

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
ĢEOGRĀFIJAS UN ZEMES ZINĀTŅU FAKULTĀTE
VIDES ZINĀTNES NODAĻA

KOĢENERĀCIJAS STACIJU KOKSNES PELNU UN BIOOGLES
ĪPAŠĪBAS UN TO IZMANTOŠANAS IESPĒJU
LAUKSAIMNIECĪBĀ NOVĒRTĒJUMS

MAĢISTRA DARBS

Autors: **Edmunds Bērziņš**

Matrikulas Nr. eb11104

Darba vadītājs:

Dr. habil. chem., prof. Māris Kļaviņš

Zinātniskais konsultants:

Mg. env. sc. Karina Stankeviča

RĪGA 2017

ANOTĀCIJA

Biomases koģenerācijas sistēmas ir labs risinājums videi draudzīgākas enerģijas (siltuma un elektrības) ražošanā, tomēr biomasas sadedzināšanas rezultātā rodas ievērojams daudzums pelnu un bioogle, kas pārsvarā tiek apglabāti poligonos kā atkritumi.

Maģistra darba mērķis – analizēt biomasas koģenerācijas staciju koksnes vieglo pelnu un bioogles sastāvu, īpašības, tajā skaitā toksicitāti, ietekmi uz augu attīstību, kā arī izvērtēt izmantošanas iespējas lauksaimniecībā. Rezultāti liecina, ka vieglie pelni un bioogle, nepārsniedzot noteiktu koncentrācijas līmeni, veicina sēklu dīgtspēju, augu augšanu, biomasas pieaugumu un nodrošina labu sakņu attīstību. Tādējādi pelnus un bioogli ir iespējams lietderīgi izmantot lauksaimniecībā, tomēr jāizvērtē augsnes īpašības un augu specifika.

Maģistra darba apjoms ir 82 lapas; darbā iekļauti 25 attēli, 21 tabula un 4 pielikumi. Kopumā izmantoti 133 literatūras avoti.

Atslēgas vārdi: atjaunojamie energoresursi, biomasas koģenerācija, koksnes sadegšana, sēklu dīgtspēja, toksicitāte, lauksaimniecība.

ANNOTATION

Cogeneration system using biomass is a good solution for more environmentally friendly energy (heat and electricity) production. However, during this process, significant amount of biomass combustion residues such as ash and biochar are generated, and they are predominantly disposed in landfills as a waste.

The aim of the MSc thesis was to analyze the residues derived from biomass cogeneration plants, including wide analysis of wood combustion fly ash and biochar composition, properties, toxicity, impact on plant development, additionally assessing possibilities for its use in agriculture. Results indicated that wood fly ash and biochar in limits of certain concentration are stimulating seed germination, plant growth, increase of biomass and development of root system. Thus, ash and biochar are suitable for use in agriculture, however, soil properties and specifics of plant species should be evaluated.

The MSc thesis consist of 82 pages, contain 25 pictures, 21 tables and 4 appendices; 133 literature sources are used.

Keywords: renewable energy resources, biomass cogeneration, wood combustion, seed germination, toxicity, agriculture.

SATURS

ANOTĀCIJA.....	2
ANNOTATION.....	3
Ievads.....	6
1. LITERATŪRAS APSKATS	9
1.1. Atjaunojamo energoresursu un biomasas nozīme energosektorā.....	9
1.2. Atjaunojamo energoresursu izmantošana Latvijā.....	10
1.3. Siltuma un elektroenerģijas koģenerācija.....	12
1.3.1. Kurināmā koksne.....	16
1.3.2. Koksnes resursi Latvijā	20
1.4. Biomasas (koksnes) sadedzināšanas galaprodukti – pelni un bioogle	22
1.4.1. Koksnes pelnu un bioogles īpašības	24
1.5. Koksnes pelnu un bioogles ietekme uz dzīvajiem organismiem.....	26
1.6. Koksnes pelnu un bioogles izmantošanas iespējas.....	28
2. MATERIĀLI UN METODEDES.....	31
2.1. Izmantotie reaģenti un laboratorijas aprīkojums	31
2.2. Pelnu un bioogles paraugi.....	32
2.3. Vieglo pelnu un bioogles īpašību izpēte.....	33
2.3.1. pH un elektrovadītspējas noteikšana	33
2.3.2. Karsēšanas zudumu (LOI) noteikšana.....	34
2.3.3. Oglekļa, ūdeņraža, skābekļa un slāpekļa noteikšana.....	34
2.3.4. Biogēnu un apmaiņas elementu noteikšana.....	34
2.3.5. Elementu speciācijas analīze un kopējā elementu satura noteikšana	35
2.3.6. Policiklisko aromātisko ogļūdeņražu (PAO) noteikšana.....	36
2.4. Augu dīgspējas un augšanas testi	37
2.4.1. Testi ar ārstniecības klijģerīti un pļavas skareni, izmantojot bioogli	37
2.4.2. Testi ar pļavas skareni un īsausģu gurģi, izmantojot vieģlos pelņus	39
2.4.3. Testi ar mieģiem un kvieģiem, izmantojot vieģlos pelņus.....	40
2.5. Toksicitātes tests ar <i>Heterocypris incongruens</i>	41
2.6. Kvalitātes kontrole un datu apstrāde	44
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	45
3.1.1. Viegģlo pelņu pH vērtība, elektrovadītspēja un LOI	46
3.1.2. Viegģlo pelņu elementsastāvs	47
3.1.3. Biogēnu un apmaiņas elementu saturs vieģlajos pelņos un bioogģē.....	48
3.1.4. Elementu speciācijas analīze un kopģējais elementu saturs.....	50

3.1.5. Policiklisko aromātisko ogļūdeņražu saturs vieglajos pelnos	56
3.2. Koksnes vieglo pelnu un bioogles ietekme uz augu attīstību.....	56
3.2.1. Tests ar plāvas skareni un ārstniecības kliņģerīti, izmantojot bioogli.....	56
3.2.2. Tests ar plāvas skareni un gurķiem, izmantojot vieglos pelnus	58
3.2.3. Tests ar miežiem un kviešiem, izmantojot vieglos pelnus	61
3.3. Toksicitātes tests ar <i>Heterocypris incongruens</i>	63
3.4. Analizēto pelnu un bioogles izmantošanas iespēju lauksaimniecībā novērtējums.....	66
SECINĀJUMI	68
PATEICĪBAS	69
LITERATŪRAS AVOTI	70
PIELIKUMI.....	78

Ievads

Pieaugošais enerģijas patēriņš, ierobežotie fosilā kurināmā krājumi, kā arī vides piesārņojums rada aizvien lielāku interesi par atjaunojamo energoresursu (AER), tajā skaitā biomasas, izmantošanu enerģijas ražošanai. Pēc saražotās elektroenerģijas apjoma no AER biomasa (galvenokārt koksnes biomasa) ieņem otro vietu (15%) aiz hidroenerģijas (66%), aiz sevis atstājot biogāzi (14%) un vēja enerģiju (5%) (CSP, 2016). Latvijas koksnes biomasas izmantošanas potenciālu kopumā veicina tas, ka vairāk kā 50% valsts teritorijas aizņem meža zemes, to platība ir 2 965,2 tūkst. ha (Latvijas meža dienests, 2017).

Līdz 2020. gadam Latvija apņēmusies spert virkni soļu zaļākas un energoefektīvākas valsts virzienā, tostarp palielināt atjaunojamo energoresursu izmantošanu (Enerģētikas attīstības..., 2016). Liela nozīme šī procesa virzībā ir tieši vietējās izcelsmes kurināmās koksnes izmantošanai. Biomasas apkures sistēmas ir lielisks risinājums ne tikai 2020. gada un tālākiem mērķiem, bet, aprīkotas ar koģenerāciju, tās spētu palielināt arī valsts energoneatkarību, kuras nozīme ģeopolitiskajā kontekstā ir būtiska (Latvijas zaļās enerģijas..., 2011).

Ņemot vērā izvirzītos mērķus atjaunojamo energoresursu izmantošanā, koksnes izmantošana enerģijas ražošanā nākotnē palielināsies. Tomēr koksnes dedzināšanas rezultātā rodas pelni un bioogle, kas Latvijā tiek uzskatīti par rūpnieciskajiem atkritumiem (Noteikumi par atkritumu..., 2011; Prasības atkritumu sadedzināšanai..., 2011). Lielākoties pelni tiek deponēti izgāztuvēs, kas var radīt vides piesārņojumu un ir dārgs un neefektīvs atkritumu apsaimniekošanas veids.

Līdz ar to pasaulē un arī Latvijā aizvien aktuālāks kļūst jautājums par enerģijas ražošanas procesā radušos koksnes pelnu utilizēšanu. Koksnes pelnus un bioogli, kas arī veidojas biomasas sadedzināšanas rezultātā, var uzskatīt par vērtīgu izejvielu un tos var izmantot, piemēram, par līdzekli augšņu ielabošanā un bagātināšanā ar barības vielām (Pitman, 2006), ceļu būvniecībā (Obernberger & Supancic, 2009), būvniecības materiālu veidošanā un ēku būvniecībā (Anagnostopoulos & Stivanakis, 2009; Arslan & Baykal, 2006), kā sorbentu (Stefaniuk & Oleszczuk, 2016). Turklāt svarīgi ir arī atgriezt lauksaimniecības un mežsaimniecības darbu rezultātā zaudētās minerālvielas augsnē.

Gadu tūkstošiem augsnes auglības uzlabošanai tiek izmantoti dažādi dabiski mēslošanas līdzekļi, tajā skaitā koksnes pelni. Pētījumi par koksnes pelnu un bioogles izmantošanu kā mēslošanas līdzekli ir daudz un tas ir aktuāli visā pasaulē (Chirenje & Ma, 2002; Vance, 1996; Wallingford, 1980). Lai gan pēdējos gados Latvijā pētījumi par dabiskajiem mēslojumiem un to ietekmi tiek veikti, tomēr pētījumi par koksnes pelnu un bioogles ietekmi

uz dažādu kultūraugu augšanu, floru un faunu ir salīdzinoši maz (Lazdina *et al.*, 2011; Lazdiņš, 2014; Rancāne u.c., 2013; Šipkovs, 2012).

Hipotēze – koģenerācijas staciju koksnes pelni un bioogle ir nozīmīgs resurss augsnes ielabošanai un augu augšanas stimulēšanai.

Darba mērķis – analizēt koģenerācijas staciju koksnes sadedzināšanas atlikumu – vieglo pelnu un bioogles sastāvu, īpašības, tajā skaitā toksicitāti, ietekmi uz augu attīstību un izmantošanas iespējas lauksaimniecībā.

Mērķa sasniegšanai ir izvirzīti šādi **uzdevumi**:

- sniegt pārskatu par koksnes pelniem, bioogli, to izmantošanas iespējām;
- izpētīt biomasas koģenerācijas staciju vieglo pelnu un bioogles ķīmiskās un fizikālās īpašības;
- veikt eksperimentālos pētījumus pelnu un bioogles pielietojumam augu augšanas stimulēšanai;
- novērtēt pelnu toksicitāti;
- izvērtēt pelnu un bioogles izmantošanas iespējas lauksaimniecībā.

Rezultātu aprobācija

Stankeviča, K., Vinceviča-Gaile, Z., **Berzins, E.**, Trubaca-Boginska, A., Klavins, M. 2017. Composition of wood combustion fly ash and its effects on seed germination of *Calendula officinalis* and growing of *Poa pratensis*. Sagatavots iesniegšanai zinātniskajā žurnālā *Agronomy Research*.

Bērziņš, E., Stankeviča, K., Vincēviča-Gaile, Z., Kļaviņš, M. 2017. Koksnes bioogles ietekme uz ārstniecības klingerītes *Calendula officinalis* sēklu dīgtspēju un pļavas skarenes *Poa pratensis* augšanu. *Latvijas Universitātes 75. zinātniskā konference. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne: Referātu tēzes*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 345–348.

Obuka, V., Stankeviča, K., Celma, S., **Bērziņš, E.** 2017. Sapropelis – no izpētes līdz pielietojumam. *Latvijas Universitātes 75. zinātniskā konference. Kūdra un sapropelis – ražošanas, zinātnes un vides sinerģija resursu efektīvas izmantošanas kontekstā. Rakstu krājums*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 125–132.

Vincēviča-Gaile, Z., **Bērziņš, E.**, Kļaviņš, M. Stankeviča, K. 2017. Šķeldas kurināmā pelnu sastāva analīze un izmantošanas iespējas. Seminārs „Atkritumi kā kurināmais līdzsadedzināšanas tehnoloģijās”. Rīga, LU Dabaszinātņu centrs, 25.05.2017.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Atjaunojamo energoresursu un biomasas nozīme energosektorā

Bez siltumenerģijas un elektroenerģijas nav iedomājama ikdiena mājās, darbā, atpūtā, ražošanā. Enerģijas ražošanā izmantoto fosilo energoresursu krājumi pasaulē ir pietiekami pārskatāmai nākotnei, taču tiem ir neatgriezeniska tendence izsīkt. Tālākā nākotnē ekonomiski pieejamie dabasgāzes un naftas resursi var piedzīvot būtisku samazinājumu, izraisot strauju šo resursu sadārdzinājumu. Enerģētika iespaido jebkuras valsts un sabiedrības funkcionēšanu ikdienā un tas ir vēl jo vairāk aktuāli valstīm, kurām pašām savu fosilo resursu (ogles, nafta, gāze, degslāneklis u.c.) vai atjaunojamo energoresursu (koksne, lauksaimniecības biomasas, vējš, saule, hidroresursi u.c.) izmantošanas iespējas ir ierobežotas (Enerģētika Latvijā, 2017).

Iespējamais risinājums, kas tuvākajās desmitgadēs uzskatāms par labu alternatīvu, bet ne fosilo resursu aizstājošu, ir atjaunojamo energoresursu (AER) izmantošana elektroenerģijas un siltuma ražošanā. Par atjaunojamajiem energoresursiem uzskata vēju, ūdeni, saules starojumu, biomasu (koksni, salmus, biogāzi, biodeģvielu), zemes siltumu, viļņus, kā arī paisuma-bēguma procesus. Atjaunojamie energoresursi var tikt izmantoti tieši vai arī pastarpināti, piemēram, no biomasas iegūstot degvielu transportam un cita veida šķidro kurināmo (Enerģētika Latvijā, 2017).

Mūsdienu enerģētikas sektorā, aizvien intensīvāk tiek izmantota biomasas kā siltuma, elektrības un degvielas izejviela, aizvietojojot fosilos enerģijas resursus (akmeņogles, jēlnafts, kūdra) (McKendry, 2002; Nunes *et al.*, 2014; Obernberger & Supancic, 2009). Biomasas ir bijusi pirmais un galvenais enerģijas avots, un vēl joprojām tiek lēsts, ka tā nodrošina ap 10 - 14% no enerģijas apgādes visā pasaulē (Masto *et al.*, 2015; McKendry, 2002).

Galvenie iemesli biomasas izmantošanas pieaugumam enerģijas ražošanā ir (Directive 2010/31/EU, 2010; Directive 2009/28/EK, 2009; Europe 2020 Strategy, 2014; European Commission Climate Action, 2017; Nunes *et al.*, 2014; Obernberger & Supancic, 2009):

- a) nepieciešamība samazināt siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijas, aizvietojojot fosilos kurināmos ar SEG-neitrāliem kurināmajiem;
- b) ilgtspējīga rūpniecības un ražošanas atlikumu izmantošana (atkritumi, kas radušies no ēdināšanas un lopbarības ražošanas industrijas, lauksaimniecības, mežsaimniecības u.c.) saskaņā ar koncepciju "atkritumi – enerģija";
- c) politiski mērķi, kā, piemēram, valsts energoneatkarības palielināšana u.c.;
- d) citi mērķi, tostarp jautājumi par ilgtspējīgu vietējo pieejamo resursu izmantošanu un citi.

Tas, vai siltuma un elektroenerģijas ražošanu, izmantojot biomasu, konkrētajā reģionā ir iespējams izmantot, galvenokārt ir atkarīgs no koksnes, lauksaimniecības materiālu un enerģētisko kultūru sastopamības apkārtējā teritorijā vai transportēšanas izmaksām (Trybalski *et al.*, 2014).

Eiropas Savienības (ES) enerģētikas politikas mērķis ir virzīties uz ilgtspējīgās un zaļās enerģētikas attīstību, tādēļ atjaunojamo enerģijas resursu apzināšana, izpēte un izmantošana ir svarīga visām ES dalībvalstīm, kā arī citām valstīm ar spēcīgu lauksaimniecības un mežsaimniecības sektoru. ES tendence fosilo kurināmo nomaīņai ar atjaunojamās enerģijas resursiem, ieskaitot biomasu, ir definēta ES Klimata Stratēģijā: 2020 Klimata un Enerģētikas paketē; 2030 Klimata un Enerģētikas Direktīvā un 2050 Zemu oglekļa emisiju ekonomikā (European Commission Climate Action, 2017). ES ir nospraudusi mērķus (Enerģētikas ceļvedis 2050, 2011; Europe 2020 Strategy, 2014):

- samazināt CO₂ emisijas par 20% (salīdzinot ar 1990. gadu) līdz 2020. gadam;
- palielināt AER izmantošanu par 20% līdz 2020. gadam;
- samazināt CO₂ emisijas par 80% (salīdzinot ar 1990. gadu) līdz 2050. gadam;
- sasniegt AER īpatsvaru enerģijas bruto galapatēriņā 75% apjomā un AER īpatsvaru elektroenerģijas patēriņā 97% apjomā līdz 2050. gadam.

1.2. Atjaunojamo energoresursu izmantošana Latvijā

Latvijas situāciju raksturo nelielais enerģētikas tirgus un nepietiekami primārie vietējie energoresursi Latvijas patēriņa noseigšanai. Enerģētikas nozari ietekmē arī īslaicīgais ekonomiskās attīstības apjoma samazinājums un iedzīvotāju skaita izmaiņas (pirms ekonomiskās krīzes 2008. gadā 2,2 miljoni un 2 miljoni 2011. gadā) (CSP, 2017a; Enerģētikas stratēģija 2030).

Augstākā līmeņa attīstības plānošanas dokuments „Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģija līdz 2030. gadam” nosaka mērķi nodrošināt valsts enerģētisko neatkarību, palielinot energoresursu pašnodrošinājumu un integrējoties ES enerģijas tīklos (Latvijas ilgtspējīgas attīstības..., 2010).

Enerģētikas nozares un arī enerģētikas politikas attīstību jāaplūko ne tikai nacionālā, bet arī Baltijas valstu un Baltijas jūras reģiona kontekstā. Būtiskus infrastruktūras projektus nav iespējams attīstīt bez vairāku reģiona valstu iesaistīšanās. Tā, piemēram, Baltijas enerģijas tirgus starpsavienojumu plāna (angļu val. *Baltic Energy Market Interconnection Plan*) īstenošanai nepieciešama sadarbība gan starp Baltijas valstīm savā starpā, gan starp Baltijas valstīm un Skandināvijas valstīm, kā arī Poliju. Arī enerģijas tirgus problēmas (mazs tirgus

apjoms, maz dalībnieku, vāja konkurence) nav iespējams efektīvi risināt nesaistīti ar norisēm kaimiņvalstīs (Baltic Energy Market..., 2017).

Latvijā atjaunojamie resursi ieņem nozīmīgu vietu primāro energoresursu bilanci. Galvenie resursi, kas plaši tiek izmantoti ir hidroresursi, koksne un vēja enerģija, citi energoresursi tiek izmantoti mazākā apjomā (Enerģētikas stratēģija 2030, 2010). Atjaunojamo resursu daļa primāro energoresursu piegādē ir pieaugusi no 13,1% 1990. gadā līdz 38,7% 2014. gadā (ES – vidēji 16%). Latvijā ir otrs augstākais AER īpatsvars energoresursu patēriņā ES (Centrālā statistikas pārvalde, 2017; Enerģētikas stratēģija 2030, 2010). Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2009/28/EK par atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanu nosaka, ka no AER saražotās enerģijas īpatsvaram enerģijas bruto galapatēriņā 2020. gadā ir jābūt 40% (Padomes Direktīva 2008/50/EK, 2008), kas Latvijas gadījumā ir reāls, sasniedzams mērķis, turklāt būtisku pieauguma daļu šeit var dot jaunu biomasas koģenerācijas staciju izveide un esošo staciju jaudas kāpināšana.

Centrālās statistikas pārvaldes dati uzrāda pieaugošu tendenci saražotās elektroenerģijas (GWh) no atjaunojamajiem energoresursiem ražošanā (1.1. tabula). Būtiska loma šeit ir arī biomasas koģenerācijas stacijām, veidojot gandrīz 12% no saražotās atjaunojamās elektroenerģijas 2015. gadā.

1.1. tabula

**Saražotā elektroenerģija (GWh) no atjaunojamajiem energoresursiem Latvijā
2008. - 2015. gadā (izstrādājis autors, izmantojot CSP, 2017a)**

Gads	Hidroelektro- stacijas	Vēja elektro- stacijas	Biomasas koģenerācijas stacijas	Biogāzes koģenerācijas stacijas	Atkritumu poligonu gāzes	Notekūdeņu dūņu gāzes koģenerāci- jas stacijas
2008	3 109	59	5	40	31	9
2009	3 457	50	4	44	35	9
2010	3 520	49	9	57	46	11
2011	2 887	71	13	105	94	11
2012	3 707	114	65	223	212	11
2013	2 912	120	215	288	278	10
2014	1 993	141	319	350	340	10
2015	1 860	147	378	392	382	10

Atjaunojamo energoresursu izmantošanai siltumapgādē, elektroenerģijas ražošanā un transportā ir iespējas labvēlīgi ietekmēt Latvijas tautsaimniecības attīstību, paaugstināt energoapgādes drošību, samazinot atkarību no importa, veicināt tehnoloģiju apgūšanu un reģionālo attīstību. Efektīva zaļās enerģijas ražošana var veicināt energoapgādes drošības un siltumnīcefekta gāzu samazināšanas mērķu sasniegšanu.

Biomases izmantošana kombinācijā ar vēja enerģiju, iespējams, arī kombinācijā ar dabas gāzi un CO₂ piesaisti un uzglabāšanu ir pati nozīmīgākā zaļajā energoplānā. Ilgtermiņā biomasas izmantošana jebkurā avotā un it īpaši lielās koģenerācijas stacijās (virs 20 MWe) varētu samazināt fosilo kurināmo izmantošanu un veicināt valsts enerģētisko neatkarību (Latvijas zaļās enerģijas..., 2011).

1.3. Siltuma un elektroenerģijas koģenerācija

Viens no enerģijas ražošanas veidiem ir siltuma un elektroenerģijas koģenerācija. Koģenerācija ir tehnoloģisks process, kurā notiek vienlaicīga elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošana vienotā termodinamiskā ciklā, pielietojot vienu kurināmā veidu. Šo procesu sauc arī par kombinēto siltuma un elektroenerģijas ražošanu (Greener-energy, 2017).

Koģenerācija ir efektīvāks un videi draudzīgāks process salīdzinājumā ar enerģijas ražošanu atsevišķos procesos – katlumājā un kondensācijas stacijā. Augstākā koģenerācijas efektivitāte ir dabasgāzes sadegšanas procesā, mazāka, izmantojot atjaunojamus energoresursus, bet kopumā no resursu optimālas izmantošanas viedokļa koģenerācija ir izdevīgs to izmantošanas veids. No komerciālā viedokļa siltuma un/vai elektroenerģijas ražotājs ir ieinteresēts iespējami efektīvākā koģenerācijas procesā (Enerģētika Latvijā, 2017).

Biomases koģenerācija kļūst aizvien aktuālāka gan visā pasaulē, gan arī Baltijas valstīs pateicoties iespējai izmantot dažāda veida samērā viegli iegūstamu biomasu, piemēram, lauksaimniecības un mežsaimniecības atlikumus vai kultivētu augu biomasu (McKendry, 2002; Vassilev *et al.*, 2010). Mūsdienās, biomasas enerģija veido apmēram 14% no pasaules enerģijas patēriņa (Odlare & Pell, 2009). Baltijas valstīs visvairāk izmantotā biomasas enerģijas ražošanai ir koksne un/vai koksnes atliekas un/vai mežsaimniecības blakusprodukti – šie materiāli ir lēti un pieejami lielā daudzumā (Final Cogeneration Roadmap, 2014).

Koģenerācijas priekšrocības (Greener-energy, 2017; HoSt, 2017):

- efektīvāks kurināmā izmantojums;
- samazināts izmešu daudzums (CO₂);
- zemākas enerģijas ražošanas izmaksas;
- lētākas enerģijas piedāvājums patērētājiem;
- mazāki pārvades zudumi decentralizētā sistēmā;
- vietējā kurināmā izmantošanas gadījumā tiek veicināta reģionālā attīstība;
- plašas kurināmā izvēles iespējas;
- samērā īss iekārtu atmaksāšanās laiks.

Koģenerācija vienlaicīgi apmierina prasības pēc vairākiem enerģijas veidiem, un tā ir izmantojama gandrīz jebkurā ražošanas, pārstrādes vai komunālo pakalpojumu nozarē. Kombinētā siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošana ir ļoti piemērota maza mēroga lietojumam. Tā var tikt izmantota, lai nodrošinātu gan telpu apkuri, gan karstā ūdens padevi individuālām ēkām vai ēku grupām. Saražotā elektroenerģija var tikt nodota arī sadales tīklā. Siltumu var pārvērst aukstumā, tā kā vasarā lieko siltumu var izmantot kondicionēšanas sistēmās, vai cauru gadu refrižeratoru sistēmās, ledus hallēs, saldēšanas kamerās utt. (Greener-energy, 2017; Kubica *et al.*, 2007).

Biomazas sadedzināšanai siltuma un elektroenerģijas ražošanā ir arī problemātiskās puses (Trybalski *et al.*, 2014):

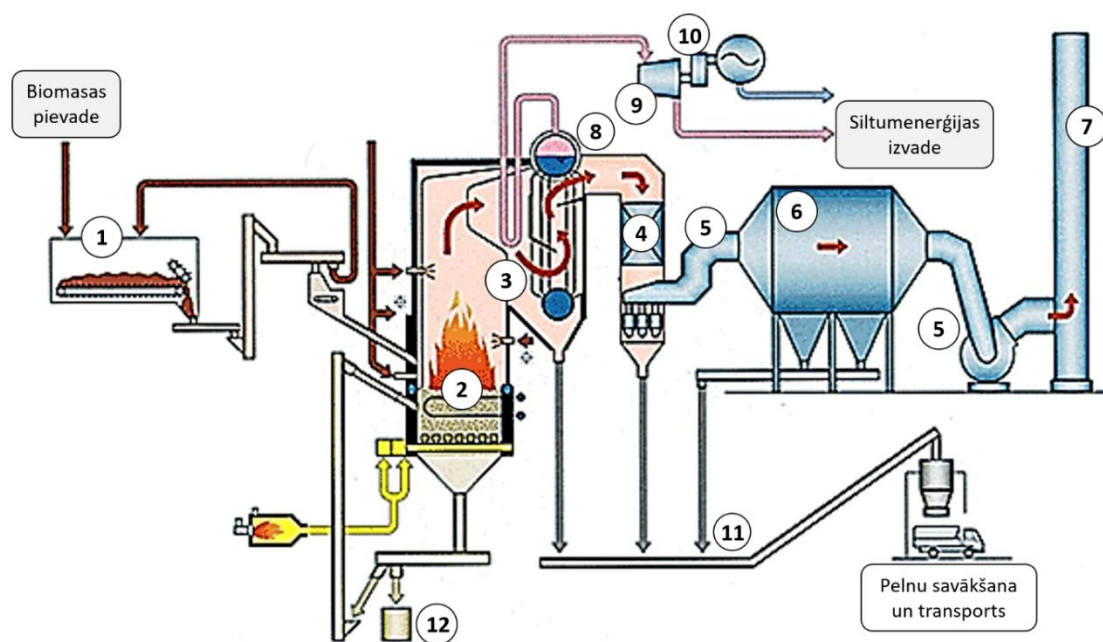
- daudz izdedžu un atkritumu (pelni);
- apkures katlu virsmu korozija (regulāra apkope, maiņa);
- atšķirīgs biomasas mitruma saturs (jo lielāks mitrums, jo sliktāk);
- biomasas transportēšanas izmaksas (atkarīgas no degvielas cenām);
- biomasas uzglabāšanas zonu nepieciešamība (lieli biomasas daudzumi).

Ir 4 galvenie koģenerācijas staciju iekārtu veidi:

- tvaika turbīna (angļu val. *steam turbine*);
- gāzes turbīna (angļu val. *gas turbine*);
- kombinētā cikla (angļu val. *combined cycle*);
- virzuļdzinēji (angļu val. *reciprocating engines*).

Biomazas koģenerācijas stacijās izmanto tvaika turbīnas ar siltumenerģijas padevi. Elektroenerģijas ģenerēšanas efektivitāte izmantojot tvaika turbīnu ir nedaudz samazināta, tomēr kopējā efektivitāte ir augstāka, salīdzinot ar nodalītu elektroenerģijas un siltuma ražošanu (Kubica *et al.*, 2007).

1.1. attēlā ir parādītas biomasas kurtuves sastāvdaļas ar tās būtiskākajiem elementiem.

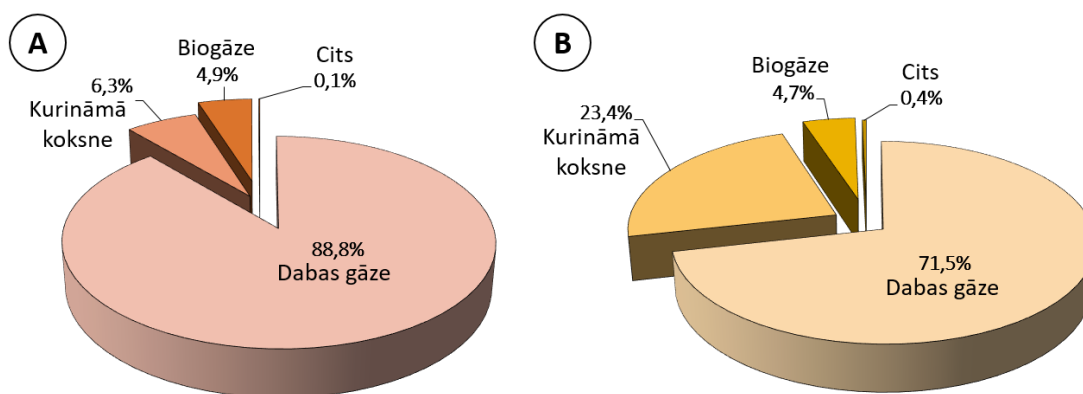


1.1. attēls. Biomassas kurtuves sastāvdaļas:

1. kurināmā padeves sistēma; 2. kurtuve; 3. multiciklons; 4. pelnu konteiners; 5. dūmsūcējs;
6. dūmgāzu kondensators; 7. dūmenis; 8. kondensators; 9. tvaika katls; 10. turbīna; 11. vieglo pelnu savācējs; 12. smago pelnu kolektors (izstrādājis autors, izmantojot Takuma boiler plants, 2017)

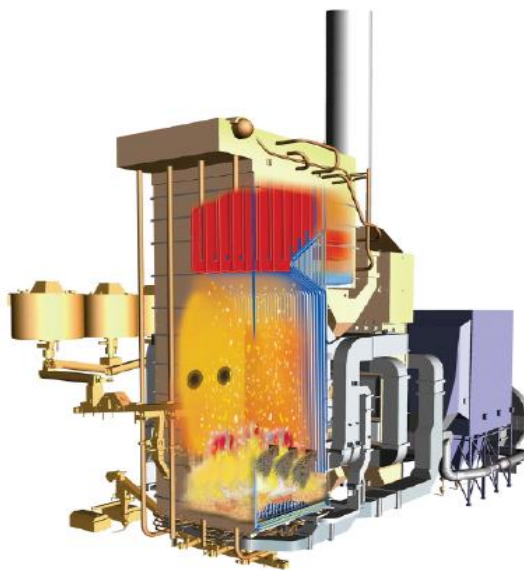
Būtiska sadedzināšanas tehnoloģijas priekšrocība ir plašā kurināmā materiāla izvēle – mitruma saturs kurināmajā materiālā var svārstīties no 10% līdz 55%, tāpat tehnoloģija ļauj sadedzināt kurināmo ar zemu pelnu kušanas temperatūru, piemēram, salmus, pelavas, olīvu izspiedas, vistu mēslus, piesārņotu koksni un cita veida organiskas izcelsmes atkritumus, kā arī RDF (angļu val. *Refused Derived Fuel* – no atkritumiem iegūtais kurināmais) (COGEN, 2017; HoSt, 2017).

Kā kurināmo Latvijas koģenerācijas stacijās lielākoties izmanto dabasgāzi. Nelielos apjomos izmanto mazutu un nu jau arī plaši attīstās biokurināmā (kurināmā koksne jeb šķelda un biogāze) izmantošana, sasniedzot virs 11% no kopējās elektriskās jaudas 2016. gadā un 28% no kopējās siltumenerģijas jaudas pēc patērētā kurināmā koģenerācijas stacijās 2015. gadā (1.2. attēls). Koģenerācijas stacijas iekārtās saražotā elektroenerģija 2015. gadā veidoja 63% no kopējā Latvijā saražotā elektroenerģijas daudzuma. 2015. gadā Latvijā darbojās 183 koģenerācijas stacijas, no kurām 23 stacijas kā kurināmo izmantoja šķeldas un 3 stacijas – kurināmo koksni (CSP, 2017b).



1.2. attēls. Koģenerācijas staciju uzstādītā a) elektroenerģijas jauda 2016. gadā b) siltumenerģijas jauda 2015. gadā pēc patērētā kurināmā Latvijā
(izstrādājis autors, izmantojot CSP, 2017a un CSP, 2017b)

Latvijā lielākā un modernākā koģenerācijas stacija, kurā tiek izmantota biomasas (koksnes šķelda), atrodas Jelgavā – SIA „Fortum Jelgava”. Koģenerācijas stacija siltuma un elektroenerģijas ražošanai izmanto verdošā slāņa katlu (1.3. attēls un 1.2. tabula) un tvaika turbīnu (1.4. attēls).



1.3. attēls. Verdošā slāņa katls biomasas koģenerācijas stacijā SIA „Fortum Jelgava”
(Fortum Jelgava, 2017)

1.2. tabula

Verdošā slāņa katla parametri „Fortum Jelgava” (Fortum Jelgava, 2017)

Parametrs	Parametra lielums
Ievadītā jauda	77 MW
Minimālā slodze	35%
Tvaika plūsmas ātrums	25 kg s ⁻¹
Tvaika temperatūra	527 °C
Tvaika spiediens	119 bar
Temperatūra kurtuvē	850 – 1000°C

„Fortum Jelgava” elektriskā jauda ir 23 MW, bet siltumenerģijas jauda – 45 MW. Stacija gadā saražo 230 GWh siltumenerģijas un 110 GWh elektroenerģijas. Koģenerācijas stacijas saražotā siltumenerģija tiek nodota Jelgavas centralizētās siltumapgādes sistēmā, bet elektroenerģija tiek pārdota brīvā tirgū (Fortum Jelgava, 2017).



1.4. attēls. Biomāsas koģenerācijas stacija SIA „Fortum Jelgava”: a) vieglo pelnu uztvērēji; b) tvaika turbīna (autora foto)




1.3.1. Kurināmā koksne

Strauji augot pieprasījumam pēc videi draudzīgiem un atjaunojamiem enerģijas resursiem, pasaulē un Eiropā palielinājies kurināmās koksnes – šķeldas, granulu un brikešu noiets, pēdējos gados sekmējot arī enerģētiskās koksnes ražošanas sektora attīstību Latvijā.

Kurināmā koksne (angļu val. *wood fuel*) ietver koksni, ko iegūst no kokiem un krūmājiem, kuri aug mežu un neapmežotās zemēs. Kurināmā koksne ietver arī biomasu, ko iegūst mežkopības darbībās (kopšanas cirte, apgriešana u.c.) un mežizstrādē (galotnes, saknes, zari u.c.), kā arī rūpniecības blakusproduktus. Visplašāk izmantotie kurināmās koksnes veidi ir malka, koksnes briketes, granulas, kokogles un mežizstrādes atlikumi (zari, galotnes, celmi u.c.), šķeldas no meža un kokrūpniecības, zāģu skaidas un miza (Brēmere u.c., 2009).

1.3. tabulā ir apkopoti kurināmās koksnes veidi.

Kurināmās koksnes veidi (Izstrādājis autors, izmantojot Brēmere *u.c.*, 2009)

Kurināmā veids	Apraksts	Attēls
Malka	<p>Kurināmais, kuru iegūst no kokiem, kuri nav ekonomiski izdevīgi kokrūpniecībai un kas paredzēts sadedzināšanai krāsnī, kamīnā vai plīti. Pelnu saturs robežās no 0,3% līdz 2,2%. Mitruma daudzums robežās no 15% līdz 47%. Enerģijas ražošanai izmantoto malku iedala:</p> <ul style="list-style-type: none"> • apaļkoksne; • skaldīta malka. 	
Šķelda (angļu val. <i>woodchips, chipped wood</i>)	<p>Kokapstrādes blakusprodukts no sasmalcinātiem zāģmateriālu atgriezumiem. Neregulāras formas, 5-50 mm daļiņas. Pelnu saturs no 0,7% līdz 7,0%. Mitrums no 30% līdz 45%. Izšķir šādus šķeldas veidus:</p> <ul style="list-style-type: none"> • smalcināta koksne no kokapstrādes rūpniecības; • smalcināta koksne no mežistrādes atliekām, lauksaimniecības zemju un ceļmalu apauguma novākšanas. 	
Koksnes (skaidu) briketes (angļu val. <i>briquets</i>)	<p>Sapresēta pulverizēta kurināmās koksnes biomasa, kubiskās vai cilindriskās formās. Energoefektīvs kurināmais materiāls ar daudz lielāku siltumietilpību kā malkai. Visbiežāk tiek ražots no skaidām. Pelnu saturs no 0,3% līdz 2% un mitrums <15%.</p>	
Koksnes (skaidu) granulas (angļu val. <i>wood pellets</i>)	<p>Kurināmais, kas veidots ar presēšanas metodi visbiežāk no izzāvētām, iepriekš sasmalcinātām skaidām. Pelnu saturs no 0,3 līdz 3,0%. Parasti granulas ir cilindriskas formas daļiņas, kuru vidējais garums ir 5-30 mm. Mitruma daudzums parasti mazāks par 10%.</p>	
Miza	<p>Kurināmais, kas rodas kokapstrādes procesa rezultātā vai nu mehāniski mizojot apaļkoksni vai arī kā atbiras veicot apaļkoksnes pārkraušanu un šķirošanu. Pelnu saturs no 0,8% līdz 3,6% un mitrums no 45% līdz 65%.</p>	
Skaidas, slīpputekļi (angļu val. <i>sawdust, fuelpowder</i>)	<p>Smalcināta koksne, kura rodas kokapstrādes procesa rezultātā un kuras sastāvā 95% veido frakcijas mazākas par 5 mm jebkurā dimensijā. Pelnu saturs ap 1%.</p>	

Galvenokārt koksnes biomasa tiek izmantota kā dedzināmais materiāls siltuma ražošanai, kas Latvijā katru gadu pieaug. Ja 2012. gadā dedzināmā koksne tika izmantota 1 396 975 t tad 2015. gadā izmantotās dedzināmās koksnes apjoms gandrīz dubultojās – 2 402 537 t (1.4. tabula).

1.4. tabula

Kurināmās koksnes apjomi Latvijā (tonnas) no 2012. gada līdz 2015. gadam
(sastādījis autors, izmantojot Lazdiņa *et al.*, 2017)

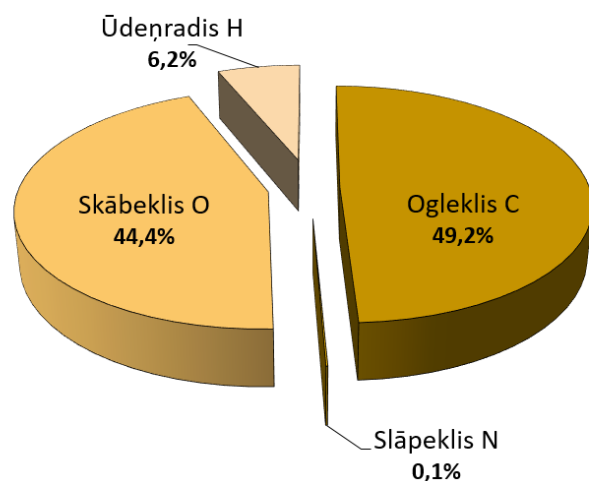
Kurināmā veids	2012	2013	2014	2015
Granulas	21 609	23 742	15 538	45 230
Koksne	497 848	641 191	753 385	907 451
Malka	186 774	179 472	154 764	144 795
Šķelda	690 774	978 922	1 182 330	1 305 062
Kopā	1 396 975	1 823 326	2 106 016	2 402 537

Kurināmās koksnes enerģētiskos produktus raksturo galvenās produkta īpašības: siltumspēja, ķīmiskais sastāvs, mitrums, blīvums, frakciju sastāvs, gaistošo vielu daudzums, oglekļa daudzums, pelnu saturs un sastāvs, pelnu kušanas temperatūra, piemaisījumu daudzums, smalkumi un sēņu sporu klātbūtne. Fizikāli mehāniskās īpašības, kas tieši ietekmē degšanas procesu ir: mitrums, siltumspēja, gaistošo vielu daudzums, pelnu saturs un kušanas apstākļi (Brēmere u.c., 2009).

Koksne ir ķīmiski sarežģīts produkts, un tas ietekmē koksnes kurināmā īpašības. Koksnes elementārajā ķīmiskajā sastāvā (1.5. attēls) ir vidēji 50% C, kaut gan elementsastāvs nelielās robežās svārstās atsevišķās koka daļās – stumbra serdē un aplievā, zaros, saknēs, jaunajos dzinumos u.c. (Dolacis u.c., 2003).

Koksnes sastāvs ir:

- gaistošās frakcijas – koksnes daļa, kas karstumā izdalās kā pirolīzes gāze un deg ar dzeltenī oranžu liesmu;
- ogleklis - koksnes atlikums pēc gaistošo frakciju izdegšanas;
- pelni - pelēcīgi balts pulveris, kuru veido minerālvielas (bet var saturēt bioogli);
- ūdens.



1.5. attēls. Galvenie koksni veidojošie elementi
(izstrādājis autors, izmantojot Brēmere u.c., 2009)

Ķīmiskie elementi (H, C, O) veido sarežģītus organiskos savienojumus, no kuriem galvenie ir celuloze, lignīns un hemicelulozes. Šie savienojumi veido šūnu apvalkus un sastāda 90-95% no absolūti sausas koksnes masas. Pārējās vielas sauc par ekstraktvielām. Pie ekstraktvielām pieder miecvielas, sveķi, krāsvielas u.c.

Sadegot koksne sadalās gāzēs, kas savienojoties ar skābekli veido ūdeni H_2O un oglekļa gāzi CO_2 . Šajā procesā rodas siltums. Koka degšanas temperatūra ir 260–700°C un sadegot 1 kg koksnes izdalās ap 4 230 kcal enerģijas. Koksnes efektīvu sadegšanu ietekmē trīs parametri – skābekļa daudzums, temperatūra, laiks un gāzu kustība. Nozīmīgākā ir temperatūra, jo, lai panāktu pilnīgu kurināmā, it īpaši gaistošo frakciju, oksidēšanos, ir jāuztur minimālais temperatūras līmenis. Lai panāktu koksnes sadedzināšanu, augšminētos faktoros iespējams dažādi kombinēt (Brēmere u.c., 2009).

Galvenais faktors, kas ietekmē sadedzināšanas sistēmas izvēli, ir mitruma saturs koksnē. Jo mitrāka koksne, jo vairāk enerģijas nepieciešams tās žāvēšanai un jo vairāk enerģijas sadegšanas zonā tiek izmantota konstantas temperatūras uzturēšanai. Dažādu sugu koksne atšķiras savā starpā ar blīvumu pie vienāda mitruma. Līdz ar to sadedzinot 1 m³ koksnes, iegūstam atšķirīgu siltuma daudzumu – 1.5. tabula (Brēmere u.c., 2009; Dolacis u.c., 2003).

Absolūti sausas koksnes siltumspējas salīdzinājums
(sastādījis autors, izmantojot Dolacis u.c., 2003)

Nr.	Koku auga	Blīvums, kg m ⁻³	1 m ³ koksnes siltumspēja, GJ m ⁻³ pie W = 0%		1 m ³ siltumspēja pret ozolu
			augstākā	zemākā	
1.	Ozols	670	13,61	12,65	1,000
2.	Kļava	660	13,40	12,46	0,985
3.	Osis	640	12,99	12,09	0,955
4.	Bērzs	620	12,59	11,71	0,925
5.	Lapegle	600	12,18	11,33	0,986
6.	Dižskābardis	580	11,78	10,92	0,866
7.	Melnalksnis	540	10,97	10,20	0,806
8.	Alksnis	495	10,05	9,35	0,739
9.	Priede	480	9,75	9,06	0,716
10.	Apse	465	9,44	8,78	0,694
11.	Liepa	460	9,34	8,69	0,687
12.	Papele	440	8,94	8,31	0,657
13.	Egle	420	8,53	7,93	0,627

Lai nodrošinātu koksnes izmantošanas ilgtspējību, tās ieguvei nevajadzētu pārsniegt koksnes resursu atjaunošanās spējas. Tādēļ līdzās koksnes izmantošanai mežaudzēs tiek meklēti citi biomasas ieguves veidi, piemēram, enerģētisko plantāciju ierīkošana neapsaimniekotajās platībās, kas savādāk aizaug ar mazvērtīgiem augiem, līdz ar to samazinās bioloģiskā daudzveidība, teritoriju ainaviskā, ekonomiskā un ekoloģiskā vērtība (Rancāne u.c., 2013). Šis jautājums ir arī svarīgs siltumnīcas efekta gāzu (SEG) emisiju samazināšanai un atjaunojamo energoresursu īpatsvara palielināšanai.

Energokultūras, kas izmantojamas siltuma un arī elektrības ražošanai, ir vairākas. Pasaulē enerģētiskās koksnes ieguvei tiek ierīkotas eikaliptu, papeļu, apšu, kārkļu plantācijas. Latvijas apstākļiem piemērotas vairākas sugas, tajā skaitā ātraudzīgie kārkli, hibrīdās apses, baltalkšņi, kaņepes, miežubrāļi, zilonzāles jeb miskantes u.c. (Lazdiņa, 2008).

1.3.2. Koksnes resursi Latvijā

Meži Latvijā aizņem 2 965 tūkstošus hektāru, bet meža zemes aizņem 3 575 tūkst. ha. Pēc Valsts meža dienesta datiem mežainums ir 50,4% (meža zemju platības procentuālā attiecība pret valsts teritorijas kopējo platību). Salīdzinājumā ar citām Eiropas valstīm Latvija pieskaitāma pie mežiem bagātām valstīm (Eiropā meži vidēji aizņem 33% no sauszemes teritorijas). Salīdzinot ar 1923. gadu, kad mežainums Latvijā bija 23%, laika gaitā līdz mūsdienām tas ir dubultojies. Meža platību pieaugums prognozējams arī turpmāk, jo turpinās lauksaimniecībā neizmantoto zemju dabiska aizaugšana, kā arī to mākslīga apmežošana (Valsts meža dienests, 2017).

Kopējā koksnes krāja mežos 2014. gadā bija 668 milj. m³ (1.6. tabula) (CSP, 2015; Zemkopības ministrija, 2017). Pēdējās gados (2001. – 2014. gadam) koksnes krāja mežos ir pieaugusi vairāk kā par 100 milj. m³ (1.6. tabula). Latvijas mežus pārsvarā veido skuju koki – priede un egle, tomēr ievērojamu daļu aizņem arī pārējās sugas. Skuju koku audzes aizņem 55% no visu audžu platībām, bērzu – 30%, baltalkšņu – 7% un apšu – 4% (Valsts meža dienests, 2017).

1.6. tabula

Latvijas meža zemes un koksnes krāja 2001. – 2014. gadam*
(sastādījis autors, izmantojot CSP, 2015)

Gads	Meža zeme, tūkst. ha	Koksnes krāja mežā, milj. m ³
2001	3 221	544
2002	3 240	585
2003	3 222	578
2004	3 230	573
2005	3 233	569
2006	3 240	572
2007	3 242	569
2008	3 238	569
2009	3 558	647
2014	3 575	668

*Līdz 2008. gadam (ieskaitot) Valsts meža dienesta dati. Sākot ar 2009. gadu, Zemkopības ministrijas Meža statistiskās inventarizācijas dati (MSI) par piecu gadu periodu no 2009. gada 1. aprīļa līdz 2014. gada 1. aprīlim

Kokiem augot, katru gadu veidojas koksnes pieaugums, kas pēc pašreizējiem aprēķiniem ir 16,5 milj. m³ gadā. Ik gadu zināms daudzums koksnes tiek nocirsts, veicot izaugušās koksnes ražas ievākšanu galvenajā cirtē, kā arī cērtot kokus kopšanas un sanitārajās cirtēs paliekošās mežaudzes stāvokļa uzlabošanai (Valsts meža dienests, 2017). Daļu izcirsto platību atjauno mākslīgi – sagatavo augsni, audzē un stāda stādus, bet daļa atjaunojas dabiski. Dabiski mežu atjauno – veģetatīvi (ar atvasēm vai saglabājot paaugas kociņus) vai ģeneratīvi (ar izcirtumā atstāto sēklas koku sēklām vai ar apkārtējo mežaudžu koku sēklām) (LVM, 2017).

Izcirsto un atjaunoto mežu platības Latvijā laika periodā no 2013. līdz 2015. gadam
(sastādījis autors, izmantojot CSP, 2015)

Gads	Izcirstā platība (ha)	Atjaunotie meži* (ha)
2013	113 744,0	40 266
2014	108 841,2	37 986
2015	98 389,1	41 653

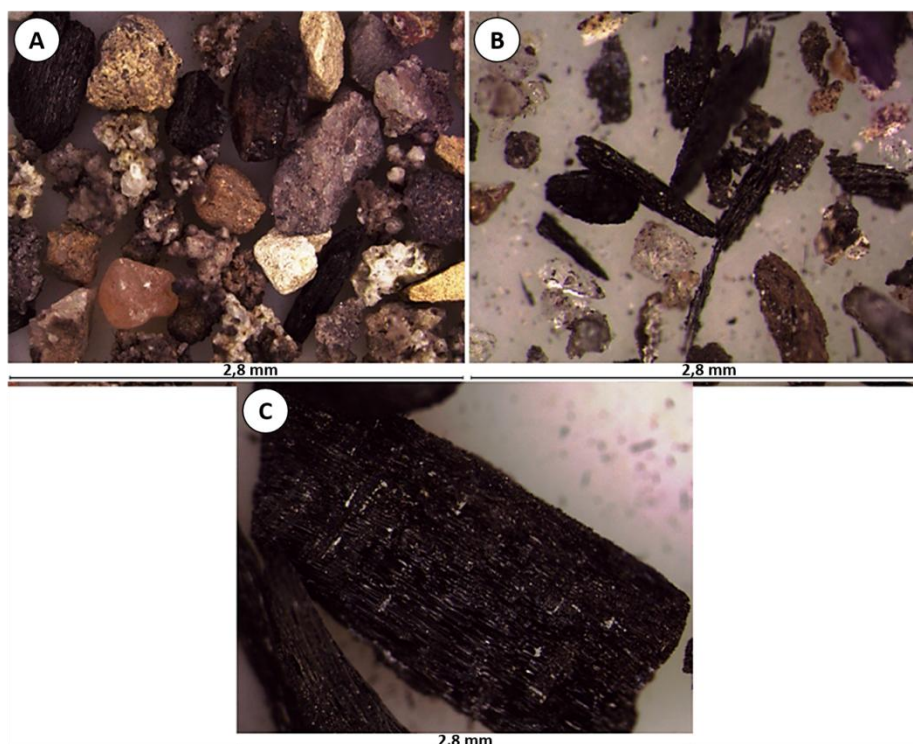
*Atjaunoti mākslīgi

Izmantojot koksni pārdomāti ir iespējams nodrošināt pietiekamu resursu daudzumu, tai skaitā biomasas sadedzināšanas iekārtu darbībām, īpaši tad, ja meža zemju daudzums un koksnes krāja palielinās.

1.4. Biomasas (koksnes) sadedzināšanas galaprodukti – pelni un bioogle

Cieto un šķidro kurināmo degošo daļu veido sarežģīti organiskas izcelsmes savienojumi, kuru sastāvā galvenokārt ietilpst pieci ķīmiski elementi - ogleklis C, ūdeņradis H, sērs S, skābeklis O, slāpeklis N. Kurināmā nedegošā daļa sastāv no pelniem un mitruma (Brēmere u.c., 2009).

Pelni ir neorganiskais kurināmā materiāla atlikums, kas radies pilnīgas sadedzināšanas rezultātā un satur lielāko minerālās frakcijas daļu no sākotnējās biomasas. Minerālie elementi tiek uzņemti koka augšanas laikā, kā arī tiek ienesti no ārpusē koksni novācot vai transportējot (Nunes *et al.*, 2014). Pelni tiek iedalīti divās frakcijās atkarībā no to uzkrāšanās vietas sadedzināšanas kamerā: viegie pelni (angļu val. *fly ash*) tiek transportēti kopā ar izplūdes gāzēm un tie parasti izgulsnējas pelnu uztvērējos un smagie pelni (angļu val. *bottom ash*) paliek kurtuves apakšdaļā pie režģa (Nunes *et al.*, 2014). Vēl var izdalīt jauktos pelnus (angļu val. *mixed ash*), kas ir abu iepriekšminēto pelnu materiāla sajaukums. Minētās pelnu frakcijas var saturēt bioogli, kas parasti rodas nepilnīgas biomasas sadegšanas rezultātā 350°C līdz 1 000°C temperatūrā, zemās skābekļa koncentrācijās (pirolīze) (EBC, 2015) (1.6. attēls).



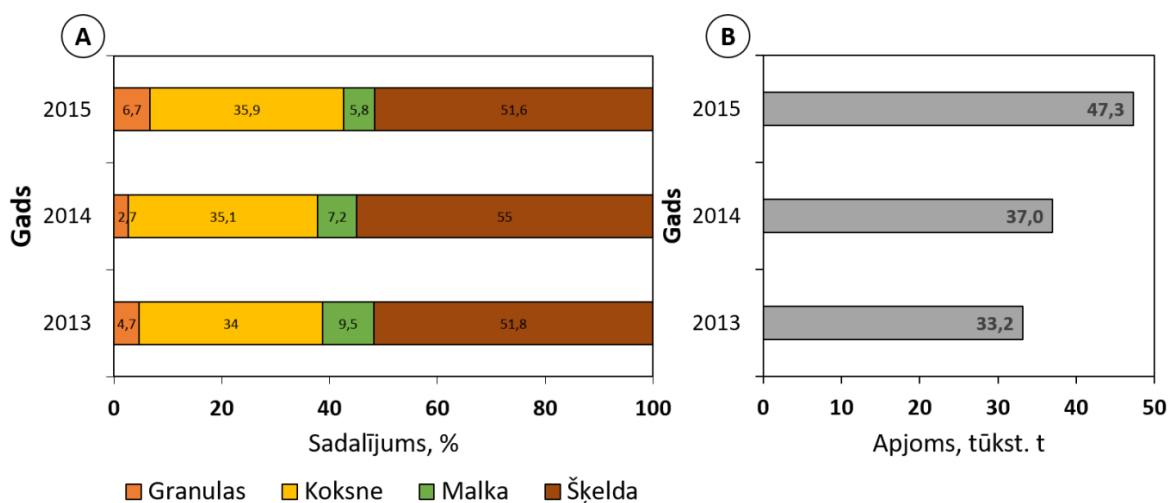
**1.6. attēls. Pelni un bioogle palielinājumā:
a) smagie pelni; b) vieglie pelni; c) bioogle (Trausa, 2016)**

Krāsnis, kas izmanto koksni un koksnes granulas, saražo pelnus ļoti lielā daudzumā, un pārsvarā tie tiek noglabāti atkritumu poligonos (Obernberger & Supancic, 2009). Latvijā šobrīd saskaņā ar likumdošanu pelni tiek klasificēti kā atkritumi (Noteikumi par atkritumu..., 2011; Prasības atkritumu sadedzināšanai..., 2011).

Saražoto pelnu daudzums ir iespaidīgs, piemēram, 600 000 t kūdras-koksnes pelnu kā blakusprodukts tiek saražots Somijā katru gadu (Emilsson, 2006). Zviedrijā saražoto pelnu apjoms ir vēl lielāks – 1 300 000 t, no kurām 140 000 t saražotas no koksnes, 450 000 t rodas no papīra un celulozes rūpniecības, bet atlikušais daudzums radies no jauktā kurināmā, galvenokārt saturot dažādas koksnes daļas (Odlare & Pell, 2009). ASV katru gadu apmēram 70% koksnes pelnu tiek deponēti izgāztuvēs, kamēr vien 25% no saražoto pelnu daudzuma tiek izmantots augsnes bagātināšanai (Naik *et al.*, 2001). Lai gan to izmantošana, piemēram, par mēslojumu, palielinās, lielākā daļa joprojām tiek deponēta atkritumu poligonos.

Ņemot vērā nepārtraukto koksnes kurināmā patēriņa pieaugumu, aktuālo Latvijā saražoto pelnu apjomu ir grūti aprēķināt. Pēc Baltijas koks, 2015 datiem, pieņemot, ka šķeldas mitruma saturs ir 40% un dedzināšanas procesā no kopējā apjoma rodas 4% pelnu, bet no granulām ar mitruma saturu 10% rodas 1% pelnu, 2012. gadā Latvijā saražoto pelnu daudzums pēc katlumāju un uzņēmumu patērētajiem koksnes resursiem bija aptuveni 33 200 t. Pēdējo gadu laikā ir radušās vairākas jaunas lieljaudas katlumājas, piemēram, SIA

„Fortum Jelgava”, AS „SIMONE” Alūksnē un SIA „Enefit Power & Heat Valka” Valkā, līdz ar to situācija mainījās un saražoto pelnu apjoms ir pieaudzis. 2015. gadā saražoto pelnu apjoms ir pieaudzis līdz 47 340 t (Lazdiņa *et al.*, 2017) (1.7. attēls).



1.7. attēls. Latvijā saražoto pelnu daudzums atkarībā no kurināmā materiāla 2013.–2015. gadā: a) kurināmā veids; b) pelnu apjoms (sastādījis autors, izmantojot Lazdiņa *et al.*, 2017)

SIA „Fortum Jelgava” kā kurināmo izmantojot šķeldu, kuras vidējais mitrums ir ~40%, 2016. gadā no ~139 267 t šķeldas, saražoja ~3 356,82 t vieglo pelnu un ~1 385,18 t smago pelnu (Fortum Jelgava, 2017). Kā redzams saražoto pelnu apjoms tiešām ir liels un tālāka to izmantošana ir būtisks jautājums.

1.4.1. Koksnes pelnu un bioogles īpašības

Koksnes pelnu un bioogles īpašības ir atkarīgas no vairākiem faktoriem (Gulbe *u.c.*, 2016; Trybalski *et al.*, 2014; Werkelin *et al.*, 2010):

- sadegšanas apstākļi (apkures katla veids, temperatūra);
- koka sugas un sadedzinātās auga daļas;
- augsnes veids un klimatiskie apstākļi;
- pelnu savākšanas un uzglabāšanas metodes;
- antropogēnās aktivitātes koka augšanas laikā.

Biomassas sadedzināšanas krāsnis galvenokārt darbojas temperatūrās, nepārsniedzot 1 000°C. Kālija, nātrijs un karbonātu saturs koksnes pelnos samazinās, bet citu metālu jonu saturs paliek konstants vai pieaug līdz ar temperatūru. Pelnu sastāvs mainās arī uzglabāšanas laikā (mainoties apkārtējās vides apstākļiem), tas ir, oglekļa dioksīds un mitrums reaģē ar

pelniem, veidojot karbonātus, bikarbonātus un hidroksīdus. Tādēļ pieejamie dati par koksnes pelnu un bioogles sastāvu un īpašībām ir ļoti dažādi (Gulbe u.c., 2016; Werkelin *et al.*, 2010).

Pētījumi ir atklājuši, ka galvenie pelnu veidojošie elementi ir Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Si un Cl (Werkelin *et al.*, 2010).

Svarīgākais limitējošais faktors plašai koksnes pelnu un bioogles izmantošanai ir metālisko elementu (sevišķi smago metālu) un metaloīdu klātbūtne, piemēram, Pb, Zn, Cu, Ni, As, kā arī organiskais piesārņojums (Odlare & Pell, 2009). Smago metālu klātbūtnei koksnes pelnos un biooglē var būt izšķiroša nozīme to piemērotībai augsnes ielabošanā (Pan & Eberhardt, 2011). Lai gan smago metālu koncentrācijas ir zemas un to mobilitāte ir atšķirīga, smagie metāli kā Cd, Cr, Cu un Pb var ietekmēt un izraisīt pārmaiņas augsnē, veģetācijā, augsnes dzīvniekos un galu galā arī pazemes un virszemes ūdeņos (Ozolincius *et al.*, 2007). Metālu un metaloīdu mobilitāte, bioloģiskā pieejamība un toksicitāte ir dažāda, un to iespējamā ietekme uz vidi var būt neprognozējama (Beesley *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2007; Jamali *et al.*, 2009). Tādējādi tikai pelni un bioogle, kas iegūti no dabiskas, neapstrādātas biomasas, var tikt izmantoti augsnes mēslošanai vai uzlabošanai, bet pelni un bioogle, kas iegūti no ķīmiski apstrādātas koksnes, nebūs piemēroti augsnes ielabošanai pateicoties iespējamajam smago metālu saturam (Masto *et al.*, 2015; Mollon *et al.*, 2016; Obernberger & Supancic, 2009; Rey Salgueiro *et al.*, 2016).

Latvijā koksnes pelnu limitējošās vērtības izmantošanai lauksaimniecībā un mežsaimniecībā nav noteiktas, bet vērtību salīdzināšanai var izmantot smago metālu koncentrāciju limitus augsnes mēslošanai un rekultivācijai ar notekūdeņu dūņām, ko nosaka MK noteikumi Nr.362 „Noteikumi par notekūdeņu dūņu un to komposta izmantošanu, monitoringu un kontroli”. MK noteikumos Nr.506 „Mēslošanas līdzekļu un substrātu identifikācijas, kvalitātes atbilstības novērtēšanas un tirdzniecības noteikumi” ir noteikta nevēlamo piemaisījumu maksimāli pieļaujamā koncentrācija mēslošanas līdzeklī un substrātā. Kā nevēlamie piemaisījumi ir minēti, piemēram, kadmijs, dzīvsudrabs, arsēns, niķelis, svins, ko nosaka karaļūdens ekstraktā. Vēl pie nevēlamiem piemaisījumiem pieskaita plastmasas, stikla vai metāla daļiņas, kaulus un akmeņus, arī patogēnos mikroorganismus tāds kā *Escherichia coli*, *Enterococaceae* un salmonellas.

Tādās valstīs kā Zviedrija, Somija, Dānija u.c., kur pelnus plaši pielieto mežsaimniecības un lauksaimniecības zemju ielabošanai, elementu limitējošās vērtības koksnes pelnos ir noteiktas (skatīt 3.1.1. nodaļu – 3.9. tabula). Jāatzīmē, ka likumdošanā koncentrāciju limiti ir noteikti absolūtās vērtībās, bet netiek skatīts metālu sadalījums frakcijās. Pat ja elements atrodas nešķīstošā formā, nav bioloģiski pieejams un toksisks,

kopējais elementa saturs var pārsniegt noteikumos noteiktās vērtības un līdz ar to atzīts par bīstamu.

1.5. Koksnes pelnu un bioogles ietekme uz dzīvajiem organismiem

Jebkuras vielas iedarbība uz dzīvajiem organismiem ir atkarīga ne tikai no vielas iedarbības rakstura (toksicitātes), bet arī no vielas daudzuma, kas iekļūst organismā. Jebkura viela ir nekaitīga, ja tās deva, kas iedarbojas uz organismu ir pietiekoši zema, bet jebkura labi zināma un plaši lietota viela lielās devās kļūst organismam bīstama (Kļaviņš un Zaļoksnis, 2005).

Organisko mēslošanas līdzekļu izmantošana lauksaimniecības augsnēs nav bez riska un var ietekmēt augsnes, ūdens un citus dzīvniekus, kā arī cilvēkus. Īpaši bīstami ir smagie metāli, kas ir toksiski un tādēļ ir nepieciešams izvērtēt mēslojuma īpašības un pielietošanas iespējamās sekas (Odlare & Pell, 2009).

Toksicitātes testi ir viens no būtiskākajiem veidiem, kā var novērtēt antropogēnās slodzes ietekmi uz dažādām ekosistēmām. Testa sugu un testa metodes izvēle ir atkarīga no parauga izcelsmes un tā īpašībām, ņemot vērā testa ilgumu, izmaksas un ekoloģisko nozīmību (Marsalek & Rojickova-Padrtova, 2000).

Toksicitātes testu kvalitāti raksturo tā veikšanas metode, paraugu dažādība, fizikālu un ķīmisku parametru ietekme, lietošanas vieglums un ilgums, precizitāte (atkārtojamība), jutīgums, testa organismu pieejamība un sastopamība, un šo testu ekoloģisko kritēriju nozīmība. Izmantojot mikroskopiskus organismus, metodes ātrums un vienkāršība palielinās, tāpat samazinās izmaksas toksicitātes raksturošanai (Johnson, 2000).

Koksnes pelnu un bioogles ietekmes izpētei veikto pētījumu uz ūdens un augsnes dzīvniekiem nav daudz. 1.8. tabulā ir dots neliels koksnes vieglo pelnu un bioogles ietekmes testu apkopojums.

Pētījumi par koksnes pelnu un bioogles ietekmi uz dzīvniekiem

Pelni/ bioogle	Test- organisms	Testa ilgums	Deva	Efekts	Atsauce
Infiltrāts no vieglajiem pelniem	<i>Daphnia magna</i>	24 un 48 h	-	Svaigi pelni ir toksiskāki par stabilizētiem pelniem. Toksicitāte pieaug līdz ar koncentrāciju un samazinās ar laiku	Krakow, 2010
Vieglo pelnu šķīdums	<i>Euglena gracilis</i>	-	>5 g L ⁻¹ (bāzisks šķīdums)	Palēnināta kustība un šūnu augšana. Toksiski efekti metālu ietekmē netika novēroti	Aronsson, 2007
Vieglo pelnu šķīdums	<i>Gammarus pulex L.</i>	4 un 24 h	>5 g L ⁻¹ (bāzisks šķīdums)	Negatīvā ietekme uz elpošanu saistīta ar augsto pH līdz ar pelnu koncentrācijas pieaugumu.	Aronsson, 2007
Vieglo pelnu šķīdums	<i>Fontinalis antipyretic a Hedw.</i>	9 nedēļas	>5 g L ⁻¹ (bāzisks šķīdums)	Nedaudz samazināta augšana	Aronsson, 2007
Vieglie pelni	<i>Plethodon cinereus</i>	-	-	Augsnes, kas apstrādātas ar vieglajiem pelniem, salamandru uzturēšanās novērota biežāk	Gorgolewski, 2015
Smagie pelni	<i>Plethodon cinereus</i>	-	-	Salamandru uzturēšanās biežums nemainās	Gorgolewski, 2015

Koksnes pelnu un bioogles augsnes uzlabošanas spējas ir novērtētas visā pasaulē. Tomēr pēdējā laikā pētījumi par koksnes vieglo pelnu un bioogles ietekmi uz augsnes un ūdens biotu ir daudz mazāk kā pētījumi par ietekmi uz augsnes ķīmiskajām īpašībām, auglību un klimata pārmaiņu mazināšanu.

Līdz šim pierādījumu par tiešu negatīvu ietekmi uz augu saknēm no pelniem un bioogles nav. Dažkārt novērotā sēņu mikorizu daudzuma samazināšanās vistīcāmāk ir izraisījusi vienlaikus palielinātā barības vielu pieejamība, samazinot nepieciešamību pēc simbiontiem. Dažādu organisko molekulu atbrīvošana no svaigas bioogles īstermiņā dažos gadījumos var būt atbildīga par augsnes biotas sastopamības un aktivitātes pieaugumu vai samazinājumu (Lehmann *et al.*, 2011).

Pelni var saturēt tādus metālus kā As, Cd, Cr, Pb, Hg un Se, kas var radīt draudus cilvēka veselībai un B, Cu, Ni un Zn, kas var būt fitotoksiski taču parasti cilvēka veselību neapdraud. Būtiski ir izpētīt smago metālu sorbcijas un mobilitātes īpašības augsnēs un to tālāku pārnesei lauksaimniecības kultūrās, lai izprastu potenciālās briesmas cilvēku veselībai (Pitman, 2006).

1.6. Koksnes pelnu un bioogles izmantošanas iespējas

Lai izvairītos no koksnes pelnu un bioogles noglabāšanas atkritumu poligonos, ir nepieciešams izstrādāt videi draudzīgus un rentablus risinājumus to izmantošanai.

Koksnes pelnus un bioogli ir iespējams izmantot vairākās tautsaimniecības jomās, taču to plašā dažādība un nepietiekamais izpētes līmenis reti ļauj to darīt racionāli un gūt gaidāmos rezultātus. Latvijā vēsturiski pelni ir pazīstami kā izejmateriāls pelnu sārnam, kas noder trauku tīrīšanai, veļas mazgāšanai un ziepju vārīšanai. Piemēram, pelnu sārma izgatavošana ir aprakstīta avīzes „Kurzemes Vārds” 1942. gada 10. jūnija numurā, bet ir pazīstama daudz senāk. Tāpat pelnu īpašības ir novērtētas un pielietotas lauksaimniecībā kā mēslojums un kā kaļķošanas līdzeklis (Rancāne u.c., 2013).

Kā viena no pētītākajām un pašlaik izplatītākajām opcijām ir biomasas pelnu un bioogles izmantošana lauksaimniecības, dārzniecības vai meža augšņu ielabošanai un izmantošanai par mēslojumu (Gomez-Rey *et al.*, 2012; Pan & Eberhardt, 2011).

Galvenie aspekti koksnes pelnu izmantošanai lauksaimniecības un meža zemēs ir šādi (pēc Aronsson, 2007):

- lai izvairītos no minerālu izneses lauksaimniecības un mežstrādes darbu rezultātā;
- lai mazinātu kaitīgās ietekmes, ko dod augsnes un virszemes ūdeņu paskābināšanās;
- lai augsnē nodrošinātu tādus makro un mikro elementus kā kalcijs, kālijs, sērs, magnijs, fosfors un citi.

Koksnes pelni satur lielu daudzumu neorganisku savienojumu, kas var tikt izmantoti, lai palielinātu augsnes skābju-bāzu līdzsvaru (pH), piemēram, meža zemju kaļķošanai (Bramryd & Fransman, 1995). Augsnes paskābināšanās ir tipiska Ziemeļeiropas problēma (EEA, 2000). Koksnes pelni satur P un K, kas skābās augsnēs trūkst un līdz ar to koksnes pelni var tikt izmantoti gan kā mēslojums gan kā ilgtermiņa kaļķošanas līdzeklis (Lazdiņa *et al.*, 2017). Samazinoties augsnes pH, var tikt palielināta smago metālu kustība, kas ir potenciāls drauds videi, bet pelnu un bioogles izmantošana augsnes pH stabilizēšanai vai paaugstināšanai var samazināt šo risku. Tomēr nestabili, viegli šķīstoši pelni var panākt pretēju negatīvu efektu, būtiski palielinot augsnes pH un sāļu koncentrāciju (Vance, 1996).

Pētījumi liecina, ka pelni un bioogle lielākoties satur tādus augiem nepieciešamus bioloģiski pieejamus makroelementus kā Ca, K, Mg (Augusto *et al.*, 2008; Chirenje & Ma, 2002; Vance, 1996). Minētie elementi ir nozīmīgi augu attīstībai, taču tradicionāli pelni galvenokārt tiek lietoti kā K un Ca mēslojums. Ir veikti pētījumi ar pelnu un bioogles izmantošanu dažādu lauksaimniecības un mežsaimniecības kultūru audzēšanā, piemēram, bioogle uzlabo kukurūzas augšanas spējas, sevišķi, bioogli pielietojot kopā ar minerālmēslojumu (Rajkovich *et al.*, 2012). Pelni dod pozitīvu ietekmi uz daudzgadīgo

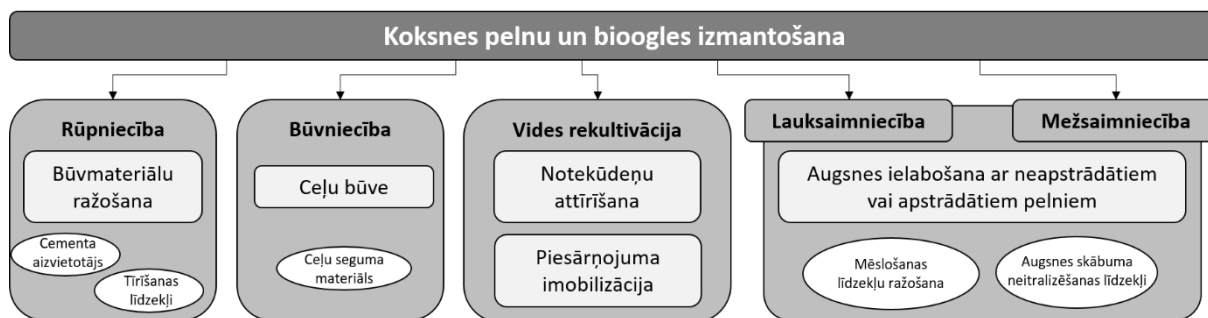
zālaugu miežabrāļa (*Phalaris sp.*), auzeņaires (*Festulolium sp.*) un galegas (*Galega sp.*) augšanu un sekmē labākus sākotnējās attīstības apstākļus, kas nodrošina lielākas biomasas veidošanos (Rancāne u.c., 2013). Latvijas Valsts Mežzinātnes Institūta „Silava” pētnieki ir pārbaudījuši pelnu pozitīvo ietekmi uz parastās egles (*Picea abies*) un citu ekonomiski vērtīgu koku sugu kā bērzu (*Betula pendula*) un parastās priedes (*Pinus sylvestris*) augšanu (Lazdiņa *et al.*, 2017).

Tā kā pelni praktiski nesatur slāpekli, tad, lai pelnus izmantotu kā mēslojumu, ir nepieciešams pievienot papildus slāpekli, izmantojot šķīdros mēslus, kūtsmēslus, vircu, sapropeli (Stankeviča un Kļaviņš, 2013) vai digestātu (Biogāzes ražošanas un..., Bez dat.) kā dabīgā slāpekļa avotu vai mākslīgi sintezētu slāpekli amonija vai nitrāciju veidā. Piemēram, pelni papildināti ar slāpekli, labi iedarbojas uz skujkoku (egļu un priežu) augšanu, kamēr pelni bez slāpekļa piedevas, būtisku koksnes pieaugumu nedod (Jacobson, 2003; Lazdiņš, 2014). Pelnu un bioogles daudzums atkarīgs no konkrēto augu vajadzībām un augsnes ķīmiskā sastāva. Arī izmantošanas efektivitāte ir atkarīga no pelnu un bioogles ķīmiskā sastāva, iestrādes metodes augsnē, augsnes pamatīpašībām (auglības), kā arī izvēlētajā kultūras (Füzesi *et al.*, 2015). Minerālu iznese (izskalošanās) no mežsaimniecības zemēm ir būtiska problēma mežkopībā, sevišķi, ja tas nākotnē var samazināt koksnes pieaugumu (Pan & Eberhardt, 2011). Pētījumi apliecina pelnu pozitīvo ietekmi uz augsnes struktūru, aerāciju, ūdens uztveršanu un katjonu apmaiņas kapacitāti (Wallingford, 1980).

Pelni ir izmantojami arī cīņai pret kaitēkļiem un augu slimībām (30 uses for wood ash, 2015). Tādējādi koksnes pelni var būt noderīgi vairākos veidos – gan kā līdzeklis, kas veicina dažādu augu un koku augtspēju, gan kā augšņu kaļķošanas līdzeklis, gan kā profilaktisks līdzeklis, kas augus padara izturīgākus pret kaitēkļiem. Šīs īpašības padara pelnus par labu izejvielu dažādu saimniecību, it sevišķi, bioloģisko saimniecību vajadzībām. Pelnu pielietošanu bioloģiskajā lauksaimniecībā reglamentē ES regula (EK) 889/2009, kas nosaka, ka koksnes pelnus ir atļauts izmantot, ja pelni iegūti no koka, kas pēc nociršanas nav ķīmiski apstrādāts.

Pētījumi parāda, ka pelni var ne tikai tikt izmantoti lauksaimniecībā un mežsaimniecībā, bet dažādās citās nozarēs (Augusto *et al.*, 2008; Omil *et al.*, 2013; Vassilev *et al.*, 2013). Ir veikti pētījumi par iespējamo bioogles izmantošanu notekūdeņu attīrīšanā, izmantojot bioogli kā sorbentu (Gao *et al.*, 2016). Tāpat bioogle spēj imobilizēt tādus viegli šķīstošus metālus kā cinku un kadmiju un arī metaloīdus kā arsēnu, līdz ar to bioogle var samazināt dažādu elementu mobilitāti piesārņotās augsnēs (Beesley & Marmiroli, 2010). Pelnus kā izejmateriālus ir iespējams iekļaut ceļu būvniecībā un būvmateriālu ražošanā (Oberberger & Supancic, 2009), kā arī dažādu vieglu būvniecībā izmantojamu materiālu

ražošanā (Anagnostopoulos & Stivanakis, 2009; Arslan & Baykal, 2006), un cementu aizvietojošu vai daļēji aizstājošu materiālu ražošanā (Provis & van Deventer, 2014), piemēram, kā saistvielu izmantojot pelnus betona bloku ražošanā (Subramaniam *et al.*, 2015). Pelnus un bioogli var izmantot arī keramikas ražošanā, inovatīvu materiālu ražošanā un iekļaut vai pārveidot ziepēs, tīrīšanas līdzekļos un farmaceitiskos produktos (Vassilev *et al.*, 2013). Koksnes pelnu un bioogles izmantošana shematiski apkopota 1.8. attēlā.



1.8. attēls. Koksnes pelnu un bioogles iespējamā izmantošana (izstrādājis autors, izmantojot Arslan & Baykal, 2006; Gomez-Rey *et al.*, 2012; Obernberger & Supancic, 2009)

Pētījumi ir pierādījuši, ka koksnes pelniem un biooglei piemīt īpašības, kas padara tos piemērotus ne tikai augsnes ielabošanai, bet pelni un bioogle spēj palielināt oglekļa uzkrāšanu augsnē un mūsdienās kad CO₂ apjomi atmosfērā pieaug, pelnu un bioogles iestrāde augsnē varētu būt viens no risinājumiem oglekļa piesaistei un uzglabāšanai ilgāku laika periodu (Rosenberg *et al.*, 2010; Steinbeiss *et al.*, 2009).

Dažas koģenerācijas stacijas piedāvā pelnus lauksaimniekiem, neprasot atlīdzību, piemēram, SIA „Liepājas enerģija” (Liepājas enerģija, 2012). Tā kā pelni var saturēt toksiskas vielas augstās koncentrācijās tad jāatceras, ka pirms jebkuru koksnes pelnu un bioogles izmantošanas lauksaimniecībā, mežsaimniecībā, ēku un ceļu veidošanas materiālos un citās nozarēs, ir nepieciešams izpētīt pelnu sastāvu, lai izvairītos no nevēlamām un neparedzētām sekām.

2. MATERIĀLI UN METODEDES

2.1. Izmantotie reaģenti un laboratorijas aprīkojums

Reaģenti:

- etiķskābe (Sigma Aldrich);
- sālsskābe (Sigma Aldrich);
- slāpekļskābe (Sigma Aldrich);
- heksāns (Sigma Aldrich);
- Segneta sāls (kālija-nātrija tartrāta šķīdums);
- Neslera reaģents (dzīvsudraba jodīda un kālija jodīda savienojums);
- dejonizēts (destilēts) ūdens ($<0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$, $18 \text{ M}\Omega \text{ cm}^{-1}$, Millipore Elix-3, Millipore Co).

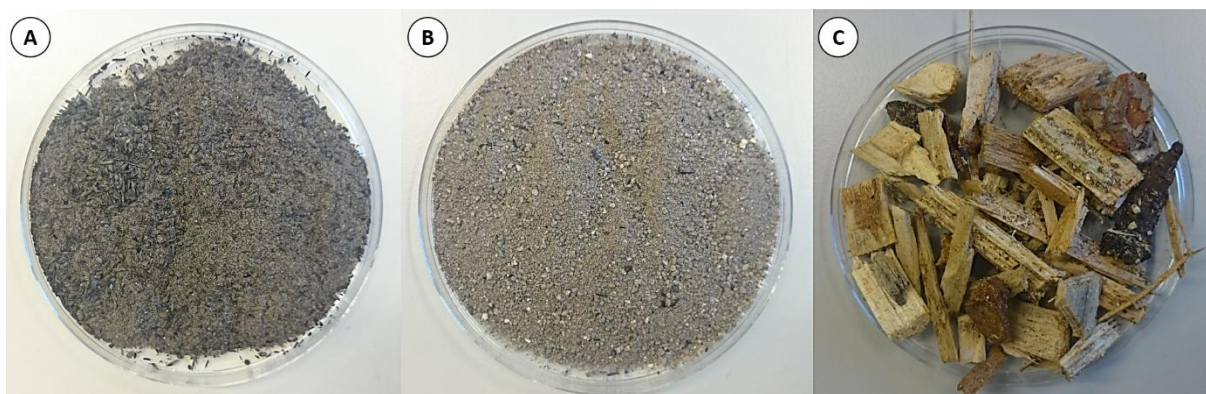
Ierīces un materiāli:

- analītiskie svāri (KERN ALJ 220-4, $\pm 0,0001$; Precisa Semi-micro scales ES 225SM-DR, $\pm 0,00001$ g);
- tehniskie svāri (KERN EW, $\pm 0,01$);
- termostats (Aqua Lytic, MicroBio Tests Inc.);
- sildīšanas bloks (Thermoblock, Biosan);
- žāvkāpīš (Plus II Oven, Labasco);
- centrifūga (Sigma 2-16P);
- gaisa sūkņš (ELITE 803, HAGEN);
- induktīvi saistītās plazmas spektrometrs ar optiskās emisijas detekciju (ICP-OES) (iCAP 7000, Thermo Scientific);
- mufelkrāšns (B180, Nabertherm);
- vortex-maisītājs (Janke & Kunkel IKA VF2 Vortex Mixer, Labasco);
- elektriskā plītiņa un maisītājs (JENWAY 1000, JENWAY);
- orbitālais kratītājs (PSU-20i, Biosan);
- spektrofotometrs (DR 2800, HACH);
- pH-metrs (pH 213, HANNA instruments; HI 991001 portable pH/Temperature meter, HANNA instruments; pH meter AM1605, ADRONA);
- elektrovadītspējas mērītājs (HI 9932, HANNA instruments);
- elementu analizators (EA-1108, Carlo Erba Instruments)
- stereomikroskops (Stemi 2000c, Carl Zeiss);
- dīgšanas testa plates (Phytotestkit, MicroBio Tests Inc.);
- celulozes kapsulas (Sartorius Stedim, Biotech);

- soksleta aparāts (BehrET2, Labor-Technik);
- gāzu hromatogrāfs (Clarus 580, Perkin Elmer);
- masselektīvais detektors ar kvadropolu tipa analizatoru (Clarus SQ 8 C, Perkin Elmer);
- toksicitātes tests *OSTRACODTOXKIT F* (MicroBio Tests Inc.);
- laboratorijas trauki no stikla un polipropilēna;
- sēklas: ārstniecības kliņģerīte *Calendula officinalis* (Lietuva), pļavas skarene *Poa pratensis* (Latvija), īsaugļu gurķi *Cucumis sativus L.* (Lietuva), kvieši *Triticum* (Latvija), mieži *Hordeum vulgare* (Latvija);
- kūdras substrāts (Suliflor);
- pilnmēslojums dārzeņiem un puķēm (VITO);
- biohumuss (Zemnieku saimniecība „Mežarājumi”).

2.2. Pelnu un bioogles paraugi

Pelnu paraugi tika iegūti 2016. gada septembrī, no koģenerācijas stacijas UAB „Aliejaus Investīciju Projektai”, Viļņā, Lietuvā. 7 atsevišķi paraugi (katrs 500 g) tika iegūti vienas nedēļas laikā (no 13.09.2016. līdz 19.09.2016). Paraugu iegūvi veica stacijas darbinieki pamatojoties uz procedūru, kas izstrādāta pēc Rey-Salgueiro *et al.* (2016). Paraugus ievāca plastmasas spaiņos ar hermētiskiem vākiem. Tika ievākti gan vieglo pelnu (*fly ash*), gan smago pelnu (*bottom ash*) paraugi, kā arī attiecīgajā dienā izmantotā kurināmā maisījuma jeb šķeldas (*fuel mix*) paraugi (2.1. attēls).



2.1. attēls. Pelnu un kurināmā maisījuma paraugi no Lietuvas koģenerācijas stacijas: a) vieglie pelni (*fly ash*); b) smagie pelni (*bottom ash*); c) kurināmais maisījums – šķelda (*fuel mix*) (autora foto)

Koģenerācijas stacija UAB „Aliejaus Investīciju Projektai” saražo elektroenerģiju un siltumu (23,8 MW) ar sadedzināšanas tehnoloģiju ”*moving grate*”, un ”*fire tube*” apkures katlu, sasniedzot 950°C temperatūru ar darbības ilgumu 8 000 h gadā. Galvenās koku sugas,

kas izmantotas koģenerācijas stacijā ir skuju koki (95%) ar nelielu lapu koku piejaukumu (5%), proti, bērzi (3%) un alkšņi (2%). Stacija izmanto šķeldas ar noteiktu izmēru – aptuveni 50×50×20 mm (garums, platums un biezums); ar mainīgu mitruma daudzumu, robežās no 35–60%. Maģistra darbā pētījumos tika izmantoti vieglie pelni.

Bioogle tika iegūta 2016. gada augustā no Latvijas elektroenerģijas un siltumenerģijas koģenerācijas stacijas Taurenē SIA „Tauresnes koģenerācijas stacija” (2.2. attēls). Paraugs tika ievākts plastikāta maisā.

Visi paraugi tika nogādāti LU Vides kvalitātes un monitoringa laboratorijā un uzglabāti sausā vietā istabas temperatūrā (+24°C).



2.2. attēls. Bioogle no SIA „Tauresnes koģenerācijas stacija” (autora foto)

Pirms paraugu turpmākas izpētes, katrs paraugs tika žāvēts 105°C žāvskapī (Plus II Oven, Labasco) līdz nemainīgam svaram. Tālākie pētījumi tika veikti izmantojot vienīgi žāvētos paraugus.

2.3. Vieglo pelnu un bioogles īpašību izpēte

Vieglo pelnu un bioogles raksturošana iekļāva fizikālā sastāva noteikšanu un ķīmisko īpašību analīzi, skābju-bāzu līdzsvara (pH) mērīšanu, elektrovadītspējas noteikšanu, karsēšanas zudumu noteikšanu (LOI – *loss-on-ignition*), kopējā elementu satura noteikšanu, elementu sadalījumu frakcijās, biogēnu un apmaiņas elementu noteikšanu un policiklisko aromātisko ogļūdeņražu (PAO) analīzi, piemērojot sagatavotas metodes.

2.3.1. pH un elektrovadītspējas noteikšana

3 g gaissausa parauga tika izšķīdināts 100 ml destilēta ūdens. pH_{H_2O} tika izmērīts izmantojot pH mērītāju (pH 213, Hanna Instruments). Elektrovadītspēja tika izmērīta ar

elektrovadītspējas mērītāju (HI9932, Hanna Instruments) (Carter & Gregorich, 2007; Pansu & Gautheyrou, 2006).

2.3.2. Karsēšanas zudumu (LOI) noteikšana

LOI noteikšana iekļāva sausnas, gravimetriskā ūdens, gaistošo vielu, pelnu un fiksētā oglekļa satura analīzi, izmantojot žāvkapi (Plus II Oven, Labassco) paraugu žāvēšanai 105°C vai mufeļkrāsni ($t_{\max}=1\ 100^{\circ}\text{C}$, Omron), paraugu dedzināšanai 950°C un 750°C (ASTM, 2013a; ASTM, 2013b).

2.3.3. Oglekļa, ūdeņraža, skābekļa un slāpekļa noteikšana

Oglekļa, ūdeņraža, skābekļa un slāpekļa satura noteikšanai tika izmantots elementu analizators (EA-1108, Carlo Erba Instruments) ar gāzu hromatogrāfijas metodi, kalibrēšanai izmantojot cistīnu (Sigma Aldrich) (Brewer, 2012; Meng *et al.*, 2014).

2.3.4. Biogēnu un apmaiņas elementu noteikšana

Nitrātjonu (NO_3^-) noteikšana (Cadmium reduction method). 3 g parauga disperģē 100 ml destilēta ūdens un krata 12 stundas, pēc tam paraugu filtrē. Pēc filtrācijas, 25 ml iegūtā parauga pievieno reaģentu „NitraVer[®] 5” un kārtīgi maisa 1 minūti. Pēc 5 minūtēm ar spektrofotometru mēra gaismas absorbciju pie 500 nm. Kā kontroles paraugu izmanto destilētu ūdeni.

Nitrātjonu (NO_2^-) noteikšana (Diazotization method). 3 g parauga disperģē 100 ml destilēta ūdens un krata 12 stundas un nofiltrē. Pēc filtrācijas, 25 ml iegūtā parauga pievieno „NitraVer[®] 3” un kārtīgi samaisa. Pēc 15 minūtēm ar spektrofotometru mēra gaismas absorbciju pie 507 nm. Kā kontroles paraugu izmanto destilētu ūdeni.

Amonija jonu (NH_4^+) noteikšana (Nesler method). 3 g parauga disperģē 100 ml destilēta ūdens un krata 12 stundas, nofiltrē. Pēc filtrācijas, 25 ml no iegūtā filtrāta mēra sorbciju pie 420 nm, tad pievieno 0,5 ml Segneta sāls šķīdumu un 1 ml Neslera reaģenta. Pēc 10 minūtēm mēra gaismas absorbciju pie 420 nm.

K, Ca, Mg, Na un P tika analizēti pēc ekstrakcijas ar $\text{CH}_3\text{COONH}_4$. 1 g gaissausa parauga tika ekstrahēts ar 1 M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ šķīdumu (Carter & Gregorich, 2007; Pansu & Gautheyrou, 2006). Apmaiņas elementu koncentrācija (K_{apm} , Ca_{apm} , Mg_{apm} , Na_{apm}) tika noteikta izmantojot ICP-OES (iCAP 7000, Thermo Scientific).

Apmaiņas elementu aprēķins tika veikts šādi:

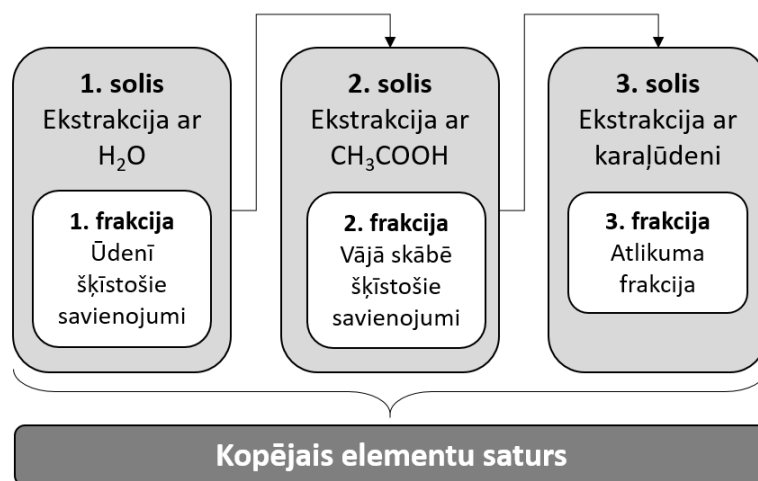
$$\text{El} = C \times (A \div B) \times (\text{OP}_{\text{El}} \div \text{MM}_{\text{El}}) \times 100, \quad (1)$$

kur El – elements (K, Ca, Mg un Na);

C – elementa koncentrācija, mg L⁻¹;
A – parauga tilpums, l;
B – parauga masa, g;
OP_{EI} – elementa oksidēšanās pakāpe;
MM_{EI} – elementa molārā masa, g mol⁻¹.

2.3.5. Elementu speciācijas analīze un kopējā elementu satura noteikšana

Koksnes pelnu elementu speciācijas analīze tika veikta 3 soļos, izmantojot adaptētas metodes (pēc Chen & Ma, 2001; Favas, 2013; Malandrino *et al.*, 2011; Mastro *et al.*, 2015; Okoro *et al.*, 2012; Tessier *et al.*, 1979) (2.3. attēls).



2.3. attēls. Shematisks pārskaits par 3 soļu speciācijas analīzi (izrādājis autors, izmantojot Vincēviča-Gaile, 2014)

Ūdenī šķīstošo savienojumu frakcija. 2 g parauga tika iebērts 40 ml uzsildītā destilētā ūdenī un kratīts 2 stundas. Paraugs tika filtrēts, papildīts līdz 50 ml atzīmei ar destilētu ūdeni un stabilizēts ar 0,2 ml HNO₃/H₂O (attiecībā 1:1) šķīdumu.

Vājā skābē šķīstošo savienojumu frakcija. Pēc pirmā soļa atlikušie nogulumi tika uzmanīgi savākti un samaisīti 40 ml 0,11 M CH₃COOH un kratīti 16 stundas. Paraugs tika filtrēts, papildīts līdz 50 ml atzīmei ar destilētu ūdeni un stabilizēts ar 0,2 ml HNO₃/H₂O (1:1) šķīdumu.

Atlikuma frakcija. Pēc otrā soļa atlikušie nogulumi tika uzmanīgi savākti un izšķīdināti 12 ml karaļūdens (koncentrētas slāpekļskābes un sālsskābes maisījums tilpuma attiecībās 1:3). Pēc 16 stundu noturēšanas istabas temperatūrā, pakāpeniski tika uzsākta sildīšana (3 stundas 110°C sildīšanas blokā) līdz paliek 2 ml šķīduma. Atdzesētie paraugi tika papildināti ar destilētu ūdeni līdz 50 ml atzīmei.

Elementu koncentrācijas (Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, Tl, V un Zn) tika noteiktas izmantojot ICP-OES spektrometru.

Kopējais elementu daudzums tika aprēķināts kā koncentrāciju summa, kas noteikta no iepriekš minēto 3 soļu speciācijas analīzēm.

Kopējais elementu daudzums tika aprēķināts šādi:

$$El_{\text{konc}} = \bar{U}d_{\text{šķ}} + Sk_{\text{šķ}} + At, \quad (2)$$

kur El_{konc} - elementa kopējā koncentrācija, mg kg^{-1} ;

$\bar{U}d_{\text{šķ}}$ - ūdenī šķīstošo savienojumu frakcija, mg kg^{-1} ;

$Sk_{\text{šķ}}$ - vājā skābē šķīstošo savienojumu frakcija, mg kg^{-1} ;

At - atlikuma frakcija, mg kg^{-1} .

2.3.6. Policiklisko aromātisko ogļūdeņražu (PAO) noteikšana

3,0 g gaissausa pelnu parauga tika ievietots celulozes kapsulās (Sartorius Stedim, Biotech) uz analītiskajiem svāriem (KERN ALJ 220-4, $\pm 0,0001$) un ekstrahētas ar 100 ml heksāna (Sigma Aldrich) Soksleta aparātā (BehrET2, Labor-Technik) uz 6 h 85°C temperatūrā. Pēc ekstrakcijas procedūras, ekstrakti tika ievietoti 100 ml vārglāzēs un atstāti istabas temperatūrā iztvaikot. Pēc iztvaikošanas atlikušais paraugs tika izšķīdināts 1 ml heksāna (Masto *et al.*, 2015). Paralēli tiek veikta kontroles paraugu apstrāde 3 atkārtojumos.

PAO koncentrācija tika noteiktas izmantojot gāzu hromatogrāfu (Clarus 580, Perkin Elmer) aprīkotu ar masselektīvo detektoru ar kvadrupolu tipa analizatoru (Clarus SQ 8 C, Perkin Elmer).

Savienojumu kvalitatīvās un kvantitatīvās analīzes realizētas ar poliaromātisko ogļūdeņražu analītisko standartu, kas satur 16 savienojumus acetonitrila šķīdumā. Savienojumu nosaukumi un ieregulētais jonu identifikatori, pie kuriem tie tika noteikti ir sekojoši: naftalīns (identifikācijas Nr.128), acenaftēns (152), acenaftilēns (153), fluorēns (166), fenantrēns (178), antracēns (178), fluorantēns (202), pirēns (202), benz[a]antracēns (228), krizēns (228), benzo[b]fluorantēns (252), benzo[k]fluorantēns (252), benzo[a]pirēns (252), indeno[1,2,3-c,d]pirēns (276), dibenzo[a,h]antracēns (278), benzo[g,h,i]perilēns (276). Papildus tika noteikts benzo[j]fluorantēns (252).

2.4. Augu dīgospējas un augšanas testi

Dīgospējas testi tiek pielietoti, lai novērtētu izmantoto sēklu dīgospējas potenciālu un izvēlēto augšanas apstākļu ietekmi uz sēklu attīstību. Sēklu dīgospējas testēšana laboratorijas apstākļos var tikt definēta kā sēklas attīstība līdz tādai fāzei, kad sēkla noteiktos vides apstākļos (piemēram, ūdens, augsne, substrāts, dūņas u.c.) spēj vai nespēj sasniegt tālākās attīstības fāzes. Sēklu dīgospēju ietekmējošo faktoru apzināšana un to ietekmes uz sēklu attīstību novērtēšana ir īpaši būtiska, jo iegūtā informācija ir praktiski izmantojama gan lauksaimniecības, gan dārzniecības un citās jomās (Ulvinen, 1973).

2.4.1. Testi ar ārstniecības kliņģerīti un pļavas skareni, izmantojot bioogli

Lai novērtētu ietekmi uz divdīgļlapja ārstniecības kliņģerītes *Calendula officinalis* sēklu dīgospēju un viendīgļlapja pļavas skarenes *Poa pratensis* augšanu, tika veikti divi tiešās saskarsmes dīgospējas testi dažādās bioogles koncentrācijās (5–100% no augšanas substrāta tilpuma). Eksperimentā izmantotās Latvijas izcelsmes pļavas skarenes sēklas iegūtas no sertificēta uzņēmuma (SIA „Latvijas Šķirnes Sēklas”). Ārstniecības kliņģerītes sēklas tika iegādātas komerciepakojumos sēklu mazumtirdzniecības vietā (ražotājs UAB agrofirma „Seklos”, Lietuva).

Dīgospējas testi ar ārstniecības kliņģerīti tika veikti izmantojot speciālas diedzēšanas testiem paredzētas *Phytotestkit* plates (ražotājs *MicroBioTests Inc*, Beļģija) kas ļauj novērtēt sēklu dīgospēju un augu agrīno attīstību dažādos substrātos vai piesārņotās augsnēs, salīdzinot to ar dīgospēju un augšanu kontroles substrātā vai augsnē (Baran & Tarnawski, 2013; *MicroBioTests*, 2004). Sēklas tika diedzētas 15 dienas bioogles ūdens izvilkumā. Kontroles paraugi tika iegūti diedzējot sēklas destilētā ūdenī.

Dīgospējas testi ārstniecības kliņģerītei tika veikti šādi:

- kontroles paraugi - dīgšanas testa platē tika ievietots ūdeni uzsūcošs pildmateriāls – medicīniskā vate, kas tika piesūcināta ar destilētu ūdeni. Pildmateriāls tika aplāts ar biezu, baltu un mitru filtrpapīru, uz kura tika uzliktas sēklas (10 sēklas katrā platē) un plate aizvērta ar caurspīdīgu plāksni, saskaņā ar *PHYTOTOXKIT* protokolu (*MicroBioTests*, 2004);
- bioogles paraugi - dīgšanas testa platēs tika ievietots noteikts daudzums bioogles, attiecīgi 5 grupās - 100% bioogle (5,5 g), 75%, 50%, 25% un 10% bioogle. 75%, 50%, 25% un 10% paraugos *Phytotestkit* platē papildus zem bioogles tika ievietota pilnībā samitrināta vate, aizpildot plates telpu zem bioogles un nodrošinot patstāvīgu, optimālu mitruma daudzumu. Substrāts tika noklāts ar filtrpapīru, kas tika pilnībā samitrināts un uz tā virsmas atbilstošā stāvoklī novietotas sēklas (10 sēklas katrā platē);

- plates tika novietotas vertikālā stāvoklī kartona ietvarā, termostatā (*Aqua Lytic*) +20°C temperatūrā, tumsā uz noteiktu laiku.

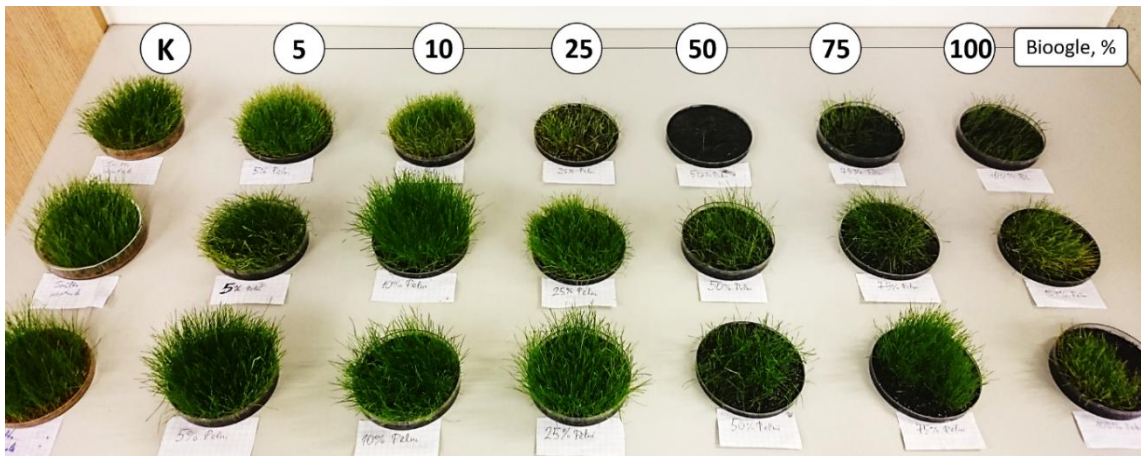
Pēc 15 dienām tika uzņemti rezultātu attēli, un tika mērīts sakņu un dzinumu garums, izmantojot *ImageJ* attēlu analīzes programmu (kļūda $\pm 0,001$ mm). Augi tika uzmanīgi noņemti no filtrpapīra, dīgsti un saknes tika savstarpēji atvienotas, un saknes tika skalotas ar destilētu ūdeni (bioogles daļiņu noņemšanai no saknes). Pēc žāvēšanas 96 stundas istabas temperatūrā (aptuveni +22°C) augiem tika noteikta dīgstu un sakņu biomasa, nosverot (KERN ALJ 220-4; $\pm 0,00001$ g). Dīgtspējas testi tika veikti trīs atkārtojumos.

Augšanas testi ar pļavas skareni tika veikti izmantojot Petri plates. Sēklas tika audzētas bioogles un izkarsētas smilts maisījumā. Kontroles paraugi auga smiltī bez bioogles. Datu kvalitātes nodrošināšanai, sēklas tika audzētas trīs atkārtojumos. Ņemot vērā Petri plates ietilpību un izmantojamo vielu blīvumu, tika noteikts, ka Petri platē optimāli var iepildīt 20 ml bioogles un smilts maisījuma. Sēklas tika audzētas 30 dienas, +19,5°C temperatūrā, pastāvīgā apgaismojumā. Paraugi tika regulāri laistīti, uzturot noteiktu mitruma daudzumu.

Augšanas testi ar pļavas skareni tika veikti šādi:

- kontroles paraugi – Petri platē tika iebērta karsēta smilts (pie 520°C, 4 stundas), kas tika samitrināta ar ūdeni. Katrā paraugā vienmērīgi pa visu Petri plati tika ievietoti 1,5 g pļavas skarenes sēklu;
- bioogles paraugi – Petri platēs tika ievietots noteikts daudzums bioogles, attiecīgi 6 grupās – 100% bioogle (atbilst 3,5 g), 75%, 50%, 25%, 10% un 5% bioogles. 75%, 50%, 25%, 10% un 5% paraugos Petri platē papildus tika ievietota smilts, lai aizņemtu noteikto 20 ml daudzumu. Paraugi tika samitrināti ar destilētu ūdeni. Katrā paraugā vienmērīgi pa visu Petri plati tika ievietotas 1,5 g pļavas skarenes sēklu.

Pēc 30 dienām tika mērīts sakņu un dzinumu garums 20 nejauši izvēlētiem augiem no katras Petri plates (2.4. attēls), izmantojot *ImageJ* attēlu analīzes programmu (kļūda $\pm 0,001$ mm). Izaudzētajiem augiem, izmantojot svarus, tika noteikta dīgstu un sakņu biomasa pēc žāvēšanas (KERN ALJ 220-4; $\pm 0,00001$ g).



2.4. attēls. Pļavas skarenes *Poa pratensis* augšanas tests 30. diena (no kreisās: K – kontrole un paraugi ar 5% līdz 100% bioogles saturu) (autora foto)

Iegūtie dati ļāva novērtēt dažādu bioogles koncentrāciju ietekmi uz sēklu dīgtspēju, sēklu izdzīvošanu, dīgstu un sakņu garuma izmaiņām.

2.4.2. Testi ar pļavas skareni un īsaugļu gurķi, izmantojot vieglos pelnus

Lai novērtētu ietekmi uz viendīgļlapja pļavas skarenes *Poa pratensis* un divdīgļlapja īsaugļu gurķa *Cucumis sativus L.* sēklu dīgtspēju, tika veikti divi tiešās saskarsmes dīgtspējas testi dažādās vieglo pelnu koncentrācijās (no augšanas substrāta tilpuma). Eksperimentā izmantotās Latvijas izcelsmes pļavas skarenes sēklas iegūtas no sertificēta uzņēmuma (SIA „Latvijas Šķirnes Sēklas”). Lauka gurķa sēklas tika iegādātas no Lietuvas sēklu ražotāja (UAB agrofirma „Seklos”).

Dīgtspējas testi pļavas skarenei tika veikti izmantojot Petri trauciņus. Sēklas tika audzētas vieglajos pelnos un izkarsētās smiltīs. Kontroles paraugi auga tīrā smiltī bez pelniem. Datu kvalitātes nodrošināšanai, sēklas tika audzētas trīs atkārtojumos. Dīgtspējas testi pļavas skarenei tika veikti šādi:

- kontroles paraugi – Petri trauciņā tika iebērta karsēta smiltis (pie 520°C, 4 stundas). Ņemot vērā Petri trauciņa ietilpību un izmantojamo vielu blīvumu, tika noteikts, ka Petri trauciņā iepildīs 20 ml pelnu un smiltis maisījuma. Katrā paraugā vienmērīgi pa visu Petri trauciņu tika ievietotas 100 pļavas skarenes sēklas;
- pelnu paraugi – Petri trauciņos tika ievietots noteikts daudzums pelnu, attiecīgi 100% pelnu (atbilst 3,5 g), 75%, 50%, 25%, 10% un 5% pelnu. 75%, 50%, 25%, 10% un 5% paraugos Petri trauciņā papildus tika ievietota smiltis. Katrā paraugā vienmērīgi pa visu Petri trauciņu tika ievietotas 100 pļavas skarenes sēklas.

Pēc 23 dienām no katras grupas tika saskaitīti visi izaugušie augi, izmantojot *ImageJ* programmu tika mērīts šo augu sakņu un dzinumumu garums. Izaudzētajiem augiem tika noteikta kopējā dīgstu un sakņu biomasa (KERN ALJ 220-4; $\pm 0,00001$ g) pēc žāvēšanas.

Dīgtspējas testi īsaugļu gurķim, līdzīgi kā ārstniecības kliņģerītei, tika veikti izmantojot *Phytotestkit* plates. Sēklas tika audzētas 8 dienas vieglo pelnu ūdens izvilkumā, par pamatni izmantojot karsētas smiltis (pie 520°C, 4 stundas). Kontroles paraugi tika audzēti karsētās smiltīs, kas piepildītas ar destilētu ūdeni. Salīdzināšanai, viena testa grupa trīs atkārtojumos, dīga šķīdumā ar VITO augu pilnmēslojumu (attiecība VITO/ūdens – 1 vāciņš (10 ml) uz 1 L ūdens, saskaņā ar norādēm uz iepakojuma).

Dīgtspējas testi īsaugļu gurķim tika veikti šādi:

- kontroles paraugi - dīgšanas testa platē tika ievietota smiltis, kas tika piepildīta ar destilētu ūdeni. Smiltis tika apklāta ar biezu, baltu un mitru filtrpapīru, uz kura tika uzliktas sēklas (10 sēklas katrā platē) un plate aizvērta ar caurspīdīgu plāksni, saskaņā ar *PHYTOTOXKIT* protokolu (MicroBioTests, 2004);
- vieglo pelnu paraugi - dīgšanas testa platēs tika ievietots noteikts daudzums pelnu, attiecīgi 3 grupās - 13%, 10% un 7% pelnu. Šādas koncentrācijas tika izmantotas balstoties uz iepriekšējo testu rezultātiem (ārstniecības kliņģerītei un pļavas skarenei), kur vislabākos rezultātus uzrādīja grupas ar 10% pelnu saturu. *Phytotestkit* platē papildus zem pelniem tika ievietota smiltis, aizpildot plates telpu zem pelniem un nodrošinot patstāvīgu, optimālu mitrumu. Virsū tika uzklāts pilnībā samitrināts filtrpapīrs, uz kura virsmas atbilstošā stāvoklī novietotas 10 sēklas;
- plates tika novietotas vertikālā stāvoklī kartona ietvarā, termostatā (*Aqua Lytic*; +25°C temperatūrā, tumsā).

Pēc 8 dienām tika uzņemti attēli un mērīts sakņu un dzinumumu garums, izmantojot *ImageJ* attēlu analīzes programmu (kļūda $\pm 0,001$ mm). Augus uzmanīgi noņēma no filtrpapīra, dīsgti un saknes tika savstarpēji atvienotas un saknes skaloja ar destilētu ūdeni (sakņu atbrīvošanai no pelniem). Pēc 96 stundu žāvēšanas istabas temperatūrā (22°C) augiem tika noteikta dīgstu un sakņu biomasa, sverot (KERN ALJ 220-4; $\pm 0,00001$ g).

Iegūtie dati ļāva novērtēt dažādu vieglo pelnu koncentrāciju ietekmi uz sēklu dīgtspēju, sēklu izdzīvošanu, dīgstu un sakņu garumu izmaiņām.

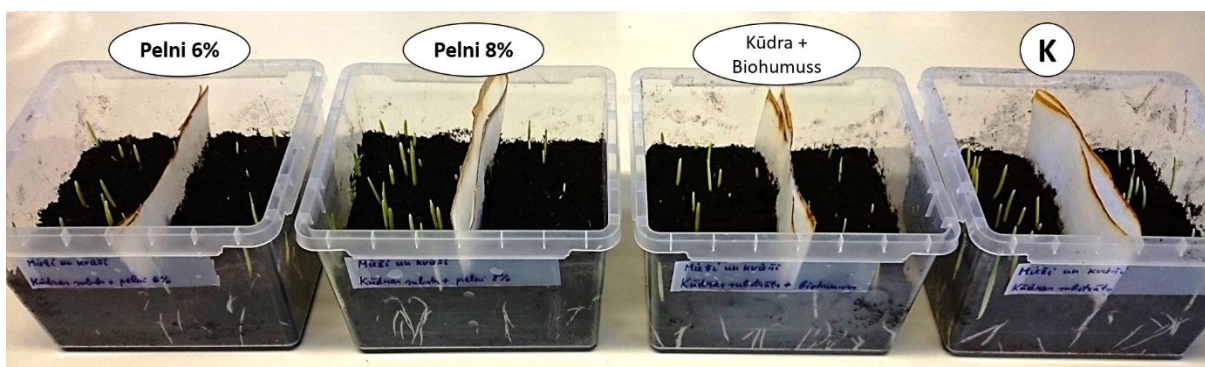
2.4.3. Testi ar miežiem un kviešiem, izmantojot vieglos pelnus

Mieži *Hordeum vulgare* un kvieši *Triticum* sp. tika audzēti, izmantojot vieglos pelnus, kūdras substrātu un biohumusu. Pirms testa sākšanas, 24 stundas starp samitrinātiem filtrpapīriem tika diedzētas sēklas. Tālāk tika sagatavota augsne:

- kontroles paraugi – 450 ml kūdras substrāta (Suliflor) samitrināta ar destilētu ūdeni;
- vieglo pelnu paraugi – 450 ml kūdras substrāts ar 6% un 8% vieglo pelnu (pēc tilpuma, attiecīgi ± 27 ml un ± 36 ml);
- biohumuss – 300 ml kūdras substrāta ar 100 ml biohumusa, pēc ražotāja norādījumiem biohumusa izmantošanai stādu audzēšanā (ZS „Mežārājumi”) un destilēts ūdens.

Biohumuss (vermikoposts, slieku komposts) šajā testā tika izvēlēts, lai pārbaudītu atšķirības starp organisku mēslošanas līdzekli un pelniem, kurus pēc MK noteikumiem Nr.506 potenciāli varētu izmantot kā organisko un organominerālo mēslošanas līdzekli un kaļķošanas materiālu, netipisko mēslošanas līdzekli un augu augšanas veicinātāju.

Sagatavotā augsne tika rūpīgi samaisīta. Puse no sagatavotās augsnes tika ievietota plastmasas konteinerā. Vienā konteinerā pusē tika ievietotas miežu, otrā – kviešu sēklas. Sēklām pa virsu tika uzberāta atlikusī augsne. Konteinerus uzglabāja laboratorijā $+22^{\circ}\text{C}$ (2.5. attēls).



2.5. attēls. Miežu *Hordeum sp.* un kviešu *Triticum sp.* augšanas tests; 2. diena pēc iestādīšanas (autora foto)

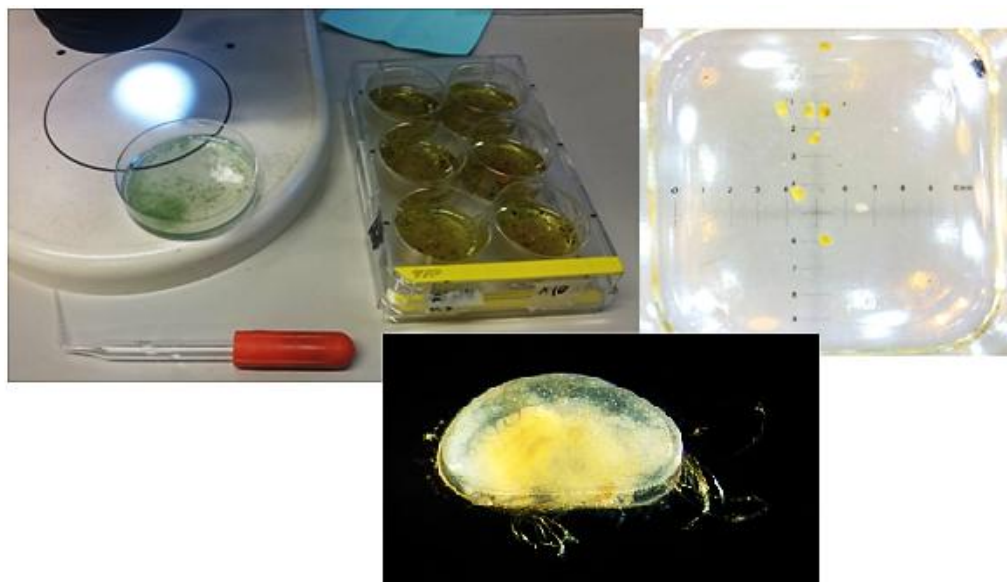
Augi tika audzēti 16 dienas, beigās tika uzņemti attēli un mērīts sakņu un dzinumu garums, izmantojot *ImageJ* attēlu analīzes programmu (kļūda $\pm 0,001$ mm). Saknes tika savstarpēji atvienotas un skalotas ar destilētu ūdeni (sakņu atbrīvošanai no pelniem).

2.5. Toksicitātes tests ar *Heterocypris incongruens*

Lai novērtētu pelnu ietekmi uz saldūdens dzīvniekiem tika veikts 6 dienas ilgs tiešās saskares tests, izmantojot bentosa gliemeņvēžus *Heterocypris incongruens*, kas tika audzēti pelnu-ūdens maisījumā (2.6. attēls). Testi tika veikti izmantojot speciālus *MicroBioTests Inc.* sagatavotos testkomplektus, kas satur visus nepieciešamos materiālus, ieskaitot testa organismus, lai veiktu vienkāršu, ātru un jutīgu toksicitātes testu. *Heterocypris incongruens* tiek pielietots kā bioindikators, izpētot atšķirīgus vides apstākļus ūdens vidē

(Ruiz *et al.*, 2013). *Heterocypris incongruens* ir plaši izplatīta suga un var tikt atrasta dažādās saldūdens bentiskajās dzīvotnēs visos kontinentos (Ostracodtoxkit F, 2017).

Šis tests ir paredzēts gan saldūdens nogulumu izpētei, gan augsnēm, kas piesārņotas ar neorganiskajiem, organiskajiem savienojumiem un metāliskajiem elementiem (Ostracodtoxkit F, 2017).



2.6. attēls. Toksicitātes tests izmantojot bentosa gliemenvēzi *Heterocypris incongruens* (augšā autora foto)

Pirms toksicitātes testa bija nepieciešams veikt vairākus sagatavošanas darbus: kā standarta ūdens sagatavošanu (destilēta ūdens un sāļu (NaHCO_3 , CaSO_4 , MgSO_4 , KCl) sajaukums), ostrakodu cistu inkubēšanu, svaigi izšķīlušos ostrakodu barošanu un garuma mērīšanu. Visi sagatavošanas darbi tika veikti precīzi saskaņā ar *MicroBioTests Inc. Ostracodtoxkit F Standard operational procedure* instrukciju (Ostracodtoxkit F, 2017).

Otrais posms ietvēra pelnu-ūdens maisījuma sagatavošanu, ostrakodu barības sagatavošanu un ostrakodu inkubēšanu. Izmantojot doto instrukciju, darbības tika pielāgotas pelnu-ūdens maisījuma testēšanai:

1. pelnu-ūdens maisījuma sagatavošana – noteiktu daudzumu pelnu (2 g un 5 g) disperģē 1 litrā ūdens un liek kratītājā uz 24 h. Sakarā ar pelnu-ūdens maisījuma augsto sārmainību, pH vērtību bija nepieciešams pazemināt. *Heterocypris incongruens* optimālais pH ir robežās 6–10 (Ruiz *et al.*, 2013), tādēļ maisījuma pH tika pazemināts līdz 8 ± 0.2 . pH pazemināšanai tika izmantota 0,11 M etiķskābe (Sigma Aldrich);
2. aļģu suspensijas sagatavošana – 1 tūbiņai ar aļģu pērlītēm pievieno 7 ml šķīdināšanas līdzekļa (*Matrix dissolving medium*);
3. aļģu atbrīvošana – tūbiņu ar aļģu pērlītēm ievieto virpuļmaisītājā (Janke & Kunkel IKA VF2 Vortex Mixer, Labasco) un gaida, kamēr aļģes ir atbrīvotas. Tūbiņu

centrifugē 10 minūtes ar 3000 apgriezieniem minūtē un saturu uzmanīgi dekantē, aļģes atstājot tūbiņā. Tūbiņai pievieno 10 ml tīra ūdens, sakrata to, lai sajauktu aļģes. Tāpat kā iepriekš tūbiņu atkal centrifugē un dekantē. Pēc tam tūbiņai pievieno 10 ml standarta saldūdeni. Aļģu suspensiju izlej 25 ml mērkolbā un aizpilda to ar standarta saldūdeni līdz atzīmei. Aizvāko kolbu un sakrata, lai iegūtu homogēnu aļģu suspensiju;

4. sedimentu, aļģu un ostrakodu pievienošana testa platēs - katrā testa plates iedobē ielej 2 ml standarta saldūdeni. Ar speciālu lāpstiņu piepilda katru iecirkni ar kontroles sedimentiem (pievieno 2 lāpstiņas, katra satur ap 500 µl). Ar pipeti katrā iecirknī pievieno 2 ml aļģu suspensijas un skatoties mikroskopā katrā iedobē ievieto 10 ostrakodus;
5. pelnu-ūdens maisījuma pievienošana – 2 ml sagatavotā pelnu-ūdens maisījumu ielej katrā iedobē;
6. ostrakodu inkubēšana – testa plates aplāj ar parafilmas plēvi un pa virsu uzliek plates vāciņu. Testa plati inkubē 25°C temperatūrā, tumsā, 6 dienas.

Pēc 6 dienu ekspozīcijas, tika uzskaitīti visi dzīvie ostrakodi un izmērīts to garums, kā noteikts protokolā (Ostracodtoxkit F, 2017). Ostrakodu garuma mērīšanai tika izmantots stereomikroskops (Stemi 2000c, Carl Zeiss).

Rezultātu apstrāde ietvēra testorganismu procentuālo mirstības aprēķināšanu un ostrakodu augšanas nomākšanu (%) attiecībā pret kontroli.

Mirstību aprēķina pēc formulas:

$$M = B \div A \times 100, \quad (3)$$

kur M – mirstība, %;

A – izmantoto ostrakodu skaits testa sākumā;

B – mirušo ostrakodu skaits testa beigās.

Augšanas nomākšana ir otrs kritērijs pēc mirstības, kas ļauj novērtēt subletālu testējamās vielas ietekmi. Augšanas nomākšana tiek noteikta testa beigās, salīdzinot izdzīvojušo ostrakodu garumus testējamajā paraugā ar kontroles paraugu. Šis rādītājs ir pielietojams gadījumos kad testējamā viela nerada letālus rezultātus. Tādēļ augšanas nomākšana ir jānosaka gadījumos kad mirstība ir novērojama zemāk par 30% (Ostracodtoxkit F, 2017).

Augšanas nomākšanu aprēķina pēc formulas:

$$AN = 100 - (A \div B \times 100), \quad (4)$$

kur AN – augšanas nomākšana, %;

A – ostrakodu garums kontroles paraugā;

B – ostrakodu garums pelnu paraugā.

Kopumā tika veikti 2 testi. Pirmais tests tika veikts, lai noskaidrotu *Heterocypris incongruens* jutīgumu pret pelnu-ūdens paraugu un metodes pielietojamības konkrētajam pētījumam pārbaudi. Otrajā testā tika izmantoti 2 pelnu-ūdens maisījuma paraugi – attiecīgi 2 g uz 1 l ūdens un 5 g uz 1 l ūdens, kā arī šo maisījumu desmitkārtīgs atšķaidījums ar ūdeni.

2.6. Kvalitātes kontrole un datu apstrāde

Analizējot elementu saturu, ļoti būtiski izvairīties no jebkāda paraugu kontakta ar vielām, kas varētu tos piesārņot, īpaši metāliem, tāpēc laboratorijas darba ietvaros tika izmantoti tādi plastmasas un stikla laboratorijas trauki, kuri pirms izmantošanas tika vismaz 6 h noturēti 5% HNO₃ un pēc tam skaloti trīs reizes ar dejonizētu ūdeni.

Lai iegūtu pēc iespējas reprezentatīvākus eksperimentu rezultātus, eksperimenti tika veikti ar 3 atkātojumiem. 3 soļu speciācijas analīze tika veikta ar kontroles paraugiem (*blank*), kurus izmantoja atkarībā no pielietotās metodes.

Augu dīgspējas un augšanas testu datu apstrādei tika izmantota MS Excel programma, nosakot dažādus statistiskos parametrus – vidējo vērtību (*average*) un standartkļūdu (*standard error*). Aprēķinātās vidējās vērtības no katra eksperimenta, tika izmantotas tālākām analīzēm; standartkļūda (*standard error*) ir norādīta attēlos rezultātu sadaļā. Augu dīgstu un sakņu mērīšanai tika izmantota *ImageJ* attēlu analīzes programmu ar precizitāti līdz $\pm 0,001$ mm.

Ar SPSS programmu tika veikts ANOVA tests, kur tika salīdzināta pelnu koncentrācija ar ostrakodu garumiem, izmantojot Šeffes metodi (*Scheffe*).



3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

Gadu tūkstošiem augsnes auglības uzlabošanai tiek izmantoti dažādi dabiski mēslošanas līdzekļi, tajā skaitā koksnes sadedzināšanas atlikumi – pelni un bioogle. Pētījumi par koksnes pelnu un bioogles izmantošanu kā mēslošanas līdzekli ir aktuāli visā pasaulē.

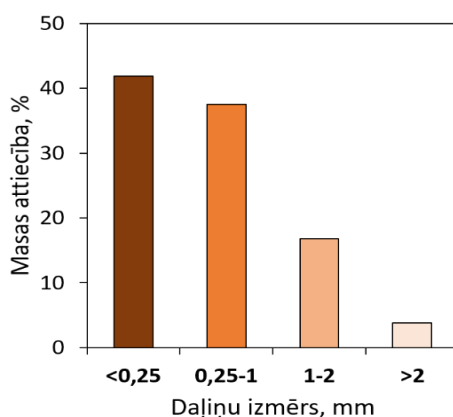
Pirms jebkuru biomasas pelnu un bioogles izmantošanas lauksaimniecībā, mežsaimniecībā un citās nozarēs, ir nepieciešams izpētīt pelnu sastāvu, ķīmiskās un fizikālās īpašības, lai izvairītos no nevēlamām un neparedzētām sekām. Maģistra darbā tika izpētīts arī vieglo pelnu un bioogles ietekme uz viendīgļlapju un divdīgļlapju sēklu dīgtspēju un augšanu dažādās pelnu koncentrācijās kā arī novērtēts vieglo pelnu toksicitāte. Pētījumā tika izmantoti UAB „Aliejaus investīciju projekta” viegie pelni un SIA „Tauresnes koģenerācijas stacija” bioogle (3.1. tabula).

3.1. tabula

Pētīto koksnes vieglo pelnu un bioogles paraugi

Paraugs	Parauga izcelsme	Parauga apraksts
Viegie pelni	UAB „Aliejaus investīciju projekta”, Lietuva	Pelēcīgi-meln pulveris
		
Bioogle	SIA „Tauresnes koģenerācijas stacija”	Meln pulveris ar spīdumu
		

Ar sietu analīzes metodi tika noteikta vieglo pelnu daļiņu izmēri (WSDOT, 2015). Rezultāti parāda, ka lielākā pelnu daļa sastāv no daļiņām, kas ir mazākas par 0,25 mm un masas attiecība ir atkarīga no daļiņu izmēra: jo mazāks ir daļiņu izmērs, jo lielāka ir masas attiecība (3.1. attēls).



3.1. attēls. Vidējais svērtais daļiņu izmērs un masas attiecība vieglajos pelnos

3.1.1. Vieglo pelnu pH vērtība, elektrovadītspēja un LOI

Analizētie veglie pelni uzrāda augstu pH vērtību (12,31), ko nosaka metālu sāļu, oksīdu, hidroksīdu un karbonātu klātbūtne (Van Herck & Vandecastelle, 2001; Pan & Eberhardt, 2011). Citos pētījumos vieglo pelnu pH vērtības ir zemākas, proti, pH 9–9,8, kas ir skaidrojams ar degšanas apstākļiem (Pan & Eberhardt, 2011; Mastro *et al.*, 2015). Arī bioogles pH vērtība bija augsta – 12,3. Pētījumos ir norādīts līdzīgs pelnu saturs, piemēram Pan & Eberhardt (2011) vieglo pelnu paraugos pelnu saturs ir 50,9% (3.2. tabula).

3.2. tabula

Potenciometriskie un LOI parametri vieglajos pelnos

Parametrs	Noteiktā vērtība
pH _{H2O}	12,31
Elektrovadītspēja, mS cm ⁻¹	10,84
Gravimetriskā ūdens saturs, %	1,51
Sausnas saturs, %	98,49
Gaistošo vielu saturs, %	8,82
Pelnu saturs, %	62,14
Fiksētā oglekļa daudzums, %	27,53

Vairākos pētījumos ir norādīts, ka koksnes pelnu pievienošana ir paaugstinājusi augsnes pH, pateicoties pelnus saturošu oksīdu, hidroksīdu un karbonātu šķīšanai (Vance, 1996; Chirenje & Ma, 2002; Mandre *et al.*, 2006). No vienas puses augsnes pH un elektrovadītspējas ievērojams pieaugums nav vēlams un var nelabvēlīgi ietekmēt augu augšanu, kā arī var veicināt minerālu dēdēšanu. No otras puses, bāziska rakstura koksnes vieglie pelni var veicināt skābju neitralizēšanos augsnēs un var novest pie zemākas bīstamo elementu mobilitātes un bioloģiskās pieejamības un samazinātu skābju izskalošanos ūdeņos kā arī toksicitāti tādiem mikroelementiem kā Al, Mn un Fe (Vassilev *et al.*, 2014). Vieglo

pelnu ilgspējīga izmantošana var uzlabot augsnes struktūru, ūdens noturēšanas spēju un aerāciju, kā arī var nodrošināt labākus vides apstākļus augsnes mikroorganismiem (Vassilev *et al.*, 2013).

3.1.2. Vieglo pelnu elementsastāvs

Elementsastāva analīzes (C_{org} , H, N un O, kā arī H/C_{org} un O/C_{org} molārā attiecība) rezultāti ir apkopoti 3.3. tabulā. Noteiktais C, H un N sastāvs ir līdzīgs kā literatūrā, piemēram, Pan & Eberhardt (2011) pētījumā elementsastāvs vieglajiem pelniem ir: C 47,6%, H 0,82% un N 0,15%.

3.3. tabula

Vieglo pelnu bioogles elementsastāva analīzes rezultāti

Parametrs	Vērtība
Organiskais ogleklis, %	49,4
Ūdeņradis, %	0,7
Slāpekļis, %	0,2
Skābeklis, %	49,7
Molārā attiecība H/C_{org}	0,01
Molārā attiecība O/C_{org}	1,01

Iegūtie dati atklāj, ka analizētajos koksnes pelnos ir augsts C_{org} (gandrīz 50%). Tādēļ, var spriest, ka iegūtie koksnes pelni ir ļoti līdzīgi biooglei, kas ir iegūta pirolīzes procesā skābekļa trūkumā. Biooglei organiskā oglekļa saturs pārsniedz 50% (EBC, 2012).

Molārā attiecība H/C_{org} ir karbonizācijas pakāpes indikators un tas ir viens no svarīgākajiem bioogli raksturojošajiem parametriem (EBC, 2012). Tāpēc, H/C_{org} molārā attiecība var tikt izmantota pelnu un bioogles stabilitātes raksturošanai. Proporciju vērtības var svārstīties un ir atkarīgas no biomasas un sadegšanas procesa. Vērtības, kas pārsniedz 0,7 norāda uz pirolīzes trūkumiem (skābekļa klātbūtne), bet biooglei H/C_{org} attiecībai vajadzētu būt mazākai par 0,7 (EBC, 2012). Noteiktā H/C_{org} attiecība vieglajiem pelniem norāda uz līdzību ar bioogli.

Galvenie faktori H/C_{org} un O/C_{org} attiecību vērtībām ir temperatūra, skābekļa daudzums un degšanas ilgums (Schimmelpfenning & Glaser, 2012). Ir ziņots, ka temperatūras virs 350°C H/C_{org} un O/C_{org} rādītāji parasti ir zemi, bet temperatūrās virs 500°C H/C_{org} attiecība ir mazāka kā 0,5. Temperatūrās ap 350°C tiek saglabātas karboksil- un hidroksilgrupas, bet temperatūrās virs 500°C tās tiek likvidētas (Hammes *et al.*, 2008; Krull *et al.*, 2009; Schimmelpfenning & Glaser, 2012). Tas var būt saistīts ar noteiktajām H/C_{org} un O/C_{org}

attiecību vērtībām koksnes pelnos. Tomēr molārajai attiecībai biooglē vajadzētu būt mazākai par 0,4 (EBC, 2012).

3.1.3. Biogēnu un apmaiņas elementu saturs vieglajos pelnos un biooglē

Vieglajos pelnos un biooglē konstatētais minerālā slāpekļa savienojumu koncentrācija ir apkopots 3.4. tabulā.

3.4. tabula

Minerālā slāpekļa savienojumu koncentrācija vieglo pelnu un bioogles ūdens izvilkumā, mg kg⁻¹

Savienojums	Vieglie pelni	Bioogle
Amonija slāpekļis, N-NH ₄	1,83	34,41
Amonijs, NH ₄	2,36	44,32
Nitrātu slāpekļis, N-NO ₃	59,96	83,33
Kopējais nitrātu daudzums, NO ₃	265,45	368,86
Nitrītu slāpekļis, N-NO ₂	0,47	0,63
Kopējais nitrītu daudzums, NO ₂	1,53	34,16

Par slāpekļa savienojumiem vieglajos pelnos, kas iegūti no biomasas ir ļoti maz informācijas. Vidēji var vērtēt tā, ka slāpekļa koncentrācija samazinās pieaugot sadegšanas temperatūrai. Rajkovich vadītā pētījumā (2012) par bioogli ir norādīts, ka pirolīzes temperatūrai ir būtiska nozīme slāpekļa koncentrācijā. Zemās pirolīzes temperatūrās, bioogle, kas iegūta no mājputnu mēsliem, satur par 33% vairāk slāpekļa nekā kontrole, bet kukurūzas augšana biooglē, kas iegūta augstākās pirolīzes temperatūrās, samazinājās (Rajkovich *et al.*, 2012).

Kopējā N koncentrācija koksnes vieglajos pelnos ir aptuveni 0,9 g kg⁻¹. Var pieņemt, ka praktiski viss N paraugā ir organiskais N, kas veido 0,2% no parauga daļas, kas nav pilnībā sadedzis. Arī augsnē vairāk kā 90% no N ir saistīts organiskajās formās, kas hidrolizējas par NH₄; tas savukārt var tikt oksidēts par NO₃, norādot uz noteiktu augsnes baktēriju aktivitāti (Manahan, 2000). Amonija slāpekļis un nitrātu slāpekļis parasti tiek pielietoti kā slāpekļa mēslojums augsnēm, bet šie savienojumi analizētajos koksnes pelnos konstatēti nelielā koncentrācijā. Bioogles gadījumā amonija slāpekļa un nitrātu slāpekļa koncentrācija ir augstāka un līdz ar to analizētā bioogle kā mēslojums var būt vērtīgāka nekā pelni. Slāpeklim kā vienam no galvenajiem augu barības elementiem ir ļoti būtiska nozīme augu barošanās procesā, biomasas veidošanā un augkopības produkcijas kvalitātes nodrošināšanā (Lipenīte u.c., 2016). Tā piemēram, pētījuma Lietuvā noteikts, ka laukaugu ražas vislabāk korelē ar augsnes minerālā slāpekļa saturu, vājāka korelācija – ar nitrātu slāpekļa saturu, bet

visvājāk ar amonija slāpekļa saturu (Staugaitis *et al.*, 2007). No augu barības elementiem ražas veidošanai slāpeklis proporcionāli tiek patērēts visvairāk (Lipenīte u.c., 2016).

3.5. tabula

Barības/apmaiņas elementu koncentrācijas vieglajos pelnos

Elements	Koncentrācija pa frakcijām, mg kg ⁻¹			
	Ūdenī šķīstošs	Vajā skābē šķīstošs	Atlikušais	Kopējais
Fosfors	4,93	164,08	6 006,01	6 175,01
Kālijs	2 324,10	6 103,57	8 906,63	38 250,95
Kalcijs	15 559,53	17 983,86	58 580,88	92 124,17
Magnijs	12,62	1 248,54	11 022,43	12 283,60
Nātrijs	645,41	159,40	814,73	1 619,53

Kopējā P koncentrācija (6 g kg⁻¹) (3.5. tabula) pētītajos koksnes pelnos nevar tikt uzskatīta par augstu, ne arī par zemu, salīdzinājumā ar citiem pētījumiem, kur P koncentrācija variēja no 10 mg kg⁻¹ līdz 14 g kg⁻¹ (Chirenje & Ma, 2002; Pitman, 2006; Krakow, 2010; Fūzesi *et al.*, 2015). Augstās pH vērtības norāda uz augsto sārmu un sārmzemju metālu saturu, kas arī tika konstatēts. K koncentrācija (38 g kg⁻¹) ir ļoti līdzīga kā minēts literatūras avotos (30–54 g kg⁻¹) (Chirenje & Ma, 2002; Pitman, 2006; Krakow, 2010; Fūzesi *et al.*, 2015). P un K šķīšanas ātrums un pieejamība ir atkarīga no augsnes pH (Etiégni & Campbell, 1991; Ohno, 1992). Ja aplūkojam N, P, K tipa mēslojumus, tad P un K koncentrāciju attiecībām vajadzētu būt vairāk vai mazāk atbilstošām, bet noteikti būtu nepieciešams pievienot papildus N augiem uzņemamās formās.

Pelnu paraugos konstatētā paaugstinātā Na koncentrācija ir vērtējama kā nelabvēlīga augu kultūrām. Koncentrācijas, kas pārsniedz 1,6 g kg⁻¹ var rezultēties ar nelabvēlīgu augsnes sasāļošanu (Fūzesi *et al.*, 2015), tomēr, ja ņem vērā Na sadalījumu frakcijās, vairāk kā 50% no Na ir saistīts atlikuma frakcijā, kuru raksturo tā zemā šķīdība un iespējams šajā gadījumā tā nelabvēlīgā ietekme nav tik izteikta.

Līdzīgi kā maģistra darba pētījumā tika konstatēts arī literatūrā ir minēts, ka augstā Ca koncentrācija koksnes vieglajos pelnos saistās ar to, ka koksne Ca savienojumi augstās koncentrācijās ir dabiski sastopami (Van Herck & Vandecastelle, 2001; Pan & Eberhardt, 2011).

Bioogles gadījumā (3.6. tabula) fosfora, kālija, kalcija, magnija un nātrija koncentrācijas ir mazākas kā vieglajos pelnos (3.5. tabula).

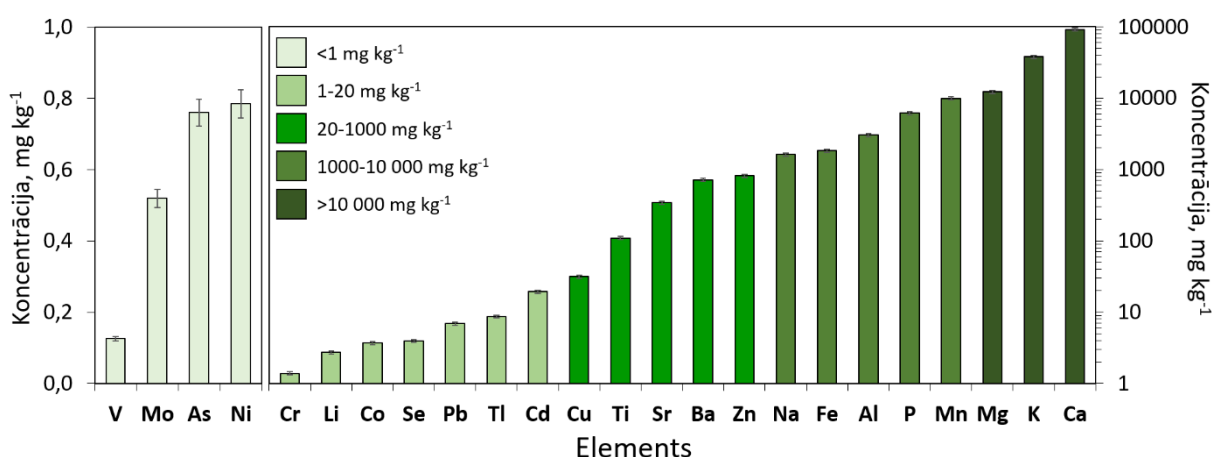
Barības/apmaiņas elementu koncentrācijas biooglē

Elements	Koncentrācija pa frakcijām, mg kg ⁻¹			
	Ūdenī šķīstošs	Vajā skābē šķīstošs	Atlikušais	Kopējais
Fosfors	7,05	185,93	2 064,62	2 257,60
Kālijs	14 068,59	3 840,14	1 915,91	19 824,65
Kalcijs	19 723,59	14 712,43	20 985,96	55 421,98
Magnijs	5 287,13	2 300,74	2 480,61	10 068,48
Nātrijs	81,77	27,99	44,64	154,40

Jāatzīmē, ka ķīmiskie elementi biooglē, izņemot fosforu, lielāko daļu saistīti ūdenī šķīstošo savienojumu frakcijā, līdz ar to bioogli veidojošie barības un apmaiņas elementi ir vairāk pieejami augiem, ko nosaka to atrašanās forma.

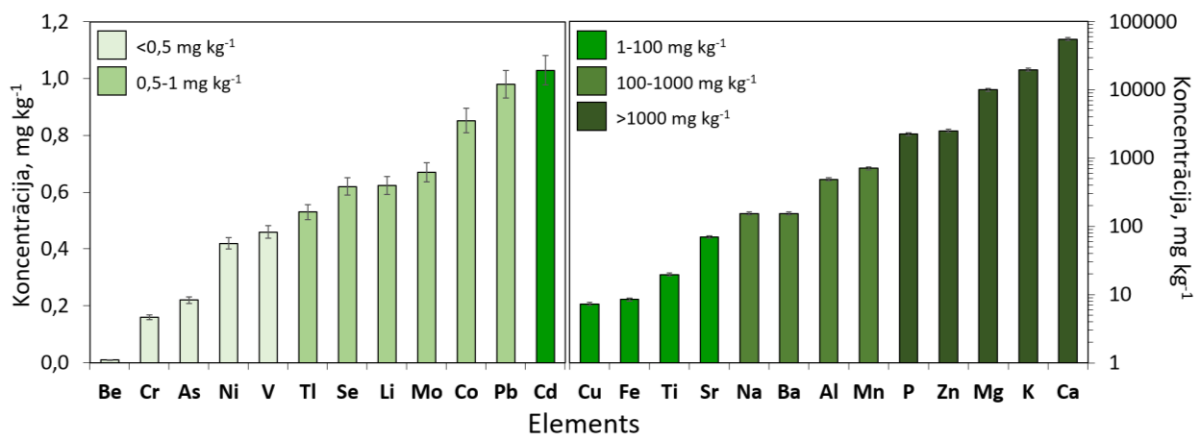
3.1.4. Elementu speciācijas analīze un kopējais elementu saturs

Pelnu un bioogles sastāvs ir atkarīgs no kurināmā, ko izmanto dedzināšanai, krāsns temperatūras un tipa. Barības vielu saturs un elementu sastāvs ir lielā mērā atkarīgs no koksnes ieguves vietas, kvalitātes un izmantotajām sadedzināšanas iekārtām (Etiégni & Campbell, 1991; Pitman, 2006). Analīžu rezultāti vieglo pelnu paraugiem uzrādīja augstus kopējās elementu koncentrācijas Ca (92 g kg⁻¹), K (38 g kg⁻¹), Mg (12 g kg⁻¹), Mn (10 g kg⁻¹), P (6 g kg⁻¹), Al (3 g kg⁻¹), Fe un Na (katrs <2 g kg⁻¹) (3.2. attēls un 1. pielikums).



3.2. attēls. Kopējā elementu koncentrācija koksnes vieglajos pelnos

Bioogles sastāvs ir līdzīgs vieglo pelnu sastāvam un bioogli galvenokārt veido Ca (55 g kg^{-1}), K (20 g kg^{-1}), Mg (10 g kg^{-1}), Zn ($2,5 \text{ g kg}^{-1}$), P ($2,3 \text{ g kg}^{-1}$) ar nelielām atšķirībām citās elementu koncentrācijās (3.3. attēls un 2. pielikums).



3.3. attēls. Kopējā elementu koncentrācija biooglē

Metāliskie elementi un metalloīdi vidē atrodas hidratētu jonu formā, nešķīstošos savienojumos, piemēram, karbonātos, kā arī var būt saistīti ar Fe un Mn oksīdiem, organiskiem kompleksiem vai citiem ķīmiskiem savienojumiem. Elementu kustība un biopieejamība vidē ir ļoti atkarīga no elementa atrašanās formas (Tessier *et al.*, 1979; Chen & Ma, 2001; Malandrino *et al.*, 2011; Okoro *et al.*, 2012; Favas, 2013; Masto *et al.*, 2015). Vieglajos pelnos lielākā daļa elementu (Al, Ba, Cd, Cu, Co, Mg, Mn, P, Pb, Se, Ti, Tl) vairāk kā 90% un Zn, Sr, V vairāk kā 80% no kopējā daudzuma ir saistīti atlikuma formā, norādot, ka elementa biopieejamība ir zema (3.7. tabula). Vienīgi Cr, K, Mo un Ni tika atrasti ūdenī šķīstošajā vai biopieejamā atrašanās formā vērā ņemamā daudzumā (>60%). Be un Sb netika konstatēti nevienā no atrašanās formām virs noteikšanas līmeņiem.

Metālisko elementu sadalījums vieglajos pelnos atrašanās formās (vērtības treknrakstā norāda elementu vērtības virs 60%; n. – zem noteikšanas līmeņa)

Elements	Elementu sadalījums frakcijās, %		
	Ūdenī šķīstošs	Vājā skābē šķīstošs	Atlikušais
Al	0,30	0,92	98,78
As	15,10	n.	84,90
Ba	1,03	5,20	93,76
Ca	16,89	19,52	63,59
Cd	n.	9,81	90,19
Co	n.	3,92	96,08
Cr	76,14	23,86	n.
Cu	0,12	1,72	98,16
Fe	n.	0,02	99,98
K	60,76	15,96	23,28
Li	9,48	9,29	81,23
Mg	0,10	10,16	89,73
Mn	n.	3,52	96,48
Na	39,85	9,84	50,31
Ni	36,50	63,50	n.
P	0,08	2,66	97,26
Pb	0,79	n.	99,21
Se	n.	6,35	93,65
Sr	9,44	10,00	80,56
Ti	0,05	0,11	99,84
Tl	n.	4,03	95,97
V	n.	n.	100,00
Zn	1,83	11,20	86,97

Noteiktā koncentrācija Al (3 g kg^{-1}) un Fe (1.8 g kg^{-1}) pelnos ir uzskatāma par zemu. Citi veiktie pētījumi uzrāda ievērojami augstākas Al ($18\text{--}29 \text{ g kg}^{-1}$) un Fe (13.5 mg kg^{-1} līdz 6.9 g kg^{-1}) koncentrācijas un tādēļ Al un Fe daudzums, kas noteikts šajā pētījumā, ir uzskatāms par nelielu un drošu. Tāpat Cr un Ni daudzumi analizētajos vieglajos pelnos uzskatāmi kā salīdzinoši mazi (Chirenje & Ma, 2002; Pitman, 2006; Krakow, 2010; Füzesi *et al.*, 2015).

Kopumā, smago metālu un metaloīdu koncentrācijas koksnes pelnos un biooglē dažādos avotos ievērojami atšķiras un autori ir ziņojuši gan par zemākām, gan augstākām koncentrācijām, salīdzinot ar šajā pētījumā noteiktajām (3.7. un 3.8. tabula) (Aronson, 2007; Krakow, 2010; Etiégni & Campbell, 1991; Füzesi *et al.*, 2015).

Biooglē, līdzīgi kā pelnos, lielākā daļa elementu atrodas nešķīstošajā formā, bet tādu elementu kā As, Cr un Fe lielākā daļa atrodas ūdenī šķīstošā frakcijā (3.8. tabula).

Metālisko elementu atrašanās formu sadalījums biooglē (vērtības treknrakstā uzrāda elementu vērtības virs 60%; n. – zem noteikšanas līmeņa)

Elements	Elementu sadalījums frakcijās, %		
	Ūdenī šķīstošs	Vājā skābē šķīstošs	Atlikušais
Al	n.	0,65	99,35
Ba	27,20	19,69	53,11
Ca	35,59	26,54	37,87
Cd	7,09	11,57	81,34
Co	17,37	27,93	54,70
Cr	86,88	13,12	n.
Cu	30,46	n.	69,54
Fe	89,41	10,59	n.
K	70,97	19,37	9,66
Li	9,93	35,42	54,65
Mg	52,51	22,85	24,64
Mn	14,54	32,43	53,03
Na	53,60	18,18	29,22
Ni	23,81	76,19	n.
P	0,31	8,24	91,45
Pb	n.	11,22	88,78
Se	n.	16,13	85,47
Sr	25,12	20,77	54,11
Ti	2,40	0,39	97,21
Tl	39,62	37,74	22,64
V	15,22	n.	84,78
Zn	7,31	2,86	89,83

Lai gan analīzes uzrāda, ka As atrodas vienīgi ūdenī šķīstošajā formā, tā kopējais daudzums ($0,22 \text{ mg kg}^{-1}$) ir niecīgs. Līdzīgi ir gadījumā ar Cr, kur lielākā daļa atrodas ūdenī šķīstošajā frakcijā (virs 80%), bet būtībā tā koncentrācija ir niecīga. Vēl mazākā koncentrācijā konstatēts Be.

Salīdzinājumā ar smago metālu un metaloīdu minimālajām koncentrācijām, kas noteiktas dažās Eiropas valstīs pelnu izmantošanai mežsaimniecībā un lauksaimniecībā (3.9. tabula), iegūtie rezultāti norāda, ka vienīgi kadmījs ($19,4 \text{ mg kg}^{-1}$) analizētajos vieglajos pelnos nedaudz pārsniedz pieļaujamās robežvērtības Somijā un Dānijā, kamēr citu elementu koncentrācijas bija ievērojami mazākas kā noteiktās vērtības. Be un Sb nosakāmos līmeņos netika atrasti, kā arī V koncentrācija minimāli pārsniedza noteikšanas līmeni.

Limitējošās elementu vērtības pelnu izmantošanai mežsaimniecībā un lauksaimniecībā Eiropā (pēc Pitman, 2006) salīdzinājumā ar noteiktajām vērtībām pētījumā

Elements	Koncentrāciju limitējošās vērtības valstī, mg kg ⁻¹					Pētījumā noteiktās koncentrācijas, mg kg ⁻¹
	Dānija	Somija	Zviedrija	Latvija*	Latvija**	
As	-	25	30	-	50	0,76
Cd	15	1,5	30	10	3,0	19,40
Cr	100	300	100	600	100	1,39
Cu	-	600	400	800	100	31,50
Ni	60	100	300	200	100	0,79
Pb	120	100	300	500	150	6,95
V	-	-	70	-	-	0,13
Zn	-	1500	7000	2500	300	814,82

*MK noteikumi Nr.362 „Noteikumi par notekūdeņu dūņu un to komposta izmantošanu, monitoringu un kontroli” - Smago metālu masas koncentrācijas limits augsnes mēslošanai un rekultivācijai vai apglabāšanai sadzīves atkritumu poligonos un izgāztuvēs paredzētajās notekūdeņu dūņās un to kompostā;

**MK noteikumi Nr.506 „Mēslošanas līdzekļu un substrātu identifikācijas, kvalitātes atbilstības novērtēšanas un tirdzniecības noteikumi” – Organiskie un organominerālie mēslošanas līdzekļi un kaļķošanas materiāli, netipiskie mēslošanas līdzekļi un augu augšanas veicinātāji; substrāti – nevēlamie piemaisījumi

Dažādos pētījumos, kadmija koncentrācijas koksnes pelnos ir norādītas robežās no 1 mg kg⁻¹ līdz 28 mg kg⁻¹ (Zhan *et al.*, 1996; Hansen *et al.*, 2001; Jacobson, 2003; Krakow, 2010). pH, organiskās vielas un ūdeni saturošu oksīdu daudzums ir faktori, kas nosaka Cd adsorbciju augsnē un tā iespējamā ietekme uz ekosistēmām izraisa īpašu uzmanību. Cd saturošu koksnes pelnu izskalošanās risks ir zems, jo Cd savienojumi ir saistīti ar Mn oksīdiem plašā augsnes pH diapazonā un arī ar Fe oksīdiem (Alloway, 1995). Speciācijas analīze liecina, ka 90% no konstatētā Cd ir saistīts atlikuma frakcijā, norādot tā zemo bioloģisko pieejamību un tāpēc potenciāli riski nav sagaidāmi. Jāatceras, ka likumdošanā nav noteikts, kādās formās elementi tiek aplūkoti, un šajā gadījumā Cd kopējais daudzums pārsniedz limitējošās vērtības, kas noteiktas Somijā un Zviedrijā, kā arī Latvijā, ja salīdzinām ar MK noteikumiem Nr.506 (3.10 tabula).

Dažādos pētījumos konstatētās smago metālu vērtības vieglajos pelnos

Elements	Koncentrācija, mg kg ⁻¹					Pētījumā noteiktās koncentrācijas
	Krakow, 2010	Etiégni & Campbell, 1991	Aronson, 2007	Odlare & Pell, 2009	Füzesi <i>et al.</i> , 2015	
As	13	-	-	67	-	0,76
Cd	5,9	21	4,0	11	6,5	19,40
Cr	43	86	40	113	182	1,39
Cu	70	145	64	192	110	31,50
Ni	18	-	24	39	58,9	0,79
Pb	56	130	-	553	85	6,95
V	14	-	-	48	-	0,13
Zn	1400	700	931	2600	496	814,82

Salīdzinājumā ar smago metālu un metaloīdu limitējošajām koncentrācijām, kas noteiktas bioogļi standartizējošos dokumentos (*European Biochar Certificate* un *IBI Biochar Standards*) bioogles izmantošanai dažādās nozarēs (3.11. tabula), iegūtie rezultāti norāda, ka vienīgi cinks (2,5 g kg⁻¹) analizētajā biooglē nedaudz pārsniedz pieļaujamās vērtības, kamēr citu elementu koncentrācijas bija ievērojami mazākas kā noteiktās vērtības. Tā kā Zn gandrīz 90% atrodas nešķīstošā formā, tad cinka daudzumi nav uzskatāmi par kaitīgiem.

Limitējošās elementu vērtības bioogles izmantošanai *European Biochar Certificate* un *IBI Biochar Standards* salīdzinājumā ar noteiktajām vērtībām pētījumā

Elements	Koncentrāciju limitējošās vērtības, mg kg ⁻¹		
	European Biochar Certif. V4.8 Pamata / augstākās klases	IBI Biochar Standards V2.0 Maksimāli pieļaujamās vērtības	Pētījumā noteiktās koncentrācijas
As	-	12-100	0,22
Cd	<1,5 / <1	1,4-39	1,03
Cr	<90 / <80	64-1200	0,16
Co	-	40-150	0,85
Cu	<100 / <100	63-1500	7,28
Pb	<150 / <120	70-500	0,98
Mo	-	5-20	0,67
Ni	<50 / <30	47-600	0,42
Se	-	2-36	0,62
Zn	<400 / <400	200-7000	2508,18

Interesanti, ka *IBI Biochar Standards* Cd koncentrāciju pieļauj līdz 39 mg kg⁻¹. Tā ir salīdzinoši augsta Cd koncentrācija, un tādā gadījumā analizētajiem vieglajiem pelniem Cd koncentrācija (19,4 mg kg⁻¹) nebūtu uzskatāma par nevēlamu.

3.1.5. Policiklisko aromātisko ogļūdeņražu saturs vieglajos pelnos

Policiklisko aromātisko ogļūdeņražu (PAO) analīzes iekļāva tādu savienojumu noteikšanu kā naftalīns, acenaftilēns, acenaftēns, fluorēns, fenantrēns, antracēns un tā atvasinājumi, fluorantēns un benzofluorantēns, hrizēns, pirēns un benzopirēns. Tika konstatēts, ka testētie koksnes vieglie pelni nesaturēja PAO nosakāmos līmeņos (3. pielikums), kas ir izskaidrojams ar degšanas procesa apstākļiem un zemas intensitātes PAO veidošanos noteiktajos degšanas procesos. PAO mazos daudzumos koksnes pelnos nosaka augstā sadegšanas temperatūra (Vance, 1996). Literatūras datos ir norādīts, ka starp galvenajiem PAO, kas ir emitēti biomasas degšanas procesā ir antracēns, fluorantēns, pirēns, benz(a)antracēns un hrizēns, bet katlos, kur kā kurināmais tiek izmantotas koksnes granulas, vairāk kā 80% no PAO tiek emitētas gāzes fāzē (Masto *et al.*, 2015).

3.2. Koksnes vieglo pelnu un bioogles ietekme uz augu attīstību

Lai novērtētu koksnes pelnu un bioogles kā mēslojuma izmantošanas ietekmi uz augu attīstību, tika veikti dīgtspējas testi un augu agrīnās attīstības stadijas testi, kuru ietvaros tika pētīti gan vieglie pelni, gan bioogle to dažādās koncentrācijās.

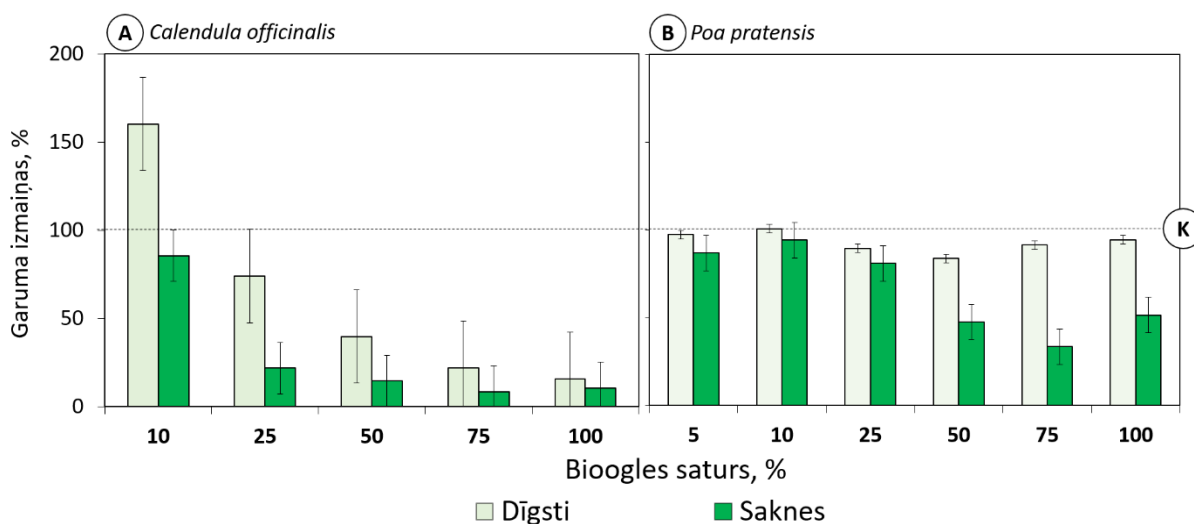
3.2.1. Tests ar plāvas skareni un ārstniecības kliņģerīti, izmantojot bioogli

Augu dīgtspējas intensitāte tika noteikta mērot dīgstu un sakņu garumus testētajām sugām – ārstniecības kliņģerītēm pēc 15 dienām (3.4. attēls) un plāvas skarenei pēc 30 dienu augšanas. Iegūtie rezultāti uzrāda, ka gan ārstniecības kliņģerītes, gan plāvas skarenes gadījumā sēklu dīgtspējā un augu augšanā vislabākie rezultāti tika iegūti testa grupās ar bioogles daudzumu 10% apmērā.



3.4. attēls. Ārstniecības kliņģerītes *Calendula officinalis* sēklu dīgtspējas testa 15. diena dažādās bioogles koncentrācijās :a) 10%; b) 25%; c) 50% un K – kontrole (destilēts ūdens); 15. diena

Ārstniecības kliņģerītes dīgsti 10% grupā bija par 160% lielāki (vidējais garums 4,62 cm) kā kontrolei (destilētām ūdenim). Augi bija veselīgi un labāk attīstīti kā kontroles un citās grupās. Sakņu garumi bija lielāki (vidēji apmēram 4,23 cm) salīdzinot ar citām grupām, izņemot kontroli. Bet līdz ar bioogles satura pieaugumu (no 25% līdz 100%) gan dīgstu un sakņu garumi ievērojami samazinājās (piemēram, dīgsti, vidēji no 2,13 cm 25% grupā līdz pat 0,45 cm 100% testa grupā) (3.5. attēls). Līdzīgi ietekmes rezultāti, kad bioogles vai pelnu koncentrācijai pieaugot, samazinās dīgstu un sakņu garumi un augu attīstība tiek traucēta, tika novēroti citu pētnieku pētījumos (Krakow, 2010; Quiberg, 2011; Fűzesi *et al.*, 2015). Sēklu dīgtspēja 10% grupā bija 108% augstāka kā kontrolei. Salīdzinot ar kontroli, citās testa grupās sēklu dīgtspēja bija līdzīga kontrolei vai zemāka. Arī iepriekšējie pētījumi kopumā uzrāda pozitīvu bioogles un pelnu ietekmi uz augu augšanu (Mandre *et al.*, 2006; Krakow, 2010).

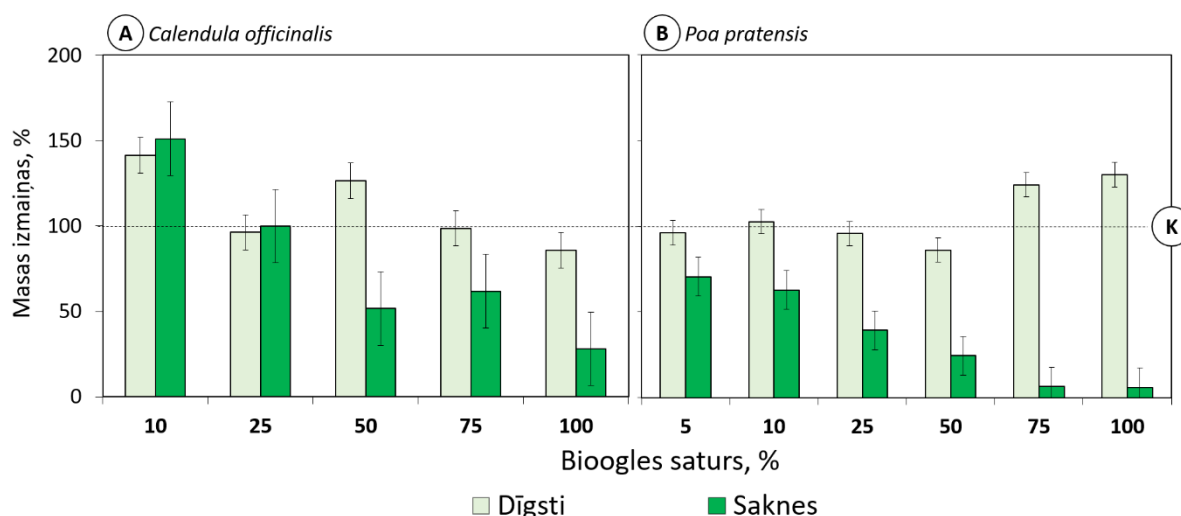


3.5. attēls. Dīgstu un sakņu garumu izmaiņas augiem: a) *Calendula officinalis*; b) *Poa pratensis*, audzēti dažādās bioogles koncentrācijās (5-100%). Kontroles līnija (K) norāda 100% garumu gan dīgstiem, gan saknēm, pamatojoties uz kontroles grupas rezultātiem; kā kontrole izmantota medicīniskā vate vai tīra kvarca smilts piesūcinātas ar destilētu ūdeni

Pļavas skarenes dīgsti no testa grupas ar bioogles koncentrāciju 10% bija par 101% lielāki kā kontrolei. Salīdzinājumā ar kontroli citas grupas uzrādīja samazināšanos gan dīgstu, gan sakņu garumos. Grupās ar bioogles koncentrāciju 50%, 75% un 100% sakņu garumi ievērojami samazinājās (3.5. attēls), tika novērota pavājināta sakņu sistēmas veidošanās, norādot uz augsto sāļu saturu līdzīgi kā konstatēts citos pētījumos (Krakow, 2010).

Eksperimenta beigās tika salīdzināta augu biomasa testa grupās ar kontroli. Rezultāti par augiem, kas auga biooglē uzrāda, ka vienīgi ārstniecības kliņģerītei ir novērojama sakņu biomasas pieaugums. Maksimālā ārstniecības kliņģerītes dīgsta un saknes masa tika novērota testa grupās ar bioogles saturu 10%, attiecīgi masas pieaugums par 141% un 151%. Citās

grupās, dīgstu biomasa bija līdzīga kontrolei (25%, 75% un 100%) un pat augstāka 50% grupā. Sakņu masa ievērojami samazinājās, pieaugot bioogles koncentrācijai (no 25% līdz 100%) (3.6. attēls).



3.6. attēls. Sausnas masas izmaiņas augu dīgstiem un saknēm: a) *Calendula officinalis*; b) *Poa pratensis*, audzēti dažādās bioogles koncentrācijās (5–100%). Kontroles līnija (K) norāda 100% masu gan dīgstiem, gan saknēm, pamatojoties uz kontroles grupas rezultātiem; kā kontrole tika izmantota medicīniskā vate vai tīra kvarca smilts piesātināta ar destilētu ūdeni

Pļavas skarenes dīgstiem augstās bioogles koncentrācijās (50% un vairāk) tika novērota ievērojama sakņu masas pazemināšanās un būtiskas anomālijas – vāja, trausla sakņu sistēma, pat vairāk, dažiem augiem saknes bija pilnīgi reducējušās.

Noteiktiem augšanas apstākļiem un pelnu vai bioogles daudzumam ir izšķiroša nozīme katrai augu sugai. Piemēram, tests ar ārstniecības kliņģerīti atklāj, ka bioogles koncentrācijai pieaugot (no 25% līdz 100%), gan dīgstu, gan sakņu garumu un masa ievērojami samazinājās, kā arī palielinājās dīgstu un sakņu apdegumi un sakņu sistēma attīstījās nepilnīgi vai neattīstījās vispār (3.4. attēls) un bija novērojama sakņu atmiršana, norādot, ka bioogles koncentrācija un attiecīgi sāļu daudzums ir pārāk augsts (Jeffery *et al.*, 2011). Iespējams, kliņģerīšu lapu saritināšanos un brūngani violeto vai iesarkano plankumu veidošanos nosaka fosfora trūkums (Riņķis un Ramane, 1989). Ātrāka sēklu dīgšana tika novērota grupās, kur bioogles koncentrācija bija virs 10% (25%, 50%, 75%), bet kopumā augiem augšana bija traucēta vai lielākoties tie neizauga vispār.

3.2.2. Tests ar pļavas skareni un gurķiem, izmantojot vieglos pelnus

Līdzīgi kā testos ar bioogli augu dīgspējas intensitāte tika noteikta mērot dīgstu un sakņu garumus testētajām sugām. Testā ar pļavas skareni, sēklas tika dēvētas vieglajos pelnos koncentrācijas no 5% līdz 100%, 23 dienu ilgā laika periodā. Pētījumā ar bioogli,

plāvas skarene vislabākos rezultātus uzrādīja grupā ar bioogles koncentrāciju 10%. Jāatzīmē, ka testā ar bioogli izdīgušo plāvas skareņu skaits pie bioogles koncentrācijām 50%, 75% un 100% bija daudz mazāks kā 5%, 10% un 25% koncentrācijās un kontrolē. Pētījumā ar vieglajiem pelniem tika aplūkota plāvas skarenes sēklu dīgspēja, katrā Petri platē ievietojot 100 sēklas. Rezultāti parāda, ka augstākais izdīgušo sēklu skaits sasniegts 10% koncentrācijā – 55, kontrolē izdīga 38, bet 5% – 40 sēklas. 25% koncentrācijā izdīga vien 8 sēklas, bet augstākās koncentrācijas – 50%, 75% un 100% neizdīga neviena sēkla. Sēklu dīgspēju un augu minerālo barošanas nosaka vides apstākļu kopums, kā augsne un tās sastāvs, mitrums, temperatūra, pH, barības vielu saturs, kā arī auga prasības pēc noteiktas barības vielas (Riņķis un Ramane, 1989). Neviens no minerālelementiem nedrīkst trūkt. Būtiska loma sēklu dīgspējas nodrošināšanā ir skābju-bāzu līdzsvaram. Pētījuma sākumā un beigās tika noteiktas arī pH vērtības katram no pelnu-smilts maisījuma paraugiem un kontrolei. 3.11. tabulā ir apkopoti plāvas skarenes dīgspējas testa rezultāti.

3.11. tabula

Poa pratensis dīgspējas vieglajos pelnos testa rezultāti

Pelnu koncentrācija	pH pirms testa	pH pēc testa	Izdīgušo sēklu skaits	Vidējais dīgsta garums, cm	Vidējais saknes garums, cm	Vidējā augu masa, mg*
Kontrolē	9,73	8,36	38	2,90±0,7	2,28±1,0	0,88
5%	11,28	9,20	40	2,76±1,1	1,44±1,1	0,72
10%	11,54	9,89	55	3,07±1,0	1,01±0,6	0,88
25%	11,85	9,93	8	2,03±1,0	0,35±0,2	0,57
50%	12,07	10,15	0	-	-	-
75%	12,23	10,30	0	-	-	-
100%	12,27	10,30	0	-	-	-

*Vidējā augu masa noteikta dalot kopējo augu masu ar izdīgušo augu skaitu konkrētajā paraugā

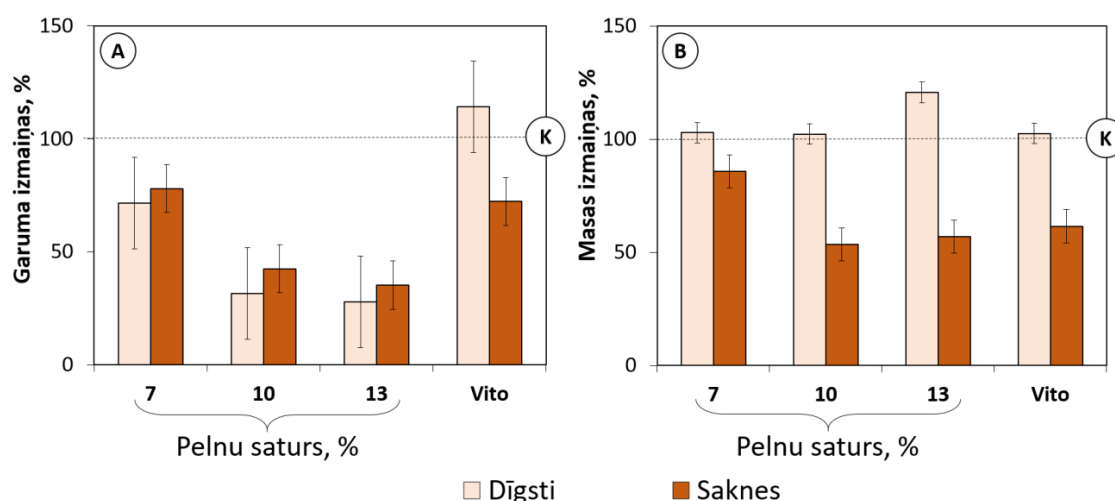
Dīgspējas tests parāda, ka labākos rezultātus uzrāda 10% koncentrācija, sasniedzot augstākos rādītājus dīgsta garumiem un izdīgušo sēklu skaitam. Tāpat vidējā augu masa bija augstākā un līdzīga kā kontrolei. Sakņu garums bija mazāks kā kontrolei un 5% koncentrācijas gadījumā. Kopumā var spriest, ka optimālākā pelnu koncentrācija plāvas skarenes sēklu dīgspējai un dīgstu attīstībai varētu būt starp 5–10%. Iespējams augstās pH vērtības ir galvenais faktors, kas noteica sliktos dīgspējas rezultātus koncentrācijās virs 10%.

Gurķu dīgspēja tika novērtēta pēc 8 dienu ilga ikubācijas perioda, izmērot dīgstu un sakņu garumus un tos salīdzinot ar kontroles paraugiem, par kuriem kalpoja gurķi, kas diedzēti kvarca smiltī, kas mitrināta ar destilētu ūdeni (3.7. attēls).



3.7. attēls. Īsaugļu gurķa *Cucumis sativus* sēkļu dīgspējas testa 8.diena dažādās vieglo pelnu koncentrācijās :a) 7%; b) 10%; c) 13%; d) mēslojums VITO un K – kontrole (destilēts ūdens)

Kā redzams 3.8. attēlā, gurķu dīgsti un saknes pelnu paraugiem salīdzinājumā ar kontroli ir ievērojami īsākas. Lai gan šajā gadījumā sakņu garuma attīstība salīdzinājumā ar kontroli bija zemāka, to nevar vērtēt kā koksnes pelnu nelabvēlīgu ietekmi uz augu attīstību. Jāņem vērā eksperimenta laikā konstatētie vizuālie novērojumi, piemēram 10% grupai, kur gurķu saknes paraugiem pelnu vidē tika konstatētas īsākas, toties resnākas un ar labi attīstītiem laterāliem atzariem. Šādu sakņu veidošanos var novērot, ja augs attīstās ar barības elementiem bagātā vidē (Rich & Watt, 2013). Tāpat 10% grupai dīgsti bija vizuāli pievilcīgāki kā kontrolei.



3.8. attēls. Dīgstu un sakņu garumu un sausnas masas izmaiņas īsaugļu gurķim *Cucumis sativus*, audzējot dažādās vieglo pelnu koncentrācijās (7–13%) un VITO pilnmēslojumā.

Kontroles līnija (K) norāda 100% garumu gan dīgstiem, gan saknēm, pamatojoties uz kontroles grupas rezultātiem; kontrole - tīra kvarca smilts piesātināta ar destilētu ūdeni

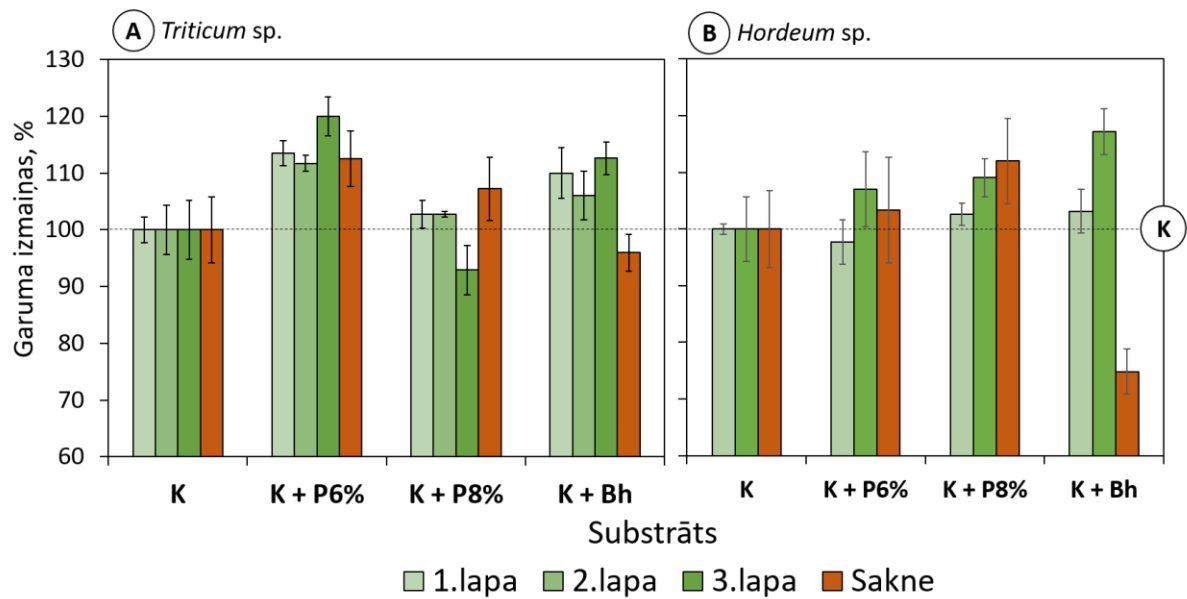
Visās pelnu koncentrācijās dīgstu garumi bija īsāki nekā kontrolei, attiecīgi 7% koncentrācijā sasniegts 72% garums, 10% gadījumā 31% un 13% koncentrācijā vien 28%. Nedaudz mazākas atšķirības no kontroles novērojamas sakņu garumu izmaiņās, bet līdzīgi kā

ar dīgstiem tās kopumā ir daudz mazākas kā kontrolei (3.8. attēls). Rezultāti parāda, ka neliels pelnu daudzuma pieaugums (no 7% līdz 10%) dod ievērojami sliktākus augu un sakņu garuma rezultātus.

Gurķu sausnas masas izmaiņas parāda, ka dīgstu masa, salīdzinot ar kontroli, visās pelnu koncentrācijās ir pieaugusi, vislielāko masu sasniedzot 13% grupā – 121%. Tas visdrīzāk saistāms ar augu minerālo barošanos un minerālvielu nemetabolisko saistīšanu – minerālvielas difundē šūnā un pārvietojas koncentrācijas gradienta virzienā, to iekļūšanu šūnā neietekmē tajā notiekošie fizioloģiskie procesi un šādi absorbētās minerālvielas var iesaistīties metabolisma procesā vai pārvietoties tālāk neizmainītā veidā, palielinot arī auga biomasu (Rich & Watt, 2013; Riņķis un Ramane., 1989).

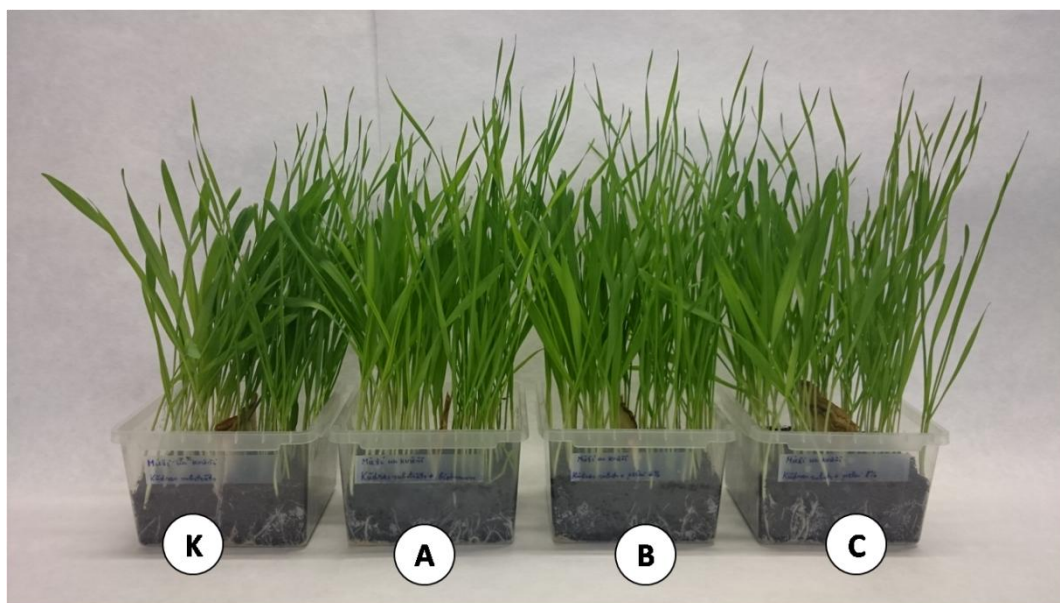
3.2.3. Tests ar miežiem un kviešiem, izmantojot vieglos pelnus

Mieži *Hordeum vulgare* un kvieši *Triticum* sp. tika audzēti, izmantojot vieglos pelnus, kūdras substrātu un biohumusu jeb vermikompostu. Pēc 16 dienu audzēšanas vislabākos rezultātus miežiem uzrādīja 6% pelnu grupa. 6% koncentrācijā augstākos rādītājus uzrādīja gan lapu garumi gan saknes (virs 110%). Nedaudz mazākus garuma skaitļus uzrādīja 8% grupa, bet kopumā lapu un sakņu garumi bija lielāki kā kontrolei. Pozitīvu rezultātu deva arī biohumusa izmantošana. Interesanti, ka miežu gadījumā biohumusa grupā, saknes bija ievērojami īsākas kā citās grupās. Iespējams tas saistāms ar to, ka biohumusā esošo barības vielu daudzums ir pietiekami liels un tādēļ augiem nav nepieciešama garāka sakņu sistēma. Jāņem vērā, ka arī lapas bija garākas kā citām grupām, apstiprinot barības vielu klātbūtni un biohumusa pozitīvo ietekmi. Lai gan kviešu gadījumā biohumusa pozitīvā ietekme nebija tik izteikta, tomēr arī šeit saknes bija īsākas, un kopumā liecina par līdzīgu situāciju kā ar miežiem.



3.9. attēls. Lapu un sakņu garumu izmaiņas kviešiem un miežiem dažādās pelnu koncentrācijās un biohumusā: K – kontrole; P6% - 6% pelnu; P8% - 8% pelnu; Bh - biohumuss

Arī vizuāli netika konstatētas nekādas būtiskas atšķirības gan starp kontroli un pelnu grupām, gan biohumusa grupā (3.10. attēls). Augi un saknes bija labi attīstījušās, lapas bez būtiskiem vizuāliem defektiem ar spēcīgi stublāju.



3.10. attēls. Miežu *Hordeum vulgare* un kviešu *Triticum sp.* augšanas testa 16.diena: a) biohumuss; b) 6%; c) 8% un K – kontrole (kūdras substrāts)

Par optimālu pelnu koncentrāciju kviešu un miežu audzēšanai, ņemot vērā atšķirīgos rezultātus, ir grūti spriest. Kviešu gadījumā tas vairāk tuvojas 6%, bet miežu 8%. Pilnīgākai izpratnei būtu nepieciešama kviešu un miežu audzēšana līdz nākamajām attīstības fāzēm.

Veiktais tests parāda, ka tādu nozīmīgu lauksaimniecības kultūru, kā miežu un kviešu augšanas stimulēšana, izmantojot koksnes pelnus, ir iespējama un spēj uzlabot augu attīstību, iespējams, pateicoties pelnos esošajām minerālvielām, bet labāki rezultāti būtu iespējami, pievienojot papildus slāpekļa savienojumus augiem pieejamā formā.

3.3. Toksicitātes tests ar *Heterocypris incongruens*

Testa rezultāti pie pētītajām koncentrācijām (2 g L⁻¹, 2/10 g L⁻¹, 5 g L⁻¹ un 5/10 g L⁻¹) neuzrādīja augstu ostrakodu mirstību, turklāt mirušie ostrakodi testa beigās netika atrasti. Iespējams ostrakodi miruši jau testa sākumā. Kā minēts Chial vadībā veiktā pētījumā (2002), dabiska ostrakodu mirstība testa ietvaros references sedimentos var sastādīt līdz pat 20% (vidēji 7%). Līdz ar to var pieņemt, ka līdzīga mirstība ir iespējama arī sedimentu testos. Tāpat var būt iespējama citu faktoru letāla iedarbība (piemēram, pH, temperatūra, izšķīdušais skābeklis) (Ruiz *et al.*, 2013), kas šajā pētījumā netika apskatīta.

Ostrakodu mirstības un augšanas nomākšanas rezultāti apkopoti 3.12. tabulā un 4. pielikumā.

3.12. tabula.

Koksnes vieglo pelnu toksiskā ietekme uz *Heterocypris incongruens*

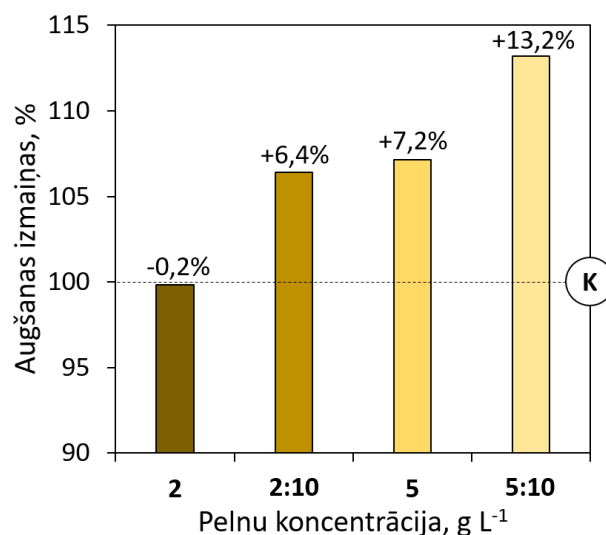
Deva, g L ⁻¹	Mirstība, %	Augšanas nomākšana, %
K	-	-
2	13,33**	0,37
2/10*	3,33**	6,61
5	3,33**	7,34
5/10*	-	13,21

*Parauga atšķaidījums ar destilētu ūdeni 10 reizes;

**Miruši ostrakodi netika atrasti; visdrīzāk miruši testa sākumā;

K – kontrole (standarta šķīdums)

Augšanas nomākšana ir nosakāma gadījumos kad ostrakodu mirstība ir novērojama mazāk par 30% (Ostracodtookit F, 2017). Tā kā nevienā no gadījumiem mirstība nepārsniedza 30% atzīmi, tālāk tika aplūkota pelnu-ūdens maisījumu ietekme uz ostrakodu augšanas nomākšanu (3.10. attēls).



3.10. attēls. *Heterocypris incongruens* augšanas nomākšana pelnu-ūdens maisījumā attiecībā pret kontroli (%). Kontroles līnija (K) norāda 100% garumu, pamatojoties uz kontroles grupas rezultātiem; 2:10 un 5:10 – parauga atšķaidījums ar ūdeni 10 reizes

Kā redzams 3.10. attēlā tad pētītie pelnu-ūdens maisījumi 2/10 g L⁻¹*10, 5 g L⁻¹ un 5/10 g L⁻¹ salīdzinājumā ar kontroles paraugu nomāc ostrakodu augšanu. Interesanti, ka pie 2 g L⁻¹ ostrakodu garums, salīdzinot ar kontroli, nav samazinājušies, bet šo pašu koncentrāciju atšķaidot 10 reizes, augšanas nomākšana ir sasniegusi 6,42%. Tāpat pie visaugstākās pelnu-ūdens maisījuma koncentrācijas 5 g L⁻¹, augšanas nomākšana ir bijusi mazāka kā pie šīs pašas koncentrācijas desmitkārtīga atšķaidījuma, sasniedzot augstāko augšanas nomākšanas rezultātu testā – 13,21%.

Veiktajā viena faktora dispersijas analīzē ANOVA tika salīdzināta pelnu-ūdens maisījumu koncentrāciju ietekme uz ostrakodu garumu izmaiņām, pie būtiskuma līmeņa $P < 0,05$. Tests parādīja, ka pelnu-ūdens maisījuma koncentrācijas pieaugums ar ostrakodu garumu nav statistiski ticams.

No toksicitātes testa rezultātiem var secināt, ka izmantotās pelnu-ūdens maisījuma koncentrācijas, neveicina augstu ostrakodu mirstību un nerada būtiskus subletālus efektus, kā ietekmi uz ostrakodu augšanu un to garumu.

Iespējams, pētīto pelnu sastāva ķīmiskās īpašības, piemēram, zemās potenciāli toksisko metālu koncentrācijas un to atrašanās ūdenī un vājā skābē nešķīstošās formās, būtiskus toksiskus efektus neuzrāda. Elementu analīzēs tika konstatētas samērā augstas Cd koncentrācijas (19,4 mg kg⁻¹), līdz ar to pastāv iespējamība, ka Cd šajos daudzumos var būt toksisks, tai skaitā arī *Heterocypris incongruens*. Līdzīgas Cd koncentrācijas ir konstatētas arī citos pētījumos (Zhan *et al.*, 1996; Jacobson, 2003), kaut gan pētījumi (Levula *et al.*, 2000;

Perkiömäki & Gritze, 2005) parāda, ka Cd vidē tik viegli neizskalojas un tā asimilācija trofiskajā ķēdē ir zema.

Veiktā pētījuma rezultāti liek pārdomāt testa derīgumu koksnes vieglo pelnu testēšanai ūdens vidē. Pēc testa izpildes apraksta Ostracodtoxkit F, 2017 un Chial *et. al.*, 2002, lai toksicitātes tests skaitītos pielietojams, ir jāizpilda divi pamata kritēriji:

1) ostrakodu mirstības procents kontroles paraugā, nedrīkstētu būt lielāks kā 20%;

2) vidējam ostrakodu garumam kontroles paraugā vajadzētu palielināties par faktoru 1,5, salīdzinājumā ar vidējiem garumiem testa sākumā.

Abi nosacījumi tika izpildīti – ostrakodu mirstība kontroles paraugā netika novērota un vidējais ostrakodu garums kontroles paraugā testa beigās bija palielinājies par faktoru 2,32 (vidējais garums 235 ± 34 μm kontrolē pirms testa un 780 ± 96 μm kontrolē pēc testa). Līdz ar to testu no šī punkta var uzskatīt par derīgu.

Jāņem vērā arī testa plates iecirkņa aizpildīšana ar 2 ml standarta saldūdeni, 2 ml aļģu suspensiju un 1 ml kontroles sedimentiem. Šādu kombināciju rekomendē izmantot testa priekšraksts (Ostracodtoxkit F, 2017), lai nodrošinātu visus nepieciešamos apstākļus ostrakodu augšanai, bet pievienojot šos elementus, kopējā pelnu-ūdens maisījuma koncentrācija un līdz ar potenciālā ietekme samazinās. Ņemot vērā šos apstākļus, pelnu-ūdens maisījumu varēja veidot izmantojot augstākas koncentrācijas, piemēram, 10 g L^{-1} un vairāk, tāpat varēja izpētīt vairākus pelnu-ūdens maisījumus, palielinot pētāmo maisījumu skaitu.

Heterocypris incongruens ir pierādījuši savu lomu dažādu vielu toksicitātes novērtēšanā. Pētījumā Ruiz ar kolēģiem (2013) ir apkopojis dažādu pesticīdu ietekmi uz *Heterocypris incongruens*, piemēram, DDT (toksiskā deva $0,04\text{--}1,74 \mu\text{g L}^{-1}$), dioksīns (2,3,7,8-TCDD; $0,002\text{--}0,2 \mu\text{g L}^{-1}$) un lindāns ($2,07\text{--}6,9 \mu\text{g L}^{-1}$). Pētījumi ar koksnes pelniem ir veikti arī ar *Daphnia magna*, kur tika pierādīta pelnu toksiskā ietekme devās virs 24 t ha^{-1} . Šajā pētījumā pelnu toksicitāte tika sasaistīta ar dažādu mainīgo parametru, kā pelnu tips (svaigi vai stabilizēti), paraugu ņemšanas laiks (nedēļās), ekspozīcijas laiks (stundas) un pelnu tipa un laika attiecība (Krakow, 2010).

Iespējams, nedaudz augstāki pelnu-ūdens maisījuma koncentrāciju līmeņi dotu augstākus ostrakodu mirstības un augšanas nomākšanas rādītājus, taču jāatceras, ka jebkura viela sasniedzot noteiktu koncentrāciju ir toksiska (Kļaviņš un Zaļoksnis, 2005). Zemā ostrakodu mirstība un nelielie augšanas nomākšanas rādītāji pie noteiktajām koncentrācijām nepierāda analizēto pelnu toksicitāti.

3.4. Analizēto pelnu un bioogles izmantošanas iespēju lauksaimniecībā novērtējums

Maģistra darba izstrādes laikā veikti vairāki būtiski uzdevumi: izpētīts koksnes vieglo pelnu un bioogles ķīmiskās un fizikālās īpašības un ietekme uz viendīgļlapju un divdīgļlapju augu sugām kā arī toksicitātes tests ar *Heterocypris incongruens*.

Analizētie koksnes pelni un bioogle lielos daudzumos satur augiem nepieciešamus bioloģiski pieejamus makroelementus kā K, Ca, Mg, Na, kā arī dažādus mikroelementus. Koksnes sadegšanas rezultātā pelnos un biooglē paliekošie slāpekļa daudzumi irniecīgi taču bioogle satur nedaudz vairāk slāpekli augiem uzņemamajās amonija slāpekļa un nitrātu slāpekļa formās. Fosfors kopumā vairāk ir vieglajos pelnos, bet biooglē P lielāka daļa atrodas šķīstošajās formās, taču kopumā P koncentrācija ir neliela.

Elementu analīzes uzrāda vērtības, kas pārsniedz dažu valstu un Latvijas likumdošanā noteiktās robežvērtības (Cd). Lai gan speciācijas analīze liecina, ka 90% no konstatētā Cd ir saistīts atlikuma frakcijā, norādot tā zemo bioloģisko pieejamību, likumdošanā netiek aplūkota elementu atrašanās formas un līdz ar to analizēto pelnu turpmāka izmantošana no šī punkta kļūst diskutabla. Cd saturošu koksnes pelnu izskalošanās risks ir zems, jo Cd savienojumi ir saistīti ar Mn un Fe oksīdiem plašā augsnes pH diapazonā (Alloway, 1995). Citu smago metālu un metaloīdu daudzumi bija niecīgi un nepārsniedz robežvērtības. Bioogles gadījumā Zn analizētajā biooglē nedaudz pārsniedz pieļaujamās vērtības, kamēr citu elementu koncentrācijas bija ievērojami mazākas kā noteiktās vērtības. Arī biooglē Zn 90% atrodas nešķīstošā formā un nav uzskatāms par bīstamu. Kopumā analizētie koksnes vieglie pelni un bioogle nebūtu uzskatāmi par bīstamiem un to pielietošana noteiktos daudzumos ir iespējama un lietderīga.

Veiktie dīgtspējas un augšanas testi uzrādīja pozitīvu ietekmi uz dīgstu garumu un biomasas pieaugumu kā arī sakņu sistēmas attīstību. Testi iezīmē pelnu un bioogles izmantošanas potenciālu augu dīgtspējas un augšanas stimulēšanai, taču svarīgs jautājums ir pelnu un bioogles koncentrācija, kurai ir izšķiroša nozīme augu attīstībā. Testi parādīja, ka koncentrācijas no 5% līdz 10% var dot pozitīvus rezultātus.

Analizējot literatūru, jāsecina, ka vieglie pelni un bioogle vislabākos rezultātus var dot, ja tos kombinē ar N un N-P tika mēslojumu. Piemēram, bioogle papildināta ar slāpekļa minerālmēslojumu, uzlabo kukurūzas augšanas spējas, kamēr bioogle bez slāpekļa piedevas, būtiskus uzlabojumus nedod (Rajkovich *et al.*, 2012).

Lielākā daļa analizēto pelnu sastāv no daļiņām, kas ir mazākas par 0,25 mm un robežās no 0,25 mm līdz 1 mm (3.1. attēls), kas pelnu izmantošanu un iestrādi lauksaimniecības zemēs padara par sarežģītu, jo pastāv risks pelnu aiznesei ar vēju, kā arī iespējama

neparedzētu negatīvu efektu attīstība, jo nestabili, viegli šķīstoši pelni var strauji palielināt augsnes pH un sāļu koncentrāciju (Vance, 1996).

Kā viens no risinājumiem vieglo pelnu un bioogles izmantošanā lauksaimniecībā ir pelnu un bioogles granulēšana. Granulēšana var nodrošināt viendabīgu granulu izveidi, kas ir viegli transportējamas un to iestrāde lauksaimniecības zemēs nerada būtiskas problēmas. Granulācijas procesā ir iespējams pievienot optimālam mēslojumam nepieciešamās pelnos un biooglē trūkstošās barības vielas, piemēram, izmantojot šķīdros mēslus, kūtsmēslus, vircu, sapropeli vai digestātu kā dabīgā slāpekļa avotu vai mākslīgi sintezētu šķidro slāpekli amonija vai nitrātjonu formā. Turklāt šķidrās mēslojums var strādāt kā saistviela pelnu granulēšanas procesā (Anagnostopoulos & Stivanakis, 2009; Arslan & Baykal, 2006).

Augsnē iestrādāts mēslojums apgādā augus ar papildus N, P, K un citiem minerālelementiem. Barības vielas augiem nepieciešamas dzīvības procesu norisei, tātad augšanai un attīstībai, kā arī ražas došanai. Augu minerālās barošanās process ir sarežģīts līdz ar to nepieciešami paplašināti pētījumi par koksnes pelnos un biooglē esošo minerālelementu izmantošanu augu augšanā. Tāpat, lai apzinātu nepieciešamo mēslojuma daudzuma pielietošanu ir jāveic augšņu agroķīmiskās analīzes un pēc analīžu rezultātiem jā sastāda mēslošanas plāns atbilstoši kultūrauga prasībām.

Pozitīvie pelnu izmantošanas efekti nav novērojami uzreiz, bet drīzāk parādās pakāpeniski un to efektivitāte izpaužas ilgākā laika periodā (Augusto *et al.*, 2008; Lazdiņa *et al.*, 2017).

Salīdzinot ar minerālmēsliem, pelni un bioogle ir videi draudzīgāka alternatīva, kas arī veicina cirkulāro ekonomiku un ilgtspējību (Ingerslev *et al.*, 2014; Huotari *et al.*, 2015) un noved pie secinājuma, ka koksnes pelni un bioogle jāpārvalda kā resurss nevis atkritumi, taču tā kā pelnu ķīmiskās īpašības ir ļoti atkarīgas no izejmateriāla un tās var ievērojami atšķirties, drošāk tos ir izmantot nevis lauksaimniecībā, bet mežsaimniecībā.

Pie nosacījuma, ka biomasas izmantošana siltuma un elektroenerģijas ražošanā palielināsies, būtiski ir apsvērt enerģētisko kultūru, piemēram, daudzgadīgo zālaugu tādu kā miežabrālis, auzeņairene un galega audzēšanu, koku sugu – kārklū, papeļu, melnalkšņu, baltalkšņu, hibrīdo alkšņu, bērzu u.c. sugu audzēšanu, kā mēslojumu izmantojot koksnes pelnus un bioogli, iespējams kombinācijā notekūdeņu dūņām un digestātu (Rancāne u.c., 2013). Tas būtu viens no variantiem pašlaik neapstrādāto lauksaimniecības zemju turpmākai izmantošanai un varētu veicināt cirkulāro ekonomiku, reģionālo attīstību, enerģētisko neatkarību u.c., kā arī samazināt atkritumu apjomu.

SECINĀJUMI

- Elementu speciācijas analīzes liecina, ka galvenie pelnus un bioogli veidojošie elementi ir augu attīstībai nepieciešamie Ca, K un Mg, un smago metālu un metaloīdu koncentrāciju vērtības, izņemot Cd, nepārsniedz likumdošanā noteiktās robežvērtības, turklāt elementi lielākoties atrodas ūdenī un vājā skābē nešķīstošās formās, kas nosaka to iespējami zemo biopieejamību.
- Vieglo pelnu un bioogles augstā pH reakcija var nelabvēlīgi ietekmēt sēklu dīgtspēju un augu attīstību, taču tajā pašā laikā pelni un bioogle var tikt izmantoti augsnes skābuma neutralizācijai lauksaimniecības un mežsaimniecības zemēs un tālāka to izmantošana ir atkarīga no izvēlēta mērķa – vai nu mēslojums vai kaļķojamais materiāls.
- Pētījumā ar ārstniecības klingerīti un pļavas skareni bioogle uzrādīja pozitīvu ietekmi uz dīgstu garumu un biomasas pieaugumu kā arī sakņu sistēmas attīstību, kur galvenā nozīme ir bioogles koncentrācijai, kuru pārsniedzot, ievērojami samazinās sēklu dīgtspēja un normāla augu attīstība.
- Sēklu dīgtspējas testu ar pļavas skareni un īsaugļu gurķi rezultāti liecina, ka pelni ne vienmēr spēj dot pozitīvu ietekmi uz dīgstu un sakņu garuma pieaugumu, taču pie noteiktām koncentrācijām, pelni var būtiski uzlabot sēklu dīgtspēju, dīgstu un sakņu attīstību, kā arī augu masa pieaugumu.
- Tādu nozīmīgu lauksaimniecības kultūru, kā mieži un kvieši augšanas stimulēšana, izmantojot koksnes pelnus, ir iespējama un spēj uzlabot augu attīstību, iespējams, pateicoties pelnos esošajām minerālvielām, bet labāki rezultāti būtu iespējami, pievienojot papildus slāpekļa savienojumus augiem pieejamā formā.
- Tests ar bentosa gliemeņvēžiem *Heterocypris incongruens* iezīmē pelnu izmantošanas potenciāli zemo ietekmi uz ūdens biotu.
- Pētījums pierāda, ka vieglo pelnu un bioogles izmantošanai lauksaimniecībā un citās nozarēs ir potenciāls, kurš vēl nav pilnībā apzināts un izmantots, ņemot vērā pelnu un bioogles mainīgo sastāvu, īpašības un nepietiekamo izpratni par pelnu izmantošanas ietekmi uz floru un faunu.

PATEICĪBAS

Autors izsaka pateicību darba vadītājam Mārim Kļaviņam, konsultantei Karinai Stankevičai, projekta darbiniekiem un visiem, kas deva padomu un palīdzēja šī darba izstrādē.

Pētījums veikts projekta "Biomāsas pelnu īpašības un izmantošanas iespēju izpēte" ietvaros, kas īstenots sadarbībā starp Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes Vides zinātnes nodaļu un SIA "Baltic Institute for Regional Development".

LITERATŪRAS AVOTI

Publicētie avoti

- Alloway, B. J. (Ed.) 1995. *Heavy metals in soils*. Springer, London, 368 p.
- Anagnostopoulos, I. M. & Stivanakis, V. E. 2009. Utilization of lignite power generation residues for the production of lightweight aggregates. *Journal of Hazardous Materials* 163, 329–336.
- Arslan, H. & Baykal, G. 2006. Utilization of fly ash as engineering pellet aggregates. *Environmental Geology* 50, 761–770.
- ASTM. 2013a. Standard practice for proximate analysis of coal and coke. West Conshohocken. ASTM D3172-13. DOI:10.1520/D3172.
- ASTM. 2013b. Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. West Conshohocken. ASTM D1762-84. DOI:10.1520/D1762.
- Augusto, L., Bakker, M. R. & Meredieu, C. 2008. Wood ash applications to temperate forest ecosystems – potential benefits and drawbacks. *Plant Soil* 306, 181–198.
- Baran, A. & Tarnawski, M. 2013. Phytotoxkit/Phytotestkit and Microtox as tools for toxicity assessment of sediments. *Ecotoxicology & Environmental Safety* 98, 19–27.
- Beesley, L., Marmiroli, M. 2010. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution* 159, 474–480.
- Beesley, L., Moreno-Jimenez, E. & Gomez-Eyles, J. L. 2010. Effects of biochar and green waste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental Pollution* 158, 2282–2287.
- Beķeris, P. 2015. Potenciāli risinājumi pelnu utilizācijā. *Baltijas koks*. 2, 58-61. Atsauce tekstā (Baltijas koks, 2015)
- Bramryd, T. & Fransman, B. 1995. Silvicultural use of wood ashes – effects on the nutrient and heavy metal balance in a pine (*Pinus sylvestris*, L) forest soil. *Water, Air & Soil Pollution* 85, 1039–1044.
- Brewer, C. E. 2012. Biochar characterization and engineering. Doctoral Thesis in Philosophy, Iowa State University.
- Brēmere, I., Indriksone, D., Aleksejeva, I., Linde, A., Toropovs, V. 2009. Pētījums par iespējām piesārņojuma samazināšanā ar daļiņām no biomasas sadedzināšanas iekārtām individuālajā apkurē Latvijā. *Baltijas Vides Forums*, 47 lpp.
- Carter, M. R. & Gregorich, E. G. (Eds.) 2007. *Soil sampling and methods of analysis* (2nd ed.). CRC Press, New York, 1262 p.
- Chen, M. & Ma, L. Q. 2001. Comparison of three Aqua regia digestion methods for twenty Florida soils. *Soil Science Society of America Journal* 65, 491–499.
- Chial, B. & Persoone, G. 2002. Cyst-Based Toxicity Tests XIII—Development of a Short Chronic Sediment Toxicity Test with the Ostracod Crustacean *Heterocypris incongruens*: Methodology and Precision. *Environmental Toxicology* 17, 528–532.
- Chirenje, T., & Ma, L. Q. 2002. Impact of high-volume wood-fired boiler ash amendment on soil properties and nutrients. *Communications in Soil Science & Plant Analysis* 33(1-2), 1–17.
- Directive 2009/28/EK. 2009. Directive 2009/28/EK on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official Journal of the European Union* L140, 16–62.
- Directive 2010/31/EU. 2010. Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union* L153, 13–35.
- Dolacis, J., Tomsons, E., Hrols, J. 2003. Kurināmās koksnes salīdzinājums ar citiem kurināmā veidiem. *Environment. Technology. Resources* 9, 67-72.
- EBC. 2012. European biochar certificate – guidelines for a sustainable production of biochar. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, 24 p.

- EEA. 2000. Down to Earth: soil degradation and sustainable development in Europe. *Environmental Issues Series Number 16*. European Environment Agency, Copenhagen, 183–202.
- Emilsson, S. 2006. *International handbook: From extraction of forest fuels to ash recycling*. Swedish Forest Agency, Stockholm, 42 p.
- Etiégni, L. & Campbell, A. G. 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource Technology* 37, 173–178.
- Favas, P. 2013. Environmental risk associated with heavy metal pollution in soils based on geochemical fractionation. *SGEM 2013 Geo Conference Proceedings on Ecology, Economics, Education & Legislation* 1, 417–422.
- Füzesi, I., Heil, B. & Kovács, G. 2015. Effects of wood ash on the chemical properties of soil and crop vitality in small plot experiments. *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica* 11(1), 55–64.
- Gao, X., Dai, Y., Zhang, Y., Zhai, X. & Fu, F. 2016. Effective removal of dyes from waste water by using a novel low-cost modified fly ash. *Clays & Clay Minerals* DOI:10.1346/CCMN.2016.064028.
- Gomez-Rey, M. X., Madeira, M. & Coutinho, J. 2012. Wood ash effects on nutrient dynamics and soil properties under Mediterranean climate. *Annals of Forest Science* 69, 569–579.
- Gulbe, L., Sētiņa, J., Vītiņa, I. 2016. Pelnu ķīmiskā sastāva ietekme uz to mehāniskajām un fizikālajām īpašībām. *Proceedings of Materials Science & Applied Chemistry* 1, 68-72.
- HACH. 2007. *DR 2800 spectrophotometer procedures manual (2nd ed.)*. HACH, Berlin, 814 p.
- Hammes, K., Smernik, R. J., Skjemstad, J. O. & Schmidt, M. W. I. 2008. Characterisation and evaluation of reference materials for black carbon analysis using elemental composition, colour, BET surface area and ¹³C NMR spectroscopy. *Applied Geochemistry* 23, 2113–2122.
- Hansen, H. K., Pedersen, A. J., Ottosen, L. M. & Villumsen, A. 2001. Speciation and mobility of cadmium in straw and wood combustion fly ash. *Chemosphere* 45, 123–128.
- Huang, S. J., Chang, C. Y., Mui, D. T., Chang, F. C., Lee, M. Y. & Wang, W. F. 2007. Sequential extraction for evaluating the leaching behaviour of selected elements in the municipal solid waste incineration fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 149, 180–188.
- Jacobson, S. 2003. Addition of stabilized wood ash to Swedish coniferous stands on mineral soil – effects on stem growth and needle nutrient composition. *Silva Fennica* 37(4), 437–450.
- Jamali, M. K., Kazi, T. G., Arain, M. B., Afridi, H. I., Jalbani, N., Kandhro, G. A., Shah, A. Q. & Baig, J. A. 2009. Speciation of heavy metals in untreated sewage sludge by using microwave assisted sequential extraction procedure. *Journal of Hazardous Material* 163, 1157–1164.
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M. & Bastos, A. C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 144, 175–187.
- Johnson, I. 2000. Criteria-Based Procedure for Selecting Test Methods for Effluent Testing and its Application to Toxkit Microbiotests. – In: Persoone, G., Janssen, C., De Coen, W. (eds.) *New Microbiotests for Routine Toxicity Screening and Biomonitoring*. New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers: 73-94.
- Kļaviņš, M., Zaļoksnis, J. 2005. *Ekotoksikoloģija*. Rīga, LU, 357 lpp.
- Krakow, E. 2010. Effects of fly ash and stabilized ash on wheat, *Daphnia magna*, radish and lettuce in laboratory tests. Magisterial thesis. Department of Plant and Environmental Sciences, Göteborgs Universitet, Göteborg.
- Krull, E. S., Baldock, J. A., Skjemstad, J. O. & Smernik, R. J. 2009. Characteristics of biochar: Organo-chemical properties. In: Lehmann, J. & Joseph S. (Eds.) *Biochar for*

environmental management: *Science and technology*. International Biochar Initiative, Westerville, 53–66.

Kubica, K., Paradiz, B., Dilara, P. 2007. Small combustion installations: Techniques, emissions and measures for emission reduction. JRC Scientific and Technical Reports. European Commission, 62 p.

Lazdina, D., Bardule, A., Lazdins, A., Stola, J. 2011. Use of waste water sludge and wood ash as fertiliser for *Salix* cultivation in acid peat soils. *Agronomy Research* 9 (1–2), 305–314.

Lazdiņa, D. 2008. Enerģētiskās koksnes sagatavošana no celmiem un daudzgadīgo enerģētisko augu plantācijās – tehnoloģijas un darba organizācija. Valsts mežzinātnes institūts “Silava”, 48 lpp.

Lazdiņa, D., Bebre, I., Dūmiņš, K., Skranda, I., Lazdins, A., Jansons, A. and Celma, S. 2017. Wood ash – green energy production side product as fertilizer for vigorous forest plantations. *Agronomy Research* 15(2), 468-477.

Lazdiņš, A. 2014. Meža mēslošanas ietekme uz kokaudžu vērtības pieaugumu - pārskats. Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”, 56 lpp.

Lehmann, J., Rilling, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biology & Biochemistry* 43, 1812-1836.

Levula, T., Saarsalmi, A., Rantavaara, A. 2000. Effects of ash fertilization and prescribed burning on macronutrient, heavy metal, sulphur and ¹³⁷Cs concentrations in lingonberries (*Vaccinium vitis-idaea*). *Forest Ecology and Management* 126, 269-279.

Lipenīte, I., Kārklīņš, A. un Ruža, A. 2016. Augsnes minerālais slāpekļis un mēslošanas rekomendācijas. Zinātniski praktiskā konference „Līdzsvarota lauksaimniecība”. Jelgava, LLU, 203-208.

Malandrino, M., Aballino, O., Buoso, S., Giacomino, A., La Gioia, C. & Mentasti, E. 2011. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite. *Chemosphere* 82, 169–178.

Manahan, S. E. 2000. Soil environmental chemistry. In: Manahan, S. E. *Environmental chemistry* (7th ed). Lewis, London, 695–712.

Mandre, M., Pärn, H. & Ots, K. 2006. Short-term effects of wood ash on the soil and the lignin concentration and growth of *Pinus sylvestris* L. *Forest Ecology & Management* 223, 349–357.

Marsalek, B., Rojickova-Padrtova, R. 2000. Selection of a Battery of Microbiotests for Various Purposes - the Czech Experience. – In: Persoone, G., Janssen, C., De Coen & W. (eds.) *New Microbiotests for Routine Toxicity Screening and Biomonitoring*. New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers: 95-101.

Masto, R. E., Sarkar, E., George, J., Jyoti, K., Dutta, P. & Ram, L. C. 2015. PAHs and potentially toxic elements in the fly ash and bed ash of biomass fired power plants. *Fuel Processing Technology* 132, 139–152.

Masto, R. E., Sarkar, E., George, J., Jyoti, K., Dutta, P. & Ram, L. C. 2015. PAHs and potentially toxic elements in the fly ash and bed ash of biomass fired power plants. *Fuel Processing Technology* 132, 139–152.

McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresources Technology* 83, 37–46.

Meng, C. P., Hanif, A. H. M. & Wahid, S. A. 2014. Short-term field decomposition and physico-chemical transformation of jatropha pod biochar in acidic mineral soil. *Open Journal of Soil Science* 4, 226–234.

MicroBioTests. 2004. *PHYTOTOKKIT. Seed germination and early growth microbio test with higher plants. Standard operational procedure*. MicroBioTests, Gent, 33 p.

Mollon, L. C., Norton, G. J., Trakal, L., Moreno-Jimenez, E., Elouali, F. Z., Hough, R. L. & Beesley, L. 2016. Mobility and toxicity of heavy metal(loid)s arising from contaminated wood ash application to a pasture grassland soil. *Environmental Pollution* 218, 419–427.

- Naik, T.R., Kraus, R.N., McCormick, S. 2001. Recycling of wood ash in cement-based construction materials. College of Engineering and Applied Science. Department of Civil Engineering and Mechanics. University of Wisconsin, 18 p.
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O. & Catalão, J. P. S. 2014. Mixed biomass pellets for thermal energy production: a review of combustion models. *Applied Energy* 127, 135–140.
- Obernberger, I. & Supancic, M. 2009. Possibilities of ash utilization from biomass combustion plants. *Proceedings of 17th European Biomass Conference & Exhibition*, 1–12.
- Ohno, T. 1992. Neutralisation of soil acidity and release of phosphorus and potassium by wood ash. *Journal of Environmental Quality* 21, 433–438.
- Okoro, H. K., Fatoki, O. S., Adekola, F. A., Ximba, B. J. & Snyman, R. G. 2012. A review of sequential extraction procedures for heavy metals speciation in soils and sediments. *Open Access Scientific Reports* 1(3), 181.
- Omil, B., Piñeiro, V. & Merino, A. 2013. Soil and tree responses to the application of wood ash containing charcoal in two soils with contrasting properties. *Forest Ecology & Management* 295, 199–212.
- Ozolincius, R., Buozyte, R. & Varnagiryte-Kabasinskiene, I. 2007. Wood ash and nitrogen influence on ground vegetation cover and chemical composition. *Biomass & Bioenergy* 31, 710–716.
- Pan, H. & Eberhardt, T. L. 2011. Characterization of fly ash from the gasification of wood and assessment for its application as a soil amendment. *Bio Resources* 6(4), 3987–4004.
- Pansu, M. & Gautheyrou, J. 2006. *Handbook of soil analysis. Mineralogical, organic and inorganic methods*. Springer, Berlin, 993 p.
- Perkiömäki, J. & Fritze, H. 2005. Cadmium in upland forests after vitality fertilization with wood ash—a summary of soil microbiological studies into the potential risk of cadmium release. *Biology and Fertility of Soils* 41, 75–84.
- Pitman, R.M. 2006. Wood ash use in forestry – a review of the environmental impacts. *Forestry* 79(5), 563–588.
- Provis, J. & van Deventer, J. (Eds.) 2014. *Alkali activated materials. State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*. Springer, Amsterdam, 388 p.
- Quiberg, S. 2011. Toxicity of wooden ash to *Daphnia magna*, *Raphanus sativus* and *Lactuca sativa* – toxicity identification and evaluation of leachate toxicity. Magisterial thesis. Department of Plant and Environmental Sciences, Göteborgs Universitet, Göteborg, 22 p.
- Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R. & Lehmann, J. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology & Fertility of Soils* 48(3), 271–284.
- Rancāne, S., Lazdiņa, D., Gūtmane, I., Bērziņš, P., Stesele, V., Dzene, I. 2013. Daudzfunkcionālu enerģētisko augu plantāciju ierīkošana un apsaimniekošana: zālaugu ražība atšķirīgos mēslojuma fonos. Zinātniski praktiskā konference „Lauksaimniecības zinātne veiksmīgai saimniekošanai”. Jelgava, LLU, 79–84.
- Rey-Salgueiro, L., Omil, B., Merino, A., Martinez-Carballo, E. & Simal-Gandra, J. 2016. Organic pollutants profiling of wood ashes from biomass power plants linked to the ash characteristics. *Science of the Total Environment* 544, 535–543.
- Riņķis, G., Ramane, M. 1989. *Kā barojas augi*. Rīga, Avots, 150 lpp.
- Rich, S.M., Watt, M. 2013. Soil conditions and cereal root system architecture: Review and considerations for linking Darwin and Weaver. *Journal of Experimental Botany* 64(5), 1193–1208.
- Rosenberg, O., Persson, T., Högbom, L., Jacobson, S. 2010. Effects of wood-ash application on potential carbon and nitrogen mineralisation at two forest sites with different tree species, climate and N status. *Forest Ecology and Management* 260, 511–518.
- Ruiz, F., Abad, M., Bodergat, A.M., Carbonel, P., Rodríguez-Lázaro, J., González-Regalado, M.L., Toscano, A., García, E. X., Prenda, J. 2013. Freshwater ostracods as

- environmental tracers. *International Journal of Environmental Science and Technology* 10, 1115–1128.
- Schimmelpfenning, S. & Glaser, B. 2012. One step forward toward characterization: some important material properties to distinguish biochars. *Journal of Environmental Quality* 41(4), 1001–1013.
- Šipkova, P. 2012. Atjaunojamo enerģijas resursu ieguves un izmantošanas tehnoloģiju izpēte un izstrāde, enerģētikas radīto klimata izmaiņu samazināšanai, ievērojot bioloģisko daudzveidību. Zinātniskā atskaite par projektu, 64 lpp.
- Stankeviča, K. & Kļaviņš, M. 2013. Sapropelis un tā izmantošanas iespējas. *Material Science and Applied Chemistry* 29, 109-126.
- Staugaitis, G., Vaisvila, Z., Mazvila, J., Arbaciauskas, J., Adomaitis, T., Fullen, M. A. A. 2007. Role of soil mineral nitrogen for agricultural crops: Nitrogen nutrition diagnostics in Lithuania. *Archives of Agronomy and Soil Science* 53(3), 263–271.
- Stefaniuk, M. & Oleszczuk, P. 2016. Addition of biochar to sewage sludge decreases freely dissolved PAHs content and toxicity of sewage sludge-amended soil. *Environmental Pollution* 218, 242-251.
- Steinbeiss, S., Gleixner, G., Antonietti, M. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 1301-1310.
- Subramaniam, P., Subasinghe, K., Fonseka, K.R.W. 2015. Wood ash as an effective raw material for concrete blocks. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 4, 228-233.
- Tessier, A., Campbell, P.G. C. & Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry* 51(7), 1–8.
- Trybalski, K., Kępys, W., Krawczykowski, D., Krawczykowska, A., Szponder, D. 2014. Physical Properties of Ash from Co-Combustion of Coal and Biomass. *Polish Journal of Environmental Studies* 23(4), 1433-1436.
- Ulvinen, O. 1973. *Testing for Genuineness of Cultivar*. International Seed Testing Association, 224 p.
- Van Herck, P. V. & Vandecastelle, C. 2001. Evaluation of the use of a sequential extraction procedure for the characterization and treatment of metal containing solid waste. *Waste Management* 21, 685–694.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva, C. G. 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89, 913–933.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva, C. G. 2013. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilization, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* 105, 19–39.
- Vassilev, S. V., Vassileva, C. G. & Baxter, D. 2014. Trace element concentrations and associations in some biomass ashes. *Fuel* 129, 292–313.
- Vance, E. D. 1996. Land application of wood-fired and combination boiler ashes: An overview. *Journal of Environmental Quality* 25, 937–944.
- Wallingford, W. 1980. Function of potassium in plants. *In: Potassium for Agriculture*. Potash and Phosphate Institute, Atlanta, GA, 10-27.
- Werkelin, J., Skrifvars, B.-J., Zevenhoven, M., Holmbom, B. & Hupa, M. 2010. Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel* 89, 481–493.
- WSDOT. 2015. *WSDOT materials manual M 46-01.23. Sieve analysis of fine and coarse aggregates*. WSDOT, Washington, 14 p.
- Vincēviča-Gaile, Z. 2014. Vides apstākļu ietekme uz mikro- un makroelementu saturu pārtikas produktos Latvijā. Promocijas darbs. Latvijas Universitāte, 179 lpp.
- Zhan, G., Erich, M. S. & Ohno, T. 1996. Release of trace elements from wood ash by nitric acid. *Water, Air & Soil Pollution* 88, 297–311.

Elektroniskie resursi

30 uses for wood ash. 2015. Mental scoop. Pieejams <http://www.mentalscoop.com/30-uses-for-wood-ashes/> Sk. 07.05.2017.

Atsauce tekstā (30 uses for wood ash, 2015)

Atjaunīgo energoresursu patēriņš pēdējos desmit gados pieaudzis par 6,2 %. 2016. Centrālā statistikas pārvalde. Pieejams <http://www.csb.gov.lv/notikumi/atjaunigo-energoresursu-paterins-pedejos-desmit-gados-pieaudzis-par-62-44049.html> Sk. 09.05.2017.

Atsauce tekstā (CSP, 2016)

Baltic Energy Market Interconnection Plan, 2017. Pieejams <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/infrastructure/baltic-energy-market-interconnection-plan> Sk. 01.03.2017.

Bioenerģijas sistēmas. 2017. HoSt Bio-energy installations. Pieejams <https://www.host.nl/lv/sadedzinasanas/> Sk. 05.04.2017.

Atsauce tekstā (HoSt, 2017)

Biomases stacija Jelgavā. 2017. Fortum. Pieejams <http://www.fortum.com/countries/lv/par-fortum/biomases-kogeneracijas-stacija/biokogeneracijas-stacija-jelgava/pages/default.aspx> Sk. 10.05.2017.

Atsauce tekstā (Fortum Jelgava, 2017)

Dubrovskis, V., Niklass, M., Emsis, I. un Kārklīšs, A. Biogāzes ražošana un efektīva izmantošana. Pieejams http://www.latvijasbiogaze.lv/files/Buklet_LQ.pdf Sk.18.04.2017.

Atsauce tekstā (Biogāzes ražošanas un..., Bez dat.)

Eiropas Rarlamenta un Padomes Direktīva 2009/28/EK par atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanu. Pieņemta 23.04.2009. Eiropas Komiteja. Sk. 18.04.2017.

Enerģētikas attīstības pamatnostādnes 2016. – 2020. gadam. Pieņemts 09.02.2016. Ministru kabineta rīkojums Nr.129. Sk. 18.04.2017.

Atsauce tekstā (Enerģētikas attīstības..., 2016)

Enerģētikas ceļvedis 2050. 2011. Brisele. Pieejams http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/;ELX_SESSIONID=pXNYJKSFbLwdq5JBWQ9CvYWYJxD9RF4mnS3cty wT2xXmFYhlnlW1!-868768807?uri=CELEX:52011DC0885 Sk. 09.05.2017.

Enerģētika – galvenie rādītāji. 2017. Centrālā statistikas pārvalde. Pieejams <http://www.csb.gov.lv/statistikas-temas/energetika-galvenie-raditaji-30331.html> Sk.18.05.2017.

Atsauce tekstā (CSP, 2017a)

Enerģētika Latvijā. 2017. Pieejams <http://energetika-lv.wikidot.com/1-ievads>. Sk. 01.03.2017.

Atsauce tekstā (Enerģētika Latvijā, 2017)

Enerģētikas stratēģija 2030. Latvijas Energoefektivitātes asociācija. Pieejams http://www.latea.lv/userfiles/news/14122011_Energetikas_strategija_2030.pdf Sk. 20.03.2017.

Europe 2020 Strategy. 2014. Pieejams http://ec.europa.eu/info/strategy/european-semester/framework/europe-2020-strategy_en#relatedlinks Sk. 26.02.2017.

Atsauce tekstā (Europe 2020 Strategy, 2014)

European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. 2015. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. Pieejams <http://www.european-biochar.org/en/download> Sk. 14.05.2017.

Atsauce tekstā (EBC, 2015)

European Commission Climate Action. 2017. Pieejams http://ec.europa.eu/clima/index_en Sk. 26.02.2017.

Final Cogeneration Roadmap. 2014. Pieejams <http://www.code2-project.eu/wp-content/uploads/D5.1-Cogeneration-raodmap-NPMS-LT-2014-12-31.pdf> Sk. 26.02.2017.

Atsauce tekstā (Final Cogeneration Roadmap, 2014)

Heterocyprus incongruens. 2012. Australian waterlife. Freshwater Ecology, Limnology and Zooplankton. Pieejams http://www.australianwaterlife.com.au/heterocyprus_incongruens.html Sk. 15.03.2017.

IBI Biochar Standards. 2012. Pieejams <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard> Sk. 19.12.2016

KOMISIJAS REGULA (EK) Nr. 889/2009 ar ko paredz sīki izstrādātus bioloģiskās ražošanas, marķēšanas un kontroles noteikumus, lai īstenotu Padomes Regulu (EK) Nr. 834/2007 par bioloģisko ražošanu un bioloģisko produktu marķēšanu. Sk. 01.03.2017.

Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģija līdz 2030. gadam. 2010. VARAM, Rīga. Pieejams <http://polsis.mk.gov.lv/documents/3323> Sk. 20.03.2017.

Latvijas zaļās enerģijas stratēģija 2050. 2011. Rīgas Tehniskās Universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts. Pieejams http://www.losp.lv/sites/default/files/articles/attachments/19.08.2011_-_1523/latvijas_energostrategija.pdf Sk. 21.02.2017.

Atsauce tekstā (Latvijas zaļās enerģijas..., 2011)

Meža resursi. 2017. Zemkopības ministrija. Pieejams <https://www.zm.gov.lv/mezi/statiskas-lapas/nozares-informacija/meza-resursi?nid=1086#jump> Sk. 09.05.2017.

Atsauce tekstā (Zemkopības ministrija, 2017)

Mežsaimniecība – Galvenie rādītāji. 2015. Centrālās statistikas pārvalde. Pieejams <http://www.csb.gov.lv/statistikas-temas/mezsaimnieciba-galvenie-raditaji-30111.html> Sk. 14.05.2017.

Atsauce tekstā (CSP, 2015)

Noteikumi par atkritumu klasifikatoru un īpašībām, kuras padara atkritumus bīstamus. Pieņemts 19.04.2011. Ministru kabineta noteikumi Nr.302. Sk. 18.04.2017.

Atsauce tekstā (Noteikumi par atkritumu..., 2011).

Noteikumi par mēslošanas līdzekļu un substrātu identifikāciju, kvalitātes atbilstības novērtēšanu un tirdzniecību. Pieņemts 01.09.2015. Ministru kabineta noteikumi Nr.506. Sk. 18.04.2017.

Noteikumi par notekūdeņu dūņu un to komposta izmantošanu, monitoringu un kontroli. Pieņemts 02.05.2006. Ministru kabineta noteikumi Nr.362. Sk. 18.04.2017.

Ostracodtookit F "Direct contact" toxicity test for freshwater sediments. Standard operational procedure. 2017. Microbiotests Inc. Pieejams <http://www.microbiotests.be/SOPs/Ostracodtookit%20F%20SOP%20-%20A5.pdf> Sk. 25.04.2017.

Atsauce tekstā (Ostracodtookit F, 2017)

Par Latvijas mežiem. 2017. Latvijas meža dienests. Pieejams <http://www.lmd.lv/par-latvijas-meziem> Sk. 09.05.2017.

Atsauce tekstā (Latvijas meža dienests, 2017)

Pelni – mēslošanas un kaļķošanas materiāls, 2012. SIA "Liepājas enerģija". Pieejams <http://www.liepajasenergija.lv/107-pelni-meslošanas-kalkosanas-materials>. Sk. 22.02.2017.

Atsauce tekstā (Liepājas enerģija, 2012)

Pelnu sārma sagatavošana un izlietošana. 1942. *Kurzemes Vārds*. 10. jūnijs, 3. Pieejams <http://data.lnb.lv/nba01/KurzemesVards/1942/KurzemesVards1942-132.pdf> Sk. 12.05.2017.

Pieaug koģenerācijas stacijās saražotais enerģijas daudzums. 2017. Centrālā statistikas pārvalde. Pieejams <http://www.csb.gov.lv/notikumi/pieaug-kogenerācijas-stācijas-sarazotais-enerģijas-daudzums-45894.html> Sk. 18.05.2017.

Atsauce tekstā (CSP, 2017b)

Prasības atkritumu sadedzināšanai un atkritumu sadedzināšanas iekārtu darbībai. Pieņemts 24.05.2011. Ministru kabineta noteikumi Nr.401. Sk. 18.04.2017.

Atsauce tekstā (Prasības atkritumu sadedzināšanai..., 2011)

Takuma boiler plants. 2017. Takuma. Pieejams
<http://www.takuma.co.jp/english/product/boiler/biomass/ricehusk.html> Sk.24.05.2017.

Atsauce tekstā (Takuma boiler plants, 2017)

What is cogeneration?. 2017. The European association for the promotion of
cogeneration. Pieejams <http://www.cogeneurope.eu/#> Sk. 05.04.2017.

Atsauce tekstā (COGEN, 2017)

PIELIKUMI

Vieglo pelnu elementu speciācijas analīzes rezultāti, mg kg⁻¹ (izstrādājis autors)

Elements	Ūdenī šķīstošs	Vājā skābē šķīstošs	Atlikums	Kopējais daudzums
N	-	-	-	895,2
P	4,93	164,08	6 006,01	6 175,01
K	2 324,10	6 103,57	8 906,63	38 25,95
Ca	15 559,53	17 984,86	58 580,88	92 124,17
Mg	12,62	1 248,54	11 022,43	12 283,60
Mn	0,23	349,13	9 563,73	9 913,08
Fe	< 0,3	0,35	1 825,05	1 825,40
Cu	0,038	0,54	30,92	31,50
Zn	14,91	91,26	708,65	814,82
Co	< 0,01	0,14	3,53	3,67
Ni	0,29	0,50	< 0,09	0,79
Mo	0,52	< 0,07	< 0,08	0,52
Na	645,41	159,40	814,73	1619,53
Cd	< 0,004	1,90	17,49	19,40
Pb	0,06	< 0,02	6,89	6,95
Cr	1,06	0,33	< 0,07	1,39
As	0,12	< 0,12	0,65	0,77
Li	0,26	0,25	2,21	2,71
Se	< 0,08	0,25	3,70	3,95
Sr	32,40	34,32	276,50	343,22
Ba	7,41	37,34	672,75	717,5
Ti	0,05	0,13	109,47	109,67
Tl	< 0,04	0,35	8,33	8,68
V	< 0,05	< 0,01	0,13	0,13
Be	< 0,002	< 0,003	< 0,003	< 0,003
Sb	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Al	9,22	28,03	3012,70	3049,95

Bioogles elementu speciācijas analīzes rezultāti, mg kg⁻¹ (izstrādājis autors)

Elements	Ūdenī šķīstošs	Vājā skābē šķīstošs	Atlikums	Kopējais daudzums
N	-	-	-	
P	7,05	185,93	2 064,62	2 257,60
K	14 068,59	3 840,14	1 915,91	19 824,65
Ca	19 723,59	14 712,43	20 985,96	55 421,98
Mg	5 287,13	2 300,74	2 480,61	10 068,48
Mn	103,36	230,60	376,99	710,94
Fe	7,55	0,86	< 0,33	8,41
Cu	2,22	< 0,01	5,06	7,28
Zn	183,33	71,69	2 253,16	2 508,18
Co	0,15	0,24	0,47	0,85
Ni	0,10	0,32	< 0,01	0,42
Mo	0,67	< 0,13	< 0,13	0,67
Na	82,77	27,99	44,64	154,40
Cd	0,07	0,12	0,84	1,03
Pb	< 0,06	0,11	0,87	0,98
Cr	0,14	0,02	< 0,01	0,16
As	0,22	< 0,09	< 0,09	0,22
Li	0,06	0,22	0,34	0,62
Se	< 0,13	0,10	0,53	0,62
Sr	17,57	14,52	37,85	69,94
Ba	42,03	30,43	82,05	154,50
Ti	0,47	0,08	19,14	19,69
Tl	0,21	0,20	0,12	0,53
V	0,06	< 0,02	0,39	0,46
Be	< 0,005	< 0,002	0,01	0,01
Sb	< 0,02	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Al	0,00	3,21	486,11	489,32

Vieglo pelnu PAO analīžu rezultāti (izstrādājis autors)
(n/a - netika atrasts, NR – noteikšanas robeža)

Savienojums	Policikliskie aromātiskie ogleņraži (PAO), mg kg ⁻¹
Naftalīns	n/a
Acenaftilēns	n/a
Acenaftēns	n/a
Fluorēns	n/a
Fenantrēns	n/a
Antracēns	< NR
Fluorantēns	< NR
Pirēns	< NR
Benz[a]antracēns	n/a
Hzizēns	n/a
Benzo[b]fluorantēns	n/a
Benzo[k]fluorantēns	n/a
Benzo[j]fluorantēns	n/a
Benzo[a]pirēns	n/a
Indeno[1,2,3-c,d]pirēns	n/a
Dibenz[a,h]antracēns	n/a
Benz[g,h,i]perilēns	n/a

Tests ar *Heterocypris incongruens*

Ostrakodu skaits	Garums pirms inkubācijas, μm	Kontrole, μm	2 g L ⁻¹ , μm	2/10 g L ⁻¹ , μm	5 g L ⁻¹ , μm	5/10 g L ⁻¹ , μm
1	250	850	850	800	800	850
2	250	800	800	750	800	800
3	250	900	800	800	750	800
4	200	800	800	850	850	600
5	300	800	850	800	800	600
6	200	850	850	750	800	650
7	200	650	750	800	800	850
8	250	850	800	800	750	750
9	250	600	800	800	850	800
10	200	850	800	750	700	750
11	-	600	800	800	850	600
12	-	850	650	600	800	800
13	-	800	800	850	650	850
14	-	900	800	800	750	800
15	-	800	700	800	700	600
16	-	850	500	850	500	600
17	-	650	600	500	700	550
18	-	650	650	750	650	650
19	-	850	850	550	800	700
20	-	750	800	850	800	750
21	-	850	800	700	600	800
22	-	800	800	550	750	650
23	-	700	1050	800	850	800
24	-	800	750	800	550	750
25	-	850	800	650	800	600
26	-	850	850	600	800	500
27	-	550	-	800	750	800
28	-	850	-	850	600	550
29	-	800	-	600	700	800
30	-	700	-	-	-	650
Vidējais garums, μm	235±34	780±96	781±101	745±104	741±93	708±105
Pieaugums, μm	-	545	546	510	506	473
Augšanas kavēšana, %	-	-	-0,18	6,42	7,16	13,21