (o), reljefs vai topogrāfija (r), cilmiezis (c), laiks (t).

Iepriekš minētais vienādojums apraksta augsni kā dabisku ķermeni, kura telpisko izplatību nosaka dažādu vides faktoru sistēmiska mijiedarbība (Hudson, 1992; Bockheim et al., 2005).

Mūsdienās Makbretnijs (McBratney et al., 2003) papildināja šo modeli, izveidojot jaunu septiņu faktoru *scorpan* modeli, kuru iespējams izmantot digitālā augsnes kartēšanā. Jaunais modelis ietvēra arī papildu faktorus: *s* – augsnes īpašību (atribūtu) prognozi un *n* – ģeogrāfiskā novietojuma prognozi (Gray et al., 2009). Lai gan mūsdienās ģeostatistikas izmantošana, kas balstās uz augsni ietekmējošo faktoru analīzi, atvieglo augsnes kartēšanu, tomēr pastāv uzskati (Moore et al., 1993; Gessler et al., 1995; Hengl et al., 2004), ka vēl joprojām ir nepilnīgas zināšanas par vides parametru un augsnes telpiskās mainības funkcionālajām likumsakarībām.

Promocijas darbā, pētot meža augšņu un to īpašību izplatības likumsakarības, no iepriekš minētajiem faktoriem lielākā uzmanība veltīta cilmiezim (ģeoloģiskajiem nogulumiem), veģetācijai (meža tipiēm), reljefam, kā arī cilvēku saimnieciskajai darbībai (lauksaimniecības zemju apmežošanai). Minēto faktoru ietekmes izpētei tik liela uzmanība pievērsta tāpēc, ka tie Latvijas meža ekosistēmās reģionālā un lokālā mērogā ir vismainīgākie.

Vides faktori nosaka augsnes veidošanās procesus un augsnes ģenēzi, arī organisko vielu akumulāciju, podzolēšanos, lesivēšanos, glejošanos un citus procesus. Dažādos vides apstākļos minēto procesu mijiedarbība ir ļoti atšķirīga un nosaka arī augšņu daudzveidību (Phillips, Marion, 2004; Targulian, Krasilnikov, 2007). Vides faktoru loma augšņu veidošanā (Jenny, 1941; Bockheim, 2005), procesu attīstībā (Targulian, Krasilnikov, 2007), augsnes segas telpiskajā izplatībā ir plaši un ilgstoši pētīta (Ibañez et al., 1995, 1998; McBratney, 1992, 1998; Burrough, 1993; Saldaña, Ibáñez, 2007; Phillips, Marion, 2005). Tajā pašā laikā zinātnieki atzinuši (McBratney et al., 2003), ka ir relatīvi maz pētījumu, kuros skaidri ir aprakstīta augsnes veidošanās faktoru mijiedarbība, turklāt šī informācija ir kvalitatīva, tādēļ ir nepieciešama kvantitatīva informācija par pastāvošajām likumsakarībām starp augsni un vides faktoriem, lai uzlabotu augsnes datu iegūšanu un augsnes modelēšanu (Gray et al., 2009). Ir grūti korekti prognozēt augsnes īpašības katrā ainavas punktā, jo šo īpašību telpiskā daudzveidība ir ļoti liela (Burrough et al., 1997).

FAO WRB augšņu pamatgrupu izplatības modelēšanu un kartēšanu no ainavu mēroga līdz globālam mērogam var uzlabot, papildinot zināšanas par noteiktām likumsakarībām starp šīm augšņu pamatgrupām un augsnes veidošanās faktoriem (Gray et al., 2011). Tādējādi tiks veikts ieguldījums ne tikai tradicionālajās augsnes izpētes programmās, bet arī kvantitatīvās augsnes modelēšanas un kartēšanas programmās, kuras kļūst arvien nozīmīgākas augsnes datu iegūšanā pasaulē (Grunwald, 2005; Hartemink, 2006; Lagacherie et al., 2007).

Tāpēc, neraugoties uz daudziem pētījumiem iepriekš minētajā jomā, šādi pētījumi būs aktuāli arī nākotnē, jo vēl arvien ir nepilnīgas zināšanas par vides apstākļu ietekmi uz augsnes morfoloģiju, ģenēzi, procesiem un to telpiskajām izpausmēm. Augsnes veidošanās faktoru nepietiekama izpēte rada problēmas, kas saistītas ar likumsakarību noskaidrošanu un rezultātu interpretāciju atbilstoši dažādām augšņu klasifikācijām. Tāpēc augsnes zinātnieki joprojām nav vienojušies par dažādu vides apstākļu ietekmi uz augsnes telpisko izplatību reģionālā un lokālā aspektā (Gray et al., 2009). Tā kā informācija par

augsnēm ir nepietiekama, pastāv augsnes veidošanās procesu pārvērtēšanas risks, kā arī problēmas, kas saistītas ar augšņu klasifikāciju lietošanu un savstarpēju salīdzināšanu (Reintam, 2002).

Lai analizētu augsnes segas telpisko izplatību, zinātnieki pēdējās desmitgadēs ir pievērsušies augšņu daudzveidības tālīzpētei un mērījumiem (McBratney et al., 2003; Minasny et al., 2010; Dobos et al., 2006), kā arī augsnes klasifikācijas vienību telpiskās variācijas prognozēšanai. Tāpēc pasaulē ir aktuāli pētījumi par augšņu informācijas iegūšanu, izmantojot netiešos vides datus (piemēram, reljefu, augsnes cilmiezi, zemes lietojumveidu) (McBratney et al., 2003; Grimm, Behrens, 2010; Gray et al., 2011). Lai noskaidrotu likumsakarības starp augsnēm, to īpašībām un vides faktoriem, mūsdienās pētījumos datu statistiskajā apstrādē tiek lietotas dažādas metodes. Svarīgi ir noskaidrot likumsakarības starp augsnes īpašībām un vides faktoriem, kā arī noteikt augšņu „mainīgos” un salīdzināt noteikumus (likumus), ko nosaka modelis ar ekspertu zināšanām balstītiem likumiem (McKenzie, Ryan, 1999; Qi, Zhu, 2003; Bui, 2004; Bui et al., 2006). Pētījumos par augsnes telpisko prognozēšanu tiek izmantotas arī kvantitatīvās likumsakarības starp augsnes atkarīgajiem mainīgajiem un augsnes veidojošajiem faktoriem, lai prognozētu augsnes ainavas vienības neapsekotās teritorijās (Moran, Bui, 2002; Grinand et al., 2008).

Neraugoties uz augsnes datu pieaugošo pieprasījumu, relatīvi augstas izmaksas un laiks, kas nepieciešami tradicionālajā augšņu kartēšanā, nozīmē, ka bieži tie nav pieejami, tādēļ augsnes digitālas kartēšanas tehnoloģijas (McBratney et al., 2003; Dobos et al. 2006) ir attīstījušās, lai nodrošinātu relatīvi ātras un pēc iespējas precīzākas metodes telpisko augsnes mainīgo prognozēšanā (Grimm, Behrens, 2010).

Augšņu daudzveidību definē kā augsnes īpašību vai augsnes klašu variāciju teritorijā (McBratney, Minasny, 2007). Augsnes segas daudzveidību nosaka ilgstošas izmaiņas gan horizontālā, gan vertikālā dimensijā (Guo et al., 2003). Augsnēm raksturīga augsta telpiskā daudzveidība dažādos mērogos – sākot ar lokālo un beidzot ar globālo mērogu (Garten et al., 2007). Daudzveidība mežos var būt krietni lielāka nekā līdźīgu teritoriju nemeža zemju augšņu daudzveidība (Phillips, Marion, 2005). Vairākos pētījumos (Heuvelink, Webster, 2001; Ettema, Wardle, 2002) ir dažādi viedokļi par augšņu īpašību un procesu, kā arī augsnes biotas telpiskajām variācijām. Šajos pētījumos atzīts, ka dabiskās variācijas augstā pakāpe dažreiz traucē vai kavē precīzu augsnes mērījumu kvantificēšanu un mērogošanu atbilstoši izšķirtspējai, kas nepieciešama dažādām analīzēm. Tādēļ nepieciešams izprast augšņu telpisko daudzveidību un izplatību, lai varētu precīzāk kvantificēt augsnes īpašības un procesus visos mērogos (Garten et al., 2007).

Viena no nozīmīgākajām ainavu ekoloģijas izpētes problēmām ir izprast, kā augsnes īpašības un procesus var attiecināt no telpiski sīka mēroga (augsnis parauglaukums) uz telpiski plašu mērogu (ekosistēma) (Garten et al., 2007).

Viens no visvairāk pētītajiem jautājumiem ir augsnes īpašību maiņa saistībā ar ainavas raksturu. Tradicionāli augsnes telpisko dažādību attēlo kartēs, galvenokārt pamatojoties uz augsnes – teritorijas ģeomorfoloģijas – savstarpējām likumsakarībām (Hudson, 1992). Šādā aspektā mūsdienās plaši tiek izmantota digitāla augsnes kartēšana, kas ir atkarīga no statistiskajām likumsakarībām starp mērītajiem augsnes novērojumiem un dažādajiem vides apstākļu ietekmējošiem faktoriem parauglaukumos. Līdz ar to, ja

pastāv kļūda parauglaukumā, tas var radīt kļūdu likumsakarībās (Cressie, Kornak, 2003). Citas kļūdas likumsakarību noskaidrošanā rodas vides apstākļu telpisko datu neskaidrības dēļ. Tos lieto augsnes digitālajā kartēšanā, un tiem bieži ir dažāda izcelsme, vecums, mērogs, izšķirtspēja, dažādas kartēšanas shēmas un/vai apkopojuma līmenis (Heuvelink, 1998; Bishop et al. 2006; Behrens et al., 2008; Grimm, Behrens, 2010).

Tādējādi augšņu un vides faktoru likumsakarību pētījumi ļauj uzlabot zināšanas par augšņu izplatību (Bui, Moran 2001). Iekļaujot šīs likumsakarības augsnes kartēšanā un modelēšanā, tiek uzlabota telpiskā prognozēšana, kā arī datu ekstrapolācija no references (reprezentatīvām) teritorijām uz plašāku teritoriju (Lagacherie et al., 2001).

Augšņu secība un to izkārtojums dabā ir atkarīgs no dažādiem vides faktoriem, piemēram, augsnes cilmieža sastāva, reljefa un veģetācijas tipiem (Sommer, Schlichting, 1997), turklāt konstatēts, ka augsnes segas dažādību nosaka arī augsnes mitruma apstākļi (Dowling et al., 2003; Blyth et al., 2004), kā arī augu sabiedrību telpiskā izplatība (Chapin et al., 1987; Fu et al., 2004).

Pamatojoties uz augsnes īpašībām, iespējams prognozēt veģetācijas telpisko izplatību (Palo, 2005). Igaunijas zinātnieki (Uuemaa et al., 2008) ir secinājuši, ka augsne ir informatīvākais un integratīvākais ainavas faktors, kas var tikt izmantots ainavas vienību analīzē. Jau sen ir atzīts (Odum, 1959), ka veģetācijas telpisko vienību prognozēšana ir viena no primārajām ekoloģijas problēmām (Dale, 2000; Palo et al., 2005). Piemēram, augsnes veidošanā biotiskā faktora lomu ir grūti novērtēt, jo vienlaikus mijiedarbojas dažādi faktori, piemēram, klimats, veģetācija un augsne. Turklāt veģetācija ir nozīmīgs mainīgais faktors, kas rada augsnes īpašību atšķirības. Tādēļ, pētot veģetācijas un augsnes savstarpējās likumsakarības, uzmanība jāvelta diviem aspektiem: veģetācijai un augsnes morfoloģijai, kā arī veģetācijai un augsnes ķīmiskajām īpašībām (Birkeland, 1984). Igaunijā A. Palo (Palo, 2005), noskaidrojot likumsakarības starp veģetācijas un augsnes tipiem un īpašībām, konstatēja, ka ar barības vielām bagātām augsnēm ir mazāk ciešu saistību ar veģetācijas tipiem, turpretim augsnēm ar zemu barības vielu saturu šādas sakarības ir labāk izteiktas (Palo et al., 2005). Augsne ir būtisks faktors, kas ietekmē veģetāciju, turklāt augsne parāda augu sabiedrību attīstības potenciālu (Kõlli, Ellermäe, 2001) un ir konstatēts, ka cilvēku saimnieciskā darbība ietekmē augsni (Palo et al., 2004). Tādējādi, mainoties augsnes īpašībām, var tikt traucēta potenciālās veģetācijas seguma prognozēšana.

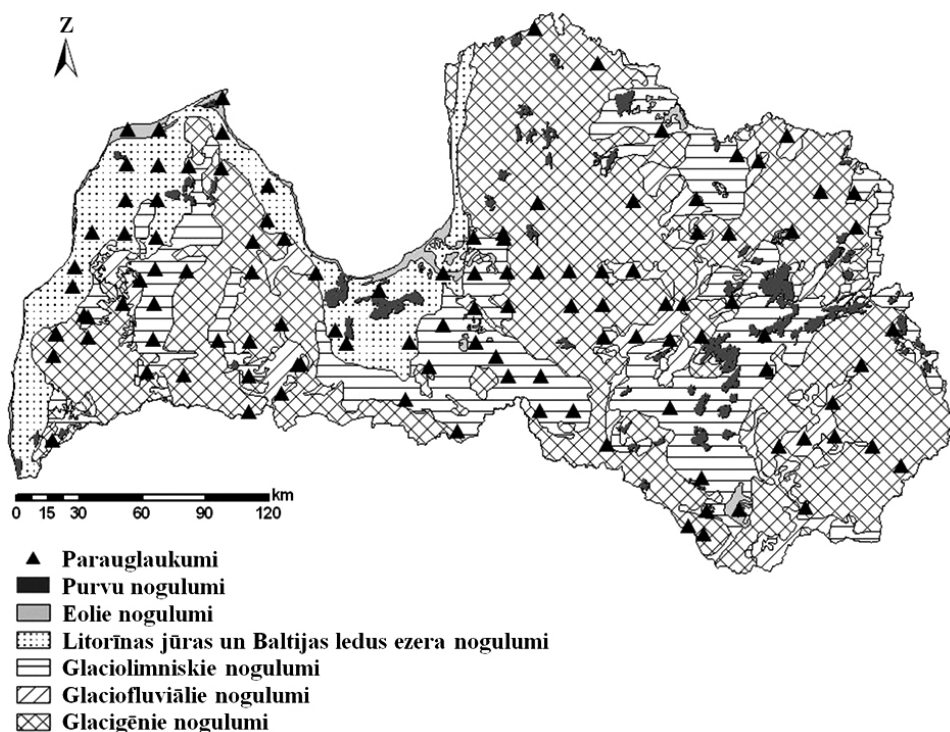
Šo iemeslu dēļ likumsakarību noskaidrošana starp augsnes veidošanās faktoriem un mainīgajiem augšņu kartēs ir viena no lielākajām augšņu kartēšanas problēmām, tāpēc daudzveidīgo augsnes resursu ģeogrāfiskās izplatības izpratnes iegūšanai ir nepieciešami daudzi pētījumi smalkākos mērogos (Guo et al., 2003; Caniego et al., 2006). Līdz ar to var secināt, ka augšņu pētījumos ir ļoti svarīgi izmantot pēc iespējas reprezentatīvāku teritoriju atkarībā no mēroga.

Lai gan pētījumi par faktoriem, kas nosaka augšņu telpisko izplatību, pasaulē ir veikti dažādos reģionos, tomēr nav statistiski drošas informācijas par augšņu telpiskās izplatības kontūrām boreāli nemorālajā reģionā, kur augsnes ir veidojušās galvenokārt uz vēlā Vislas leduslaikmeta glaciālajiem nogulumiem, kas ir pārveidoti līdz dažādi pakāpei ar postglaciālajiem eolajiem, jūras, ezeru un fluviālajiem procesiem, un kur aptuveni 10% no teritorijas sedz purvi (Kärkliņš u. c., 2009; Zelčs et al., 2011).

2.2. Pētījumu materiāli un metodes

2.2.1. Augšņu telpiskās izplatības izpēte

Laika posmā no 2006. līdz 2010. gadam Eiropas pirmā līmeņa meža monitoringa, ES programmas Nr. 2152/2003 par mežu un vides mijiedarbības monitoringu (*Forest Focus*) un starptautiskās sadarbības programmas (*ICP Forests*) starptautiskā projekta „Meža augšņu inventarizācija un bioloģiskās daudzveidības novērtēšana” (*BioSoil*) ietvaros tika veikti pētījumi 95 parauglaukumos. Papildus minētajiem parauglaukumiem promocijas darba izstrādāšanas vajadzībām monitoringā relatīvi vāji reprezentētajos reģionos 2011. gadā tika ierīkoti un aprakstīti 18 parauglaukumi (2.1. att.).



2.1. attēls. Pētījuma parauglaukumu vietas un kvartāra nogulumi Latvijā

(pēc Latvijas ģeoloģiskās kartes, 1981)

Figure 2.1. Location of sampling sites within this study and the Quaternary deposits in Latvia (after the Geological Map of Latvia, 1981)

Parauglaukumos tika izrakts augsnes dziļrakums un aprakstīta augsne atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai (IUSS Working Group, 2007). Augšņu paraugi tika ievākti no augsnes profila ģenētiskajiem horizontiem, un to fizikālās un ķīmiskās analīzes tika veiktas atbilstoši *ICP* meža monitoringa metodēm (FSCC, 2006).

Lauka darbos tika noteikts arī parauglaukumu novietojums reljefā, augsnes cilmiezis – kvartāra un pirmskvartāra nogulumieži, mežaudzē dominējošās koku sugas un meža tipi. Zemes segums tika noteikts, izmantojot *CORINE Land Cover 2005* datus, kas raksturo zemes virsmas (bio)fizikālo segu mērogā 1 : 100 000. Atbilstoši *CORINE Land Cover 2005* datiem meži Latvijā iedalāmi 3 klasēs: lapu koku meži (11 parauglaukumos), skuju koku meži (47 parauglaukumos) un jauktie meži (55 parauglaukumos). Kvartāra nogulumu tika analizēti, ņemot vērā to granulometrisko sastāvu un sastopamību reljefā. Mežu tipi tika noteikti atbilstoši Latvijas meža ekosistēmu klasifikācijai (Bušs, 1981).

2.2.2. Datu statistiskā apstrāde

Datu statistiskās analīzes, lietojot ģeneralizētos lineāros modeļus (GLM), izmantojot *R 2.11.1* programmu, tika veiktas, lai noskaidrotu likumsakarības (būtiskuma līmenis = $p < 0,05$) starp augšņu un augsnes cilmiežu novietojumu reljefā, zemes lietojumu, augsnes granulometrisko sastāvu, meža tipu un dominējošo koku sugu telpisko izplatību. Šajā pētījumā izmantoti Dž. A. Nelderā un R. V. N. Vederbērnā (Nelder, Wedderburn, 1972) izveidotie un P. Makalegā un Dž. A. Nelderā (McCullagh, Nelder, 1989) pilnveidotie ģeneralizētie lineārie modeļi. Tie dod iespēju apstrādāt arī citus datu tipus, kam nav raksturīgs normāls sadalījums (Quinn, Keough, 2002) un kas nerada problēmas, kuras saistītas ar terminu „nenormāla kļūda”. Tāpēc ir iespējams izvairīties no situācijām, kad datu transformācijas ir neefektīvas un rada kļūdas (piemēram, kad atkarīgais mainīgais ir kategorisks).

Katrs faktora tips tika definēts attiecīgi sastopamībai (0 – nav konstatēts, 1 – ir konstatēts) parauglaukumos, lai noskaidrotu kvartāra nogulumu tipa, novietojuma reljefā, zemes lietojuma, meža tipa un koku sugu ietekmi uz augšņu telpisko izplatību.

Akaika (angl. – *Akaike's*) informācijas kritērijs (*AIC*) parāda ģeneralizētu informācijas kritēriju katram atbilstošajam parametriskajam modelim (Sakamoto et al., 1986). Zemākās *AIC* vērtības labāk apraksta atbilstošos ģeneralizētos lineāros modeļus.

P-vērtību korekcijas tika veiktas, izmantojot Homela (angl. – *Hommel's*) līdzsvarošanas metodi (Hommel, 1988). Šī metode ir korekta gadījumos, kad hipotēžu testi ir neatkarīgi vai pozitīvi asociēti (Sarkar, 1998; Sarkar, Chang, 1997). Līdzsvarošanas metodes ietver Bonferoni (*Bonferroni*) korekciju, kurā p-vērtības tiek multiplicētas (pavairotas) ar salīdzinājumu skaitu.

Datu statistiskajā apstrādē un p-vērtību līdzsvarošanā netika iekļauti mainīgie (augšņu pamatgrupas – *Phaeozem*, *Umbrisol*; ģeoloģiskie nogulumi – Litorīnas jūras, aluviālie; meža tipi – slapjais mētrājs (*Vaccinioso-sphagnosa*), purvājs (*Sphagnosa*), niedrājs (*Caricoso-phragmitosa*), mētru ārenis (*Vacciniosa mel.*) un mētru kūdrēnis (*Vacciniosa turf. mel.*)), kas sastopami mazāk nekā 3 parauglaukumos.

Mežaudzē dominējošo koku sugu, kā arī granulometriskā sastāva kvantitatīvās vērtības (1–100%) tika izmantotas tādu telpisko likumsakarību noskaidrošanā, kādas pastāv starp augsnēm un kvartāra nogulumiem.

2.3. Rezultāti

Latvija atrodas Eiropas ziemeļaustrumu daļā, boreāli nemorālajā starpzonā, kur sastopami gan skuju koku, gan lapu koku meži (Hytteborn et al., 2005). Meža platība ir 3,53 miljoni hektāru jeb 54,7% no Latvijas teritorijas (Latvijas statistika, 2010). Mežaudzi veido galvenokārt trīs dominējošās koku sugas – parastā priede (*Pinus sylvestris* L.), parastā egļe (*Picea abies* (L.) H. Karst.) un āra bērzs (*Betula pendula* Roth.) –, kas izplatītas aptuveni 74% no meža platības.

Klimats Latvijā ir mērens, ar ikgadējo vidējo nokrišņu daudzumu 700–800 mm, no kuriem aptuveni 500 mm izkrīt karstajā periodā. Ikgadējā vidējā gaisa temperatūra ir +5,5 °C. Augnes ir veidojušās galvenokārt uz vēlā Vislas apledošanas (glaciālajiem) nogulumiem (mālsmilts, vidējs māls, smilšmāls, māls, grants, smilts), ko pārsedz dažādi postglaciālie eolie, jūras, ezeru, aluviālie un purvu nogulumi (Zelčs et al., 2011).

Pētījumi tika veikti 17 meža tipos (Latvijai raksturīgi 23 meža tipi). No pētītajiem 113 parauglaukumiem sausieņu meža tipos atradās 67 parauglaukumi, slapjainu meža tipos – 11, āreņos – 19, purvainos – 4, bet kūdreņos – 12 parauglaukumi.

Latvijā meži ir izplatīti uz ļoti daudzveidīgām augsnēm, kas veidojušās uz dažādiem – galvenokārt neviendabīgiem – kvartāra nogulumiem, dažviet arī vāji konsolidētiem pirmskvartāra terīgēnajiem vai cietajiem karbonātu nogulumiežiem (2.1. tab.). Kopumā augsnes ar augstu telpisko daudzveidību sedz relatīvi plašu teritoriju un ir veidojušās uz glaciģēnajiem (31 parauglaukums), glaciolimniskajiem (27 parauglaukumi), glaciofluviālajiem (20 parauglaukumi) un Baltijas jūras dažādu attīstības stadiju – Litorīnas jūras, Baltijas ledus ezera – nogulumiem (11 parauglaukumi) (2.1. tab.). Augšņu daudzveidības aspektā relatīvi viendabīgi ir eolo kāpu nogulumi (7 parauglaukumi), kur sastopamas *Arenosol* (6 parauglaukumi) un *Podzol* (1 parauglaukums) augšņu pamatgrupas (2.1. tab.). *Histosol* augsnes izplatītas uz organogēnajiem nogulumiem (16 parauglaukumi).

Augstākā augšņu daudzveidība ir raksturīga glaciģēnajiem un glaciolimniskajiem nogulumiem, kur konstatēta augstākā augsnes granulometriskā sastāva daudzveidība (smilts, mālsmilts, smilšmāls, putekļi, māls). Glaciģēnajos nogulumos bieži sastopamas šādas augšņu pamatgrupas: *Luvisol* (10 paraugl.), *Albeluvisol* (7 paraugl.), *Cambisol* (6 paraugl.) un *Stagnosol* (5 paraugl.), savukārt glaciolimniskajos nogulumos – *Planosol* (6 paraugl.), *Stagnosol* (5 paraugl.), *Gleysol* (5 paraugl.) un *Luvisol* (4 paraugl.) (2.1. tab.).

Iegūto datu analīzē izmantojot ģeneralizētos lineāros modeļus (*GLM*), tika konstatēts (2.2. tab.), ka augšņu grupu izplatība ir cieši saistīta ar noteiktiem augsnes cilmiežiem. Būtiskas telpiskās likumsakarības ($p < 0,05$) pastāv starp Baltijas ledus ezera nogulumiem un *Podzol*; glaciofluviālajiem nogulumiem, eolajiem nogulumiem un *Arenosol*; organogēnajiem nogulumiem un *Histosol*; glaciģēnajiem nogulumiem un *Cambisol*, *Luvisol* un *Albeluvisol*. *Gleysol* un *Planosol* augsnes ir cieši saistītas ar glaciolimniskajiem nogulumiem. Turklāt *Stagnosol* telpiskā izplatība nav cieši saistīta ar noteiktu augsnes cilmieži, bet šīs augšņu pamatgrupa bieži sastopama uz glaciolimniskajiem un glaciģēnajiem nogulumiem, kur augsnes cilmieži veido relatīvi smags granulometriskais sastāvs.

2.1. tabula

Augšņu pamatgrupu (IUSS Working Group, 2007) sastopamība parauglaukumos dažādu kvartāra nogulumu teritorijās

Table 2.1.

Soil groups (IUSS Working Group WRB, 2007) in sampling sites within the areas of Quaternary deposits

Kvartāra nogulumu tipi (sastopamība parauglaukumos)	Augšņu pamatgrupas (sastopamība parauglaukumos)										
	<i>Histosol</i> (16)	<i>Gleysol</i> (8)	<i>Podzol</i> (9)	<i>Planosol</i> (10)	<i>Stagnosol</i> (12)	<i>Phaeozem</i> (2)	<i>Albeluvisol</i> (9)	<i>Luvisol</i> (14)	<i>Umbrisol</i> (2)	<i>Arenosol</i> (25)	<i>Cambisol</i> (6)
Eolās kāpas (7)	—	—	1	—	—	—	—	—	—	6	—
Litorīnas jūra (2)	—	—	1	—	1	—	—	—	—	—	—
Baltijas ledus ezers (9)	—	1	4	—	—	—	—	—	1	3	—
Aluviālie (1)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—
Glaciofluviālie (20)	—	—	2	3	1	—	1	—	1	12	—
Glaciolimniskie (27)	—	5	1	6	5	2	1	4	—	3	—
Glacigēnie (31)	—	2	—	1	5	—	7	10	—	—	6
Organogēnie (16)	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

2.2. tabula

Sakarības starp kvartāra nogulumiem un augšņu pamatgrupām (IUSS Working Group, 2007). Būtiskās sakarības (būtiskuma līmenis = $p < 0,05$) ir izceltas

Table 2.2.

Relationships between Quaternary deposits and soil groups (IUSS Working Group WRB, 2007). The significant relationships (the level of significance $p < 0.05$) are highlighted

Kvartāra nogulumu tipi (sastopamība parauglaukumos)		Augšņu pamatgrupas (sastopamība parauglaukumos)								
		<i>Histosol</i> (16)	<i>Gleysol</i> (8)	<i>Podzol</i> (8)	<i>Planosol</i> (10)	<i>Stagnosol</i> (11)	<i>Albeluvisol</i> (9)	<i>Luvisol</i> (14)	<i>Arenosol</i> (24)	<i>Cambisol</i> (6)
Eolie (7)	AIC	—	—	66	—	—	—	—	109	—
	p	—	—	0,71	—	—	—	—	0,006	—
Baltijas ledus ezera (8)	AIC	—	62	56	—	—	—	—	123	—
	p	—	0,87	0,002	—	—	—	—	0,40	—
Glaciofluviālie (19)	AIC	—	—	67	71	80	66	—	106	—
	p	—	—	0,71	0,29	0,38	0,59	—	0,0004	—
Glaciolimniskie (25)	AIC	—	56	66	65	78	66	88	121	—
	p	—	0,03	0,71	0,03	0,37	0,59	0,66	0,24	—
Glacigēnie (31)	AIC	—	62	—	70	78	56	75	—	34
	p	—	0,87	—	0,29	0,38	0,009	0,001	—	*
Organogēnie (16)	AIC	4	—	—	—	—	—	—	—	—
	p	*	—	—	—	—	—	—	—	—

* – augšņu pamatgrupas ir sastopamas noteiktos kvartāra nogulumos.

Detalizējot augšņu pamatgrupu un to priedēkļa modifikatoru likumsakarības ar parauglaukumiem dažādos ģeoloģiskajos nogulumos, tika konstatētas būtiskas likumsakarības ($p < 0,05$) daļai augšņu pamatgrupu un kvartāra nogulumu (2.3. tab.).

Albic Arenosol augsne ir bieži sastopama eolajās kāpās un glaciofluviālajos smilts un grants nogulumos (2.3. tab.). Šiem augsnes cilmiežiem raksturīga relatīvi zema katjonu apmaiņas kapacitāte ($KAK = 2,8\text{--}10,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), kas attīsta podzolēšanās procesu un līdz ar to arī *Albic* horizonta veidošanos.

Baltijas ledus ezera smiltāju līdzenumos, kur ir traucēta dabiskā drenāža, konstatētas būtiskas likumsakarības ($p < 0,05$) ar *Endogleyic Histic Podzol* (2.3. tab.). Šajos līdzenumos bieži ir sastopamas *Endogleyic Arenosol* augsnes.

Savukārt *Albic Podzol* augsnes nav saistītas ar noteiktiem augsnes cilmiežiem un ir sastopamas dažādās ģenēzes nogulumos, kur izplatīti smilšaini augsnes cilmieži. Turklāt *Calcic Endostagnic Endogleyic Cutanic Luvisol*, *Stagnic Cutanic Albeluvisol* un *Stagnic Cambisol* telpiskā izplatība ir cieši saistīta ar glaciģenajiem nogulumiem (2.3. tab.). Virsūdeņu filtrācija ir traucēta morēnās, kur apakškārtā raksturīgs relatīvi smags granulometriskais sastāvs (smilšmāls, puteklains smilšmāls, viegls māls un māls), veidojot *Stagnic* un *Gleyic* krāsu salikumu, kas morfoloģiski liecina par *Stagnic* un *Endogleyic* priedēkļa modifikatoriem.

Lai gan daudzas augšņu pamatgrupas (*Gleysol* un *Planosol*) ir cieši saistītas ar glaciolimniskiem nogulumiem, tomēr netika konstatētas būtiskas likumsakarības starp šiem nogulumiem un augšņu pamatgrupu priedēkļa modifikatoriem.

Pētījuma rezultāti parāda, ka augsnes granulometriskais sastāvs ir nozīmīgs faktors, kas nosaka meža augšņu telpisko daudzveidību vēlā Vislas apledošanas (glaciālajos) nogulumos un Holocēna eolajos, jūras, ezeru, aluviālajos nogulumos. *Arenosol* un *Podzol* sastopamība ir galvenokārt saistīta ar smilšainiem nogulumiem. Citu augšņu pamatgrupu sastopamība nav cieši saistīta ar noteiktu augsnes granulometriskā sastāva daļiņu frakciju dominanci. Citu augšņu pamatgrupu izplatība drīzāk ir atkarīga no tādiem faktoriem kā, piemēram, dažādi mitruma apstākļi. Granulometriskā sastāva ietekme uz augšņu pamatgrupu un meža tipu telpisko izplatību ir aprakstīta 3.3. un 3.4. nodaļā.

Sausienos atrodas 67 profili no pētītajiem 113 parauglaukumiem, kur izplatītākās augsnes ir *Arenosol* (24 paraugl.), *Luvisol* (13 paraugl.), *Albeluvisol* (9 paraugl.), *Podzol* (6 paraugl.), *Planosol* (5 paraugl.) un *Stagnosol* (4 paraugl.) (2.6. tab.), savukārt *Cambisol* (3 paraugl.), *Phaeozem* (2 paraugl.) un *Umbrisol* (1 paraugl.) augšņu pamatgrupas ir relatīvi maz izplatītas. 11 parauglaukumos tika konstatēti slapjaini, kur atbilstoši *FAO WRB* augšņu klasifikācijai konstatētas šādas augšņu pamatgrupas: *Stagnosol*, *Cambisol*, *Planosol*, *Gleysol*, *Podzol* un *Arenosol*. Āreņi (19 paraugl.) daudzos gadījumos ir sastopami tajās pašās augsnēs kā slapjaini, kur *Luvisol*, *Umbrisol* un *Cambisol* tika konstatētas attiecīgi 3 parauglaukumos. Turklāt 4 purvainu un 12 kūdreņu meža tipos ir sastopama *Histosol* augšņu pamatgrupa (2.4. tab.). Pamatojoties uz faktu, ka noteikšanas kritērijs (kūdras slāņa biezums) *Histosol* augšņu pamatgrupas un purvainu, kā arī kūdreņu izdalīšanai ir līdzīgs, šo meža tipu izplatība ir saistīta ar *Histosol*.

2.3. tabula
Sakarības starp kvartāra nogulumiem un augšņu pamatgrupām ar piedēkļa modifikatoriem (IUSS Working Group, 2007).
Būtiskās sakarības (būtiskuma līmenis = $p < 0,05$) ir izceltas

Table 2.3.

Relationships between Quaternary deposits and soil groups with prefix qualifiers (IUSS Working Group WRB, 2007).
The cases of significant relationships (the level of significance $p < 0.05$) are highlighted

Kvartāra nogulumu tipi (sastopamība parauglaukumos)		Augšņu pamatgrupas ar piedēkļa modifikatoriem (sastopamība parauglaukumos)																				
		Albic Arenosol (12)	Endogleyic Arenosol (5)	Ferralic Arenosol (6)	Hypoferralic Arenosol (5)	Rubic Arenosol (10)	Albic Podzol (6)	Histic Podzol (4)	Endogleyic Podzol (3)	Endogleyic Planosol (8)	Luvic Planosol (6)	Stagnic Cambisol (4)	Endogleyic Stagnosol (6)	Luvic Stagnosol (5)	Calcic Stagnosol (6)	Luvic Gleysol (6)	Stagnic Albelsol (4)	Cutanic Albelsol (7)	Endogleyic Luvisol (6)	Cutanic Luvisol (7)	Calcic Luvisol (7)	Endostagnic Luvisol (4)
Eolie (7)	AIC	69	—	56	44	69	56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	p	0,0004	—	0,37	0,44	0,24	0,54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Baltijas ledus ezera (8)	AIC	85	41	54	—	72	54	35	27	—	—	—	—	—	—	51	—	—	—	—	—	—
	p	0,97	0,06	0,15	—	0,80	0,24	0,002	*	—	—	—	—	—	—	0,70	—	—	—	—	—	—
Glaciofluvālie (19)	AIC	81	45	54	41	62	56	—	60	50	—	—	—	45	—	—	—	56	—	—	—	—
	p	0,18	0,93	0,20	0,09	0,004	0,54	—	0,32	0,57	—	—	—	0,93	—	—	—	0,76	—	—	—	—
Glaciotlīmniekie (25)	AIC	82	44	—	45	70	56	45	59	49	—	49	39	49	49	—	—	—	51	56	56	—
	p	0,34	0,78	—	0,83	0,60	0,54	0,83	0,24	0,42	—	0,19	0,78	0,19	0,42	—	—	—	0,67	0,76	0,76	—
Glaciģenie (31)	AIC	—	—	—	—	—	—	—	61	51	28	49	45	49	51	28	45	42	50	50	28	*
	p	—	—	—	—	—	—	—	0,36	0,57	*	0,19	0,93	0,19	0,70	*	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	*

* – augšņu pamatgrupas ar piedēkļa modifikatoriem ir sastopamas noteiktos kvartāra nogulumos.

**Meža tipu sastopamība parauglaukumos dažādās augšņu pamatgrupās
(IUSS Working Group, 2007)**

Table 2.4.

**Forest site types in sampling sites within different soil groups
(IUSS Working Group WRB, 2007)**

Augšņu pamatgrupas (sastopamība paraug- laukumos)	Meža tipi (sastopamība parauglaukumos)															
	Sausieņi						Slapjaini		Purvaini		Āreņi		Kūdreņi			
	Sils (3)	Mētrājs (6)	Lāns (6)	Damaksnis (23)	Vēris (14)	Gārša (15)	Slapjais mētrājs (2)	Slapjais vēris (9)	Purvājs (2)	Niedrājs (2)	Mētru ārenis (2)	Šaurlapju ārenis (13)	Platlapju ārenis (4)	Mētru kūdreis (1)	Šaurlapju kūdreis (8)	Platlapju kūdreis (3)
<i>Histosol</i> (16)	—	—	—	—	—	—	—	—	2	2	—	—	—	1	8	3
<i>Gleysol</i> (8)	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	4	3	—	—	—
<i>Podzol</i> (9)	—	1	—	4	1	—	1	—	—	—	1	1	—	—	—	—
<i>Planosol</i> (10)	—	—	—	3	2	—	—	2	—	—	—	3	—	—	—	—
<i>Stagnosol</i> (12)	—	—	—	—	—	4	—	4	—	—	—	3	1	—	—	—
<i>Phaeozem</i> (2)	—	—	—	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Albeluvisol</i> (9)	—	—	—	5	2	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Luvisol</i> (14)	—	—	—	4	2	7	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—
<i>Umbrisol</i> (2)	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
<i>Cambisol</i> (6)	—	—	—	1	2	—	—	2	—	—	—	1	—	—	—	—
<i>Arenosol</i> (25)	3	5	6	5	4	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Lai gan daudzi meža tipi ir saistīti ar daudzām augšņu pamatgrupām, tikai dažos gadījumos tika konstatētas būtiskas ($p < 0,05$) telpiskās likumsakarības starp augšņu pamatgrupām un meža tiptiem, piemēram, *Albeluvisol* un damaksni (*Hylocomiosa*); *Arenosol* un mētrāju (*Vacciniosa*); *Stagnosol* un slapjo vēri (*Myrtillosa-polytrichosa*); *Gleysol* un platlapju āreni (*Mercurialiosa mel.*) un šaurlapju āreni (*Myrtillosa mel.*); *Luvisol* un gāršu (*Aegopodiosa*) (2.5., 2.6. tab.).

Sils (*Cladinoso-callunosa*) un lāns (*Myrtillosa*) ir izplatīti uz *Arenosol* augsnēm pētītajos parauglaukumos. Slapjā vēra telpiskā izplatība ir tuva būtiskai sakarībai ar *Cambisol*, savukārt gāršai – ar *Stagnosol*. Tomēr būtiskas telpiskās likumsakarības netika konstatētas *Podzol* un *Planosol* augšņu pamatgrupām ar noteiktiem meža tiptiem, jo šīs augsnes ir relatīvi līdzīgi sastopamas gan sausieņos, gan slapjajos un āreņos.

2.5. tabula
Sakarības starp dabiskajiem, cilvēka maz pārveidotajiem meža tiptiem un augšņu pamatgrupām (IUSS Working Group, 2007).
Būtiskās sakarības (būtiskuma līmenis = $p < 0,05$) ir izceltas

Table 2.5.
Relationships between the forest site types on mineral and peat soil and soil groups (IUSS Working Group WRB, 2007).
The cases of significant relationships (the level of significance $p < 0.05$) are highlighted

Augšņu pamatgrupas (sastopamība parauglaukumos)	Meža tipi (sastopamība parauglaukumos)														
	Sausieni					Slapieni					Purvaini				
	Sils (3) AIC <i>p</i>	Mētrājs (6) AIC <i>p</i>	Lāns (6) AIC <i>p</i>	Damaksnis (23) AIC <i>p</i>	Vēris (14) AIC <i>p</i>	Gārsa (15) AIC <i>p</i>	Slapjais vēris (9) AIC <i>p</i>	Purvājs (2) AIC <i>p</i>	Niedrājs (2) AIC <i>p</i>						
<i>Histosol</i> (16)	—	—	—	—	—	—	—	16	*	16	*	16	*	—	—
<i>Gleysol</i> (8)	—	—	—	—	—	—	67	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Stagnosol</i> (12)	—	—	—	—	—	89	59	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Podzol</i> (9)	—	50	0,43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Cambisol</i> (6)	—	—	—	115	0,35	89	0,90	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Albeluvisol</i> (9)	—	—	—	118	0,96	87	0,78	—	—	63	0,09	—	—	—	—
<i>Luvisol</i> (14)	—	—	—	112	0,05	88	0,90	92	0,41	—	—	—	—	—	—
<i>Planosol</i> (10)	—	—	—	118	0,96	89	0,90	79	0,0004	—	—	—	—	—	—
<i>Arenosol</i> (25)	22	*	40	0,01	32	*	88	0,90	90	0,30	—	—	—	—	—

* – meža tipi ir sastopami noteiktās augšņu pamatgrupās.

Sakarības starp nosusinātiem meža tiptiem un augšņu pamatgrupām (IUSS Working Group, 2007).
Būtiskās sakarības (būtiskuma līmenis = $p < 0,05$) ir izceltas

2.6. tabula

Table 2.6.
Relationships between the forest site types on drained mineral and peat soil and soil groups (IUSS Working Group WRB, 2007).
The cases of significant relationships (the level of significance $p < 0.05$) are highlighted

Augšņu pamatgrupas (sastopamība parauglaukumos)	Meža tipi (sastopamība parauglaukumos)														
	Āreni					Kūdreņi					Platlapju kūdreņi (3)				
	Saurlapju ārenis (13) AIC <i>p</i>	Platlapju ārenis (4) AIC <i>p</i>	Mēru kūdreņis (1) AIC <i>p</i>	Saurlapju kūdreņis (8) AIC <i>p</i>											
<i>Histosol</i> (16)	—	—	11	—	—	26	*	19	*	—	—	—	—	—	—
<i>Gleysol</i> (8)	77	0,01	26	0,001	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Stagnosol</i> (12)	83	0,39	38	0,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Podzol</i> (9)	85	0,97	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Cambisol</i> (6)	85	0,97	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Albeluvisol</i> (9)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Luvisol</i> (14)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Planosol</i> (10)	82	0,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Arenosol</i> (25)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* – meža tipi ir sastopami noteiktās augšņu pamatgrupās.

Augšņu pamatgrupu priedēkļa modifikatoru lietošana datu analīzē ļāva precīzāk noteikt būtiskas likumsakarības starp noteiktu augšņu un meža tipu telpisko izplatību (2.7., 2.8. tab.). GLM statistiskās analīzes arī ļāva detalizēt būtiskās ($p < 0,05$) likumsakarības starp meža tipiem un *Arenosol* augšņu pamatgrupu.

Albic Arenosol ir galvenokārt izplatītas eolajās kāpās, kur sastopami mētrājs un lāns. *Endogleyic Arenosol* augsnes ir veidojušās galvenokārt Baltijas ledus ezera smiltāju līdzenumos, kur ir izplatīts lāns. *Hypoferralic Rubic Arenosol* augsnes ir veidojušās glaciofluvialajos nogulumos, kur sastopams mētrājs un lāns, turklāt konstatēta būtiska ($p < 0,05$) likumsakarība starp *Calcic Endostagnic Endogleyic Luvisol* un glacigēno nogulumu telpisko izplatību, kur sastopama gārša. Tajā pašā laikā neatkarīgi no ģeoloģiskajiem nogulumiem būtiskas sakarības tika konstatētas starp *Luvic Calcic Endogleyic Stagnosol* un gāršas telpisko izplatību. Tomēr šajā gadījumā netika konstatētas būtiskas likumsakarības starp šādiem sausieņu meža tipiem – vēri, damaksni un augšņu pamatgrupām ar priedēkļa modifikatoriem.

Cieša likumsakarība ($p < 0,05$) tika konstatēta starp *Cutanic Albeluvisol*, *Calcic Endogleyic Cutanic Luvisol* un glacigēnajiem nogulumiem, kam raksturīgas vāji drenētas minerālaugsnes ar relatīvi smagu granulometrisku sastāvu. *Endostagnic Luvisol*, *Stagnic Cambisol* un *Stagnic Albeluvisol* augsnes ir izplatītas uz glacigēnajiem nogulumiem.

Slapjais vēris ir izplatīts uz *Endogleyic Stagnosol*, *Luvic Gleysol*, *Endogleyic Planosol* un *Stagnic Cambisol*, tomēr šajā gadījumā netika konstatētas būtiskas likumsakarības starp slapjo vēri un noteiktiem augšņu pamatgrupu priedēkļa modifikatoriem.

Cieša likumsakarība ($p < 0,05$) tika konstatēta starp nosusinātas minerālaugsnes meža tipu – platlapju āreni un *Luvic Gleysol*. Tomēr šajā gadījumā netika konstatētas būtiskas sakarības starp šaurlapju āreni un noteiktiem augšņu pamatgrupu priedēkļa modifikatoriem.

Pētījuma rezultāti parādīja, ka galvenokārt meža tipu telpisko izplatību nenosaka augsnes pamatgrupas, izņemot sausieņu meža ekosistēmas, kur sils, mētrājs un lāns ir cieši saistīti ar *Arenosol*, damaksnis – ar *Albeluvisol*, gārša – ar *Luvisol* un visi pētītie purvainu un kūdreņu meža tipi – ar *Histosol*. Novērtējot likumsakarības starp augšņu pamatgrupu priedēkļa modifikatoriem un meža tipiem, daudzos gadījumos sausieņos pastāv būtiskas likumsakarības starp noteiktām augšņu pamatgrupām un mētrāju, lānu un gāršu (2.7. tab.).

Tika konstatēts, ka dominējošo koku sugu izplatība mežaudzē ir relatīvi mazāk saistāma ar noteiktām augšņu pamatgrupām salīdzinājumā ar meža tipu un augšņu pamatgrupu sastopamību. Dominējošās koku sugas mežaudzē Latvijas meža ekosistēmās – piemēram, priede, egle un bērzs – ir sastopamas uz visām pētītajām augšņu pamatgrupām (2.9. tab.). Parauglaukumos priedes ir izplatītas uz *Arenosol* (32,8% gadījumu), *Histosol* (16,4%) un *Podzol* (11,9%) augšņu pamatgrupām. Egļu kokaudzes ir galvenokārt izplatītas uz *Luvisol* (14,4%), *Histosol* (13,0%), *Stagnosol* (13,0%), *Planosol* (13,0%) un *Arenosol* (11,6%), bet bērzi – uz *Histosol* (18,8%), *Stagnosol* (15,0%) un *Planosol* (15,0%) augšņu pamatgrupām.

2.7. tabula
Sakarības starp sausieņu meža tiptiem un augšņu grupām ar piedēkļa modifikatoriem (IUSS Working Group, 2007).
Būtiskās sakarības (būtiskuma līmenis = $p < 0,05$) ir izceltas

Table 2.7.
Relationships between forest site types on dry mineral soil and soil groups with prefix qualifiers (IUSS Working Group WRB, 2007).
The cases of significant relationships (the level of significance $p < 0.05$) are highlighted

Augšņu pamatgrupas ar priedēkļa modifikatoriem (sastopamība parauglaukumos)	Sausieņi (sastopamība parauglaukumos)														
	Sils (3)		Mētrājs (6)		Lāns (6)		Damaksnis (23)		Vēris (14)		Gārša (15)				
	AIC	p	AIC	p	AIC	p	AIC	p	AIC	p	AIC	p			
<i>Albic Arenosol</i> (13)	18	0,99	45	0,02	45	0,009	115	0,97	88	0,99	—	—			
<i>Endogleyic Arenosol</i> (5)	—	—	49	0,30	45	0,009	115	0,97	—	—	—	—			
<i>Ferralic Arenosol</i> (7)	30	0,25	—	—	41	0,003	113	0,97	—	—	—	—			
<i>Hypoferralic Arenosol</i> (5)	—	—	38	0,001	45	0,009	—	—	—	—	—	—			
<i>Rubic Arenosol</i> (10)	30	0,34	43	0,01	43	0,009	115	0,97	89	0,99	—	—			
<i>Albic Podzol</i> (7)	—	—	50	0,30	—	—	113	0,97	89	0,99	—	—			
<i>Histic Podzol</i> (5)	—	—	—	—	—	—	114	0,97	—	—	—	—			
<i>Endogleyic Podzol</i> (4)	—	—	—	—	—	—	113	0,97	—	—	—	—			
<i>Endogleyic Planosol</i> (8)	—	—	—	—	—	—	114	0,97	89	0,99	—	—			
<i>Luvic Planosol</i> (6)	—	—	—	—	—	—	115	0,97	87	0,99	—	—			
<i>Stagnic Cambisol</i> (4)	—	—	—	—	—	—	—	—	85	0,44	—	—			
<i>Endogleyic Stagnosol</i> (6)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	87	0,04			
<i>Luvic Stagnosol</i> (5)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	86	0,03			
<i>Calcic Stagnosol</i> (6)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	83	0,006			
<i>Luvic Gleysol</i> (6)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
<i>Stagnic Albeluvisol</i> (4)	—	—	—	—	—	—	113	0,97	88	0,99	92	0,49			
<i>Cutanic Albeluvisol</i> (7)	—	—	—	—	—	—	113	0,97	87	0,99	91	0,46			
<i>Endogleyic Luvisol</i> (6)	—	—	—	—	—	—	115	0,97	89	0,99	83	0,006			
<i>Cutanic Luvisol</i> (7)	—	—	—	—	—	—	115	0,97	89	0,99	88	0,09			
<i>Calcic Luvisol</i> (7)	—	—	—	—	—	—	115	0,97	89	0,99	79	0,002			
<i>Endostagnic Luvisol</i> (4)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	75	*			

* – meža tipi ir sastopami noteiktās augšņu pamatgrupās ar priedēkļa modifikatoriem.

2.8. tabula

Sakarības starp slapjainu un āreņu meža tipiēm un augšņu pamatgrupām ar priedēkļa modifikatoriem (IUSS Working Group, 2007). Būtiskās sakarības (būtiskuma līmenis = $p < 0,05$) ir izceltas

Table 2.8.

Relationships between forest site types on wet and drained mineral soil and soil groups with prefix qualifiers (IUSS Working Group WRB, 2007). The cases of significant relationships (the level of significance $p < 0.05$) are highlighted

Augšņu pamatgrupas ar priedēkļa modifikatoriem (sastopamība parauglaukumos)	Slapjaini (sastopamība parauglaukumos)		Āreņi (sastopamība parauglaukumos)			
	Slapjais vērīs (9)		Šaurlapju ārenis (13)		Platlapju ārenis (4)	
	AIC	<i>p</i>	AIC	<i>p</i>	AIC	<i>p</i>
<i>Albic Arenosol</i> (13)	—	—	—	—	—	—
<i>Endogleyic Arenosol</i> (5)	—	—	—	—	—	—
<i>Ferralic Arenosol</i> (7)	—	—	—	—	—	—
<i>Hypoferralic Arenosol</i> (5)	—	—	—	—	—	—
<i>Rubic Arenosol</i> (10)	—	—	—	—	—	—
<i>Albic Podzol</i> (7)	—	—	89	0,87	—	—
<i>Histic Podzol</i> (5)	—	—	88	0,87	—	—
<i>Endogleyic Podzol</i> (4)	—	—	88	0,87	—	—
<i>Endogleyic Planosol</i> (8)	67	0,62	85	0,28	—	—
<i>Luvic Planosol</i> (6)	—	—	87	0,72	—	—
<i>Stagnic Cambisol</i> (4)	66	0,62	88	0,87	—	—
<i>Endogleyic Stagnosol</i> (6)	63	0,12	—	—	37	0,11
<i>Luvic Stagnosol</i> (5)	—	—	88	0,87	36	0,11
<i>Calcic Stagnosol</i> (6)	—	—	—	—	37	0,11
<i>Luvic Gleysol</i> (6)	66	0,62	83	0,08	32	0,01
<i>Stagnic Albeluvisol</i> (4)	—	—	—	—	—	—
<i>Cutanic Albeluvisol</i> (7)	—	—	—	—	—	—
<i>Endogleyic Luvisol</i> (6)	—	—	—	—	—	—
<i>Cutanic Luvisol</i> (7)	—	—	—	—	—	—
<i>Calcic Luvisol</i> (7)	—	—	—	—	—	—
<i>Endostagnic Luvisol</i> (4)	—	—	—	—	—	—

Latvijā ozolu kokaudzes galvenokārt ir sastopamas uz *Luvisol* (33,3%) augšņu pamatgrupas. Līdzīga telpiskā izplatība ir raksturīga apšu kokaudzēm. Citas koku sugas (osis, baltalksnis, melnalksnis, kļava) parauglaukumos bija ļoti vāji pārstāvētas. No iepriekš minētajām koku sugām tikai melnalksnis ir izplatīts uz noteiktas augšņu pamatgrupas – uz *Planosol*, savukārt citas koku sugas parauglaukumos mežaudzēs ir izplatītas uz dažādām augsnēm.

GLM analīze (2.10. tab.) parādīja, ka cieša likumsakarība ($p < 0,05$) pastāv starp priežu kokaudzēm un *Arenosol*, egļu kokaudzēm un *Cambisol* un ozolu kokaudzēm un *Luvisol* augšņu pamatgrupu.

2.9. tabula

Dominējošo koku sugu sastopamība parauglaukumos dažādās augšņu pamatgrupās
(IUSS Working Group, 2007)

Table 2.9.

Dominant tree species in sampling sites within different soil groups
(IUSS Working Group WRB, 2007)

Augšņu pamatgrupas	Koku sugas (sastopamība parauglaukumos)								
	Priede (67)	Egle (69)	Bērzs (53)	Meln- alksnis (4)	Balt- alksnis (6)	Osīs (6)	Ozols (21)	Apse (8)	Kļava (1)
<i>Histosol</i>	11	9	10	—	—	1	1	—	—
<i>Gleysol</i>	5	4	5	—	1	2	1	—	1
<i>Stagnosol</i>	2	9	8	—	1	1	4	2	—
<i>Podzol</i>	8	5	2	—	—	—	—	—	—
<i>Cambisol</i>	1	5	3	—	—	—	—	—	—
<i>Albeluvisol</i>	4	7	4	1	2	1	3	1	—
<i>Luvisol</i>	7	10	6	—	1	—	7	4	—
<i>Planosol</i>	5	9	8	3	—	—	—	—	—
<i>Arenosol</i>	22	8	4	—	—	—	4	1	—
<i>Umbrisol</i>	1	2	2	—	1	—	—	—	—
<i>Phaeozem</i>	1	1	1	—	—	1	1	—	—

2.10. tabula

Sakarības starp dominējošām koku sugām un augšņu pamatgrupām
(IUSS Working Group, 2007). Būtiskās sakarības (būtiskuma līmenis = $p < 0,05$) ir izceltas

Table 2.10.

Relationships between dominant tree species and soil groups
(IUSS Working Group WRB, 2007). The cases of significant relationships
(the level of significance $p < 0.05$) are highlighted

Augšņu pamatgrupas (sastopamība parauglaukumos)	Koku sugas (sastopamība parauglaukumos)							
	Priede (47)		Egle (21)		Bērzs (22)		Ozols (18)	
	AIC	<i>p</i>	AIC	<i>p</i>	AIC	<i>p</i>	AIC	<i>p</i>
<i>Histosol</i> (16)	159	0,97	113	0,98	117	0,88	105	0,90
<i>Gleysol</i> (8)	159	0,97	—	—	117	0,88	106	0,90
<i>Stagnosol</i> (12)	151	0,18	112	0,98	117	0,88	104	0,55
<i>Podzol</i> (9)	154	0,24	112	0,98	118	0,88	—	—
<i>Cambisol</i> (6)	157	0,80	105	0,05	118	0,88	—	—
<i>Albeluvisol</i> (9)	158	0,97	111	0,96	118	0,88	106	0,90
<i>Luvisol</i> (13)	155	0,40	112	0,98	—	—	97	0,006
<i>Planosol</i> (10)	153	0,25	110	0,48	113	0,16	—	—
<i>Arenosol</i> (25)	141	0,0004	—	—	111	0,28	106	0,90

Kopumā ģeneralizēto lineāro modeļu pieeja liecina, ka pastāv vājas būtiskas likumsakarības starp augšņu pamatgrupu telpisko izplatību un novietojumu reljefā un zemes lietojumu.

2.4. Diskusija

Kvartāra nogulumiem, to ģenētiskai izcelsmei un sastāvam (granulometriskajam un ķīmiskajam) ir liela nozīme augšņu pamatgrupu telpiskajā izplatībā. Latvijā augsnes ar smilšainu granulometrisko sastāvu ir galvenokārt saistītas ar Baltijas ledus ezera un Litorīnas jūras, eolajiem, glaciofluviālajiem un glaciolimniskajiem nogulumiem, kur *Podzol* un *Arenosol* ir dominējošās augšņu pamatgrupas. Kvartāra nogulumu vecumam arī ir būtiska nozīme šo augšņu telpiskajā izplatībā. Lai gan *Podzol* augšņu pamatgrupa Latvijas meža ekosistēmās ir izplatīta uz relatīvi dažādiem ģeoloģisko nogulumu tiptiem, tomēr tā ir ciešāk saistīta ar Baltijas ledus ezera nogulumiem, kas ir salīdzinoši senāki (13 500–10 000 gadi) (Gelumbauskaitē, 2009) nekā Litorīnas jūras nogulumi (8800–6600 gadi) (Raukas, 1997; Saarse et al., 2006; Reintam et al., 2008) un eolie nogulumi (Reintam et al., 2001).

Šis secinājums sakrīt ar to pētījumu rezultātiem, kuri veikti D. P. Fransmeijera un R. Proca vadībā (Fransmeier et al., 1963; Protz et al., 1984) un kuros konstatēts, ka pilnīga *Podzol* profila izveidošanās līdzīgos klimatiskajos apstākļos (kā Latvijā) norisinās aptuveni 3000–10 000 gadus – līdzīgi kā ASV, Zviedrijā, Somijā un Norvēģijā (Lundström et al., 2000; Sauer et al., 2008; Mokma et al., 2004). Latvijā *Arenosol* augšņu pamatgrupa dominē eolajos nogulumos, kas ir relatīvi jaunāki, – saskaņā ar pētnieku atzinumu (M. Nartišs et al., 2009) iekškontinentālo kāpu vecums ir aptuveni 6,4–11,9 tūkstoši gadu (pēc optiski stimulētās luminiscences metodes). *Arenosol* augšņu pamatgrupai raksturīga zema katjonu apmaiņas kapacitāte ($KAK = 2,8\text{--}5, 4 \text{ cmol kg}^{-1}$), kas ir priekšnoteikums relatīvi ātrai *Spodic* horizonta izveidei (IUSS Working Group, 2007).

Luvisol un *Albeluvisol* ir cieši saistītas ar brīvos kalcija karbonātus saturošajiem glaciģenajiem nogulumiem (2.2. tab.). Šīm augsnēm ir konstatēta māla iluviāla akumulācija uz augsnes makroagregātu vertikālās virsmas B horizontā un *Argic* diagnostiskā horizonta veidošanās. Būtiska atšķirība ir *Albeluvisol* mēļveidīguma veidošanās starp abām augšņu pamatgrupām, kas norisinās aptuveni 4600–6200 gadu laikā (Sauer et al., 2009). Daži pētnieki (Reintam, 2002; Kühn, 2003; Sauer et al., 2009) uzsver augsnes evolūcijas ilgumu. Latvijā šajā gadījumā augsnes veidošanās vecums nevar būt limitējošais faktors *Luvisol* un *Albeluvisol* augšņu evolūcijā, jo šo augšņu vecums ir lielāks par 10 000 gadiem visos parauglaukumos meža ekosistēmās, kas izplatītas uz glaciģenajiem nogulumiem. *Luvisol*, *Albeluvisol* augšņu un ģeoloģisko nogulumu izplatība ir cieši saistīta ar minerālaugsnes virskārtas granulometrisko sastāvu. Turklāt *Albeluvisol* salīdzinājumā ar *Luvisol* satur relatīvi vairāk smilts daļiņu un mazāk māla daļiņu (2.11. tab.). Augsnes virskārtas horizonti ir skābāki, un tiem raksturīga zemāka katjonu apmaiņas kapacitāte, tātad nozīmīgs faktors *Albeluvisol* augšņu pamatgrupas ģenēzē ir dekarbonizācijas process (Kühn, 2003; Sauer et al., 2008). Promocijas darba rezultāti apstiprina L. Reintema (Reintam, 2002) pētījuma rezultātus, ka Latvijā, līdzīgi kā Igaunijā, *Albeluvisol* augsnēm ir raksturīgs *Albic* horizonts, kas var veidoties lesivēšanās, podzolēšanās vai reduktmorfo procesu rezultātā. Latvijā meža ekosistēmās tikai atsevišķos gadījumos *Luvisol* augsnēm ir konstatēts vāji izteikts podzolēšanās process, kas morfoloģiski kļūst redzams kā E horizonts.

Būtiskas ($p < 0,05$) likumsakarības starp *Gleysol*, *Planosol* augšņu pamatgrupām un glaciolimnisko nogulumu telpisko izplatību nosaka augsnes granulometriskais sastāvs (2.1. tab.) un relatīvi līdzenais reljefs. Relatīvi smags augsnes granulometriskais sastāvs

(māls, smags putekļu māls, smags smilšmāls) ietekmē sezonālus reducēšanās apstākļus un *Stagnic* krāsu salikuma veidošanos augšnes profilā.

Litoloģiskā dažādība, kas ir kritērijs *Planosol* augšņu noteikšanā, ir raksturīga daudziem glaciolimniskajiem nogulumiem.

2.11. tabula

Albeluvisol un Luvisol augšņu pamatgrupu (IUSS Working Group WRB, 2007) minerālā virsējā slāņa granulometriskais sastāvs, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ un katjonu apmaiņas kapacitāte

Table 2.11.

Soil texture, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ and cation exchange capacity of the mineral topsoil layer of Albeluvisols and Luvisols (IUSS Working Group WRB, 2007)

Augšņu pamatgrupas (slāņu dziļums)	Māls (%)	Putekļi (%)	Smilts (%)	pH (CaCl_2)	Katjonu apmaiņas kapacitāte (cmol kg^{-1})
<i>Albeluvisol</i> (0–20 cm)	5,96	27,64	66,43	4,18	15,23
<i>Albeluvisol</i> (20–40 cm)	12,08	29,55	58,39	5,12	10,33
<i>Luvisol</i> (0–20 cm)	17,82	34,90	47,27	4,63	27,58
<i>Luvisol</i> (20–40 cm)	33,34	35,49	31,18	5,63	21,60

Nozīmīgs faktors veģetācijas izplatībā ir augsne – parametrs, kas nosaka potenciālo augu sabiedrību attīstību (Kölli, Ellermäe, 2001). Meža augšņu izpēte Latvijā parādīja, ka ne visos gadījumos pastāv telpiskās izplatības likumsakarības starp meža tipiēm un augšņu pamatgrupām, un to priedēkļa modifikatoriem atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai (2.5., 2.6., 2.7., 2.8. tab.). Meža ekosistēmas uz sausām minerālaugsnēm – sils, mētrājs, lāns – ir cieši saistītas ($p < 0,05$) ar barības vielām nabadzīgo *Arenosol* augšņu pamatgrupu; gāršas izplatībai ir būtiska ($p < 0,05$) sakarība ar barības vielām bagāto *Luvisol* augšņu pamatgrupu; savukārt mezotrofais damaksnis ir saistīts ar *Albeluvisol* augšņu pamatgrupas telpisko izplatību. Līdzīgas likumsakarības ir novērotas Igaunijā, kur augsnes granulometriskais sastāvs un augšņu auglība nosaka veģetācijas tipu izplatību un barības vielām nabadzīgās augsnes labi korelē ar veģetācijas tipiēm (Palo, 2005).

Mežu tipi uz slapjām kūdras augsnēm un nosusinātām kūdras augsnēm ir saistīti ar *Histosol*, jo, kā aprakstīts iepriekš, to noteikšanas kritēriji ir līdzīgi. Novērtējot augšņu telpisko izplatību saistībā ar mežaudžu sastāvu un meža tipiēm, ir jāņem vērā, ka mežaudzes ir dažādās sukcesijas stadijās, kas veidojušās atkarībā no izcirtumu un lauksaimniecības zemju aizaugšanas. Tāpēc ļoti dažāds kokaudžu sastāvs var attīstīties uz līdzīgām augsnēm (Ruskule et al., in press) un augstāka korelācija veidojas tikai tad, kad meža ekosistēmas sasniedz to klimaksa stadiju. Pagājušā gadsimta 60. gados norisinājās plaša homogēnu egļu monokultūru stādīšana (Laiviņš, 1998), kad, neņemot vērā augsnes granulometriskā sastāvu un teritorijas mitruma apstākļus, Latvijas meži tika atjaunoti ar egļu plantācijām. Šis fakts nav maznozīmīgs, jo ietekmē neatbilstību starp augsnēm un mežaudžu sastāvu Latvijā.

Novērtējot likumsakarības starp augšņu pamatgrupu priedēkļa modifikatoriem un meža tipiēm, daudzos gadījumos tika atrastas būtiskas ($p < 0,05$) likumsakarības starp sausieņu meža tipiēm – mētrāju, lānu un gāršu. To var izskaidrot ar faktu, ka augšņu pamatgrupu priedēkļa modifikatoru kompleksi tiek izmantoti noteiktu augšņu raksturošanā. Piemēram, lāns ir izplatīts uz šādām raksturīgām augsnēm: *Hypoferralic Ferralic Endogleyic Rubic Albic Arenosol*, un gārša daudzos gadījumos ir sastopama uz *Luvic Calcic Endogleyic Stagnosol* un *Calcic Endostagnic Endogleyic Luvisol*.

Mezotrofā damakšņa un eitrofā vēra telpiskā izplatība ir saistīta ar relatīvi augstu augšņu pamatgrupu un to priedēkļa modifikatoru daudzveidību, tādēļ pastāv daudz variāciju un dati ir nepietiekami, lai konstatētu noteiktas likumsakarības.

Augšņu pamatgrupu un to priedēkļa modifikatoru daudzveidības nozīmi atspoguļo arī likumsakarības starp koku sugām, *Land Cover 2005* klasēm un augšņu pamatgrupām. Konstatēts, ka veģetācijas vienību raksturošanā līdz ar vispārīguma pieaugumu (meža tips → mežaudzē dominējošās koku sugas → *Land Cover 2005* klases) samazinās likumsakarības starp veģetācijas raksturīgajiem tipiem un augšņu pamatgrupām un to priedēkļa modifikatoriem. Iespējams, ka labākas likumsakarības var nodrošināt, papildinot informāciju par biotisko vidi.

2.5. Kopsavilkums

Kopumā var secināt, ka ne vienmēr pastāv ciešas likumsakarības starp veģetācijas tipiem un augsnēm, tāpēc ir ļoti grūti prognozēt nākotnes veģetāciju, par pamatu izmantojot likumsakarības starp augsnēm un veģetācijas tipiem (Palo et al., 2005; Uuema et al., 2008). Potenciālo augšņu, veģetācijas un meža tipu prognozēšanā ir grūti lietot augsnes informāciju atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai boreāli nemorālajā reģionā, kur augšņu cilmiezi veido dažāds granulometriskais sastāvs, kas izveidojies glaciālo kušanas ūdeņu un glaciģēno nogulumu rezultātā.

Pētījuma rezultāti parāda, ka ir iespējams konstatēt likumsakarības starp augšņu pamatgrupu un vides faktoru telpisko izplatību, lietojot ģeneralizētos lineāros modeļus datu statistiskajā analizē, izmantojot *R 2.11.1* programmu.

Promocijas darbs parāda, ka ļoti augsta augšņu pamatgrupu daudzveidība pastāv litoloģiski līdzīgos kvartāra nogulumos. Turklāt daudzi meža tipi ir saistīti ar daudzām augšņu pamatgrupām, kas atkarīgas no augsnes cilmieža, novietojuma reljefā un mitruma apstākļiem.

No vienas puses, kvartāra nogulumu un meža telpiskās izplatības informācijas iegūšanas risinājumi šajā promocijas darbā var turpmāk uzlabot augšņu kartēšanu reģionālā mērogā. No otras puses, iegūtā informācija nevar uzlabot liela mēroga kartēšanu. Tādēļ turpmāk ir nepieciešami detalizēti pētījumi par augsnes īpašību un morfoloģijas, kā arī augsnes granulometriskā sastāva izmaiņām augsnes katēnā. Jebkurā gadījumā, augšņu kartēšanā par pamatu izmantojot ģeoloģiskās kontūras, ir iespējams nodalīt augšņu pamatgrupu asociācijas (grupas), jo ir grūti nodalīt atsevišķas augšņu pamatgrupas.

Pastāvošo likumsakarību noteikšana nākotnē uzlabos augšņu kartēšanu (reģionālā mērogā 1 : 50 000, jo šis mērogs ir standartmērogs telpiskajā plānošanā Latvijā, kā arī tajā ir pieejama meža tipu un ģeoloģisko nogulumu telpiskā informācija) boreāli nemorālā reģionā, kur augsnes ir veidojušās uz vēlā Vislas leduslaikmeta glaciālajiem nogulumiem, ko sedz postglaciālie eolie, jūras, ezeru, aluviālie un purvu nogulumi.

Nākotnē ir nepieciešams veikt pētījumus, lai noskaidrotu starptautiskās *FAO WRB* augšņu klasifikācijas vājas un stiprās puses un to lietošanu meža ekosistēmu izpētē. Izmantojot šo klasifikāciju, ir noteiktas likumsakarības starp augšņu (drenētu un nedrenētu) telpisko izplatību un vides faktoriem. Konstatēts, ka vides apstākļu ietekmi uz meliorētajām augsnēm atspoguļo meža tipi, nevis augšņu pamatgrupas atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai.

3. MEŽA AUGŠŅU ĶĪMISKAIS SASTĀVS UN TO ĪPAŠĪBAS

3.1. Literatūras apskats

3.1.1. Augsnes cilmiezis un ģeoloģiskie nogulumu

Ģeoloģisko nogulumu izcelsme un sastāvs (t. sk. minerālais un granulometriskais sastāvs) ir vieni no galvenajiem faktoriem, kas nosaka augsnes cilmieža un kopumā arī augsnes īpašības. Smilts un putekļu daļiņām, salīdzinot ar māla daļiņām, piemīt mazāka barības elementu adsorbcija, kā arī organominerālu kompleksu veidošanas spēja (Vanmechelen et al., 1997). Smilts daļiņas sastāv galvenokārt no kvarca (SiO_2), kas ķīmiskā ziņā ir mazaktīvs (Brady, Weil, 1996). Eiropas mežu ekosistēmās smilts nogulumi visraksturīgākie ir *Podzol* un *Arenosol* augsnēs. *Cambisol*, *Leptosol*, *Luvisol* un *Gleysol* augsnēs relatīvi vairāk ir māla daļiņu (Vanmechelen et al., 1997). To nelielais izmērs un plāksņveida forma būtiski palielina minerālu virsmu, kas savukārt palielina barības elementu adsorbciju uz minerālu virsmas un nosaka to atbrīvošanos, t. i., nonākšanu augsnes šķīdumā (Barber, 1995). Produktīvākās augsnes ir smalka granulometriskā sastāva augsnes, kurās dominē putekļu daļiņas (Vanmechelen et al., 1997).

Glacigēnie nogulumi Latvijā satur karbonātus, tanī skaitā kalcīta ($\text{Ca}[\text{CO}_3]$) un dolomīta ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$) minerālus. Iepriekš minētie minerāli ūdens un augsnes šķīduma iedarbībā pakāpeniski sadēd (Doner, Lynn, 1989), tāpēc to kristāliskajā režģī esošie ķīmiskie elementi kļūst pieejami augiem. Mērenā klimata boreālajā biotā tie var tikt iznesti no augsnes virsējiem slāņiem (Vanmechelen et al., 1997). Karbonātu klātbūtne augsnē ietekmē pH vērtību, kas atbilstoši zinātnieku uzskatiem (Кабара-Пендиас, Пендиас, 1989) būtiski ietekmē mikroelementu kustīgumu, migrāciju un uzņemšanu ar augu saknēm. F. de Koninks un E. van Rensts (De Coninck, Van Ranst, 1993) ir konstatējuši, ka kalcīta klātbūtne augsnē nodrošina $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtību robežās no 6,8 līdz 8,0 un vairāk. Karbonāti tieši var ietekmēt arī mikroelementu uzvedību augsnē. Tie, iekļaujoties karbonātu struktūrā vai veidojot ķīmiskos savienojumus, kļūst mazkustīgi un uzkrājas augsnē. Karbonātu klātbūtne ietekmē Fe un Mn kustīgumu un līdz ar to arī minēto mikroelementu pieejamību augiem. Tomēr zinātniskajās publikācijās tiek atzīmēts, ka vissvarīgākā nozīme mikroelementu uzvedības maiņā ir karbonātu ietekmei uz augsnes pH (Кабара-Пендиас, Пендиас, 1989).

Augsnes granulometriskais sastāvs un arī brīvo karbonātu klātbūtne augsnē nosaka katjonu apmaiņas kapacitāti un piesātinājuma pakāpi ar bāzēm. Māla augsnēm katjonu apmaiņas kapacitāte ir daudz augstāka nekā smilts augsnēm. Katjonu apmaiņas procesā augsnes šķīdumā esošie katjoni tiek saistīti uz negatīvi lādēto koloīdu virsmas, piemēram, uz māla minerālu un organisko koloīdu virsmas. Ar negatīvi lādētiem koloīdiem parasti saistās šādi apmaiņas katjoni: Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , K^+ , Na^+ un NH_4^+ (Bain, Smith, 1987). Katjonu apmaiņas kapacitāti būtiski ietekmē augsnes minerālais sastāvs un minerālu dēdēšanas intensitāte. Tāpēc Eiropas mežu augsnēs relatīvi zemākas katjonu apmaiņas kapacitātes vērtības ir *Arenosol* un *Podzol* augsnēm, kurām ir relatīvi zems māla daļiņu

saturs, savukārt, palielinoties mālu daļiņu daudzumam, kā, piemēram, *Cambisol* augsnēm, pieaug arī ir katjonu apmaiņas kapacitāte (Vanmechelen et al., 1997).

Aptuveni 25% Eiropas mežu augšņu virsējiem minerālajiem slāņiem ir raksturīgs relatīvi zems piesātinājums ar bāzēm, kur bāziskie katjoni veido mazāk par 15% no kopējā adsorbēto katjonu daudzuma. Šādā situācijā atsevišķi katjoni, piemēram, alumīnijs, nonāk augsnes šķīdumā un izraisa stresa apstākļus augsnes dzīvajiem organismiem un augiem, kas savukārt ietekmē to funkcionēšanu un augšanu (Ulrich, 1995). Augsts piesātinājums ar bāzēm ir raksturīgs augsnēm, kurām ir *Calcic* pazīmes, turpretim augsnēm, kurām ir *Spodic* un *Albic* pazīmes, parasti ir zems bāzes katjonu saturs (Vanmechelen et al., 1997).

Minerālu ķīmiskais sastāvs un līdz ar to augsnes cilmiezis nosaka barības elementu daudzumu augsnē. Minerālu dēdēšanas rezultātā atbrīvojas K, Ca, Mg un citi elementi, kas nodrošina bioloģiskos procesus mežaudzē (Barber, 1995). Minerāli (kvarcs, laukšpati u. c.), kas veido smilts un putekļu frakciju, salīdzinot ar māla minerāliem, parasti ir nabadzīgāki ar makroelementiem. Tāpēc Eiropas mežu augsnēs barības elementu saturs palielinās līdz ar māla daļiņu īpatsvara pieaugumu (Vanmechelen et al., 1997). Karbonātus nesaturošas rupja granulometriskā sastāva augsnes, piemēram, *Arenosol* un *Podzol*, satur relatīvi maz kalcija (mazāk par 2 g kg⁻¹), turpretim kaļķainas augsnes var saturēt vairāk nekā 100 g kg⁻¹ kalcija (Barber, 1995). Kalcijs ir daudzu iežu un minerālu sastāvā, arī laukšpatos, vizlās, dolomītā, ģipsī un citos minerālos. Vislielākais kopējā kalcija daudzums Latvijā ir augsnēs uz māla cilmiežiem (aptuveni 30 g kg⁻¹), bet vismazākais – kāpu smilts augsnēs (< 1g kg⁻¹) (Nikodemus u. c., 2008). Kalcija saturu organiskajos slāņos galvenokārt nosaka Ca saturs dziļāk esošajos minerālaugsnes slāņos. Minēto likumsakarību apliecina arī Eiropas mežu augsnēs konstatētā būtiskā korelācija starp kalcija saturu organiskajos slāņos un minerālā virsējā slānī (Vanmechelen et al., 1997).

Augsnē 98% kālija ir augsnes minerālu sastāvā un tikai 2% augsnes šķīdumā vai apmaināmā formā (Nikodemus u. c., 2008). Kālijs augsnes šķīdumā nonāk minerālu, piemēram, laukšpata un vizlas, dēdēšanas rezultātā (Pratt, 1965). Augsnes paskābināšanās paātrina bāzisko katjonu, arī K⁺ izskalošanos no augsnes (Aber et al., 1989). Pastāv arī cits viedoklis (Nilsson, Bergkvist, 1983), proti, ka K⁺ atbrīvošanos augsnes šķīduma skābums praktiski neietekmē.

Kālija saturs augsnes minerālajos slāņos nosaka arī tā saturu augsnes organiskajos slāņos. Organiskie slāņi ir relatīvi nabadzīgi ar kāliju, ja augsnes minerālajos slāņos tā saturs ir relatīvi zems (Barber, 1995).

Fosfors ir nozīmīgs elements augu augšanā. Pēc S. A. Bārbera (Barber, 1995), augsnē fosfors ir

- 1) augsnes šķīdumā;
- 2) adsorbēts uz minerālu virsmas;
- 3) minerālu sastāvā;
- 4) organiskajā vielā.

Tiek uzskatīts (Pritchett, Fisher, 1987), ka mežu augsnēs fosfora galvenais avots ir organiskā viela un tāpēc augu nodrošināšanā ar fosforu augsnes cilmiežiem nav tik

liela nozīme kā iepriekš aprakstītajiem elementiem. Fosfora deficīts parasti novērojams vāji drenētās, skābās smilšainās vai smilšmāla augsnēs (Pritchett, Fisher, 1987). Skābo *Podzols* augšņu *Spodic* horizontā liela daļa fosfora atrodas dzelzs un alumīnija fosfātu veidā, tāpēc tas var būt nepieejams augiem. Ja augsnes satur ļoti zemu dzelzs, alumīnija un mangāna koncentrāciju, lielākā daļa fosfora skābajās augsnēs tiek izskalota no to virskārtas (Vanmechelen et al., 1997).

Neitrālās un bāziskās augsnēs uz kalcīta virsmas fosfāciju adsorbcijas rezultātā veidojas kalcija fosfāti, kas nodrošina fosfora fiksāciju, tāpēc karbonātus saturošās augsnes satur arī vairāk fosfora (Doner, Lynn, 1989). Augsnēs ar *Calcic* pazīmēm ir relatīvi augstāka fosfora vidējā koncentrācija minerālā virskārtā (Vanmechelen et al., 1997). Augiem izmantojamā fosfora saistīšanos augsnē nešķīstošo savienojumu formā nosaka arī māla saturs un dzelzs savienojumu klātbūtne. Tieši māls daudzās augsnēs nodrošina galveno adsorbcijas virsmu fosfātiem – īpaši tad, ja to koncentrācija ir zema (Nikodemus u. c., 2008). Fosfora šķīstošo formu daudzums samazinās, pieaugot dzelzs oksīdu un kalcija karbonātu attiecībai augsnē (Nikodemus u. c., 2008).

Magnijs augsnēs ir sastopams apmaiņas katjonu formā, organisko nobiru sastāvā, kā arī dažādos minerālos, piemēram dolomītā, kas labi šķīst ūdenī un augsnes šķīdumā (Heald, 1965). Atkarībā no augsnes cilmieža sastāva un dēdēšanas intensitātes, kā arī augsnes reakcijas Mg saturs augsnēs mainās ļoti plašā diapazonā. Izteiktāks Mg deficīts, salīdzinot ar citām augsnēm, ir *Podzol*, *Arenosol* un *Histosol* augsnēs. Zems Mg saturs ($< 1000 \text{ mg kg}^{-1}$) ir Eiropas meža augšņu organiskajā slānī. Savukārt *Cambisol*, *Luvisol*, *Leptosol* un *Regosol* augsnēs vairāk nekā 75% gadījumu Mg saturs organiskajā slānī pārsniedz 1000 mg kg^{-1} (Vanmechelen et al., 1997).

Augsnēs dzelzs ir sastopama relatīvi lielākā koncentrācijā nekā citi mikroelementi. Dzelzi saturošie minerāli, piemēram, gefīts ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) un hematīts (Fe_2O_3), augsnēs ir sastopami bieži. Dzelzs ir daudzu silikātu minerālu galvenā sastāvdaļa, kā arī sastopama iežu dēdēšanas produktos – oksihidrātos, oksīdos, jaunveidojumos, dažādos trīsvērtīgās un divvērtīgās dzelzs neorganisko un organisko skābju kompleksos savienojumos. Latvijā visvairāk dzelzs ir māla augsnēs (vidēji 2%), bet vismazāk kāpu smiltāju augsnēs (ap 0,2%) (Nikodemus u. c., 2008). Arī Eiropas mežu augsnēs dzelzs saturs ļoti variē (Vanmechelen et al., 1997). Dzelzs kustīgums augsnē ir atkarīgs no vides, tās reakcijas un oksidēšanas apstākļiem (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Ar skābekli bagātā neitrālā vidē, kur augsnes ūdens nesatur organiskās vielas vai satur tās relatīvi maz, dzelzs augsnē galvenokārt ir $(\text{Fe}(\text{OH})_3)_x$ formā (Перельман, Касимов, 1999), kas nodrošina tās uzņemšanu ar augu saknēm (Jones, Jarvis, 1981). Neorganisko savienojumu oksidēšanas un hidrolīzes procesos pie $\text{pH} < 5$ divvērtīgā dzelzs pāriet augsnes šķīdumā koloidālā stāvoklī. Anaerobā vidē dominē Fe^{2+} , kā arī FeHCO_3 , FeSO_4 , FeCO_3 , bet ar skābekli bagātos augsnes slāņos tie kļūst mazkustīgi un uzkrājas (Перельман, Касимов, 1999). Ar organiskajām vielām dzelzs veido noturīgus fulvātus un mazmolekulārus oglekļa kompleksus, kas pat neitrālā vidē pasargā to no iesaistīšanās hidrolīzes procesos (Nikodemus u. c., 2008). Savukārt sevišķi kustīga dzelzs ir stipri skābos un skābos gleja ūdeņos (Перельман, Касимов, 1999), tāpēc tā migrē uz dziļākajiem augsnes slāņiem, kā arī bieži tiek iznesta no augsnes. Dzelzs saturs augsnē un vides reakcija ietekmē arī

citu ķīmisko elementu uzvedību. Koloidālie dzelzs hidroksīdi skābā vidē ir pozitīvi lādēti un tāpēc piesaista anjonus, bet neitrālā vidē negatīvi un tāpēc saista katjonus. Pirmajā gadījumā Fe veido kompleksus ar P, As, Mo, Cr, bet otrajā gadījumā ar Mn, Cu, Co, Ni (Перельман, Касимов, 1999).

Viens no izplatītākajiem metāliem Zemes garozā un augsnē ir alumīnijs. Augsnē tas atrodams alumīnija oksīda (Al_2O_3) un hidroksīdu, alumīnija sāļu veidā, kā arī organominerālajos kompleksos un alumosilikātos (Nikodemus u. c., 2008). Tā saturs Eiropas meža ekosistēmu smiltis augsnēs var būt mazāks par 1000 mg kg^{-1} , bet augsnēs ar alumosilikātu saturu tā koncentrācija sasniedz $1000\,000 \text{ mg kg}^{-1}$. Tā kā alumīnijs ir sastopams galvenokārt neorganiskajās formās, augsnes organiskajos slāņos alumīnija saturs atklāj augsnes minerālā materiāla saturu (Vanmechelen et al., 1997). Alumīnija kustīgumu nosaka augsnes reakcija. Ja augsnes pH ir 5–8, alumīnija hidroksīdi tikpat kā nešķīst ūdenī un augsnes šķīdumā, tāpēc alumīnijs ir mazkustīgs (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Skābās augsnēs, samazinoties augsnes pH zem 5,5, alumīnija kustīgums strauji palielinās un jonu apmaiņas procesos tas konkurē ar citiem katjoniem. Uzskata, ka mēreni humīdā klimatā alumīnijs ir mazkustīgs (Перельман, Касимов, 1999).

Mangāns augsnē adsorbcijas procesā konkurē ar dzelzi. Kopējo augsnes mangānu veido minerālu sastāvā esošais Mn, organiski saistītais Mn, apmaiņas Mn un šķīdumā esošais Mn, turklāt līdzsvaru starp iepriekš minētajām formām būtiski ietekmē augsnes pH un reducēšanās–oksidēšanās apstākļi. Augsnē mangāns pastāv trīs dažādos oksidēšanās veidos – Mn^{2+} , Mn^{3+} un Mn^{4+} . Šķīstošākā apmaiņas Mn forma, ko absorbē augu saknes, primāri ir Mn^{2+} , kas arī veido kompleksus ar šķīstošajiem un nešķīstošajiem organiskajiem savienojumiem. Savukārt labi aerētās augsnēs Mn^{2+} oksidējas līdz Mn^{4+} un izgulsnējas kā oksīds. Augsnē izplatītākie mangāna minerāli ir oksīdi, kas sastopami dzelzs–mangāna konkrēcijās, vai arī kā uzklājumi uz citiem minerāliem (Vanmechelen et al., 1997).

3.1.2. Augsne kā meža ekosistēmu komponents

Augsne ir nozīmīgs meža ekosistēmu komponents, tāpēc koku ietekmes izpētei uz augsnes veidošanos un elementu apriti ir gara vēsture. Par to liecina daudzās publikācijas pagājušajā gadsimtā (Shear, Stewart, 1934; Zinke, 1962; Challinor, 1968; Alban, 1982; Crozier, Boerner, 1986; Boerner, Koslowsky, 1989; Boettcher, Kalisz, 1990; France et al., 1989; Johnson, Todd, 1990; Binkley et al., 1992; Hobbie, 1992; Gower, Son, 1992; Nordén, 1994; Binkley, 1995; Bockheim, 1997; Finzi et al., 1998a, b).

Relatīvi maz pētījumu ir par augsnes īpašību ietekmi uz mežaudžu attīstību un to telpisko izplatību.

Mežaudzes sastāvu un attīstību nosaka gan augsnes granulometriskais sastāvs, gan barības vielu daudzums, gan arī augsnes reakcija. Daudzas augsnes īpašības ir atkarīgas no granulometriskā sastāva, kas ir viens no nozīmīgākajiem faktoriem kokaudžu izplatībā. Piemēram, parastais skābardis (*Carpinus betulus L.*) ir izplatīts uz augsnēm, kur ir augsts barības elementu saturs (Krauklis, Zariņa, 2002). K. Kiršteins un V. Eiche ir uzsvēruši, ka Belovežas gāršā parastais skābardis ir sastopams tikai labi drenētās augsnēs

uz smilšmāla vai mālsmilts, pa retam arī uz grants cilmieža, bet nekad nav sastopams uz smilts cilmieža (Kiršteins, Eiche, 1933). Svarīga nozīme ir litoloģiskajam sastāvam, piemēram, atsevišķos pētījumos Čehijā (Purdon et al., 2004) konstatēts, ka litoloģiskajos rajonos, kur ir izplatītas auglīgākas augsnes ar augstu kalcija karbonātu un citu sārmu minerālu daudzumu, paskābināšanās un līdz ar to arī mežaudžu defoliācija tiek kavēta salīdzinājumā ar mežaudzēm, kas izplatītas uz mazauglīgākām augsnēm.

V. L. Pričets un R. F. Fišers (Pritchett, Fisher, 1987) uzskata, ka skuju koku mežos optimālais pH ir robežās no 5,2 līdz 6,2, bet lapu koku mežos no 5,8 līdz 6,2. Savukārt T. D. Landis (1989) secinājis, ka skujkokiem $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ optimālās vērtības ir starp 5,0–6,0, bet lapu kokiem starp 6,0–7,0. Citi zinātnieki atzīst, ka skujkokiem piemērotāki augšanas apstākļi ir skābā vidē, ja pH ir robežās starp 4,5 un 5,0 (Brix, Van den Driessche, 1974). R. Rikala un H. J. Jozefeks (Rikala, Jozefek, 1990) konstatējuši, ka *Pinus sylvestris* un *Picea abies* stādu augšanai optimāli apstākļi ir tad, ja $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ir 4,0–5,0.

Tātad katrai koku sugai ir sava optimālā augsnes reakcija, bet kopumā uzskata, ka augsnes $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ robežās no 5,0 līdz 7,0 veido kokiem optimālus augšanas apstākļus, kuros notiek mikroorganismu aktivitātes pieaugums un ir barības elementu pieejamība. Koku sugu tolerance pret vides reakciju nosaka to, ka augsnes apstākļi ietekmē augu sugu sastāvu vairāk nekā sugu sastāvs iespaido augsnes reakciju. Turklāt augsnes skābums nosaka skābuma jutīgo augu izplatību (Vanmechelen et al., 1997).

Pētījumos konstatēts, ka ne tikai augsnes īpašības ietekmē atsevišķu koku sugu izplatību, bet arī skuju koki un lapu koki dažādi iespaido minerālaugsnes īpašības un meža zemsegu (Brais et al., 1995; Vesterdal, Raulund-Rasmussen, 1998; Rejšek et al., 2010), kā arī tiem ir nozīmīga ietekme uz augšņu ķīmiskajām īpašībām (Binkley, Valentine, 1991).

Veiktie pētījumi (Zinke, 1962) parāda, ka skujkoku apkārtnē ir zemāks pH, N daudzums. Apmaiņas bāzu summa un katjonu apmaiņas kapacitāte ir relatīvi zemāka koku tuvumā, bet pieaug līdz ar attālumu no koka stumbra. Tā kā skuju un lapu nobiru ķīmiskais sastāvs atšķiras (Terauda, Nikodemus, 2006), tad atkarībā no koku sugām mainās arī augsnes īpašības, piemēram, organiskais ogleklis, kopējais slāpeklis, pH, apmaiņas katjonu daudzums un piesātinājums ar bāzēm (Birkeland, 1984). Šīs augsnes īpašības var mainīties, izmainoties vides apstākļiem (Birkeland, 1984), turklāt atkarībā no koku sugām vecākās augsnēs var būt lielākas ķīmisko elementu satura atšķirības.

Tiek uzskatīts, ka meža ekosistēmas attīstību un produktivitāti galvenokārt nosaka barības elementu riņķojums un ka meža nobiras ir visnozīmīgākais faktors šajā apritē (Kavvadias et al., 2001). Nobiras ir viens no svarīgākajiem barības elementu avotiem meža ekosistēmā, un barības elementi no organiskajām vielām mineralizācijas procesā atbrīvojas lēni (Ukonmaanaho, 2001; Terauda, 2008). Līdz ar to mežu augšana un produktivitāte daudzos gadījumos ir atkarīga no nobiru daudzuma, to veida un sadalīšanās ātruma (Kavvadias et al., 2001). Skuju koku nobiras sadalās lēnāk salīdzinājumā ar lapu koku nobirām, tāpēc augsnes zemsegā uzkrājas nobiras (Berg, 2000). Lapu koku audzēs ir augstāka bioloģiskā aktivitāte, kas nodrošina organisko vielu degradāciju un humifikāciju. Relatīvi skābās skuju koku mežaudzes augsnēs augsnes fauna ir mazāk aktīva, tāpēc samazinās organisko vielu sajaukšanās apjoms ar minerālaugsni (Thuile,

Schulze, 2006). Nedzīvās zemsegas ķīmisko sastāvu nosaka meža nobiru sastāvs. Piemēram, Latvijā priežu meža nobirās, salīdzinot ar egļu un lapu koku nobirām, konstatēta zema barības vielu koncentrācija un līdz ar to barības vielu degradācijas dēļ arī neliela šo vielu pieejamība kokaudei (Tērauda, 2008). Lapu koku vainagā (lapās, zaros u. c.) parasti ir augstāka slāpekļa, kālija, kalcija un magnija koncentrācija salīdzinājumā ar skuju koku vainaga daļām (Bergmann, 1988). Tāpēc mežos ar lapu koku piejaukumu nobirās ir augstāks bāzisko katjonu saturs, kā arī augstāka augsnes pH vērtība (Binkley, 1995). Atšķirīgais nobiru sastāvs un to degradācija izpaužas arī podzolēšanās procesā, kas straujāk norisinās skuju koku mežos, salīdzinot ar lapu koku mežiem (Schulp et al., 2008).

Pētījumi liecina, ka meža zemsegas oglekļa krājumu un augsnes organiskā oglekļa krājumu veidošanās ir atkarīga no kokaudes vecuma (Vesterdal et al., 2002) un biofizikālā raksturojuma. Savukārt no augsnes tipa ir atkarīgs organisko vielu sadalīšanās ātrums un enerģijas aprīte meža ekosistēmā. Turklāt organisko vielu daudzums augsnē ir atkarīgs no augsnes virsējo slāņu organiskās vielas samazināšanās un palielināšanās funkcijas, ko pavada degradācijas process, līdz ar to minerālaugsnes A horizonta veidošanās ir atkarīga no veģetācijas (Birkeland, 1984).

Kokaude var ietekmēt ne tikai augsnes ķīmiskās īpašības, bet ilgtermiņā arī augsnes morfoloģiskās īpašības (Phillips, Marion, 2004). Ir noskaidrots, ka īstermiņā ķīmiskās un bioloģiskās izmaiņas augsnē atspoguļo veģetācijas izmaiņas, turklāt, skujkokiem nomainot lapu kokus, vairākos gadu desmitos var būtiski izmainīties augsnes morfoloģiskās pazīmes un augsnes veidošanās procesi (Certini et al., 1998; Phillips, Marion, 2004). Daudzas augšņu diagnostiskās pazīmes un īpašības ir cieši saistītas ar veģetācijas izmaiņām (Birkeland, 1984). Piemēram, skujkoku mežos raksturīga podzolēšanās procesa attīstība, bet šis process var norisināties arī lapu koku mežos. Turpretim depodzolizēšanās ir pretējs process, ja skujkoku mežus nomaina lapu koku meži, tāpēc no lapu koku nobirām augsnes virskārtā pieaug Ca daudzums, bet, samazinoties skuju koku nobirām, B horizontā atbrīvojas Fe un Mn (Lundström et al., 2000). Pētījumos konstatēts, ka aptuveni 50 gados koku sugas var būtiski izmainīt augsnes ķīmiskās īpašības (Binkley, Valentine, 1991).

Balstoties uz apkopoto literatūru, tika pieņemts, ka plašākā mērogā augsnes fizikālo un ķīmisko īpašību mainību nosaka ģeoloģiskie nogulumi, no kuriem pamatā ir atkarīgas augsnes cilmiežu īpašības un tātad arī augšņu veidošanās un augšņu pamatgrupu (*FAO WRB*) izplatība. Savukārt meža tipu un dominējošo koku sugu izplatība ir atkarīga no abiem iepriekš minētajiem faktoriem.

Kā zināms, augsnes profilu fizikālās un ķīmiskās īpašības augsnes virskārtā nosaka augsnes veidošanās procesi, piemēram, minerālu dēdēšana, podzolēšanās, lesivēšanās, dekalifikācija un dekarbonizācija, kuru izpausmes ir atkarīgas no augsnes profilu apakškārtas – augsnes cilmieža fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām (teritorijas ģeoloģiskās uzbūves un ģeoloģisko nogulumu sastāva). Tomēr augsnes veidošanās procesus augsnes profila virskārtā, iespējams, vairāk ietekmē augsnes veidošanās laiks, veģetācija (meža tipi un mežaudzē valdošās koku sugas), kā arī cilvēka saimnieciskā darbība.

3.2. Pētījumu materiāli un metodes

3.2.1. Lauka pētījumi un augsnes fizikālās un ķīmiskās analīzes

Lauka pētījumi un augsnes paraugu ievākšana veikta no 2006. līdz 2008. gadam Eiropas pirmā līmeņa meža monitoringa, ES programmas Nr. 2152/2003 par mežu un vides mijiedarbības monitoringu Kopienā (*Forest Focus*) un starptautiskās sadarbības programmas (*ICP Forests*) starptautiskā projekta „Meža augšņu inventarizācija un bioloģiskās daudzveidības novērtēšana” (*BioSoil*) ietvaros 95 parauglaukumos.

Parauglaukumos tika izrakts augsnes dziļrakums un aprakstītas augsnes atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai (IUSS Working Group, 2007). Augšņu paraugi tika ievākti no augsnes profilu ģenētiskajiem horizontiem, kā arī atbilstoši *ICP* mežu monitoringa metodēm no šādiem augsnes slāņiem: O horizonts, 0–10 cm, 10–20 cm, 20–40 cm, 40–80 cm (FSCC, 2006). Tas nodrošina augšņu fizikālo un ķīmisko īpašību noteikšanu atbilstoši starptautiski akceptētām (standartmetodēm) meža monitoringa metodēm.

Lauka darbos tika noteikts arī parauglaukumu novietojums reljefā, augsnes cilmiezis – kvartāra un pirmskvartāra nogulumieži, mežaudzē dominējošās koku sugas un meža tipi. Kvartāra nogulumu tika analizēti, ņemot vērā to granulometrisko sastāvu un sastopamību reljefā. Meža tipi tika noteikti atbilstoši Latvijas meža ekosistēmu klasifikācijai (Bušs, 1981).

Augsnes paraugu sagatavošana laboratorijā veikta atbilstoši LVS ISO 11464 standartam (2005), savukārt fizikālās un ķīmiskās analīzes izdarītas atbilstoši *ICP* mežu monitoringa metodēm (FSCC, 2006) LVMI „Silava” Meža vides laboratorijā un Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūrā.

Augsnes paraugiem tika noteikti un promocijas darbā izmantoti šādi rādītāji:

- granulometriskais sastāvs (smilts, māla, putekļu daļiņu saturs, %). Noteikts, lietojot slapjo sijāšanu un sedimentācijas jeb pipetes metodi) atbilstoši LVS ISO 11277 (2000) standartam;
- kopējā slāpekļa koncentrācija (g kg^{-1}). Noteikta, izmantojot modificētu Kjeldāla metodi atbilstoši LVS ISO 11261 (2002) standartam;
- kopējā organiskā oglekļa koncentrācija (g kg^{-1}). Noteikta atbilstoši LVS ISO 10694 : 1995 standartam;
- aktīvais skābums $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. Noteikts augsnes suspensijā 1 : 5 (V/V) ūdenī atbilstoši LVS ISO 10390 (2002) standartam;
- apmaiņas katjonu (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) koncentrācija (cmol kg^{-1}). Noteikta 1M amonija acetāta ekstraktā, izmantojot atomabsorbcijas spektrometru;
- apmaiņas elementu (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+}) koncentrācija (cmol kg^{-1}). Noteikta, izmantojot atomabsorbcijas spektrometru;
- katjonu apmaiņas kapacitāte (cmol kg^{-1});
- karaļūdenī ekstrahējamo elementu (Ca, Mg, K, Na, Mn, P, Fe) koncentrācija (mg kg^{-1}). Noteikta karaļūdens izvilkumā, izmantojot atomabsorbcijas spektrometru (Ca, Mg, K, Na, Mn, Fe) un spektrofotometru (P);

- skābā amonija oksalātā ekstrahējamo elementu (Al, Fe) koncentrācija (mg kg^{-1}). Noteikta, lietojot spektrometru;
- karbonātu koncentrācija (g kg^{-1}). Noteikta, augsni apstrādājot ar 4 M HCl atbilstoši LVS ISO 10693 : 1995;
- piesātinājums ar bāzēm (%).

LVMI „Silava” Meža vides laboratorijā iegūtie dati tika validēti atbilstoši *ICP Forests* rekomendētiem algoritmiem un minimālām un maksimālām attiecīgo parametru vērtībām (Clarke et al., 2008).

3.2.2. Datu statistiskā apstrāde

Augšņu fizikālo un ķīmisko īpašību datu statistiskajā apstrādē tika analizētas minerālaugšnes, tādēļ netika iekļauta *Histosol* augšņu pamatgrupa. Izejas datu atlasē netika iekļauti arī faktori (ģeoloģiskie nogulumi – Litorīnas jūras, aluviālie; augšņu pamatgrupas – *Phaeozem*, *Umbrisol*; meža tipi – slapjais mētrājs (*Vaccinoso-sphagnosa*), purvājs – (*Sphagnosa*), niedrājs (*Caricoso-phragmitosa*), mētru ārenis (*Vacciniosa mel.*) un mētru kūdrenis (*Vacciniosa turf. mel.*)), kas sastopami mazāk nekā 3 parauglaukumos.

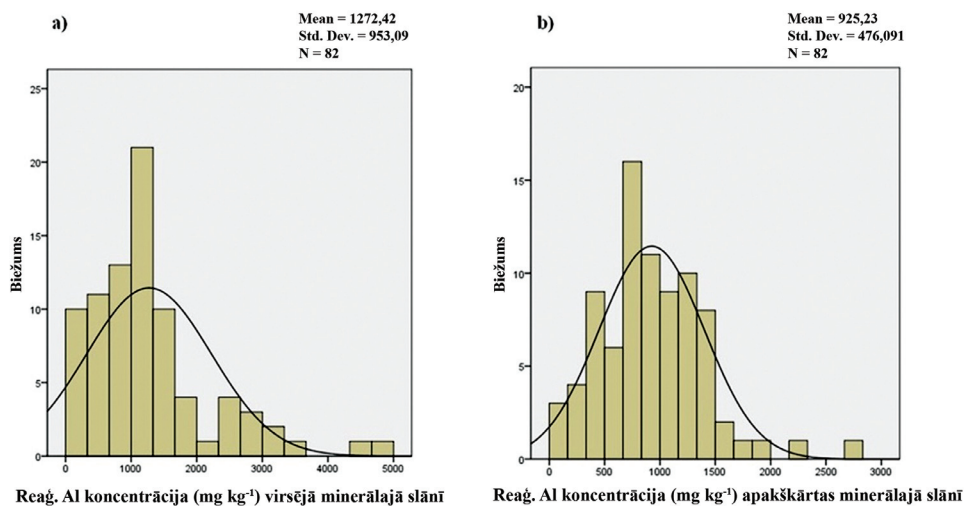
Promocijas darbā tika statistiski apstrādāti fizikālo un ķīmisko analīžu dati atlasītajiem 56 augsnes profilu nedzīvās zemsegas O horizontiem, 74 augsnes profilu augsnes minerālajiem virsējiem (0–10 cm) un apakškārtas (40–80 cm) slāņiem. Tika ņemts vērā, ka 10–20 cm un 20–40 cm slāņus ietekmē dažādi augsnes veidošanās procesi, tādēļ kopumā netika veltīta uzmanība padziļinātai šo slāņu datu analīzei un interpretācijai.

Promocijas darbā, līdzīgi kā citos ģeoķīmiskajos (Reimann, Filzmoser, 1999; Reimann et al., 2002; Gilucis, 2007) un meža augšņu pētījumos (Vanmechelen et al., 1997), tika konstatēts, ka ģeoķīmiskā lauka faktoru kombināciju lielā daudzveidība neļauj korekti izmantot parametriskās statistiskās metodes.

Augšņu pamatgrupu, ģeoloģisko nogulumu un meža tipu fizikālā un ķīmiskā sastāva satura sadalījuma novērtēšanai tika izmantotas histogrammas (3.1. att.).

Pārbaudot datu atbilstību noteiktiem sadalījuma veidiem pēc Fišera dispersijas kritērija, tika konstatēts (3.1. att.), ka tie ne vienmēr atbilst normālam (atbilstoši Gausa sadalījumam), tādēļ iegūto datu statistiskajā apstrādē tika izmantotas parametriskās un neparametriskās metodes, attiecīgajos gadījumos apstrādājot datu kopas – gan vidējās vērtības un standartnovirzes, gan mediānu.

Augšņu fizikālo un ķīmisko īpašību statistiski būtisku atšķirību noteikšanai starp atlasītajiem ģeoloģiskajiem nogulumiem, augšņu pamatgrupām un meža tiptiem tika veikta normāla sadalījuma piešķiršana, veicot to transformāciju logaritmos. Statistiski būtiskās ($p < 0,05$) atšķirības tika noteiktas, izmantojot *Tukey* testu vienfaktora dispersiju analīzē, lietojot *SPSS PASW Statistics 18* programmu. Turklāt, ņemot vērā, ka atlasītajiem datiem varētu būt nevienādas dispersijas gradācijas klasēs, vidējo starpību vērtēšanai tika izmantota Danneta (angl. – *Dunnet's*) korekcija.



3.1. attēls. Ķīmisko elementu saturs lognormāla sadalījuma piemērs augsnes minerālajos slāņos

Figure 3.1. Lognormal distribution example of chemical elements content of the soil mineral layers

Lietojot komponentanalīzi, izmantojot *PC-ORD 5.0* programmu, tika noskaidrotas sakarības starp ģeoloģiskajiem nogulumiem, augšņu pamatgrupām, meža tipiem, granulometriskā sastāvu 74 parauglaukumos un augsnes minerālā virsējā slānā (0–10 cm) un apakšējās (40–80 cm) fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām:

- granulometriskais sastāvs (smilts, māla, putekļu daļiņu saturs, %);
- augsnes reakcija ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$);
- katjonu apmaiņas kapacitāte (cmol kg^{-1});
- piesātinājums ar bāzēm (%);
- kopējā slāpekļa koncentrācija (g kg^{-1});
- kopējā organiskā oglekļa koncentrācija (g kg^{-1});
- apmaiņas katjonu (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) koncentrācija (cmol kg^{-1});
- apmaiņas elementu (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+}) koncentrācija (cmol kg^{-1});
- karaļūdenī ekstrahējamo elementu (Ca, Mg, K, Na, Mn, P, Fe) koncentrācija (mg kg^{-1});
- skābā amonija oksalātā ekstrahējamo elementu (Al, Fe) koncentrācija (mg kg^{-1});
- karbonātu koncentrācija (g kg^{-1}).

Monte Carlo tests tika izmantots, lai pārbaudītu būtiskumu starp komponentanalīzes asīm. Starp vides faktoriem un paraugu dispersiju tika noskaidroti Pīrsona korelācijas koeficienti ($r > 0,50$).

3.3. Rezultāti

3.3.1. Augšņu fizikālo un ķīmisko īpašību mainība saistībā ar ģeoloģiskajiem nogulumiem

Augsnes granulometriskais sastāvs

Viens no nozīmīgākajiem faktoriem, kas ietekmē augsnes ķīmiskās īpašības, ir augsnes minerālais un granulometriskais sastāvs. Visviendabīgākie augsnes cilmieži Latvijas meža ekosistēmās ir Litorīnas jūras, Baltijas ledus ezera un eolie nogulumi, kuros smilts frakcijas daudzums pārsniedz 95%. Arī glaciofluviālajiem nogulumiem raksturīgs augsts smilts daļiņu saturs – 86%. Augsnes virskārtas granulometriskais sastāvs šajos nogulumos būtiski neatšķiras no augsnes apakškārtas granulometriskā sastāva (3.2. tab.).

Relatīvi mazāk smilts daļiņu ir glaciģēnajos nogulumos (3.1. tab.), kur minerālā virskārta vidēji satur 68%, bet apakškārta 58% smilts daļiņu. Glaciolimniskajos nogulumos smilts daļiņu saturs augsnes virskārtā ir 80%, bet 40–80 cm dziļumā – 87%. Šo augsto smilts daļiņu daudzumu glaciolimniskajos nogulumos iespējams skaidrot ar to, ka lielākā daļa mežu monitoringa parauglaukumu ir izvietoti nogulumos, kur augsnes cilmieži veido smilts nogulumus. Glaciolimnisko nogulumu augsnes, kur lielāku īpatsvaru veido māla un putekļu daļiņas, to relatīvi augstās auglības dēļ Latvijā galvenokārt tiek izmantotas lauksaimniecībā.

Relatīvi zemāks granulometriskā sastāva variāciju diapazons konstatēts eolajiem, Baltijas ledus ezera un glaciofluviālajiem nogulumiem, bet augstākais – glaciģēnajiem un glaciolimniskajiem nogulumiem. Šajos nogulumos līdz ar dziļumu pieaug māla daļiņu saturs (3.1. tab.).

Analizējot granulometriskā sastāva atšķirības starp ģeoloģiskajiem nogulumiem, tika konstatēts, ka statistiski būtiski ($p < 0,05$) savstarpēji neatšķiras eolie un Baltijas ledus ezera nogulumi, savukārt glaciģēnie nogulumi statistiski būtiski neatšķiras no glaciolimniskajiem nogulumiem. Eolo un Baltijas ledus ezera nogulumu virsējā slāņa un apakškārtas granulometriskais sastāvs būtiski atšķiras no glaciģēnajiem un glaciolimniskajiem nogulumiem, bet glaciofluviālo nogulumu granulometriskais sastāvs būtiski atšķiras no glaciģēnajiem nogulumiem (3.2. tab.). Savukārt virsējā slāņa granulometriskā sastāva ziņā statistiski būtiski neatšķiras glaciofluviālie nogulumi no eolajiem, Baltijas ledus ezera un glaciolimniskajiem nogulumiem, bet vienlaikus pastāv to atšķirības augsnes apakškārtā. Iepriekš aprakstītais parāda, ka ģeoloģisko un augsnes veidošanās procesu rezultātā augsnes virskārtas granulometriskais sastāvs viena ģenētiskā noguluma tipa ietvaros ir kļuvis daudzveidīgāks.

Katjonu apmaiņas kapacitāte

Smilts granulometriskā sastāva ģeoloģiskajiem nogulumiem (eolajiem, Baltijas ledus ezera, glaciofluviālajiem) raksturīga zema katjonu apmaiņas kapacitāte (mediāna 6–12 cmol kg⁻¹). Noguluma viena ģenētiskā tipa robežās atsevišķu augšņu parauglaukumos katjonu apmaiņas kapacitāte savstarpēji maz atšķiras. Relatīvi smagāka granulometriskā sastāva ģeoloģiskajos nogulumos (glaciolimniskajos, glaciģēnajos) minētais rādītājs būtiski palielinās un katjonu apmaiņas kapacitātes mediāna, piemēram, glaciolimnisko nogulumu augšņu minerālā virskārtā, sasniedz 22 cmol kg⁻¹ (3.1. tab.).

Visos pētītajos ģeoloģiskajos nogulumos, izņemot glacigēnos, virsējā minerālā slānī katjonu apmaiņas kapacitāte ir relatīvi augstāka nekā apakškārtā. Glacigēnajos nogulumos novērojams pretējs process, jo minētais rādītājs līdz ar dziļumu pieaug (3.1. tab.). Tas parāda mežaudzes lielo nozīmi pozitīvi lādēto katjonu (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} u. c.) migrācijā un akumulēšanā augsnes virsējos, tanī skaitā minerālajos, slāņos.

3.1. tabula

Augsnes granulometriskais sastāvs (%) un katjonu apmaiņas kapacitāte (cmol kg^{-1}) augsnes minerālajos slāņos (0–10 cm un 40–80 cm) dažādos ģeoloģiskos nogulumos

Table 3.1.

Soil texture (%) and cation exchange capacity (cmol kg^{-1}) of the mineral soil layers (0–10 cm and 40–80 cm) within different geological deposits

Ģeoloģiskie nogulumi	Smilts			Māls			Putekļi			Katjonu apmaiņas kapacitāte (cmol kg^{-1})		
	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.
Eolie												
0–10 cm	94	6	98	2	1	2	4	5	2	8	2	8
40–80 cm	98	3	99	1	1	1	2	3	0	4	1	4
Baltijas ledus ezera												
0–10 cm	92	8	95	2	2	2	6	7	5	14	9	11
40–80 cm	95	6	98	1	1	1	4	6	1	10	9	6
Glaciolimniskie												
0–10 cm	68	28	80	10	14	4	22	19	14	25	15	22
40–80 cm	65	38	87	18	25	5	16	16	8	18	18	9
Glaciofluvialie												
0–10 cm	86	7	86	4	3	3	11	7	10	19	15	12
40–80 cm	87	10	86	4	4	4	9	7	11	13	12	7
Glacigēnie												
0–10 cm	64	21	68	12	13	8	24	12	25	24	19	18
40–80 cm	61	20	58	17	14	16	22	10	20	26	17	20

Pētījums parādīja, ka Latvijas meža ekosistēmās ļoti zema katjonu apmaiņas kapacitāte ir augsnēm, kas veidojušās uz eolajiem nogulumiem, un tās statistiski būtiski atšķiras no visu pārējo nogulumu augsnēm (3.2. tab.). Kaut gan Baltijas ledus ezera, glaciofluvialo un glaciolimnisko nogulumu augsnēs savstarpēji novērojamas granulometriskā sastāva atšķirības, tomēr katjonu apmaiņas kapacitāte starp minēto nogulumu augšņu slāņiem statistiski būtiski ($p < 0,05$) neatšķiras. Savukārt būtiski atšķiras glacigēno nogulumu augsnes apakškārtas katjonu apmaiņas kapacitātes skaitliskā vērtība no Baltijas ledus ezera un glaciofluvialo nogulumu augsnes apakškārtas skaitliskajām vērtībām (3.2. tab.). Minēto nogulumu augšņu virskārtā katjonu apmaiņas kapacitātes skaitliskās vērtības savstarpēji būtiski neatšķiras.

Pētījuma rezultāti parādīja, ka augsnes katjonu apmaiņas kapacitātes izmaiņas ne vienmēr skaidri atspoguļo augsnes granulometriskā sastāva maiņu un līdz ar to ģeoloģisko nogulumu izcelsmi un litoloģisko sastāvu. Katjonu apmaiņas kapacitāti, sevišķi augsnes virskārtā, ietekmē arī veģetācija un augsnes veidošanās procesi.

Dažādu ģeoloģisko nogulumu augsnes minerālo slāņu (0–10 cm un 40–80 cm) īpašību raksturojošo parametru savstarpēja salīdzinājuma rezultāti

Table 3.2.

Results of comparison of characteristic parameters of soil mineral layer (0-10 cm and 40-80 cm) properties within different geological deposits

Ģeoloģiskie nogulumi	Granulometriskais sastāvs (%)			pH _{H₂O} vērtība	KAK (cmol kg ⁻¹)	Ekstrahejamie elementi (mg kg ⁻¹)								Apmaiņas elementi (cmol kg ⁻¹)				Reagējošie elementi (mg kg ⁻¹)		C _{org.} (mg kg ⁻¹)	N _{tot.} (mg kg ⁻¹)
	Smiltis	Māls	Putekļi			Ca	K	Mg	Fe	Mn	Na	P	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mn ²⁺	Al	Fe			
Eolie – Glaciofluvālie																					
0–10 cm	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*			
40–80 cm	n.b.	*	*	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.			
Eolie – Glaciēnie																					
0–10 cm	*	*	*	*	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	*	*	*	n.b.	*	*	*	*			
40–80 cm	*	*	*	*	*	*	*	*	n.b.	n.b.	*	*	*	n.b.	n.b.	*	*	n.b.			
Eolie – Glaciolinniskie																					
0–10 cm	*	*	*	*	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	*	*	*	n.b.	*	*	*	*			
40–80 cm	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.			
Baltijas ledus ezera – Glaciofluvālie																					
0–10 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	*	n.b.			
40–80 cm	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.			
Baltijas ledus ezera – Glaciēnie																					
0–10 cm	*	*	*	*	n.b.	*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	*	*	n.b.			
40–80 cm	*	*	*	*	*	*	*	*	n.b.	*	*	*	*	n.b.	n.b.	*	*	n.b.			
Baltijas ledus ezera – Glaciolinniskie																					
0–10 cm	*	*	*	*	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	n.b.			
40–80 cm	*	*	*	*	*	*	*	*	n.b.	*	*	*	*	n.b.	n.b.	*	*	n.b.			
Glaciofluvālie – Glaciēnie																					
0–10 cm	*	*	*	*	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.			
40–80 cm	*	*	*	*	n.b.	*	*	*	n.b.	*	*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.			
Glaciofluvālie – Glaciolinniskie																					
0–10 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*			
40–80 cm	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.			
Glaciolinniskie – Glaciēnie																					
0–10 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.			
40–80 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.			

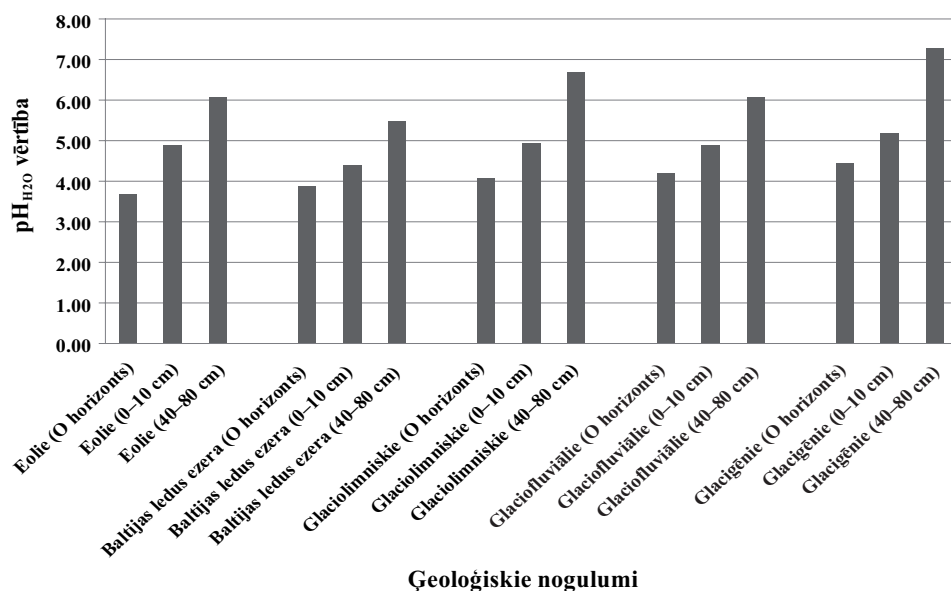
* – atšķirības starp ģeoloģiskajiem nogulumiem ir būtiskas ($p < 0,05$) pēc Tukey testa un Dunnett's T3 korekcijas.

n.b. – atšķirības starp ģeoloģiskajiem nogulumiem nav būtiskas.

Augsnes reakcija ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) un karbonātu saturs

Latvijas meža ekosistēmās nedzīvās zemsegas $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ mediāna atkarībā no augsnes cilmieža ģenēzes mainās robežās no 3,7 līdz 4,5. Visos pētītajos ģeoloģiskajos nogulumos līdz ar dziļumu augsnes reakcija ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) kļūst neitrālāka (3.2. att.). Visskābākie augsnes slāņi (O horizonts, kā arī minerālais virsējais slānis) konstatēti augsnēs, kas veidojušās uz eolajiem un Baltijas ledus ezera nogulumiem. Savukārt visaugstākās $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtības augšņu O horizontā un minerālā virsējā slānī ir augsnēs, kas veidojušās uz glacigēnajiem nogulumiem. Arī augsnes apakškārtā visaugstākās mediānas vērtības ir glacigēno un glaciolimnisko nogulumu augšņu apakškārtai ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ mediāna attiecīgi 7,3 un 6,7). Tas skaidrojams ar karbonātu klātbūtni (3.2. att.).

Savstarpēji salīdzinot ģeoloģisko nogulumu augšņu $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtības, tika konstatēts, ka starp dažādas izcelsmes ģeoloģiskajiem nogulumiem augsnes minerālā virskārtā nepastāv statistiski būtiskas atšķirības. Statistiski būtiski ($p < 0,05$) atšķiras tikai apakškārtas, ka veidojušās uz glacigēnajiem un eolajiem, kā arī Baltijas ledus ezera nogulumiem.



3.2. attēls. $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ mediānas izmaiņas dažādu ģeoloģisko nogulumu augsnes minerālā virsējā slānī un apakškārtā

Figure 3.2. Changes of $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ median of the mineral topsoil and subsoil layer within different geological deposits

Tāpat savstarpēji būtiski atšķiras arī Baltijas ledus ezera un glaciolimnisko nogulumu augsnes apakškārtā (3.2. tab.). Tas tikai parāda, ka ģeoloģiskie nogulumi mazāk ietekmē meža ekosistēmu augsnes reakciju augsnes virskārtā, izņemot gadījumus, kad tie satur karbonātus. Relatīvi lielāka nozīme augsnes reakcijas veidošanā šeit ir veģetācijai un augsnes veidošanās procesiem.

Ekstrahējamie elementi (Ca, K, Mg, Mn, Fe, P)

Ekstrahējamo elementu koncentrācija augsnē parasti ir saistīta ar nogulumu minerālu un granulometrisko sastāvu. Pētītajos vienas ģenēzes ģeoloģiskajos nogulumos ekstrahējamo elementu koncentrācijai ir raksturīgs relatīvi augsts variāciju diapazons (3.3. tab.). Būtiski atšķiras arī daudzu elementu koncentrācija starp nogulumu tiptiem. Kopumā mazākas ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mg, Mn, Fe) koncentrācijas konstatētas Baltijas ledus ezera, eolajos un glaciofluviālajos nogulumos, turpretim relatīvi augstākas šo elementu koncentrācijas ir glaciolimniskajos un glaciģēnajos nogulumos (3.3. tab.). Šeit ir arī lielāks māla un putekļu daļiņu daudzums (3.1. tab.).

Visās augsnēs (neatkarīgi no ģeoloģisko nogulumu ģenēzes) dziļāk esošajos slāņos, salīdzinot ar minerālo virskārtu, ir augstāka ekstrahējamā Mg, Mn un Fe koncentrācija. Atšķirīgas izpausmes ir novērojamas Ca un K saturam. Baltijas ledus ezera un glaciolimniskajos nogulumos, salīdzinot ar apakškārtu, augstāka ekstrahējamā Ca koncentrācija ir virsējā minerālā slānī. Savukārt virskārtā zemāka Ca koncentrācija ir glaciģēnajos, glaciofluviālajos un eolajos nogulumos. Ekstrahējamā K koncentrācija nedaudz augstāka ir augsnes minerālā virskārtā eolajos un Baltijas ledus ezera nogulumos (3.3. tab.). Kopējā tendence ir šāda: augsnēs, kas ir nabadzīgas ar bāziskajiem katjoniem, pateicoties vielu bioloģiskajai aprītei, Ca un K tiek koncentrēts augsnes virsējos slāņos, savukārt augsnēs, kuru cilmieži satur karbonātus, bāzisko katjonu vairāk ir augsnes apakškārtā.

Līdzīgi granulometriskajam sastāvam arī ekstrahējamo elementu satura ziņā augsnes apakškārtā starp dažādas ģenēzes nogulumiem pastāv būtiskas ($p < 0,05$) savstarpējas atšķirības. Šīs atšķirības tika konstatētas starp eolajiem, Baltijas ledus ezera un glaciofluviālajiem, glaciģēnajiem, glaciolimniskajiem nogulumiem, kā arī starp glaciofluviālajiem un glaciģēnajiem nogulumiem (3.2. tab.). Statistiski būtiski ($p < 0,05$) savstarpēji neatšķiras eolie nogulumi no Baltijas ledus ezera nogulumiem, glaciofluviālie nogulumi no glaciolimniskajiem nogulumiem, kā arī glaciģēnie nogulumi no glaciolimniskajiem nogulumiem.

Kā jau iepriekš tika atzīmēts, augsnes minerālais un granulometriskais sastāvs ir viens no nozīmīgākajiem faktoriem, kas ietekmē ekstrahējamo elementu koncentrāciju dažādos ģeoloģiskajos nogulumos. Vienīgi ekstrahējamo P un Na koncentrāciju tikpat kā neietekmē augsnes minerālu sastāvs. Promocijas darba literatūras sadaļā atzīmēts, ka P koncentrāciju augsnē vairāk ietekmē veģetācija un augsnes reakcija, kā arī karbonātu klātbūtne augsnē, bet relatīvi mazāk – augsnes granulometriskais sastāvs. Tas atspoguļojas arī iegūto rezultātu statistiskā analīzē, jo, kaut gan starp dažādas ģenēzes nogulumiem ir novērojamas mediānu skaitlisko vērtību atšķirības, tomēr lielākoties tās nav statistiski būtiskas.

3.3. tabula
Ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mg, Mn, Fe) koncentrācija (mg kg⁻¹) augsnes minerālajos slāņos (0–10 cm un 40–80 cm)
dažādos ģeoloģiskos nogulumos

Table 3.3.

Concentration of extractable elements (Ca, K, Mg, Mn, Fe) (mg kg⁻¹) of soil mineral layers (0-10 cm and 40-80 cm)
within different geological deposits

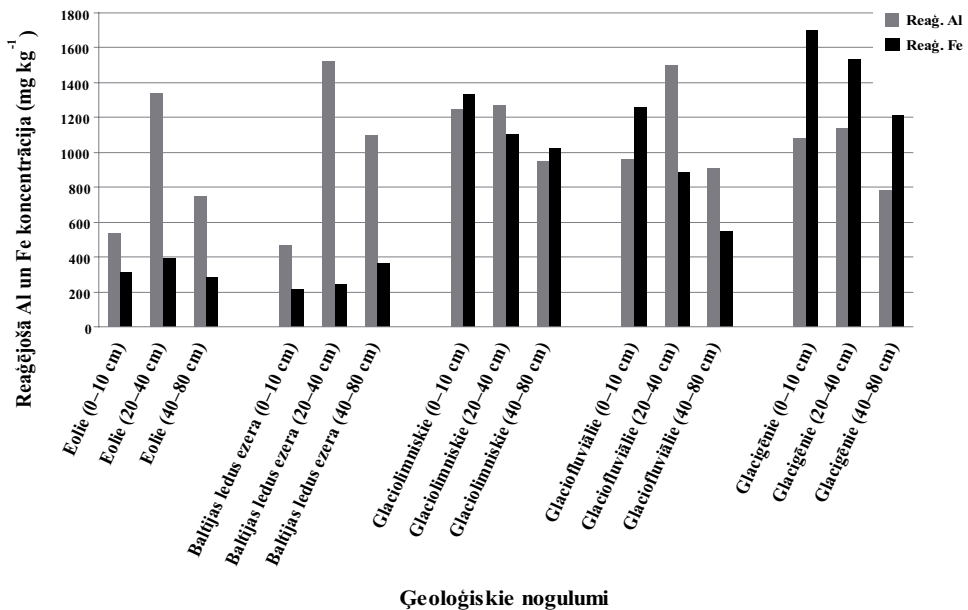
Ģeoloģiskie nogulumi	Ca			K			Mg			Mn			Fe		
	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.
Eolie															
0–10 cm	789	1432	318	279	201	194	131	119	105	44	61	16	1482	954	943
40–80 cm	398	221	452	182	122	190	140	50	142	67	66	45	2801	1532	2141
Baltijas ledus ezera															
0–10 cm	901	1540	382	262	151	257	127	112	71	12	9	10	887	851	615
40–80 cm	392	281	232	204	81	189	180	155	169	22	14	19	1864	863	1625
Glaciolimmniskie															
0–10 cm	4998	12149	1265	2166	3629	407	914	1011	519	122	168	63	7801	11576	3690
40–80 cm	6397	9727	1106	3415	4496	1411	3536	4480	1446	191	188	128	15008	16016	7252
Glaciofluvālie															
0–10 cm	1088	1587	427	474	609	303	466	805	118	108	114	55	2380	1323	2324
40–80 cm	5868	11509	578	771	854	398	1392	1848	781	142	108	90	6151	4147	4609
Glaciģēnie															
0–10 cm	3245	5571	664	1388	1229	1103	1539	1982	771	153	166	87	6741	5805	4523
40–80 cm	6191	6012	3558	2972	2050	2997	4457	2991	4084	264	173	232	15597	8124	15646

Salīdzinot ekstrahējamo elementu koncentrāciju atšķirības ar apmaiņas elementu koncentrāciju atšķirībām (3.2. tab.), redzams, ka ekstrahējamā K, Mg, Fe un Mn koncentrācija ģeoloģiskajos nogulumos (eolie, Baltijas ledus ezera, glaciofluviālie), kur pārsvarā ir smilts daļiņas, būtiski atšķiras no nogulumiem, kur relatīvi daudz ir māla un putekļu daļiņas (glacigēnie, glaciolimniskie).

Šajā gadījumā apmaiņas katjonu koncentrācijā minētās atšķirības nav tik izteiktas. Tas tikai parāda, ka ģeoloģiskais faktors vairāk ietekmē ekstrahējamo elementu daudzumu, nevis apmaiņas katjonu daudzumu augsnē.

Reagējošais Al un Fe

Augsnes šķīdumā esošo amorfo Al un Fe formu saturu parāda pētījumā noteiktā reagējošā Al un Fe koncentrācija. Šos rādītājus iespējams izmantot augsnes ģenēzes procesu (piemēram, podzolēšanās, izskalošanās, ieskalošanās un akumulācijas procesa) interpretācijā.



3.3. attēls. Reagējošā Al un Fe koncentrācijas mediāna dažādu ģeoloģisko nogulumu augšņu slāņos

Figure 3.3. Median concentration of reactive Al and Fe of soil layers within different geological deposits

Augsnes minerālā virsējā slānī zemākā reagējošā Al koncentrācija ir Baltijas ledus ezera un eolo nogulumu (attiecīgi 470 un 539 mg kg⁻¹) augsnēs, bet augstākā – glaciofluviālajos, glacigēnajos un glaciolimniskajos nogulumos (attiecīgi 961, 1079 un 1246 mg kg⁻¹). Augsnes apakškārtā zemākā reagējošā Al koncentrācija ir eolajos

un glaciģēnajos nogulumos (attiecīgi 744 un 785 mg kg⁻¹). Augstākā reaģējošā Al koncentrācija augsnes apakškārtā ir glaciofluviālajos, glaciolimniskajos un Baltijas ledus ezera nogulumos (attiecīgi 905, 947 un 1095 mg kg⁻¹) (3.3. att.). Eolajos un Baltijas ledus ezera nogulumos podzolēšanās procesa rezultātā novērojams būtisks Fe un sevišķi Al koncentrācijas pieaugums augsnes 20–40 cm slānī, kas morfoloģiski atbilst B horizontam. Reaģējošā Al koncentrācija, salīdzinot ar augsnes virsējo un apakšējo slāni, nedaudz augstāka 20–40 cm slānī ir arī glaciofluviālajos nogulumos (3.3. att.).

Reaģējošā Al un Fe koncentrācija dažādas ģenēzes nogulumos savstarpēji statistiski būtiski atšķiras galvenokārt augsnes minerālā virskārtā, nevis apakškārtā (3.2. tab.). Tas parāda organisko skābju nozīmi Al un Fe migrācijā. Glaciolimniskajos, glaciofluviālajos un glaciģēnajos nogulumos, kur reaģējošā Al un Fe augsnes cilmiezī ir daudz vairāk nekā eolajos un Baltijas ledus ezera nogulumos, pateicoties zemajam pH, Al un Fe ir tikuši iznesti no augsnes virskārtas, un to koncentrācija būtiski palielinās B horizontā (3.3. att.). Tomēr tas tik spilgti neizpaužas glaciolimniskajos, glaciofluviālajos un glaciģēnajos nogulumos.

Izmantojot vienfaktora dispersijas analīzi, pētot augšņu fizikālo un ķīmisko īpašību mainību atkarībā no ģeoloģiskajiem nogulumiem, minerālā virsējā slānī šādiem rādītājiem: pH_{H₂O}; piesātinājumam ar bāzēm; ekstrahējamajā Ca, Na, P saturam; apmaiņas Na⁺, Al³⁺, Fe³⁺ saturam netika konstatētas statistiski būtiskas ($p < 0,05$) atšķirības starp atšķirīgiem ģeoloģiskajiem nogulumiem (3.2. tab.).

Minerālaugsnes 40–80 cm slānī būtiskas atšķirības netika konstatētas šādiem rādītājiem: piesātinājumam ar bāzēm; reaģējošajam Al saturam; apmaiņas Na⁺, Mn²⁺, Al³⁺, Fe³⁺ saturam (3.2. tab.).

Tas norāda, ka augsnes virskārtā, pateicoties augsnes veidošanās procesiem un to izpausmēm, kā arī veģetācijai, samazinās ģeoloģisko nogulumu nozīme, tāpēc daudzi augsni raksturojošie ķīmiskie un fizikālie rādītāji atkarībā no dažādas izcelsmes ģeoloģiskajiem nogulumiem būtiski neatšķiras. Minētās atšķirības nonivelē arī promocijas darbā izmantotā pētījumu metodika – augsnes paraugi atbilstoši meža monitoringa (*ICP Forest*) metodikai tika ņemti un analizēti pa augsnes slāņiem, nevis augsnes ģenētiskajiem horizontiem.

Būtiskas savstarpējās atšķirības pētītajiem fizikālajiem un ķīmiskajiem rādītājiem netika konstatētas starp relatīvi vieglāka granulometriskā sastāva ģeoloģiskajiem nogulumiem (eolie, Baltijas ledus ezera), kā arī starp relatīvi smagāka granulometriskā sastāva ģeoloģiskajiem nogulumiem (glaciolimniskie, glaciģēnie). Tomēr starp pirmo un pēdējo iepriekš minēto ģeoloģisko nogulumu grupu fizikālās un ķīmiskās īpašības atšķiras, jo iepriekš minētie ģeoloģiskie nogulumi atšķiras pēc izcelsmes un veidošanās laika, kā arī granulometriskā un minerālā sastāva, kas atspoguļojas augšņu fizikālajās un ķīmiskajās īpašībās. Kopumā šie faktori ir nozīmīgākie un nosaka arī augsnes veidošanās procesus un augšņu auglību, no kā savukārt ir atkarīga barības vielām nabadzīgu un bagātu mežaudžu izplatība.

3.3.2. Augsnes fizikālās un ķīmiskās īpašības un mežaudzes sastāvs

Līdzīgi kā ģeoloģiskie nogulumi, arī mežaudzes sastāvs atstāj būtiski ietekmi uz augsnes veidošanās procesiem un morfoloģiju, kā arī augsnes fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām.

Augsnes granulometriskais sastāvs

Mežaudzes sastāvs neietekmē augsnes granulometrisko sastāvu, bet tas ietekmē ķīmisko sastāvu. Šādā aspektā arī tiek apskatītas minētās sakarības. Pēc augsnes granulometriskā sastāva satura visviendabīgākie meža tipi ir sausieņi – sils, mētrājs, lāns, kur dominē smilts daļiņas, kuru daudzums augsnes slāņos pārsniedz 93%. Arī damaksnī ir salīdzinoši augsts smilts daļiņu īpatsvars ($> 82\%$). Vismazāk smilts daļiņu ir vērī (augšnes virsējā minerālā slāņa mediāna ir 54%, bet apakškārtā – 47%). No pētītajiem meža tiptiem augstākais māla (mediāna – 21%) un putekļu (mediāna – 29%) daļiņu saturs ir vērī apakškārtā. Salīdzinoši augsts māla un putekļu daļiņu saturs ir arī slapjā vērī un šaurlapju ārenī (3.4. tab.).

Silam, mētrājam un lānam raksturīgs zemākais granulometriskā sastāva satura variāciju diapazons, bet augstākais variāciju diapazons ir vērī, slapjā vērī un šaurlapju ārenī (3.4. tab.).

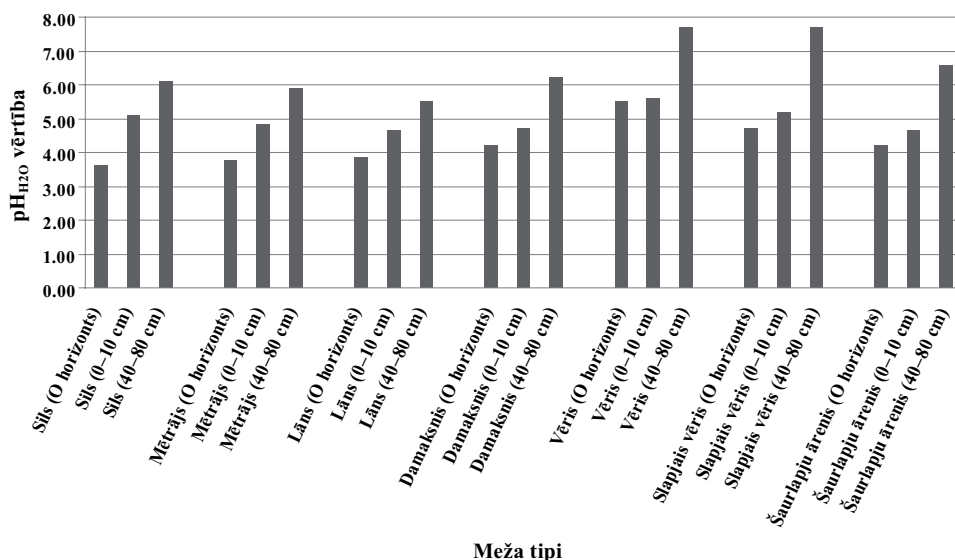
Kopumā augsnes granulometriskā sastāva ziņā starp lielāko daļu meža tipu pastāv statistiski būtiskas atšķirības (3.6. tab.), kas parāda, ka Latvijas meža tipoloģija relatīvi labi raksturo augsnes granulometrisko sastāvu.

Pateicoties viendabīgam augsnes granulometriskajam sastāvam, statistiski būtiski ($p < 0,05$) neatšķiras sils no mētrāja un lāna, kā arī tādu mežu granulometriskais sastāvs, kuri ir samērā bagāti ar barības vielām, piemēram, damaksnis no slapjā vēra un šaurlapju āreņa, kā arī slapjais vēris no vēra un šaurlapju āreņa.

Augsnes reakcija ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$)

Augsnes reakcija nedzīvās zemsegas horizontā silā, mētrājā, lānā, damaksnī un šaurlapju ārenī ir stipri skāba ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ mediāna attiecīgi no 3,6 līdz 4,2), savukārt slapjā vērī un arī vērī – vidēji skāba (mediāna attiecīgi 4,7 un 5,5) (3.4. att.). Augšnes virsējā minerālā slānī lānā, šaurlapju ārenī, damaksnī un mētrājā augsnes reakcija ir stipri skāba, bet silā, slapjā vērī un vērī – vidēji skāba (3.4. att.). Tomēr statistiski būtiski augsnes $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ atšķiras tikai vērī no mētrāja, lāna, damakšņa, slapjā vēra un šaurlapju āreņa (3.6. tab.).

Pētīto augšņu reakcija 40–80 cm dziļā slānī mētrājā ir vidēji skāba (mediāna – 5,5), bet lānā, silā, damaksnī un šaurlapju ārenī – vāji skāba (mediāna attiecīgi 5,9, 6,1, 6,2 un 6,6) un vērī, slapjā vērī – vāji bāziska ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ mediāna ir 7,7). Eitrofo mežu tipu (vēris, slapjais vēris) augsnes apakškārtas $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ statistiski būtiski atšķiras no oligotrofo (sils, mētrājs) un mezotrofo (lāns, damaksnis) mežu tipu augsnes apakškārtas reakcijas (3.6. tab.). Statistiski būtiski neatšķiras oligotrofo meža tipu (sils un mētrājs) un mezotrofo meža tipu (lāns, damaksnis un šaurlapju ārenis) augšņu reakcija, kā arī eitrofo mežu tipu (slapjais vēris un vēris) augšņu $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$.



3.4. attēls. pH_{H₂O} mediānas izmaiņas dažādu meža tipu augšņu slāņos

Figure 3.4. Changes of pH_{H₂O} median of soil layers in different forest site types

Piesātinājuma pakāpe ar bāzēm

Zema piesātinājuma pakāpe ar bāzēm ir oligotrofo meža tipu (sils, mētrājs) augsnēs, kur minerālā virsējā slānī šī rādītāja mediāna attiecīgi ir 5 un 25%, bet apakškārtā – 51 un 41%, kā arī atsevišķu mezotrofo mežu tipu (lāns (5%), damakšnis (18%), šaurlapju ārenis (27%)) augšņu minerālā virsējā slānī. Augsnes apakškārtā zemākā piesātinājuma pakāpe ar bāzēm ir lānā (mediāna – 37%) (3.4. tab.). Augstākā piesātinājuma pakāpe ar bāzēm ir Latvijas eitrofo meža tipu (vēris un slapjais vēris) augsnēs, kur minerālā virsējā slānī mediāna attiecīgi ir 44 un 46%, savukārt apakškārtā attiecīgi – 69 un 91%. Augsnes apakškārtā salīdzinoši augsts piesātinājums ar bāzēm ir arī mezotrofajos meža tipos (damakšnis un šaurlapju ārenis), kur minētā rādītāja mediāna attiecīgi ir 63 un 78%.

Savstarpēji salīdzinot dažādu meža tipu augšņu piesātinājuma pakāpes ar bāzēm, tika konstatēts, ka virsējā minerālā slānī savstarpēji būtiski ($p < 0,05$) atšķiras lāns no damakšņa, vēra un slapjā vēra, kuri, savukārt, savā starpā būtiski neatšķiras (3.6. tab.). Interesanti, ka, neskatoties uz relatīvi zemo piesātinājuma pakāpi ar bāzēm silā un mētrājā, pētījumā netika konstatētas statistiski būtiskas atšķirības starp minēto meža tipu augsnēm un eitrofo meža tipu augsnēm. Šajā gadījumā tomēr nozīmīga ir relatīvi augstā piesātinājuma pakāpes standartnovirze, kas silā un mētrājā attiecībā pret vidējo vērtību ir augstāka nekā lānā.

3.4. tabula
Dažādu meža tipu augsnes minerālo slāņu (0–10 cm un 40–80 cm) īpašību raksturojošo parametru (granulometriskais sastāvs, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, piesātinājums ar bāzēm, katjonu apmaiņas kapacitāte) raksturojums

Table 3.4.
Characterization of soil mineral layers (0–10 cm and 40–80 cm) characteristic properties (soil texture, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, base saturation, cation exchange capacity) in different forest site types

Mežu tipi	Smiltis (%)		Māls (%)		Putekļi (%)		$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtība		Piesātinājums ar bāzēm (%)		Katjonu apmaiņas kapacitāte (cmol kg^{-1})	
	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Vid.	St. nov.	Vid.	St. nov.
Sils												
O horizonts	—	—	—	—	—	—	3,57	0,25	3,60	—	—	—
0–10 cm	94	3	93	4	2	2	4,93	0,38	5,10	13	16	5
40–80 cm	98	2	99	2	1	0	6,20	0,17	6,10	39	33	51
Mētrājs												
O horizonts	—	—	—	—	—	—	3,72	0,33	3,75	—	—	—
0–10 cm	94	5	95	2	2	4	4,77	0,23	4,85	26	13	25
40–80 cm	98	1	98	1	1	1	5,75	0,57	5,90	40	22	41
Lāns												
O horizonts	—	—	—	—	—	—	3,88	0,34	3,85	—	—	—
0–10 cm	93	3	94	2	1	2	4,72	0,51	4,65	9	10	5
40–80 cm	93	7	96	1	2	1	5,65	0,50	5,50	42	37	37
Damaksnis												
O horizonts	—	—	—	—	—	—	4,30	0,48	4,20	—	—	—
0–10 cm	82	13	82	4	3	15	4,78	0,59	4,70	31	24	18
40–80 cm	82	14	88	6	6	4	6,30	0,82	6,20	61	29	63
Vēris												
O horizonts	—	—	—	—	—	—	5,23	0,76	5,50	—	—	—
0–10 cm	52	24	54	19	16	16	5,95	1,01	5,60	46	28	44
40–80 cm	43	32	47	28	23	21	7,18	0,99	7,70	63	37	69
Slapjais vēris												
O horizonts	—	—	—	—	—	—	4,82	0,63	4,70	—	—	—
0–10 cm	69	28	78	14	19	8	5,70	0,91	5,20	52	32	46
40–80 cm	71	28	78	14	21	5	7,49	0,65	7,70	82	21	91
Šaurlapiju ārenis												
O horizonts	—	—	—	—	—	—	4,35	0,69	4,20	—	—	—
0–10 cm	76	19	81	4	2	3	4,98	0,79	4,65	31	25	27
40–80 cm	72	27	80	14	19	8	6,81	0,97	6,55	71	31	78

Savstarpēji salīdzinot augšņu apakškārtas piesātinājuma pakāpi ar bāzēm, statistiski būtiskas atšķirības starp meža tipiēm netika konstatētas. Tas liecina, ka augsnes apakškārtas piesātinājuma pakāpe ar bāzēm nav vienīgais kritērijs meža tipu noteikšanā un ka viens un tas pats meža tips var atrasties uz cilmiežiem, kas satur atšķirīgu apmaiņas bāzisko katjonu daudzumu. Meža tipi saistībā ar bāzisko katjonu daudzumu augsnē ir nedaudz ciešāk saistīti ar to daudzumu augsnes minerālā virsējā slānī, kur statistiski tiek nodalīts lāns no damakšņa, vēra un slapjā vēra. Kopumā vērtējot augšņu piesātinājuma pakāpi ar bāzēm, secināms, ka meža tipi nav cieši saistīti ar augsnes piesātinājuma pakāpi ar bāzēm, izņemot, iespējams, gāršu, kas šajā pētījumā netika pietiekamā skaitā apsekota, tāpēc gāršas dati nav iekļauti šajā statistiskajā salīdzinājumā.

Katjonu apmaiņas kapacitāte

Katjonu apmaiņas kapacitāte raksturo maksimālo augsnē saistīto katjonu daudzumu, ko noteiktos apstākļos augsnes cietā fāzē var apmainīt pret šķīdumā esošajiem katjoniem. Apakškārtā katjonu apmaiņas kapacitāte augsta ir vērī (mediāna attiecīgi 17 cmol kg⁻¹). Virsējā minerālā slānī šis rādītājs ir visaugstākais eitrofos meža tipos – vērī un slapjā vērī, kur mediāna attiecīgi ir 26 un 24 cmol kg⁻¹.

Zems šis rādītājs ir oligotrofo meža tipu (sila un mētrāja) augsnēs, kā arī lānā. Šo meža tipu augšņu minerālā virskārtā mediāna ir robežās no 6,0 līdz 10,0 cmol kg⁻¹, savukārt apakškārtā šis rādītājs ir zemāks (mediānas attiecīgi ir 4,0, 5,0 un 4,0 cmol kg⁻¹) (3.4. tab.).

Katjonu apmaiņas kapacitātes ziņā statistiski būtiskas ($p < 0,05$) savstarpējas atšķirības augsnes minerālā virsējā slānī konstatētas starp silu un slapjo vērī, kā arī lānu un damakšni. Savukārt vēris atšķiras no sila, mētrāja, lāna un damakšņa, kuri savā starpā būtiski neatšķiras (3.6. tab.). Slapjais vēris augsnes apakškārtā būtiski atšķiras no mētrāja un lāna, savukārt mētrājs – no vēra un šaurlapju āreņa.

Iegūtie rezultāti parāda, ka piesātinājuma pakāpe ar bāzēm un katjonu apmaiņas kapacitāte augsnes minerālā apakškārtā dažādos mežu tipos ir atkarīga galvenokārt no ģeoloģisko nogulumu izcelsmes un sastāva, savukārt augsnes minerālā virsējā slānī šie rādītāji būtiski augstāki ir eitrofos mežu tipos (vērī un slapjā vērī). To, iespējams, nosaka organisko vielu daudzuma pieaugums šajos horizontos, kā arī vielu bioloģiskā aprīte.

Organiskais ogleklis

C_{org.} saturs Latvijas meža ekosistēmās pētīto augšņu profilos līdz ar dziļumu samazinās (3.5. tab.). Augstākā C_{org.} koncentrācija meža augsnēs ir nedzīvās zemsegas horizontā (313,65–432,50 g kg⁻¹), savukārt virsējā minerālā slānī tā strauji samazinās atkarībā no meža tipa līdz 12,60–54,30 g kg⁻¹, bet augsnes apakškārtā ir robežās no 1,00 līdz 5,60 g kg⁻¹ (3.5. tab.).

C_{org.} zemākā koncentrācija oligotrofo meža tipu augsnēs nedzīvās zemsegas horizontā ir silā (mediāna ir 358,90 g kg⁻¹), bet relatīvi augstāka – mētrājā (mediāna ir 407,70 g kg⁻¹). Pateicoties organisko vielu mineralizācijas procesiem, vērī nedzīvās zemsegas horizontā C_{org.} koncentrācija ir relatīvi mazāka nekā oligotrofo mežu tipu

augsnēs (mediāna ir 313,65 g kg⁻¹). Saprotams, ka augsta C_{org.} koncentrācija (mediāna ir 432,50 g kg⁻¹) ir nosusinātā šaurlapju ārenī (3.5. tab.).

Zemākā C_{org.} koncentrācija minerālā virsējā slānī, kā arī apakškārtā ir oligotrofo meža tipu – sila un mētrāja – augsnēs (mediāna virskārtā attiecīgi ir 12,6 un 14,75 g kg⁻¹, bet apakškārtā – 1,00 un 2,90 g kg⁻¹). Augstākais šis rādītājs ir eitrofo meža tipu – vēra un slapjā vēra – augsnēs, kur minerālā virsējā slānī mediāna ir attiecīgi 34,90 un 54,30 g kg⁻¹, savukārt apakškārtā attiecīgi 3,55 un 5,60 g kg⁻¹.

3.5. tabula

C_{org.} un N_{kop.} koncentrācija (g kg⁻¹) O horizontā un augsnes minerālos slāņos
(0–10 cm un 40–80 cm) dažādos meža tipos

Table 3.5.

C_{org.} and N_{tot.} (g kg⁻¹) concentration of O horizon and soil mineral layers
(0-10 cm and 40-80 cm) in different forest site types

Meža tipi	C _{org.}			N _{kop.}		
	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.
Sils						
O horizonts	348,43	97,42	358,90	12,87	6,09	10,40
0–10 cm	11,20	3,42	12,60	0,33	0,15	0,30
40–80 cm	1,03	0,15	1,00	0,10	0,10	0,10
Mētrājs						
O horizonts	391,18	48,71	407,70	12,27	4,54	12,25
0–10 cm	17,98	10,33	14,75	0,53	0,41	0,50
40–80 cm	3,18	2,00	2,90	0,12	0,08	0,10
Lāns						
O horizonts	379,05	52,62	380,80	13,20	4,43	13,00
0–10 cm	21,90	15,16	16,35	0,65	0,21	0,55
40–80 cm	3,08	2,18	2,60	0,07	0,08	0,05
Damaksnis						
O horizonts	358,32	106,21	365,20	14,48	4,70	15,95
0–10 cm	38,01	58,03	21,90	1,60	2,11	1,00
40–80 cm	3,72	2,47	3,60	0,18	0,12	0,20
Vēris						
O horizonts	317,33	155,90	313,65	15,00	6,95	14,45
0–10 cm	34,24	12,10	34,90	2,33	1,02	2,35
40–80 cm	4,54	3,00	3,55	0,33	0,16	0,30
Slapjais vēris						
O horizonts	353,78	128,14	398,80	17,82	5,48	18,20
0–10 cm	48,33	25,01	54,30	2,63	1,46	2,30
40–80 cm	5,01	2,51	5,60	0,27	0,17	0,20
Šaurlapju ārenis						
O horizonts	394,32	94,14	432,50	18,67	5,43	18,20
0–10 cm	94,03	127,94	26,80	3,74	4,58	1,65
40–80 cm	4,64	3,12	3,95	0,23	0,18	0,20

Statistiski analizējot C_{org} satura savstarpējās atšķirības starp meža tipu augsnēm, tika konstatēts, ka nedzīvās zemsegas horizonts pēc C_{org} satura augšnes horizontā dažādos meža tipos būtiski neatšķiras. Savukārt C_{org} saturs virsējā minerālā slānī silā atšķiras no C_{org} satura šajā slānī slapjā vērī un šaurlapju ārenī. Arī augšnes apakškārtā C_{org} saturs silā augsnēs atšķiras no iepriekš minēto meža tipu augsnēm. Turklāt šī meža tipa augšnes atšķiras arī no damakšņa un vēra augsnēm (3.6. tab.).

Kopējais slāpeklis

N_{kop} saturs tāpat kā C_{org} saturs pētītajos augšnes profilos līdz ar dziļumu samazinās (3.5. tab.). Tas liecina par iespējamo mežaudžu ietekmi uz augstāku šo pētīto rādītāju saturu augšnes virskārtā.

Augstākais N_{kop} saturs meža tipos ir raksturīgs nedzīvās zemsegas horizontā, bet augšnes virsējā minerālā slānī tas strauji samazinās. Augšnes apakškārtā (40–80 cm) N_{kop} koncentrācija mediāna pētītajos meža tipos ir robežās no 0,05 līdz 0,30 g kg⁻¹ (3.5. tab.).

Līdzīgi C_{org} saturam arī N_{kop} saturs ir zems sausieņu oligotrofo meža tipu (sila, mētrāja), kā arī lāna augsnēs, kur nedzīvās zemsegas horizonta mediāna attiecīgi ir 13,00 g kg⁻¹. Augšnes virsējā minerālā slānī N_{kop} koncentrācijas mediāna iepriekš minētajos meža tipos attiecīgi ir šāda: silā – 0,30, mētrājā – 0,50 un lānā – 0,55 g kg⁻¹ (3.5. tab.). Augšnes apakškārtā N_{kop} ir ļoti maz (3.5. tab.).

N_{kop} daudzums ir lielāks eitrofo meža tipu (vēra un slapjā vēra) augsnēs, kur slapjā vērī nedzīvās zemsegas horizontā šī rādītāja mediāna ir 18,20 g kg⁻¹. Tikpat augsta N_{kop} koncentrācija ir šaurlapju ārenī. Starp pētītajām meža augsnēm arī minerālā virsējā slānī vērī un slapjā vērī tika konstatētas augstākās N_{kop} koncentrācijas.

Analizējot N_{kop} satura būtiskas ($p < 0,05$) savstarpējās atšķirības starp meža tipi, tika konstatēts (3.6. tab.), ka minerālā virsējā slānī vērī, slapjā vērī un šaurlapju ārenī N_{kop} koncentrācija atšķiras no N_{kop} koncentrācijas silā. Savukārt silā N_{kop} koncentrācija šajā slānī būtiski neatšķiras no N_{kop} koncentrācijas mētrājā un lānā. Līdzīgas statistiski būtiskas atšķirības tika noteiktas arī starp silu un damakšni.

Savukārt apakškārtā N_{kop} koncentrācija vērī būtiski atšķiras no N_{kop} koncentrācijas mētrājā, lānā un damakšnī.

C_{org} un N_{kop} saturs augsnē ir cieši saistīts ar mežaudzes sastāvu un tās veidojošām nobirām. Lielākā daļa organisko vielu uzkrājas augšnes nedzīvās zemsegas horizontos un nosaka šajos horizontos relatīvi augstu C_{org} un N_{kop} koncentrāciju. Pateicoties labvēlīgākiem vides apstākļiem, organisko augu atlieku mineralizācijas process straujāk norisinās eitrofos meža tipos, tāpēc vērī un slapjā vērī augšnes virsējā minerālā slānī ir vairāk C_{org} , salīdzinot ar mezotrofiem un oligotrofiem meža tipi. Vērtējot statistiski būtiskās atšķirības pēc iepriekš minētajiem augšnes auglības rādītājiem, redzams, ka lāna augšnes ir līdzīgākas silā un mētrāja, nevis vēra augsnēm. Tas ļauj izvirzīt hipotēzi, ka lāna augšnes vairāk atbilst oligotrofo meža tipu augsnēm, bet mazāk – mezotrofo meža tipu augsnēm.

O horizonta un augsnes minerālo slāņu (0–10 cm un 40–80 cm) fizikālo un ķīmisko īpašību raksturojošo parametru savstarpēja salīdzinājuma rezultāti dažādos meža tipos

Table 3.6.

Results of physical and chemical properties characteristic parameters comparison of O horizon and soil mineral layers (0–10 cm and 40–80 cm) in different forest site types

Meža tipi	Granulometriskais sastāvs (%)			pH _{u,0} vērtība	PB (%)	KAK (cmol kg ⁻¹)	Ekstrahējamie elementi (mg kg ⁻¹)							Apmaiņas elementi (cmol kg ⁻¹)				Reagējošie elementi (mg kg ⁻¹)		C _{org.} (g kg ⁻¹)	N _{tot.} (g kg ⁻¹)
	Smiltis	Māls	Putekļi				Ca	K	Mg	Fe	Mn	Na	P	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Al	Fe		
Sils – Mētrājs																					
O horizonts				n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm				n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
40–80 cm				n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Sils – Lāns																					
O horizonts				n.b.	—	—	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm				n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
40–80 cm				n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Sils – Damaksnis																					
O horizonts				n.b.	—	—	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm				*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*
40–80 cm				*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Sils – Vēris																					
O horizonts				*	—	—	n.b.	*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm				*	n.b.	*	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*
40–80 cm				n.b.	*	*	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Sils – Slapjais vēris																					
O horizonts				*	—	—	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm				n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*
40–80 cm				n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Sils – Šaurlapju ārenis																					
O horizonts				n.b.	—	—	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm				n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*
40–80 cm				n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

* – atšķirības starp meža tipiem ir būtiskas ($p < 0,05$) pēc Tukey testa un Dunnett's T3 korekcijas.

n.b. – atšķirības starp meža tipiem nav būtiskas.

3.6. tabula (1. turpinājums)

Table 3.6.

Meža tipi	Granulometriskais sastāvs (%)			pH _{h₂O} vērtība	PB (%)	KAK (cmol kg ⁻¹)	Ekstrahējamie elementi (mg kg ⁻¹)							Apmaiņas elementi (cmol kg ⁻¹)				Reagējošie elementi (mg kg ⁻¹)		C _{org.} (g kg ⁻¹)	N _{kop.} (g kg ⁻¹)	
	Smiltis	Māls	Putekļi				Ca	K	Mg	Fe	Mn	Na	P	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Al	Fe				
Mētrājs – Lāns																						
O horizonts					—																	
0–10 cm			*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
40–80 cm			n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Mētrājs – Damaksnis																						
O horizonts					—				*	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm		*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
40–80 cm		*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Mētrājs – Vēris																						
O horizonts					—			*	*	*	*	*	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm		*	*	*	n.b.	*	*	*	*	*	*	*	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
40–80 cm		*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Mētrājs – Slapjais vēris																						
O horizonts					—		*	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm		n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
40–80 cm		n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Mētrājs – Šaurlapju ārenis																						
O horizonts					—		n.b.	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm		n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
40–80 cm		n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Lāns – Damaksnis																						
O horizonts					—		n.b.	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm		*	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
40–80 cm		n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Lāns – Vēris																						
O horizonts					—		*	*	*	*	*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
40–80 cm		*	n.b.	*	n.b.	n.b.	*	*	*	*	*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Lāns – Slapjais vēris																						
O horizonts					—		*	n.b.	*	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
0–10 cm		n.b.	*	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
40–80 cm		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Table 3.6.

Meža tipi	Granulometriskais sastāvs (%)			pH _{H₂O} vērtība	PB (%)	KAK (cmol kg ⁻¹)	Ekstrahējamie elementi (mg kg ⁻¹)								Apmaiņas elementi (cmol kg ⁻¹)			Reagējošie elementi (mg kg ⁻¹)		C _{org} (g kg ⁻¹)	N _{tot} (g kg ⁻¹)
							Ca	K	Mg	Fe	Mn	Na	P	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Al	Fe		
	Smiltis	Māls	Putekļi																		
Lāns – Šaurlapju ārenis																					
O horizonts																					
0–10 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	—	—	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
40–80 cm	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	
Damaksnis – Vēris																					
O horizonts																					
0–10 cm	*	*	*	*	—	—	n.b.	n.b.	*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
40–80 cm	*	*	*	*	n.b.	n.b.	*	*	*	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	
Damaksnis – Slapjais vēris																					
O horizonts																					
0–10 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	—	—	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
40–80 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Damaksnis – Šaurlapju ārenis																					
O horizonts																					
0–10 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	—	—	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
40–80 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Vēris – Slapjais vēris																					
O horizonts																					
0–10 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	—	—	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
40–80 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Vēris – Šaurlapju ārenis																					
O horizonts																					
0–10 cm	n.b.	*	n.b.	n.b.	—	—	n.b.	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
40–80 cm	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	*	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	
Slapjais vēris – Šaurlapju ārenis																					
O horizonts																					
0–10 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	—	—	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
40–80 cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	

* – atšķirības starp meža tipiem ir būtiskas ($p < 0,05$) pēc Tukey testa un Dunnett's T3 korekcijas.

n.b. – atšķirības starp meža tipiem nav būtiskas.

Ekstrahējamie elementi (Ca, K, Mg, Mn, Fe)

Mazāks ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mg, Mn, Fe) saturs ir oligotrofo sausieņu meža tipu (sila un mētrāja) un mezotrofā meža tipa (lāna) augsnēs. Augsta šo elementu koncentrācija ir meža tipos, kas veidojušies uz relatīvi smagāka granulometriskā sastāva augsnēm, piemēram, eitrofos meža tipos (vērī un slapjā vērī) un šaurlapju ārenī (3.7. tab.).

Ģeoloģisko nogulumu ietekmes izpēte uz ekstrahējamo elementu saturu augsnē parādīja, ka to nosaka nogulumu ģenēze, konkrēti – to minerālais un granulometriskais sastāvs. Tomēr, kā rāda minēto elementu koncentrācijas dažādos augšnes slāņos, būtiska nozīme ir arī mežaudzes ietekmei, kas piedalās ekstrahējamo elementu migrācijā un nodrošina to akumulāciju nedzīvās zemsegas horizontā un augšnes minerālā virsējā slānī. Nedzīvās zemsegas horizontā visos meža tipos, izņemot vēri un šaurlapju āreni, ir augstākais ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mn) saturs augšnes profilā. Vērī līdz ar dziļumu pieaug Ca, K un Mg saturs, savukārt šaurlapju ārenī līdz ar dziļumu palielinās K un Mg saturs. Mg saturs līdz ar dziļumu pieaug arī damaksnī, vērī un slapjā vērī. Visos pētīto meža tipu augšņu profilos līdz ar dziļumu palielinās Fe saturs (3.7. tab.).

Ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mg, Mn, Fe) saturam meža tipos raksturīga relatīvi augsta standartnovirze (3.7. tab.). Tas tikai liecina, ka viena meža tipa augšnes ķīmiskais sastāvs var būt ļoti atšķirīgs. To apliecina arī fakts, ka starp lielāko daļu meža tipu, balstoties uz ekstrahējamo elementu saturu augsnē, sevišķi minerālajos slāņos, netika konstatētas statistiski būtiskas atšķirības.

Statistiski būtiskās ($p < 0,05$) (3.6. tab.) atšķirības ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mg, Mn, Fe) saturā augšnes nedzīvās zemsegas horizontos tika konstatēts starp šādiem meža tiptiem:

- sils atšķiras no lāna (pēc Mg satura), damakšņa (pēc Mg satura), vēra (pēc K, Mg, Fe, Mn satura), slapjā vēra (pēc Ca, Mg satura), šaurlapju āreņa (pēc Ca, Mg satura);
- mētrājs atšķiras no damakšņa (pēc Mg, Mn satura), vēra (pēc K, Mg, Fe, Mn satura), slapjā vēra (pēc Ca, Mg satura), šaurlapju āreņa (pēc Mg satura);
- lāns atšķiras no vēra (pēc K, Mg, Fe, Mn satura) un slapjā vēra (pēc Ca, Mg satura);
- damaksnis atšķiras no vēra (pēc Mg un Fe satura) un slapjā vēra (pēc Ca satura);
- vēris atšķiras no šaurlapju āreņa (pēc Fe satura).

Interesanti, ka starp vairumu meža tipu augšņu statistiski būtiskas atšķirības novērojamas Mg saturā. Iespējams, ka tas izskaidrojams ar relatīvi nelielo Mg koncentrācijas standartnovirzi viena meža tipa augsnēs.

Augšnes minerālajos slāņos – kā virskārtā, tā arī apakškārtā – lielākās daļas ekstrahējamo elementu saturs vērī atšķiras no mētrāja un lāna (3.6. tab.), kā arī no šaurlapju āreņa. Iepriekš tika izvirzīta hipotēze, ka lāna augšnes ķīmiskais sastāvs vairāk atbilst oligotrofiem meža tiptiem, bet datu statistiskā apstrāde parādīja, ka augšnes minerālajos slāņos lānā un mētrājā neviena pētītā ekstrahējamā elementa saturs statistiski būtiski neatšķiras. Savukārt augšnes Mg saturs statistiski būtiski atšķiras lāna un damakšņa minerālā virsējā slānī, bet apakškārtā atšķirīgs ir K un Fe saturs. Ca un Mg saturs atšķirīgs ir lāna un slapjā vēra minerālajos slāņos, turklāt minerālajā virsējā slānī būtiski atšķiras arī K saturs šo meža tipu augsnēs.

Kopumā ekstrahējamo elementu saturā augsnēs būtiskas savstarpējas atšķirības nepastāv starp oligotrofajiem meža tipiēm (silu un mētrāju), arī starp mētrāju un lānu, kā arī starp mezotrofajiem meža tipiēm (damaksnī un šaurlapju ārenī).

Rezultāti rāda, ka augsnes virsējos slāņos ekstrahējamie elementi no augsnes cilmieža nonāk mežaudžu ietekmes rezultātā gan ar nobirām, gan arī sakņu darbības rezultātā. Šajā gadījumā nav maznozīmīga arī mežaudzē dominējošo koku sugu ietekme.

Apmaiņas elementi (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+)

Tāpat kā ekstrahējamo elementu saturs, arī apmaiņas elementu saturs līdz ar dziļumu pētīto meža tipu augšņu profilos samazinās, izņemot vēri, kur augsnē līdz ar dziļumu palielinās apmaiņas Ca^{2+} saturs. Kopumā zemākais apmaiņas elementu (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) saturs ir oligotrofo meža tipu (sila un mētrāja) augsnēs, bet augstākās to koncentrācijas ir eitrofo meža tipu (vēra un slapjā vēra) augsnēs (3.8. tab.).

3.8. tabula

Apmaiņas elementu (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) koncentrācija (cmol kg^{-1}) O horizontā un minerālajos slāņos (0–10 cm un 40–80 cm) dažādos meža tipos

Table 3.8.

Exchangeable elements (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) concentration (cmol kg^{-1}) of O horizon and soil mineral layers (0–10 cm and 40–80 cm) in different forest site types

Meža tipi	Ca^{2+}			Mg^{2+}			K^+		
	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.	Vid.	St. nov.	Med.
Sils									
O horizonts	7,30	6,20	4,99	0,48	0,27	0,49	0,64	0,17	0,62
0–10 cm	0,27	0,37	0,10	0,05	0,05	0,03	0,02	0,01	0,02
40–80 cm	0,26	0,32	0,10	0,04	0,04	0,02	0,00	0,01	0,00
Mētrājs									
O horizonts	6,28	4,81	4,88	0,86	0,29	0,76	0,64	0,16	0,69
0–10 cm	0,85	1,47	0,15	0,08	0,11	0,03	0,03	0,02	0,03
40–80 cm	0,27	0,26	0,14	0,06	0,08	0,02	0,01	0,01	0,02
Lāns									
O horizonts	8,56	5,81	5,98	1,05	0,42	0,97	0,70	0,34	0,55
0–10 cm	0,48	0,35	0,33	0,10	0,09	0,10	0,04	0,02	0,05
40–80 cm	0,83	1,52	0,17	0,07	0,09	0,03	0,01	0,01	0,01
Damaksnis									
O horizonts	7,39	8,57	5,85	1,29	1,21	0,79	0,73	0,60	0,60
0–10 cm	0,87	0,98	0,50	0,21	0,20	0,13	0,07	0,05	0,06
40–80 cm	1,27	2,24	0,59	0,32	0,52	0,14	0,04	0,04	0,03
Vēris									
O horizonts	9,51	18,68	0,23	2,35	1,92	1,96	1,13	0,07	1,15
0–10 cm	4,77	6,00	1,55	0,88	0,73	0,62	0,18	0,10	0,18
40–80 cm	3,53	3,60	3,24	1,15	1,14	0,65	0,11	0,07	0,12
Slapjais vēris									
O horizonts	27,45	18,03	32,10	0,76	0,05	0,76	0,54	0,55	0,32
0–10 cm	9,41	13,95	2,37	0,57	0,37	0,56	0,08	0,06	0,07
40–80 cm	2,61	2,33	1,71	0,57	0,34	0,57	0,06	0,04	0,05
Šaurlapju ārenis									
O horizonts	12,24	16,10	4,96	1,28	1,25	0,83	0,76	0,62	0,55
0–10 cm	1,45	1,52	0,55	0,53	0,75	0,23	0,08	0,04	0,06
40–80 cm	1,43	1,47	0,96	0,39	0,32	0,31	0,06	0,04	0,04

Nedzīvās zemsegas horizontā visiem pētītajiem meža tipiem salīdzinājumā ar augsnes minerālajiem slāņiem ir raksturīgs augstāks apmaiņas Ca^{2+} , Mg^{2+} un K^{+} saturs, izņemot eitrofo meža tipu – vēri, kur nedzīvās zemsegas horizontā ir viszemākā Ca^{2+} koncentrācija (mediāna – $0,23 \text{ cmol kg}^{-1}$). Vēri apmaiņas Ca^{2+} koncentrācija līdz ar dziļumu palielinās, un apakškārtā tā sasniedz $3,24 \text{ cmol kg}^{-1}$ (3.8. tab.).

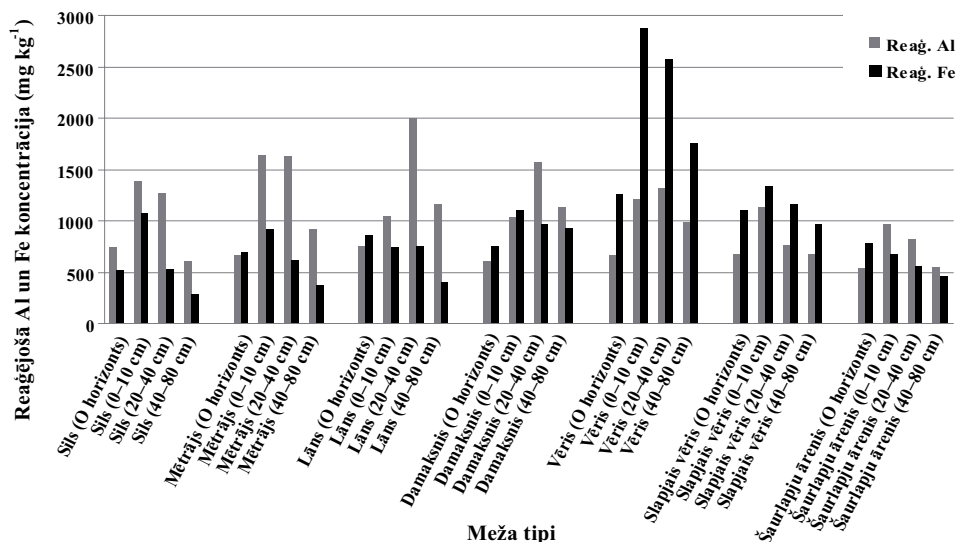
Vēri augsnes nedzīvās zemsegas horizontā ir visaugstākā Mg^{2+} un K^{+} koncentrācija (mediānas attiecīgi ir $1,96$ un $1,15 \text{ cmol kg}^{-1}$), bet visaugstākā Ca^{2+} koncentrācijas mediāna O horizontā ir slapjā vēri ($32,10 \text{ cmol kg}^{-1}$). Šajā mežu tipā arī augsnes virsējā minerālā slānī konstatēta augstākā šī rādītāja mediāna – $2,37 \text{ cmol kg}^{-1}$. Apmaiņas elementu zemākās koncentrācijas mediānas augsnes minerālā virsējā slānī un apakškārtā ir silā un mētrājā.

Salīdzinot ar ekstrahējamo elementu saturu, apmaiņas katjonu saturam starp mežu tipu augsnēm ir konstatēts relatīvi maz statistiski būtisku atšķirību (3.6. tab.). Izvērtējot apmaiņas elementu (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) saturu nedzīvās zemsegas horizontā, tika konstatēts, ka K^{+} saturs mētrājā un vēri statistiski būtiski ($p < 0,05$) atšķiras. Dažādiem meža tipiem augsnes minerālajos slāņos visvairāk atšķiras Mg^{2+} un K^{+} koncentrācija. Iepriekš minētās jonu satura atšķirības augsnes minerālajos slāņos ļoti izteiktas ir vērim un slapjam vērim salīdzinājumā ar citiem pētītajiem meža tipiem. Ca^{2+} koncentrācija tikai augsnes virsējā minerālā slānī slapjā vēri atšķiras no tā koncentrācijas lāna un damakšņa augsnēs (3.6. tab.).

Rezultāti rāda, ka līdzīgi kā granulometriskā sastāva un ekstrahējamo elementu satura ziņā, arī pēc apmaiņas elementu satura atšķirīgākie ir oligotrofie (sils un mētrājs) meža tipi, kuri ir izplatīti uz relatīvi nabadzīgām augsnēm, kas veidojušās galvenokārt smiltāju nogulumos, un eitrofie meža tipi – vēris un slapjais vēris, kuri ir izplatīti uz relatīvi bagātākām augsnēm, kas veidojušās galvenokārt glaciolimniskajos un glacigēnajos nogulumos. Turklāt, pateicoties vielu bioloģiskajai aprītei, bāziskie katjoni tiek akumulēti augsnes virsējos slāņos. Šajā gadījumā nozīme ir mežaudžu produktivitātei, kas ir atkarīga galvenokārt no augsnes cilmieža minerālā un līdz ar to arī ķīmiskā sastāva, turklāt svarīga ir arī mežaudzē dominējošo koku sugu iespējamā ietekme uz apmaiņas elementu akumulēšanos augsnes virsējos slāņos.

Reaģējošais Fe un Al

Analizējot, kāda ir reaģējošā Al un Fe koncentrācija dažādu meža tipu augsnes slāņos, tika konstatētas līdzīgas likumsakarības kā minēto rādītāju izmaiņām augsnēs dažādos ģeoloģiskajos nogulumos. Lielākai daļai meža tipu reaģējošā Al un Fe koncentrācija ir augstāka augsnes virsējā minerālā slānī, izņemot lānu, damaksni un vēri, kuros visaugstākais reaģējošā Al saturs ir augsnes 20–40 cm slānī, kas atbilst B horizontam (3.5. att.). Lānā šajā augsnes slānī augstāks ir arī reaģējošā Fe saturs. Minētās sakarības apliecina, ka augsnes paraugu ņemšana dažādos dziļumos, neņemot vērā augsnes diagnostiskos horizontus, ne vienmēr adekvāti atspoguļo augsnes veidošanās procesus. Oligotrofajos meža tipos, it sevišķi, ja podzolēšanās process nav tik intensīvi noritējis, B horizonta augšējā robeža ir iespējama arī līdz 10 cm dziļumam, B horizonts atspoguļojas arī paaugstinātā reaģējošā Al un Fe saturā šajā augsnes slānī. Savukārt damaksnī un vēri B horizonts parasti atrodas relatīvi dziļāk, tas atspoguļojas paaugstinātā reaģējošā Al un Fe saturā 20–40 cm dziļumā.



3.5. attēls. Reaģējošā Al un Fe koncentrācijas mediāna dažādu meža tipu augšņu slāņos

Figure 3.5. Median concentration of reactive Al and Fe of soil layers in different forest site types

Reaģējošā Al saturs nedzīvās zemsegas horizontā un virsējā minerālā slānī, savstarpēji salīdzinot meža tipu augsnes, statistiski būtiski ($p < 0,05$) neatšķiras. Būtiskas atšķirības starp meža tipiēm pastāv apakškārtā, kur slapjais vēris atšķiras no lāna, damakšņa un vēra, savukārt šaurlapju ārenis atšķiras no lāna, damakšņa un vēra (3.6. tab.).

Reaģējošā Fe koncentrācijā statistiski būtiskas ($p < 0,05$) savstarpējas atšķirības konstatētas tikai augsnes minerālajos slāņos starp vēri un mētrāju, lānu, damakšni, šaurlapju āreni.

Pētījumu rezultāti parāda, ka ļoti nozīmīgi Latvijas meža augšņu īpašību rādītāji ir augsnes granulometriskais sastāvs un arī veģetācijas sega. Meža augšņu kopējās fizikālo un ķīmisko īpašību likumsakarības saistībā ar augšņu veidošanās faktoriem sīkāk ir analizētas diskusijas nodaļā.

3.4. Diskusija

Augsnes paraugošana bieži ir koncentrēta uz augsnes organiskajiem un virsējiem minerālajiem horizontiem, kuros tiek analizēti galvenokārt apmaiņas elementi un pH saistībā ar kokaudžu ietekmi (Stendahl et al., 2002). Tomēr augsnes virsējo slāņu datu izmantošana rada problēmas noskaidrot meža īpašību sakarības, jo šie slāņi nav vietas kvalitātes funkciju neatkarīgie noteicēji, turklāt tie vāji atspoguļo cilmieža ietekmi saistībā ar ģeoķīmisko un minerālo sastāvu (Stendahl et al., 2002). Minerālu dēdēšana ir viens no nozīmīgākajiem faktoriem, kas apgādā mežus ar svarīgākajiem barības elementiem, izņemot slāpekli (Cole, 1995). Sakarības starp vietas kvalitāti un kokaudzes neatkarīgām īpašībām var uzlabot vietas klasifikācijas sistēmas reģionālā mērogā (Stendahl et al., 2002).

Ģeoloģiskie nogulumi un augsnes fizikālās un ķīmiskās īpašības

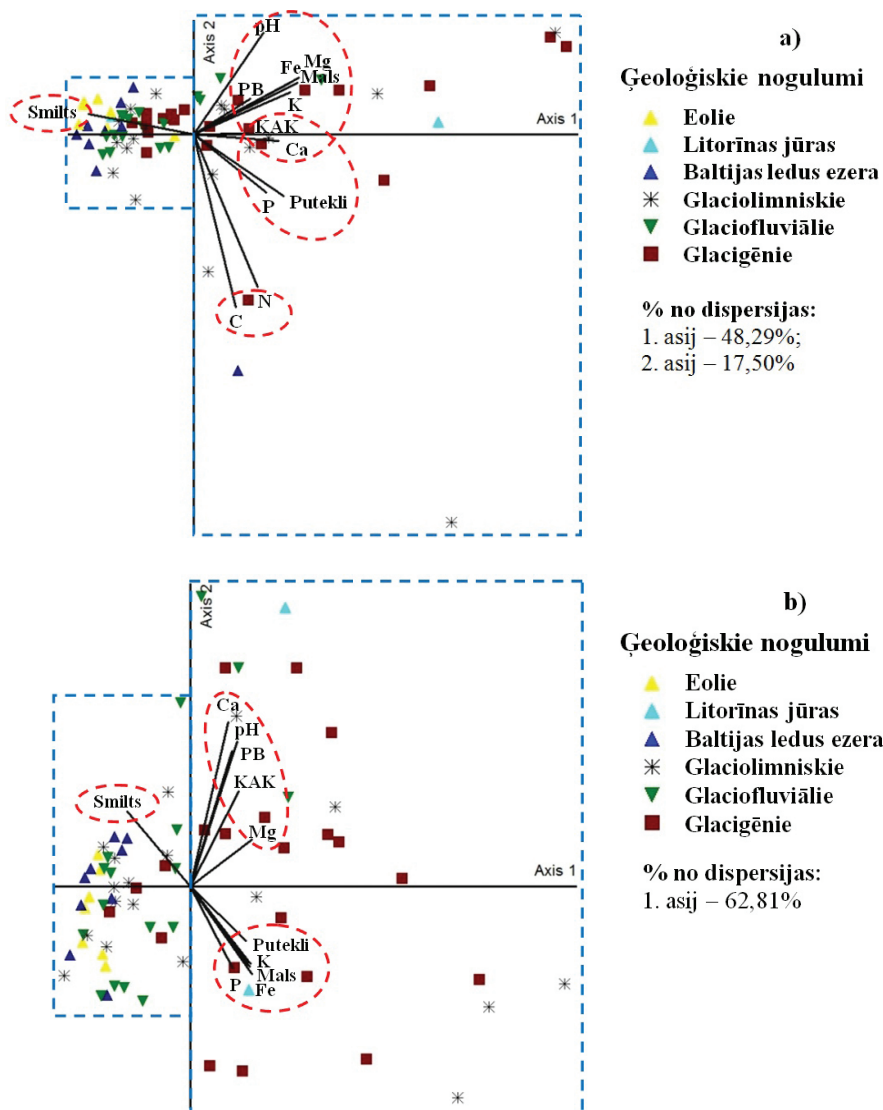
Eiropas mežu ekosistēmās augšņu fizikālās un ķīmiskās īpašības galvenokārt nosaka augsnes minerālais un granulometriskais sastāvs (Vanmechelen et al., 1997). Dažāda augsnes daļiņu virsmas platība ietekmē sorbciju, minerālu šķīšanu un elementu atbrīvošanos (Parry et al., 2011; Oelkers et al., 2009). Augšņu un augsnes minerālu plašā daudzveidība būtiski ietekmē ekosistēmu funkcionēšanu, zemes apsaimniekošanu, savukārt raksturīgās augsnes auglības pazīmes bieži tiek saistītas ar augsnes minerālo sastāvu (Page et al., 1967; Murashkina et al., 2007; Graham, O'Geen, 2010). Minerālā un granulometriskā sastāva telpiskā dažādība ir atkarīga no teritorijas ģeoloģiskajiem apstākļiem, ģeoloģisko nogulumu veidošanās apstākļiem un procesiem (Salminen et al., 2008; Klassen, 2009).

Promocijas darbā pētījumu rezultāti (3.3. tab.) parādīja, ka Latvijas meža augšņu minerālās virskārtas un apakškārtas granulometriskais sastāvs vairums gadījumos starp dažādas ģenēzes nogulumiem statistiski būtiski atšķiras. Statistiski būtiskas atšķirības starp nogulumiem tika konstatētas arī ekstrahējamo elementu (K, Mg, Mn), apmaiņas elementu (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}) un reaģējošo elementu (galvenokārt Fe) saturā. Augsnes reakcija, ekstrahējamā P un Na saturs un – interesanti – arī ekstrahējamā Ca saturs dažādos ģeoloģiskajos nogulumos statistiski būtiski tikpat kā neatšķiras.

Latvijas meža ekosistēmās augsnes ar augstu māla un putekļu īpatsvaru galvenokārt ir raksturīgas glaciģenajiem un arī glaciolimniskajiem nogulumiem (3.1. tab.). Augsnes virsējā minerālā slāņa fizikālo un ķīmisko īpašību komponentanalīze (3.6. a. att.) rāda, ka minēto nogulumu augsnes, salīdzinot ar citas ģenēzes nogulumiem, ir neviendabīgas. Augsnēm raksturīgs augsts putekļu un māla daļiņu saturs un līdz ar to arī augstāka katjonu apmaiņas kapacitāte, piesātinājuma pakāpe ar bāzēm un $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. Eoliem, Baltijas ledus ezera un glaciofluviāliem nogulumiem komponentanalīzes grafikā raksturīga zema putekļu, māla un līdz ar to arī zema katjonu apmaiņas kapacitāte, piesātinājuma pakāpe ar bāzēm un $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. Minēto ģeoloģisko nogulumu augsnēm ir raksturīga relatīvi zema dispersija (3.6. att.).

Augsnes virsējā minerālā slāņa parauglaukumu izvietojums koordinātu plaknē statistiski būtisks ir ar 1. un 2. asi ($p = 0,001$), kas kopumā izskaidro 65,79% no kopējās dispersijas. Ar 1. asi, kas izskaidro 48,29% no parauglaukumu kopējās dispersijas, ir konstatēta būtiska ($r > 0,50$) pozitīva sakarība starp māla ($r = 0,81$) un putekļu ($r = 0,75$) daļiņu daudzumu un daudziem ekstrahējamiem elementiem – Fe ($r = 0,88$), Mg ($r = 0,87$), K ($r = 0,81$), Ca ($r = 0,71$), P ($r = 0,61$); augsnes $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ($r = 0,59$); $\text{N}_{\text{kop.}}$ ($r = 0,54$), piesātinājuma pakāpi ar bāzēm ($r = 0,50$) un katjonu apmaiņas kapacitāti ($r = 0,50$). Turpretim negatīva sakarība ir starp smilts daļiņu saturu ($r = -0,89$) un iepriekš minētajiem rādītājiem.

Tas tikai parāda, ka augšņu ķīmisko īpašību rādītāju neviendabīgums parasti ir saistīts ar augsnes granulometriskā sastāvu, kurš mainās atkarībā no teritorijas ģeoloģiskajiem nogulumiem, kā arī to ietekmē augsnes veidošanās procesi. Ar 1. asi netika konstatēta būtiska sakarība ar $\text{C}_{\text{org.}}$ saturu. Tas liecina, ka organiskā oglekļa saturs augsnes virskārtā nav saistīts ar ģeoloģisko nogulumu ģenēzi.



3.6. attēls. Augsnes minerālā virsejā slāņā (a) un apakškārtas (b) fizikālo (granulometriskā sastāva saturs (%)) un ķīmisko īpašību (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtība; ekstrahējamie elementi (mg kg^{-1}) – Ca, Mg, K, P; N – kopējais slāpeklis (g kg^{-1}); C – organiskais ogleklis (g kg^{-1}); KAK – katjonu apmaiņas kapacitāte (cmol kg^{-1}); PB – piesātinājuma pakāpe ar bāzēm (%)) izvietojums ar komponentanalīzi nodalītajās asīs saistībā ar ģeoloģiskajiem nogulumiem

Figure 3.6. Distribution of the physical properties (soil texture [%]) and chemical properties (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ value; extractable elements [mg kg^{-1}] – Ca, Mg, K, P; N – total nitrogen [g kg^{-1}]; C – organic carbon [g kg^{-1}]; CEC – cation exchange capacity [cmol kg^{-1}]; BS – base saturation [%]) of the mineral topsoil (a) and subsoil (b) layers in the PCA axes depending on geological deposits

Komponentanalīzes grafikā 2. ass izskaidro 17,50% no augsnes paraugu raksturojošo lielumu dispersijas. Šajā gadījumā konstatēta negatīva sakarība starp $C_{org.}$ ($r = -0,91$) un $N_{kop.}$ ($r = -0,80$) saturu, savukārt abiem šiem rādītājiem ir pozitīva sakarība ar pH_{H_2O} ($r = 0,53$). Tas parāda organisko vielu lielo nozīmi slāpekļa akumulācijā augsnē, kā arī ūdeņraža jonu koncentrācijā augsnes slāņos. Organiskā oglekļa izmaiņas augsnes virsējā minerālā slānī nosaka mežaudzē dominējošās koku sugas (Vesterdal et al., 2008), humifikācijas intensitāte, kas savukārt netieši tomēr ir saistīta ar augsnes granulometrisku sastāvu. Tiek uzskatīts, ka augsnes smalko daļiņu (māls, putekļi) daudzums ir viens no nozīmīgākajiem faktoriem, kas ietekmē augsnes organiskā oglekļa saglabāšanu (Oades, 1988; Hassink, 1997). Turklāt augsnes minerālo daļiņu lielums un sastāvs būtiski ietekmē augsnes organiskās vielas mineralizāciju, daudzumu un izplatību (Spain, 1990; Alvarez, Lavado, 1998).

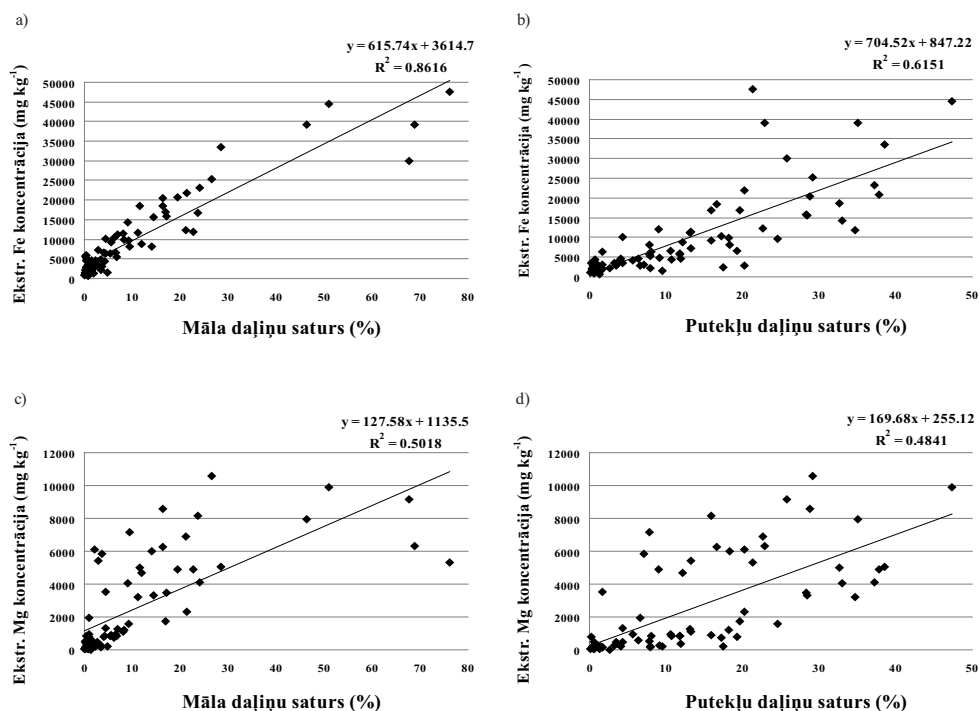
Augsnes apakškārtas paraugu izvietojums komponentanalīzes koordinātu plaknē statistiski būtisks ($p = 0,001$) ir tikai ar 1. asi, kas izskaidro 62,81% no paraugu kopējās dispersijas (3.6. b. att.). Līdzīgi kā minerālā virsējā slānī, arī apakškārtā pastāv statistiski būtiska pozitīva sakarība starp māla ($r = 0,89$), putekļu ($r = 0,83$) un ekstrahējamo elementu – Mg ($r = 0,92$), Fe ($r = 0,92$), K ($r = 0,89$), Ca ($r = 0,56$), P ($r = 0,62$) – saturu, kā arī katjonu apmaiņas kapacitāti ($r = 0,72$), augsnes reakciju ($r = 0,70$) un piesātinājuma pakāpi ar bāzēm ($r = 0,62$). Turpretim šiem rādītājiem ir negatīva korelācija ar smilts daļiņu saturu ($r = -0,93$). Augsnes apakškārtas komponentanalīzes grafikā vienu plejādi veido pH_{H_2O} , ekstrahējamais Mg un Ca, kā arī katjonu apmaiņas kapacitāte un piesātinājuma pakāpe ar bāzēm, bet otru plejādi – putekļu un mālu daļiņu daudzums, kā arī ekstrahējamais K, P un Fe. Tas tikai parāda, ka, lai gan daudzu ķīmisko elementu koncentrācija Latvijas mežu augsnēs līdzīgi kā Eiropā kopumā (De Vos, Cools, 2011) ir saistīta ar māla un putekļu daļiņu saturu augsnē, to koncentrācijas dispersiju var ietekmēt arī citi faktori.

Piemēram, augsnes katjonu apmaiņas kapacitāti nosaka ne tikai māla daļiņu, bet arī organisko vielu daudzums (Horn et al., 2005; Liao et al., 2011). Līdz ar to augsnes katjonu apmaiņas kapacitātes telpisko mainību nosaka gan augsnes cilmiezis, gan citi faktori (Cambardella et al., 1994).

To veiktajā pētījumā parāda arī dažādu augsnes ķīmisko un fizikālo rādītāju savstarpējās korelācijas analīzes. Latvijas meža augsnēs, piemēram, pastāv būtiska ($R^2 > 0,48$) korelācija starp ekstrahējamo elementu (Mg, Fe) koncentrāciju un māla un putekļu daļiņu saturu augsnes apakškārtā (3.7. att.). Korelācija starp iepriekš minētajiem ekstrahējamiem elementiem un māla daļiņu saturu ir ciešāka (3.7. a, b att.) nekā ar putekļu daļiņu saturu (3.7. c, d att.). Tas skaidrojams ar to, ka nozīmīga makroelementu daļa ir iekļauta māla minerālu kristāliskajā režģī, kas būtiski palielina elementa koncentrāciju augsnē, turklāt svarīgi ir arī tas, ka māla minerāliem, salīdzinot ar putekļu un smilts frakciju veidojošiem minerāliem, piemīt augstāka elementu adsorbcijas spēja (Barber, 1995).

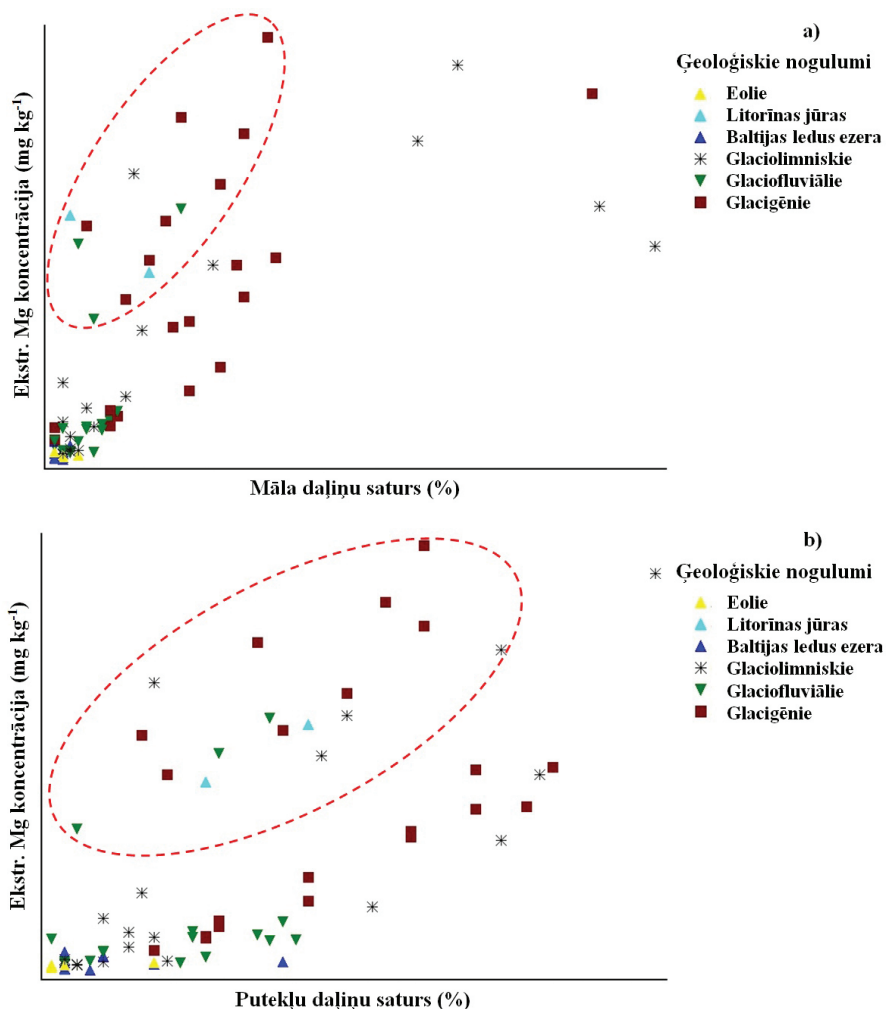
Augsnes minerālā sastāva ietekmi uz Latvijas meža augšņu ķīmisko sastāvu parāda ekstrahējamā Mg koncentrācijas izmaiņas atkarībā no māla un putekļu daļiņu satura

augšnes apakškārtā. Lineārās regresijas grafikos (3.8. att.) labi nodalīta to augšnes parauglaukumu kopa, kas izvietoti glacigēnajos nogulumos Kurzemes dienvidu daļā (3.8. att.). Šajā kopā līdzīgi kā Latvijā kopumā ir novērojama Mg koncentrācijas palielināšanās līdz ar māla un putekļu daļiņu daudzumu pieaugumu, tomēr Kurzemē minētā elementa koncentrācija, ja ir viens un tas pats māla daļiņu daudzums, ir augstāka. Līdzīgi rezultāti iegūti Latvijas augšņu ģeoķīmiskajā kartēšanā (Gilucis, Segliņš, 2003). Kurzemē, salīdzinot ar pārējo Latvijas teritoriju, relatīvi tuvu Zemes virsmai sastopami dolomīti (Биреп и др., 1979), tāpēc glacigēno nogulumu veidošanās procesā tajā uzkrājušies dolomīta minerāli, kas satur Mg (Heald, 1965; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).



3.7. attēls. Ekstrahējamā Fe un Mg koncentrācija (mg kg⁻¹) atkarībā no māla (a, b) un putekļu (c, d) daļiņu satura (%) augšnes 40–80 cm slānī (būtiskuma līmenis $p = 0,05$)

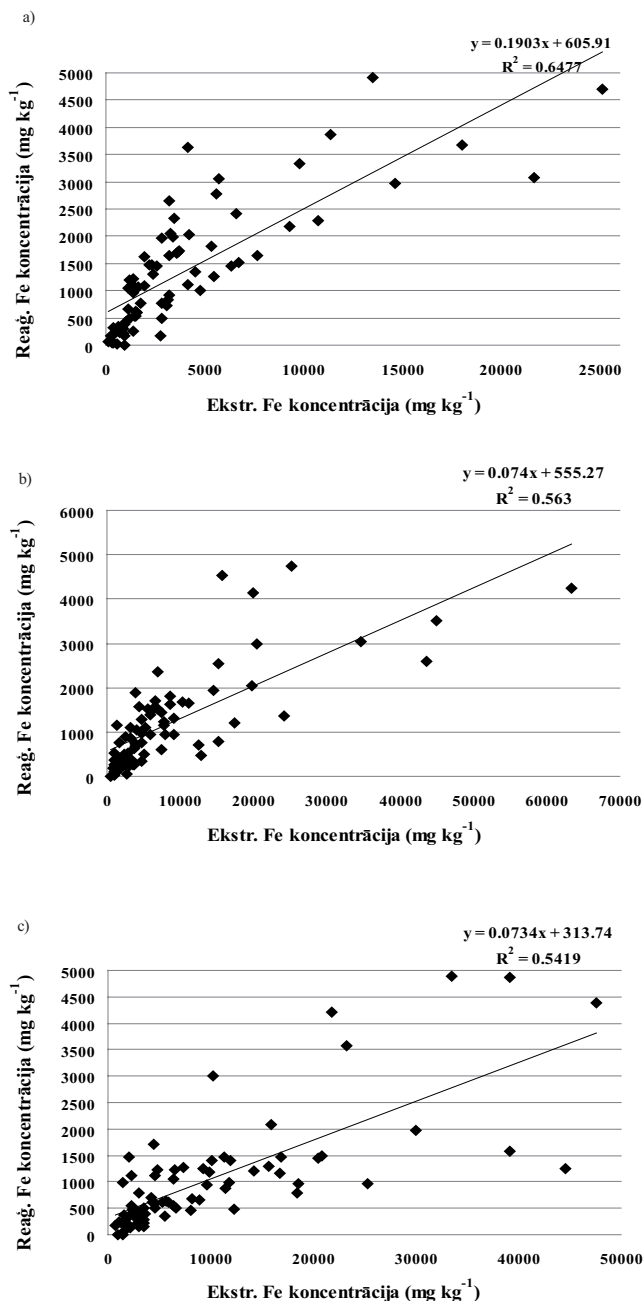
Figure 3.7. Extractable Fe and Mg concentration (mg kg⁻¹) depending on the content (%) of clay (a, b) and silt (c, d) particles in the soil 40-80-cm layer (the level of significance $p = 0.05$)



3.8. attēls. Ekstrahējamā Mg koncentrācijas (mg kg^{-1}) izmaiņas atkarībā no māla (a) un putekļu (b) daļiņu satura (%) augsnes 40–80 cm slānī dažādos ģeoloģiskajos nogulumos (būtiskuma līmenis $p = 0,05$)

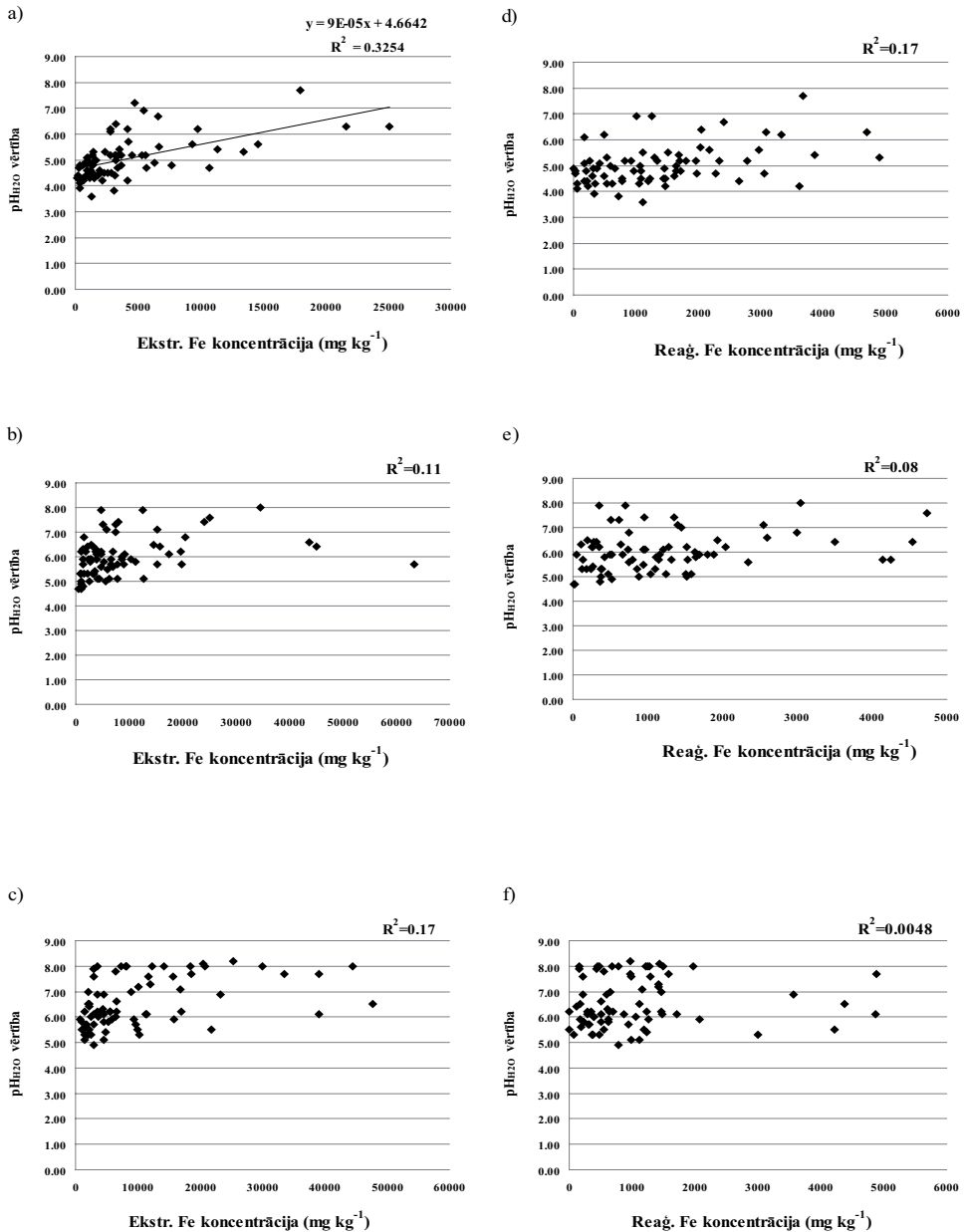
Figure 3.8. Changes of extractable Mg concentration (mg kg^{-1}) of soil 40–80 cm layer in different geological deposits depending on content (%) of clay (a) and silt (b) (the level of significance $p = 0.05$)

Atsevišķu ķīmisko elementu formu koncentrāciju, kā arī migrāciju augsnē nosaka arī augsnes reakcija. Regresijas analīzes uzrāda būtisku ciešu korelāciju starp reaģējošās Fe koncentrāciju un ekstrahējamās Fe koncentrāciju. Augsnes profilā līdz ar dziļumu minētās sakarības kļūst vājākas (3.9. att.), to iespējams skaidrot ar augsnes skābuma samazināšanos. Tas ietekmē iepriekš minētā metāla atrašanās formu un kustīgumu (Перельман, Касимов, 1999).



3.9. attēls. Sakarība starp reaģējošā Fe un ekstrahējamā Fe koncentrāciju (mg kg^{-1}) augšnes 0–10 cm (a), 20–40 cm (b) un 40–80 cm (c) slānī (būtiskuma līmenis $p = 0,05$)

Figure 3.9. Relationship between reactive Fe and extractable Fe concentration (mg kg^{-1}) of soil 0–10 cm (a), 20–40 cm (b) and 40–80 cm (c) layer (the level of significance $p = 0.05$)



3.10. attēls. Ekstrahējamā Fe un reaģējošā Fe koncentrācija (mg kg^{-1}) atkarībā no $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtības izmaiņām augsnes 0–10 cm (a, d), 20–40 cm (b, e) un 40–80 cm (c, f) slānī (būtiskuma līmenis $p = 0,05$)

Figure 3.10. Extractable Fe and reactive Fe concentration (mg kg^{-1}) dependent on changes of $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ value of soil 0–10 cm (a, d), 20–40 cm (b, e) and 40–80 cm (c, f) layer (the level of significance $p = 0.05$)

Iepriekš teikto apliecina arī korelācijas grafiki starp augsnes reakciju ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) un dažādas formas Fe (3.10. att.). Šajā gadījumā statistiski būtiska sakarība pētītajās augsnēs tika konstatēta tikai augsnes virsējā slānī, kur augsne ir skābāka.

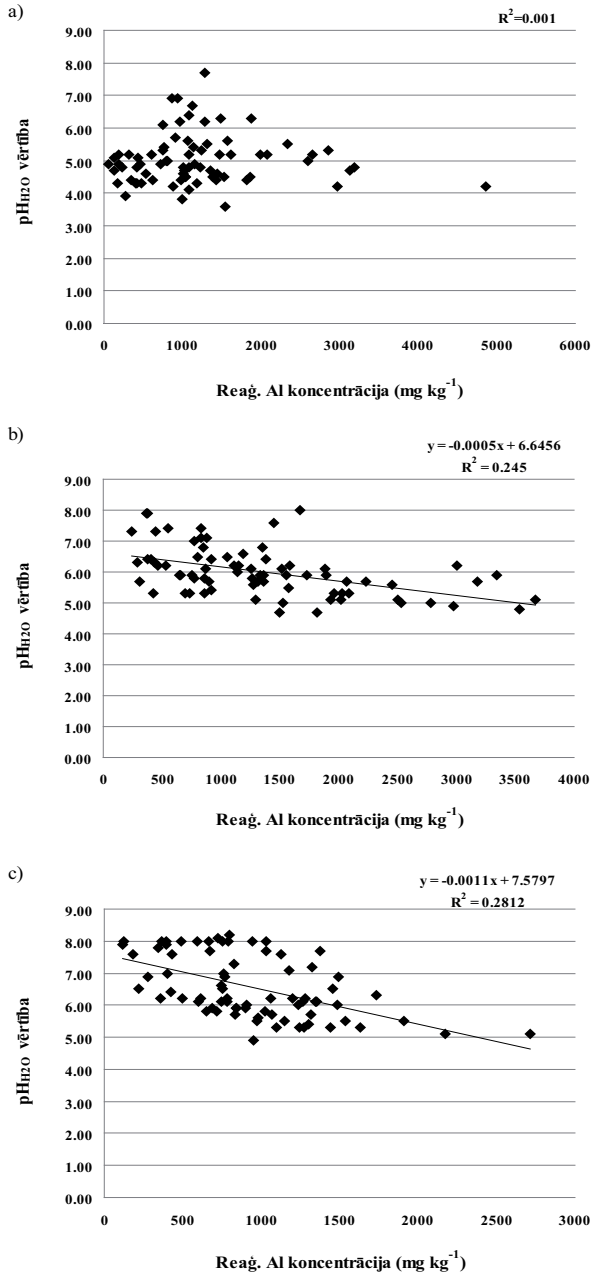
Augsnes apakškārtā pētītajos parauglaukumos $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtība ir robežās no 4,9 līdz 8,2, savukārt augsnes virsējā minerālā slānī no 3,6 līdz 7,7 (3.6. att.). Neorganisko savienojumu oksidēšanās un hidrolīzes procesos pie $\text{pH} < 5$ divvērtīgie dzelzs joni pāriet augsnes šķīdumā koloidālā stāvoklī, turklāt, kā aprakstījuši A. I. Perelmans un N. S. Kasimovs (Перельман, Касимов, 1999), sevišķi kustīgi dzelzs joni ir stipri skābos un skābos gleja ūdeņos, tāpēc dzelzs migrē uz dziļākajiem augsnes slāņiem, kā arī bieži tiek iznesta no augsnes. Pētītajos augsnes parauglaukumos reaģējošās Fe saturs *Gleysol* augšņu apakškārtā ir ļoti zems (mediāna – 387 mg kg^{-1}). $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtība šajā slānī ir 6,55, kas tomēr neveicina Fe jonu izskalošanos. Šajā augšņu pamatgrupā augsnes virsējā minerālā slānī šis rādītājs ir viens no augstākajiem (2038 mg kg^{-1}). Tas tikai parāda, ka Fe joni šādos apstākļos ir mazkustīgi. Iepriekš minēto apstiprina arī meža monitoringa dati Eiropā (Vanmechelen et al., 1997). Augstākās Fe koncentrācijas Eiropas mežu ekosistēmās ir augsnēs ar vidēju līdz augstu organiskās vielas saturu, ja pH ir robežās no 4,0 līdz 6,0.

Ir zināms, ka reaģējošā jeb amorfā Al un Fe saturs raksturo nesilikātu amorfos savienojumus un atspoguļo ar tiem saistītos ķīmiskos procesus augsnē (Орлов и др., 2005), piemēram, paskābināšanos, savienojumu mobilizāciju izgulsnēšanās ceļā, minerālu dēdēšanu un organominerālu savienojumu veidošanos. Augsnes pH izmaiņas ietekmē Al hidroksīdu šķīdību ūdenī un augsnes šķīdumā (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Skābās augsnēs, samazinoties augsnes pH zem 5,5, Al kustīgums strauji palielinās un jonu apmaiņas procesos tas konkurē ar citiem katjoniem (Перельман, Касимов, 1999).

Pētījuma rezultāti parādīja, ka reaģējošā Al jonu koncentrācija augsnes virsējā minerālā slānī nav cieši saistīta ar $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ maiņu. Šajā slānī sevišķi skābās augsnēs bieži atrodas E horizonts, kurā Al ir ļoti maz, un līdz ar to skābākās augsnēs bieži ir mazāk arī Al jonu. Augsnes 20–40 cm slānī un apakškārtā konstatēta būtiska vidēji cieša sakarība starp reaģējošā Al koncentrāciju un augsnes reakciju. Šajā gadījumā determinācijas koeficients pieaug līdz ar dziļumu (3.11. att.), jo virsējā minerālā slānī, kas ir skābāks, Al ir kustīgāks un izskalojas no virskārtas dziļākajos horizontos. Al uzkrāšanās augsnes 20–40 cm slānī tika aprakstīta arī promocijas darba 3.3. sadaļā.

Pētījuma rezultāti kopumā apliecina, ka Latvijā, līdzīgi kā Eiropā, meža augšņu ķīmisko īpašību veidošanā izšķiroša nozīme ir to granulometriskajam sastāvam (Vanmechelen et al., 1997), tomēr atsevišķus rādītājus ietekmē augsnes minerālu sastāvs, skābums, organisko vielu daudzums un sastāvs, kā arī augsnes veidošanās procesi.

Jau agrāk Latvijā dažādos pētījumos (Brumelis, Nikodemus, 1995) tika uzsvērts, ka augsnes tips būtiski ietekmē dažādu metālu saturu augsnes nedzīvās zemsegas horizontā. E. Tērauda (2008) savā promocijas darbā, pētot vielu apriti priežu mežaudzē uz smilts augsnēm, parādīja, ka barības vielu daudzums nobirās ir vairāk atkarīgs no nobiru izsēšanās sezonas, meteoroloģiskajiem apstākļiem, kokaudzes sastāva un mazāk atkarīgs no augsnes īpašībām. Šajā sakarā veidojas zināmas pretrunas, tāpēc interesanti bija noskaidrot, kā izmaiņas augsnes granulometriskā sastāvā ietekmē dažādus augsnes ķīmiskos rādītājus augsnes nedzīvajā zemsegā.

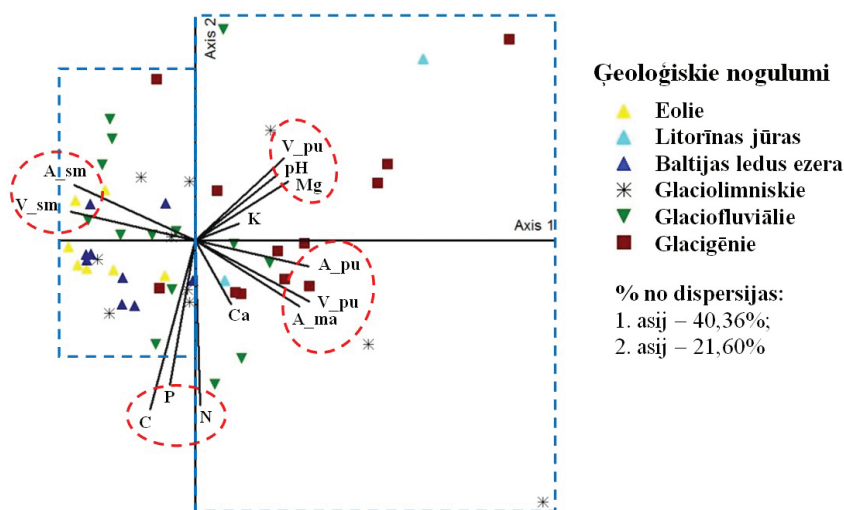


3.11. attēls. Reagējošā Al koncentrācijas (mg kg^{-1}) izmaiņas atkarībā no $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtības augsnes 0–10 cm (a), 20–40 cm (b) un 40–80 cm (c) slānī (būtiskuma līmenis $p = 0,05$)

Figure 3.11. Changes of reactive Al concentration (mg kg^{-1}) dependent on $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ value of soil 0–10 cm (a), 20–40 cm (b) and 40–80 cm (c) layer (the level of significance $p = 0.05$)

Augsnes virskārtas un apakškārtas granulometriskā sastāva un nedzīvās zemsegas horizonta ķīmisko īpašību komponentanalīze (3.12. att.) parāda, ka parauglaukumu izvietojums koordinātu plaknē statistiski būtisks ir ar 1. un 2. asi ($p = 0,001$), kas kopumā izskaidro 61,96% no kopējās dispersijas. Turklāt nedzīvās zemsegas horizonta paraugu ķīmisko īpašību izvietojums atkarībā no ģeoloģiskajiem nogulumiem, augšņu pamatgrupām (FAO WRB) un meža tipiēm ir atkarīgs no

- 1) nobiru daudzuma un sastāva ietekmes, kas komponentanalīzē saistīta ar C, P un N plejādi (2. ass);
- 2) virsējā minerālā slāņa un apakškārtas granulometriskā sastāva (1. ass).



3.12. attēls. Nedzīvās zemsegas horizonta ķīmisko parametru (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; ekstrahējamie elementi – Ca, Mg, K, P (mg kg^{-1}); N – kopējais slāpeklis (g kg^{-1}); C – organiskais ogleklis (g kg^{-1})) un augsnes virskārtas (V_) un apakškārtas (A_) granulometriskā sastāva (sm – smilts daļiņu saturs (%); pu – putekļu daļiņu saturs (%); ma – māla daļiņu saturs (%)) izvietojums ar komponentanalīzi nodalītajās asīs atkarībā no ģeoloģiskajiem nogulumiem

Figure 3.12. Distribution of O horizon chemical properties (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; extractable elements [mg kg^{-1}] – Ca, Mg, K, P; N – total nitrogen (g kg^{-1}); C – organic carbon (g kg^{-1})) and topsoil (V_) and subsoil (A_) soil texture (sm – sand content (%); pu – silt content (%); ma – clay content (%)) on the PCA axes depending on geological deposits

Ar 1. asi, kas izskaidro 40,36% no augsnes parauglaukumu dispersijas, ir konstatēta būtiska ($r > 0,50$) pozitīva sakarība starp virskārtas un apakškārtas putekļu ($r = 0,84$; $r = 0,84$), māla ($r = 0,66$; $r = 0,77$) saturu un nedzīvās zemsegas horizonta ekstrahējamā Mg saturu ($r = 0,69$) un $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtību ($r = 0,61$). Turpretim negatīva korelācija pastāv starp šiem rādītājiem un augsnes virsējā minerālā slāņa un apakškārtas smilts daļiņu saturu ($r = -0,92$; $r = -0,89$). Ar 1. asi netika konstatētas būtiskas korelācijas ar nedzīvās zemsegas horizonta ekstrahējamo Ca, P, K, organiskā C, kā arī kopējā N saturu nedzīvās zemsegas horizontā un minerālā virsējā slāņā, kā arī apakškārtas granulometriskā sastāvu.

Turpretim ar 2. asi, kas izskaidro 21,60% no augšnes paraugu dispersijas, ir konstatēta būtiska ($r > 0,50$) negatīva korelācija starp organiskā C ($r = -0,86$), kopējā N ($r = -0,84$) un ekstrahējamā P ($r = -0,74$) saturu nedzīvās zemsegas horizontā. Ar 2. asi netika konstatētas būtiskas korelācijas ar nedzīvās zemsegas horizonta augšnes reakciju, ekstrahējamiem elementiem – Ca, Mg, K, kā arī minerālā virsējā slāņā un apakškārtas granulometriskā sastāvu.

Vērtējot nedzīvās zemsegas horizontu ķīmisko īpašību dispersiju atkarībā no granulometriskā sastāva, redzams, ka augsnēs, kas veidojušās uz eolajiem un Baltijas ledus ezera nogulumiem, dispersija ir zema. Šīm augsnēm ir raksturīgs arī zems māla un putekļu daļiņu saturs virsējā minerālā slānī un apakškārtā. Rezultātu izkliede nedzīvās zemsegas horizontos, tāpat kā minerālajos horizontos, palielinās līdz ar māla un putekļu daļiņu satura īpatsvara pieaugumu.

Komponentanalīzes rezultāti parāda, ka augšnes virsējā minerālā slāņā un apakškārtas granulometriskais sastāvs tieši neietekmē nedzīvās zemsegas horizontā ekstrahējamā Ca, K un P saturu, kā arī organiskā C un kopējā N daudzumu. Tas liecina par nobiru sastāva, ko nosaka mežaudzē dominējošās koku sugas, kā arī citu faktoru iespējamo ietekmi. Savukārt virsējā minerālā slāņā un apakškārtas granulometriskais sastāvs ietekmē augšnes reakciju un ekstrahējamā Mg saturu nedzīvās zemsegas horizontā. Šo rādītāju skaitliskā vērtība palielinās līdz ar māla un putekļu daļiņu satura pieaugumu. Daļēji tas ir skaidrojams ar to, ka augsnēs, palielinoties māla daļiņu daudzumam, pieaug arī Mg daudzums un vielu bioloģiskās aprites dēļ tas uzkrājas augšnes nedzīvās zemsegas horizontā.

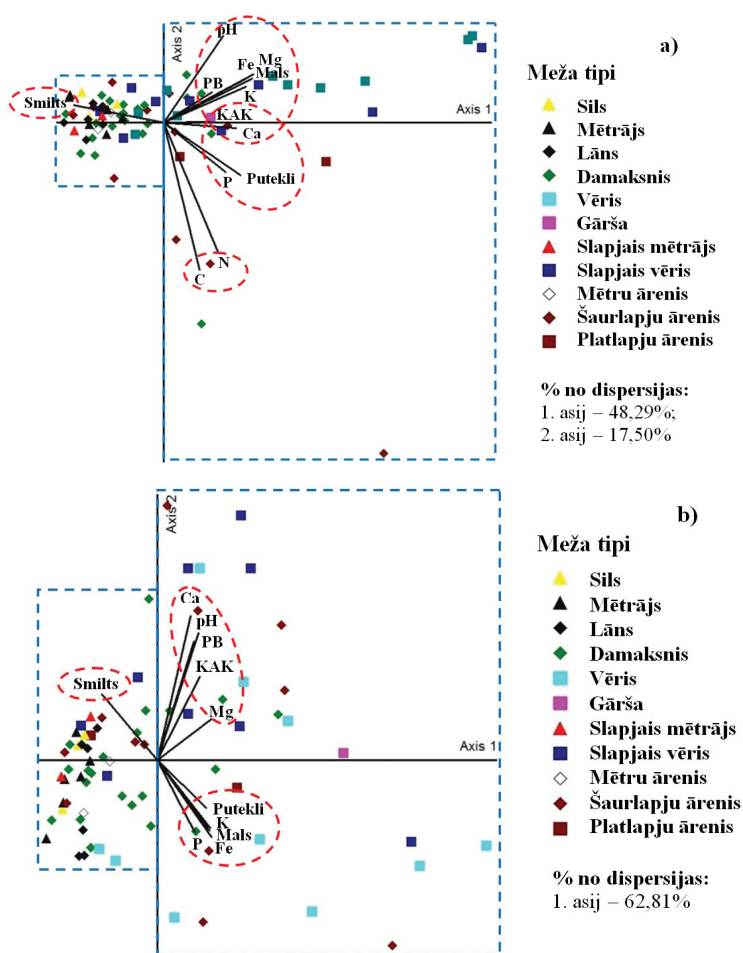
Pētījuma rezultāti kopumā parādīja, ka Latvijas mežu ekosistēmās augšnes nedzīvās zemsegas horizonta ķīmisko sastāvu netieši ietekmē augšnes granulometriskais sastāvs, tomēr relatīvi lielāka nozīme ir mežaudzei un kopumā vielu bioloģiskajai aprītei. Vērtējot iepriekš izteikto viedokli, ka pastāv zināma pretruna starp G. Brūmeļa, O. Nikodemusa (1995) un E. Tēraudas (2008) pētījuma rezultātiem, secināms, ka pretrunas tomēr nav, jo patiešām, mainoties augšņu granulometriskajam sastāvam, mainās arī nedzīvās zemsegas horizonta īpašības un vienāda granulometriskā sastāva augsnēs barības vielu daudzums nobirās ir vairāk atkarīgs no nobiru izsēšanās sezonas, meteoroloģiskajiem apstākļiem un kokaudzes sastāva.

Mežaudze un augšnes fizikālās un ķīmiskās īpašības

Augšnes hidroloģiskais režīms un auglība nosaka augu sabiedrību izplatību (Kōlli, in Ellermāe, 2001; Palo et al., 2005). Komponentanalīzes rāda, ka augšnes parauglukumū kopu ar relatīvi zemu iegūto rezultātu dispersiju virsējā minerālā slānī veido sils, mētrājs, lāns, damaksnis, slapjais mētrājs (3.13. a att.). Minētājiem meža tipiem virsējo augšnes minerālo slāni veido smilts nogulumi, tāpēc šo meža tipu augšnes satur relatīvi mazāk barības vielu, tām ir zemāka katjonu apmaiņas kapacitāte un arī piesātinājuma pakāpe ar bāzēm.

Augšnes apakškārtas komponentanalīzē, balstoties uz augšņu ķīmiskajām un fizikālajām īpašībām, meža tipu grupas relatīvi labāk var nodalīt (3.13. b. att.). Visnevienīgākie meža tipi pēc augšnes apakškārtas ķīmiskajām un fizikālajām īpašībām ir vēris, šaurlapju ārenis un slapjais vēris. Iepriekš minētā relatīvi lielā eitrifo meža tipu augšņu daudzveidība ir arī galvenais iemesls, kāpēc starp meža tipu augsnēm lielākoties

netika konstatētas statistiski būtiskas atšķirības. Vērtējot iegūtos rezultātus, joprojām aktuāls jautājums ir lāna novietojums augsnes auglības grupā. Analizējot apakškārtas komponentanalīzes grafiku (3.13. b att.) un balstoties uz 1. asi, kas raksturo augsnes auglību, redzams, ka lāns atrodas vienā grupā ar damaksnī un mētrāju. Līdz ar to, pamatojoties uz pašreiz iegūtajiem augšņu izpētes rezultātiem, var uzskatīt, ka Latvijas meža tipu iedalījumā pēc auglības robeža starp oligotrofiem un mezotrofiem tiem ir ļoti nosacīta.



3.13. attēls. Augsnes minerālā virsējā slānā (a) un apakškārtas (b) fizikālo (granulometriskā sastāva (%)) un ķīmisko parametru (pH – pH_{H₂O}; ekstrahējamie elementi (mg kg⁻¹) – Ca, Mg, K, P; KAK – katjonu apmaiņas kapacitāte (cmol kg⁻¹); PB – piesātinājuma pakāpe ar bāzēm (%)) izvietojums ar komponentanalīzi nodalītajās asīs atkarībā no meža tipiem

Figure 3.13. Distribution of physical (soil texture [%]) and chemical (pH – pH_{H₂O}; extractable elements [mg kg⁻¹] – Ca, Mg, K, P; CEC – cation exchange capacity [cmol kg⁻¹]; BS – base saturation [%]) properties of the mineral topsoil layer (a) and subsoil (b) in the PCA axes depending on forest site types

Komponentanalīzes rezultāti vienlaikus izvirza jautājumu par šaurlapju āreņa atrašanos mezotrofo mežu tipu grupā. Meža monitoringa ietvaros veiktie pētījumi rāda, ka pēc augsnes īpašībām šaurlapju ārenis ir līdzīgs eitrofiem meža tipiem, piemēram, vērim un slapjajam vērim, nevis mezotrofiem meža tipiem.

Analizējot augsnes parauglūkumu izvietojumu koordinātu plaknē atkarībā no ģeoloģiskajiem nogulumiem (3.14. att.) un augšņu pamatgrupām (3.15. att.) komponentanalīzē tika konstatēts, ka mežaudzē dominējošo koku sugu izplatība ir saistīta ar augsnes ķīmiskajām īpašībām, ko nosaka galvenokārt granulometriskais sastāvs.

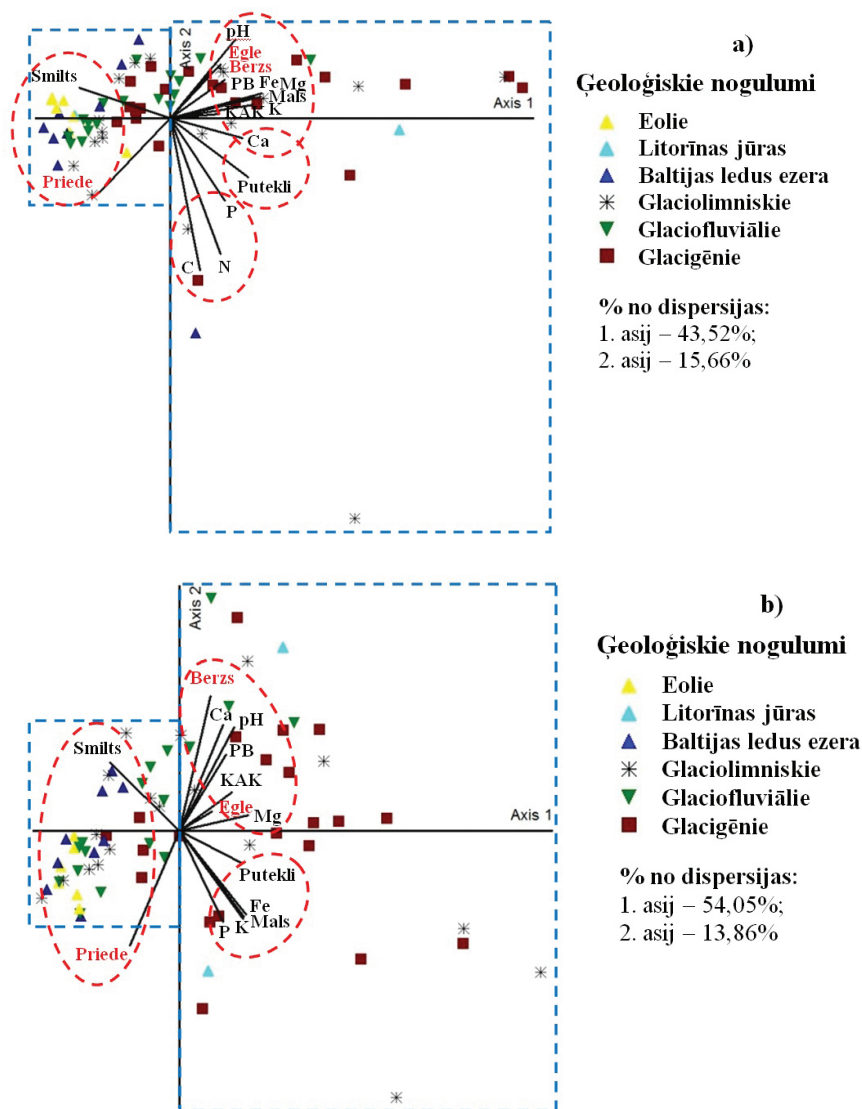
Virsējā minerālā slāņa ķīmisko īpašību komponentanalīzē (3.14. a, 3.15. a att.) konstatēts, ka ar 1. asi, kas izskaidro 43,52% no augsnes paraugu dispersijas, ir konstatēta būtiska pozitīva korelācija starp māla ($r = 0,81$), putekļu ($r = 0,75$) daļiņu saturu un egles izplatību ($r = 0,50$), kā arī ekstrahējamo elementu saturu – Fe ($r = 0,88$), Mg ($r = 0,87$), K ($r = 0,80$), Ca ($r = 0,70$), P ($r = 0,52$), augsnes reakciju ($r = 0,63$), piesātinājumu ar bāzēm ($r = 0,52$), katjonu apmaiņas kapacitāti ($r = 0,50$), kopējo N saturu ($r = 0,50$). Turpretim šiem rādītājiem pastāv negatīva sakarība ar smilts daļiņu saturu ($r = -0,88$) un priedes izplatību ($r = -0,68$). Ar 1. asi netika konstatēta būtiska sakarība ar organiskā C saturu.

Savukārt ar 2. asi, kas izskaidro 15,66% no augsnes paraugu dispersijas, ir konstatēta būtiska negatīva sakarība starp $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ($r = 0,50$) un organiskā C ($r = -0,89$), kopējā N ($r = -0,80$) un ekstrahējamā P ($r = -0,50$) saturu. Tas norāda, ka 2. ass ir saistāma ar organisko vielu ietekmi.

Apakškārtas slānī konstatētas līdzīgas fizikālo un ķīmisko īpašību sakarības ar koku sugām komponentanalīzē (3.14. b, 3.15. b att.) kā virsējā minerālā slānī. Tomēr interesanti, ka apakškārtas augsnes īpašībām netika konstatēta būtiska ($r > 0,50$) sakarība ar egles izplatību. To iespējams skaidrot ar egles virsējo sakņu sistēmu – eglu audžu augšanas apstākļi nav būtiski atkarīgi no augsnes apakškārtas fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām. Turklāt šī slāņa komponentanalīzes rezultāti parāda, ka ar 2. asi, kas izskaidro 13,86% no paraugu dispersijas, pastāv pozitīva būtiska sakarība starp bērza izplatību ($r = 0,60$) un augsnes reakciju ($r = 0,50$), kā arī ekstrahējamā Ca saturu ($r = 0,50$), savukārt šiem rādītājiem pastāv negatīvs gradients ar priedes izplatību ($r = -0,51$).

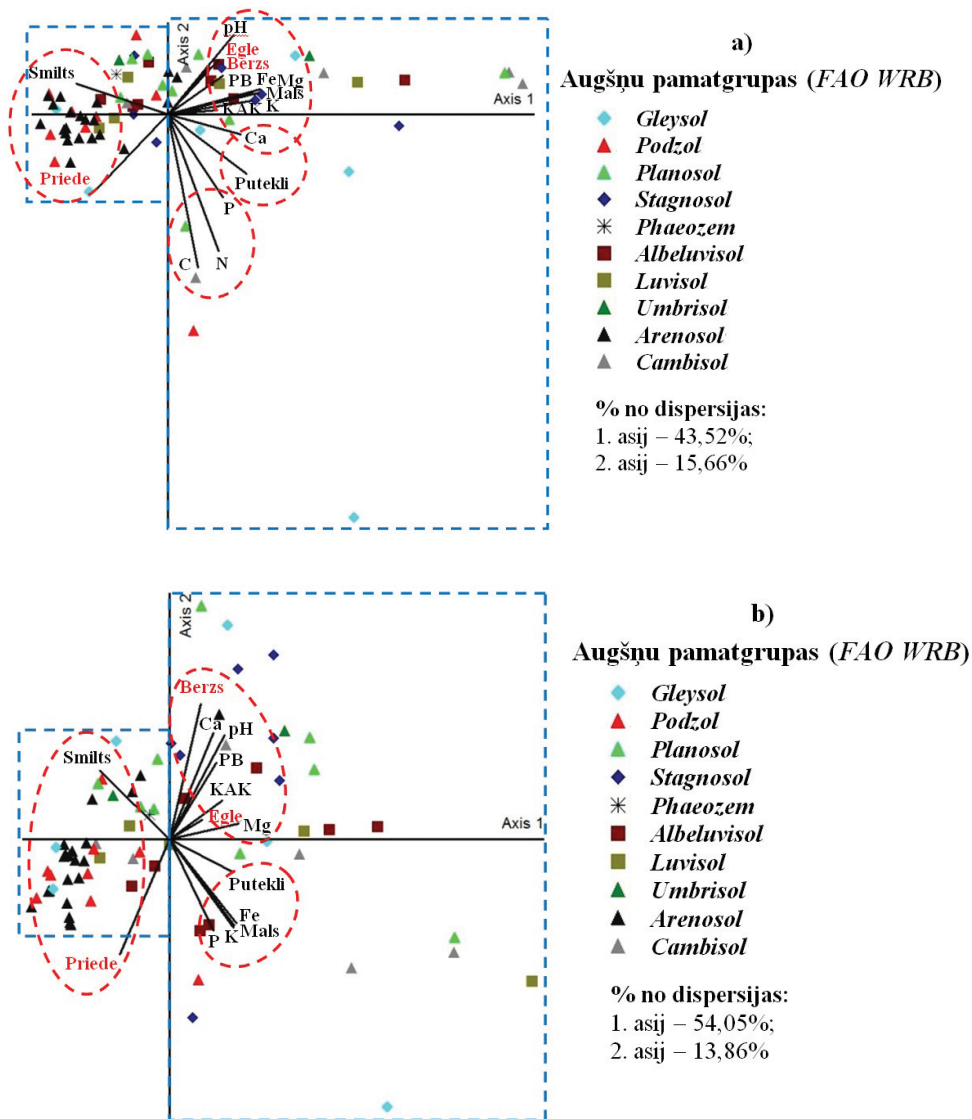
Līdz ar to var secināt, ka relatīvi zemu augsnes paraugu dispersiju nosaka augsts smilts daļiņu saturs un priedes izplatība biežāk ir saistāma ar *Podzol* un *Arenosol* augšņu pamatgrupām, kas veidojušās uz eolajām kāpām, Baltijas ledus ezera un glaciofluviālajiem nogulumiem (3.14. a, 3.15. a att.). Savukārt relatīvi auglīgākās teritorijās līdz ar māla un putekļu daļiņu satura palielināšanos augsta profila dispersija ir saistīta ar egles izplatību galvenokārt uz *Albeluvisol*, *Stagnosol*, kā arī *Luvisol* augšņu pamatgrupām, kas veidojušās galvenokārt uz ledāja veidotajiem (glaciolimniskajiem un glaciģenajiem) nogulumiem (3.14. a, 3.15. a att.).

Augsnes minerālā virsējā slānī dominē relatīvi smags granulometriskais sastāvs (virskārtā galvenokārt smilšmāls). Arī bērza izplatībai ir raksturīgs relatīvi smags granulometriskais sastāvs (virskārtā galvenokārt mālsmilts, smaga mālsmilts) un līdz ar to augstāks piesātinājums ar bāzēm, augstāka katjonu apmaiņas kapacitāte un neitrālāka augsnes reakcija. Tas raksturīgs galvenokārt *Stagnosol* augšņu pamatgrupai.



3.14. attēls. Mežaudzē dominējošo koku sugu (priede, egļe, bērzs (%)) un augsnes virsējā minerālā slānī (a) un apakšējā (b) granulometriskā sastāvā (%) un ķīmisko parametru (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; KAK – katjonu apmaiņas kapacitāte (cmol kg^{-1}); PB – piesātinājuma pakāpe ar bāzēm (%); ekstrahējamie elementi (mg kg^{-1}) – Fe, P, K, Ca, Mg) izvietojums ar komponentanalīzi nodalītājās asīs atkarībā no ģeoloģiskajiem nogulumumiem

Figure 3.14. Distribution of the tree species (pine, spruce, birch [%]) dominant in the forest stands and the soil texture (%) and chemical properties (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; KAK – cation exchange capacity [cmol kg^{-1}]; PB – base saturation [%]; extractable elements [mg kg^{-1}] - Fe, P, K, Ca, Mg) of the mineral topsoil layer (a) and subsoil (b) in the PCA axes depending on geological deposits



3.15. attēls. Mežaudzē dominējošo koku sugu (priede, egle, bērzs (%)) un augsnes virsējā minerālā slānā (a) un apakškārtas (b) granulometriskā sastāva (%) un ķīmisko parametru (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; KAK – katjonu apmaiņas kapacitāte (cmol kg^{-1}); PB – piesātinājuma pakāpe ar bāzēm (%); ekstrahējamie elementi (mg kg^{-1}) – Fe, P, K, Ca, Mg) izvietojums ar komponentanalīzi nodalītajās asīs atkarībā no augšņu pamatgrupām (FAO WRB)

Figure 3.15. Distribution of the tree species (pine, spruce, birch [%]) dominant in the forest stands and the soil texture (%) and chemical properties (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; KAK – cation exchange capacity [cmol kg^{-1}]; PB – base saturation [%]; extractable elements [mg kg^{-1}] - Fe, P, K, Ca, Mg) of the mineral topsoil layer (a) and subsoil (b) in the PCA axes depending on soil groups (FAO WRB)

Pētījums rāda, ka galvenokārt granulometriskais sastāvs nosaka dominējošo koku sugu izplatību Latvijas meža ekosistēmās. Piemēram, egles un bērza izplatība ir saistīta ar relatīvi auglīgākām augsnēm, kur ir augstāks māla un putekļu daļiņu saturs, kā arī plašs ķīmisko īpašību variāciju diapazons, turpretim priedes izplatība ir saistīta ar nabadzīgākām augsnēm un zemu ķīmisko īpašību variāciju diapazonu (3.15. att.).

Iepriekš minēto apstiprina arī citi pētījumi Latvijā. A. Bārdules un kolēģu (Bārdule u. c., 2009) publikācijā noskaidrots, ka pastāv cieša korelācija starp valdošo skuju koku sugu (priedi, egli), mežaudzes bonitāti un māla daļiņu īpatsvaru augsnē, turklāt šīs koku sugas vislabāk aug mālsmilts augsnēs, kur māla daļiņas veido 7–10%. Turpretim lapu koku (bērzs, apse) audzēs, salīdzinot bonitāti un augsnes granulometrisko sastāvu, izteiktas likumsakarības nav konstatētas (Bārdule u. c., 2009).

Līdz ar to secināms, ka Latvijas minerālaugšņu telpiskajā izplatībā un augšņu ķīmisko īpašību veidošanā, kā arī mežaudžu sastāva noteikšanā visbūtiskākā nozīme ir augsnes granulometriskajam sastāvam.

3.5. Kopsavilkums

Latvijas meža augšņu fizikālo un ķīmisko īpašību analīze parāda, ka šīs īpašības nosaka augsnes granulometriskais sastāvs, ko, iespējams, ietekmē arī minerālais sastāvs. Visviendabīgākie augsnes cilmieži Latvijas mežu ekosistēmās ir Litorīnas jūras, Baltijas ledus ezera un eolie nogulumi, kuros smilts frakcijas daudzums pārsniedz 95%. Arī glaciofluvialajos nogulumos ir augsts smilts daļiņu saturs. Augsnes virskārtas granulometriskais sastāvs šajos nogulumos būtiski neatšķiras no augsnes apakškārtas granulometriskā sastāva.

Relatīvi zemāks granulometriskā sastāva variāciju diapazons konstatēts eolajiem, Baltijas ledus ezera un glaciofluvialajiem nogulumiem, bet augstākais – glacigēnajiem un glaciolimniskajiem nogulumiem. Šajos nogulumos līdz ar dziļumu pieaug māla daļiņu saturs. Līdz ar to granulometriskā sastāva atšķirības un izmaiņas ir saistītas ar teritoriju geoloģiskās veidošanās apstākļiem.

Ļoti zema katjonu apmaiņas kapacitāte ir augsnēm, kas veidojušās uz eolajiem nogulumiem, un tās statistiski būtiski atšķiras no visu pārējo nogulumu augsnēm. Visskābākie augsnes slāņi (O horizonts, kā arī virsējais minerālais slānis) konstatēti augsnēm, kas veidojušās uz eolajiem un Baltijas ledus ezera nogulumiem. Savukārt visaugstākās pH_{H_2O} vērtības augšņu O horizontā un minerālā virsējā slānī ir augsnēs, kas veidojušās uz glacigēnajiem nogulumiem. Arī augsnes apakškārtā visaugstākās mediānas vērtības ir glacigēno un glaciolimnisko nogulumu augšņu apakškārtai. Tas skaidrojams ar karbonātu klātbūtni. Kopumā mazākas ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mg, Mn, Fe) koncentrācijas konstatētas Baltijas ledus ezera, eolajos un glaciofluvialajos nogulumos, turpretim relatīvi augstākas šo elementu koncentrācijas ir glaciolimniskajos un glacigēnajos nogulumos.

Augsnes ģenēzes procesu (piemēram, podzolēšanās, izskalošanās, ieskalošanās un akumulācija) interpretācijā iespējams izmantot reaģējošā Al un Fe koncentrāciju, kas parāda augsnes šķīdumā esošo amorfā Al un Fe formu saturu. Piemēram, reaģējošā

Al un Fe koncentrācija dažādās ģenēzes nogulumos savstarpēji statistiski būtiski atšķiras galvenokārt augsnes minerālā virskārtā, nevis apakškārtā. Tas parāda agresīvo fulvoskābju nozīmi Al un Fe ģeoķīmiskajos procesos. Glaciolimniskajos, glaciofluviālajos un glaciģenajos nogulumos, kur reaģējošā Al un Fe augsnes cilmiezī ir daudz vairāk nekā eolajos un Baltijas ledus ezera nogulumos, pateicoties zemajam pH, tas ir ticis iznests no augsnes virskārtas, un to koncentrācija būtiski palielinās B horizontā. Minētā likumsakarība tik spilgti neizpaužas glaciolimniskajos, glaciofluviālajos un glaciģenajos nogulumos. Arī eolajos un Baltijas ledus ezera nogulumos podzolēšanās procesa rezultātā novērojams būtisks Fe un sevišķi Al koncentrācijas pieaugums augsnes 20–40 cm slānī, kas morfoloģiski atbilst B horizontam.

Būtiskas savstarpējās atšķirības pētītajiem fizikālajiem un ķīmiskajiem rādītājiem netika konstatētas starp relatīvi vieglāka granulometriskā sastāva ģeoloģiskajiem nogulumiem (eolie, Baltijas ledus ezera), kā arī starp relatīvi smagāka granulometriskā sastāva ģeoloģiskajiem nogulumiem (glaciolimniskie, glaciģenie). Tomēr starp pirmo un pēdējo iepriekš minēto ģeoloģisko nogulumu grupu fizikālās un ķīmiskās īpašības ir atšķirīgas, jo iepriekš minētie ģeoloģiskie nogulumi atšķiras pēc izcelsmes un veidošanās laika, kā arī granulometriskā un minerālā sastāva, kas atspoguļojas augšņu fizikālajās un ķīmiskajās īpašībās. Kopumā šie faktori ir visnozīmīgākie un nosaka arī augsnes veidošanās procesus un augšņu auglību, no kā savukārt ir atkarīga barības vielām nabadzīgu un bagātu mežaudžu izplatība.

Pētījums rāda, ka galvenokārt granulometriskais sastāvs nosaka dominējošo koku sugu izplatību Latvijas meža ekosistēmās. Piemēram, egles un bērza izplatība ir saistīta ar relatīvi auglīgākām augsnēm, kur ir augstāks māla un putekļu daļiņu saturs, kā arī plašs ķīmisko īpašību variāciju diapazons, turpretim priedes izplatība ir saistīta ar nabadzīgākām augsnēm un zemu ķīmisko īpašību variācijas diapazonu.

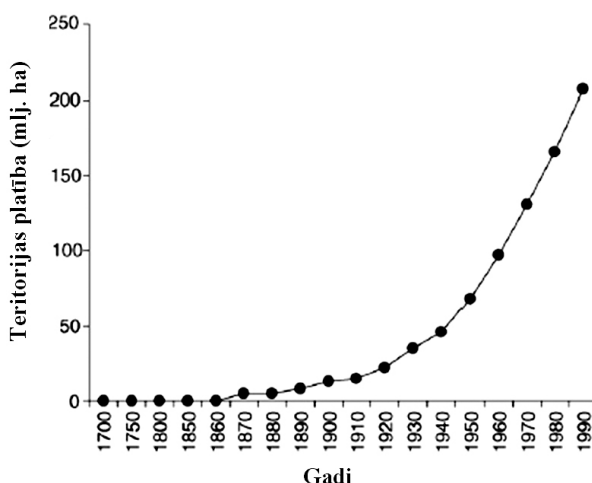
Virsējā minerālā slāņa fizikālo un ķīmisko īpašību relatīvi zema dispersija ir raksturīga sila, mētrāja, lāna, damakšņa un slapjā mētrāja meža tipi, kur augsnes minerālo slāni veido smilts nogulumi, tāpēc šo meža tipu augsnes satur relatīvi mazāk barības vielu, tām ir zemāka katjonu apmaiņas kapacitāte un arī piesātinājuma pakāpe ar bāzēm.

Augsnes apakškārtas fizikālo un ķīmisko īpašību ziņā visneviendabīgākie meža tipi ir vēris, šaurlapju ārenis un slapjais vēris. Iepriekš minētā relatīvi lielā oligotrofo meža tipu augšņu daudzveidība ir arī galvenais iemesls, kāpēc starp meža tipu augsnēm lielākoties netika konstatētas statistiski būtiskas atšķirības. Pēc fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām, kas raksturo augsnes auglību, konstatēts, ka lāns atrodas vienā grupā ar damaksni un mētrāju. Līdz ar to, pamatojoties uz pašreiz iegūtajiem augšņu izpētes rezultātiem, var uzskatīt, ka Latvijas mežu tipu iedalījumā pēc auglības robeža starp oligotrofiem un mezotrofiem tipi ir ļoti nosacīta. Komponentanalīzes rezultāti vienlaikus izvirza jautājumu par šaurlapju āreņa atrašanos mezotrofo mežu tipu grupā. Meža monitoringa ietvaros veiktie pētījumi rāda, ka pēc augsnes īpašībām šaurlapju ārenis ir līdzīgs eitrofiem meža tipi, piemēram, vērim un slapjajam vērim, nevis mezotrofiem meža tipi.

4. AUGŠŅU ĪPAŠĪBU MAIŅA LAUKSAIMNIECĪBAS ZEMJU APMEŽOŠANĀS REZULTĀTĀ

4.1. Literatūras apskats

Zemes pamešana ir raksturīga cilvēces iezīme mijiedarbībā ar ekosistēmām ilgā laika posmā. To parāda pasaulē plaši augošā tendence pamest lauksaimniecībā izmantotās aramzemes. Piemēram, zinātnieki (Cramer et al., 2008, pēc Ramankutty, Foley, 1999) konstatējuši, ka kopš pagājušā gadsimta 50. gadiem pasaulē strauji pieaugušas pamesto aramzemju teritoriju platības (4.1. att.).



4.1. attēls. Pamesto aramzemju platību izmaiņas pasaulē no 1700. līdz 1990. gadam
(Cramer et al., 2008, pēc Ramankutty, Foley, 1999)

Figure 4.1. Changes of abandoned arable lands in the world from 1700 to 1990 year
(Cramer et al., 2008, after Ramankutty, Foley, 1999)

Zemes apsaimniekošana nozīmīgi ietekmē augsnes veidošanās procesus, tās morfoloģiju un fizikālās un ķīmiskās īpašības (Kristiansen, 2001; Wall, Hytönen, 2005; Armolaitis et al., 2007). Daudzviet Eiropā pašlaik aktuāla problēma ir lauksaimniecības zemju atstāšana atmatā un to pakāpeniska apmežošanās (Lipsky, 1995; Kristensen et al., 2001; Mander, Kuuba, 2004; Sitzia et al., 2010). Līdz ar to mainās ne tikai ainava, bet notiek arī pakāpeniskas izmaiņas augsnē.

Lauksaimniecības zemju apmežošana ar skujkokiem, pateicoties nobīrām, izraisa būtiskas izmaiņas minerālaugsnes virskārtā, ko ietekmē nobiru apjoms (Armolaitis et al., 2007). Tāpēc augsnē palielinās organisko vielu daudzums (Paul et al., 2002; Vesterdal et al., 2002) un ar to saistīto katjonu aprīte (Birkeland, 1984). Minerālaugsnes virskārtā samazinās pH (Reynolds et al., 1988; Alriksson, Olsson, 1995; Andersson et al., 2002; Vesterdal et al., 2002; Ritter et al., 2003), kas sekmē podzolēšanās procesa attīstību (Miles, 1985).

Augsnes pārveidošanās procesi, sevišķi boreālajā un nemorālajā biotā, noris lēni, tādēļ kopumā relatīvi maz ir informācijas par lauksaimniecības zemju apmežošanās ietekmi uz augsni un tās auglību.

Viens no aktuālajiem jautājumiem ir zemes lietošanas veidu radikāla maiņa un to iespējamā ietekme uz augsnes kvalitāti ilgtermiņā (Līpenīte, Kārklīšs, 2011a). Latvijā šādus pētījumus par augsnes kvalitātes, fizikālo un agroķīmisko īpašību izmaiņām zemes izmantošanas maiņas kontekstā ir uzsākuši Ināra Līpenīte un Aldis Kārklīšs (Līpenīte, Kārklīšs, 2011a, b). Noskaidrots, ka mežā, salīdzinot ar apstrādājamām zemēm, kur liela daļa izaudzētās biomasas tiek novākta, palielinās organisko vielu ienese augsnē, taču uzkrājums veidojas galvenokārt O horizontā, turklāt organiskā oglekļa uzkrāšanās tendences vairāk raksturīgas vājāk iekultivētām smilts augsnēm, savukārt smagāka granulometriskā sastāva augsnēs ar augstu augu barības elementu nodrošinājumu pat 30 gadus pēc apmežošanas organiskā oglekļa krājumi augsnes minerālā daļā samazinās (Līpenīte, Kārklīšs, 2011a).

Latvijā, tāpat kā daudzviet Eiropā, daļa meža zemju ir veidojušās uz bijušajām lauksaimniecības zemēm. No 1925. līdz 2007. gadam mežu platības Latvijā ir palielinājušās no 25 līdz 54,7% (Latvijas statistika, 2010). Lauksaimniecības zemju apmežošanās process Latvijā notiek arī pašlaik (Penēze, 2009; Ruskule et al., in press). Pēdējos gadsimtos pakāpeniskas zemes izmantošanas strukturālo izmaiņu dēļ Latvijā bijušajās lauksaimniecības zemēs sastopamas dažāda vecuma meža zemes, kas paver plašas iespējas izziņāt lauksaimniecības zemju apmežošanās ietekmi uz augsnes ģenēzi, morfoloģiju un īpašībām.

Līdz šim pasaulē pētītas galvenokārt smilts augšņu izmaiņas saistībā ar apmežošanu (Armolaitis et al., 2007; Nielsen et al., 1999; Hagen-Thorn et al., 2004; Smal, Olszewska, 2008; Wall, Hytönen, 2005; Alriksson, Olsson, 1995; Miller et al., 2001; Paul et al., 2002, 2003). Smilts augsnēs augsnes pārveidošanās procesi norisinās relatīvi ātrāk nekā smaga granulometriskā sastāva augsnēs (smaga mālsmilts, smilšmāls, māls), kuru morfoloģiskās un fizikālās un ķīmiskās izmaiņas tādēļ ir relatīvi maz pētītas (nozīmīgākie pētījumi: Falkengren-Grerup et al., 2006; Vesterdal et al., 2002; He, Tang, 2008; Reintam, 2007).

Iepriekš minētais rosinājis izpēti veikt dažāda vecuma meža zemēs, kur parastās egles (*Picea abies* (L.) H. Karst.), āra bērza (*Betula pendula* Roth.), baltalkšņa (*Alnus incana* (L.) Moench) un parastās apses (*Populus tremula* L.) kokaudzes ir kolonizējušas bijušās lauksaimniecības zemes un kur augsnes cilmiezi veido glacigēnie nogulumi (smaga mālsmilts, smilšmāls).

4.2. Pētījumu materiāli un metodes

4.2.1. Lauka pētījumi un augsnes analīzes

2009. gadā pētījumi veikti astoņos 25–200 gadus vecu meža zemju parauglaukumos. Visi meža parauglaukumi tika ierīkoti vērī (*Oxalidos*) 25–100 gadus vecās mežaudzēs. Meža zemju vecums noteikts, veicot speciālu pētījumu par Spinduļu meža vēsturi (Lūkins, Nikodemus, 2011). Izpētei izmantoti Latvijas Valsts vēstures arhīva fondos Nr. 1679, 7404 un 6828 uzglabātie Nītaures muižas un draudzes un Annas muižas plāni un kartes, kā arī Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” mežierīcības arhīva materiāli (no 1938. līdz 2000. gadam) par Siguldas novada Nītaures mežniecību, Cēsu virsmežniecības Nītaures un Zaubes mežniecību. Kokaudzes vecums pētītajās mežaudzēs noteikts, lietojot Preslera svārpstu. Atbilstoši Latvijas mežu tipoloģijai (Bušs, 1981) noteikti arī meža tipi parauglaukumos.

Paralēli meža augšņu izpētei viens augsnes dziļrakums izdarīts ekstensīvi izmantotās ganībās. Dziļrakuma vieta izvēlēta, pirms tam zondējot augsni.

Augsnes rakums šajā gadījumā raksturo tipiskāko augsnes profilu apsekotajā zālājā. Pētītā lauksaimniecības zeme nav arta kopš pagājušā gadsimta 70. gadiem un visu laika posmu izmantota kā ganības, par ko papildus minētajai karšu un mežierīcības materiālu izpētei liecina arī vietējo iedzīvotāju aptauja, kuras laikā precizēta mežu un lauksaimniecības zemju izmantošanas un apsaimniekošanas vēsture.

Augsnes paraugi lauksaimniecības un meža zemēs ievākti no katra augsnes horizonta vai slāņa trīs atkārtojumos, pēc tam izveidots vidējais paraugs. Kopumā 9 augsnes dziļrakumos no katra augsnes horizonta vai slāņa ievākti 52 vidējie augsnes paraugi. Augsnes profili aprakstīti atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai (IUSS Working Group, 2007). Turklāt pētījuma parauglaukumā noteikta ģeoloģisko nogulumu ģenētiskā izcelsme un sastāvs, kā arī parauglaukumu novietojums reljefā.

Augsnes paraugu fizikālās un ķīmiskās analīzes izdarītas Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē, kā arī Bioloģijas fakultātē. Pēc paraugu nogādāšanas laboratorijā tie izžāvēti līdz gaissausam stāvoklim, tad minerālaugsnes paraugi izsijāti caur 2 mm sietu, bet organiskais materiāls – caur 4 mm sietu. Pēc paraugu sagatavošanas analīzēm noteikts to granulometriskais sastāvs, augsnes pH_{KCl} , skābā amonija oksalāta ekstrahējamā dzelzs $[\text{Fe}_o]$ un alumīnijs $[\text{Al}_o]$, kopējais slāpeklis $[\text{N}_{\text{kop}}]$, fosfors $[\text{P}_{\text{kop}}]$, kalciji $[\text{Ca}_{\text{kop}}]$, magnijs $[\text{Mg}_{\text{kop}}]$ un kālijs $[\text{K}_{\text{kop}}]$. Analīzes veiktas atbilstoši FSCC (*Forest Soil Co-Ordinating Centre*) (2006) metodēm.

Nosakot augsnes granulometriskā sastāvu, paraugi apstrādāti ar 0,1M NaOH šķīdumu. Granulometriskais sastāvs noteikts, izmantojot pipetēšanas metodi (Van Reeuwijk, 1995). Balstoties uz *USDA* augsnes granulometriskā sastāva iedalījumu, frakcija ar daļiņu lielumu no 0,063 līdz 2,0 mm klasificēta kā smiltis, daļiņas no 0,002 līdz 0,063 mm – kā putekļi, bet smalkākās daļiņas, kas mazākas par 0,002 mm – kā māls (FSCC, 2006). Granulometriskā sastāva grupa noteikta, lietojot nomogrammu (Kārklīņš, 2008).

Augsnes pH noteikts, izmantojot pH-metru *WTW inoLab* ar stikla elektrodu, 1M KCl šķīdumā (masas/tilpuma attiecība 1 : 2,5). Amorfā dzelzs (Fe_o) un alumīnijs (Al_o) noteikts 0,2M amonija oksalāta šķīdumā pie pH 3 (USDA, 2004).

Kopējā elementu (Ca, Mg, K), kā arī Fe_0 un Al_0 koncentrācija amonija oksalāta šķīdumā noteikta ar atomabsorbcijas spektrometru *Perkin Elmer Analyst 200*. Kopējais N noteikts, izmantojot Kjeldāla standartmetodi (ISO, 11261), bet kopējais P – ar spektrofotometru *Zuzi 4210/20*.

Humusvielas no augsnes ekstrahētas ar 0,1M NaOH; šķīduma–augšnes attiecība 10 : 1. Kopējā organiskā oglekļa (angl. – *total organic carbon (TOC)*) koncentrācija (mg L^{-1}) noteikta 0.1M NaOH ekstraktā, izmantojot kopējā oglekļa analizatoru *Shimadzu TOC-Vcsn*. Noteiktais TOC (mg L^{-1}) lietots, lai aprēķinātu NaOH izdalāmā organiskā oglekļa koncentrāciju augsnē (OC_{NaOH} , mg g^{-1}). Fluorescences spektri noteikti ar fluorescences spektrometru *Perkin-Elmer LS-55*.

Humifikācijas indekss (I_{510}/I_{460}) aprēķināts kā fluorescences intensitātes (I) pie 510 nm attiecība pret fluorescences intensitāti pie 460 nm (Kalbitz et al., 1999). Augšnes ekstrakti ar 0,1M NaOH paskābināti līdz $\text{pH} < 2$ ar koncentrētu H_2SO_4 , izgulsnētās humīnskābes (HA) atdalītas centrifugējot. Fulvoskābju koncentrācija, izsakot to kā TOC (mg L^{-1}), noteikta ar kopējā oglekļa analizatoru *Shimadzu TOC-Vcsn*.

Visas fizikālās un ķīmiskās analīzes izdarītas 3 atkārtojumos. Laboratorijas analīžu rezultāti uzskatīti par ticamiem, ja starpība starp noteiktajām vērtībām mazāka par $\pm 5\%$.

4.2.2. Datu statistiskā apstrāde

Augsnes paraugu ķīmisko analīžu rezultātā iegūtie dati tika izmantoti datu statistiskajā apstrādē, analīzē un interpretācijā. To statistiskās analīzes (vidējās aritmētiskās vērtības un standartnovirzes) tika veiktas atsevišķi katram parametram un atsevišķi katram ģenētiskajam horizontam, izmantojot *Microsoft Excel 2007* programmu. Variāncu analīze (vienfaktoru dispersijas analīze (*One-way ANOVA*)) tika veikta, lai noskaidrotu Ap horizontu īpašību (pH_{KCl} , OC_{NaOH} , organiskās vielas humifikācijas indekss I_{510}/I_{460} , $C_{\text{HA}} : C_{\text{FA}}$) būtiskās atšķirības starp lauksaimniecības zemi un meža zemēm. Pēc galvenās hipotēzes pārbaudes detalizēti salīdzinājumi tika veikti, izmantojot *Tukey* un *Scheffe HSD post-hoc* testus ($\alpha = 0,05$). Aprēķini tika veikti, lietojot *SPSS PASW Statistics 18* programmu.

Galveno komponentu analīze tika veikta, izmantojot *PC-ORD 5.0* programmu, lai noskaidrotu sakarības starp apmežošanās vecumu (gadi) un vidējo organiskā oglekļa saturu, I_{510}/I_{460} un $C_{\text{HA}} : C_{\text{FA}}$ minerālaugsnes O un Ap horizontā 8 parauglaukumos. *Monte Carlo* tests tika veikts, lai pārbaudītu būtiskumu galveno komponentu asīm. Komponentanalīzē Pīrsona korelācijas koeficienti (r) tika noskaidroti starp šiem faktoriem un paraugiem.

4.3. Rezultāti

Pētījums veikts Latvijas centrālajā daļā, Vidzemes augstienē, vāji saposmotā reljefā (200–300 m virs jūras līmeņa). Teritorijā dominē morēnas pauguri, kēmi un plato virsas pauguri (Lūkins, Nikodemus, 2011). Augšnes cilmiezi morēnu pauguros veido smilšmāls un māls, kēmos – rupja smilts, bet plato virsas pauguros – māls. Lauksaimniecības zemju apmežošanās ietekmes uz augsni novērtēšanai pētījuma parauglaukumi ierīkoti lauksaimniecības un meža zemēs, kur augsnes cilmiezi veido glacigēnie nogulumi.

4.1. tabula

Parauglaukumu, kokaudzes un augsnes raksturojums pētījuma teritorijā

Table 4.1.

Characterization of the sampling sites, forest stands and soils in the study area

Augsnes profila Nr.	Dominējošā koku suga (kvantitāte)	Meža zemes vecums (gadi)	Meža vecums (gadi)	Augsnes pamatgrupa (FAO WRB)	Augsnes granulo- metriskais sastāvs (virskārtā/ apakškārtā)	CaCO ₃ dziļums (cm)	Novie- tojums reljefā
1.	—	—	—	<i>Endostagnic Cutanic Luvisol</i>	Smaga mālsmilts/ smaga mālsmilts	73	Nogāze
2.	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst. (100%)	25	25	<i>Endostagnic Cutanic Albeluvisol</i>	Smaga mālsmilts/ smaga mālsmilts	104	Virsozne
3.	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst. (80%); <i>Betula pendula</i> Roth. (20%)	70	60	<i>Endostagnic Cutanic Luvisol</i>	Smaga mālsmilts/ smilšmāls	65	Virsozne
4.	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst. (50%); <i>Betula pendula</i> Roth. (30%); <i>Alnus incana</i> (20 %) + <i>Populus tremula</i>	70	70	<i>Endostagnic Cutanic Luvisol</i>	Smaga mālsmilts/ smaga mālsmilts	111	Virsozne
5.	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst. (90%); <i>Betula pendula</i> Roth. (10%)	100	100	<i>Luvic Stagnosol</i>	Smaga mālsmilts/ smaga mālsmilts	108	Virsozne
6.	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst. (90%); <i>Betula pendula</i> Roth. (10 %)	100	100	<i>Luvic Stagnosol</i>	Smaga mālsmilts/ smilšmāls	67	Nogāze
7.	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst. (90%); <i>Betula pendula</i> Roth. (10 %)	150	100	<i>Endostagnic Cutanic Luvisol</i>	Smaga mālsmilts/ smilšmāls	65	Virsozne
8.	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst. (80%); <i>Betula pendula</i> Roth. (10%); <i>Populus tremula</i> L. (10%)	200	80	<i>Luvic Stagnosol</i>	Smaga mālsmilts/ smilšmāls	90	Virsozne
9.	<i>Populus tremula</i> L. (80%); <i>Betula pendula</i> Roth. (10%); <i>Picea abies</i> (L.) H. Karst. (10%)	200	80	<i>Endostagnic Cutanic Albeluvisol</i>	Smaga mālsmilts/ smilšmāls	90	Virsozne

Vidzemes augstienē klimats ir mērens. Gaisa vidējā temperatūra jūlijā ir +16,5 °C, bet janvārī –6 °C. Ikgadējie nokrišņi ir 750–850 mm, no kuriem aptuveni 500 mm izkrīt vasarā un rudenī. Faktiskā iztvaikošana sasniedz 67% no nokrišņu daudzuma, savukārt 33% nokrišņu infiltrējās augsnē vai veido virszemes noteci (Krauklis, 2000).

Zaubes pagastā, kur veikts pētījums, lauksaimniecības zemes aizņem 34,4% no pagasta kopplatības; 43,9% no minētajām zemēm 2005. gadā netika apsaimniekotas (Nikodemus et al., 2010), savukārt lielu daļu no apsaimniekotajām zemēm aizņēma ganības un pļavas.

Pētītajos parauglaukumos augsnes minerālo virskārtu veido smaga mālsmilts, bet cilmiezi – smaga mālsmilts vai smilšmāls. Pēc starptautiskās *FAO WRB* augšņu klasifikācijas pētītās augsnes atbilst *Endostagnic Cutanic Luvisols*, *Endostagnic Cutanic Albeluvisols* un *Luvic Stagnosols* klasifikācijas vienībām (4.1. tab.). Pētījumā netika konstatētas augsnes grupu atšķirības saistībā ar lauksaimniecības zemju apmežošanās laiku.

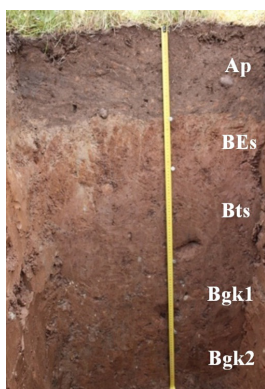
Pētītajā teritorijā lauksaimniecības zemes vēsturiski ir apmežojušās vai arī pēc izstrādes izcirtums atjaunojies ar parasto egli (*Picea abies* (L.) H. Karst.), āra bērzu (*Betula pendula* Roth.), balttalksni (*Alnus incana* (L.) Moench) un parasto apsi (*Populus tremula* L.).

Mežaudzes meža zemēs, kuru vecums līdz 100 gadiem, veido koku sugas, kas ir kolonizējušas laukus tūlīt pēc to izmantošanas pārtraukšanas. Savukārt meža zemēs, kas vecākas par 150 gadiem, meži vienreiz tikuši nocirsti un audze pēc tam atjaunojusies dabiski.

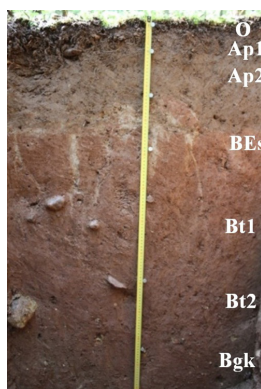
Pētījumā konstatētas acīmredzamas morfoloģisko pazīmju izmaiņas augsnes profilos atkarībā no meža zemju vecuma. Trūdvielu akumulācijas horizonti (Ap horizonta biezums 21–27 cm) biežāki ir lauksaimniecības zemes augsnē un jaunākajās meža zemēs (4.2. att., 1., 2., 3. augsnes profils). Savukārt 150 gadu vecā meža zemē (4.2. att., 7. augsnes profils), kur kokaudei veido parastā egļu, Ap horizonta biezums ir tikai 6 cm; 200 gadu vecā meža zemē (4.2. att., 8. augsnes profils), kur dominējošās koku sugas ir āra bērzs un parastā apse, Ap horizonta biezums ir 18 cm. Izteikts *Albic* (E) horizonts tika konstatēts 70 gadus vecās un vecākās meža zemju augsnēs (4.2. att., 3., 7. un 8. augsnes profils). Savukārt jaunākās meža zemju augsnēs (4.2. att., 2. augsnes profils) un lauksaimniecības zemē (4.2. att., 1. augsnes profils) augsnes profilā redzamas tikai E horizonta pazīmes. Te novērojams vāji izteikts *Albeluvic* mēļveidīgums, kas, iespējams, saglabājies no perioda pirms lauksaimniecības zemju ierīkošanas, un tas redzams 1., 2. un 8. augšņu profila B horizontā.

Stagnic pazīmes konstatētas visos augšņu profilos (4.2. att.). *Stagnic* krāsu salikums redzams lauksaimniecības un relatīvi jaunāko meža zemju augšņu B horizontā 73–105 cm dziļumā. Vecākās meža zemēs *Stagnic* krāsu salikums novērojams EB un E horizontā 22–45 cm dziļumā virs blīvā B horizonta.

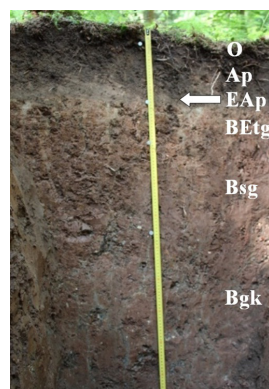
Kalcija karbonāti pētītajos augšņu profilos ir sastopami 65–111 cm dziļumā. Vistuvāk augsnes virskārtai – 65 cm (4.2. att., 4.2. tab.) dziļumā – CaCO_3 ir 3. un 7. augšņu dziļrakumā. CaCO_3 sastopamības dziļums pētītajā apvidū nav saistīts ar meža zemes vecumu, lai gan to klātbūtne var ietekmēt augsnes veidošanās procesus.



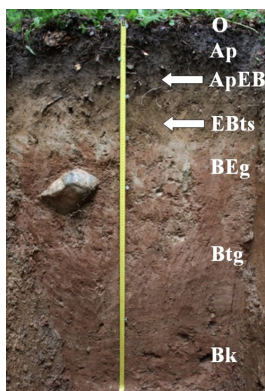
Augsnes profils Nr. 1
Endostagnic Cutanic Luvisol
Pļava



Augsnes profils Nr. 2
Endostagnic Cutanic
Albeluvisol
Vēris
(100% *Picea abies* (L.)
H. Karst.)
Kokaudzes vecums: 25 gadi
Meža zemes vecums: 25 gadi



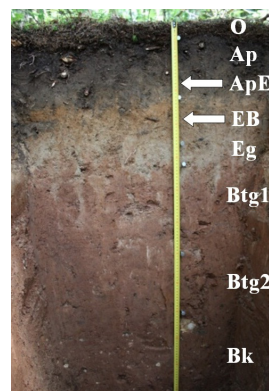
Augsnes profils Nr. 3
Endostagnic Cutanic Luvisol
Vēris
(80% *Picea abies* (L.)
H. Karst.,
20% *Betula pendula* Roth.)
Kokaudzes vecums: 60 gadi
Meža zemes vecums: 70 gadi



Augsnes profils Nr. 5
Luvic Stagnosol
Vēris
(90% *Picea abies* (L.)
H. Karst.,
10% *Betula pendula* Roth.)
Kokaudzes vecums: 100 gadi
Meža zemes vecums:
100 gadi



Augsnes profils Nr. 7
Endostagnic Cutanic Luvisol
Vēris
(90% *Picea abies* (L.)
H. Karst.,
10% *Betula pendula* Roth.)
Kokaudzes vecums: 100 gadi
Meža zemes vecums:
150 gadi



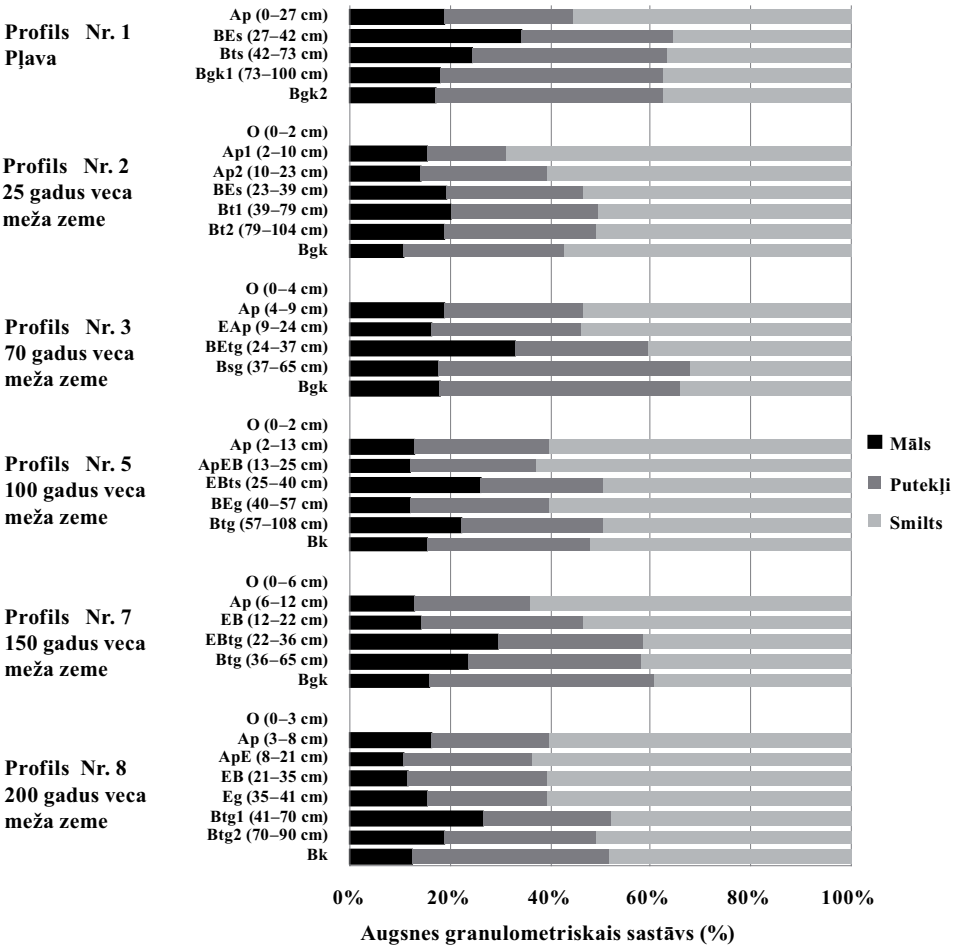
Augsnes profils Nr. 8
Luvic Stagnosol
Vēris
(80% *Picea abies* (L.)
H. Karst.,
10% *Betula pendula* Roth.,
10% *Populus tremula* L.)
Kokaudzes vecums: 80 gadi
Meža zemes vecums:
200 gadi

4.2. attēls. Parauglaukumu un augsnes profilu raksturojums

Figure 4.2. Description of sampling sites and soil profiles

Augsnes horizontu granulometriskais sastāvs pētītajās augsnēs kopumā ir relatīvi līdzīgs. Augsnes virskārtā dominē smaga mālsmits, bet cilmiezī – smilšmāls un 2. parauglaukumā – smaga mālsmits. Augstāks māla daļiņu daudzums visās augsnēs, izņemot 8. profilu, konstatēts tieši zem aramkārtas slāņa – BE un EB horizontā (4.3. att.). Māla daļiņas šajos horizontos ir indikators māla iluviālai akumulācijai – par to liecina arī daļiņu orientācija augsnes tukšumos, kā arī veidošanās *in situ*.

Relatīvi vecākā meža zemē (8. augsnes profils) salīdzinoši lielāks māla daļiņu daudzums konstatēts Btg horizontā, kas atrodas dziļāk par iepriekš minēto BE un EB horizontu citos augšņu dziļrakumos (4.3. att.).



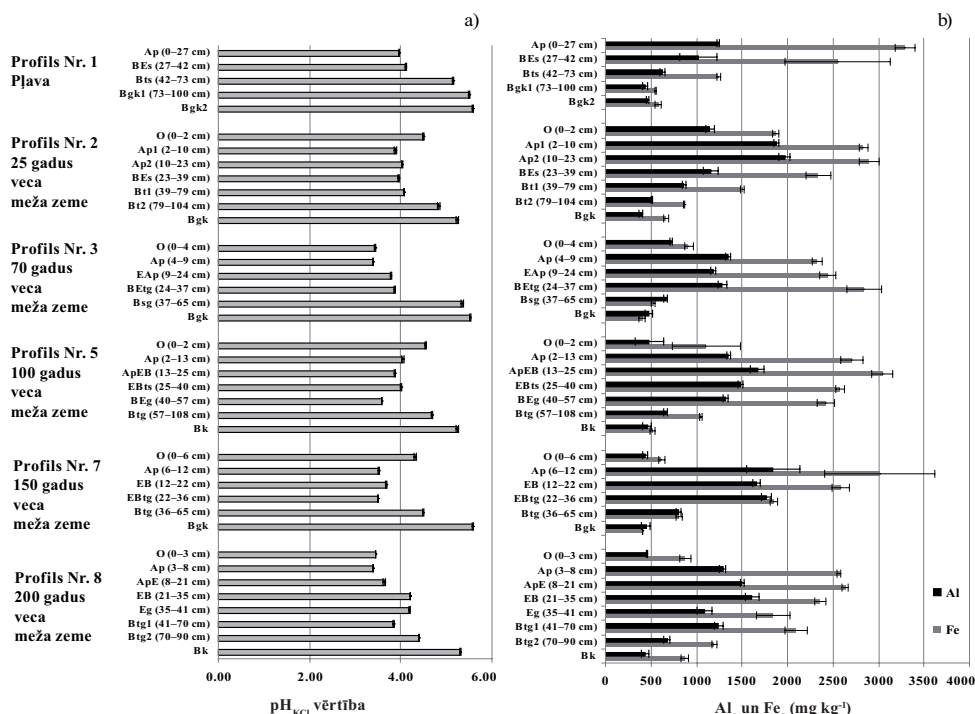
4.3. attēls. Augsnes granulometriskais sastāvs pļavu ekosistēmas un dažāda vecuma meža zemju augsnēs

Figure 4.3. Soil texture in the soils of grassland and forest lands of different ages

Vecākās meža zemēs, salīdzinot ar 25-gadīgu meža zemi un lauksaimniecības zemi, pH_{KCl} vērtība virsējā minerālā horizontā ir zemāka (4.4. a att.). Būtiskas savstarpējas pH_{KCl} vērtību atšķirības vecāko mežu zemju (70, 150 un 200 gadus vecās meža zemēs) virsējos minerālajos horizontos pētījumā netika konstatētas; arī O horizonta pH_{KCl} nav tieši atkarīgs no meža zemes vecuma.

Pētījums parādīja, ka pļavā, salīdzinot ar meža zemi, augsnes Ap horizontā ir augstāka Fe_o koncentrācija (4.4. b att.). Savukārt meža zemju augsnēs relatīvi augstāka Fe_o koncentrācija ir zem Ap horizonta esošajos horizontos, arī sekundārajā E un B horizontā (3., 5. un 8. augšņu profils). Minētā sakarība nav īpaši skaidra, jo 7. profilā augstākā Fe_o koncentrācija ir tieši Ap horizontā.

Lauksaimniecībā izmantojamo zemju un jaunāko meža zemju augsnēs, salīdzinot ar vecajām mežu zemēm, izteikti augstāka Al_o koncentrācija tika konstatēta Ap horizontā (4.4. b att.). Turklāt šajās augsnēs Al_o koncentrācija strauji samazinās dziļākajos horizontos. Savukārt vecāko meža zemju EB horizontā Al_o koncentrācija ir tikpat augsta kā virsējos minerālajos horizontos. Turklāt 200 gadus vecās meža zemes EB horizontā (8. augsnes profils) novērojama augstākā vidējā Al_o koncentrācija (1611 mg kg⁻¹) šajā profilā. Minētais horizonts veidojies sekundārās podzolēšanās procesā. Līdzīgas tendences novērotas arī citās relatīvi vecākās meža zemju augsnēs.



4.4. attēls. pH_{KCl} (a) vidējā vērtība un Al_o un Fe_o vidējā koncentrācija un standartnovirze (b) pļavu ekosistēmas un dažāda vecuma meža zemju augsnēs

Figure 4.4. Average values and standard deviations of pH_{KCl} (a) and Al_o and Fe_o concentration (b) in the soils of grassland and forest lands of different ages

Lauksaimniecības zemju apmežošanās ietekmē augsnes organiskā oglekļa koncentrāciju, un meža augsnēs tā uzkrāšanās notiek galvenokārt O horizontā (4.5. a att.), kur visos meža augšņu profilos koncentrācija ir visaugstākā. Augsnes minerālajos horizontos OC_{NaOH} lielākā koncentrācija ir Ap horizontā, turklāt vecākās meža zemēs tā ir augstāka. Salīdzinot ar lauksaimniecības zemēm, meža zemju augsnēs horizontā zem Ap horizonta (EB horizontā) ir notikusi organiskā oglekļa ieskalšanās no virskārtas vai arī akumulācija, atmirstot saknēm un citiem organiskajiem materiāliem. Tomēr visaugstākā organiskā oglekļa koncentrācija Ap horizontā nav visvecākajās meža zemēs, bet gan *Endostagnic Cutanic Luvisol* augsnē, kas atrodas 70 gadu vecā meža zemē (3. augsnes profils). Ļoti liela OC_{NaOH} koncentrācija ir arī 3. augsnes profilā EAp horizontā. Dati rāda, ka 70 gadu ilgā laika posmā pēc apmežošanās sākuma organiskā oglekļa saturs augsnē ir pieaudzis. Pēc 70 gadiem organiskā oglekļa daudzums augsnes Ap horizontā, sasniedzot koncentrāciju 14,8–24,8 mg g⁻¹, nostabilizējas un vairs nepalielinās (4.2. tab.).

4.2. tabula

Organiskā oglekļa, organisko vielu humifikācijas indeksa vidējās vērtības un $C_{HA} : C_{FA}$ izmaiņas virsējos augsnes horizontos saistībā ar meža zemes vecumu

Table 4.2.

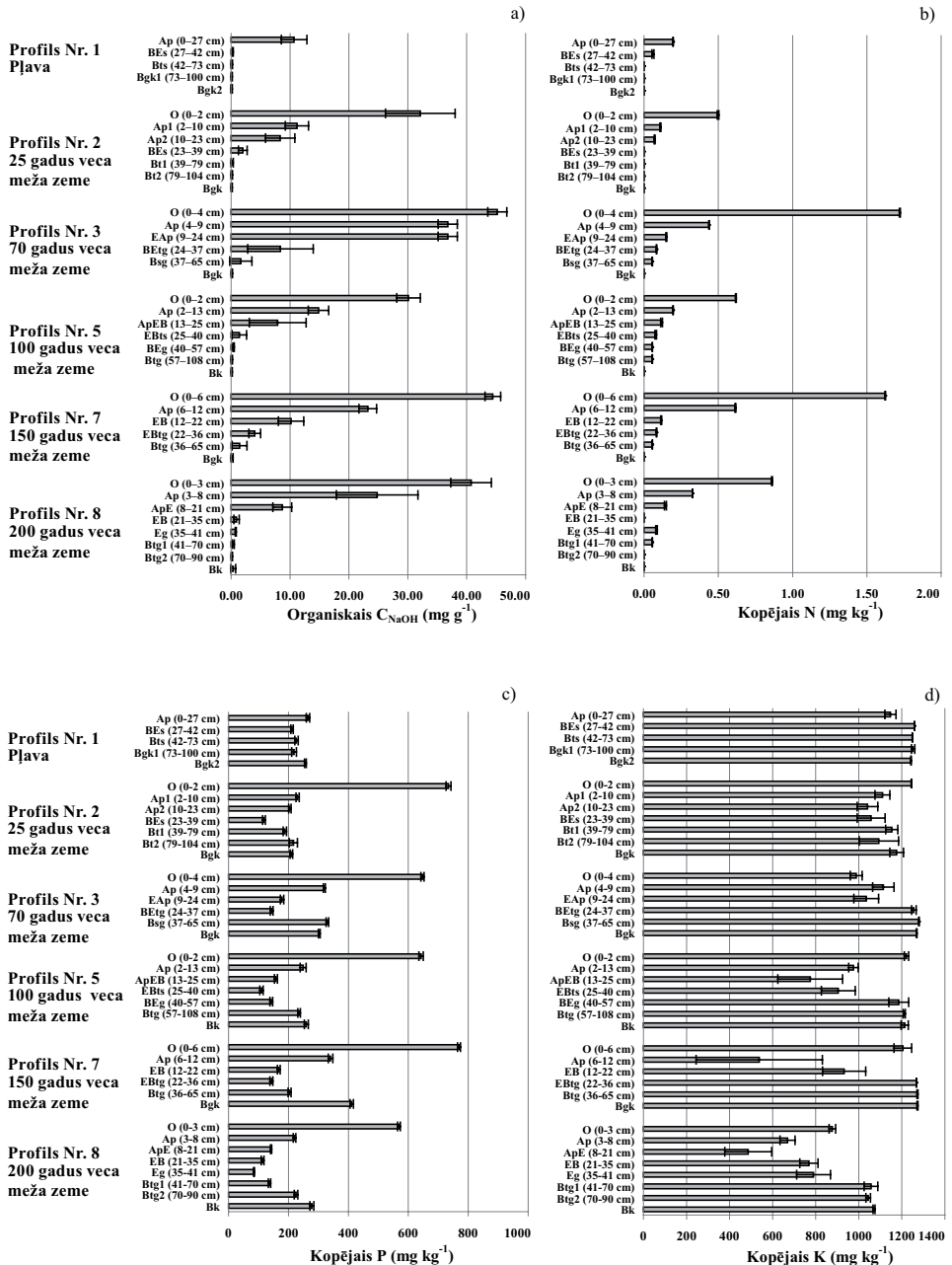
Average values of organic carbon, humification index of organic matter and $C_{HA} : C_{FA}$ changes in the topsoil horizons depending on the age of forest land

Augsnes profila Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Meža zemes vecums, gadi		0	25	70	70	100	100	150	200	200
OC_{NaOH} (mg g ⁻¹)	O horizonts	-	32,1 (3,91)	45,2 (1,61)	38,4 (3,56)	45,2 (1,64)	30,1 (1,19)	44,4 (1,34)	40,8 (3,45)	32,8 (1,31)
	Ap horizonts	10,7 (2,17)	^a 11,2 (1,97)	^b 36,8 (1,62)	^b 21,9 (1,71)	^b 22,2 (1,62)	^a 14,8 (1,73)	^b 23,2 (1,5)	^b 24,8 (2,93)	^b 18,9 (2,31)
OC_{NaOH} (mg g ⁻¹)	O/Ap horizonts	-	2,87	1,23	1,75	2,04	2,03	1,91	1,65	1,74
Organiskās vielas humifikācijas indekss I_{510}/I_{460}	O horizonts	-	0,57 (0,01)	0,69 (0,02)	0,62 (0,02)	0,71 (0,01)	0,58 (0,04)	0,68 (0,01)	0,66 (0,01)	0,62 (0,01)
	Ap horizonts	0,63 (0,01)	^a 0,58 (0,02)	^a 0,64 (0,01)	^b 0,73 (0,02)	^b 0,77 (0,01)	^a 0,65 (0,01)	^b 0,78 (0,02)	^b 0,70 (0,02)	^b 0,70 (0,01)
$C_{HA} : C_{FA}$	Ap horizonts	1,24 (0,07)	^b 0,55 (0,01)	^b 0,33 (0,02)	^b 0,37 (0,02)	^b 0,56 (0,01)	^b 0,49 (0,05)	^b 0,34 (0,03)	^b 0,35 (0,05)	^b 0,39 (0,04)

^a – nav būtisks.

^b – ir būtisks (salīdzinot lauksaimniecības zemes un meža zemes Ap horizonta augsnes īpašības, izmantojot *Tukey* un *Scheffe* testu).

Kā jau iepriekš atzīmēts, OC_{NaOH} koncentrācija O horizontā visos gadījumos ir augstāka nekā Ap horizontā, un šīs atšķirības ir vairāk izteiktas relatīvi jaunākās meža zemēs (2. augsnes profils). O un Ap horizontā, 2. augsnes profilā organiskās vielas humifikācijas indekss I_{510}/I_{460} ir vismazākais (4.2. tab.). Tai pašā laikā minētais rādītājs augstāko vērtību sasniedz O horizontā, 5. augsnes profilā un Ap horizontā, 7. augsnes profilā. Tas liecina, ka humifikācijas process nav tieši saistīts ar meža zemes vecumu.

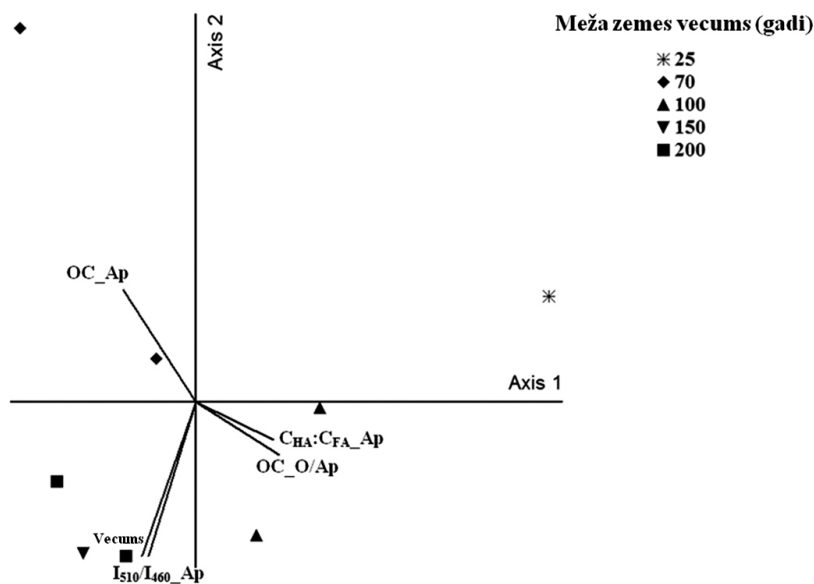


4.5. attēls. Organiskā C_{NaOH} (a) un kopējā N (b), P (c), K (d) vidējās koncentrācijas vērtības un standartnovirzes pļavu ekosistēmas un dažāda vecuma meža zemju augsnēs

Figure 4.5. Average values and standard deviations of organic C_{NaOH} (a) and total N (b), P (c), K (d) concentrations in the soil profiles of grassland and forest lands of different ages

Vislielākās $C_{HA} : C_{FA}$ vērtības konstatētas lauksaimniecības zemes augsnē, turpretī meža zemēs tās ir relatīvi mazākas. Starp meža zemju augsnēm humīnskābes salīdzinoši vairāk satur lauksaimniecības zemes, kas transformētas meža zemēs relatīvi nesen (2. augsnes profils), un 100 gadus vecā meža zemē (5. augsnes profils), kur konstatēts relatīvi augsts I_{510}/I_{460} indekss (4.2. tab.).

Komponentanalīze parāda vidējā organiskā oglekļa saturā, I_{510}/I_{460} , $C_{HA} : C_{FA}$ nozīmi O un Ap horizonta telpiskajā izplatībā 8 parauglaukumos atkarībā no apmežošanās vecuma (4.6. att.).



4.6. attēls. O un Ap horizonta ordinācija atkarībā no meža zemes vecuma un vidējām organiskā oglekļa, I_{510}/I_{460} , $C_{HA} : C_{FA}$ vērtībām

(OC_Ap – OC_{NaOH} vidējā koncentrācija (mg g⁻¹) Ap horizontā; OC_O/Ap – attiecība starp OC_{NaOH} vidējo koncentrāciju (mg g⁻¹) O un Ap horizontā; I_{510}/I_{460} _Ap – organiskās vielas humifikācijas indekss I_{510}/I_{460} Ap horizontā; $C_{HA} : C_{FA}$ _Ap – $C_{HA} : C_{FA}$ Ap horizontā)

Figure 4.6. PCA ordination of the O and Ap horizons within sampling sites dependent on age of forest land and average values of organic carbon, I_{510}/I_{460} , $C_{HA} : C_{FA}$

(OC_Ap - OC_{NaOH} average concentration (mg g⁻¹) in Ap horizon; OC_O/Ap - ratio between OC_{NaOH} average concentration (mg g⁻¹) in O and Ap horizon; I_{510}/I_{460} _Ap - organic matter humification index I_{510}/I_{460} in Ap horizon; $C_{HA} : C_{FA}$ _Ap - $C_{HA} : C_{FA}$ in Ap horizon)

Komponentanalīze izskaidro 81,39% no kopējās augsnes paraugu variācijas (4.6. att.). Tomēr tikai 1. ass, kas izskaidro 58,80% no kopējās variācijas, ir statistiski būtiska ($p < 0,05$). Ar pirmo asi tika konstatēta būtiska pozitīva korelācija starp Ap horizonta $C_{HA} : C_{FA}$ un attiecību starp OC_{NaOH} vidējo saturu O un Ap horizontā ($r = 0,93$; $r = 0,86$), turpretī ar šo gradientu negatīva korelācija ir starp apmežošanās vecumu un Ap horizonta OC_{NaOH} vidējo saturu un I_{510}/I_{460} ($r = -0,59$; $r = -0,81$; $r = -0,52$).

Līdz ar to var secināt, ka Ap horizontā OC_{NaOH} vidējais saturs un I_{510}/I_{460} norāda uz humifikācijas procesa attīstību līdz ar meža zemes vecuma palielināšanos, tomēr šo procesu nevar tieši saistīt tikai ar meža zemes vecumu, iespējams, to ietekmē, piemēram, koku sugas, vainagu blīvums un citi faktori.

$N_{kop.}$ (4.5. b att.) koncentrācija augstāka ir meža zemēs, kas vecākas par 70 gadiem, nevis ekstensīvi izmantotā pļavā un 25 gadus vecā meža zemē. Šī likumsakarība novērota ne tikai Ap horizontā, bet arī dziļākos minerālajos horizontos. Tomēr pētījumu rezultāti rāda, ka arī $N_{kop.}$ koncentrācijas izmaiņas nedzīvajā zemsegā un augsnes minerālā virskārtā nav tieši saistītas ar meža zemju vecumu.

Izvērtējot $P_{kop.}$ koncentrāciju (4.5. c att.) dažāda vecuma meža zemju augsnēs, konstatēts, ka meža zemēs, kas vecākas par 70 gadiem, kopējā P koncentrācija E un EB horizontā samazinās, bet pieaug dziļāk esošajā Bt horizontā.

150 un 200 gadus vecās meža zemju augsnes Ap un ApE horizontā, salīdzinot ar jaunākām meža zemju un lauksaimniecības augsnēm, $K_{kop.}$ koncentrācija ir relatīvi zemāka (4.5. d att.). Pieaugot meža zemju vecumam, samazinās minētā elementa koncentrācija ApE horizontā un citos horizontos, kas atrodas tieši zem Ap horizonta. Elementa koncentrācija pēc lauksaimniecības zemju apmežošanās nemainās dziļākos minerālajos horizontos.

Izpētē konstatēts, ka augsnes minerālajos horizontos līdz ar dziļumu palielinās $Ca_{kop.}$ un $Mg_{kop.}$ koncentrācija, augsnes cilmiežī sasniedzot attiecīgi $22108 \pm 9797 \text{ mg kg}^{-1}$; $9420 \pm 2754 \text{ mg kg}^{-1}$ (4.7. a, b att.).

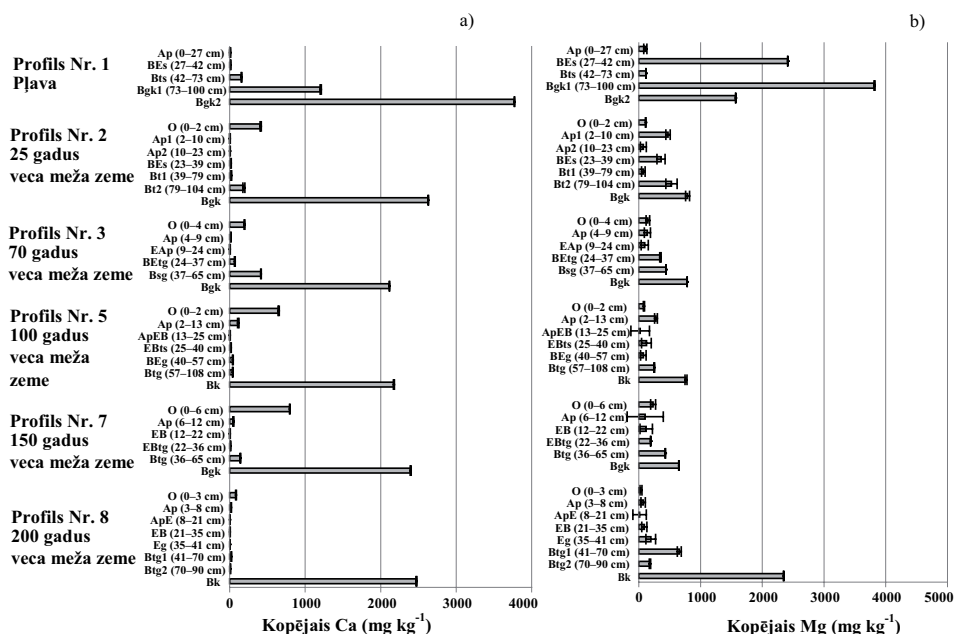


Figure 4.7. Average values and standard deviation of total Ca and Mg concentration in the soils of grassland and forest lands of different ages

No vienas puses, tas liecina par šo elementu ienesi no augšnes virskārtas tās dziļākajos horizontos, to varētu izraisīt dekalifikācijas un podzolēšanās procesu norise, bet, no otras puses, straujš koncentrācijas pieaugums atklāj augšnes cilmieža sastāvu.

4.4. Diskusija

Augšnes veidošanās parasti tiek uzskatīta par lēnu procesu (Montagne et al., 2008), kuru V. Targuljans un P. Krasilņikovs (Targulian, Krasilnikov, 2007) pēc norises ātruma iedala trīs galvenajās klasēs: ātrs (10^{1-2} gadi), vidējs (10^{3-4} gadi), lēns (10^{5-6} gadi). M. Vilkinsons un citi pētnieki (Wilkinson et al., 2005) uzskata, ka augšnes veidošanās, lai rastos pilns augšnes profils, notiek vidēji 10^4 līdz 10^5 gadu ilgā periodā. Turpretī šī pētījuma rezultāti liecina, ka morfoloģiskās izmaiņas augsnēs boreonemorālā starpzonā attīstās daudz ātrāk.

Rezultātu sadaļā aprakstītās izmaiņas Ap horizonta biezumā un E horizonta saglabāšanos vecākās meža zemēs pētītajos augšnes parauglaukumos iespējams skaidrot ar zemkopības un augšnes apstrādes vēsturisko gaitu. Latvijā līdz 1940. gadam aramzemju virsējo slāni uzirdināja tikai līdz 15 cm dziļumam (Boruks, 2003), tāpēc augsnēs, kas veidojušās uz glacigēnajiem nogulumiem, netika skarts E horizonts. Savukārt padomju periodā augsni apvērsa līdz pat 25 cm dziļumam, sajaucot E un Ap horizontu (1. un 2. augšņu profils). Tādēļ E horizonta pazīmes, kas veidojušās ilgstošā laika posmā, pirms zemju izmantošanas lauksaimniecībā un vēlākās teritorijas apmežošanās ir saglabājušās 100, 150 un 200 gadus vecās meža zemju augsnēs (5., 7. un 8. augšnes profils), bet nav novērojamas augsnēs, kas kultivētas padomju laikā.

Pētījumā sekundārās podzolēšanās pazīmes tika konstatētas vecāko meža zemju augšņu profilos. Par podzolēšanās procesu attīstību liecina tā pazīmes Ap horizontā (5., 7. un 8. augšņu profils) un trīsvērtīgo oksīdu uzkrāšanās virs E horizonta, veidojoties sekundārajam EB horizontam. Tādēļ var piekrist augšņu zinātniekiem (Mellor, 1985; Alexander, Burt, 1996; Stützer, 1998), kuri norāda, ka podzolēšanās procesa morfoloģiskās pazīmes ir novērojamas jau 100 gadus kopš tā sākšanās. Pētījums rāda, ka sekundārā B horizonta (tas veidojies virs primārā E horizonta (4.2. att.)) pazīmes (augšnes krāsa 7,5YR 3/4; 10YR 5/4) boreonemorālajās starpzonas augsnēs, kas izveidojušās uz glacigēnajiem nogulumiem, iespējams konstatēt 100 gadus pēc tam, kad notikusi lauksaimniecības zemju apmežošanās.

Māla iluviālā uzkrāšanās uz vertikālo makroagregātu virsmām B horizontā konstatēta visās pētītajās augsnēs. Tas norāda uz lesivēšanās procesa attīstību. Pēc zinātniskās literatūras datiem, šis process parasti norisinās relatīvi ilgā laika posmā. D. Sauera un citu zinātnieku (Sauer et al., 2008) pētījuma rezultāti liecina, ka *Albeluvic* mēļveidīgums attīstās 4600–6200 gadu laikā. Māla daļiņu pārklājuma izpēte pasaulē liecina par vismaz trīs dažādām māla iluviālajām fāzēm, un jaunākai no tām, visticamāk, ir antropogēna izcelsme (Kühn, 2003). Šajā gadījumā māla uzklājumu veidošanos atsevišķi zinātnieki (Slager, Van de Wetering, 1977; Kwaad, Múcher, 1977) saista ar mežu zemju transformēšanu lauksaimniecības zemēs, kas, pateicoties līduma zemkopības attīstībai, ir noritējusi visā Latvijas teritorijā, ieskaitot pētīto teritoriju, – par to liecina augšnes Ap horizontā un dziļākajos horizontos atrastās oglītes.

Līduma zemkopības attīstība acīmredzot notikusi 13.–18. gadsimtā (Zunde, 1999), tāpēc zemes izmantošanas veids šajā periodā, iespējams, vairākas reizes ir mainījies. Pētījuma rezultāti uzrāda aptuveni vienādu *Albeluvic* mēļveidīguma izpausmi neatkarīgi no tā, kad pēdējo reizi lauksaimniecības zemes transformētas meža zemēs (2. un 8. augšņu profils). Vienlaikus atkarībā no meža zemes vecuma atšķirīgs ir iluviālā māla uzkrāšanās dziļums augsnē. Iespējams, tas liecina, ka lesivēšanās procesu ir ietekmējuši atšķirīgā zemes izmantošana pēdējo 200 gadu laikā. Vecākajās meža zemju augsnēs lielākais māla daudzums (8. augšnes profils) konstatēts Bt horizontā 41–70 cm dziļumā, turpreti citās augsnēs vairāk māla daļiņu ir 22–40 cm dziļumā. Relatīvi nelielo māla un augsto smilts daļiņu īpatsvaru vecāko meža zemju virsējos minerālajos horizontos un relatīvi biezāko E horizontu (4.2. att.) var skaidrot ne tikai ar lesivēšanās procesa norisi, bet arī ar minerālu dēdēšanu, ko izraisa kompleksās zemas molekulasmasas organiskās skābes (Aristovskaya, Zykina, 1977; Lundström, 1993). Minētais process notiek galvenokārt E horizontā (Lundström et al., 2000). Iespējamību, ka tas noris aktīvāk pēc lauksaimniecības zemju apmežošanās, apstiprina arī fakts, ka meža zemēm un lauksaimniecības zemēm humīnskābju un fulvoskābju attiecība Ap horizontā ir atšķirīga (4.2. tab.).

Pieaugot meža zemes vecumam, pH_{KCl} samazinās ne tikai Ap horizontā, bet arī dziļākajos horizontos. Augšnes pH_{KCl} izmaiņas nosaka arī Fe_0 koncentrāciju augsnē (Smal, Olszewska, 2008). Tādēļ, no vienas puses, ekstrahējamās Fe augstāka koncentrācija ir zālāja Ap horizontā un vecāku meža zemju dziļākajos EB un Btg horizontos. Tomēr, no otras puses, Fe_0 lielāka koncentrācija var norādīt arī uz Fe^{3+} izskalošanos no augšnes virskārtas horizontiem podzolēšanās rezultātā.

Augstāka Al_0 koncentrācija meža zemes augšnes virskārtas horizontos, salīdzinot ar lauksaimniecības zemi, liecina, ka podzolēšanās process palielina Al_0 koncentrāciju sekundāri iluviālajos horizontos meža zemēs, kas veidojušās uz bijušajām lauksaimniecības zemēm.

Svarīgs process, kas norisinās pēc lauksaimniecības zemju apmežošanās, ir O horizonta veidošanās. Kā liecina pētījuma rezultāti, O horizonta biezums (2–6 cm) (4.2. att.) un organisko vielu saturs (4.2. tab.) uz barības vielām bagāta minerālā slāņa ir nemainīgs ilgākā laika posmā. Arī OC_{NaOH} koncentrācija O horizontā ilgāku laiku saglabājas nemainīga. Savukārt Ap horizontā straujam OC_{NaOH} pieaugumam sākuma periodā (pēc lauksaimniecības zemes apmežošanās) seko būtiska tā koncentrācijas samazināšanās. Iepriekš minētā likumsakarība sakrīt ar daudzu citu zinātnieku pētījumu rezultātiem (Paul et al., 2002; Cerli et al., 2006). Organiskā oglekļa samazināšanās, kas notiek augsnē ilgstošākā periodā pēc mežu stādīšanas, tiek skaidrota ar izmaiņām organisko vielu mineralizācijas ātrumā, ar ienesto oglekļa daudzumu un veidu, kā arī ar barības vielu nepieciešamību meža augiem. Jāpiekrīt K. Kerli un viņa kolēģiem (Cerli et al., 2008), ka ogleklis pēc lauksaimniecības zemju apmežošanās A horizontā kļūst daudz kustīgāks un sāk pārvietoties dziļākajos augšnes slāņos. Šī likumsakarība novērota arī augsnēs, kas veidojušās uz relatīvi smaga granulometriskā sastāva glacigēnajiem nogulumiem.

$\text{P}_{\text{kop.}}$ un $\text{N}_{\text{kop.}}$ koncentrāciju atšķirības dažādu mežaudžu O horizontā ir atkarīgas no nobiru sastāva (Terauda, Nikodemus, 2006). Dažāda mežaudžu sastāvs nosaka arī O horizonta ķīmiskā sastāva atšķirības.

4.5. Kopsavilkums

Organisko vielu pieaugums augsnes dziļākajos slāņos palielina tajos arī slāpekļa koncentrāciju. Turklāt lauksaimniecības zemju apmežošanās ietekmē arī kopējā P un K migrāciju augsnē, tāpēc vecākās meža zemēs trūdvielu akumulācijas horizontā samazinās $P_{kop.}$ un $K_{kop.}$ koncentrācija. Tajā pašā laikā novērots minēto elementu koncentrācijas pieaugums dziļāk esošajos B horizontos. Iepriekš minēto procesu dēļ augsnes auglības izmaiņas, kas norisinās lauksaimniecības zemju apmežošanās rezultātā, ir vērtējamas dažādi. No vienas puses, podzolēšanās un citu procesu rezultātā samazinās barības vielu daudzums trūdvielu akumulācijas horizontā, bet, no otras puses, organiskās vielas un tādējādi arī barības vielas uzkrājas O horizontā. Kopumā šis pētījums rāda, ka augsnes glaciģenajos nogulumos (smaga mālsmits, smilšmāls) lauksaimniecības zemju morfoloģiskās pazīmes saglabājas līdz 100 gadiem. Sekundārās podzolēšanās pazīmes augsnes profilos novērotas 100 gadus pēc apmežošanās sākuma, turklāt augsnes profilā 200 gados nav izveidojušies *Albic* un *Spodic* horizonti, kas atbilstu diagnostiskajiem kritērijiem.

Pētījuma rezultāti rāda, ka podzolēšanās process aizkavēti noris relatīvi auglīgās augsnēs dažāda vecuma meža zemēs, kas ir veidojušās uz glaciģenajiem nogulumiem (smaga mālsmits, smilšmāls). To galvenokārt nosaka salīdzinoši augstais putekļu un māla daļiņu saturs, kas saistīts ar relatīvi augstu pH_{KCl} vērtību un kopējā kalcija, magnija un kālija daudzumu augsnes cilmiezī. Pētījumā konstatēts, ka pēc lauksaimniecības zemju apmežošanās augsnes pH_{KCl} , organisko vielu un ekstrahējamā alumīnija un dzelzs saturs izmainās daudz ātrāk nekā augsnes diagnostiskās pazīmes tās profilā.

Pētījuma rezultāti ļauj labāk izprast un skaidrot meža augšņu telpiskās izplatības likumsakarības Latvijā. Pēdējā gadsimtā meža platības valstī ir divkāršājušās, tāpēc secināms, ka vairāk nekā puse šo mežu ir veidojušies uz bijušajām lauksaimniecības zemēm. Joprojām nav noskaidrota lauksaimniecības zemju apmežošanās ietekme uz augu barības vielu izmaiņām, jo to daudzums dziļākajos augsnes slāņos samazinās, bet palielinās O horizontā un Ap horizonta virsējā slānī. Turpmākajos zinātniskajos projektos vēlams augiem pieejamo elementu izpēte, lai izzinātu, kā augsnes auglību ietekmē lauksaimniecības zemju apmežošana.

5. PĒTĪJUMU REZULTĀTU KOPSAVILKUMS

Promocijas darba 2. sadaļa parāda, ka Latvijas meža ekosistēmās reģionālā mērogā pastāv liela augšņu telpiskā mainība, kuru galvenokārt nosaka augsnes granulometriskais sastāvs, kas ir cieši saistīts ar teritorijas ģeoloģisko nogulumu ģenētisko tipu izplatību un sastāvu. Piemēram, Latvijā relatīvi viendabīgas augsnes ar augstu smilts daļiņu saturu ir galvenokārt saistītas ar Baltijas ledus ezera, Litorīnas jūras un eolajiem nogulumiem, kur *Podzol* un *Arenosol* ir dominējošās augšņu pamatgrupas. Turpretim ļoti augsta augšņu pamatgrupu (atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai) daudzveidība pastāv litoloģiski līdzīgos kvartāra nogulumos (glacigēnajos, glaciolimniskajos, glaciofluvialajos).

Savukārt daudzu meža tipu izplatību nosaka ar vairākas augšņu pamatgrupas, kas atkarīgas no augsnes cilmieža īpašībām, novietojuma reljefā un mitruma apstākļiem. Tādēļ nākotnē ir nepieciešams veikt pētījumus, lai noskaidrotu starptautiskās *FAO WRB* augšņu klasifikācijas vājās un stiprās puses un to lietošanu meža ekosistēmu izpētē.

Augsnes granulometriskā sastāva lielo nozīmi apstiprina arī promocijas darba 3. sadaļa, kur pierādīts, ka kvartāra nogulumi, to ģenētiskā izcelsme un sastāvs (granulometriskais un ķīmiskais) ietekmē augšņu cilmiežu ķīmiskās īpašības (karbonātu saturu, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, piesātinājuma pakāpi ar bāzēm, katjonu apmaiņas kapacitāti, ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mg, Mn, Fe) un reaģējošā Al un Fe daudzumu), kā arī meža ekosistēmu un mežaudzē dominējošo koku sugu izplatību un attīstību. Mežaudzes neiespaido augsnes granulometriskā sastāvu, tomēr tām ir liela nozīme ķīmisko elementu apritē, jo mežaudzes ietekmē augsnes veidošanās procesus un ķīmisko sastāvu augsnes virskārtā, piemēram, ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mg, Mn, Fe), reaģējošā Al un Fe, apmaiņas katjonu (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}), kā arī C_{org} un N_{kop} daudzumu, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtību, katjonu apmaiņas kapacitāti.

Būtiskas savstarpējās atšķirības pētītajiem fizikālo un ķīmisko īpašību rādītājiem netika konstatētas starp relatīvi vieglāka granulometriskā sastāva ģeoloģiskajiem nogulumiem (eolie, Baltijas ledus ezera), kā arī starp relatīvi smagāka granulometriskā sastāva ģeoloģiskajiem nogulumiem (glaciolimniskie, glacigēnie). Tomēr starp pirmo un pēdējo iepriekš minēto ģeoloģisko nogulumu grupu fizikālās un ķīmiskās īpašības ir atšķirīgas, jo iepriekš minētie ģeoloģiskie nogulumi atšķiras pēc izcelsmes un veidošanās laika, kā arī granulometriskā un minerālā sastāva, kas atspoguļojas augšņu fizikālajās un ķīmiskajās īpašībās. Kopumā šie faktori ir visnozīmīgākie un nosaka arī augsnes veidošanās procesus un augšņu auglību, no kuriem savukārt ir atkarīga barības vielām nabadzīgu un bagātu mežaudžu izplatība.

Pētījums rāda, ka galvenokārt granulometriskais sastāvs nosaka dominējošo koku sugu izplatību Latvijas mežu ekosistēmās. Piemēram, egles un bērza izplatība ir saistīta ar relatīvi auglīgākām augsnēm, kur ir augstāks māla un putekļu daļiņu saturs, kā arī plašs ķīmisko īpašību variāciju diapazons, turpretim priedes izplatība ir saistīta ar nabadzīgākām augsnēm un zemu ķīmisko īpašību variācijas diapazonu.

Virsējā minerālā slāņa fizikālo un ķīmisko īpašību relatīvi zema dispersija ir raksturīga sila, mētrāja, lāna, damakšņa un slapjā mētrāja meža tipam, kur augsnes

minerālo slāni veido smilts nogulumi, tāpēc šo meža tipu augsnes satur relatīvi mazāk barības vielu, tām ir zemāka katjonu apmaiņas kapacitāte un arī piesātinājuma pakāpe ar bāzēm.

Augsnes apakškārtas fizikālo un ķīmisko īpašību ziņā visneviendabīgākie meža tipi ir vēris, šaurlapju ārenis un slapjais vēris. Iepriekš minētā relatīvi lielā oligotrofo meža tipu augšņu daudzveidība ir arī galvenais iemesls, kāpēc starp meža tipu augsnēm lielākoties netika konstatētas statistiski būtiskas atšķirības. Pēc fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām, kas raksturo augsnes auglību, konstatēts, ka lāns atrodas vienā grupā ar damaksni un mētrāju. Līdz ar to, pamatojoties uz pašreiz iegūtajiem augšņu izpētes rezultātiem, var uzskatīt, ka Latvijas meža tipu iedalījumā pēc auglības robeža starp oligotrofiem un mezotrofiem tiem ir ļoti nosacīta. Komponentanalīzes rezultāti vienlaikus izvirza jautājumu par šaurlapju āreņa atrašanos mezotrofo mežu tipu grupā. Meža monitoringa ietvaros veiktie pētījumi rāda, ka pēc augsnes īpašībām šaurlapju ārenis ir līdzīgs eitrofiem meža tiem, piemēram, vērim un slapjajam vērim, nevis mezotrofiem meža tiem.

Būtiska nozīme augsnes, arī meža zemju augšņu, veidošanās procesā ir cilvēka saimnieciskajai darbībai. Promocijas darba 4. sadaļā ir pierādīts, ka augsnes morfoloģijas un īpašību maiņa ir saistīta ar lauksaimniecības zemju dabisku apmežošanās procesu. Šī procesa rezultātā vecākās meža zemēs trūdvielu akumulācijas horizontā samazinās $P_{kop.}$ un $K_{kop.}$ koncentrācija. Tajā pašā laikā novērots minēto elementu koncentrācijas pieaugums dziļāk esošajos B horizontos. Tomēr saistībā ar iepriekš minētajiem procesiem augsnes auglības izmaiņas, kas norisinās lauksaimniecības zemju apmežošanās rezultātā, ir vērtējamas dažādi. No vienas puses, podzolēšanās un citu procesu rezultātā samazinās barības vielu daudzums trūdvielu akumulācijas horizontā, bet, no otras puses, organiskās vielas un tādējādi arī barības vielas uzkrājas O horizontā. Turklāt šis pētījums rāda, ka augsnes glacigēnajos nogulumos (smaga mālsmilts, smilšmāls) lauksaimniecības zemju morfoloģiskās pazīmes saglabājas līdz 100 gadiem. Sekundārās podzolēšanās pazīmes augsnes profilos novērotas 100 gadu laikā pēc apmežošanās sākuma, turklāt augsnes profilā 200 gados nav izveidojušies *Albic* un *Spodic* horizonti, kas atbilstu diagnostiskajiem kritērijiem.

Pētījuma rezultāti rāda, ka podzolēšanās process relatīvi lēnāk noris auglīgās augsnēs, kas veidojušās uz glacigēnajiem nogulumiem (smaga mālsmilts, smilšmāls). To galvenokārt nosaka salīdzinoši augstais putekļu un māla daļiņu saturs, kas nosaka augstu pH_{KCl} vērtību un kopējā Ca, Mg un K daudzumu augsnes cilmiezī. Pētījumā konstatēts, ka pēc lauksaimniecības zemju apmežošanās augsnes pH_{KCl} , organisko vielu un ekstrahējamā alumīnija un dzelzs saturs izmainās daudz ātrāk nekā augsnes diagnostiskās pazīmes tās profilā.

Pētījuma rezultāti ļauj labāk izprast un skaidrot meža augšņu telpiskās izplatības likumsakarības Latvijā. Pēdējā gadsimtā meža platības valstī ir divkāršājušās, tāpēc secināms, ka vairāk nekā puse šo mežu ir veidojušies uz bijušajām lauksaimniecības zemēm. Joprojām nav noskaidrota lauksaimniecības zemju apmežošanās ietekme uz augu barības vielu izmaiņām, jo to daudzums dziļākajos augsnes slāņos samazinās, bet palielinās O horizontā un Ap horizonta virsējā slānī. Turpmākajos zinātniskajos projektos vēlams augiem pieejamo elementu izpēte, lai izzinātu, kā augsnes auglību ietekmē lauksaimniecības zemju apmežošana.

SECINĀJUMI

1. Ģeoloģiskie nogulumi un to sastāvs ir viens no galvenajiem faktoriem, kas nosaka augšņu pamatgrupu (atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai) sastopamību un arī augsnes fizikālās un ķīmiskās īpašības. Daudzveidīgākās augsnes ir raksturīgas glacigēnajiem, glaciolimniskajiem un glaciofluviālajiem nogulumiem. Augšņu daudzveidības ziņā relatīvi viendabīgākas ir eolās kāpas, kur sastopamas tikai *Arenosol* un *Podzol* augsnes. *Histosol* augsnes ir izplatītas uz organogēnajiem nogulumiem.
2. Sausieņu meža tipi ir izplatīti uz *Arenosol*, *Luvisol*, *Albeluvisol*, *Podzol*, *Planosol* un *Stagnosol* augsnēm, savukārt relatīvi mazāk uz *Cambisol*, *Phaeozem* un *Umbrisol* augšņu pamatgrupām.
3. Slapjainu meža tipi ir izplatīti uz *Stagnosol*, *Cambisol*, *Planosol*, *Gleysol*, *Podzol* un *Arenosol* augšņu pamatgrupām. Turklāt āreņi daudzos gadījumos ir sastopami uz tām pašām augsnēm. Tā kā noteikšanas kritērijs (kūdras slāņa biezums) *Histosol* augšņu pamatgrupas un purvainu, kā arī kūdreņu nodalīšanai ir līdzīgs, šie meža tipi ir izplatīti uz *Histosol* augšņu pamatgrupas.
4. Augšņu pamatgrupu priedēkļa modifikatoru lietošana datu analīzē ļāva precīzāk konstatēt būtiskas sakarības starp noteiktu augšņu un meža tipu telpisko izplatību. Daudzos gadījumos tika atrastas būtiskas sakarības starp sausieņu meža tiptiem – mētrāju, lānu un gāršu, jo augšņu pamatgrupu priedēkļa modifikatoru kompleksi tiek izmantoti noteiktu augšņu raksturošanā.
5. Augsnes profilos līdz ar dziļuma palielināšanos pieaug augšņu fizikālo un ķīmisko īpašību sakarības, kas apstiprina, ka augsnes īpašības galvenokārt ir atkarīgas no augsnes cilmieža īpašībām, ko savukārt nosaka ģeoloģisko nogulumu sastāvs. Latvijas mežu augsnēs virskārtā norisinās dažādi augsnes veidošanās procesi, piemēram, organisko vielu akumulācija, lesivēšanās, izskalošanās, eluviācija, podzolēšanās, dekalcifikācija, dekarbonizācija, glejošanās, un tie ir atkarīgi gan no teritoriju ģeoloģiskās uzbūves un veidošanās apstākļiem, to sastāva, augsnes veidošanās vecuma, mežu pašreizējās un vēsturiskās apsaimniekošanas, kokaudzēm un to sastāva un citiem faktoriem.
6. Ģeoloģisko nogulumu izplatība nosaka augsnes granulometriskā sastāvu, kas ir viena no nozīmīgākajām augsnes fizikālajām īpašībām, kura ietekmē augsnes cilmieža ķīmisko sastāvu, piemēram, ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mg, Mn, Fe) un reaģējošā Al un Fe daudzumu, katjonu apmaiņas kapacitāti, piesātinājuma pakāpi ar bāzēm, karbonātu saturu, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtību.
7. Augsnes granulometriskais sastāvs ietekmē Latvijas meža ekosistēmu un mežaudzē dominējošo koku sugu izplatību un attīstību, tomēr mežaudzes neiespaido augsnes granulometriskā sastāvu, bet virskārtā ietekmē augsnes veidošanās procesus un ķīmisko sastāvu, piemēram, ekstrahējamo elementu (Ca, K, Mg, Mn, Fe), reaģējošā Al un Fe, apmaiņas katjonu (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}), kā arī $\text{C}_{\text{org.}}$ un $\text{N}_{\text{kop.}}$ daudzumu, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vērtību, katjonu apmaiņas kapacitāti.

8. Konstatēts, ka veģetācijas vienību raksturošanā līdz ar vispārīguma pieaugumu (meža tips → mežaudzē dominējošās koku sugas → *Land Cover 2005* klases) samazinās sakarības starp veģetācijas raksturīgajiem tipiem un augšņu pamatgrupām, kā arī to piedēkļa modifikatoriem. Iespējams, ka labākas sakarības var iegūt, uzlabojot informāciju par biotisko vidi.
9. Pēc lauksaimniecības zemju apmežošanās novērojama podzolēšanās procesa attīstība, par ko liecina augsnes morfoloģiskās pazīmes (sekundārā E un B horizonta veidošanās), pH_{KCl} samazināšanās pirmajos 70 gados pēc lauksaimniecības zemju apmežošanās. Izmaiņas reaģējošā (amorfā) Al un Fe saturā augsnes horizontos norisinās daudz ātrāk, nekā konstatējamas augsnes diagnostiskās pazīmes augsnes profilā.
10. Lauksaimniecības zemju apmežošana ietekmē arī augsnes organiskā oglekļa saturu. Liela daļa organiskā oglekļa meža augsnēs uzkrājas augsnes O horizontā. O horizonta (*mull* un *moder* tipa) biezums pētītajās meža augsnēs nav atkarīgs no meža zemes vecuma, bet to ietekmē gan dominējošā veģetācija, gan arī augsnes minerālās virskārtas ķīmiskais sastāvs.
11. Kopumā bijušajās lauksaimniecības zemēs uz glacigēnajiem nogulumiem pēc to apmežošanās, salīdzinot ar vecām meža zemēm, norisinās intensīvāka vielu bioloģiskā aprite un podzolēšanās process norit relatīvi lēnāk. To iespējams skaidrot ar relatīvi augstāku putekļu un māla daļiņu saturu, kas saistīts ar relatīvi augstu pH_{KCl} vērtību un kopējā kalcija, magnija un kālija daudzumu augsnes cilmiezī. Turklāt lauksaimniecības zemju morfoloģiskās pazīmes augsnes profilos saglabājas līdz 100 gadiem pēc apmežošanās, tomēr augsnes profilā 200 gadu laikā neizveidojās *Albic* un *Spodic* horizonti atbilstoši to diagnostiskajām īpašībām.

PRIEKŠLIKUMI

Balstoties uz iegūtajiem kokaudžu, mežu, augšņu pamatgrupu un kvartāra nogulumu telpiskās izplatības sakarību risinājumiem, ieteicams veikt meža augšņu reģionālo kartēšanu mērogā 1 : 50 000, jo Latvijā šis mērogs ir telpiskās plānošanas standartmērogs, kā arī tajā ir pieejama meža tipu un ģeoloģisko nogulumu telpiskā informācija.

No vienas puses, kvartāra nogulumu un meža telpiskās izplatības informācijas iegūšanas risinājumi šajā promocijas darbā var turpmāk uzlabot augšņu kartēšanu reģionālā mērogā. No otras puses, iegūtā informācija nevar uzlabot liela mēroga kartēšanu. Tādēļ turpmāk ir nepieciešami vispusīgi pētījumi par augsnes īpašību un morfoloģijas, kā arī augsnes granulometriskā sastāva izmaiņām augsnes katēnā. Jebkurā gadījumā augšņu kartēšanā, par pamatu izmantojot ģeoloģiskās kontūras, ir iespējams nodalīt augšņu pamatgrupu asociācijas (grupas), jo ir grūti nodalīt atsevišķas augšņu pamatgrupas.

Nākotnē ir nepieciešams veikt pētījumus, lai noskaidrotu starptautiskās *FAO WRB* augšņu klasifikācijas vājās un stiprās puses un to lietošanu meža ekosistēmu izpētē. Izmantojot šo klasifikāciju, ir atklātas likumsakarības starp augšņu (drenētu un nedrenētu) telpisko izplatību un vides faktoriem. Konstatēts, ka vides apstākļu ietekmi meliorētajās augsnēs atspoguļo meža tipi, nevis augšņu pamatgrupas atbilstoši starptautiskajai *FAO WRB* augšņu klasifikācijai.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Aber J.D., Knute J.N., Stedler P., Melillo J.E., 1989. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. Excess nitrogen from fossil fuel combustion may stress the biosphere. *Bioscience*, 39(6), 378-386.
2. Alban D.H., 1982. Effects of nutrient accumulation by aspen, spruce, and pine on soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 853-861.
3. Alexander E.B., Burt R., 1996. Soil development on moraines of Mendenhall Glacier, southeast Alaska. 1. The moraines and soil morphology. *Geoderma*, 72, 1-17.
4. Aliksson A., Olsson M.T., 1995. Soil changes in different age classes of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) on afforested farmland. *Plant Soil*, 168-169, 103-110.
5. Alvarez R., Lavado R.S., 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*, 83, 127-141.
6. Andersson P., Berggren D., Nilsson I., 2002. Indices for nitrogen status and nitrate leaching from Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands in Sweden. *Forest Ecol. Manag.*, 157, 39-53.
7. Aristovskaya T.V., Zykina L.V., 1977. Biological factors of aluminium migration and accumulation in soils and weathering crusts. In: *Problems of soil science*. Nauka, Moscow, 175-182.
8. Armolaitis K., Aleinikovienė J., Baniūnienė A., Lubyte J., Žekaitė V., 2007. Carbon Sequestration and Nitrogen Status in Arenosols Following Afforestation or Following Abandonment of Arable Land. *Baltic For.*, 13 (2/25), 169-177.
9. Bain D.C., Smith B.F.L., 1987. Chemical Analysis. In: *A handbook of determinative methods in clay mineralogy* (Ed: M.J. Wilson), 248-274.
10. Barber S.A., 1995. *Soil Nutrient Bioavailability. A mechanistic approach*, 2nd ed. Wiley, New York, 414.
11. Bārdule A., Bāders E., Stola J., Lazdiņš A., 2009. Latvijas meža augšņu īpašību raksturojums demonstrācijas projekta *BioSoil* rezultātu skatījumā. *Mežzinātne*, 20 (53), 105-124.
12. Bārdule A., Lazdiņš A., 2010. Oglekļa un slāpekļa piesaiste minerālaugsnēs baltalkšņa (*Alnus incana* (L.) Moench) audzēs apmežojušās lauksaimniecības zemēs. *Mežzinātne*, 21 (54), 95-109.
13. Behrens T., Schmidt K., Scholten T., 2008. An approach to removing uncertainties in nominal environmental covariates and soil class maps. In: Hartemink, A., McBratney, A., Mendoca-Santos, M.L. (Eds.). *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer, Berlin, 213-224.
14. Berg B., 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecol. Manag.*, 133, 13-22.
15. Berggren D., Mulder J., 1995. The role of organic matter in controlling aluminium solubility in acidic mineral soil horizons. *Geoch. Cosmoch. Acta.*, 59, 4167-4180.

16. Bergmann W., 1988. Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Entstehung, visuelle und analytische diagnose, Bergmann W. (Ed.), 2^e édition, Gustav Fisher Verlag, Stuttgart, 762.
17. Bertram H.G., Schleser G.H., 1982. The ¹³C/¹²C isotope ratios in a north-German Podzol. In: Stable Isotopes (Eds.: H.L. Schmidt, H. Forstel, K. Heinziger). Elsevier, Amsterdam, 115-120.
18. Binkley D., 1995. The influence of tree species on forest soils: processes and patterns. In: Mead, D.J., Cornforth, I.S. (Eds.), Proceedings of the Trees and Soil Workshop 1994. Lincoln University Press, Canterbury, New Zealand, 1-33.
19. Binkley D., Valentine D., 1991. Fifty-year biogeochemical effects of green ash white pine, and Norway spruce in a replicated experiment. Forest Ecol. Manag., 40, 13-25.
20. Binkley D., Sollins P., Bell R., Sachs D., Myrold D., 1992. Biogeochemistry of adjacent conifer and conifer-hardwood stands. Ecology, 73, 2022-2033.
21. Birkeland P.W., 1984. Soils and Geomorphology. Oxford University Press, New York, 372.
22. Bishop T.F.A., Minasny B., McBratney A.B., 2006. Uncertainty analysis for soil-terrain models. Int. J. Geogr. Inf. Sci., 20 (2), 117-134.
23. Blyth E.M., Robinson M., Rosier P., 2004. Can soil moisture be mapped onto the terrain? Hydrol. Earth. Syst. Sci., 80 (5), 923-930.
24. Bockheim J.G., 1997. Soils in a hemlock-hardwood ecosystem mosaic in the Southern Lake Superior Uplands. Can. J. Forest Res., 27, 1147-1153.
25. Bockheim J.G., 2005. Soil endemism and its relation to soil formation theory. Geoderma, 129, 109-124.
26. Bockheim J.G., Gennadiyev A.N., Hammer R.D., Tandarich J.P., 2005. Historical development of key concepts in pedology. Geoderma, 124, 23-36.
27. Boerner R.E.J., Koslowsky S.D., 1989. Microsite variation in soil chemistry and nitrogen mineralization in a beech-maple forest. Soil Biol. Biochem., 21, 795-801.
28. Boettcher S.E., Kalisz P.J., 1990. Single-tree influence on soil properties in the mountains of eastern Kentucky. Ecology, 71, 1365-1372.
29. Boruks A., 2003. Zemnieks, zeme un zemkopība Latvijā no senākiem laikiem līdz mūsdienām. Otrais, pārstrādātais un papildinātais izdevums. Latvijas Lauksaimniecības Universitāte, 717.
30. Boruks A., Brīvkalns K., Salbovs R., 1967. Zeme un ražība. Rīga, 223.
31. Boruks A., Eihmane V., Kalniņš G., Nikodemus O., Paršova V., Zālītis P., 2001. Zemes izmantošana un kadastrs Latvijā. Rīga, LR Valsts zemes dienests, LLU Skrīveru zinātnes centrs, 408.
32. Boruks A., Kārklīšs A., Nikodemus O., 2002. Augsnes izpētes un zemes novērtējuma metodikas pilnveidošanas problēmas. Izstrādātas uz Skrīveru zinātnes centra bāzes. Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Skrīveru zinātnes centrs, Latvijas Republikas Valsts zemes dienests. Skrīveri, 148.

33. Bouabid R., Nater E.A., Bloom P.R., 1995. Characterization of the weathering status of feldspar minerals in sandy soils of Minnesota using SEM and EDX. *Geoderma*, 66, 137-149.
34. Brady N.C., Weil R.R., 1996. The nature and properties of soils. Prentice Hall, New Jersey. 11th ed, 740.
35. Brais S., Camire C., Bergeron Y., Pare D., 1995. Changes in nutrient availability and forest floor characteristics in relation to stand age and forest composition in the southern part of the boreal forest of Northwestern Quebec. *Forest Ecol. Manag.*, 76, 181-189.
36. Brix H., Van den Driessche R., 1974. Mineral nutrition of container grown tree seedlings. In: *Containerized Forest Tree Seedlings Symposium* (eds.: R.W. Tinus, W.I. Stein, W.E. Palmer). Proc. Of North Amer. Great Plains Agric. Coun. Publ. 68, Denver, 77-84.
37. Brumelis G., Nikodemus O., 1995. Biological monitoring in Latvia using moss and soil: Problems in the partitioning of anthropogenic and natural effects. *Bioind. Env. Health*, 123-132.
38. Brūmelis G., Lapiņa L., Nikodemus O., Tabors G., 2002. Use of the O horizon of forest soils in monitoring metal deposition in Latvia. *Water Air Soil Poll.*, 135, 291-309.
39. Bui E.N., 2004. Soil survey as a knowledge system. *Geoderma*, 120, 17-26.
40. Bui E.N., Henderson B.L., Viergever K., 2006. Knowledge discovery from models of soil properties. *Ecol. Model.*, 191, 431-446.
41. Bui E.N., Moran C.J., 2001. Disaggregation of polygons of surficial geology and soil maps using spatial modelling and legacy data. *Geoderma*, 103, 79-94.
42. Buol S.W., Hole F.D., McCracken R.J., 1973. *Soil genesis and classification: The Iowa State Univ. Press, Ames*, 360.
43. Buol S.W., Southard R.J., Graham R.C., McDaniel P.A., 2003. *Soil Genesis and Classification*, 5th ed. Wiley-Blackwell, 494.
44. Burrough P.A., 1993. Soil variability: a late 20th century view. *Soils Fertil.*, 56, 529-562.
45. Burrough P.A., van Gaans P.F.M., Hootsmans R., 1997. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries. *Geoderma*, 77, 115-135.
46. Bušs K., 1981. *Meža ekoloģija un tipoloģija*. Rīga, Zinātne, 68.
47. Campbell C.A., 1978. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. In: *Soil organic matter* (Eds: M. Schnitzer, S.U. Khan), Elsevier Publ., Amsterdam, 173-271.
48. Caniego J., Ibáñez J.J., Jan José Martínez F., 2006. Selfsimilarity of pedotaxa distributions at the planetary scale: A multifractal approach. *Geoderma*, 134, 306-317.
49. Cerli C., Celi A., Kaiser K., Guggenberger G., Johansson M.B., Cignetti A., Zanini E., 2008. Changes in humic substances along an age sequence of Norway spruce stands planted on former agricultural land. *Org. Geochem.*, 39, 1269-1280.

50. Cerli C., Celi L., Johansson M.B., Kögel-Knabner I., Rosenqvist L., Zanini E., 2006. Soil organic matter changes in a spruce chronosequence on Swedish former agricultural soil: I. carbon and lignin dynamics. *Soil Sci.*, 171, 837-84.
51. Certini C., Ugolini F.C., Corti G., Agnelli A., 1998. Early stages of podzolization under Corsican pine (*Pinus nigra* Arn. *Ssp. laricio*). *Geoderma*, 83, 103-125.
52. Challinor D., 1968. Alteration of surface soil characteristics by four tree species. *Ecology*, 49, 286-290.
53. Chapin F.S., Bloom A.J., Field C.B., Waring R.H., 1987. Plant responses to multiple environmental factors. *Bioscience*, 37 (1), 49-57.
54. Clarke N., Cools N., Derome J., Derome K., De Vos B., Fuerst A., 2008. Quality Assurance and Control in Laboratories, 55.
55. Cole D.W., 1995. Soil nutrient supply in natural and managed forests. *Plant Soil*, 43-45, 168-169.
56. Cramer V.A., Hobbs R.J., Standish R.J., 2008. What's new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly. *Tr. Ecol. Evol.*, 23 (2), 104-112.
57. Cressie N., Kornak J., 2003. Spatial statistics in the presence of location error with an application to remote sensing of the environment. *Stat. Sci.*, 18 (4), 436-456.
58. Crozier C.R., Boerner R.E.J., 1986. Stemflow induced soil nutrient heterogeneity in a mixed mesophytic forest. *Bartonia*, 52, 1-8.
59. Crowther E.M., 1953. The skeptical soil chemist. *Journal of Soil Science*, 40, 107-122.
60. Dale M.R.T., 2000. Spatial pattern analysis in plant ecology. Cambridge University Press, 340.
61. Daņiļeviča E., Nikodemus O., Kļaviņš M., Ļulko I., 2004. Sēra un slāpekļa savienojumi nokrišņos un augsnes ūdenī Latvijas priežu mežos. *Ģeogrāfiski raksti. Folia Geographica*, 11, 63-71.
62. Daugaviete M., 2004. Pētījums par oša un ozola stādījumu apjomiem, to kvalitāti un saglabāšanas lauksaimniecībā neizmantojamo zemju apmežojumos. *LVMI „Silava”*, 14 (47), 3-26.
63. Daugaviete M., Gaitnieks T., Kļaviņa D., Teliševa G., 2008. Oglekļa akumulācija virszemes un sakņu biomasā bērza, baltalkšņa, priedes un egles jaunaudzēs lauksaimniecības zemēs. *Mežzinātne*, 18 (51), 35-52.
64. De Coninck F., Van Ranst E., 1993. Soils and their interaction with mineral polluting substances. Internal document, University of Ghent, 11.
65. De Vos B., Cools N., 2011. Second European Forest Soil Condition Report. Volume I: Results of the BioSoil Soil Survey. INBO.R.2011.35. Research Institute for Nature and Forest, Brussel, 359.
66. Dobos E., Carré F., Hengl T., Reuter H.I., Tóth G., 2006. Digital Soil Mapping as a Support to Production of Functional Maps. EUR 22123 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 68.
67. Doner H.E., Lynn W.C., 1989. Carbonate, halide, sulfate and sulfide minerāls. In: *Minerals in soil environments* (Eds.: Dixon J.B. and Weed S.B.), 2nd ed. *Soils Sci. ASm. Madison, Wi*, 279-330.

68. Dowling T., Sommerell G.K., Walker J., 2003. Soil wetness as an indicator of steram salinity: a landscape positioning index approach. *Environ. Modell. Softw.*, 18 (6), 587-593.
69. Ettema C.H., Wardle D.A., 2002. Spatial soil ecology. *Tr. Ecol. Evol.*, 17, 177-183.
70. Falkengren-Grerup U., ten Brink D.J., Brunet J., 2006. Land use effects on soil N, P, C and pH persist over 40-80 years of forest growth on agricultural soils. *Forest Ecol. Manag.*, 225, 74-81.
71. Finzi A.C., Canham C.D., van Breemen N., 1998a. Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on pH and cations. *Ecol. Appl.*, 8, 447-454.
72. Finzi A.C., van Breemen N., Canham C.D., 1998b. Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on carbon and nitrogen. *Ecol. Appl.*, 8, 440-446.
73. France E.A., Binkley D., Valentine D., 1989. Soil chemistry change after 27 years under four tree species in southern Ontario. *Can. J. Forest Res.*, 19, 1648-1650.
74. Fransmeier D.P., Whiteside E.P., Mortland M.M., 1963. A chronosequence of Podzols in Northern Michigan: III Mineralogy, micromorphology, and net changes occurring during soil formation. *Michigan State University*, 46 (1), 37-57.
75. Fridland V.M., 1976. The soil cover pattern: problems and methods of investigation. *Soil Combinations and Their genesis*. Amerind Publishing, 272.
76. FSCC (Forest Soil Co-Ordinating Centre), 2006. Manual IIIa: Sampling and Analysis of Soil. In: ICP Forests, 2006: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Hamburg. p 26. + annexes; Pieejams: <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>
77. Fu B.J., Liu S.L., Ma K.M., Zhu Y.G., 2004. Relationships between soil characteristics, topography and plant diversity in a heterogeneous deciduous broad-leaved forest near Beijing, China. *Plant Soil*, 261 (1-2), 47-54.
78. Garten Jr.C.T., Kang S., Brice D.J., Schadt C.W., Zhou J., 2007. Variability in soil properties at different spatial scales (1m-1km) in a deciduous forest ecosystem. *Soil Biol. Biochem.*, 39, 2621-2627.
79. Gelumbauskaitė L.Ž., 2009. Character of sea level changes in the subsiding south-eastern Baltic Sea during Late Quaternary. *Baltica*, 22 (1), 23-36.
80. Gessler P., Moore I., McKenzie N., Ryan P., 1995. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 9 (4), 421-432.
81. Gilucis A., 2007. Mikro- un makroelementu saturs izplatības likumsakarības Latvijas augšņu virsējos horizontos. Promocijas darbs. Latvijas Universitāte, 139.
82. Gilucis A., Segliņš V., 2003. Latvijas ģeokīmijas atlants. Augšņu ģeokīmiskās kartes. Rīga, Valsts ģeoloģijas dienests, 88.
83. Glinka K.D., 1914. Die typen der Bodenbildung, ihre Klassifikation und Geographische Verbreitung. Gebruder Borntraeger, Berlin, 365.

84. Gower S.T., Son Y., 1992. Differences in soil and leaf litterfall nitrogen Dynamics for five forest plantations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1959-1966.
85. Graham R.C., O'Geen A.T., 2010. Soil mineralogy trends in California landscapes. *Geoderma*, 154, 418-437.
86. Grantina L., Seile E., Kenigšvalde K., Kasparinskis R., Tabors G., Nikolajeva V., Jungerius P., Muiznieks I., 2011. The influence of the land use on abundance and diversity of soil fungi: comparison of conventional and molecular methods of analysis. *Env. Exp. Biol.*, 9, 9-21.
87. Grantina L., Seile E., Malinovskis U., Tabors G., Kasparinskis R., Nikolajeva V., Muiznieks I., 2009. Particular characteristics of soil microbial communities in forest stands infected with *Heterobasidion parviporum* and *Armillaria* spp. In: *Microorganisms in industry and environment From Scientific and Industrial Research to Consumer Products. Proceedings of BioMicroWorld2009 – III International Conference on Environmental, Industrial and Applied Microbiology*. World Scientific Publishing Company Pte Ltd. 86-91.
88. Grantina L., Bondare G., Janberga A., Tabors G., Kasparinskis R., Nikolajeva V., Muiznieks I., In press. Monitoring Seasonal Changes of Northern Temperate Zone Spruce Forest Soil Microbial Populations. *Est. J. Ecol.*
89. Gray J.M., Humphreys G.S., Deckers J.A., 2011. Distribution patterns of World Reference Base soil groups relative to soil forming factors. *Geoderma*, 160, 373-383.
90. Gray J.M., Humphreys G.S., Deckers J.A., 2009. Relationships in soil distribution as revealed by a global soil database. *Geoderma*, 150 (3/4), 309-323.
91. Grimm R., Behrens T., 2010 Uncertainty analysis of sample locations within digital soil mapping approaches. *Geoderma*, 155 (3/4), 154-163.
92. Grinand C., Arrouays D., Laroche B., Martin M.P., 2008. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: Sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. *Geoderma*, 143, 180-190.
93. Grunwald S., 2005. *Environmental Soil-Landscape Modelling*. Geographic Information Technologies and Pedometrics. CRC Press. 504.
94. Guo Y., Gong P., Amundson R., 2003. Pedodiversity in the United States of America. *Geoderma*, 117, 99-115.
95. Hagen-Thorn A., Callesen I., Armolaitis K., Nihlgård B., 2004. The impact of six European tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land. *Forest Ecol. Manag.*, 195, 373-384.
96. Hall P.L., 1987. Clays: their significance, properties, origins and uses. In: *A handbook of determinative methods in clay mineralogy* (Ed.: M.J. Wilson), 1-25.
97. Hartemink A.E., 2006. *The Future of Soil Science*. International Union of Soil Sciences (IUSS), Wageningen, 165.
98. Hassink J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil*, 191, 77-87.

99. He L., Tang Y., 2008. Soil development along primary succession sequences on moraines of Hailuoguo Glacier, Gongga Mountain, Sichuan, China. *Catena*, 72, 259-269.
100. Heald W.R., 1965. Calcium and magnesium. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2* (Ed.: C.A. Black), Amer. Soc. Agron., Madison, Agronomy, 9, 999-1010.
101. Hendershot W.H., Lalande H., Duquette M., 1993. Soil Reaction and Exchangeable Acidity. In: *Soil Sampling and Methods of Analysis* (Ed.: M.R. Carter), 141-146.
102. Hengl T., Heuveling G.B.M., Stein A., 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 120, 75-93.
103. Heuvelink G.B.M., Webster R. 2001. Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma*, 100, 269-301.
104. Hobbie S.E., 1992. Effects of plant species on nutrient cycling. *Tr. Ecol. Evol.*, 7, 336-339.
105. Hommel G., 1988. A stagewise rejective multiple test procedure based on a modified Bonferroni test. *Biometrika*, 75, 383-386.
106. Hudson B.D., 1992. The soil survey as paradigm-based science. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 836-841.
107. Hytteborn H., Maslov A.A., Nazimova D.I., Rysin L.P., 2005. Boreal forests of Eurasia. In *Coniferous Forests of the World, Ecosystems of the World 6* (Anderson, F., red.), Elsevier, 6, 23-99.
108. Ibañez J.J., De-Alba S., Bermudez F.F., Garcia-Alvarez A., 1995. Pedodiversity: concepts and measures. *Catena*, 24, 215-232.
109. Ibañez J.J., De-Alba S., Lobo A., Zucarello V., 1998. Pedodiversity and global soil patterns at coarse scales (with Discussion). *Geoderma*, 83, 171-192.
110. ISO 11261, 1995. Soil Quality – Determination of total nitrogen – Modified Kjeldahl method. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. p. 4. Pieejams: <http://www.iso.org/iso/home.html>
111. IUSS Working Group, 2007. World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. *World Soil Resources Reports 103*. FAO, Rome. 103-116. Pieejams: http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrb/doc/wrb2007_corr.pdf
112. Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D.W., Minkinen K., Byrne K.A., 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137, 253-268.
113. Jenny H., 1941. *Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology*. McGraw Hill Book Company, New York, NY, USA, 281.
114. Joffe J.S., 1936. *Pedology*. Rutgers University Press, New Brunswick, New York.
115. Johnson D.W., Todd D.E., 1990. Nutrient cycling in forests of Walker Branch Watershed, Tennessee: roles of uptake and leaching in causing soil changes. *J. Environ. Qual.*, 19, 97-104.
116. Jones L.H.P., Jarvis S.C., 1981. The fate of heavy metals. In: *The Chemistry of Soil Processes* (Ed.: D.J. Greenland, M.H.B. Hayes), 593-620.

117. Kalbitz K., Geyer W., Geyer S., 1999. Spectroscopic Properties of Dissolved Humic Substances – a Reflection of Land Use History in a Fen Area. *Biogeochemistry*, 47, 219-238.
118. Karklins A., 1997. Comparison of soil organic matter determination methods. In: *Proceedings of the Latvia University of Agriculture*, 11 (288), 9-13.
119. Karklins A., 2002. A comparative study of the Latvian soil Classification with WRB. In: Micheli E., Nactergaele F.O., Jones R.J.A., Montanarella L. (Eds.), *Soil Classification 2001. European Soil Bureau Research Report No. 7*, EUR 20398 EN, 199-204.
120. Karklins A., 2005. Soil information in Latvia. In: *Soil Resources of Europe*, second edition. Jones R.J.A., Houšková B., Bullock P., Montanarella L. (eds). *European Soil Bureau Research Report No. 9*, EUR 20559 EN, 420 p. Office for Official publications of the European Communities, Luxembourg, 201-209.
121. Karklinsh A., 1993. Compatibility of CEC determination methods used in Latvia and Nordic countries. In: *Proceedings of NJF - Seminar No. 228 „Soil Tillage and Environment”*, Jokioinen, Finland, 8-10 June 1993. Paavo Elonen and Jurki Pitkänen (eds). *Scandinavian Association of Agricultural Scientists: Rapport Nr. 88*, 319-324.
122. Kasparinskis R., Nikodemus O., 2012. Influence of Environmental Factors on Forest Soil Spatial Distribution and Diversity in Latvia. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 61(1), 48-64.
123. Kavvadias V.A., Alifragis D., Tsiotsis A., Brofas G., Stamatelos G., 2001. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *Forest Ecol. Manag.*, 144, 113-127.
124. Kāposts V., 2006. Augsnes īpašību ietekme uz bērza stādījumu augšanas rādītājiem bijušo lauksaimniecības zemju platībās. Atskaite par zinātnisko pētījumu, LVMI „Silava”, 97.
125. Kārklīš A., 2008. Augsnes diagnostika un apraksts. *Latvijas Lauksaimniecības Universitāte, Jelgava*, 336.
126. Kārklīš A., Gemste I., Mežals H., Nikodemus O., Skujāns R., 2009. Latvijas augšņu noteicējs. *Latvijas Lauksaimniecības Universitāte*, 240.
127. Kiršteins K., Eiche V., 1933. Baltā skābarža (*Carpinus betulus L.*) dabiskā izplatība un ekoloģija Latvijā. *LU Raksti. Lauksaimniecības fakultātes sērija 2* (13), 343.-448.
128. Klassen R.A., 2009. Geological controls on soil parent material geochemistry along a northern Manitoba-North Dakota transect. *Appl. Geochem.*, 24, 1382-1393.
129. Kline J.R., 1973. Mathematical simulation of soil-plant relationships and soil genesis. *Soil Sci.*, 115, 240-249.
130. Kölli R., Ellermäe O., 2001. Soils as basis of Estonian landscapes and their diversity. Development of European landscapes. In: *Development of European landscapes* (Mander, Ü., Printsman, A., Palang H., eds), 2, 445-448. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu: Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuens.
131. Krauklis A., 2000. Living with diversity in Latvia: people, nature and cultural landscapes. *Ģeogrāfiski raksti. Folia Geographica*, 8, 1-14.

132. Krauklis Ā., Zariņa A., 2002. Parastais skābardis sava areāla ziemeļu robežas ainavā Latvijā. Ģeogrāfiski raksti. Folia Geographica, 10, 16-47.
133. Kristensen S.P., Thenail C., Kristensen L., 2001. Farmers's involment in landscape activietis: An anlysis of the relationship between farm location, farm characteristics and landscape changes in two study areas in Jutland, Denmark. J. Environ. Manage., 61, 301-318.
134. Kristiansen S.M., 2001. Present-day soil distribution explained by prehistoric land-use: Podzol-Arenosol variation in and ancient woodland in Denmark. Geoderma, 103, 273-289.
135. Kronītis J., 1991. Latvijas valsts meža apsaimniekošana. Meža gadagrāmata (J. Vanags red.), Rīga, Avots, 206.-213.
136. Kühn P., 2003. Micromorphology and late glacial/Holocene genesis of Luvisols in Mecklenburg - Vorpommern (NE – Germany). Catena, 54, 537-555.
137. Kwaad F.J.P.M., Múcher H.J., 1977. The evolution of soils and slope deposits in the Luxembourg Ardennes near Wiltz. Geoderma, 17, 1-37.
138. Lagacherie P., McBratney A.B., Voltz M., 2007. Digital soil mapping, an introductory perspective. Developments in Soil Science., 31. Elsevier, Amsterdam, 658.
139. Lagacherie P., Robbez Masson J.M., Nguyen-The N., Barthes J.P., 2001. Mapping of reference area representativity using a mathematical soilscape distance. Geoderma, 101, 105-118.
140. Laiviņš M., 1984. Latvijas PSR ezeru salu baltalkšņu mežu sabiedrības. Mežsaimniecība un Mežrūpniecība, 6, 23.-27.
141. Laiviņš M., 2000. Baltā skābarža (*Carpinus betulus* L.) audze Sventajas upes ielejā. Grām.: Jauns gadsimts – jauna ģeogrāfija. Latvijas Ģeogrāfijas kongress. Rīga, 33.-35.
142. Laiviņš M., 2001. Subkontinentālie priežu un ozolu meži Latvijā. [Subcontinental pine and oak forests in Latvia.] Book of Abstracts. International Conference „Research and Conservation of Biological Diversity in Baltic Region”. April 26-28, 2001. Daugavpils, 55.
143. Laiviņš M., Sīpols M., Riekstiņa D., 1993. Reģionālais meža monitorings Latvijā. Latvijas Vides aizsardzības komiteja, Pētījumu centrs, 149.
144. Laiviņš M., 1998. Latvijas boreālo priežu mežu sinantropizācija un eitrofikācija. Latvijas veģetācija, 1, 137.
145. Landis T.D., 1989. Mineral nutrients and fertilization. In: Seedling nutrition and irrigation (Eds.: T.D. Landis, R.W. Tinus, S.E. McDonald, J.P. Barnett). The container tree nursery manual. Vol. 4. Agricultural Handbook 674. Washington D.C., U.S. Department of Agric., Forest Service, 1-67.
146. Latvijas ģeoloģiskā karte, mērogs 1 : 500 000, 1981. State Geological Survey. Rīga. Pieejams: kartes.geo.lu.lv
147. Latvijas Statistika, 2010. Forestry-key indicators. Central Statistical Bureau of Latvia. Pieejams: <http://www.csb.gov.lv/en/statistikas-temas/forestry-key-indicators-30729.html>

148. Lazdiņš A., 2008. Meža monitoringa valsts programmas 2008. gadam uzdevumu izpilde. Pārskats par Meža attīstības fonda atbalstīto pētījumu, 66.
149. Lazdiņš A., 2011. Dabiski apmežojušos lauksaimniecības zemju efektīvas apsaimniekošanas nosacījumi. Promocijas darba kopsavilkums. LLU, LVMI „Silava”, 50.
150. Lipsky Z., 1995. The changing face of the Czech rural landscape. *Landscape Urban. Plan.*, 31, 39-45.
151. Līpenīte I., Kārkliņš A., 2011a. Augsnes kvalitāte zemes izmantošanas maiņas kontekstā. I. Problēmas nostādne un augsnis organiskā viela. *LLU Raksti*, 26 (321), 1-17.
152. Līpenīte I., Kārkliņš A., 2011b. Augsnes kvalitāte zemes izmantošanas maiņas kontekstā. II. Augsnes fizikālās un agroķīmiskās īpašības. *LLU Raksti*, 26 (321), 18-32.
153. Lundström U.S., van Breemen N., Bain D., 2000. The podzolization process. A review. *Geoderma*, 94, 91-107.
154. Lundström U.S., 1993. The role of organic acids in soil solution chemistry in a podzolized soil. *J. Soil Sci.*, 44, 121-133.
155. Lundström U.S., Van Breemen N., Bain D., 2000. The podzolization process. A review. *Geoderma*, 94 (2/4), 91-107.
156. Lūkins M., Nikodemus O., 2011. Meža masīva struktūras maiņa 20. gs. pauguraines ainavā Vidzemē. *Acta Universitatis Latvensis. Earth Env. Sci.*, 762, 7-25.
157. LVS ISO 10390:2002.
158. LVS ISO 10693:1995.
159. LVS ISO 10694:1995.
160. LVS ISO 11261:2002.
161. LVS ISO 11277:2000.
162. Mander Ü., Kuuba R., 2004. Changing landscapes in Northeastern Europe based on examples from the Baltic countries. In: The new dimension of the European landscape. 123-134; Pieejams: <http://edepot.wur.nl/119323>
163. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, 2006. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. United Nations Economic Commission for Europe Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Part IIIa, Expert Panel on Soil Forest Soil Co-ordinating Centre, Research Institute for Nature and Forest, Belgium, 26. Pieejams: [http://www.icp-forests.org/pdf/Chapt_3a_2006\(1\).pdf](http://www.icp-forests.org/pdf/Chapt_3a_2006(1).pdf)
164. Marbut C.F., 1927. The Great Soil Groups of the World and their Development. In: Glinka K.D. (Ed.). *Edwards Bros.*, Ann Arbor, MI. Transl., 235.
165. McBratney A., Minasny B., 2007. On measuring pedodiversity. *Geoderma*, 14, 149-154.
166. McBratney A.B., 1992. On variation, uncertainty, and informatics in environmental soil management. *Aust. J. Soil Res.*, 30, 913-935.
167. McBratney A.B., 1998. Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 50, 51-64.

168. McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117 (1-2), 3-52.
169. McCullagh P., Nelder J.A., 1989. *Generalized Linear Models*, 2nd edition. Chapman & Hall, New York, 532.
170. McKenzie N.J., Ryan P.J., 1999. Spatial prediction of soil properties by using environmental correlation. *Geoderma*, 89 (1-2), 67-94.
171. McLean E.O., 1965. Aluminium. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2* (Ed.: C.A. Black), Amer. Soc. Agron., Madison, Agronomy, 9, 978-998.
172. Mellor A., 1985. Soil chronosequences on Neoglacial moraine ridges, Jostedal-breen and Jotunheimen, southern Norway: a quantitative pedogenic approach. In Arnett, R.R., Ellis S., Richards K.S. (eds.): *Geomorphology and Soils*. George, Allen and Unwin, London, 289-308.
173. Mežals G., 1980. Meža augšnes zinātne. Rīga, Zvaigzne, 174.
174. Miles J., 1985. The pedogenic effects of different species and vegetation types and the implications of succession. *Soil Sci.*, 36, 571-584.
175. Miller J.D., Duff E.I., Hirst D., Anderson H.A., Bell J.S., Henderson D.J. 2001. Temporal Changes in Soil Properties at an Upland Scottish Site Between 1956 and 1997. *Sci. Tot. Environ.*, 265, 15-26.
176. Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E., 2010. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*, 155, 132-139.
177. Mokma D.L., Yli-Halla M., Lindqvist K., 2004. Podzol formation in sandy soils of Finland. *Geoderma*, 120 (3/4), 259-272.
178. Montagne D., Cornu S., Le Forestier L., Hardy M., Josière O., Caner L., Cousin I., 2008. Impact of drainage on soil-forming mechanisms in a French Albeluvisol: Input of mineralogical data in mass-balance modelling. *Geoderma*, 145, 426-438.
179. Moore I., Gessler P., Nielsen G., Peterson G., 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57 (2), 443-452.
180. Moran J.M., Bui E.N., 2002. Spatial data mining for enhanced soil map modelling. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 16 (6), 533-549.
181. Mund M., Kummetz E., Hein M., Bauer G.A., Schulze E.D., 2002. Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in central Europe. *Forest Ecol. Manag.*, 171, 275-296.
182. Murashkina M.A., Southard R.J., Pettygrove G.S., 2007. Silt and fine sand fractions dominante K fixation in soils derived from granitic alluvium of the San Joaquin Valley, California. *Geoderma*, 141, 283-293.
183. Nartišs M., Celiņš I., Zelčs V., Dauškans M., 2009. Stop 8: History of the development and palaeogeography of ice-dammed lakes and inland dunes at Seda sandy plain, north western Vidzeme, Latvia. In *Extent and timing of Weichselian glaciation southeast of the Baltic Sea: Abstracts and Guidebook* (Kalm, V., Laumets, L., Hang, T., eds). The INQUA Peribaltic Working Group Field Symposium in southern Estonia and northern Latvia, September 13-17, 2009. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu, 79-81.

184. Nelder J., Wedderburn R.W.M., 1972. Generalized linear models. *J. R. Stat. Soc.*, 370-384.
185. Nielsen K.E., Ladekarl U.L., Nørnberg P., 1999. Dynamic soil processes on heathland due to changes in vegetation to oak and Sitka spruce. *Forest Ecol. Manag.*, 114, 107-116.
186. Nikodemus O., Bell S., Peneze Z., Rasa I., 2010. The influence of single area payments on the Latvian landscape. *Eur. Countrys.*, 2 (1), 25-41.
187. Nikodemus O., 2001. Augšnes pētniecība un izmantošana kadastra izveidē. *Zemes izmantošana un kadastrs Latvijā* (A. Boruka red.). LLU Skrīveru zinātnes centrs, LR Valsts zemes dienests, 243.-257.
188. Nikodemus O., Kasparinskis R., Tabors G., 2008. Soil Mapping in Latvia According to the International FAO WRB 2006 Soil Classification. *Problems and Solutions. Vagos* 80 (33), 68-74.
189. Nilsson S.I., Bergkvist B., 1983. Aluminium chemistry and acidification processes in a shallow podzol on a Swedish westcoast. *Water Air Soil Pollut.*, 20, 311-329.
190. Nordén U., 1994. Influence of tree species on acidification and mineral pools in deciduous forest soils of south Sweden. *Water Air Soil Poll.*, 76, 363-381.
191. Oades J.M., 1988. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*, 5, 35-70.
192. Odum E.P., 1959. *Fundamentals of Ecology* (2nd ed.). Saunders: Philadelphia, 790.
193. Oelkers E.H., Golubev S.V., Chairat C., Pokrovsky O.S., Schott J., 2009. The surface chemistry of multi-oxide silicates. *Geochim. Cosmochim. Ac.*, 73, 4617-4634.
194. Ovington J.D., 1953. Studies of the development of woodland conditions under different trees. I. Soils pH. *J. Ecol.*, 41, 13-34.
195. Page A.L., Burge W.D., Ganje T.J., Garber M.J., 1967. Potassium and ammonium fixation by vermiculitic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 31, 337-341.
196. Palo A., Remm K., Kikas T., Mander Ü., 2004. The Prediction of Vegetation Pattern Using Biophysical Landscape Factors. In: Martin-Duque, J.F., Brebbia, C.A., Godfrey, A.E., Diaz de Teran, J.R. (Eds.) *Geo-Environment. Monitoring, Simulation and Remediation of the Geological Environment*. WIT Press, Southampton, Boston, 315-334.
197. Palo A., 2005. Relationships between landscape factors and vegetation site types: Case study from Saare County, Estonia. *Dissertationes Geographicae Universitatis Tartuensis*, 114.
198. Palo A., Aunap R., Mander Ü., 2005. Predictive vegetation mapping based on soil and topographical data: A case study from Saare County, Estonia. *J. Nat. Cons.*, 13 (2/3), 197-211.
199. Parry S.A., Hodson M.E., Oelkers E.H., Kemp S.J., 2011. Is silt the most influential soil grain size fraction. *Appl. Geochem.*, 26, 5119-5122.
200. Paul K.I., Polglase P.J., Nyakuengama J.G., Khanna P.K., 2002. Change in Soil Carbon Following Afforestation. *Forest Ecol. Manag.*, 168, 241-257.

201. Paul K.I., Polglase P.J., Richards G.P., 2003. Sensitivity analysis of predicted change in soil carbon following afforestation. *Ecol. Model.*, 164, 137-152.
202. Penēze Z., 2009. Latvijas lauku ainavas izmaiņas 20. un 21. gadsimtā: cēloņi, procesi un tendences. Promocijas darbs. Latvijas Universitāte, 255.
203. Perala D.A., Alban D.H., 1982. Biomass, nutrient distribution and litterfall in *Populus*, *Pinus* and *Picea* stands on two different soils in Minnesota. *Plant Soil*, 64, 177-192.
204. Phillips J.D., 1998. On the relations between complex systems and the factorial model of soil formation (with discussion). *Geoderma*, 86, 1-21.
205. Phillips J.D., Marion D.A., 2004. Pedological memory in forest soil development. *Forest Ecol. Manag.*, 188 (1/3), 363-380.
206. Phillips J.D., Marion D.A., 2005. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. *Geoderma*, 124, 73-89.
207. Piirainen S., Finer L., Starr M., 2002. Deposition and leaching of sulphate and base cations in a mixed boreal forests in Eastern Finland. *Water Air Soil Poll.*, 131, 185-204.
208. Pratt P.F., 1965. Potassium, Sodium. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2* (Ed.: C.A. Black), Amer. Soc. Agron., Madison, Agronomy, 9, 1022-1034.
209. Prescott C.E., 2002. The influence of the forest canopy on nutrient cycling. *Tree Physiol.*, 22, 193-1200.
210. Pritchett W.L., Fisher R.F., 1987. Properties and management of forest soils. 2nd ed., Wiley, 494.
211. Protz R., Ross G.J., Martini I.P., Terasmae J., 1984. Rate of Podzolic soils formation near Hudson Bay, Ontario. *Can. J. Soil Sci.*, 64, 31-49.
212. Purdon M., Cienciala E., Metelka V., Beranová J., Hunová I., Cerný M., 2004. Regional variation in forest health under long-term air pollution mitigated by lithological conditions. *Forest Ecol. Manag.*, 195, 355-371.
213. Qi F., Zhu A.X., 2003. Knowledge discovery from soil maps using inductive learning. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 17 (18), 771-795.
214. Quinn G.P., Keough M.J., 2002. *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge University Press, 556.
215. Ramankutty N., Foley J.A., 1999. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochem. Cy.*, 13 (4), 997-1027.
216. Raukas A., 1997. Evolution of the Baltic Sea. In: *Geology and Mineral Resources of Estonia* (Raukas, A., Teedumäe, A., eds). Estonian Academy Publishers, Tallinn, 268-274.
217. Reimann C., Filzmoser P., 1999. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environ. Geol.*, 39, 1001-1014.
218. Reimann C., Filzmoser P., Garrett R., 2002. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Sci. Total Environ.*, 17 (3), 185-206.

219. Reintam L., 2007. Soil formation on reddish-brown calcareous till under herbaceous vegetation during forty years. *Est. J. Earth Sci.*, 56, 65-84.
220. Reintam L., 2002. Correlation of the diagnostic properties of soil genetic units for harmonisation of soil map units. In: *Soil Classification 2001* (Micheli, E., Nachtergaele, F.O., Jones, R.J.A., Montanarella, L., eds). European Soil Bureau Research Report 7, EUR 20398 EN, 205-210, Pieejams: http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/esb_rr/n07_ESBResRep07/505Reintam.pdf
221. Reintam L., Moora T., Raukas A., 2008. Gleysols on sandy deposits of the Litorina Sea underlain by Histosol formations of Ancylus Lake age in western Estonia. *Est. J. Earth Sci.*, 57 (4), 231-240.
222. Reintam L., Raukas A., Kleesment A., Moora T., Kährlik R., 2001. Podzolization in Aeolian sands underlain by Gleysol formation, during nine millennia in southwestern Estonia. *Proceedings of Estonian Academy of Science. Geology*, 50 (4), 254-281. Pieejams: http://www.kirj.ee/public/va_ge/g50-4-4.pdf
223. Rejšek K., Haverlaen O., Sandnes A., Somerlíková K., 2010. Soil characteristics under selected broadleaved tree species in East Norway. *J. Forest Sci.*, 56 (7), 295-306.
224. Reynolds B., Neal C., Hornung M., Hughes S., Stevens P.A., 1988. Impact of afforestation on the soil solution chemistry of stagnopodzols in mid-Wales. *Water Air Soil Poll.*, 38 (1-2), 55-70.
225. Rikala R., Jozefek H.J., 1990. Effect of dolomite lime and wood ash on peat substrate and development of tree seedlings. *Silva Fenn.*, 24, 323-334.
226. Ritter E., Vesterdal L., Gundersen P., 2003. Changes in soil properties after afforestation of former intensively managed soils with oak and Norway spruce. *Plant Soil.*, 249, 319-330.
227. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinska Z., Kasparinskis R., Brumelis G. In press. Patterns of afforestation on abandoned agriculture land in Latvia. *Agroforest Syst.*
228. Rūsiņa S., 2007. Latvijas mezofīto un kserofīto zālāju daudzveidība un kontakt-sabiedrības. *Latvijas veģetācija*, 12, 366.
229. Saarse L., Vassiljev J., Miidel A., Niinemets E., 2006. Holocene buried organic sediments in Estonia. *Proceedings of Estonian Academy of Science. Geology*, 55 (4), 296-320. Pieejams: http://www.kirj.ee/public/va_ge/geo-2006-4-3.pdf
230. Sakamoto Y., Ishiguro M., Kitagawa G., 1986. Akaike Information Criterion Statistics. D. Reidel Publishing Company, 290.
231. Saldaña A., Ibáñez J.J., 2007. Pedodiversity, connectance and spatial variability of soil properties, what is the relationship? *Ecol. Model.*, 208, 342-352.
232. Salminen R., Gregorauskiene V., Tarvainen T., 2008. The normative mineralogy of 10 soil profiles in Fennoscandia and north-western Russia. *Appl. Geochem.*, 23, 3651-3665.
233. Sarkar S., 1998. Some probability inequalities for ordered MTP2 random variables: a proof of Simes conjecture. *Ann. Stat.*, 26, 494-504.
234. Sarkar S., Chang C.K., 1997. Simes' method for multiple hypothesis testing with positively dependent test statistics. *J. Am. Stat. Assoc.*, 92, 1601-1608.

235. Sauer D., Schüllli-Maurer I., Sperstad R., Sorensen R., Stahr K., 2009. Albeluvisol development with time in loamy marine sediments of southern Norway. *Quatern. Int.*, 209 (1/2), 31-43.
236. Sauer D., Schüllli-Maurer I., Sperstad R., Sorensen R., Stahr K., 2008. Podzol development with time in sandy beach deposits in southern Norway. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 171, 483-497.
237. Schulp C.J.E., Nabuurs G., Verburg P.H., de Waal R.W., 2008. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. *Forest Ecol. Manag.*, 256, 482-490.
238. Shaw C.F., 1932. A soil formation formula. In: Prassolov, L.F., Vilensky, D.G. (Eds.), *Proceedings and Papers of the Second International Congress of Soil Science. Commission V* (5), 7-14.
239. Shear G.M., Stewart W.D., 1934. Moisture and pH studies of the soil under forest trees. *Ecology*, 15, 134-153.
240. Sitzia T., Sementzato P., Trentanovi G., 2010. Natural reforestation is changing spatial patterns of rural mountain and hill landscapes: A global overview. *Forest Ecol. Manag.*, 259 (8), 1354-1362.
241. Skujāns R., 1970. Augšņu kartēšana. *Augsnes zinātne un Latvijas PSR augsnes. Rīga, Zvaigzne*, 445-464.
242. Slager S., Van de Wetering H.T.J., 1977. Soil formation in archaeological pits and adjacent soils in southern Germany. *J. Archaeol. Sci.*, 4, 259-267.
243. Smal H., Olszewska M., 2008. The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus. *Plant Soil*, 305, 171-187.
244. Sokolov I.A., 1996. Paradigm of pedology from Dokuchaev to the present day. *Eurasian Soil Sci.*, 29, 222-231.
245. Sommer M., Schlichting E., 1997. Archetypes of catenas in respect to matter – a concept for structuring and grouping catenas. *Geoderma*, 76 (1-2), 1-33.
246. Spain A.V., 1990. Influence of environmental conditions and some chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soils. *Aust. J. Soil Res.*, 28, 825-839.
247. Staaf H., Berg B., 1981. Accumulation and release of plant nutrients in decomposing Scots pine needle litter. Long – term decomposition in a Scots pine forest II. *Can. J. Bot.*, 60, 1561-1568.
248. Stendahl J., Snäll S., Olsson M.T., Holmgren P., 2002. Influence of soil mineralogy and chemistry on site quality within geological regions in Sweden. *Forest Ecol. Manag.*, 170, 75-88.
249. Stützer A., 1998. Early stages of podzolisation in young aeolian sediments, western Jutland. *Catena*, 32, 115-129.
250. Sverdrup H., 1990. The kinetics of base cation release due to chemical weathering. *Lund University Press, Sweden*, 246.
251. Sverdrup H., Warfvinge P., 1988. Weathering of primary silicate minerals in the natural soil environment in relation to a chemical weathering model. *Water Air Soil Poll.*, 38, 387-408.

252. Targulian V.O., Krasilnikov P.V., 2007. Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena*, 71, 373-381.
253. Tee Boon Goh R.J., Arnaud St, Mermut A.R., 1993. Carbonates. In: *Soil Sampling and Methods of Analysis* (Ed.: Carter M.R.), 177-185.
254. Terauda E., Nikodemus O., 2006. Element input by litterfall to the soil in pine forest ecosystems. *Env. Bioind.*, 1 (2), 145-156.
255. Terauda E., Nikodemus O., 2007. Sulphate and nitrate in precipitation and soil water in pine forests in Latvia. *Water Air Soil Poll.*, 7, 77-84.
256. Tērauda E., 2008. Ķīmisko vielu plūsmas Latvijas priežu mežu ekosistēmās. Promocijas darbs. Latvijas Universitāte, 123.
257. Thuille A., Schulze E.D., 2006. Carbon dynamics in successional and afforested spruce stands in Thuringia and the Alps. *Global Change Biol.*, 12, 325-342.
258. Tice K.R., Graham R.C., Wood H.B., 1996. Transformations of 2 : 1 phyllosilicates in 41-year-old soils under oak and pine. *Geoderma*, 70, 49-62.
259. Ukonmaanaho L., 2001. Canopy and soil interaction with deposition in remote boreal ecosystems: a long-term integrated monitoring approach [dissertation]. Helsinki: University of Helsinki, 54.
260. Ulrich B., 1995. The history and possible causes of forest decline in Central Europe, with particular attention to the German situation. *Envir. Rev.*, 3, 262-276.
261. Ulrich B.B.P., Harris W.F., Khanna P.K., Mayer R., 1981. Soil Processes. In: Reichle D.E. (Eds.). *Dynamic Properties of Forest Ecosystems*. Cambridge University Press, Inter. Biol. Programme 23, 265-339.
262. USDA National Resources Conservation Service, 2004. Survey Laboratory Methods Manual. Soil Investigations report 42, (4), 312-317.
263. Uuemaa E., Roosaare J., Kanal A., Mander Ü., 2008. Spatial correlograms of soil cover as an indicator of landscape heterogeneity. *Ecol. Indic.*, 8 (6), 783-794.
264. Van Reeuwijk L.P., 1995. Procedures for Soil Analysis, 5th edition. Wageningen.
265. Vanmechelen L., Groenemans R., Van Ranst E., 1997. Forest Soil Condition in Europe. Results of a Large-Scale Soil Survey. Technical Report. EC, UN/ECE, Ministry of the Flemish Community, Brussels, Geneva, 259.
266. Vasiļevskis A., 2007. Latvijas valsts mežu apsaimniekošana 1918–1940. Rīga, Nacionālais apgāds.
267. Vesterdal L., Raulund-Rasmussen K., 1998. Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient. *Can. J. Forest Res.*, 28, 1636-1647.
268. Vesterdal L., Ritter E., Gundersen P., 2002. Change in Soil Organic Carbon Following Afforestation of Former Arable Land. *Forest Ecol. Manag.*, 169, 137-147.
269. Vesterdal L., Schmidt I.K., Callesen I., Ola Nilsson L., Gundersen P., 2008. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest Ecol. Manag.*, 255 (1), 35-48.
270. Wall A., Hytönen J., 2005. Soil fertility of afforested arable land compared to continuously forested sites. *Plant Soil.*, 275, 247-260.
271. Waring R.H., Schlesinger W.H., 1985. Forest ecosystems. Concepts and management. Academic Press, Orlando, 340.

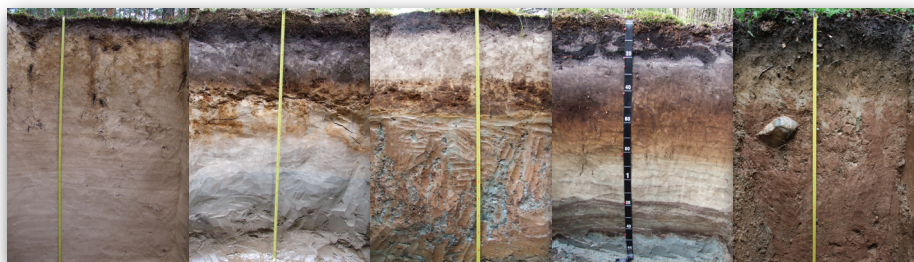
272. Wilkinson M.T., Chappell J., Humphreys G.S., Fifield K., Smith B., Hesse P., 2005. Soil production in heath and forest, Blue Mountains, Australia: influence of lithology and paleoclimate. *Earth Surf. Proc. Land.*, 30 (8), 923-934.
273. Zadeika I., 2005. Meža augšņu inventarizācija un bioloģiskās daudzveidības novērtēšana starptautiskā projekta „BIOSOIL” ietvaros. Pārskats, Zemkopības ministrijas Meža attīstības fonda pasūtītais pētījums, 82.
274. Zadeika I., 2006. Meža augšņu inventarizācija un bioloģiskās daudzveidības novērtēšana starptautiskā projekta „BIOSOIL” ietvaros. Pārskats, Zemkopības ministrijas Meža attīstības fonda pasūtītais pētījums, 49.
275. Zelčs V., Markots A., Nartišs M., Saks T., 2011. Chapter 18: Pleistocene Glaciations in Latvia. In *Quaternary glaciations – extent and chronology*. In: *Developments in Quaternary Sciences 15* (Ehlers, J., Gibbard, P.L., Hughes, P.D., eds), 221-229.
276. Zemes pārvaldības likuma koncepcija. Informatīvā daļa, 2010. Ministru kabineta 2010. gada 19. aprīļa rīkojums Nr. 214.
277. Zinke P.J., 1962. The pattern of influence of individual forest trees on soil properties. *Ecology*, 43, 130-133.
278. Zunde M., 1999. Mežainuma un koku sugu sastāva pārmaiņu dinamika un to galvenie ietekmējošie faktori Latvijas teritorijā. Latvijas meža vēsture līdz 1940. gadam. Rīga: WWF – Pasaules Dabas fonds, 111.-203.
279. Биргер А.Я., Биргер Л.В., Биркис А.П., Брангулис А.П., Брио Х.С., Гаврилова А.В., Гайлите Л.К., Куршс В.М., Лярская Л.А., Мейронс З.В., Страуме Я.А., Ульст Р.Ж., Юшкевич В.В., 1979. Геологическое строение и полезные ископаемые Латвии. (Ред.: Мисанс Я.П., Брангулис А.П., Даниланс И.Я., Куршс В.М.). Рига, Зинатне, 543.
280. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х., 1989. Микроэлементы в почвах и растениях. Москва, Мир, 439.
281. Лаивинш М., Гемсте И.К., 1977. Ординация почв острова Морицсала. Тезисы докладов V делегатского съезда Всесоюзного общества почвоведов. Минск, вып., 5, 227-228.
282. Малдав З., 1977. Принципы составления карты почвообразующих пород Латвий. Почвенные ресурсы в сельскохозяйственном производстве Латвийской ССР. Труды ЛСХА, выпуск 154. Министерство сельского хозяйства СССР, Латвийская сельскохозяйственная академия. Елгава, 10-14.
283. Перельман А.И., Касимов Н.С., 1999. Геохимия ландшафта. Москва, 763.

UNIVERSITY OF LATVIA
FACULTY OF GEOGRAPHY AND EARTH SCIENCES
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE



Raimonds Kasparinskis

DIVERSITY OF FOREST SOILS AND ITS INFLUENCING FACTORS IN LATVIA



Summary of Doctoral Thesis

Submitted for the Doctoral Degree in Geography
Field: Environmental Science
Subfield: Nature Protection

Riga, 2012

The doctoral thesis was carried out at the Department of Environmental Science at the Faculty of Geography and Earth Sciences of the University of Latvia from 2007 till 2011. This work has been supported by the European Social Fund within the Project “Support for Doctoral Studies at the University of Latvia” No. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004.



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

The thesis contains the introduction, 5 chapters, conclusions, recommendations, reference list.

Form of the thesis: dissertation in geography, field of environmental science, subfield of nature protection.

Supervisors:

Dr. geogr., professor, **Oļģerts Nikodemus**

Dr. hab. chem., professor, **Māris Kļaviņš**

Reviewers:

Viesturs Melecis, *Dr. biol.*, professor, University of Latvia, UL Institute of Biology

Aldis Kārklīšs, *Dr. hab. agr.*, professor, Latvia University of Agriculture

Raimo Kõlli, *Dr. Sc.*, professor, Estonian University of Life Sciences

The thesis will be defended at the public session of the Doctoral Committee of Environmental Science, Faculty of Geography and Earth Sciences, University of Latvia, at 10:00, May 18, 2012, 10 Alberta Street, Riga.

The thesis is available at the Library of the University of Latvia Multi-branched Library: Computer Science, Law and Theology, Riga, Raiņa Blvd. 19.

This thesis is accepted for the commencement of the degree of Doctor of Environmental Science on May 18, 2012, by the Doctoral Committee of Environmental Science, University of Latvia.

Chairman of the Doctoral Committee: **Viesturs Melecis**

Secretary of the Doctoral Committee: **Gunta Sprinģe**

Summary

In this thesis, for the first time in Latvia, an assessment of forest soil diversity in accordance with the international FAO WRB soil classification has been carried out, its influencing factors have been studied, as well as information in connection with soil genesis and changes in the morphology and physical and chemical properties of forest lands of different ages developed on former agricultural lands has been obtained.

The results show that geological deposits and their composition is one of the main factors determining the occurrence of soil groups and also their physical and chemical properties. Geological deposits determine the soil texture, which in turn affects the chemical composition of the soil parent material: extractable elements (Ca, K, Mg, Mn, Fe) and content of reactive Al and Fe, cation exchange capacity, base saturation, carbonate content, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ value. Soil texture has impact on the distribution and development of forest ecosystems and tree species in forest stands in Latvia as well as on soil-forming processes and topsoil chemical composition, e.g., extractable elements (Ca, K, Mg, Mn, Fe), reactive Al and Fe, exchangeable cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), as well as C_{org} and N_{tot} content, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ value and cation exchange capacity.

Following the afforestation of agricultural lands, the development of podzolization process is observed, and the following characteristics are indicative of this process: soil morphological features (development of the secondary E and B horizon), decrease in pH_{KCl} value during the first 70 years after the afforestation of agricultural lands and changes in the content of reactive (amorphous) Al and Fe within the soil horizons, which occur more rapidly than changes in the soil diagnostic features and profile formation.

In general, following afforestation of the former agricultural lands on glacial deposits, in comparison to older forest lands, occurrence of more intensive biological turnover of substances and delay of podzolization process is observed. Furthermore, the morphological features of agricultural land are preserved in the soil profiles for up to 100 years after afforestation; however, the diagnostic properties of *Albic* and *Spodic* horizons have not developed in the soil profile after 200 years.

Key words: soil texture, geological deposits, age of forest land, FAO WRB soil classification, forest types, soil genesis.

Contents

General characteristics of the doctoral thesis	123
1. Concise summary of the doctoral thesis	128
1.1. Theoretical justification of the study	128
Forest soil research in Latvia	128
1.2. Materials and methods	129
1.2.1. Research of soil spatial distribution and its physical and chemical properties at a regional scale	129
1.2.2. Research of changes in soil properties in glacigenic deposits related to the afforestation of agricultural lands at a local scale	131
1.3. Results and discussion	133
1.3.1. Spatial inconstancy of forest soils and its influencing factors at a regional scale	133
1.3.2. Change of soil physical and chemical properties at a regional scale	136
1.3.3. Change of soil properties in glacigenic deposits following the afforestation of agricultural lands at a local scale	142
2. Conclusions	147
Reference list	149
Acknowledgements	154

General characteristics of the doctoral thesis

Topicality of the doctoral thesis

There are many studies in the world about soil spatial distribution relationships (Jenny, 1941; Hudson, 1992; McBratney, 1998; Phillips, Marion, 2005). Investigations show the importance of different environmental factors in the development of soil processes, morphology and properties. Traditionally, the main natural soil forming factors are considered: soil parent material, climate, topography, biological factors (flora and fauna) and time of soil formation (soil age). Anthropogenic activities have an important role in the soil formation process. These factors determine processes in the soil and its development, e.g., humus accumulation, podzolization, lessivage, gleyzation etc. However, the development of the abovementioned processes as well as their interactions in different environmental conditions are very diverse, often determining the soil diversity as well (Targulian, Krasilnikov, 2007).

At the same time, it has been recognized that there are many problems related to the use of a specific soil classification in establishing the soil spatial distribution relationships. As a result, soil scientists have so far not reached an agreement on the influence of specific environmental conditions on the spatial distribution of soil in regional and local aspects (Gray et al., 2009). Incomplete knowledge about environmental conditions may sometimes lead to the overestimation of soil-forming processes and cause problems in the application and comparison of soil classifications (Reintam, 2002).

McBratney et al. (2003) have observed that it is difficult to find studies in which correlations between different soil-forming factors and multivariate functions are clearly described.

Until now, forest soils and their distribution relationships in Latvia have been studied relatively little. Henrihs Mežals (1980) has made a major contribution in forest soil research, investigating the relationships of brown soils formation. Almost no mapping of forest soils has been done in Latvia. During the Soviet period, in collaboration of the Land Project Institute ("Zemes projekts") and the Leningrad All-Union Agriculture Aerophotogeodesical Institute, Latvian forest soil mapping was performed in 11 districts at a scale 1:100,000 (Nikodemus, 2001). The land use and soil protection policy documents highlight the mapping of forest soils as one of the most important tasks in the near future in Latvia (Zemes pārvaldības..., 2010).

Carbon balance calculation, investigating the role of forest ecosystems in carbon sequestration, as well as forest ecosystems critical level calculation, modeling the risk of environmental pollution, play no less important role in establishing the spatial distribution relationships of forest soils. Research of the abovementioned relationships is important also in land use planning and management. All these aspects account for the novelty of the doctoral thesis.

Until now, in Latvia, the national soil classification has for the most part been used in soil investigations, causing certain problems in soil information exchange in Europe and the world (Karklins, 2005). Therefore, in the doctoral thesis, the international FAO

WRB soil classification was used for investigating correlations between the distribution of soil and geological deposits, between topography and forest types. In the doctoral thesis, a great deal of attention is focused on soil development after afforestation of agricultural lands. In Latvia this question is urgent, because, similarly to Europe, large areas of woodland have formed on former agricultural lands. Between 1925 and 2007, the area of forest in Latvia increased from 25 to 54.7% (Kronītis, 1991; Vasiļevskis, 2007; Latvijas statistika, 2010). Calculations indicate that the area of naturally afforested agricultural lands in Latvia is about 298,000 ha. Besides, natural afforestation has been more intense in the eastern part (Lazdiņš, 2011). Accordingly, the age of forest lands in Latvia is different, and this factor diversely impacts the genesis of soil (soil-forming processes), change of morphological features and physical and chemical properties.

Novelty of the study

- For the first time in Latvia, an assessment of forest soil diversity has been performed in accordance with the international FAO WRB (*The international Food and Agricultural Organization soil classification system World Reference Base for Soil Resources*) soil classification (IUSS Working Group, 2007; Kārklīšs, 2008).
- Influence of the most important environmental factors (geological deposits, forest types) on the spatial diversity, genesis and properties of forest soils has been studied.
- Local scale information related to changes in soil genesis, morphology and physical and chemical properties in glacial deposits within differently aged forest lands, where spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.), birch (*Betula pendula* Roth.), grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) and aspen (*Populus tremula* L.) forest stands have colonized former agricultural lands, has been obtained.

The aim of the thesis

To clarify the relationships of changes of soils and their properties in forest ecosystems and their influencing factors in Latvia.

The tasks of the thesis:

1. To summarize the scientific literature on soil formation, diversity and its influencing factors in forest ecosystems.
2. Using internationally accepted methods, to clarify:
 - 2.1. The environmental factors influencing the forest soil spatial distribution;
 - 2.2. The spatial changes of forest soil physical and chemical properties depending on geological deposits and forest types.
3. To find out the impact of afforestation of agricultural lands on soil morphology and soil physical and chemical properties in glacial deposits.

Hypothesis, thesis of the study

The diversity of soils and their physical and chemical properties in the forest ecosystems in Latvia is dependent mainly on the soil texture, which is determined by the genetic origin of geological deposits and formation time. These factors also have an

impact on the distribution and development of forest stands, which, in turn, influence the properties of topsoil.

Characterization of the methods

The doctoral thesis consists of three parts. In first part, the influencing factors of forest soil spatial distribution are studied. In the second part, the physical and chemical properties of soils and their changes depending on geological deposits and forest stand composition are described. In the third part, local-scale changes of soil properties in glacial deposits following the afforestation of agricultural lands are investigated.

In the forest ecosystems of Latvia over a period from 2006 to 2011, field work investigations and laboratory analyses of physical and chemical properties of soil samples were carried out in accordance with the ICP forest monitoring methods (FSCC, 2006) in a total of 122 sampling sites. Statistical processing and analysis of the collected data were done by using these software programs: Microsoft Office Excel 2007, SPSS PASW Statistics 18, PC-ORD 5.0, R 2.11.1. Generalized linear models (GLM), One-way analysis of variance (ANOVA) (*Tukey* and *Scheffe HSD post-hoc* tests) and the principal components analysis were performed as part of the statistical analysis of data.

Approbation of the results

The results of the doctoral thesis have been discussed and presented in 10 scientific publications, 2 international scientific congresses, 12 international scientific conferences, 13 local scientific conferences in Latvia.

The results of the doctoral thesis have been used in study courses at the level of bachelor and master at the Faculty of Geography and Earth Sciences, University of Latvia, as well as in supervising 5 bachelor's theses and in consulting 2 master's theses.

The most important publications (related to the thesis)

Scientific publications (related to the thesis):

1. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O. 2012. Influence of Environmental Factors on Forest Soil Spatial Distribution and Diversity in Latvia. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 61(1): 48-64.
2. **Kasparinskis R.**, Kukuļš I., Nikodemus O., Rolavs N., Tabors G. 2011. Lauksaimniecības zemju apmežošanās ilgtermiņa ietekme uz augsnes morfoloģiju un īpašībām. *Mežzinātne*. 24(57):17–40.
3. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Kukuļš I., Tabors G., Freimane A. 2011. Changes on Soil Properties and Processes Due to Afforestation of Agricultural Lands. *Book of proceedings "100 years Bulgarian Soil science, International Conference"*. 1:241–245.
4. Kukuļš I., **Kasparinskis R.**, Ansone L. 2010. Lauksaimniecības zemju apmežošanas ietekme uz augsnes humusu. Latvijas Universitātes raksti 767. sēj. Zemes un Vides zinātnes. 93–103.
5. Nikodemus O., **Kasparinskis R.**, Tabors G. 2008. Soil Mapping in Latvia According to the International FAO WRB 2006 Soil Classification. Problems and Solutions. *Vagos*. 80(33):68–74. Lithuanian University of Agriculture.

6. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinska Z., **Kasparinskis R.**, Brumelis G. *In press*. Patterns of Afforestation on Abandoned Agriculture Land in Latvia. *Agroforestry systems*.
7. Nikodemus O., **Kasparinskis R.**, Kukuls I. 2012. Influence of Afforestation on Soil Genesis, Morphology and Properties in Glacial Till Deposits. *Archives of Agronomy and Soil Science*. In press.

Abstracts of Reports Presented at International Congresses, Conferences:

1. Kukuls I., **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Ansone L. 2011. The accumulation of the organic matter and the change of humification process following afforestation of abandoned farmland. In: *Program and Abstracts Book "Soil Science in a Changing World"*. Wageningen, The Netherlands, p. 273.
2. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Kukuls I., Tabors G., Freimane A. 2011. Changes on Soil Properties and Processes Due to Afforestation of Agricultural Lands. In: *Book of proceedings "100 years Bulgarian Soil science, International Conference"*. Sofia, Bulgaria, 1:241–245.
3. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O. 2010. Environmental factors influence on forest soil spatial distribution and diversity in Latvia. In: *Book of Abstracts of geoENV 2010 // 8th International conference on Geostatistics for Environmental Applications*. Ghent University, Belgium, 188–191.
4. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinska Z., **Kasparinskis R.** 2010. Impacts of natural reforestation of abandoned agricultural land on structure of rural landscape in Latvia. In: *PECSRL the Permanent European Conference for the Study of the Rural Landscape, 24th Session – Living in Landscapes: Knowledge, Practice, Imagination*. University of Latvia, Faculty of Geography and Earth Sciences, p. 119.
5. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinska Z., **Kasparinskis R.** 2010. Patterns of afforestation process in abandoned agriculture land in Latvia. In: *Forest landscape and global change: New frontiers in Management, Conservation and restoration. Book of abstracts of the IUFRO Landscape Ecology Working Group International Conference, September 21-27*. Braganca, Portugal, p. 78.
6. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O. 2009. Soil degradation risk assessment opportunities in Latvia. In: *Proceedings of the International conference of Soil degradation, February 17-19*. Riga, Latvia, p. 98.
7. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Zelchs V. 2008. Influence of geological factors on soil forming and morphology in coastal Lowland, Latvia. In: *Proceedings of 33rd International Geological Congress, August 6-14*. Oslo, Norway.
8. **Kasparinskis R.**, Nikodemus O., Zelchs V. 2008. Role of Geological Factors on Soil Forming and Morphology in Western Latvia Coastal Plains. In: *Book of Abstracts "EuroSoil 2008"*. Blum W.E.H., Gerzabek M. H., Vodrazka M. (Eds.). Europe Soil Congress, August 25-29, Vienna, Austria. p. 116.

-
9. Nikodemus O., **Kasparinskis R.**, Tabors G. 2008. Soil Mapping in Latvia According to the International FAO WRB 2006 Soil Classification. Problems and Solutions. The international scientific conference to commemorate 50 years jubilee of Lithuanian Soils Science Society at the Lithuanian Academy of Sciences "Soil in sustainable environment". September 24–26, Lithuanian University of Agriculture.

Information on scientific projects

- International project "Inventory of forest soils and assessment of forest biological diversity „BioSoil”" of the Focus Forest research programme of the International Co-operative Programme (ICP) and forest monitoring, the Forest Development Fund of the Ministry of Agriculture of Republic of Latvia and Forest Research Institute "Silava";
- UNDP/GEF Project "Building Sustainable Capacity and Ownership to Implement UNCCD objectives in Latvia";
- The research project "Forestry adaptation to climate change" of the Forest Development Fund of the Ministry of Agriculture of Republic of Latvia and Forest Research Institute "Silava".
- Science Council of Latvia Grant No. 09.1118 „Landscape ecological assessment of the agricultural lands afforestation";
- Science Council of Latvia Grant No.09.1568 "Influence of geographical and geological processes on nature conditions and society in Latvia".

1. Concise summary of the doctoral thesis

1.1. Theoretical justification of the study

Forest soil research in Latvia

Relatively abundant information about the soils of agricultural lands in Latvia has been collected in the process of mapping the soils of all agricultural lands at a scale of 1:10,000 (Boruks et al., 1967, 2001, 2002; Karklins, 2005). In total, soil maps of agricultural and forest lands at a scale of 1:100,000 have been prepared for 11 from the 26 administrative districts in Latvia. The soil mapping has been performed on the basis of genetic soil classification. In the middle of the 20th century, on this soil information basis, were produced a soil map at a scale of 1:400,000 was prepared (Малдав, 1977; Mežals, 1980; Karklins, 2005), and it is still used in different reports of soil resources and the environment. However, this cartographical information is relatively incorrect, because of the lack of precise data about the soils of forest lands (Nikodemus et al., 2008).

Henrihs Mežals (1980) has made a major contribution in forest soil research, investigating the relationships of brown soils formation. Individual studies about hornbeam forest stands have been conducted by Ādolfs Krauklis and Anita Zariņa (2002). Further investigations related to the distribution of separate plant communities have been carried out by Māris Laiviņš (1977, 1984, 1998, 2000, 2001). Within the framework of regional forest monitoring under the supervision of M. Laiviņš (Laiviņš et al., 1993), the chemical properties of forest soils have also been studied from 1990 till 1992. It is known that changes in vegetation are dependent on abiotic factors; however, Solvita Rūsiņa (2007) has concluded that the information is incomplete in this respect.

The results of geochemical mapping in Latvia (Gilucis, Segliņš, 2003) performed at a scale of 1:500,000 over a period from 1999 to 2002 provides important information about the geochemical composition of soil. On the basis of these data, Aivars Gilucis (2007) has investigated the content and distribution relationships of microelements and macroelements in topsoil horizons in Latvia, including forest soils.

In general, to summarize all these studies, it can be concluded that there is a lack of correct information about forest soils, their distribution relationships, formation processes and properties in Latvia. The Latvian soil classification has previously been used in the soil research, and this classification does not provide information comprehensible to international institutions (Karklins, 2002, 2005). Furthermore, standardised methods and interpretations of the Soviet Union – which differ substantially from internationally used methods – have been used in Latvia. Individual studies related to the transformation of data from the methods previously used in Latvia to internationally recommended methods by performing mutual comparison of analytical methods were performed by Aldis Kārkliņš (Karklins, 1997; 2005).

Comprehensive research of forest soils as well as their description according to the international FAO WRB soil classification were started in Latvia in 2005, within the framework of the European first-level forest monitoring, the EU programme No. 2152/2003 on the monitoring of forests and environmental interactions in the

Community (Forest Focus) and the international project “Inventory of forest soils and assessment of forest biological diversity ‘BioSoil’” under the international collaboration programme (ICP) Forests. The author of this doctoral thesis participated in this project. Based on the monitoring results, several reports (Zadeika, 2005, 2006; Lazdiņš, 2008) and individual publications related to forest soils and their properties in Latvia were produced (Bārdule u.c., 2009, Kasparinskis, Nikodemus, 2012).

Soil description and mapping on the basis of the international FAO WRB soil classification were performed in Svēte and Nīca rural municipalities in 2007 (Nikodemus et al., 2008). That was one of the first attempts to use the abovementioned classification in the mapping of agricultural and forest lands in Latvia.

1.2. Materials and methods

1.2.1. Research of soil spatial distribution and its physical and chemical properties at a regional scale

Field investigations and laboratory analyses

From 2006 till 2010, under the international project “Inventarization of forest soils and assessment of forest biological diversity ‘BioSoil’” of the Forest Focus research programme (No. 2152/2003) of the International Co-operative Programme (ICP) Forest and the European first-level forest monitoring, investigations were carried out in 95 sampling sites of ICP Forest monitoring and, in 2011, for the purposes of this thesis, in additional 18 sampling sites within relatively poorly represented regions of this monitoring (Fig. 1).

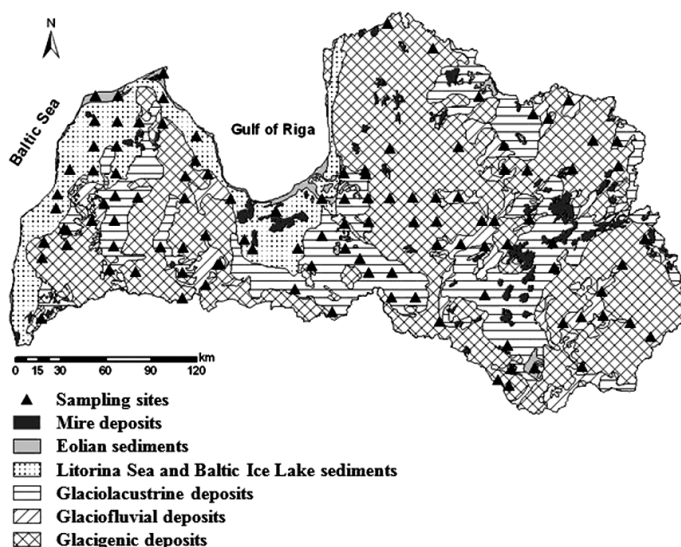


Figure 1. Location of sampling sites within this study and the Quaternary deposits in Latvia (after the Geological Map of Latvia, 1981)

Digging of the deep soil profiles and soil profile description according to the international WRB soil classification (IUSS Working Group WRB 2007) were performed in the sampling sites. The field works were carried out to determine the site topography and parent material: Quaternary deposits and pre-Quaternary sedimentary rock, the dominant tree species of the forest stand and forest site types in the sampling plots. The forest site types were described according to the Latvian forest ecosystem classification (Bušs, 1981). Land cover was described by using data from CORINE Land Cover 2005, which characterize the (bio)physical cover of the earth's surface at a scale of 1:100,000.

Soil samples were collected from genetic horizons of soil profiles, as well as according to the ICP forest monitoring methods from the following layers: O horizon, 0–10 cm, 10–20 cm, 20–40 cm, 40–80 cm (FSCC, 2006). Physical and chemical analyses of soil samples were performed according to the ICP forest monitoring methods (FSCC, 2006) in the Forest Environment Laboratory of the Forest Research Institute “Silava” and in the Latvian Environment, Geology and Meteorology Agency.

The following properties of soil samples were determined and used in the doctoral thesis:

- Soil texture (sand, silt, clay content, %);
- Total nitrogen content (g kg^{-1});
- Total organic carbon content (g kg^{-1});
- Active acidity $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$;
- Exchangeable cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) content (cmol kg^{-1});
- Exchangeable elements (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+}) content (cmol kg^{-1});
- Cation exchange capacity (cmol kg^{-1});
- Extractable elements (Ca, Mg, K, Na, Mn, P, Fe) content (mg kg^{-1}) in aqua regia solution;
- Extractable elements (Al, Fe) content (mg kg^{-1}) in acid ammonium oxalate solution;
- Carbonate content (g kg^{-1});
- Base saturation (%).

The data obtained in the Forest Environment laboratory of the Forest Research Institute “Silava” were validated according to the algorithms recommended by the ICP Forests and the minimal and maximal values of the relevant parameters (Clarke et al., 2008).

Data statistical analysis

A generalized linear model (GLM) analysis, using R 2.11.1 software, was carried out to investigate the correlations (the level of significance $p < 0.05$) between soil spatial distribution and parent material, topographical situation, land cover, soil texture, forest site types and tree species.

Variables occurring in less than three sampling sites were not included in the raw data selection.

Each type of factors was defined by the quantitative value of occurrence (0 – not observed, 1 – observed) in the sampling sites. Corrections of p -values were performed by Hommel's adjustment method.

Quantitative values (1-100%) of tree species in forest stands and soil texture were used to confirm the relationships between the spatial distribution of soils and Quaternary deposits.

Physical and chemical properties of mineral soils were included in the data statistical analysis; therefore, the *Histosols* soil group was excluded.

Statistical analysis for the following raw data was performed in the doctoral thesis: O horizons – 56 soil profiles; mineral topsoil (0-10 cm) and subsoil (40-80 cm) – 74 soil profiles. It was taken into account that the layers of 10-20 cm and 20-40 cm are affected by different soil-forming processes; therefore, attention in general was not focused on a detailed analysis and interpretation of the data of these layers.

It was established in the verification of data conformity for certain distribution types according to the Fisher criteria of dispersion that the data did not always correspond to the normal (according to Gaussian distribution); therefore, the parametrical and nonparametrical methods were used in the data statistical processing, which means that data sets were processed in appropriate cases – their average value, standard deviation and median value.

For the determination of statistically significant differences of the soil physical and chemical properties between selected geological deposits, soil groups and forest site types, normal distribution appropriation was performed by transformation into logarithms. Statistically significant ($p < 0.05$) differences were determined by means of the Tukey test in One-way analysis of variance (ANOVA), using SPSS PASW Statistics 18 software. Furthermore, taking into account that the selected data could have unequal dispersions in gradation classes, Dunnet's adjustment was used for the assessment of the average differences.

Correlations between geological deposits, soil groups, forest site types and soil texture in the topsoil layers (0-10 cm) and subsoil layer (40-80 cm) of the soil sampling sites (74) were determined through the principal component analysis of physical and chemical properties by using PC ORD 5.10 software.

A Monte Carlo test was used in determining the significance of the PCA axes. The Pearson correlation coefficients ($r > 0.50$) were determined between environmental factors and PCA scores of the samples.

1.2.2. Research of changes in soil properties in glacial deposits related to the afforestation of agricultural lands at a local scale

Field investigations and soil analyses

Field investigations were carried out in 2009 in the forest lands of different ages (25–200 years) in eight sampling sites, which were established in a forest site of the *Oxalidosa* type. The age of forest lands were determined by performing special investigation into the history of Spindulī forest (Lūkins, Nikodemus, 2011). The forested areas were surveyed on-site, determining the forest stand species and, using a Pressler's auger – the tree age. The forest site types were described according to the Latvian forest ecosystem classification (Bušs, 1981).

One soil profile was taken from extensively used grassland with a topography similar to the forest sampling sites. The location of the deep soil profile was chosen by prior soil augering.

Soil samples in agricultural and forest lands were collected from each soil horizon or layer in three repetitions, then forming an average sample. In total, 52 average soil samples were collected from the genetic horizons of nine soil profiles. Soil profiles in the sampling plots were described according to the international FAO WRB classification system (IUSS Working Group WRB, 2007). Furthermore, the genetic origin, composition and topography of geological deposits were determined in the sampling sites.

Air-dried mineral soil samples were sieved through a 2-mm sieve, and the organic materials were sieved through a 4-mm sieve. After preparation of the soil samples, their physical and chemical analyses (soil texture, ammonium oxalate extractable iron $[Fe_o]$ and aluminum $[Al_o]$, soil pH_{KCl} , total nitrogen $[N_{tot}]$ and phosphorus $[P_{tot}]$, calcium $[Ca_{tot}]$, magnesium $[Mg_{tot}]$, potassium $[K_{tot}]$) were conducted according to the FSCC (2006) methodology at the Faculty of Biology and the Faculty of Geography and Earth Sciences of the University of Latvia.

To determine the particle sizes, the samples were treated with 0.1 M NaOH to break down the aggregates. Sands were sieved and fractions finer than 0.05 mm were determined by pipette analysis (Van Reeuwijk, 1995). On the basis of the USDA soil texture classes, the fractions from 0.063 to 2.0 mm were classified as sand, those from 0.002 to 0.063 mm – as silt, and those finer than 0.002 mm – as clay (FSCC, 2006). Soil texture groups were determined by using a nomogram (Kārklīš, 2008).

The soil pH was measured with a glass electrode pH-meter WTW inoLab in 1 M KCl (1:2.5 mass-to-volume ratio). Amorphous iron (Fe_o) and aluminium (Al_o) were determined with 0.2 M acid ammonium oxalate solution at pH 3 (USDA 2004).

The total element (Ca, Mg, K) content as well as Fe_o and Al_o concentrations in the acid ammonium oxalate solution were determined using an atom absorption spectrophotometer Perkin-Elmer AAnalyst 200. The total N was estimated using the standard Kjeldahl method (ISO 11261), whereas the total P – using a spectrophotometer Zuzi 4210/20.

Humic substances were extracted from the soil with 0.1 N NaOH, with a solution/soil ratio of 10 : 1. The total organic carbon concentration (TOC, $mg\ L^{-1}$) was determined in 0.1M NaOH solution using a Shimadzu TOC-Vcsn analyser. The determined TOC ($mg\ L^{-1}$) was used to calculate the soil NaOH extractable organic carbon concentration (OC_{NaOH} , $mg\ g^{-1}$). Fluorescence spectra were recorded using a fluorescence spectrometer Perkin-Elmer LS755.

The organic matter humification index (I_{510}/I_{460}) was calculated as fluorescence intensity (I) ratio at 510 nm to 460 nm wavelength (Kalbitz et al. 1999).

Soil extracts (0.1M NaOH) were acidified with concentrated H_2SO_4 to $pH < 2$, the precipitated humic acids (HA) were removed by centrifugation. The concentration of fulvic acid (FA) was expressed as TOC ($mg\ L^{-1}$), measured with a total organic carbon analyser Shimadzu TOC – Vcsn.

Chemical analysis of the elements was carried out in triplicate. The laboratory results were considered acceptable when the difference between the values obtained was less than $\pm 5\%$.

Data statistical analysis

Statistical analyses (arithmetic mean values and standard deviations) were calculated separately for each parameter and each genetic horizon using Microsoft Excel 2007 software. One-way analysis of variance (ANOVA) was performed to determine whether there was a significant differentiation in the studied Ap horizon properties (pH_{KCl} , OC_{NaOH} , organic matter humification index I_{510}/I_{460} , $C_{\text{HA}}:C_{\text{FA}}$) between the agricultural and forest lands. After verification of the general hypothesis, detailed comparisons were made with the Tukey and Scheffe HSD post-hoc tests ($\alpha=0.05$). Calculations were performed using SPSS PASW Statistics 18 software.

The principal component analysis (PCA) with PC-ORD 5.0 software was carried out to investigate the correlations between the afforestation age (years) and the mean content of organic carbon, I_{510}/I_{460} and $C_{\text{HA}}:C_{\text{FA}}$ in the O and Ap horizons within 8 soil sampling sites. A Monte Carlo test was used testing determining the significance of PCA axes. Pearson's correlation coefficients (r) were determined between these factors and the PCA scores of the samples.

1.3. Results and discussion

1.3.1. Spatial inconstancy of forest soils and its influencing factors at a regional scale

In Latvia, forests are situated on soils of relatively high diversity, formed on different, mainly unconsolidated Quaternary deposits, in some places, also on weakly consolidated pre-Quaternary terrigenous or hard carbonate sedimentary rock.

Using generalized linear models, it was established that the prevalence of soil groups are closely linked to specific parent materials. A significant correlation ($p < 0.05$) of spatial distribution exists between the Baltic Ice Lake sediments and *Podzols*; glaciofluvial deposits, aeolian sediments and *Arenosols*; organic deposits and *Histosols*; and glacial deposits and *Cambisols*, *Luvisols* and *Albeluvisols*. *Gleysols* and *Planosols* are closely associated with glaciolacustrine deposits. Furthermore, the spatial distribution of *Stagnosols* is not linked to specific parent material, but they occur most frequently in glaciolacustrine and glacial deposits, where the parent material has a relatively heavy soil texture.

When specifying the main groups of particular soils and their prefix qualifier relationships with sampling sites in geological structures, a significant correlation ($p < 0.05$) to the Quaternary deposits was generally established for a part of the soil groups. For example, *Albic Arenosols* occur most frequently in aeolian dunes and glaciofluvial sand and gravel deposits. These parent materials of soil are characteristic with a relatively low cation exchange capacity ($\text{CEC}=2.8\text{--}10.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), which promotes the process of podzolization and development of the *Albic* horizon.

In spite of the fact that most soil groups (*Gleysols* and *Planosols*) are closely related to glaciolacustrine deposits, no significant correlation between these deposits and soil prefix qualifiers was established.

Although several forest site types were related to most soil groups, only in some cases there was a significant correlation ($p < 0.05$) between the spatial distributions of soil groups and forest site types, e.g. *Albeluvisols* and *Hylocomiosa*; *Arenosols* and *Vacciniosa*; *Stagnosols* and *Myrtilloso-polytrichosa*; *Gleysols* and *Mercurialiosa mel.* and *Myrtillosa mel.*; *Luvisols* and *Aegopodiosa*.

Cladinoso-callunosa and *Myrtillosa* are common only on *Arenosols* within the studied sampling sites. The spatial distribution of *Myrtilloso-polytrichosa* is close to significant correlation with *Cambisols*, while *Aegopodiosa* is near to a close correlation with *Stagnosols*. However, no significant correlation of certain forest site types with *Podzols* and *Planosols* was established, because it occurs relatively equally often within forest site types on dry and wet mineral soil and drained mineral soil.

The usage of the prefix qualifier of soil groups in data processing enabled to define more precisely significant spatial distribution correlations between some particular forest site types and soils.

The study results showed that, in general, the spatial distribution of forest site types is not determined by soil groups, except dry forest ecosystems, where *Cladinoso-callunosa*, *Vacciniosa* and *Myrtillosa* are closely related to *Arenosols*, *Hylocomiosa* to *Albeluvisols*, *Aegopodiosa* to *Luvisols*, and all of the investigated forest site types on wet and drained peat soil are related to *Histosols*. Assessing the correlation between the soil group prefix qualifiers and forest site types, in most cases within dry mineral soil, significant correlations between specific soil groups and *Vacciniosa*, *Myrtillosa* and *Aegopodiosa* were detected.

It was established that the distribution of the dominant tree species in a forest site stand is relatively less associated with a particular soil group compared to the forest site type and soil group occurrence. The dominant tree species in the forest stands of the forest ecosystems of Latvia, such as pine, spruce and birch, are found on all of the studied groups of soils.

The generalized linear model analysis revealed a significant correlation ($p < 0.05$) between pine stands and *Arenosols*, spruce stands and *Cambisols*, and oak stands and the *Luvisols* soil group.

Overall, the generalized linear model approach suggests that there are weak significant correlations between the spatial distribution of soil groups and topographical situation and land cover.

Quaternary deposits, their genetic origin and composition (granulometric and chemical) have the highest bearing on the spatial distribution of soil groups. In Latvia, soils with sandy soil texture are mainly related to the Baltic Ice Lake and Litorina Sea, aeolian sediments, and glacioaquatic (glaciofluvial and glaciolacustrine) deposits, where *Podzols* and *Arenosols* are the dominant soil groups. The age of Quaternary deposits also plays a significant role in the spatial distribution of these soils. Although *Podzols* in the Latvian forest ecosystems are present in relatively different types of deposits, they are more closely related with the Baltic Ice Lake sediments that are comparatively older (13,500-10,000 calendar years before present [cal yr BP]) (Gelumbauskaitė, 2009) than the Litorina Sea (8800-6600 cal yr BP) (Raukas, 1997; Saarse et al., 2006; Reintam et al., 2008) and aeolian sediments (Reintam et al., 2001).

Luvisols and *Albeluvisols* are closely related to free carbonates-containing glacial deposits. The illuvial accumulation of clay on the vertical macroaggregate surfaces of B horizons and formation of *Argic* diagnostic horizon were observed in these soils. The fundamental difference is the *Albeluvic tonguing* between both soil groups that developed over a time period of 4600-6200 years (Sauer et al., 2009).

In this case in Latvia, the age of soil formation could not be the limiting factor in the evolution of *Luvisols* and *Albeluvisols*, because the age of these soils in all the sampling sites of forest ecosystems that developed on glacial deposits exceeds 10,000 cal yr BP. The distribution of *Luvisols*, *Albeluvisols* and geological deposits is closely related to the mineral topsoil texture. Furthermore, *Albeluvisols* contain relatively more sand and less clay particles than *Luvisols*. The topsoil horizons are acidic and have a lower cation exchange capacity, which confirms that the decarbonization process is an important factor in the development of *Albeluvisols* (Kühn, 2003; Sauer et al., 2008).

The results of the doctoral thesis confirm L. Reintam's (2002) research results, i.e. that in Latvia, similarly to Estonia, the *Albic* horizon that can be formed as a result of leaching, podzolization or reductomorphic processes is characteristic of *Albeluvisols*. In the forest ecosystems of Latvia, a weakly expressed podzolization process that morphologically becomes apparent as the E horizon, which diagnostically mismatches the *Albic* horizon, is only occasionally observed in *Luvisols*.

Significant correlations ($p < 0.05$) between the spatial distribution of *Gleysols*, *Planosols* and glaciolacustrine deposits are determined by the soil texture and relatively flat topography. Relatively heavy soil texture (clay, silty clay, sandy clay loam) affects the development of seasonal reducing conditions and the *Stagnic* colour pattern within the soil profile.

Lithological discontinuity, which is the criterion for determination of *Planosols*, is characteristic of most of the glaciolacustrine deposits.

The forest soil research in Latvia showed that spatial distribution correlations do not always exist between forest site types, soil groups and prefix qualifiers according to the international FAO WRB soil classification. In forest ecosystems on dry mineral soil, *Cladinosa-callunosa*, *Vacciniosa* and *Myrtillosa* are closely related to the nutrient-poor *Arenosols*, while *Aegopodiosa* has a significant correlation to the nutrient-rich *Luvisols*, and the mesotrophic *Hylocomiosa* forest site type is related to *Albeluvisols*. Similar correlations were observed also in Estonia, where the soil texture and productivity determine the distribution of vegetation site types with which the nutrient-poor soils have a good correlation (Palo, 2005).

Forest site types on wet peat and drained peat soil are related to *Histosols*, because their determination criteria are similar. Assessing the correlation of the spatial distribution of soils with the forest stand composition and forest site types, one should take into account that forest stands are in different stages of succession formed due to the overgrowing of agricultural lands and clearings. As a result, a very different stand composition may develop on soils of the same kind (Ruskule et al., in press), and higher correlation develops only when ecosystems reach their climax stage. The planting of homogeneous spruce monocultures in the 1960s (Laiviņš, 1998), when, notwithstanding the soil texture and territory drainage, the Latvian forests were renewed by planting spruce, has an equally important effect on the disparity between soils and forest stand composition in Latvia.

The importance of the diversity of soil groups and prefix qualifiers is also reflected in the analysis of correlations between tree species, Land Cover 2005 classes and soil groups. It was established that with the generality increase of a vegetation characteristics unit (forest site type → dominant tree species in a forest stand → Land Cover 2005 class), a decrease in correlations between the characteristic types of vegetation and soil groups, and their prefix qualifiers was observed. It is possible that better correlations could be provided by improving the information on biotic environment.

1.3.2. Change of soil physical and chemical properties at a regional scale

The influence of geological deposits and soil texture

The results of the doctoral thesis showed that, in many cases, the soil texture of mineral topsoil and subsoil are statistically significantly different in the geological deposits of different genesis in forest soils in Latvia.

Statistically significant differences in the content of extractable elements (K, Mg, Mn), exchangeable elements (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}) and reactive elements (mainly Fe) of the deposits were detected. Statistically significant differences were not established in the soil pH_{KCl} value, extractable P and N content, and – interestingly – extractable Ca content.

In the Latvian forest ecosystems, soils with high clay and silt content are mainly characteristic of the glacial and also glaciolacustrine deposits. The principal component analysis of the physical and chemical properties of the mineral topsoil layer (Fig. 2a) shows that the soils of the aforementioned geological deposits are not homogeneous in comparison to other genetic types of geological deposits.

The high content of silt and clay particles is characteristic of the soils, and therefore also the higher cation exchange capacity, base saturation and $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. In the principal component analysis, the eolian, Baltic Ice Lake sediments and glaciofluvial deposits are characterised by low content of silt and clay, and also by low cation exchange capacity, base saturation and $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ value. Low dispersion is characteristic of the soils of these Quaternary deposits (Fig. 2).

The PCA shows that the heterogeneity of the most part of chemical properties of soils is related to soil texture which change depending on the geological deposits in the respective area. Besides, this heterogeneity is also due to soil formation processes. Significant correlations were not established for the content of C_{org} with respect to axis 1, which means that the content of organic carbon in topsoil is not related to the genesis of geological deposits. Tree species in forest stands and humification intensity determine the changes of organic carbon in the mineral topsoil (Vesterdal et al., 2008); at the same time, the humification intensity is indirectly related to soil texture.

In the PCA graph (Fig. 2b) of subsoil, one group of parameters is formed by $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, extractable Mg and Ca, as well as cation exchange capacity and base saturation, and another group – by the amount of silt and clay particles as well as extractable K, P and Fe. This result shows that, in spite of the fact that the concentrations of most chemical elements in the forest soils in Latvia, similarly as it is in Europe (De Vos, Cools, 2011), are related to clay and silt content in soil, the dispersion of their concentration could be affected by other factors as well.

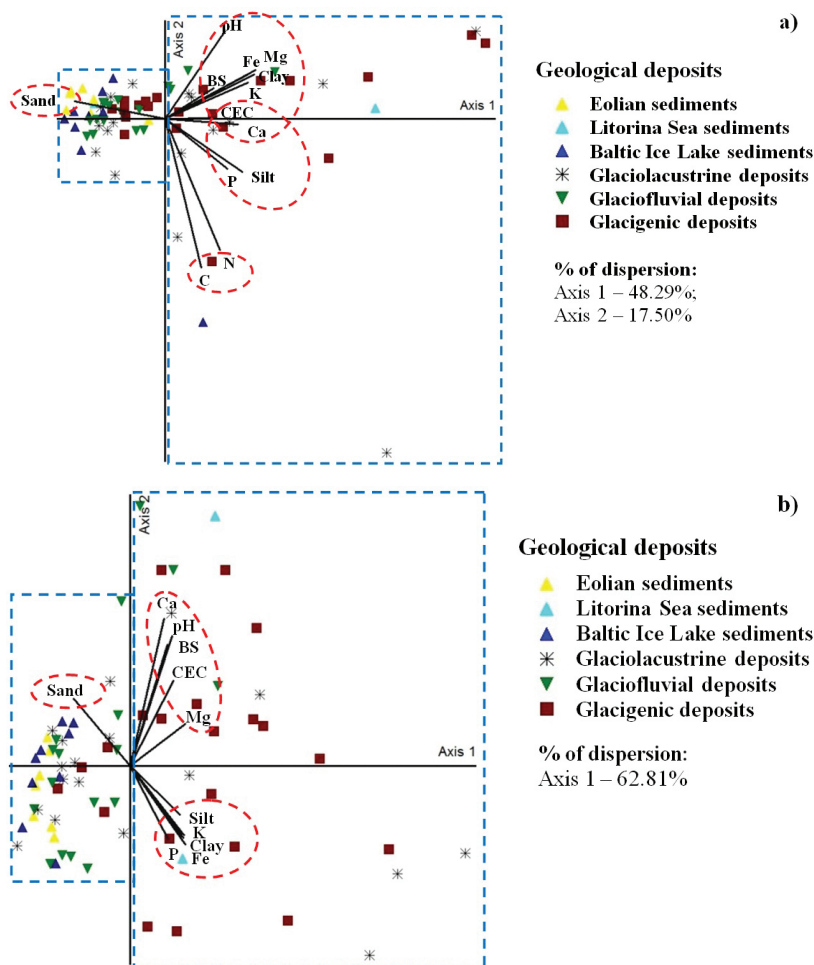


Figure 2. Distribution of the physical properties (soil texture [%]) and chemical properties (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ value; extractable elements [mg kg^{-1}] – Ca, Mg, K, P; N – total nitrogen [g kg^{-1}]; C – organic carbon [g kg^{-1}]; CEC – cation exchange capacity [cmol kg^{-1}]; BS – base saturation [%]) of the mineral topsoil (a) and subsoil (b) layers in the PCA axes depending on geological deposits

In the forest soils of Latvia, there is a significant ($R^2 > 0.48$) correlation between the concentration of extractable elements (Mg, Fe) and the content of clay and silt in subsoil (Fig. 3). The aforementioned extractable elements have a closer correlation with the content of clay particles (Fig. 3a, 3b) than with the content of silt particles (Fig. 3c, 3d). This could be explained by the fact that an important part of the macroelements are included in the crystalline lattice of clay minerals, thereby significantly increasing the concentration of elements in soil. Furthermore, an important aspect is that the minerals that form the silt and sand fraction have higher adsorption capacity than clay minerals (Barber, 1995).

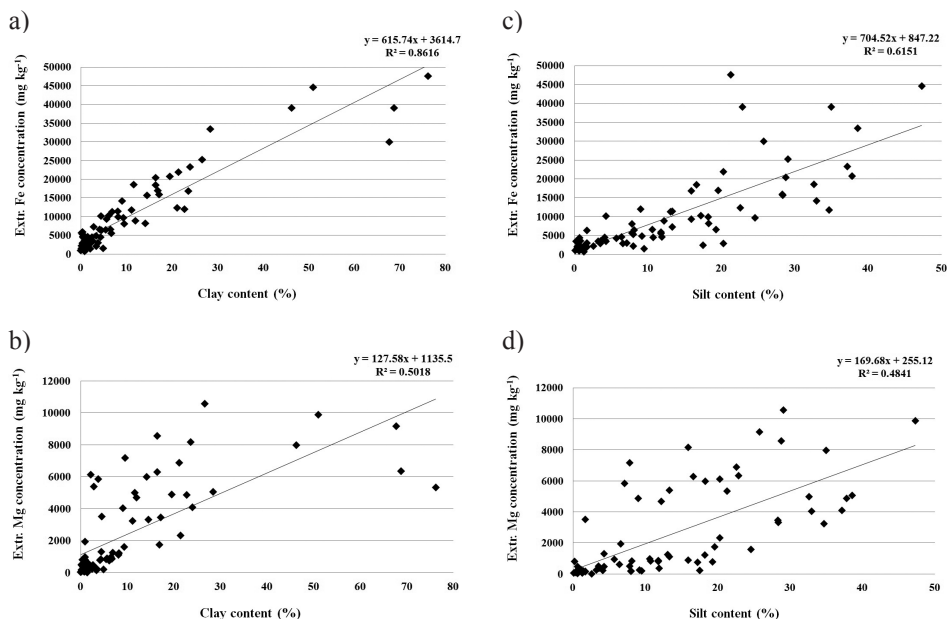


Figure 3. Extractable Fe and Mg concentration (mg kg⁻¹) depending on the content (%) of clay (a, b) and silt (c, d) particles in the soil 40–80-cm layer (the level of significance $p = 0.05$)

In general, the study results confirm that in Latvia, similarly to forest soils in Europe (Vanmechelen et al., 1997), the soil texture has crucial importance in the formation of chemical properties of forest soils. At the same time, individual parameters are affected by soil acidity, the amount and composition of organic matter, as well as soil-forming processes.

Forest stand and soil physical and chemical properties

The PCA results show that the cluster of soil sampling sites with relatively low dispersion in mineral topsoil layer is formed by *Cladinoso-callunosa*, *Vacciniosa*, *Myrtillosa*, *Hylocomiosa* and *Vaccinioso-sphagnosa* (Fig. 4a). Sandy deposits form the mineral topsoil layer in these forest site types, and this explains that the soils of these forest site types contain relatively less nutrients and have lower cation exchange capacity and base saturation.

More heterogeneous forest site types by their subsoil chemical and physical properties are *Oxalidosa*, *Myrtillosa mel.* and *Myrtilloso-polytrichosa*. The relatively high diversity of the soils of eutrophic forest site types is also the main cause why there were not established any statistically significant differences between the soils of forest site types.

Assessing the obtained results, a relevant issue is the location of the *Myrtillosa* forest site type in the group of soil fertility. Analyzing the PCA graph of subsoil (Fig. 4b) on the

basis of axis 1, which characterizes the soil fertility, it can be observed that *Myrtillosa* are in one group with the *Hylocomiosa* and *Vacciniosa* forest site types. Therefore, considering the obtained results, one can see that the border between the oligotrophic and mesotrophic forest site types in the classification by the fertility of Latvian forests is quite provisional. Simultaneously, the PCA results raise a question about the location of *Myrtillosa mel.* in the group of mesotrophic forest site types.

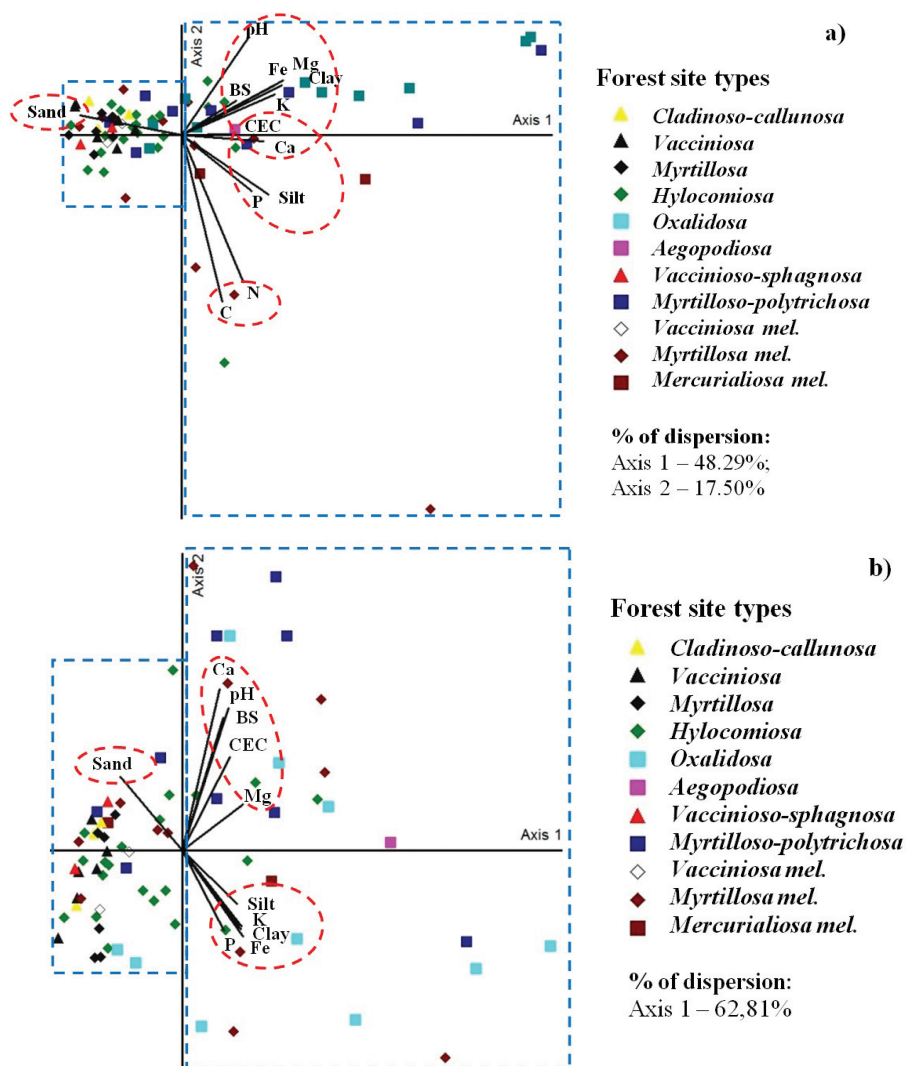


Figure 4. Distribution of physical (soil texture [%]) and chemical (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; extractable elements [mg kg^{-1}] – Ca, Mg, K, P; CEC – cation exchange capacity [cmol kg^{-1}]; BS – base saturation [%]) properties of the mineral topsoil layer (a) and subsoil (b) in the PCA axes depending on forest site types

Investigations within the framework of forest monitoring show that, judging by the soil properties, *Myrtillosa mel.* is closer to eutrophic forest site types, e.g. to *Oxalidos* and *Myrtilloso-polytrichosa*, than to forest site types.

Analyzing the distribution of soil sampling sites depending on geological deposits as well as soil groups in the PCA plane of coordinates (Fig. 5), it was established that the distribution of the dominant tree species in the forest stands is related to soil chemical properties mainly determined by soil texture.

Similar correlations between physical and chemical properties and tree species in the PCA were established in the subsoil layer and mineral topsoil layer. However, it is interesting that no significant ($r > 0,50$) correlation was established between the subsoil properties and the distribution of spruce. It can be explained with the topsoil roots system of spruce, as a result of which, the growth conditions of spruce stands are not substantially dependent on subsoil physical and chemical properties.

Furthermore, it can be concluded that the relatively low dispersion of sampling sites of soils is determined by the high content of sand particles. Consequently, the distribution of spruce is frequently connected to the *Podzols* and *Arenosols* soil groups (Fig. 5a) formed in eolian dunes, Baltic Ice Lake sediments and glaciofluvial deposits (Fig. 5a). At the same time, in relatively fertile areas, with the increase in the content of clay and silt particles, the high dispersion of soil profiles is related to spruce distribution mainly on the *Albehuvisols*, *Stagnosols* as well as *Luvisols* soil groups (Fig. 5a) that are formed in glacial deposits (glaciolacustrine and glacialogenic).

In the mineral topsoil layer, a relatively heavy soil texture (mainly loam in the topsoil) dominates. A relatively heavy soil texture, and thus higher base saturation, cation exchange capacity and more neutral soil reaction, is also characteristic of the distribution of birch (mainly loamy sand, sandy loam in the topsoil).

The study shows that soil texture mainly determines the distribution of the dominant tree species in the forest ecosystems of Latvia. For example, the distributions of spruce and birch are related to relatively fertile soils, where there is a higher content of clay and silt and a wider diapason of chemical properties. Furthermore, the distribution of pine is related to poorer soils and a low diapason of varieties of chemical properties.

Other investigations in Latvia confirm the aforementioned results, e.g. Bārdule et al. (2009) have found that close correlations exist between the dominant coniferous tree species (pine, spruce), site quality and clay content in the soil.

Thus it can be concluded that soil texture has the most essential role in the spatial distribution of mineral soils in Latvia as well as in the formation of soil chemical properties and determination of forest stand composition.

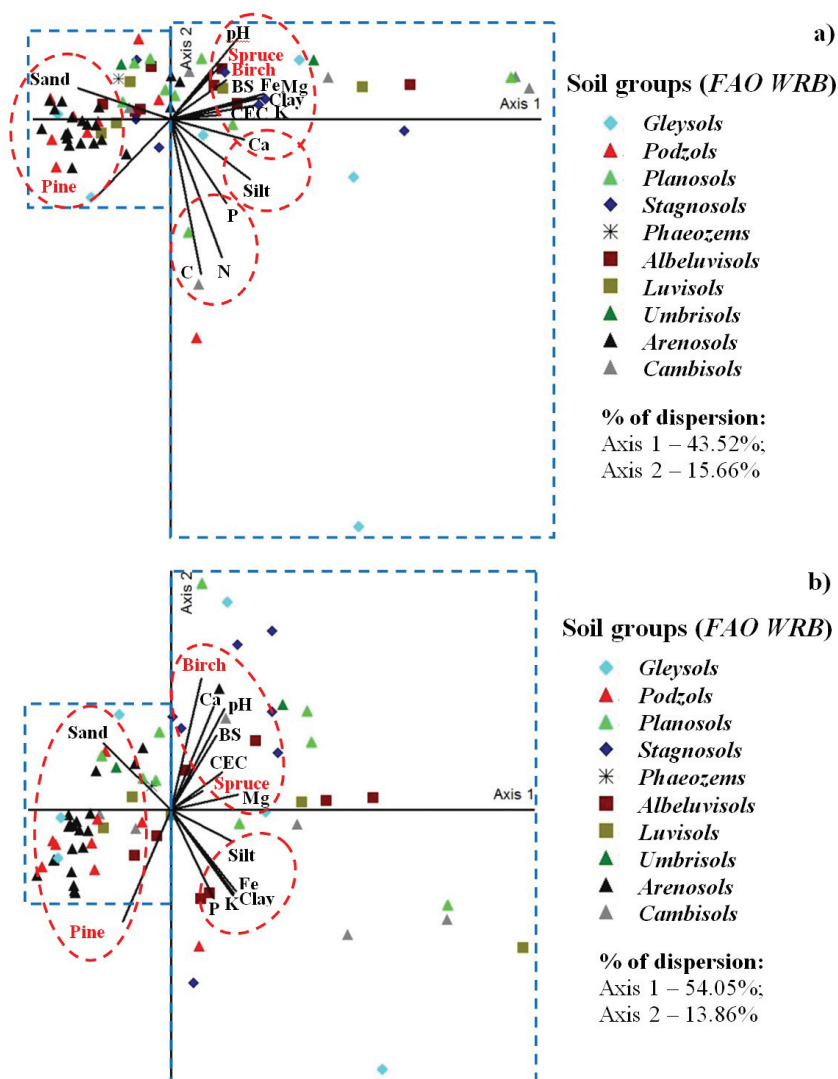


Figure 5. Distribution of the tree species (pine, spruce, birch [%]) dominant in the forest stands and the soil texture (%) and chemical properties (pH – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; CEC – cation exchange capacity [cmol kg^{-1}]; BS – base saturation [%]; extractable elements [mg kg^{-1}] - Fe, P, K, Ca, Mg) of the mineral topsoil layer (a) and subsoil (b) in the PCA axes depending on soil groups (FAO WRB)

1.3.3. Change of soil properties in glacial deposits following the afforestation of agricultural lands at a local scale

In the research, the changes in the soil profiles and morphological properties were observed depending on the age of forest lands. Ploughing (Ap) horizons (21–27 cm) were thicker in the soils of agricultural lands and in younger forest lands. However, the thickness of the Ap horizon in 150-year-old and in 200-year-old forest land is 6–18 cm. The expressed *Albic* (E) horizon was determined in the soils from 70-year-old and older forest lands, while only the E horizon properties were observed in the soils of younger forest lands and in agricultural land. The *Stagnic* properties were observed in all of the soil profiles.

Calcium carbonates were present in the studied soil profiles at a depth of 65–111 cm. It was established that the depth at which the carbonates are found does not depend on the forest land age, although this may affect soil formation.

The overall soil texture of the soil horizons in the studied soil profiles was relatively similar (Fig. 6). Sandy loam dominated in the top layer and in the 2nd soil profile, whereas loam dominated in the parent material. A higher clay particle content in the BE and EB horizons is indicative of the illuvial accumulation of clay and its formation in situ.

In older forest lands, compared with 25-year-old forest and agricultural lands, the mean value of pH_{KCl} is lower in the mineral soil surface horizon. Substantial differences in the mean pH_{KCl} values were not found among the mineral soil surface horizons of 70-, 150- and 200-year-old forest lands; also pH_{KCl} of the O horizon is not directly dependent on the age of forest land.

The investigation showed that the Fe_0 concentration in the soil Ap horizon is higher in grassland than in forest land. However, the forest land soil profiles had a relatively higher concentration of Fe_0 in the deeper horizons, including the secondary forming E and B horizons.

The highest value of Al_0 concentration in the agricultural soils and relatively recent forest lands was detected in the Ap horizon, while it decreased sharply in deeper horizons. However, the concentration of Al_0 in the deeper EB horizon of older forest land soils was as high as in the topsoil mineral horizons.

The afforestation of agricultural land affects the soil organic carbon content. The most part of organic carbon in forest soils accumulates in the O soil horizon, where the concentration is highest in all forest soil profiles. The organic C_{NaOH} concentration was highest in the top mineral soil horizons (Ap), especially in older forest lands. In comparison to agricultural lands, in the forest soils below the Ap horizon (in the EB horizon), organic carbon has leached there from the topsoil or accumulated from necroded roots or other organic materials.

The data show an increase in organic carbon in the period of 70 years from the beginning of afforestation. After this time, the concentration does not increase and becomes stable at 14.8–24.8 mg g⁻¹.

Obviously, OC_{NaOH} was higher in the O horizon than in the Ap horizon in all cases, and these differences were more pronounced in the relatively younger forest lands.

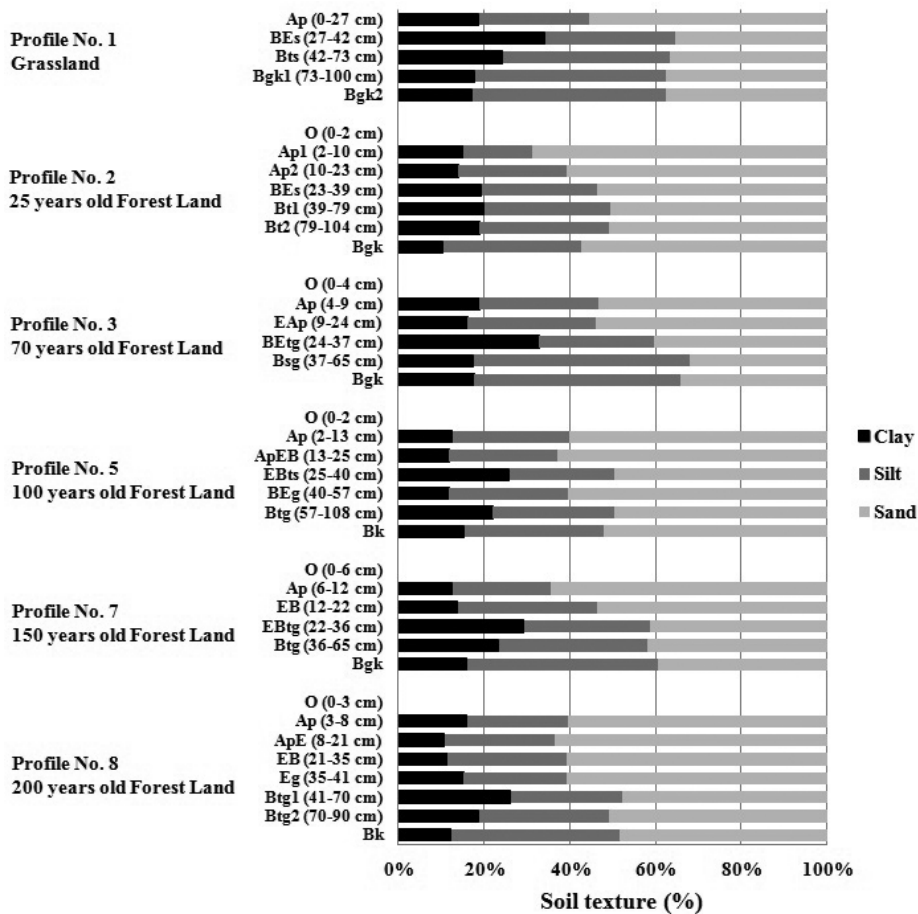


Figure 6. Soil texture in the soils of grassland and forest lands of different ages

The highest value of $C_{HA}:C_{FA}$ was found in the agricultural soil, while this parameter was relatively lower in the forest soils. Among the forest soils, humic acids were comparatively more concentrated in the agricultural lands that have been transformed relatively recently as well as in the 100-year-old forest land, where a relatively high I_{510}/I_{460} index was also found.

The principal component analysis shows the role of the mean content of organic carbon I_{510}/I_{460} , $C_{HA}:C_{FA}$ in the spatial distribution of the O and Ap horizons in 8 sampling plots according to afforestation age. The PCA results regarding the OC_{NaOH} mean content ($mg\ g^{-1}$) and I_{510}/I_{460} in the Ap horizons point to the development of humification process with the increase in the age of forest land, although this process is not directly related to the age of forest land and is possibly affected by other factors (e.g., tree species, canopy density, etc.).

The total N in the forest land soils that are older than 70 years was higher than in the extensively used grassland and 25-year-old forest land. This rule was observed not only in the Ap horizon but also in the deeper mineral horizons. However, the study results show that changes in the total N concentration in the O horizon and mineral topsoil are not directly related to the age of forest lands.

Studying the concentration of the total P in soils according to the age of forest lands, it was found that, in the forest lands older than 70 years, the total P concentration decreases in the E and EB horizons and increases in the deeper Bt horizon.

150 and 200 years old forest land soils had a relatively lower K_{tot} concentration in the Ap and ApE horizons in comparison with younger forest land and grassland soils. With the age increase of forest lands, the decrease of this parameter was observed in the ApE and other horizons located directly below the Ap horizon. The concentration of this parameter has not changed in the deeper mineral soil horizons after the afforestation of agricultural lands.

It was established in the study that the total Ca and Mg concentrations increase with depth, reaching $22,108 \pm 9797 \text{ mg kg}^{-1}$ and $9420 \pm 2754 \text{ mg kg}^{-1}$ in the parent material respectively. On the one hand, this fact indicates that these elements are carried from topsoil to deeper horizons due to the processes of decalcification and podzolization. On the other hand, the rapid increase of concentration shows the composition of soil parent material.

Soil formation is classically considered to be a slow process (Montagne et al., 2008). According to Targulian and Krasilnikov (2007), general knowledge allows a tentative grouping of pedogenic processes in terms of characteristic times into three main classes: rapid (10^1 – 10^2 years), medium-rate (10^3 – 10^4 years), and slow (10^5 – 10^6 years). Wilkinson et al. (2005) give 10^4 to 10^5 years as an average age for the development of soil profile. By contrast, the results of this study show that morphological changes in soil develop much faster in the boreal-nemoral zone.

The previously described differences in the thickness of the Ap horizon and preservation of the E horizon in older forest soils in the investigated sampling sites could be explained by the historical tillage and cultivation of soil. In Latvia until 1940, scarification of the upper layer of arable soils was performed only to a depth of 15 cm (Boruks, 2003), which resulted in an unaffected E horizon in the soils of glacial deposits. However, during the Soviet period, soils were ploughed up to 25 cm deep, which resulted in mixed E and Ap horizons (soil profiles 1 and 2). Therefore, the characteristics of the E horizon that had developed over a long period before afforestation remain in 100-, 150- and 200-year-old forest land soils (soil profiles 5, 7 and 8), whereas they are no longer visible in the soils that had also been cultivated in the Soviet period.

Secondary podzolization was detected in the soil profiles of older forest lands, being indicative of the eluviation process in the Ap horizon and accumulation of sesquioxides in the surface of the E horizon, forming a secondary EB horizon. Thus, I can agree with the previous studies (Mellor, 1985; Alexander, Burt, 1996; Stützer, 1998) suggesting that the morphological features of podzolization process are observable as early as within 100 years. This study shows that it is possible to detect in the boreal-nemoral zone the characteristics of the secondary B horizon (soil colour 7.5YR 3/4; 10YR 5/4), which has

formed above the primary E horizon, in soils that have formed on glacial deposits within 100 years after the afforestation of agricultural land.

Illuvial accumulation of clay on the vertical macroaggregate surfaces of B horizons was found in all of the studied soils. This is indicative of lessivage occurring during soil development. According to literature, lessivage usually takes place over a relatively long period. The results of the study by Sauer et al. (2008) show that *Albeluvic tonguing* develops within 4600 to 6200 years. The characteristics of the clay coatings suggest at least three different phases of clay illuviation, the youngest of which is most probably of an anthropogenic origin (Kühn, 2003). In this case, other scientists (Slager, Van de Wetering, 1977; Kwaad, Múcher, 1977) relate the formation of clay particles to the transformation of forest lands into agricultural lands. This transformation has also occurred in Latvia, including the investigation area, where charcoal in the Ap and deeper horizons of soils were discovered.

The results show an approximately uniform expression of *Albeluvic tonguing* in soil profiles independently of the last transformation of agricultural land into forest land. In the same time, conditionally to the age of forest land, the depth of illuvial accumulation of clay particles in soils is different, suggesting that the different use of land within the last 200 years could have affected the process of lessivage. The relatively low content of clay particles and the highest sand content, as well as a relatively thicker E horizon in the mineral topsoil of oldest forest lands can be explained not only by the lessivage process but also by mineral weathering taking place due to the action of complex organic acids of low molecular mass (Lundström, 1993). The aforementioned process occurs in the E horizon in particular (Lundström et al., 2000). The likelihood of more active occurrence of the aforementioned process after the afforestation of agricultural lands is also confirmed by the differences in ratios between the humic acids and fulvic acids in the Ap horizon between forest land and agricultural land.

With the increasing age of forest land, pH_{KCl} decreases not only in the Ap horizon but also in the deeper horizons. Concentration of Fe_o also determine the changes of pH_{KCl} value in soil (Smal, Olszewska, 2008). Therefore, on the one hand, the concentrations of Fe_o are higher in the Ap soil horizon in grassland and in the deeper EB and Btg horizons of older forest land soils. However, on the other hand, the higher concentration of Fe_o might indicate to the leaching of Fe^{3+} from the soil surface horizons as a result of podzolization.

A higher Al_o concentration in the soil surface horizons of woodland compared with agricultural land suggests that podzolization increases the Al_o concentration in the secondary illuvial horizons of the forest lands formed on former agricultural lands.

An important process occurring after the afforestation of agricultural lands is the formation of the O horizon. As shown by the results of the research, the thickness of the O horizon (2–6 cm) and the organic matter content on the nutrient-rich mineral layer do not change over an extended period. Although the concentration of OC_{NaOH} remains unchanged in the O horizon, in the Ap horizon, a rapid increase in this concentration (after the afforestation of agricultural land) is followed by a substantial decrease. This observation coincides with the results of other studies (Paul et al., 2002; Cerli et al., 2006) that explain the reduction in soil carbon after the planting of forests by an increase in the rate of mineralization of the organic matter accumulated in the soil, the quantity

and type of incoming carbon, as well as the need for nutrients by young forest plants. I agree with Cerli et al. (2008) that carbon in the A horizon becomes more mobile and starts to move to the deeper soil layers after the afforestation of agricultural land. This relationship has also been observed in soils developed on the glacial deposits of a relatively heavy soil texture.

The differences between the $P_{\text{tot.}}$ and $N_{\text{tot.}}$ concentrations in the O horizon of different forest stands are dependent on the composition of litter (Terauda, Nikodemus, 2006). The differences in chemical composition of the O horizon are also determined by different forest stands.

2. Conclusions

1. Geological deposits and their composition is one of the main factors that determine the occurrence of soil groups (according to the international FAO WRB soil classification) and also their physical and chemical properties. More diverse soils are characteristic of glacial, glaciolacustrine and glaciofluvial deposits. In the aspect of soil diversity, eolian dunes, where only *Arenosols* and *Podzols* are distributed, are more homogeneous. *Histosols* are distributed on organic deposits.
2. Dry mineral soil forest site types are distributed mainly on such soil groups as *Arenosols*, *Luvisols*, *Albeluvisols*, *Podzols*, *Planosols* and *Stagnosols*, and relatively less on *Cambisols*, *Phaeozems* and *Umbrisols*.
3. Wet mineral soil forest site types are distributed on *Stagnosols*, *Cambisols*, *Planosols*, *Gleysols*, *Podzols* and *Arenosols*. Furthermore, forest site types on drained mineral soils in many cases occur on the same soils. Forest site types on wet peat and drained peat soil are related to *Histosols*, as their determination criteria (thickness of the peat layer) are similar.
4. The usage of the prefix qualifiers of soil groups in data processing enabled to define more precisely the significant correlations between the spatial distributions of forest site types and soils. In most cases, significant correlations were found between soil groups and prefix qualifiers in dry mineral soil forest site types *Vacciniosa*, *Myrtillosa* and *Aegopodiosa*. This finding can be explained by the fact that the complex of prefix qualifiers of soil groups is used for characterizing one specific soil.
5. Increasing correlations of soil physical and chemical properties with the increase of depth confirms that the properties of soil are mainly dependent on the properties of its parent material that are determined by the composition of geological deposits. This can be explained with the occurrence of different soil-forming processes on the surface of forest soils in Latvia, e.g., accumulation of organic matter, leaching, eluviation, podzolization, decalcification, decarbonisation and gleization that are dependent on the geological structure and forming conditions of the territories, their composition, age of soil formation, actual and historical forest management, forest stands, their composition and other factors.
6. Distribution of geological deposits determine soil texture, which is one of the most important physical properties of soil that affects the chemical composition of soil parent material, e.g. content of extractable elements (Ca, K, Mg, Mn, Fe) and reactive Al and Fe, cation exchange capacity, base saturation, carbonate content, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ value.
7. Soil texture affects the distribution and development of tree species in forest stands in the Latvian forest ecosystems; however, forest stands do not have an influence on soil texture, instead affecting the surface soil formation processes and chemical composition, e.g. the amount of extractable elements (Ca, K, Mg, Mn, Fe), reactive Al and Fe, exchangeable cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}), as well as C_{org} and N_{tot} , $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ value, cation exchange capacity.

8. It was established that a decrease in correlations among the characteristic types of vegetation, soil groups and their prefix qualifiers was observed with the generality increase of a vegetation characteristics unit (forest site type → dominant tree species in a forest stand → Land Cover class). It is possible that better correlations could be obtained by improving the information on biotic environment.
9. Following the afforestation of agricultural lands, the development of podzolization process is observed, indicated by the morphological features of soil (development of secondary E and B horizon), decrease in pH_{KCl} value in the first 70 years after the afforestation of agricultural lands, changes in the content of reactive (amorphous) Al and Fe within soil horizons occur more rapidly than changes in soil diagnostic features and profile formation.
10. The afforestation of agricultural lands also affects the soil organic carbon content. In forest soils, the O horizon accumulates the most part of organic carbon. Thickness of the O horizon (*mull* and *moder* type) does not depend on the age of forest land, instead being affected by the dominant vegetation, as well as chemical composition of mineral topsoil in the investigated forest soils.
11. In general, following the afforestation of former agricultural lands on glacial deposits, in comparison to older forest lands, the occurrence of more intensive biological turnover of substances and delay of podzolization process is observed. It can be explained with the relatively high content of silt and clay particles that, in turn, is related to the relatively high pH_{KCl} value and amounts of total Ca, Mg and K in the soil parent material. Furthermore, the morphological features of agricultural land in soil profiles are preserved for up to 100 years after afforestation, although the *Albic* and *Spodic* horizons did not develop according to their diagnostic properties in the soil profile after 200 years.

Reference list

1. Alexander E.B., Burt R., 1996. Soil development on moraines of Mendenhall Glacier, southeast Alaska. 1. The moraines and soil morphology. *Geoderma*, 72, 1-17.
2. Barber S.A., 1995. Soil Nutrient Bioavailability. A mechanistic approach, 2nd ed. Wiley, New York, 414.
3. Bārdule A., Bāders E., Stola J., Lazdiņš A., 2009. Latvijas meža augšņu īpašību raksturojums demonstrācijas projekta BioSoil rezultātu skatījumā [Forest soil characteristic in Latvia according results of the demonstration project BioSoil]. *Mežzinātne*, 20(53), 105-124.
4. Boruks A., 2003. Zemnieks, zeme un zemkopība Latvijā no senākiem laikiem līdz mūsdienām. Otrais, pārstrādātais un papildinātais izdevums [Land, agriculture and peasantry in Latvia]. 2nd ed. Latvijas Lauksaimniecības Universitāte. 717.
5. Boruks A., Brīvkalns K., Salbovs R., 1967. Zeme un ražība [Land and Productivity]. Rīga, 223.
6. Boruks A., Eihmane V., Kalniņš G., Nikodemus O., Paršova V., Zālītis P., 2001. Zemes izmantošana un kadastrs Latvijā [Land use and the Cadaster in Latvia]. Rīga, LR Valsts zemes dienests, LLU Skrīveru zinātnes centrs, 408.
7. Boruks A., Kārklīšs A., Nikodemus O., 2002. Augsnes izpētes un zemes novērtējuma metodikas pilnveidošanas problēmas. Izstrādātas uz Skrīveru zinātnes centra bāzes [Soil Research and Problems in the Development of Land Valuation Methodology/ Work Carried out at the Skrīveri Center for Scientific Research]. Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Skrīveru zinātnes centrs, Latvijas Republikas Valsts zemes dienests. Skrīveri, 148.
8. Bušs K., 1981. Meža ekoloģija un tipoloģija [Forest ecology and taxonomy]. Rīga, Zinātne, 68.
9. Cerli C., Celi A., Kaiser K., Guggenberger G., Johansson M.B., Cignetti A., Zanini E., 2008. Changes in humic substances along an age sequence of Norway spruce stands planted on former agricultural land. *Org. Geochem.*, 39, 1269–1280.
10. Cerli C., Celi L., Johansson M.B., Kögel-Knabner I., Rosenqvist L., Zanini E., 2006. Soil organic matter changes in a spruce chronosequence on Swedish former agricultural soil: I. carbon and lignin dynamics. *Soil Sci.*, 171, 837–84.
11. Clarke N., Cools N., Derome J., Derome K., De Vos B., Fuerst A., 2008. Quality Assurance and Control in Laboratories, 55.
12. De Vos B., Cools N., 2011. Second European Forest Soil Condition Report. Volume I: Results of the BioSoil Soil Survey. INBO.R.2011.35. Research Institute for Nature and Forest, Brussel, 359.
13. FSCC (Forest Soil Co-Ordinating Centre), 2006. Manual IIIa: Sampling and Analysis of Soil. In: ICP Forests, 2006: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Hamburg. p 26. + annexes; Available: <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>; 1.08.2011.
14. Gelumbauskaitē L.Ž., 2009. Character of sea level changes in the subsiding south-eastern Baltic Sea during Late Quaternary. *Baltica*, 22 (1), 23-36.
15. Gilucis A., 2007. Mikro- un makroelementu saturs izplatības likumsakarības Latvijas augšņu virsējos horizontos [Relevancies of Content and Distribution of Trace and Major Elements in the Latvian Topsoils]. Promocijas darbs. Latvijas Universitāte. 139.
16. Gilucis A., Segliņš V., 2003. Latvijas ģeokīmijas atlants. Augšņu ģeokīmiskās kartes [Geochemical atlas of Latvia: Geochemical mapping of soil]. Rīga, Valsts ģeoloģijas dienests, 88.

17. Gray J.M., Humphreys G.S., Deckers J.A., 2009. Relationships in soil distribution as revealed by a global soil database. *Geoderma*, 150 (3/4), 309-323.
18. Hudson B.D., 1992. The soil survey as paradigm-based science. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 836-841.
19. IUSS Working Group, 2007. World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports 103. FAO, Rome. 103-116. Available: http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrb/doc/wrb2007_corr.pdf, 1.08.2011.
20. Jenny H., 1941. Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology. McGraw Hill Book Company, New York, NY, USA, 281.
21. Kalbitz K., Geyer W., Geyer S., 1999. Spectroscopic Properties of Dissolved Humic Substances – a Reflection of Land Use History in a Fen Area. *Biogeochemistry*, 47, 219–238.
22. Karklins A., 1997. Comparison of soil organic matter determination methods. In: Proceedings of the Latvia University of Agriculture, 11 (288), 9-13.
23. Karklins A., 2002. A comparative study of the Latvian soil Classification with WRB. In: Micheli E., Nactergaele F.O., Jones R.J.A., Montanarella L. (Eds.), *Soil Classification 2001. European Soil Bureau Research Report No. 7*, EUR 20398 EN, 199-204.
24. Karklins A., 2005. Soil information in Latvia. In: *Soil Resources of Europe*, second edition. Jones R.J.A., Houkova B., Bullock P., Montanarella L. (eds). European Soil Bureau Research Report No. 9, EUR 20559 EN, 420 p. Office for Official publications of the European Communities, Luxembourg, 201–209.
25. Kasparinskis R., Nikodemus O., 2012. Influence of Environmental Factors on Forest Soil Spatial Distribution and Diversity in Latvia. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 61(1), 48-64.
26. Kārklīņš A., 2008. Augsnis diagnostika un apraksts [Guidelines for soil diagnosis and description]. Latvijas Lauksaimniecības Universitāte, Jelgava, 336.
27. Krauklis Ā., Zariņa A., 2002. Parastais skābardis sava areāla ziemeļu robežas ainavā Latvijā [European Hornbeam in the Landscape of its Northern Distribution Limit in Latvia]. *Ģeogrāfiski raksti. Folia Geographica*, 10, 16-47.
28. Kronītis J., 1991. Latvijas valsts meža apsaimniekošana [Management of Latvian State Forests]. Meža gadagrāmata (J. Vanags red.), Rīga, Avots, 206.-213.
29. Kühn P., 2003. Micromorphology and late glacial/Holocene genesis of Luvisols in Mecklenburg - Vorpommern (NE – Germany). *Catena*, 54, 537–555.
30. Kwaad F.J.P.M., Múcher H.J., 1977. The evolution of soils and slope deposits in the Luxembourg Ardennes near Wiltz. *Geoderma*, 17, 1-37.
31. Laiviņš M., 1984. Latvijas PSR ezeru salu baltalkšņu mežu sabiedrības [Communities of grey alder forests in lakes islands of Latvia USSR]. *Mežsaimniecība un Mežrūpniecība*, 6, 23-27.
32. Laiviņš M., 1998. Latvijas boreālo priežu mežu sinantropizācija un eitrofikācija [Synantrophisation and eutrophisation of Latvian boreal pine forests]. *Latvijas veģetācija*, 1, 137.
33. Laiviņš M., 2000. Baltā skābarža (*Carpinus betulus* L.) audze Sventajas upes ielejā [Forest stands of grey alder (*Carpinus betulus* L.) in valley of Sventaja river]. *Grām.: Jauns gadsimts – jauna ģeogrāfija. Latvijas Ģeogrāfijas kongress*. Rīga, 33.-35.
34. Laiviņš M., 2001. Subkontinentālie priežu un ozolu meži Latvijā [Subcontinental pine and oak forests in Latvia]. Book of Abstracts. International Conference “Research and Conservation of Biological Diversity in Baltic Region”. April 26-28, 2001. Daugavpils, 55.
35. Laiviņš M., Sīpols M., Riekstiņa D., 1993. Reģionālais meža monitorings Latvijā [Forest regional monitoring]. Latvijas Vides aizsardzības komiteja, Pētījumu centrs. 149.

36. Latvijas ģeoloģiskā karte, mērogs 1:500 000, 1981. [The Geological map of Latvia, scale 1:500,000]. State Geological Survey. Available: kartes.geo.lu.lv; 1.08.2011.
37. Latvijas Statistika, 2010. Forestry-key indicators. Central Statistical Bureau of Latvia. Available: <http://www.csb.gov.lv/en/statistikas-temas/forestry-key-indicators-30729.html>; 1.08.2011.
38. Lazdiņš A., 2008. Meža monitoringa valsts programmas 2008. gadam uzdevumu izpilde [Implementation of forest monitoring state programme 2008 tasks]. Pārskats par Meža attīstības fonda atbalstīto pētījumu 66.
39. Lazdiņš A., 2011. Dabiski apmežojušos lauksaimniecības zemju efektīvas apsaimniekošanas nosacījumi [Preconditions for efficient management of naturally afforested farmlands]. Promocijas darba kopsavilkums. LLU, LVMI „Silava”, 50.
40. Lundström U.S., 1993. The role of organic acids in soil solution chemistry in a podzolized soil. *J. Soil Sci.*, 44, 121-133.
41. Lundström U.S., Van Breemen N., Bain D., 2000. The podzolization process. A review. *Geoderma*, 94 (2/4), 91-107.
42. Lūkins M., Nikodemus O., 2011. Meža masīva struktūras maiņa 20. gs. pauguraines ainavā Vidzemē [The Change of Forest Structure During the 20th Century. Case Study of Forest Tract in Vidzeme Hummocky Landscape]. *Acta Universitatis Latvensis. Earth Environ. Sci.*, 762, 7-25.
43. McBratney A.B., 1998. Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 50, 51-64.
44. McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117 (1-2), 3-52.
45. Mellor A., 1985. Soil chronosequences on Neoglacial moraine ridges, Jostedalsbreen and Jotunheimen, southern Norway: a quantitative pedogenic approach. In Arnett, R.R., Ellis S., Richards K.S. (eds.): *Geomorphology and Soils*. George, Allen and Unwin, London, 289-308.
46. Mežals G., 1980. Meža augsnes zinātne [Forest soil science]. Izdevniecība „Zvaigzne”. Rīga, 174.
47. Montagne D., Cornu S., Le Forestier L., Hardy M., Josière O., Caner L., Cousin I., 2008. Impact of drainage on soil-forming mechanisms in a French Albeluvisol: Input of mineralogical data in mass-balance modelling. *Geoderma*, 145, 426-438.
48. Nikodemus O., 2001. Augsnes pētniecība un izmantošana kadastra izveidē. Zemes izmantošana un kadastrs Latvijā (A. Boruks red.) [Soil research and use in formation of cadastre (A. Boruks ed.)]. LLU Skrīveru zinātnes centrs, LR Valsts Zemes dienests. 243.-257.
49. Nikodemus O., Kasparinskis R., Tabors G. 2008. Soil Mapping in Latvia According to the International FAO WRB 2006 Soil Classification. Problems and Solutions. *Vagos* 80 (33), 68-74.
50. Palo A., 2005. Relationships between landscape factors and vegetation site types: Case study from Saare County, Estonia. *Dissertationes Geographicae Universitatis Tartuens*, 114.
51. Paul K.I., Polglase P.J., Nyakuengama J.G., Khanna P.K., 2002. Change in Soil Carbon Following Afforestation. *Forest Ecol. Manag.*, 168, 241-257.
52. Phillips J.D., Marion D.A., 2005. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. *Geoderma*, 124, 73-89.
53. Raukas A., 1997. Evolution of the Baltic Sea. In: *Geology and Mineral Resources of Estonia* (Raukas, A., Teedumäe, A., eds). Estonian Academy Publishers, Tallinn, 268-274.
54. Reintam L., 2002. Correlation of the diagnostic properties of soil genetic units for harmonisation of soil map units. In: *Soil Classification 2001* (Micheli, E., Nachtergaele, F.O., Jones, R.J.A., Montanarella, L., eds). European Soil Bureau Research Report 7, EUR 20398 EN, 205-210. Available: http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/esb_rr/n07_ESBResRep07/505Reintam.pdf; 1.08.2011.

55. Reintam L., Moora T., Raukas A., 2008. Gleysols on sandy deposits of the Litorina Sea underlain by Histosol formations of Ancylus Lake age in western Estonia. *Est. J. Earth Sci.*, 57 (4), 231-240.
56. Reintam L., Raukas A., Kleesment A., Moora T., Kährik R., 2001. Podzolization in Aeolian sands underlain by Gleysol formation, during nine millennia in southwestern Estonia. *Proceedings of Estonian Academy of Science. Geology*, 50 (4), 254-281. Available: http://www.kirj.ee/public/va_ge/g50-4-4.pdf; 1.08.2011.
57. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinska Z., Kasparinskis R., Brumelis G., (In press). Patterns of afforestation on abandoned agriculture land in Latvia. *Agroforest Syst.*
58. Rūsiņa S., 2007. Latvijas mezofīto un kserofīto zālāju daudzveidība un kontaktsabiedrības [Diversity and contact communities of mesophytic and xerophytic grasslands in Latvia]. *Latvijas veģetācija*, 12, 366.
59. Saarse L., Vassiljev J., Miidel A., Niinemets E., 2006. Holocene buried organic sediments in Estonia. *Proceedings of Estonian Academy of Science. Geology*, 55 (4), 296-320. Pieejams: http://www.kirj.ee/public/va_ge/geo-2006-4-3.pdf; skatīts: 1.08.2011.
60. Salminen R., Gregorauskiene V., Tarvainen T., 2008. The normative mineralogy of 10 soil profiles in Fennoscandia and north-western Russia. *Appl. Geochem.*, 23, 3651-3665.
61. Sauer D., Schüllli-Maurer I., Sperstad R., Sorensen R., Stahr K., 2008. Podzol development with time in sandy beach deposits in southern Norway. *J. Plant Nutr. Soil Sc.*, 171, 483-497.
62. Sauer D., Schüllli-Maurer I., Sperstad R., Sorensen R., Stahr K., 2009. Albeluvisol development with time in loamy marine sediments of southern Norway. *Quatern. Int.*, 209 (1/2), 31-43.
63. Slager S., Van de Wetering H.T.J., 1977. Soil formation in archaeological pits and adjacent soils in southern Germany. *J. Archaeol. Sci.*, 4, 259-267.
64. Smal H., Olszewska M., 2008. The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus. *Plant Soil*, 305, 171-187.
65. Stützer A., 1998. Early stages of podzolisation in young aeolian sediments, western Jutland. *Catena*, 32, 115-129.
66. Targulian V.O., Krasilnikov P.V., 2007. Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena*, 71, 373-381.
67. Terauda E., Nikodemus O., 2006. Element input by litterfall to the soil in pine forest ecosystems. *Envir. Bioind.*, 1(2), 145-156.
68. Terauda E., Nikodemus O., 2007. Sulphate and nitrate in precipitation and soil water in pine forests in Latvia. *Water Air Soil Poll.*, 7, 77-84.
69. Tērauda E., 2008. Ķīmisko vielu plūsmas Latvijas priežu mežu ekosistēmās [Flows of Chemical Substances in Latvian Pine Forests Ecosystems]. *Promocijas darbs. Latvijas Universitāte*, 123.
70. USDA National Resources Conservation Service, 2004. *Survey Laboratory Methods Manual. Soil Investigations report N° 42* (4), 312-317.
71. Van Reeuwijk L.P., 1995. *Procedures for Soil Analysis*, 5th edition. Wageningen.
72. Vanmechelen L., Groenemans R., Van Ranst E., 1997. *Forest Soil Condition in Europe. Results of a Large-Scale Soil Survey. Technical Report. EC, UN/ECE, Ministry of the Flemish Community, Brussels, Geneva*. 259.
73. Vasiļevskis A., 2007. Latvijas Valsts Mežu Apsaimniekošana 1918-1940 [Management of state forests in Latvia]. Rīga: Nacionālais apgāds.
74. Vesterdal L., Schmidt I.K., Callesen I., Ola Nilsson L., Gundersen P., 2008. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest Ecol. Manag.*, 255(1), 35-48.

-
75. Wilkinson M.T., Chappell J., Humphreys G.S., Fifield K., Smith B., Hesse P., 2005. Soil production in heath and forest, Blue Mountains, Australia: influence of lithology and paleoclimate. *Earth Surf. Proc. Land.*, 30(8), 923-934.
 76. Zadeika I., 2005. Meža augšņu inventarizācija un bioloģiskās daudzveidības novērtēšana starptautiskā projekta „BIOSOIL” ietvaros [Inventory of forest soils and assessment of biodiversity under international project “BIOSOIL”]. Pārskats, Zemkopības Ministrijas Meža attīstības fonda pasūtītais pētījums. 82.
 77. Zadeika I., 2006. Meža augšņu inventarizācija un bioloģiskās daudzveidības novērtēšana starptautiskā projekta „BIOSOIL” ietvaros [Inventory of forest soils and assessment of biodiversity under international project “BIOSOIL”]. Pārskats, Zemkopības Ministrijas Meža attīstības fonda pasūtītais pētījums. 49.
 78. Zemes pārvaldības likuma koncepcija. Informatīvā daļa, 2010. [Land management law concept]. Ministru kabineta 2010. gada 19. aprīļa rīkojums Nr. 214.
 79. Лаивинш М., Гемсте И.К., 1977. Ординация почв острова Морицсала. Тезисы докладов V делегатского съезда Всесоюзного общества почвоведов. Минск, вып., 5, 227-228.
 80. Малдав З., 1977. Принципы составления карты почвообразующих пород Латвий. Почвенные ресурсы в сельскохозяйственном производстве Латвийской ССР. Труды ЛСХА выпуск 154. Министерство сельского Хозяйства СССР, Латвийская Сельскохозяйственная Академия. Елгава, 10.-14.

Acknowledgements

The dissertation was supported by the Science Council of Latvia Grants – No. 09.1118 „Landscape ecological assessment of the agricultural lands afforestation” and Grant No.09.1568 “Influence of geographical and geological processes on nature conditions and society in Latvia”; and European Social Fund Activity Programme Supplement 1.1.2.1.2. sub-activity ‘Support for Doctoral Studies implementation’ Project ‘Support for Doctoral Studies at University of Latvia’ (No. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004).

Essential meaning was to International project “Inventory of forest soils and assessment of forest biological diversity „BioSoil”” of the Focus Forest research programme of the International Co-operative Programme (ICP) and forest monitoring, the Forest Development Fund of the Ministry of Agriculture of Republic of Latvia and Forest Research Institute “Silava”; as well as to UNDP/GEF Project “Building Sustainable Capacity and Ownership to Implement UNCCD objectives in Latvia”; and the research project “Forestry adaptation to climate change” of the Forest Development Fund of the Ministry of Agriculture of Republic of Latvia and Forest Research Institute “Silava”.

I would like to express my gratitude to my supervisors – Dr. geogr., Professor Oļģerts Nikodemus and Dr. hab. chem., Professor Māris Kļaviņš whose encouragement, supervision and support from the preliminary to the concluding level enabled me to develop an understanding of the subject.

I would also like to thank all of those who supported me in any respect during the completion of the dissertation, especially – Dr. silv. Andis Lazdiņš, Dr. geol., Professor Vitālijs Zelčs, Dr. biol., Professor Viesturs Melecis, Dr. biol., Professor Guntis Brūmelis, Dr. biol., Guntis Tabors, Dr. biol., Didzis Elferts, Dr. chem., Linda Eglīte, MSc. biol., Lelde Grantiņa, Mg. sc mundi amb. Ingus Liepiņš, MSc. geogr., Mārtiņš Lūkins, laboratory assistant Konstantīns Viligurs, PhD student Imants Kukuļs, as well to Didzis Stalīdzāns, Nauris Rolavs, Jurijs Rakuts and Valts Vīndedzis. My research would not have been possible without their helps.

Finally, I would like to thank my family – Aina, Zane, Laura Līva and Ralfs Rūdolfs Kasparinskis as well as to Agris Briedis. They always supporting and encouraging me with their best wishes.