

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Latvia University of Life Sciences and Technologies
Lauksaimniecības fakultāte
Faculty of Agriculture



Mg. agr. Sarmīte Rancāne 

**AUGU BARĪBAS ELEMENTU RECIKLĀCIJAS IESPĒJAS
ENERĢĒTISKO ZĀLAUGU PLANTĀCIJĀS**

*POSSIBILITIES OF PLANT NUTRIENT RECYCLING IN
ENERGY GRASS PLANTATIONS*

Promocijas darba KOPSAVILKUMS
zinātniskā doktora grāda zinātnes doktors (Ph.D.) iegūšanai
lauksaimniecības un zivsaimniecības zinātnēs, mežzinātnē

SUMMARY
of the DOCTORAL Thesis for the Doctoral degree Doctor of
Science (Ph.D.) in Agriculture, Forestry, and Fisheries

paraksts / signature

Jelgava
2021

Promocijas darba zinātniskie vadītāji / Scientific supervisors:

Profesors, *Dr. habil. agr.* Aldis Kārklīšs

Dr. silv. Dagnija Lazdiņa

Promocijas darba recenzenti / Reviewers:

1. *Dr. agr.* Zinta Gaile
2. *Dr. agr.* Ilze Skrabule
3. *Dr. silv.* Zane Lībiete

Promocijas darba aizstāvēšana paredzēta Latvijas Lauksaimniecības universitātes Lauksaimniecības un zivsaimniecības zinātnes, mežzinātnes ar specializāciju “Lauksaimniecība” atklātajā sēdē 2021. gada 28. decembrī plkst. 10.00, Latvijas Lauksaimniecības universitātē, 123. auditorijā Lielā ielā 2, Jelgavā

The defence of the Thesis will be held in an open session of the Promotion Board in Field of Agriculture and Fisheries Sciences, Forest Science with specialization “Agriculture” on December 28, 2021, at 10:00 in room No. 123, Latvia University of Life Sciences and Technologies, Liela iela 2, Jelgava, Latvia

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Lauksaimniecības universitātes Fundamentālajā bibliotēkā, Lielā ielā 2, Jelgava. *The Thesis and Summary are available at the Fundamental Library of Latvia University of Life Sciences and Technologies, Liela iela 2, Jelgava.*

Atsauksmes lūdzu sūtīt Lauksaimniecības un zivsaimniecības zinātnes, mežzinātnes ar specializāciju “Lauksaimniecība” promocijas padomes sekretārei *Dr.sc.ing.* Ingrīdai Augšpolei, Lielā ielā 2, Jelgava, LV-3001.

References are welcome to be sent to Dr.sc.ing. Ingrīda Augšpole, the Secretary of the Promotion Board in the Field of Agriculture and Fisheries Sciences, Forest Science with specialization “Agriculture”, Latvia University of Life Sciences and Technologies, Liela iela 2, Jelgava, LV-3001.

Promocijas darbs izstrādāts

ERAF sadarbības projekta „Daudzfunkcionālu lapu koku un enerģētisko augu plantāciju ierīkošanas un apsaimniekošanas modeļu izstrāde” ietvaros laika periodā no 2012. līdz 2016. gadam.

The Ph.D. study was performed with the support of the European Regional Development Fund's project “Elaboration of models for establishment and management of multifunctional plantations of short rotation energy crops and deciduous trees” (2012–2016).

ISBN 978-9984-48-387-0

SATURS / CONTENTS

IEVADS	4
PĒTĪJUMU APSTĀKĻI UN METODES	6
PĒTĪJUMU REZULTĀTI UN DISKUSIJA	11
1. Mēslojuma ietekme uz zālaugu ražu	11
2. Ražas struktūra	13
3. Ražas ķīmiskais sastāvs	15
4. Augu barības elementu iznese ar ražu	18
5. Slāpekļa izmantošanās efektivitāte	24
6. Augsnes agroķīmisko rādītāju izmaiņas mēslošanas ietekmē	27
7. Mēslošanas ekonomiskais izvērtējums	29
SECINĀJUMI	32
PRIEKŠLIKUMI	34
PATEICĪBAS	34
INTRODUCTION	35
MATERIALS AND METHODS	37
RESULTS AND DISCUSSION	40
1. Grass yield depending on fertiliser use	40
2. Structure of grass yield	41
3. Chemical composition of yield	42
4. Plant nutrient removal by yield	44
5. Nitrogen use efficiency	48
6. Fertilisation effect on soils' agrochemical properties	50
7. Economics of fertiliser use	51
CONCLUSIONS	54
RECOMMENDATIONS	55
ACKNOWLEDGEMENTS	56

IEVADS

Fosilo enerģijas resursu izsmelšana, augošā slodze uz vidi un klimata pārmaiņas liek mainīt līdz šim pastāvošās metodes bioloģisko resursu izmantošanā, patēriņā, atkārtotā izmantošanā un utilizācijā. Fosilā kurināmā resursi ir ierobežoti, tie neatgriezeniski izsīkst, tādēļ esošie resursi jāizmanto pēc iespējas ilgtspējīgāk, jāpalielina atjaunojamo energoresursu (AER) īpatsvars un jāveicina augu barības elementu reciklācija, t.sk., bioenerģijas ražošanas blakusproduktu atkārtota izmantošana. Bioenerģija ir dominējošais atjaunojamās enerģijas avots un, ņemot vērā politiskos mērķus, var sagaidīt, ka Eiropā palielināsies enerģijas ražošana no lauksaimniecības zemēs iegūtās augu biomasas. Latvijas agroklimatiskajos apstākļos perspektīva ir zālaugu, t.sk., miežabrāļa un auzuņairesnes izmantošana enerģijas vajadzībām, ņemot vērā zālaugu produktīvo ilggadību, audzēšanas prasības un izmantošanas iespējas. ES zaļā kursa ietvaros ir sagatavots rīcības plāns, kura mērķis ir līdz 2050. gadam panākt klimatneitralitāti. Tas ietver resursu efektīvu izmantošanu, pārejot uz tīru aprites ekonomiku, bioloģiskās daudzveidības atjaunošanu un piesārņojuma samazināšanu. Līdz 2030. gadam paredzēts samazināt augu barības vielu zudumus par 50%, nodrošinot, ka nepasliktinās augsnes auglība. Minerālmēslu ražošanā tiek izmantots liels daudzums fosilās enerģijas, tādēļ jādarā viss iespējama, lai rastu iespējas minerālmēslos esošos augu barības elementus aizstāt ar atkritumproduktos esošajiem. Šajā kontekstā būtiski veicināt bioenerģijas ražošanas procesā radušos blakusproduktu – fermentācijas atlieku jeb digestāta un pelnu atgriešanu aprītē.

Resursu taupīšanas nolūkā, kā arī augu barības elementu aprites nodrošināšanai pelnus un digestātu lietderīgi nogādāt atpakaļ uz platībām, no kurām barības elementi ar biomasas ražu ir aizgādāti projām. Minēto produktu izmantošana mēslošanā var palielināt virszemes slāpekļa piesaisti un zālaugu produktivitāti, uzlabot augsnes fizikālās un ķīmiskās īpašības, kā arī radīt virkni pozitīvu vides un ekonomisku ieguvumu, t.sk., kļūt par alternatīvu rūpnieciski ražoto mēslošanas līdzekļu izmantošanai.

Līdzšinējie pētījumi par atkārtotu augu barības elementu izmantošanu nav pietiekami, tie nesniedz atbildes uz daudziem jautājumiem. Lai pelnus un digestātu varētu droši izmantot, nepieciešama papildus informācija par šo līdzekļu mēslošanas efektivitāti un tajos esošo augu barības elementu atkārtotas izmantošanas ietekmi uz zālaugu produktivitāti, ražas kvalitāti un augsnes agroķīmiskajām īpašībām. Tādēļ promocijas darbam tika izvēlēta tēma par pelnos un digestātā esošo barības elementu reciklācijas iespējām enerģētisko zālaugu plantācijās. Tās ietvaros tika veikti pētījumi par digestāta un koksnes pelnu kā mēslošanas līdzekļu efektivitāti miežabrāļa un auzuņairesnes sējumos, kā arī skaidrota to ietekme uz augsnes agroķīmiskajām īpašībām sistēmā: augsne – augi – digestāts/pelni – augsne – augi.

Pētījuma mērķis

Noskaidrot miežabrāļa (*Phalaris arundinacea* L.) ‘Bamse’ un auzeņaires (*Festulolium pabulare*) ‘Felina’ audzēšanas iespējas enerģijas ieguvei, mēslošanā izmantojot bioenerģijas ražošanas blakusproduktus – fermentācijas atliekas jeb digestātu un koksnes pelnus, kā arī pētīt augu barības elementu atkārtotas izmantošanas iespējas sistēmā: augsne – augi – digestāts / pelni – augsne – augi.

Pētījuma uzdevumi

1. Izvērtēt digestātu un koksnes pelnus kā enerģētisko zālaugu mēslošanas līdzekļus.
2. Noskaidrot digestāta optimālās normas un izmantošanas režīmu miežabrāļa mēslošanā.
3. Izpētīt slāpekļa, fosfora, kālija aprites ciklu sistēmā: augsne – augi – digestāts/ pelni – augsne – augi.
4. Veikt miežabrāļa un auzeņaires mēslošanas ekonomisko izvērtējumu.

Darba hipotēze

Mēslošanā lietojot bioenerģijas ražošanas blakusproduktus – fermentācijas atliekas jeb digestātu un koksnes pelnus, ir iespējams daļēji segt enerģētisko zālaugu prasības pēc barības elementiem, tādējādi nodrošinot elementu atgriešanu aprītē.

Aizstāvamās tēzes

1. Bioenerģijas ražošanas blakusproduktu izmantošana vismaz par 50% samazina augu barības elementu vajadzību enerģētiskiem zālaugiem.
2. Lietojot palielinātas digestāta normas daļīti, vairākas reizes sezonā, ir iespējams iegūt augstākas miežabrāļa sausnas ražas.
3. Lietojot enerģētisko zālaugu mēslošanā bioenerģijas ražošanas blakusproduktus, kā arī veicot zālaugu pļaušanu augu atmiršanas fāzē, ir iespējama slāpekļa, fosfora un kālija atkārtota izmantošanās.
4. Digestāta un pelnu lietošana zālaugu mēslošanā samazina mēslošanas izmaksas.

Pētījuma novitāte. Pasaulē aizvien aktuālāka kļūst atjaunojamo energoresursu īpatsvara palielināšana, kā arī noslēgta augu barības elementu cikla veidošana. Latvijā līdz šim šo jautājumu kopsakarība attiecībā uz enerģētisko zālaugu audzēšanu praktiski nav pētīta.

Pētījuma rezultātu aprobācija

Pēc šī pētījuma rezultātiem sagatavotas 5 publikācijas, kuras indeksētas Scopus un/vai Web of Science datu bāzēs, 6 publikācijas konferenču rakstu krājumos. Sniegti 6 mutiskie un 5 stenda ziņojumi zinātniskajās konferencēs.

PĒTĪJUMA APSTĀKĻI UN METODES

Pētījumu vieta. Latvijas Lauksaimniecības universitātes (LLU) Zemkopības zinātniskajā institūtā (ZZI) Skrīveros ($56^{\circ}41'$ ziemeļu platuma un $25^{\circ}08'$ austrumu garuma) laika posmā no 2012. līdz 2016. gadam tika veikti pētījumi, iekārtojot divus lauka izmēģinājumus: 1) mēslošanas izmēģinājumu Pardenču laukā, kur miežabrāļa un auzeņairesnes sējumos lietoja atšķirīgus mēslošanas līdzekļus, nodrošinot vienādu NPK daudzumu; 2) mikroizmēģinājumu, kur miežabrāļa sējumā salīdzināja atšķirīgas digestāta mēslojuma normas un tā lietošanas režīmu.

Augsne. Izmēģinājuma lauka augsne Pardenču laukā – virsēji velēnglejota (Latvijas augšņu klasifikācija), atbilstoši starptautiskajai (WRB) augšņu klasifikācijai – Endocalcaric Katostagnic Glossic Retisol (Aric, Cutanic, Drainic, Katoloamic, Ochric). Augsnes granulometriskais sastāvs – smaga smalka mālsmits un galvenie agroķīmiskie rādītāji bija šādi: vidējs organisko vielu saturs ($29.1 - 34.3 \text{ g kg}^{-1}$); reakcija pH KCl $5.9 - 6.5$; ļoti augsts nodrošinājums ar fosforu ($235.3 - 352.3 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$) un vidējs nodrošinājums ar kāliju ($127.5 - 155.9 \text{ mg kg}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$).

Mikroizmēģinājumā bija virsēji velēnglejota smilšmāla augsne, Eutric Retisol (Aric, Cutanic, Drainic, Loamic, Ochric), kuras reakcija pH KCl 6.4 , organisko vielu saturs 25.1 g kg^{-1} , augsts nodrošinājums ar fosforu ($187.2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$) un vidējs ar kāliju ($110.4 \text{ mg kg}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$).

Mēslošanas varianti. Pardenču izmēģinājumā tika pētīta atšķirīgu mēslošanas līdzekļu lietošanas efektivitāte miežabrāļa (*Phalaris arundinacea* L.) ‘Bamse’ un auzeņairesnes (\times *Festulolium*) ‘Felina’ mēslošanā, izmantojot bioenerģijas ražošanas blakusproduktus – koksnes pelnus un digestātu. Tika salīdzināti 5 mēslošanas varianti četros atkārtojumos, kuri tika izvietoti randomizēti:

1. kontrole (K), bez mēslošanas līdzekļu lietošanas;
2. minerālmēsli (Mm);
3. koksnes pelni (P);
4. digestāts (D1) – digestāta pilnā norma, lietota vienu reizi sezonā – agri pavasarī pēc veģetācijas atjaunošanās;
5. digestāts (D2) – digestāta norma lietota dalīti divas reizes sezonā – agri pavasarī pēc veģetācijas atjaunošanās un rudenī pēc zālaugu biomasas novākšanas.

Zālaugu sēja veikta 2012. gada jūlijā parastajā rindsējā, izmantojot sējmašīnu ‘Nordsten NS-1025’. Izsējas norma: miežabrālim 12 , bet auzeņairenei 15 kg ha^{-1} . Viena lauciņa kopējā platība 43.2 m^2 , ražas uzskaites platība – 10 m^2 .

Mēslošanas līdzekļu normas tika izvēlētas ar aprēķinu, lai katrā mēslošanas variantā tiktu iestrādāts vienāds daudzums slāpekļa (N); fosfora (P_2O_5) un kālija (K_2O), attiecīgi 100 , 80 un 160 kg ha^{-1} gadā. Digestāta un pelnu mēslojuma variantos iztrūkstošie barības elementi tika kompensēti ar

minerālmēsliem, kuri tika izmantoti arī minerālmēsļu (Mm) variantā: amonija nitrāts (34.4% N); superfosfāts (20.0% P₂O₅), kālija sulfāts (51% K₂O) un kālija hlorīds (60% K₂O). Sējas gadā mēslojuma normas tika samazinātas uz pusi, lietojot 50 kg ha⁻¹ N; 40 kg ha⁻¹ P₂O₅ un 80 kg ha⁻¹ K₂O. Sējas gadā mēslojums tika iestrādāts augsnē pirms zālaugu sējas, turpmākajos gados izkļiedēts pa augošiem augiem un atstāts bez iestrādes. Variantā D2 digestāta norma tika lietota divos piegājienos: puse tika izkļiedēta veģetācijas sākumā; otra deva – veģetācijas beigās pēc zālaugu zelmeņu novākšanas.

Mikroizmēģinājumā salīdzināja sešus digestāta mēslošanas variantus, izmantojot atšķirīgas digestāta normas un lietošanas režīmus. Digestāta normas aprēķināja atbilstoši slāpeklim (no 0 līdz 150 kg ha⁻¹ N) un izkļiedēja kā vienu, divas vai trīs devas veģetācijas perioda laikā. Mēslošanas varianti un to raksturojums skat. 1. tabulā.

1. tabula / Table 1

Mēslošanas līdzekļu lietošana mikroizmēģinājumā
Fertiliser use in the micro-trial

Variants / <i>Treatment</i>	Digestāts / <i>Digestate,</i> kg ha ⁻¹ N	Mēslojuma lietošanas laiks / <i>Time of</i> <i>fertiliser application</i>
N0	0	Netika lietots / <i>Not used</i>
N30	30	1) vs* – N ₃₀
N60	60	1) vs – N ₆₀
N60 (30+30)	60	1) vs – N ₃₀ ; 2) vv** – N ₃₀
N90 (30+30+30)	90	1) vs – N ₃₀ ; 2) vv – N ₃₀ ; 3) vb*** – N ₃₀
N120 (40+40+40)	120	1) vs – N ₄₀ ; 2) 1. pļ. – N ₄₀ ; 3) vb – N ₄₀
N150 (50+50+50)	150	1) vs – N ₅₀ ; 2) 1. pļ. – N ₅₀ ; 3) vb – N ₅₀

*vs – veģetācijas sākumā / *at the beginning of the vegetation*

**vv – veģetācijas vidū – pēc 1. pļāvuma / *after the 1st cut*

***vb – veģetācijas perioda beigās / *at the end of vegetation*

Mēslojuma varianti izkārtoti randomizēti 4 atkārtojumos, katrs lauciņš 1 m² platībā tika norobežots ar plastikāta maliņām, kuras bija ieraktas augsnē 20 cm dziļumā. Pirms miežabrāļa sējas digestāts tika iestrādāts augsnē, turpmākajos gados – izkļiedēts pa augošiem augiem un atstāts bez iestrādes. Miežabrāļa sēja veikta 2012. gada augustā, izmantojot mazgabarīta mehāniski stumjumu sējmašīnu. Izsējas norma 15 kg ha⁻¹ sēklas.

Mēslošanai izmantoja digestāta šķīdro frakciju, kas iegūta raudzēšanas procesa noslēgumā pēc separēšanas. Pirms katras mēslošanas reizes veica digestāta un koksnes pelnu ķīmisko analīzi, lai precizētu tā lietošanas devu. Augu barības elementu saturs digestātā svārstījās šādās robežās, g L⁻¹: N 2.08 – 5.10; P₂O₅ 0.47 – 1.76 un K₂O 2.20 – 4.44 (skat. 2. tab.). Slāpekļis digestātā lielākoties

bija amonija formā (N–NH₄), tas svārstījās no 1.69 līdz 2.47 g L⁻¹ N–NH₄, kas vidēji sastādīja 58 – 85% no kopējā slāpekļa daudzuma digestātā.

2. tabula / Table 2

Izmēģinājumos izmantotā digestāta un koksnes pelnu ķīmiskais sastāvs /
Chemical composition of digestate and wood ash used in the experiments

Mēslošanas līdzeklis / <i>Fertiliser</i>	Sausna /DM, %	Slāpeklis / <i>Nitrogen, g L⁻¹</i>		P ₂ O ₅ , g L ⁻¹	K ₂ O, g L ⁻¹	Reakcija / <i>Reaction,</i> pH
		kopējais / total	t. sk. / <i>incl.</i> N–NH ₄			
D* 2012	5.4	2.08	n.d.	1.67	3.33	7.9
D* 2013	4.8	2.71	1.69	0.47	2.20	8.0
D* 2014	4.4	4.20	2.47	1.76	4.44	7.9
D* 2015	n.d.	5.10	n.d.	0.70	3.70	8.3
D BMI**13–1	3.5	2.80	2.38	0.67	2.50	8.2
D BMI**13–2	3.4	3.50	n.d.	0.69	2.64	8.2
D BMI**14–1	3.7	2.50	2.13	0.71	2.30	8.1
Pelni / <i>Wood ash</i> 2012, Sigulda***	n.d.	0.40	–	10.90	31.6	n.d.
Pelni / <i>Wood ash</i> 2013, Sigulda***	n.d.	0.20	–	4.50	38.0	n.d.

* Fermentācijas atliekas (digestāts) no biogāzes ražotnēm lopkopības saimniecībās / *Fermentation residues from biogas plants of livestock farms*

** Zālaugu fermentācijas atliekumi no Biomehānikas institūta Rīgā / *Grass fermentation residues from the Institute of Biomechanics in Riga*

*** Stabilizēti koksnes pelni no Siguldas pašvaldības katlumājas / *Stabilized wood ash from Sigulda municipal boiler house*

n.d. Datu nav / *No data*

Novērojumi, uzskaites, analīzes. Trīs lietošanas gados veica zālaugu sausas ražas uzskaiti viena plāvuma un divu plāvumu režīmā: plaušanu viena plāvuma režīmā (rudens plāvums) un arī otro plāvumu veica augu atmiršanas fāzē septembra beigās – oktobra sākumā; pirmo plāvumu veica pilnas skarošanas/vārpošanas fāzē jūnija vidū. Pirmā un rudens plāvuma zeltiem veica struktūras analīzi – noteica lapu, stiebru, vārpu/skaru īpatvaru. LVMI ‘Silava’ Meža vides laboratorijā tika veikta ražas ķīmiskā analīze, noteikts: pelnu, kopējā oglekļa (C); slāpekļa (N); fosfora (P); kālija (K); kalcija (Ca) un magnija (Mg) saturs. Izmantotas šādas metodes: pelnu saturs – pārpelnojot mufelkrāsnī; oglekļa un sēra saturs – izmantojot elementanalizatoru; kopējais slāpeklis – atbilstoši Kjeldāla metodei; fosfors, kālijs, kalcijs un magnijs – pelnu izvilkumā. Visas izmantotās metodes atbilst LVS ISO standartiem. Pirms izmēģinājumu sējas, kā arī zālaugu ceturtajā lietošanas gadā (2012. un

2016. gadā) tika veikta augsnes agroķīmiskā analīze. Noteiktie rādītāji un pielietotās analīžu metodes ir apkopotas 3. tabulā.

3. tabula / Table 3

Augsnes agroķīmisko rādītāju noteikšanas metodes / Methods for determination of soil agrochemical properties

Rādītājs / Property	Metode / Method
Augsnes granulometriskais sastāvs / Soil texture	Slapjā sijašana un sedimentācija / Wet sieving and sedimentation (LVS ISO 11277)
Augsnes blīvums / Soil bulk density	100 mL metāla cilindri / 100 mL metal cylinders (LVS ISO 11272:1998)
Augsnes reakcija / Soil reaction	1.0 M KCl uzduļķojums / 1.0 M KCl suspension (LVS ISO 10390/NAC)
Kopējais ogleklis / Total carbon	Sausā sadedzināšana / Dry combustion (LVS ISO 10694)
Karbonāti / Carbonates	Volumetriski / Volumetrically (LVS ISO 10693:1995)
Kopējais slāpeklis / Total nitrogen	Modificēta Kjeldāla metode / Modified Kjeldahl method (LVS ISO 11261)
Augiem izmantojamais fosfors / Plant available phosphorus	0.2 M HCl ekstraktā, spektrofotometriski (LVS 398) / 0.2 M HCl extract, spectrophotometrically
Augiem izmantojamais kālijs / Plant available potassium	0.2 M HCl ekstraktā, liesmas fotometrs (LVS 398) / 0.2 M HCl extract, flame photometry
Minerālais slāpeklis (nitrātu un amonija) / Mineral nitrogen (nitrate and ammonium)	0.1 M NaCl ekstraktā, spektrofotometriski (LVS 398) / 0.2 M NaCl extract, spectrophotometrically

Šajā darbā fosfora un kālija koncentrācijas izteikšanai augsnē, augu barības elementu izneses un bilances aprēķiniem, kā arī apzīmējot atbilstošas mēslošanas normas un devas, tiek izmantota to oksīdu forma (P_2O_5 un K_2O). Tāpēc tekstā šajā kontekstā lietotie nosacītie apzīmējumi fosfors un kālijs nozīmē attiecīgi P_2O_5 un K_2O . Savukārt zālaugu biomasas ķīmiskais sastāvs, ieskaitot arī fosforu un kāliju, tiek norādīts elementu veidā: N, P, K, C.

Mēslošanas efektivitātes aprēķini. Augu barības elementu (NPK) iznese aprēķināta, ņemot vērā sausas ražu un tās ķīmisko sastāvu. Augu barības elementu bilance izteikta divējādi: gan pēc masas (iedotā un iznestā starpība, $kg\ ha^{-1}$), gan arī relatīvi, iznestā īpatsvars procentuāli no iedotā daudzuma.

Viens no efektivitāti raksturojošiem rādītājiem zālaugiem var būt iegūtā sausas raža, attiecinot to uz 1 kg lietotā slāpekļa (ražas indekss jeb N_R). Kā otru var aprēķināt ražas pieaugumu (mēslotajos variantos iegūtā raža mīnus kontroles variantā iegūtā raža), kas attiecināta uz 1 kg lietoto slāpekli (ražas pieauguma

indekss – N_{RP}). Iegūtie rādītāji abos gadījumos būs relatīvi, jo viss iegūtās ražas apjoms vai arī ražas pieaugums tiek attiecināts uz slāpekli, ignorējot fosfora un kālija ietekmi.

Lai spriestu par lietotā mēslojuma izmantošanos, tika aprēķināts slāpekļa, fosfora un kālija tā sauktais “šķīstamās izmantošanās” koeficients (N_{sk} , P_{sk} un K_{sk}). Lietotais pieņēmums – augu barības elementa iznesas starpība mēslotajā un nemēslotajā variantā, attiecināta pret ar mēslojumu iedoto slāpekļa (fosfora vai kālija) daudzumu. Aprēķinā tiek pieņemts, ka augi vienādā daudzumā izmanto augu barības elementus no augsnes gan kontroles, gan arī mēslotajos variantos.

Tika aprēķinātas minerālmēsļu, koksnes pelnu un digestāta lietošanas izmaksas pie nosacījuma, ka zālaugiem visos variantos tiek nodrošināta ekvivalenta slāpekļa, fosfora un kālija tūrvielas norma. Tika salīdzinātas arī miežabrāļa mēslošanas izmaksas, lietojot atšķirīgas digestāta mēslojuma normas. Mēslojuma transportēšanas un izklīdes izmaksu noteikšanai izmantots LLKC¹ tehnisko pakalpojumu vidējo cenu apkopojums pēdējo piecu gadu laikā (2016. – 2020).

Datu matemātiskā apstrāde. Izmēģinājumos iegūtie dati tika statistiski apstrādāti, izmantojot aprakstošās statistikas metodiku. Variācijas koeficients (V%) < 10% raksturots kā zems, > 20% kā augsts. Datu analīzei izmantota „*Microsoft Office Excel*” datorprogramma, pielietojot divfaktoru un daudzfaktoru dispersijas analīzi, korelācijas un faktoranalīzes metodes. Iegūto datu būtiskuma vērtēšanai un kopējo sakarību analīzei tika izmantots Fišera kritērijs (F). Atšķirības starp variantu vidējiem rādītājiem vērtētas, izmantojot robežstarpību ar ticamības pakāpi 0.05 ($R_{s0.05}$).

¹ Latvijas Lauku konsultāciju un izglītības centrs

PĒTĪJUMU REZULTĀTI UN DISKUSIJA

1. Mēslojuma ietekme uz zālaugu ražu

Zālaugu saunas ražu būtiski ietekmēja zālaugu suga, lietotais mēslojums, kā arī pļaušanas režīms. Bez mēslojuma lietošanas tika iegūtas būtiski zemākas saunas ražas – miežabrālim vidēji 3.87 t ha⁻¹ un 4.60 t ha⁻¹; auzenairenei 2.09 t ha⁻¹ un 2.43 t ha⁻¹, attiecīgi divu pļāvumu un viena pļāvuma režīmā. Visu mēslošanas līdzekļu lietošana nodrošināja būtiski augstākas zālaugu saunas ražas salīdzinājumā ar kontroles variantu, kur mēslošanas līdzekļi netika lietoti. Vidēji trīs lietošanas gados divu pļāvumu režīmā saunas raža miežabrālim, atkarībā no lietotā mēslojuma, svārstījās no 5.64 t ha⁻¹ līdz 8.14 t ha⁻¹; auzenairenei no 3.63 t ha⁻¹ līdz 5.34 t ha⁻¹. Viena pļāvuma režīmā mēslotajos variantos saunas raža miežabrālim svārstījās no 6.24 t ha⁻¹ līdz 8.11 t ha⁻¹; auzenairenei no 3.98 t ha⁻¹ līdz 7.02 t ha⁻¹ (skat. 4. tab.).

4. tabula / Table 4

**Zālaugu saunas raža atkarībā no mēslojuma un pļaušanas režīma /
Dry matter yield (DMY) depending on fertilisation and mowing regime**

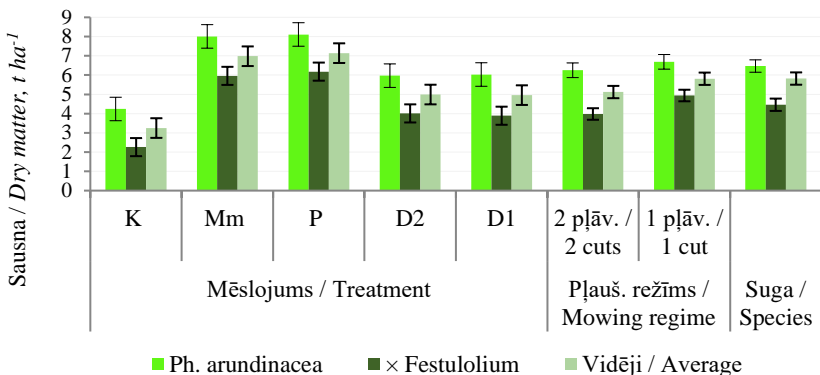
Mēslojums / Treatment	<i>Phalaris arundinacea</i> L.		× <i>Festulolium</i>	
	2 pļāvumi / 2 cuts*	1 pļāvums / 1 cut**	2 pļāvumi / 2 cuts*	1 pļāvums / 1 cut**
Kontrole / Control	3.87±0.17	4.60±0.33	2.09±0.24	2.43±0.18
Minerālmēsli/ Mineral fertilisers	7.91±0.38	8.11±0.19	5.06±0.31	6.85±0.19
Pelni / Wood ash	8.14±0.67	8.08±0.40	5.34±0.41	7.02±0.52
D1 / Digestate 1×	5.71±0.33	6.24±0.31	3.63±0.17	4.39±0.34
D2 / Digestate 2×	5.64±0.25	6.43±0.29	3.80±0.29	3.98±0.25
RS _{0.05} / LSD _{0.05}	1.37	0.98	0.92	1.11

* – 2 pļāvumi / 2 cuts – divi pļāvumi sezonā / two cuts per season

** – 1 pļāvums / 1 cut – viens pļāvums sezonā / one cut per season

Salīdzinoši efektīvāk tika izmantoti minerālmēsli (Mm) un pelnu mēslojums (P), kuru lietošana trīs gadu periodā nodrošināja augstākās saunas ražas, attiecīgi 7.14 t ha⁻¹ (P) un 6.98 t ha⁻¹ (Mm) abām zālaugu sugām vidēji (1. att.). Arī digestāta mēslojums deva būtisku ($p < 0.05$) saunas ražas pieaugumu salīdzinājumā ar kontroles variantu (+1.73 t ha⁻¹ vidēji abām sugām), tomēr digestāta mēslojuma lietošana nenodrošināja pelnu un minerālmēsļu variantos iegūto ražas līmeni. Tam par iemeslu varēja būt iespējamās slāpekļa emisijas amonjaka veidā, ņemot vērā faktu, ka digestātā liela daļa slāpekļa bija šādā formā un digestāts, tāpat kā citi mēslošanas līdzekļi, zelmeņu izmantošanas gados tika izklaidēts virspusēji. Kaut arī slāpekļa emisijas netika noteiktas,

citviet veiktie pētījumi liecina, ka digestātā esošais amonija slāpekļis, ja nenotiek tā iestrāde augsnē, daļēji emitē.



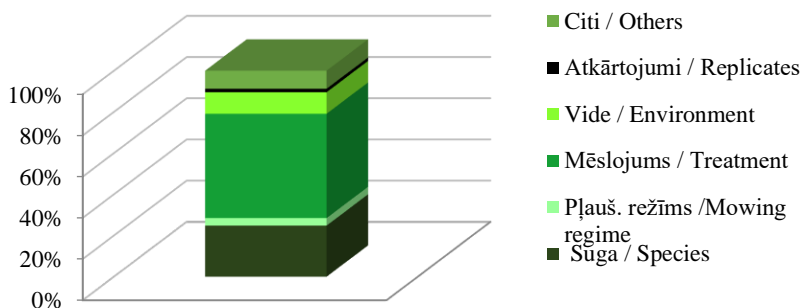
1. att. / Fig. 1. Sausnas raža atšķirīgu faktoru ietekmē vidēji divos pļaušanas režīmos, t ha⁻¹ / Dry matter yield affected by different factors, on average in two mowing regimes

Digestāta lietošana gan vienā paņēmienā, gan dalīti divos paņēmienos nodrošināja līdzvērtīgu sausnas ražu. Toties tika konstatētas būtiskas atšķirības sausnas ražas ziņā starp zālaugu sugām: vidēji trīs gadu periodā abos pļaušanas režīmos visos mēslojuma variantos būtiski ($p < 0.05$) augstāku sausnas ražu nodrošināja miežabrāļa zelmeņi – 6.47 t ha⁻¹, kamēr auzeņairenes vidējā raža bija ievērojami zemāka – 4.46 t ha⁻¹. Atšķirības starp pļaušanas režīmiem nevar vērtēt viennozīmīgi: sausnas ražas atšķirās pa pļāvumiem, izmantošanas gadiem, sugām un arī mēslošanas variantiem, bet kopumā trīs lietošanas gados augstāka sausnas raža tika iegūta viena pļāvuma režīmā.

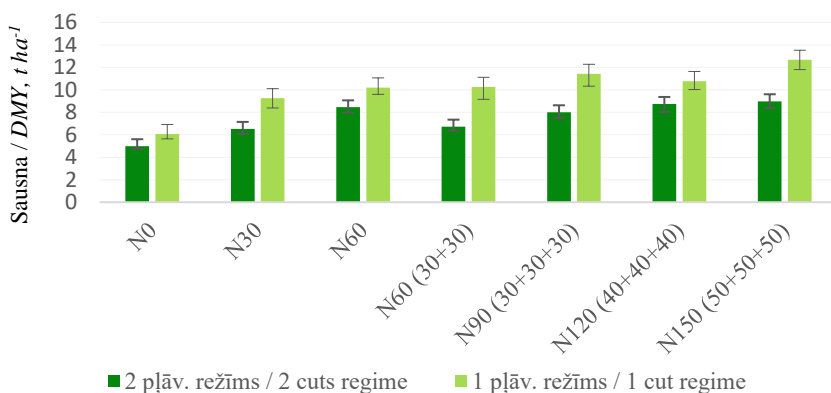
Faktoru analīze parādīja, ka zālaugu sausnas ražu visvairāk ietekmēja mēslojums: tā ietekmes īpatsvars vidēji abām sugām bija 56.6%. Otrs nozīmīgākais faktors bija zālaugu suga (27.7%). Pļaušanas režīma ietekmes īpatsvars vidēji bija 4.1% (2. att.).

Visas digestāta mēslojuma normas nodrošināja būtiski ($p < 0.05$) augstākas sausnas ražas salīdzinājumā ar kontroles variantu (3. att.). Miežabrāļa sausnas raža mikroizmēģinājumā ar atšķirīgām digestāta normām un lietošanas režīmu divu pļāvumu režīmā vidēji trīs lietošanas gados svārstījās no 4.99 t ha⁻¹ nemēslojamā (kontroles) variantā līdz 8.99 t ha⁻¹ variantā ar augstāko digestāta devu (N150 (50+50+50)). Nebūtiski zemāka bija sausnas raža, lietojot digestāta normas N120 (40+40+40) (8.75 t ha⁻¹) un N60 (8.45 t ha⁻¹). Būtiski augstākas miežabrāļa sausnas ražas vidēji trīs lietošanas gados tika iegūtas viena pļāvuma režīmā salīdzinājumā ar divu pļāvumu režīmu, attiecīgi 10.09 t ha⁻¹ un 7.49 t ha⁻¹. Viena pļāvuma režīmā būtiski augstāka sausnas raža tika iegūta, lietojot augstāko digestāta normu N150 (50+50+50) (12.67 t ha⁻¹). Iegūtie dati

uzskatāmi parādīja miežabrālim raksturīgās augu barības elementu aprites priekšrocības, kuras augu atmiršanas fāzē ļauj pārvietot barības elementus no virszemes daļām uz saknēm.



2. att. / Fig. 2. Faktoru ietekme uz zālaugu sausnas ražu, % / Importance of factors on dry matter yield of grasses



3. att. / Fig. 3. Miežabrāļa sausnas raža atkarībā no digestāta lietošanas normas, t ha⁻¹ / Dry matter yield of reed canary grass depending on application rate of digestate

2. Ražas struktūra

Zālaugu zelmeņu sausnas kvalitāte var būtiski atšķirties atkarībā no to struktūras – lapu un stiebru īpatsvara, kurš var mainīties dažādu faktoru ietekmē. Biokurināmā ražošanai vēlami zelmeņi ar iespējami augstāku stiebru īpatsvaru. Augstākais stiebru īpatsvars (68.9% – 74.9%) miežabrālim tika konstatēts rudens pļāvumam viena pļāvuma režīmā. Divu pļāvumu režīmā vidēji trīs lietošanas gados būtiski augstāks stiebru īpatsvars (61.0% – 70.2%) tika konstatēts

1. plāvumā, 2. plāvumā tas svārstījās 46.6% – 51.6% robežās (skat. 5. tab.). Zemākais stiebru īpatsvars visos plāvumos tika konstatēts kontroles variantā. Būtiski augstāks tas bija 1. plāvumā minerālmēslu (Mm) un pelnu (P) mēslojuma variantos. Līdzīgas tendences parādījās arī rudens plāvumā viena plāvuma režīmā. Ziedkopu (skaras / vārpas) daudzums viena plāvuma režīmā fiksēts pavisam niecīgā daudzumā: 0.2 – 0.3% apmērā, jo vēlīnā ražas vākšanas termiņā dēļ ziedkopas bija daļēji iznīcinātas – nolūzušas, nobirušas utt.

5. tabula / Table 5

Zālaugu zelmeņa ražas struktūra, % sausnas
Grass yield structure, % (dry matter)

Mēsloš. variants/ <i>Treatment*</i>	1. plāvums / <i>1st cut</i>			2. plāvums / <i>2nd cut</i>		Rudens plāvums / <i>Autumn cut</i>		
	stieбри / <i>culms</i>	lapas / <i>leaves</i>	skaras / <i>panicles</i>	stieбри / <i>culms</i>	lapas / <i>leaves</i>	stieбри / <i>culms</i>	lapas / <i>leaves</i>	skaras / <i>panicles</i>
<i>Phalaris arundinacea L.</i>								
K	61.0	37.6	1.5	47.8	52.3	68.9	30.8	0.3
Mm	70.2	28.2	1.6	51.6	48.4	73.2	26.5	0.3
P	70.1	28.5	1.4	51.1	48.9	74.9	24.8	0.3
D1	64.5	34.1	1.4	48.9	51.1	71.8	28.0	0.2
D2	66.7	31.5	1.8	46.6	53.4	70.7	29.0	0.3
<i>RS_{0.05} / LSD_{0.05}</i>	8.35	8.96	1.40	6.01	6.01	8.61	8.69	0.22
<i>×Festulolium</i>								
K	48.0	38.5	13.5	6.1	93.9	34.8	61.6	4.3
Mm	50.5	39.7	9.8	8.5	91.5	24.6	72.5	2.9
P	44.0	43.7	12.3	12.1	87.9	22.1	75.6	2.3
D1	48.6	40.3	11.1	6.7	93.3	27.5	69.3	3.3
D2	49.2	39.0	11.8	8.9	91.1	30.9	66.0	3.2
<i>RS_{0.05} / LSD_{0.05}</i>	10.82	11.86	3.74	6.33	6.33	14.56	15.95	2.37

* Mēslošanas variants / *Treatment*: K – kontrole bez mēslojuma lietošanas / *control without fertiliser*; Mm – minerālmēsli / *mineral fertilisers*; P – pelnu mēslojums / *wood ash*; D1 – digestāts, lietots vienā paņēmiņā / *full rate of digestate, applied in one treatment*; D2 – digestāts, lietots daļīti divos paņēmiņos / *split rate of digestate, applied in two treatments*

Auženairenei stiebru īpatsvars kopumā bija zemāks salīdzinājumā ar miežabrāli (44.0 – 50.5% 1. plāvumā; 6.1 – 12.1%, 2. plāvumā; 22.1 – 34.8% rudens plāvumā). Netika konstatētas būtiskas atšķirības stiebru īpatsvara ziņā mēslošanas variantu starpā. Auženairenei tika konstatēts ievērojami augstāks ziedkopu īpatsvars 1. plāvumā (9.8 – 13.5%). Rudens plāvumā iepriekšminēto

iemeslu dēļ (nolūšana, nobiršana utt.) arī auzeņairenei ziedkopu īpatsvars salīdzinājumā ar 1. plāvumu bija ievērojami zemāks, tas svārstījās no 2.3% līdz 4.3%, bet atšķirības starp mēslošanas variantiem nebija statistiski būtiskas. Kopumā būtiski augstāku stiebru īpatsvaru nodrošināja miežabrāļa zelmeņi un viena plāvuma režīms (abām sugām).

Arī mikroizmēģinājumā viena plāvuma režīmā tika konstatēts būtiski augstāks stiebru īpatsvars – vidēji 63.8% salīdzinājumā ar 56.0% divu plāvumu režīmā. Palielinot digestāta mēslojuma normu, palielinājās miežabrāļa ziedkopu īpatsvars no 1.4% līdz 5.1%, 1. plāvumā, iezīmējot likumsakarību: jo augstāka digestāta norma, jo augstāks ziedkopu īpatsvars. Šis rādītājs ir īpaši nozīmīgs sēklaudzēšanas sējumos.

3. Ražas ķīmiskais sastāvs

Pelnu saturs svārstījās atkarībā no auga daļas, zālaugu sugas un plaušanas laika. Miežabrāļa lapās, salīdzinājumā ar auzeņairesnes lapām, konstatēts būtiski ($p < 0.05$) zemāks pelnu saturs, kas kurināmā izejmateriālam vērtējams pozitīvi: 7.7% un 8.5% 1. plāvumā; 6.3% un 7.2% rudens plāvumā, attiecīgi miežabrālim un auzeņairenei. Gan miežabrāļa, gan auzeņairesnes stiebrus bija būtiski zemāks pelnu saturs salīdzinājumā ar lapām: tas svārstījās ap 5.8% 1. plāvumā un ap 3.5 – 4.3% rudens plāvumā. Izšķiroša nozīme pelnu satura ziņā bija plaušanas laikam – gan miežabrālim, gan auzeņairenei būtiski zemāks pelnu saturs konstatēts rudens plāvumā – vidēji 5.4%, kamēr 1. plāvuma zelmeņi tas vidēji bija 6.5%, bet 2. plāvumā 8.4%. Tas skaidrojams ar augu barības elementu translokāciju no virszemes daļām uz saknēm augu atmiršanas fāzē, kā arī minerālvielu iespējamo izskalošanos no biomasas ar nokrišņiem. Apkopojot abu sugu vidējos rādītājus, konstatēts, ka pelnu saturs pirmajā un rudens plāvumā attiecīgi bija: 8.1% un 6.7% lapās; kā arī 5.8% un 3.9% stiebrus. Iegūtie dati ļauj secināt, ka, veicot zālaugu plaušanu augu atmiršanas fāzē, kad stiebru īpatsvars zelmeņi ir augstāks, var iegūt kvalitatīvāku izejmateriālu kurināmā ražošanai, jo pelnu saturs stiebrus bija ievērojami zemāks, tas svārstījās ap 5%. Pelnu saturs miežabrāļa un auzeņairesnes ziedkopās bija gandrīz identisks – vidēji 5.3% un 5.4%. Vērtējot mēslojuma ietekmi, konstatēts, ka miežabrālim zemākais pelnu saturs bija ražīgākajiem zelmeņiem, minerālmēsļu un pelnu variantos, savukārt auzeņairenei nekonstatēja būtiskas atšķirības. Miežabrāļa sausnā pelnu saturs bija būtiski zemāks salīdzinājumā ar auzeņaireni: attiecīgi 6.54% un 7.06% (skat. 6. tab.).

Ogleklis (C) ir galvenais degošais elements kurināmajā. Atkarībā no auga daļas, zālaugu sugas, plaušanas laika un lietotā mēslojuma tā daudzums svārstījās vidēji no 454 līdz 539 g kg⁻¹ C. Būtiski ($p < 0.05$) augstāks oglekļa saturs tika konstatēts, lietojot minerālmēslus (Mm) (skat. 6. tab.). Liela nozīme bija auga daļai – stieбри saturēja vairāk oglekļa. Atkarībā no plāvuma, būtiski augstāks oglekļa saturs tika konstatēts rudens plāvumā – vidēji 505.9 g kg⁻¹ C. Pirmā un

otrā plāvuma zelmeņos oglekļa saturs praktiski neatšķīrās, tas attiecīgi bija 475.1 un 477.1 g kg⁻¹ C. Būtiski augstāks oglekļa saturs tika konstatēts miežabrālim, vidēji visos plāvumos 488.0 g kg⁻¹ (rudens plāvumā vidēji bija 514.2 g kg⁻¹, 1. un 2. plāvumā attiecīgi 471.7 g kg⁻¹ un 478.1 g kg⁻¹), kamēr auzeņairenei tas bija vidēji 484.1 g kg⁻¹ (no 476.2 g kg⁻¹ 2. plāvumā līdz 497.6 g kg⁻¹ rudens plāvumā) (skat. 6.tab.).

6. tabula / Table 6

Zālaugu sausas ķīmiskais sastāvs vidēji visos plāvumos /
Chemical composition of grass dry matter, average of all cuts

Variants / Variant	Pelni / Ash, %	C, g kg ⁻¹	N, g kg ⁻¹	P, g kg ⁻¹	K, g kg ⁻¹
Mēslojums / Fertilisation					
K	7.03±0.34	483.7±4.75	11.07±0.11	2.26±0.01	14.47±0.17
Mm	6.39±0.21	490.6±1.18	12.65±0.31	1.80±0.06	15.21±0.73
P	6.69±0.09	487.5±3.40	13.10±0.19	1.91±0.02	15.85±0.64
D1	6.82±0.11	485.3±3.97	11.39±0.47	2.20±0.04	16.99±0.54
D2	7.05±0.11	483.2±1.92	10.91±0.06	2.24±0.06	16.44±0.62
Suga / Species					
<i>Ph. arundinacea</i>	6.54±0.29	488.0±4.59	10.91±0.19	2.29±0.04	14.05±0.21
× <i>Festulolium</i>	7.06±0.05	484.1±1.50	12.74±0.03	1.87±0.05	17.53±0.22

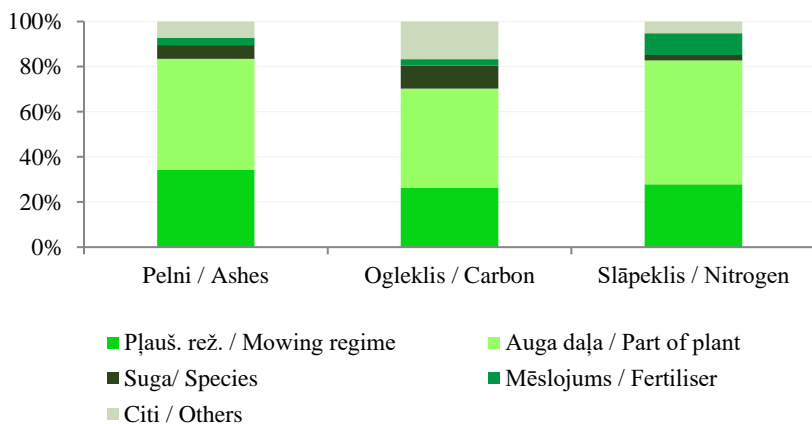
Slāpekļis (N) zālaugu sausnā kurināmajam nav vēlams, jo tas degšanas laikā emitē. Atkarībā no zālaugu sugas un lietotā mēslojuma vidējais slāpekļa saturs svārstījās no 11.11 g kg⁻¹ līdz 20.73 g kg⁻¹ 1. plāvumā; no 11.04 g kg⁻¹ līdz 14.26 g kg⁻¹ 2. plāvumā un no 6.53 g kg⁻¹ līdz 11.45 g kg⁻¹ rudens plāvumā. Būtiski vairāk slāpekļa saturēja zelmeņi pelnu (P) un minerālmēslu (Mm) variantos – attiecīgi 13.10 g kg⁻¹ N un 12.65 g kg⁻¹ N vidēji abos pļaušanas režīmos (skat. 6. tab.). Būtiskas atšķirības slāpekļa satura ziņā bija novērojamas sugu starpā, miežabrālis saturēja mazāk slāpekļa – vidēji 10.91 g kg⁻¹ N (12.88 g kg⁻¹ N 1. plāvumā; 12.82 g kg⁻¹ N 2. plāvumā un 7.03 g kg⁻¹ N rudens plāvumā). Auzeņairenei slāpekļa saturs bija vidēji 12.74 g kg⁻¹ N (svārstījās no 10.46 g kg⁻¹ N rudens plāvumā līdz 16.25 g kg⁻¹ N 1. plāvumā). Stieбри saturēja vidēji 2.5 reizes mazāk slāpekļa nekā lapas.

Fosfora (P) saturs zālaugu sausnā bija salīdzinoši zems, vidēji svārstījās 0.5 – 2.5 g kg⁻¹ P robežās. Augstāks fosfora saturs bija lapās, turklāt 1. plāvuma lapās tas bija būtiski augstāks (1.97 – 2.66 g kg⁻¹ P) salīdzinājumā ar rudens plāvumu, kur fosfora saturs lapās svārstījās no 1.68 līdz 2.11 g kg⁻¹ P. Zemākais fosfora saturs konstatēts auzeņairesnes stiebrus rudens plāvumā (0.48 – 0.79 g kg⁻¹ P), kamēr miežabrāļa stiebrus tas bija ievērojami (2 – 3 reizes) augstāks, svārstījās no 1.12 līdz 2.20 g kg⁻¹ P. Pirmā un otrā plāvuma zelmeņos

kopumā netika konstatētas būtiskas atšķirības fosfora satura ziņā, bet rudens plāvumā tas bija būtiski zemāks. Sugu starpā būtiski augstāks fosfora saturs visos plāvumos bija miežabrāļa zelmeņiem.

Kālijs (K) pazemina pelnu kušanas temperatūru, kas vērtējams kā negatīvs process, tādēļ biokurināmā ražošanai jācenšas iegūt zālaugu sausnu ar iespējami zemāku kālija saturu. Būtiski ($p < 0.05$) zemāks (vidēji 2 – 4 reizes salīdzinājumā ar 1. plāvumu) kālija saturs bija rudens plāvumā. Salīdzinot sugu starpā, konstatēts, ka būtiski zemāks kālija saturs visos plāvumos gan stiebrs, gan lapās bija miežabrālim, turklāt miežabrāļa lapās un stiebrs kālija saturs bija līdzvērtīgs. Turpretī auzeņairesnes lapās visos plāvumos konstatēts būtiski augstāks (vidēji 22.1 g kg⁻¹ K) kālija saturs salīdzinājumā ar stiebriem (13.65 g kg⁻¹ K). Kaut arī rezultāti variēja pa plāvumiem, kopumā zālaugu sausna ar zemāko kālija saturu tika iegūta kontroles variantā, savukārt būtiski augstāks kālija saturs bija ar digestātu mēslotajos zelmeņos, kas varētu būt skaidrojams ar to, ka digestātā esošais kālijs bija augiem vieglāk uzņemamā formā. Miežabrāļa sausnā visos plāvumos konstatēts būtiski zemāks kālija saturs salīdzinājumā ar auzeņairesi, vidējie rādītāji bija attiecīgi 14.05 g kg⁻¹ K un 17.53 g kg⁻¹ K (skat. 6. tab.). Līdzīgas tendences – augstāks kālija saturs mēslošanas ietekmē salīdzinājumā ar nemēslotajiem zelmeņiem, kā arī pie augstākām kālija mēslojuma normām ir konstatētas arī citu pētnieku izmēģinājumos.

Kopumā var secināt, ka zālaugu sausnas ķīmisko sastāvu ietekmēja vairāki faktori. Pelnu satura ziņā izšķiroša nozīme bija auga daļai (49.2%) un plaušanas režīmam (34.2%). Sugas izvēle pelnu saturu ietekmēja 6.1% apmērā, mēslojums – 3.3% apmērā (4. att.).



4. att. / Fig. 4. **Dažādu faktoru ietekme uz zālaugu sausnas ķīmisko sastāvu / Influence of different factors on the chemical composition of grass dry matter**

Arī oglekļa un slāpekļa saturu lielā mērā noteica zelmeņa frakcija jeb auga daļa (attiecīgi 43.9% un 54.9%) un pļaušanas režīms (attiecīgi 26.3% un 27.9%). Oglekļa saturu 10.3% apmērā noteica sugas izvēle, savukārt slāpekļa saturu 9.6% apmērā ietekmēja lietotais mēslojums. Atšķirīgas digestāta mēslojuma normas neatstāja būtisku ietekmi uz miežabrāļa zelmeņa ķīmisko sastāvu – vidējais pelnu saturs miežabrāļa sausnā vidēji viena un divu pļāvumu režīmā pa mēslošanas variantiem svārstījās no 6.2% līdz 6.9%. Tāpat netika konstatētas būtiskas atšķirības oglekļa, slāpekļa un arī kālija satura ziņā.

4. Augu barības elementu iznese ar ražu

Augu barības elementu (NPK) saimnieciskā iznese jeb augu barības elementu daudzums, kuru visā pētījumu periodā ar ražu aizgādāja projām no lauka, pa gadiem svārstījās plašā amplitūdā, un bija atkarīgs no iegūtās ražas un tās ķīmiskā sastāva. Tādējādi faktori, kas ietekmēja šos lielumus, summāri atspoguļojās arī izneses skaitliskajās vērtībās. Lielāko ietekmi uz iznesi veidoja pētītā zālaugu suga un zelmeņa pļaušanas režīms.

Slāpekļa (N) iznese vidēji gadā divu pļāvumu režīmā miežabrālim variēja no 54.0 kg ha⁻¹ N bez mēslojuma izmantošanas līdz 142.9 kg ha⁻¹ N, lietojot pelnu mēslojumu (skat. 7. tab.). Viena pļāvuma režīmā slāpekļa iznese bija vidēji divas reizes zemāka, tā variēja no 39.0 kg ha⁻¹ N bez mēslojuma lietošanas līdz 69.1 kg ha⁻¹ N, lietojot minerālmēslus.

7. tabula / Table 7

Slāpekļa (N) un kālija (K₂O) iznese, kg ha⁻¹ gadā / Nitrogen (N) and potassium (K₂O) removal, kg ha⁻¹ per year

Mēslošanas variants / Treatment	Slāpekļlis / Nitrogen (N)		Kālijs / Potassium (K ₂ O)	
	divi pļāvumi / two cuts	viens pļāvums / delayed cut	divi pļāvumi / two cuts	viens pļāvums / delayed cut
<i>Phalaris arundinacea</i> L.				
K	54.0±3.21	39.0±3.11	92.6±5.59	45.2±3.60
Mm	113.2±3.07	69.1±0.44	207.3±5.41	70.6±0.45
P	142.9±8.30	68.2±5.17	202.3±11.77	75.1±5.69
D1	94.5±6.14	56.3±2.69	170.5±11.44	69.8±3.33
D2	80.6±4.26	40.5±0.82	152.0±8.68	80.8±1.64
× <i>Festulolium</i>				
K	23.2±2.17	22.1±2.43	43.4±4.17	38.6±4.23
Mm	67.3±1.53	78.7±4.07	108.7±2.49	129.8±6.71
P	73.3±4.66	77.2±2.82	115.0±7.16	134.6±4.91
D1	44.6±1.57	42.0±2.83	89.3±3.15	85.6±5.76
D2	39.4±1.51	36.6±2.14	85.9±3.20	52.5±3.07

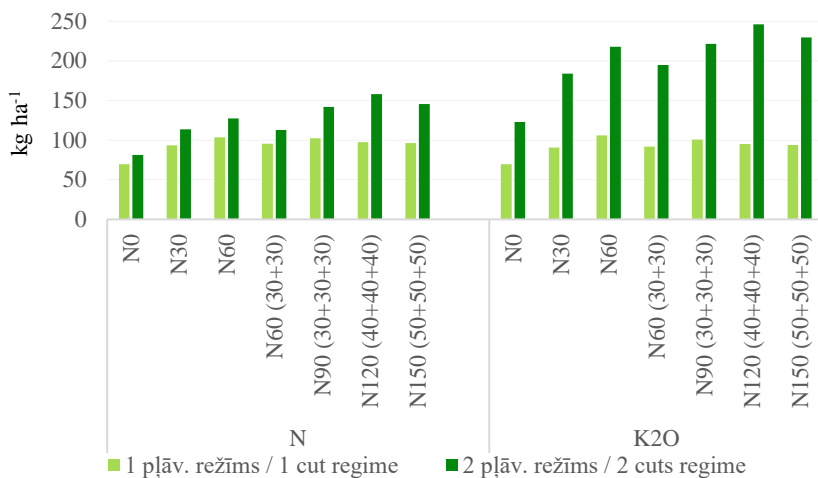
Auzeņaienei abos pļaušanas režīmos slāpekļa iznese bija būtiski zemāka salīdzinājumā ar miežabrāli. To galvenokārt noteica sausnas raža, kas auzeņaienei šajā izmēģinājumā bija zemāka. Divu pļāvumu režīmā auzeņaiene gadā vidēji iznesa no 23.2 kg ha⁻¹ N bez mēslojuma lietošanas līdz 73.3 kg ha⁻¹ N, lietojot pelnu mēslojumu. Auzeņaienei, atšķirībā no miežabrāļa, slāpekļa iznese abos pļaušanas režīmos bija ļoti līdzīga, viena pļāvuma režīmā, tā svārstījās no 22.1 kg ha⁻¹ N bez mēslojuma lietošanas, līdz 78.7 kg ha⁻¹, lietojot minerālmēslus. Iegūtie dati parāda būtiskas atšķirības abu zālaugu sugu starpā slāpekļa uzņemšanas un izmantošanas ziņā.

Fosfora (P₂O₅) iznese, salīdzinājumā ar slāpekli, bija ievērojami zemāka. Miežabrālim divu pļāvumu režīmā gadā vidēji tā svārstījās no 24.2 kg ha⁻¹ P₂O₅ kontroles variantā līdz 48.0 kg ha⁻¹ P₂O₅ pelnu variantā. Viena pļāvuma režīmā fosfora iznese miežabrālim bija gandrīz divas reizes zemāka nekā divu pļāvumu režīmā, savukārt starp mēslošanas variantiem viena pļāvuma režīmā fosfora iznese variēja daudz mazākā mērā – no 22.2 kg ha⁻¹ P₂O₅ bez mēslojuma lietošanas līdz 26.5 kg ha⁻¹ P₂O₅, lietojot pelnu mēslojumu. Auzeņaienei fosfora iznese bija vidēji divas reizes zemāka nekā miežabrālim, divu pļāvumu režīmā tā svārstījās no 9.4 kg ha⁻¹ P₂O₅ bez mēslojuma līdz 19.8 kg ha⁻¹ P₂O₅, lietojot pelnu mēslojumu. Viena pļāvuma režīmā fosfora iznese auzeņaienei bija vidēji par 50% zemāka nekā divu pļāvumu režīmā, tā svārstījās no 6.0 kg ha⁻¹ P₂O₅ kontroles variantā līdz 12.9 kg ha⁻¹ P₂O₅ minerālmēslu variantā.

Kālija (K₂O) iznese bija visaugstākā, tā pārsniedza slāpekļa (N) iznesi apmēram 1.5 – 2 reizes. Vidēji pa pļāvumiem tā sastādīja: 191%; 154% un 151% no slāpekļa izneses attiecīgi pirmajam, otrajam un rudens pļāvumam. Būtiskas atšķirības kālija izneses ziņā tika konstatētas gan starp pļaušanas režīmiem, gan sugām: miežabrālis lielāko kālija daudzumu (207.3 kg ha⁻¹ K₂O) iznesa divu pļāvumu režīmā, lietojot minerālmēslus, savukārt viena pļāvuma režīmā augstākā kālija iznese (75.1 kg ha⁻¹ K₂O) veidojās pelnu mēslojuma variantā (P). Auzeņaienei augstākā kālija iznese abos pļaušanas režīmos bija, lietojot pelnu (P) mēslojumu – 115 un 134.6 kg ha⁻¹ K₂O, attiecīgi divu pļāvumu režīmā un viena pļāvuma režīmā (skat. 7. tab.). Lietojot pelnu mēslojumu un minerālmēslus, kālija iznese bija būtiski augstāka salīdzinājumā ar iznesēm abos digestāta mēslojuma variantos, kur tā svārstījās no 152.0 līdz 170.5 kg ha⁻¹ K₂O. Kopumā viena pļāvuma režīmā visos mēslojuma variantos miežabrālis ar ražu iznesa pat 2 – 3 reizes mazāk kālija nekā divu pļāvumu režīmā. Atšķirībā no miežabrāļa, auzeņaienei kālija iznese pa pļaušanas režīmiem būtiski neatšķīrās.

Augu barības elementu iznese atšķirīgu digestāta mēslojuma normu ietekmē svārstījās plaša amplitūdā. Slāpekļa iznese viena pļāvuma režīmā gadā vidēji svārstījās no 69.56 līdz 103.7 kg ha⁻¹ N; divu pļāvumu režīmā no 81.19 līdz 158.21 kg ha⁻¹ N (5. att.). Zemākā slāpekļa iznese abos pļaušanas režīmos tika konstatēta nemēslotajā variantā; augstākā bija, lietojot digestāta mēslojumu

N60 viena plāvuma režīmā un, lietojot digestāta mēslojumu N120 (40+40+40) divu plāvumu režīmā. Fosfora (P_2O_5) iznese vidēji trīs lietošanas gados divu plāvumu režīmā bija 26.46 – 51.81 $kg\ ha^{-1} P_2O_5$ gadā; viena plāvuma režīmā 26.32 – 43.47 $kg\ ha^{-1} P_2O_5$ gadā. Atšķirībā no slāpekļa un kālija, fosfora izneses ziņā netika konstatētas būtiskas atšķirības pa plaušanas režīmiem. Augstākā fosfora iznese viena plāvuma režīmā bija, lietojot digestāta mēslojumu N150 (50+50+50) un N60, attiecīgi 43.47 $kg\ ha^{-1} P_2O_5$ un 42.54 $kg\ ha^{-1} P_2O_5$ gadā; savukārt divu plāvumu režīmā lielākais fosfora daudzums tika iznests, lietojot digestātu N120 (40+40+40); N90 (30+30+30) un N150 (50+50+50), kur tika iznesti attiecīgi 51.81 $kg\ ha^{-1} P_2O_5$; 46.67 $kg\ ha^{-1} P_2O_5$ un 46.28 $kg\ ha^{-1} P_2O_5$.



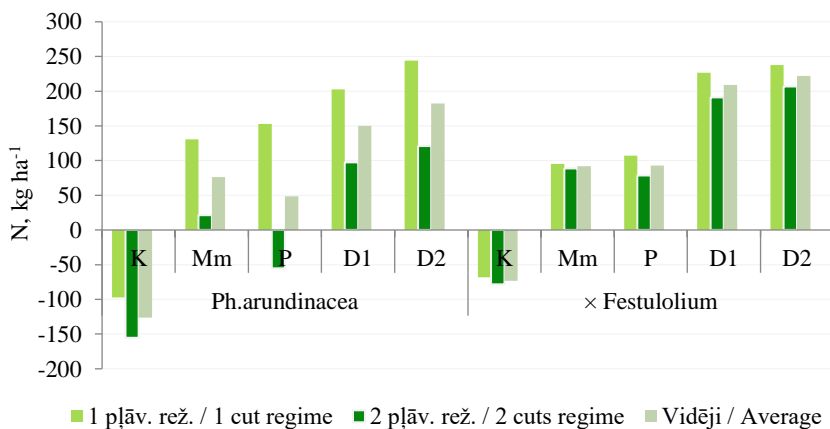
5. att. / Fig. 5. Slāpekļa (N) un kālija (K_2O) iznese vidēji trīs lietošanas gados, $kg\ ha^{-1}$ gadā / Nitrogen (N) and potassium (K_2O) removal (three years average), $kg\ ha^{-1}$ per year

Kālija (K_2O) iznese, atkarībā no digestāta normas, svārstījās no 122.74 – 246.02 $kg\ ha^{-1} K_2O$ gadā. Savukārt viena plāvuma režīmā kālija iznese bija līdzīga slāpekļa iznesei, un svārstījās no 69.74 līdz 105.84 $kg\ ha^{-1} K_2O$ gadā. Zemākās kālija izneses abos plaušanas režīmos, līdzīgi kā slāpeklim, konstatētas nemēslotajā variantā; augstākās – divu plāvumu režīmā, lietojot digestāta normu N60 (217.95 $kg\ ha^{-1} K_2O$) un N120 (40+40+40) (246.02 $kg\ ha^{-1} K_2O$), bet viena plāvuma režīmā, lietojot digestāta normu N60 (105.84 $kg\ ha^{-1} K_2O$). Vidēji visos mēslošanas variantos trīs lietošanas gados viena plāvuma režīmā tika iznests apmēram uz pusi mazāks kālija daudzums nekā divu plāvumu režīmā: attiecīgi 92.54 un 202.32 $kg\ ha^{-1} K_2O$ gadā.

Augu barības elementu bilance tika rēķināta visam izmēģinājumu periodam kopā, sākot no sējumu ierīkošanas līdz ražas novākšanai 3. lietošanas

gadā. NPK bilance tika aprēķināta kā starpība starp ar mēslojumu ienesto slāpekļa (N), fosfora (P₂O₅) un kālija (K₂O) kopējo daudzumu un to NPK daudzumu, kas trīs gadu laikā tika iznests ar novākto ražu. Ja pārskata periodā veidojās augu barības elementu pārpalikums, t.i., ienese bija lielāka par iznesi, veidojās pozitīva bilance (izsakot procentuāli > 100%) un otrādi, iznesei pārsniedzot ienesi, veidojās negatīva bilance (< 100%). Vērtējot NPK bilanci trīs zālaugu lietošanas gados kopā, var secināt, ka viena plāvuma režīmā visos mēslošanas variantos tā bija pozitīva – tika ienests lielāks minēto augu barības elementu daudzums, nekā iznests ar sausnas ražu. Divu plāvumu režīmā kopumā NPK bilance veidojās zemāka, atsevišķos mēslošanas variantos tā bija pat negatīva.

Slāpekļa bilance gandrīz visos mēslotajos variantos bija pozitīva. Izmēģinājumu periodā kopā ar mēslošanas līdzekļiem tika ienesti 350 kg ha⁻¹ N. Viena plāvuma režīmā slāpekļa bilance stipri svārstījās atkarībā no lietotā mēslošanas līdzekļa: miežabrālim no 131 kg ha⁻¹ N jeb 160%, lietojot minerālmēslus, līdz 244 kg ha⁻¹ N jeb 330%, lietojot digestāta normu dalīti (D2); auzeņairenei no 95 kg ha⁻¹ N jeb 137% lietojot minerālmēslus, līdz 237 kg ha⁻¹ N jeb 312%, lietojot digestātu dalīti (D2) (6. att.).

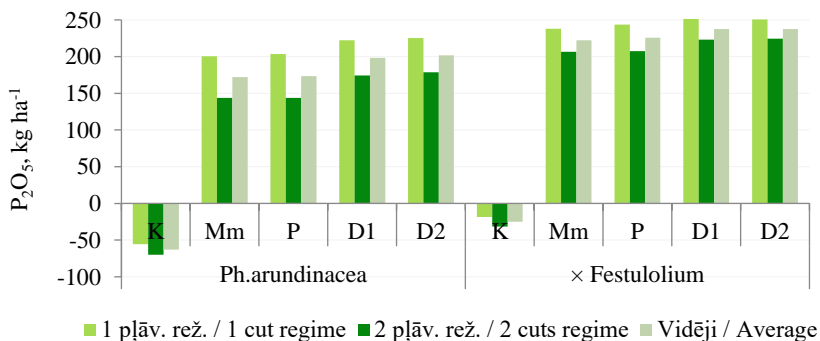


6. att. / Fig. 6. **Slāpekļa bilance kopā trīs zelmeņa lietošanas gados, kg ha⁻¹ / Nitrogen balance over three years of sward use**

Atšķirības slāpekļa bilances ziņā galvenokārt noteica ievāktā sausnas raža. Divu plāvumu režīmā slāpekļa bilance kopumā bija zemāka, zālaugi ar sausnas ražu iznesa ievērojami vairāk slāpekļa, līdz ar to iznests slāpekļa daudzums bija tuvāks ienestajam. Atsevišķos mēslojuma variantos veidojās pat negatīva slāpekļa bilance – miežabrālim tā svārstījās no -55 kg ha⁻¹ N jeb 86%, lietojot pelnu mēslojumu (P), līdz 121 kg ha⁻¹ N jeb 153%, lietojot digestātu dalīti (D2). Savukārt auzeņairenei tā bija pozitīva – no 78 kg ha⁻¹ N jeb 129%, lietojot

pelnu mēslojumu (P), līdz 206 kg ha⁻¹ N jeb 244%, lietojot digestātu dalīti (D2). Salīdzinot slāpekļa bilanci sugu starpā, konstatēts, ka lielāku slāpekļa daudzumu ražas veidošanai trīs gadu periodā kopā patērēja miežabrālis, jo tā sausas raža bija būtiski augstāka. Iegūtie rezultāti parāda, ka divu plāvumu režīmā slāpekļa bilance miežabrālim bija būtiski zemāka nekā viena plāvuma režīmā, un šajā gadījumā galvenā nozīme bija slāpekļa saturam miežabrāļa sausnā ražas vākšanas laikā. To, iespējams, ietekmēja miežabrāļa spēja augu atmiršanas fāzē pārvietot slāpekli no augu virszemes daļām uz saknēm. Auzeņairenei slāpekļa bilance abos plaušanas režīmos būtiski neatšķīrās.

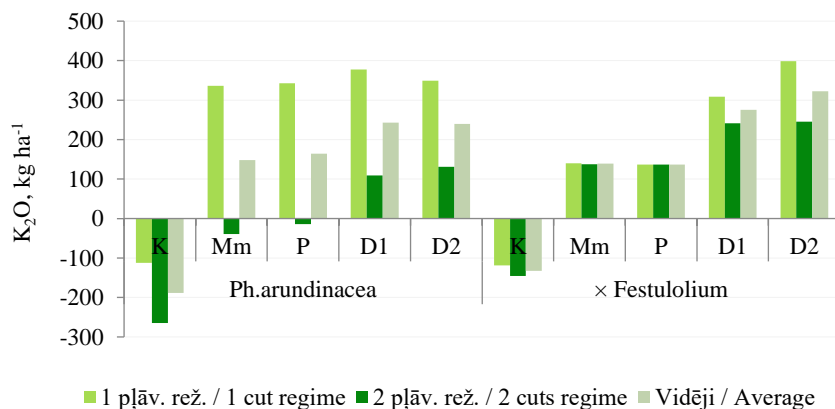
Fosfora bilance mēslotajos variantos variēja atkarībā no zālaugu sugas un plaušanas režīma. Lai arī atšķirības nebija būtiskas, zināmas tendences bija vērojamas. Izmēģinājumu periodā kopā ar mēslošanas līdzekļiem tika ienesti 280 kg ha⁻¹ P₂O₅. Viena plāvuma režīmā miežabrālim fosfora bilance trīs lietošanas gados kopā svārstījās no 200 kg ha⁻¹ P₂O₅ jeb 351%, lietojot minerālmēslus, līdz 225 kg ha⁻¹ P₂O₅ jeb 511%, lietojot digestātu dalīti (D2). Auzeņairenei tā svārstījās no 238 kg ha⁻¹ P₂O₅ jeb 668%, lietojot minerālmēslus, līdz 252 kg ha⁻¹ P₂O₅ jeb 998%, lietojot digestātu vienā paņēmienā (D1) (7. att.). Divu plāvumu režīmā fosfora bilance bija zemāka, tā izmēģinājumu periodā kopā svārstījās miežabrālim no 143 kg ha⁻¹ P₂O₅ jeb 205%, lietojot minerālmēslus, līdz 178 kg ha⁻¹ P₂O₅ jeb 276%, lietojot digestātu dalīti (D2); auzeņairenei no 206 kg ha⁻¹ P₂O₅ jeb 382%, lietojot minerālmēslus, līdz 224 kg ha⁻¹ P₂O₅ jeb 503%, lietojot digestātu dalīti (D2). Vērtējot fosfora bilanci var izdarīt līdzīgu secinājumu – lai gan fosfora iznese skaitliski bija mazāka, tā bilance pa plaušanas režīmiem veidojās ļoti atšķirīgi.



7. att. / Fig 7. Fosfora bilance kopā trīs zelmeņa lietošanas gados, kg ha⁻¹ / Phosphorus balance over three years of sward use

Kālija bilance, atkarībā no plaušanas režīma un zālaugu sugas, veidojās atšķirīga. Kopā izmēģinājumu periodā ar mēslošanas līdzekļiem augsnē tika ienesti 560 kg ha⁻¹ K₂O. Viena plāvuma režīmā mēslotajos variantos miežabrālim

kālija balance bija līdzīga, tā svārstījās no 336 kg ha⁻¹ K₂O jeb 250%, lietojot minerālmēslus, līdz 377 kg ha⁻¹ K₂O jeb 307%, lietojot digestātu vienā paņēmiņā (D1) (8. att.). Auzeņairenei kālija balance ievērojami svārstījās pa variantiem: no 136 kg ha⁻¹ K₂O jeb 132% lietojot pelnu mēslojumu, līdz 399 kg ha⁻¹ K₂O jeb 348%, lietojot digestātu dalīti (D2). Divu plāvumu režīmā kālija balance veidojās ievērojami zemāka, atsevišķos variantos bija pat negatīva: miežabrālim mēslotajos variantos svārstījās no -39 kg ha⁻¹ K₂O jeb 93%, lietojot minerālmēslus, līdz 131 kg ha⁻¹ K₂O jeb 131%, lietojot digestātu dalīti (D2); auzeņairenei no 136 kg ha⁻¹ K₂O jeb 132%, lietojot pelnu mēslojumu (P) līdz 245 kg ha⁻¹ K₂O jeb 178%, lietojot digestātu dalīti (D2). Vērtējot kālija bilanci, uzskatāmi parādījās pļaušanas režīma nozīme augu barības elementu aprītē – pie vienādām NPK mēslojuma devām un līdzvērtīgām miežabrāļa sausnas ražām kālija iznese trīs gadu periodā kopā atšķīrās vairākkārtīgi, līdz pat 375 kg ha⁻¹.



8. att. / Fig. 8. **Kālija balance kopā trīs zelmeņa lietošanas gados, kg ha⁻¹ / Potassium balance over three years of sward use**

Izmēģinājumu periodā kopā ar zālaugu ražu ievērojami lielāks augu barības elementu (NPK) daudzums no augsnes tika iznests divu plāvumu režīmā salīdzinājumā ar viena plāvuma režīmu. Izteiktas atšķirības bija vērojamas miežabrālim, kuram divu plāvumu režīmā balance veidojās apmēram uz pusi zemāka nekā viena plāvuma režīmā. To noteica atšķirības sausnas ķīmiskā sastāva ziņā – miežabrālim rudens plāvumā tika konstatēts būtiski zemāks NPK saturs salīdzinājumā ar divu plāvumu režīmā ievāktu sausu, bet auzeņairenei NPK saturs atšķirīgos plāvumos variēja daudz mazākā mērā, turklāt viena plāvuma režīmā auzeņairesnes sausnas raža bija augstāka, kas zināmā mērā izlīdzināja NPK bilanci abos pļaušanas režīmos. NPK negatīvā balance kontroles variantā ilustrē to barības elementu daudzumu, ko zālaugiem spēj nodrošināt augsne. Izmēģinājumā konstatētie fosfora pozitīvās bilances rādītāji

mēslotajos variantos, rēķinot summāri trīs gadu periodā, ļauj secināt, ka augsnēs ar vidēju un augstu fosfora nodrošinājumu lietojamas zemākas fosfora mēslojuma normas, sevišķi, lietojot digestāta mēslojumu daļīti (D2).

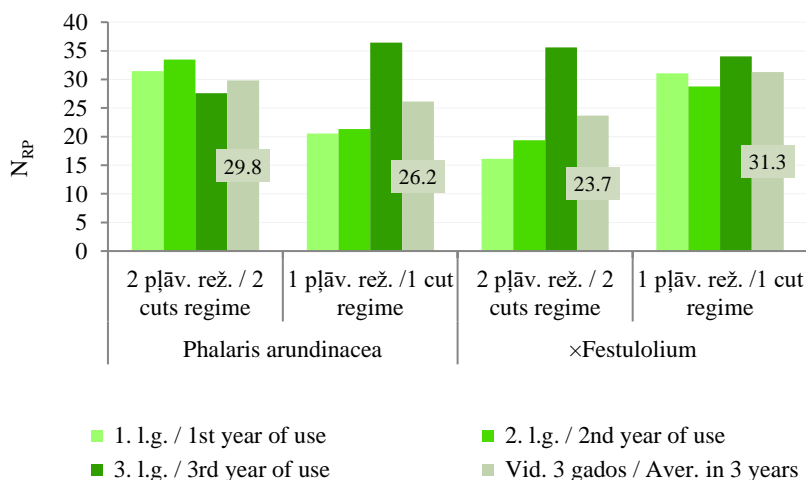
5. Slāpekļa izmantošanās efektivitāte

Lai novērtētu lietotā slāpekļa mēslojuma izmantošanās agronomisko efektivitāti, var lietot dažādus pieņēmumus un rezultātā iegūt atšķirīgus efektivitāti raksturojošos rādītājus. Nosacīti tos var saukt par indeksiem. Viens no efektivitāti raksturojošiem rādītājiem zālaugiem var būt iegūtā sausas ražas, attiecinot to uz 1 kg lietotā slāpekļa (ražas indekss jeb N_R). Kā otru var aprēķināt ražas pieaugumu mēslošanas ietekmē, kas attiecināta uz 1 kg lietoto slāpekli (ražas pieauguma indekss – N_{RP}). Iegūtie rādītāji abos gadījumos būs relatīvi, jo viss iegūtās ražas apjoms vai arī ražas pieaugums tiek attiecināts uz slāpekli, ignorējot fosfora un kālija ietekmi.

Ražas indekss (N_R). Abām zālaugu sugām augstāks ražas indekss (N_R) bija viena plāvuma režīmā – vidēji 63.9 salīdzinājumā ar 56.6 divu plāvumu režīmā. Vidēji trīs lietošanas gados viena plāvuma režīmā N_R indekss svārstījās: miežabrālim no 62.4, lietojot digestātu vienā paņēmienā (D1), līdz 81.1, lietojot minerālmēslus; auzeņairenei no 39.8, lietojot digestātu daļīti (D2), līdz 70.2, lietojot pelnu mēslojumu. Divu plāvumu režīmā vidēji trīs lietošanas gados N_R indekss bija zemāks: miežabrālim no 56.4, lietojot digestātu daļīti (D2) līdz 81.4, lietojot pelnu mēslojumu; auzeņairenei no 36.3, lietojot digestātu vienā paņēmienā (D1), līdz 53.4, lietojot pelnu mēslojumu. Vidēji trīs lietošanas gados būtiski augstāks N_R indekss abos pļaušanas režīmos tika konstatēts miežabrālim – vidēji 68.5 un 72.2, attiecīgi divu un viena plāvuma režīmā, kamēr auzeņairenei tas bija būtiski zemāks – vidēji 44.6 un 55.6, attiecīgi divu un viena plāvuma režīmā. Vērtējot atšķirības mēslošanas variantu starpā, augstākais N_R indekss abām sugām abos pļaušanas režīmos tika konstatēts, lietojot pelnu mēslojumu: vidēji 81.1 miežabrālim un 61.8 auzeņairenei. Tikai nedaudz zemāki N_R indeksi iegūti, lietojot minerālmēslus: attiecīgi 80.1 un 59.6. Vairākos izmēģinājumos graudaugiem līdzīgā veidā aprēķinātais N_R indekss svārstījās ap 40 – 70 (kg graudu uz kg N). Zālaugiem slāpekļa izmantošanas efektivitāte bija salīdzinoši augstāka, jo tika uzskaitīta visa virszemes masa, kamēr graudaugiem līdzīgos aprēķinos ņem vērā tikai graudu ražu.

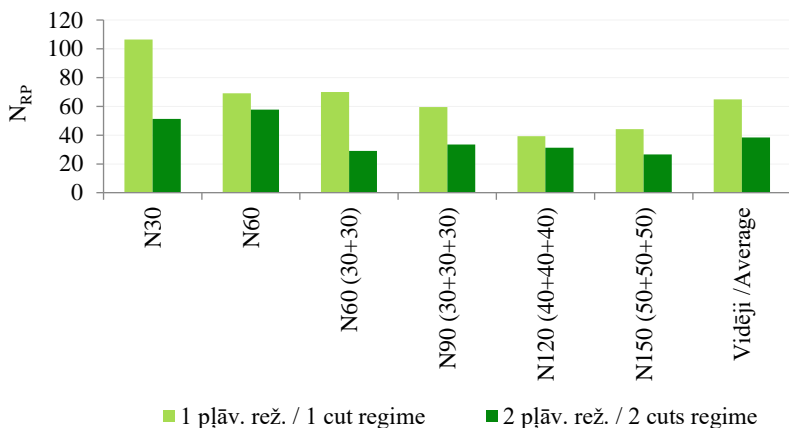
Ražas pieauguma indekss (N_{RP}) labāk atspoguļo mēslojuma ietekmi attiecībā uz iegūto kultūraugu ražu, jo augsnes auglības faktors vairs netiek pieskaitīts kopējam mēslojuma devumam. Lietojot pieaugošas mēslojuma normas, ar šī indeksa palīdzību ir iespējams izsekot arī ražības līknei, tas ir, cik strauji notiek ražas palielinājums noteiktā mēslojuma normas intervālā. Tādējādi N_{RP} indekss parāda efektivitāti, ar kādu augi izmanto katru papildus pielietoto mēslojuma vienību. Miežabrālim N_{RP} svārstījās no 16.4 (D1) līdz 35.1 (Mm) viena plāvuma režīmā un no 17.7 (D2) līdz 42.7 (P) divu plāvumu režīmā;

auzeņairenei attiecīgi: no 15.5 (D2) līdz 45.9 (P) un no 15.4 (D1) līdz 32.5 (P). Augstāks N_{RP} miežabralim tika konstatēts divu plāvumu režīmā, attiecīgi 29.8 pret 26.2, savukārt auzeņairenei augstāks N_{RP} bija viena plāvuma režīmā, attiecīgi 31.3 pret 23.7 (9. att.). Vidēji abām sugām augstāks N_{RP} tika konstatēts viena plāvuma režīmā: 28.7 pret 26.7. Pa gadiem N_{RP} indekss palielinājās no 24.8 līdz 33.4, attiecīgi 1. un 3. lietošanas gadā. Zālaugu sugu starpā netika konstatētas būtiskas atšķirības: miežabralim vidēji abos plaušanas režīmos N_{RP} bija 28.0; auzeņairenei – 27.5. Kopumā vērtējot, iegūtie N_{RP} rādītāji zālaugiem bija salīdzinoši augsti, ja salīdzina ar graudaugiem, kuriem N_{RP} vidēji svārstās 10 – 30 robežās, un indekss >30 tiek vērtēts, kā ļoti augsts. Tādu parasti iegūst vai nu efektīvi pārvaldītās sistēmās, vai pie zemām slāpekļa devām, vai arī pie zema augsnes nodrošinājuma ar slāpekli. N_{RP} indeksu var palielināt, optimizējot slāpekļa mēslojuma izmantošanas, kultūrauga izvēles un augsnes apsaimniekošanas praksi.



9. att. / Fig. 9. Slāpekļa izmantošanās agronomiskā efektivitāte (N_{RP}) / *Agronomic efficiency of nitrogen use (N_{RP})*

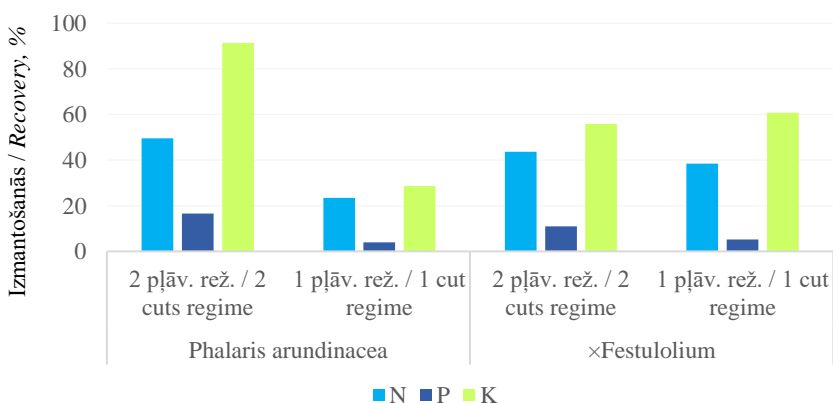
Mikroizmēģinājumā augstāks ražas pieauguma indekss (N_{RP}) bija viena plāvuma režīmā – vidēji visos mēslojuma variantos 64.7 salīdzinājumā ar 38.3 divu plāvumu režīmā. Pa mēslošanas variantiem N_{RP} viena plāvuma režīmā svārstījās no 39, lietojot slāpekļa normu N120 (40+40+40), līdz 106, lietojot slāpekļa normu N30 (10. att.). N_{RP} indeksam tika konstatēta negatīva korelācija ar slāpekļa normu: -0.35 un -0.39, attiecīgi viena plāvuma un divu plāvumu režīmā. Arī citviet pētījumos konstatēts, ka šādi aprēķinātā slāpekļa mēslojuma efektivitāte samazinās, pieaugot mēslojuma normai.



10. att. / Fig. 10. **Slāpekļa izmantošanās agronomiskā efektivitāte (N_{RP}) mikroizmēģinājumā** / *Agronomic efficiency of nitrogen use (N_{RP}) in the micro-trial*

Augu barības elementu (NPK) izmantošanās no lietotā mēslojuma.

Aprēķinam tika izmantotā tā saucamā “starpību metode”, pieņemot, ka zālaugi vienādā mērā izmanto augsnē esošos augu barības elementus gan nemēslotajā variantā (kontrolē), gan arī variantos, kur attiecīgie augu barības elementi tiek lietoti. Tāpēc no augu barības elementu izneses mēslotajā variantā tika atņemta šī paša elementa iznese nemēslotajā variantā un atlikums dalīts ar pielietoto mēslojuma daudzumu tūrvielā. Šādi iegūto rādītāju mēdz apzīmēt kā noteikta elementa šķietamo izmantošanos. Iegūtie rādītāji ir sakopoti 11. attēlā.



11. att. / Fig. 11. **Slāpekļa, fosfora un kālija šķietamās izmantošanās / Apparent recovery of the nitrogen, phosphorus and potassium use**

Rēķinot šādā veidā, slāpekļa šķietamā izmantošanās (N_{sk}) cieši korelēja ar izesi: ievērojami zemāka tā bija viena plāvuma režīmā, jo zālaugu, sevišķi miežabrāļa, sausnā slāpekļa saturs plaušanas brīdī bija stipri samazinājies. Miežabrālim vidēji trīs lietošanas gados slāpekļa izmantošanās pa plaušanas režīmiem atšķīrās apmēram uz pusi – 23.4 un 49.5, attiecīgi viena un divu plāvumu režīmā. Auzeņairenei, kurai nepiemīt izteikta spēja augu atmiršanas fāzē pārvietot augu barības elementus no virszemes daļām uz saknēm, atšķīrības pa plaušanas režīmiem bija mazāk izteiktas: vidēji trīs gados N_{sk} bija 38.4 un 43.6, attiecīgi viena un divu plāvumu režīmā.

Līdzīgā veidā rēķinot kālija un fosfora t.s. šķietamās izmantošanas koeficientus, konstatēts, ka miežabrālim kālija šķietamā izmantošana (K_{sk}) divu plāvumu režīmā bija trīs reizes augstāka nekā viena plāvuma režīmā, attiecīgi 91.3 un 28.7, kamēr auzeņairenei atšķīrības bija nebūtiskas – 55.9 un 60.7, attiecīgi divu un viena plāvuma režīmā. Fosfora šķietamās izmantošanas koeficients (P_{sk}) miežabrālim divu plāvumu režīmā bija četras reizes augstāks nekā viena plāvuma režīmā: attiecīgi 16.6 un 4.0. Auzeņairenei P_{sk} vidēji bija 11.0 un 5.2, attiecīgi divu plāvumu un viena plāvuma režīmā.

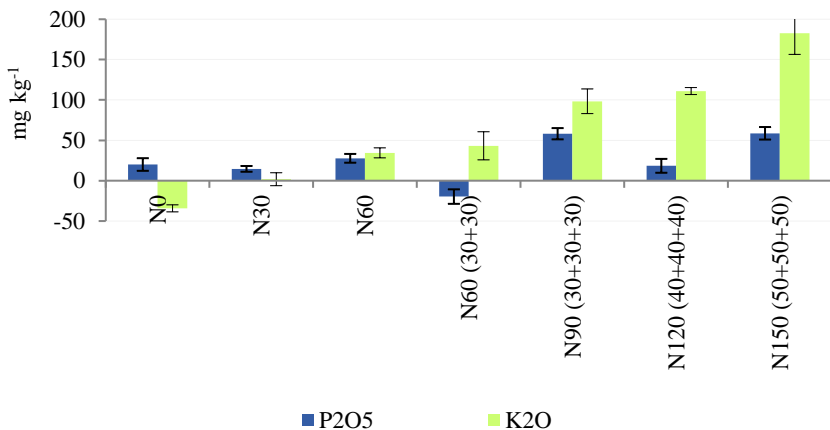
6. Augsnes agroķīmisko rādītāju izmaiņas mēslošanas ietekmē

Augsnes analīzes, kuras tika veiktas pirms izmēģinājumu iekārtošanas un atkārtoti pēc četriem gadiem, ļāva vērtēt augsnes agroķīmisko rādītāju iespējamās izmaiņas mēslošanas un zālaugu audzēšanas rezultātā. Analīžu rezultāti atsevišķiem parametriem uzrādīja nebūtiskas ($p < 0.05$) izmaiņas pa mēslošanas variantiem, t.sk., augsnes pH līmenim (pH KCl). Neskatoties uz atšķirīgu mēslošanas līdzekļu izmantošanu zālaugu mēslošanā, augsnes pH līmenis četru gadu periodā palika praktiski nemainīgs. Iegūtie rezultāti neapstiprina pieņēmumu par to, ka regulāra digestāta mēslojuma izmantošana var būtiski izmainīt augsnes pH līmeni. Iespējams, šādi procesi norisinās ļoti pakāpeniski, bet mūsu izmēģinājumos četru gadu laikā netika konstatētas statistiski pierādāmas izmaiņas. Līdzīgi rezultāti iegūti arī citviet pētījumos, kur konstatēts, ka digestāta izmantošana augsnes pH praktiski neietekmē. Salīdzinoši augstāks augsnes pH līmenis tika konstatēts pelnu mēslošanas variantā, kas parāda pelnu ietekmi augsnes skābuma neutralizēšanā. Tomēr arī šajā gadījumā atšķīrības lielākoties nebija būtiskas. Tam par iemeslu, iespējams, bija pelnu mēslojuma lietošanas kopā ar minerālmēsliem, lai kompensētu trūkstošos barības elementus, galvenokārt N. Pelni neutralizēja minerālmēsļu radīto augsnes paskābināšanos.

Augstāks organisko vielu saturs konstatēts digestāta mēslojuma ietekmē, kas norāda uz organiskā mēslojuma izmantošanas pozitīvo ietekmi augsnes organiskā oglekļa krājumu palielināšanā. Mēslotajos variantos salīdzinājumā ar kontroli bija augstāks augiem viegli izmantojamā fosfora saturs. Būtiski ($p < 0.05$) augstāks tas bija pelnu variantā. Vērtējot kālija saturu, var secināt, ka

visos mēslotajos variantos kālija daudzums bija palielinājies (vidēji par 27.15 mg kg⁻¹ K₂O), nodrošinot būtisku kālija satura pieaugumu augsnē. Labākos rezultātus šajā gadījumā nodrošināja digestāta mēslojuma izmantošana, pozitīvi ietekmējot augsnes kālija rezervju palielināšanos. Zemākais fosfora un kālija saturs likumsakarīgi tika konstatēts nemēslotajos variantos. Iegūtie augsnes analīžu rezultāti rāda, ka augsnei raksturīga ievērojama buferespēja, tāpēc agroķīmisko rādītāju izmaiņas četru gadu periodā bija niecīgas.

Vērtējot digestāta mēslojuma ietekmi uz augsnes rādītājiem mikroizmēģinājumā, tika konstatētas pozitīvas izmaiņas augu barības vielu satura ziņā. Jo augstāka bija lietotā digestāta norma, jo vairāk palielinājās augiem pieejamā fosfora un kālija krājumi augsnē (12. att.).



12. att. / Fig. 12. **Augiem viegli izmantojamā fosfora un kālija izmaiņas augsnē, lietojot digestātu** / *Plant available phosphorus and potassium changes in soil by the use of digestate*

Izmēģinājumā tika konstatēta cieša korelācija starp lietoto digestāta devu un: organisko vielu saturu ($r = 0.93$); augsnes reakciju pH KCl ($r = 0.64$); fosfora saturu ($r = 0.92$) un kālija saturu, kur tika konstatēta visciešākā korelācija ($r = 0.99$). Kaut arī vairumam rādītāju palielinājums nebija būtisks ($p < 0.05$), pozitīvās tendences liecina, ka regulāra digestāta izmantošana zālaugu mēslošanā var uzlabot augsnes agroķīmiskos rādītājus ilgtermiņā. Digestāta lietošana četru gadu periodā nodrošināja būtisku augiem izmantojamā kālija (K₂O) palielinājumu augsnē praktiski visos digestāta mēslojuma variantos. Būtisks fosfora (P₂O₅) satura pieaugums augsnē, salīdzinājumā ar kontroles un zemākās digestāta normas N30 variantiem, konstatēts, lietojot augstāko digestāta normu N150 (50+50+50). Pārējos variantos, kaut arī mēslošanas ietekmē augiem pieejamā fosfora saturs palielinājās, konstatētās atšķirības nebija statistiski

pierādāmas. Arī augsnes reakcijas ziņā tika novērotas pozitīvas tendences – augstāks augsnes pH līmenis bija variantos ar augstākām digestāta devām, kas ļauj secināt, ka digestāta izmantošana intensīvā zālaugu audzēšanas sistēmā izslēdz augsnes paskābināšanos mēslošanas rezultātā, bet augstāku digestāta normu lietošana var sekmēt pakāpenisku augsnes pH līmeņa paaugstināšanos.

7. Mēslošanas ekonomiskais izvērtējums

Līdzās saimnieciskajam un ekoloģiskajam enerģētisko zālaugu audzēšanas vērtējumam ļoti būtisks ir ekonomiskais aspekts, no kā lielā mērā būs atkarīga viena vai otra agrotehnisko pasākumu kompleksa izmantošana ilgtermiņā. Tika salīdzinātas atšķirīgu mēslošanas līdzekļu, t.sk., minerālmēsļu, koksnes pelnu un digestāta izmantošanas izmaksas, pie nosacījuma, ka visos mēslošanas variantos tiek nodrošinātas ekvivalentas galveno augu barības elementu (NPK) devas. Tāpat tika salīdzinātas zālaugu mēslošanas izmaksas, izmantojot atšķirīgas digestāta mēslojuma normas.

Mēslojuma lietošanas izmaksu aprēķinam tika ņemtas vērā šādas pozīcijas:

1. mēslojuma iegādes izmaksas;
2. mēslojuma transportēšanas no iegādes vietas līdz laukam izmaksas;
3. mēslojuma izsējas (izkliedes) izmaksas.

Mēslošanas līdzekļu iegādes izmaksas. Pelnus katlumājās parasti piedāvā par brīvu, jo visbiežāk tos ir spiesti deponēt kā atkritumus un tas veido papildus izmaksas. Pēc LVMI² “Silava” pētnieku datiem, pelnu deponēšanas izmaksas sastāda aptuveni 39.50 EUR par tonnu. Tādēļ katlumāju apsaimniekotāji labprāt sadarbojas ar lauksaimniekiem un mežkopjiem, kompensējot pelnu iekraušanas izmaksas. Katlumājas bieži vien pilnībā vai daļēji sedz arī transporta izmaksas līdz saimniecībai, bet tas šajos aprēķinos netika ņemts vērā. Aprēķinā netika iekļautas digestāta iegādes izmaksas, jo biogāzes ražotnēs digestāts nepārtraukti uzkrājas un nepieciešams regulāri atbrīvot lagūnas. Izmantoto minerālmēsļu: amonija salpetris (34.4% N); vienkāršais superfosfāts (19% P₂O₅); kālija hlorīds (60% K₂O) iegādes izmaksas rēķināja, balstoties uz vidējām 2020. gada minerālmēsļu cenām. Viena tūrvielas kilograma iegādes izmaksas bija šādas: N = 0.844 EUR kg⁻¹; P₂O₅ = 1.684 EUR kg⁻¹; K₂O = 0.267 EUR kg⁻¹.

Transportēšanas izmaksas aprēķināja, izmantojot LLKC tehnisko pakalpojumu vidējo cenu apkopojumu Latvijā pēdējo piecu gadu laikā (2016. – 2020.). Izmakas rēķinātas pieņemot, ka transportēšanas attālums ir 20 km.

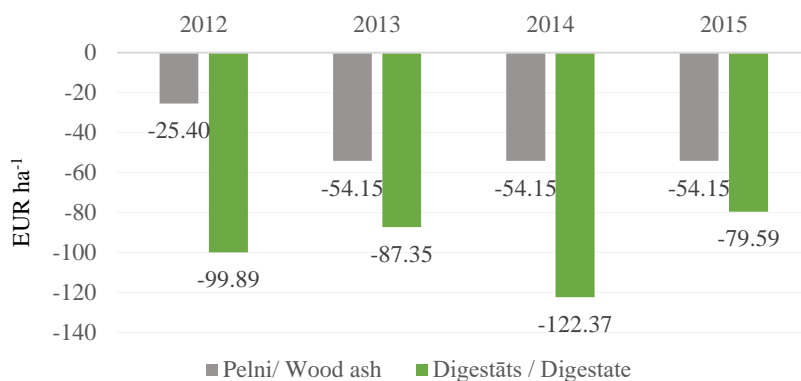
Izkliedēšanas izmaksu aprēķinos par pamatu tika ņemtas tehnisko pakalpojumu vidējās cenas pēdējo piecu gadu laikā. Pelniem veikti aprēķini, pieņemot, ka tiek izmantoti granulētie pelni, jo daudzviet katlumājās

² Latvijas Valsts mežzinātnes institūts

tehnoloģiskajā procesā pelnus no kurtuvēm uzreiz sajauc ar ūdeni un iegūst granulētos pelnus. Tie ir pietiekami birstoši, lai tos izkliedētu ar minerālmēsļu kļiedētāju.

Augstākās izmaksas pelnu un digestāta sastāvā esošo augu barības elementu pielietošanai sastādīja transportēšana un izkliede. Minerālmēsļu lietošanā liela nozīme ir konkrētā mēslošanas līdzekļa izvēlei, jo šajā gadījumā augstāko izmaksu īpatsvaru sastāda mēslošanas līdzekļa cena. Rēķinot pēc 2020. gada minerālmēsļu cenām, viena tūrvielas kilograma izmantošana zālaugu mēslošanā (ieskaitot transportēšanu un izkliedi) izmaksāja: 1.021 EUR kg⁻¹ N (amonija nitrāts), 1.861 EUR kg⁻¹ P₂O₅ (superfosfāts); 0.443 EUR kg⁻¹ K₂O (kālija hlorīds).

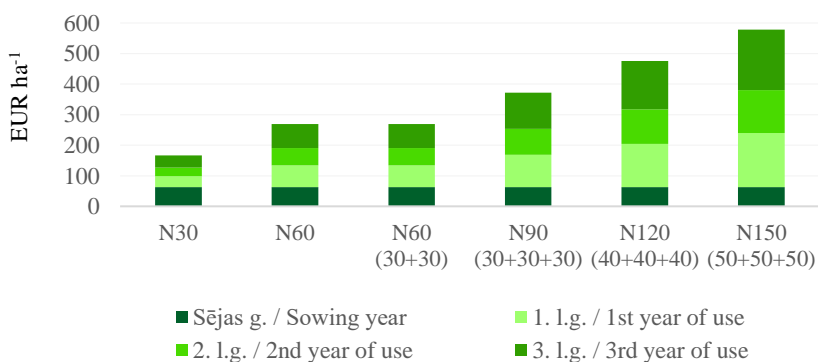
Salīdzinot atšķirīgu mēslošanas līdzekļu ar ekvivalentu galveno augu barības elementu (NPK) daudzumu izmantošanas izmaksas, tika konstatēts, ka visaugstākās izmaksas veidojās minerālmēsļu variantā – 163.48 EUR ha⁻¹ sējas gadā un 314.48 EUR ha⁻¹ zelmeņa izmantošanas gados. Salīdzinoši zemākas izmaksas veidojās pelnu variantā – 138.08 EUR ha⁻¹ un 260.75 EUR ha⁻¹, attiecīgi sējas gadā un zelmeņa izmantošanas gados. Digestāta mēslojuma izmantošanas izmaksas uz platības vienību bija viszemākās, tās sastādīja 63.59 EUR ha⁻¹ sējas gadā; un 192.53 EUR ha⁻¹ līdz 235.31 EUR ha⁻¹ zelmeņa izmantošanas gados. Salīdzinājumā ar minerālmēsliem, pelnu izmantošana ļāva ietaupīt 25.40 EUR ha⁻¹ sējas gadā un 54.15 EUR ha⁻¹ zelmeņa izmantošanas gados, digestāta izmantošana ļāva ietaupīt 99.89 EUR ha⁻¹ sējas gadā un no 79.59 līdz 122.37 EUR ha⁻¹ zelmeņa izmantošanas gados (13. att.). Grafiski atainotas mēslošanas līdzekļu lietošanas izmaksas, pieņemot, ka minerālmēsļu lietošanas izmaksas ir bāzes jeb nulles līnija.



13. att. / Fig 13. Pelnu un digestāta mēslojuma izmantošanas izmaksas salīdzinājumā ar minerālmēsliem, EUR ha⁻¹ / Costs of ash and digestate use compared to mineral fertiliser use

Rēķinot mēslošanas izmaksas uz saražotās miežabrāļa sausnas tonnu, vidēji trīs gadu periodā divu plāvumu režīmā tās svārstījās no 32.28 EUR t⁻¹, lietojot pelnu mēslojumu, līdz 40.94 EUR t⁻¹, lietojot digestātu vienā paņēmienā (D1); viena plāvuma režīmā izmaksas bija ļoti līdzīgas, tās svārstījās no 33.17 EUR t⁻¹, lietojot pelnu mēslojumu, līdz 39.44 EUR t⁻¹, lietojot minerālmēslus. Mēslošanas izmaksas uz saražotās auzuņairesnes sausnas tonnu bija augstākas, vidēji trīs gadu periodā divu plāvumu režīmā svārstījās no 52.36 EUR t⁻¹, lietojot pelnu mēslojumu, līdz 68.48 EUR t⁻¹, lietojot digestātu vienā paņēmienā (D1); viena plāvuma režīmā, atšķirībā no miežabrāļa, auzuņairenei izmaksas bija ievērojami zemākas, tās svārstījās no 37.92 EUR t⁻¹, lietojot pelnu mēslojumu, līdz 56.65 EUR t⁻¹, lietojot digestātu vienā paņēmienā (D1). Veiktie aprēķini ļauj secināt, ka kopumā zemākas mēslošanas izmaksas veidojās viena plāvuma režīmā. Miežabrāļa mēslošanas izmaksas uz saražotās sausnas vienību divu plāvumu režīmā bija vidēji par 40% zemākas salīdzinājumā ar auzuņaireni; viena plāvuma režīmā miežabrāļa mēslošanas izmaksas uz sausnas tonnu bija vidēji par 10% līdz 40% zemākas salīdzinājumā ar auzuņaireni.

Digestāta izmantošanas ekonomiskais pamatojums. Digestāta mēslojuma izmantošanas izmaksas miežabrālīm, atkarībā no normas un digestāta sastāva, pa gadiem svārstījās šādās robežās: no 35.29 EUR ha⁻¹ līdz 176.43 EUR ha⁻¹ 1. lietošanas gadā; no 28.23 EUR ha⁻¹ līdz 141.10 EUR ha⁻¹ 2. lietošanas gadā; no 39.52 EUR ha⁻¹ līdz 197.60 EUR ha⁻¹ 3. lietošanas gadā (14. att.). Miežabrāļa sējas gadā, kad tika lietota vienāda digestāta norma visos variantos (40 kg ha⁻¹ N), mēslošanas izmaksas bija 63.33 EUR ha⁻¹. Jo zemāka digestāta norma, jo proporcionāli zemākas bija mēslojuma lietošanas izmaksas uz hektāru un otrādi, jo galvenās izmaksas digestāta mēslojuma izmantošanā sastādīja transportēšana un izkliede.



14. att. / Fig. 14. Digestāta mēslojuma lietošanas izmaksas četrus gadu periodā, EUR ha⁻¹ / The costs of digestate use over a four-year period

Vērtējot mēslošanas izmaksas uz vienu saražotās miežabrāļa sausnas tonnu, konstatēts, ka salīdzinoši zemākas izmaksas bija viena plāvuma režīmā, kur tās svārstījās no 3.73 EUR t⁻¹ variantā ar zemāko digestāta normu N30 līdz 13.74 EUR t⁻¹ variantā ar augstāko digestāta normu N150 (50+50+50). Divu plāvumu režīmā izmaksas svārstījās no 5.61 EUR t⁻¹ variantā ar zemāko digestāta normu N30 līdz 19.52 EUR t⁻¹ variantā ar augstāko digestāta normu N150 (50+50+50). Vidēji viena plāvuma režīmā mēslošanas izmaksas uz vienu saražoto sausnas tonnu bija par 40% (svārstījās robežās no 30% līdz 60%, atkarībā no varianta) zemākas nekā divu plāvumu režīmā.

Kopumā var secināt, ka bioenerģijas ražošanas blakusproduktu izmantošana zālaugu mēslošanā ļauj ievērojami samazināt mēslošanas izmaksas uz hektāru. Bioenerģijas ražošanas blakusproduktu, īpaši, digestāta mēslojuma izmantošanas lielākās izmaksas sastādīja to izkļiede. Jo koncentrētāks mēslošanas līdzeklis ar augstāku augu barības elementu saturu, jo zemākas bija izmaksas. Mēslošanas izmaksas uz saražotās zālaugu sausnas vienību bija cieši saistītas ar sausnas ražu – zemākās veidojās, lietojot pelnu mēslojumu, kas nodrošināja augstākās sausnas ražas. Digestāta mēslojuma variantos tika iegūtas salīdzinoši zemākas sausnas ražas, tādēļ mēslošanas izmaksas uz saražotās zālaugu sausnas tonnu bija augstākas. Taču šeit jāņem vērā digestāta kā organiskā mēslošanas līdzekļa pozitīvā ietekme uz augsnes īpašībām un augu barības elementu aprites cikla nodrošināšana, kura nozīme aizvien palielinās. Izmantojot modernākas digestāta izkļiedes tehnoloģijas, kas mēslojumu ļauj iestrādāt augsnē vismaz daļēji, ir iespējams būtiski samazināt augu barības elementu zudumus, paaugstināt mēslojuma izmantošanas efektivitāti un rezultātā kāpināt zālaugu ražas līmeni. Kopumā var secināt, ka digestāta un pelnu izmantošana zālaugu mēslošanā ir perspektīva arī no ekonomiskā viedokļa.

SECINĀJUMI

1. Pelnu mēslojuma lietošana, kompensējot trūkstošos augu barības elementus ar minerālmēsliem, nodrošināja līdzvērtīgu iegūto sausnas ražas līmeni: 8.11 t ha⁻¹ (pelni) un 8.01 t ha⁻¹ (minerālmēsli) miežabrālim; 6.18 t ha⁻¹ (pelni) un 5.96 t ha⁻¹ (minerālmēsli) auzuņairenei.
2. Digestāta mēslojums nodrošināja būtisku zālaugu sausnas ražas pieaugumu salīdzinājumā ar kontroli – 42% miežabrālim un 75% auzuņairenei vidēji abos plaušanas režīmos, tomēr nesasniedza minerālmēsli variantā iegūto ražas līmeni. Netika konstatētas būtiskas atšķirības sausnas ražas pieaugumam starp digestāta mēslojuma lietošanas režīmiem, kas ļauj secināt, ka būtiskāka nozīme bija kopējam ienestā mēslojuma daudzumam.
3. Augstāka digestāta mēslojuma norma nodrošināja augstāku miežabrāļa sausnas ražu, tā vidēji svārstījās no 6.53 t ha⁻¹ līdz 8.99 t ha⁻¹ divu plāvumu režīmā; un no 9.25 t ha⁻¹ līdz 12.67 t ha⁻¹ viena plāvuma režīmā. Efektīvākā digestāta mēslojuma norma divu plāvumu režīmā bija N60. Viena plāvuma

- režīmā miežabrāļa sausnas raža pieauga proporcionāli mēslojuma normai, katri ar digestātu papildus iedotie 30 kg ha⁻¹ N palielināja sausnas ražu vidēji par 1 t ha⁻¹.
4. Būtiski augstāka sausnas raža iegūta viena plāvuma režīmā: vidēji visos mēslošanas variantos abām sugām – 5.81 t ha⁻¹ salīdzinājumā ar 5.12 t ha⁻¹ divu plāvumu režīmā; izmēģinājumā ar atšķirīgām digestāta normām iegūtas attiecīgi 10.09 t ha⁻¹ un 7.49 t ha⁻¹. Vidēji abos pļaušanas režīmos būtiski augstāku sausnas ražu nodrošināja miežabrālis – vidēji 6.47 t ha⁻¹, salīdzinājumā ar 4.46 t ha⁻¹ auzeņairenei.
 5. Zelmeņa struktūru būtiski ietekmēja: a) zālaugu suga; b) pļaušanas režīms; c) pļaušanas laiks; d) izmantotais mēslojums. Augstāks stiebru īpatsvars konstatēts: a) miežabrāļa zelmeņos; b) viena plāvuma režīmā; c) 1. plāvumā salīdzinājumā ar 2. plāvumu; d) lietojot minerālmēslus un pelnu mēslojumu.
 6. Zālaugu sausnas ķīmisko sastāvu būtiski ietekmēja: a) zālaugu suga – zemāks pelnu saturs bija miežabrālim – 6.5% pret 7.1% auzeņairenei; b) pļaušanas laiks – zemāks pelnu un slāpekļa, bet augstāks oglekļa saturs bija rudens plāvumā; c) auga daļa – zemāks pelnu un slāpekļa saturs, un augstāks oglekļa saturs bija stiebrs. Tika konstatēts lineārs kālija satura samazinājums pa plāvumiem, nodrošinot būtiskas atšķirības starp visiem trim pļaušanas termiņiem: 26.21 g kg⁻¹ K 1. plāvumā; 15.32 g kg⁻¹ K 2. plāvumā un 7.64 g kg⁻¹ K rudens plāvumā.
 7. Augu barības elementu iznesi būtiski ietekmēja: a) suga; b) pļaušanas režīms; c) mēslošanas līdzeklis, d) iegūtā sausnas raža. Augstāka NPK iznese bija: a) miežabrālim; b) divu plāvumu režīmā; c) lietojot minerālmēslu un pelnu mēslojumu. Ar zālaugu ražu visvairāk tika iznests kālijs, turklāt divu plāvumu režīmā kālija iznese bija uz pusi augstāka – 202.32 kg ha⁻¹ K₂O salīdzinājumā ar 92.54 kg ha⁻¹ K₂O viena plāvuma režīmā. Līdzīgas tendences tika novērotas arī attiecībā uz slāpekli un fosforu, kas apstiprina miežabrāļa spēju augu atmiršanas fāzē pārvietot augu barības elementus no auga virszemes daļām uz saknēm.
 8. Būtiski augstāka slāpekļa izmantošanas efektivitāte abām sugām konstatēta viena plāvuma režīmā pelnu variantā. Lietojot atšķirīgas digestāta mēslojuma normas konstatēta negatīva korelācija slāpekļa izmantošanas efektivitātei un digestāta normai: -0.44 un -0.48, attiecīgi viena un divu plāvumu režīmā.
 9. Digestāta un pelnu izmantošana zālaugu mēslošanā trīs lietošanas gados ļāva ievērojami samazināt mēslošanas izmaksas: no 1108.18 EUR ha⁻¹, lietojot minerālmēslus, uz 920.33 EUR ha⁻¹, lietojot pelnus, un uz 718.98 EUR ha⁻¹, lietojot digestātu. Zemākās izmaksas un saražotās zālaugu sausnas vienību veidojās, lietojot pelnu mēslojumu: miežabrālim 32.28 EUR t⁻¹ divu plāvumu režīmā un 33.17 EUR t⁻¹ viena plāvuma režīmā; auzeņairenei attiecīgi 52.36 EUR t⁻¹ un 37.92 EUR t⁻¹. Bioenerģijas ražošanas blakusproduktu izmantošanas izmaksas bija cieši saistītas ar sausnas ražu.

PRIEKŠLIKUMI

1. Izmantojot zālaugu biomasu kurināmajam, pļaušanu ieteicams veikt vienu reizi sezonā pēc iespējas vēlāk rudenī, tas nodrošinās augstāku sausas ražu, labāku kurināmā materiāla kvalitāti un sekmēs atkārtotu augu barības elementu izmantošanu, sevišķi sakneņu tipa zālaugiem, ņemot vērā to izteiktās spējas atmiršanas fāzē pārvietot augu barības elementus no virszemes daļām uz saknēm.
2. Plānojot mēslošanas normas sakneņu tipa zālaugiem, svarīgi ņemt vērā plānoto ražas vākšanas režīmu – jo vēlāk rudenī veiks pļaušanu, jo lielāks augu barības elementu daudzums būs pārvietojies no virszemes daļām uz saknēm. Mēslojuma (NPK) normas viena pļāvuma režīmā miežabralim var samazināt līdz 50%.
3. Izkliepjot digestāta mēslojumu, ļoti svarīgi veikt tā iestrādi, lai izvairītos no slāpekļa zudumiem, tas ļaus paaugstināt mēslošanas efektivitāti un izvairīties no vides piesārņojuma. Mērenas digestāta normas neattaisnojas lietot dalīti, jo vēlāk sezonā dotais mēslojums nekompensē trūkstošo pavasarī.
4. Pelnu mēslojuma izmantošanu ieteicams kombinēt ar minerālmēsliem, nodrošinot augu vajadzību pēc slāpekļa. Tas ļauj ievērojami samazināt mēslošanas izmaksas un sekmē atkārtotu augu barības elementu izmantošanu.

PATEICĪBAS

Izsaku pateicību LLU Zemkopības institūta kolektīvam, un jo īpaši zālaugu selekcijas grupai, par atbalstu un praktisko palīdzību izmēģinājumu iekārtošanā, uzturēšanā un datu ieguvē.

Paldies Dr.agr. Pēterim Bērziņam par padomiem, konsultācijām, praktisko palīdzību datu sistematizēšanā un matemātiskajā apstrādē, kā arī par vērtīgiem ieteikumiem, morālo atbalstu un viedajiem vārdiem.

Izsaku pateicību LVMI “Silava” Meža vides laboratorijas darbiniekiem par zālaugu paraugu un augsnes ķīmiskajām analizēm, un par lielisko sadarbību.

Paldies manai ģimenei un radu lokam par atbalstu, praktisko palīdzību, uzmundrinājumiem un ticību.

INTRODUCTION

Depletion of non-renewable energy resources, increasing environmental pollution load, and climate changes impose also changes in the currently applied methods for the use, consumption, recycling and utilisation of biological resources. Fossil fuel resources are limited, they are irreversibly running out; therefore, existing resources should be used as sustainably as possible, the share of renewable energy resources should be increased, and the recycling of plant nutrients should be improved, including also utilisation of bioenergy production by-products. Bioenergy is the dominating renewable energy source, and, taking into consideration political objectives, it can be expected that energy production from the plant biomass obtained from agricultural land will increase in Europe. In Latvia's agro-climatic conditions, the use of grasses, including reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.) and festulolium (\times *Festulolium*), is perspective for energy production, taking into consideration the productive longevity, requirements for growing, and usage possibilities of grasses. The Green Deal – the Action plan within the EU – is prepared, which aim is the achievement of climate-neutral Europe until the year 2050. The Plan includes effective use of resources by realisation of climate-neutral economy, restoration of biological diversity, and a substantial decrease in pollution. Until 2030, it is envisaged to decrease plant nutrient losses by 50%, ensuring that soil fertility does not decline. Great amount of fossil energy is used for the production of mineral fertilisers; therefore, as much as possible should be done to find the ways for substituting plant nutrients in mineral fertilisers with those in waste products. Hence, it is essential that the by-products (fermentation residues or digestate, and wood ash) from bioenergy production process are returned back to the crop growing cycle – they are recognized as a valuable source of plant nutrients.

Our general aim is to save the non-renewable recourses; therefore, it is reasonable to recycle plant nutrients, e.g., to return the ash and digestate to the soil from which energy crops had removed them. Above-mentioned materials are able to facilitate atmospheric nitrogen fixation and the productivity of grasslands, to improve the physical and chemical properties of the soil, as well as to positively affect the economic and environmental factors. Therefore, the use of those materials are a good alternative compared to commercial fertilisers.

Experimental data about the reuse of plant nutrients with wood ash and digestate are very limited; therefore, many theoretical and practical issues are still unclear. There is a need for additional information about the effectiveness of that kind of fertilisers on the productivity and quality of grass swards, agrochemical properties of soil, etc., to be sure that those materials are safe and usable as high-quality fertilisers.

Due to this reason, the aim of our research was to study the recycling possibilities of plant nutrients found in wood ash and digestate for fertilisation of grasses cultivated for energy production, more specifically – the effectiveness of

wood ash and digestate on the productivity of reed canary grass and festulolium as well as their effect on agrochemical properties of soil within the system “soil – crops – digestate/wood ash – soil – crops”.

The aim of the Thesis

To evaluate the possibility for cultivating reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.) ‘Bamse’ and festulolium (\times *Festulolium pabulare*) ‘Felina’ for bioenergy production by using wastes (digestate, and wood ash) as fertilisers for grasses, as well as to evaluate the possibility of recycling plant nutrients within the system “soil – crops – digestate/ash – soil – crops”.

Research goals

1. To examine digestate and wood ash as fertilisers for grasses cultivated for energy production.
2. To find out the optimum rates of digestate use and the best method of its application for reed canary grass.
3. To study the cycling of nitrogen, phosphorus and potassium within the system “soil – crops – digestate/wood ash – soil – crops”.
4. To assess the economic factors of the fertilisation of reed canary grass and festulolium.

Hypothesis of the Thesis

It is possible to partly cover the plant nutrient requirement of grasses cultivated for energy production by using bioenergy by-products – fermentation residues (digestate) and wood ash – as fertilisers and therefore to provide the plant nutrient recycling.

Theses to be defended

1. The use of by-products from bioenergy production provides reduction of plant nutrient needs for grasses at least by 50%.
2. By splitting high rates of digestate and applying them in several treatments during vegetation, it is possible to provide higher dry matter yields of reed canary grass.
3. It is possible to ensure the recycling of nitrogen, phosphorus and potassium by using the by-products of bioenergy production and harvesting the grasses in the stage of senescence.
4. The use of digestate and wood ash decrease fertilisation costs for cultivated grasses.

Research novelty

The topicality of the use of renewable energy resources as well as the creation of closed plant nutrient cycles is gradually increasing globally. Until now, practically no research has been carried out on issues regarding the interrelation between possibilities of cultivating energy grasses by means of such closed plant nutrient cycles.

Approbation of study results

Based on the results of this study, 5 publications, which are indexed in Scopus and/or Web of Science databases, 6 publications in conference

proceedings, and 6 oral and 5 poster presentations in conferences have been prepared.

MATERIALS AND METHODS

Location. Experiments were carried out in Skrīveri (56°41' N and 25°08' E), in the Research Institute of Agriculture, Latvia University of Life Sciences and Technologies, during 2021–2016. Two field experiments were set up: 1) in the Pardenci field, where different kinds of fertilisers were used for reed canary grass and festulolium, with equal NPK application rates; 2) a micro-trial, where different rates and several application regimes of digestate were used for reed canary grass.

Soil. In the field of Pardenci, according to the Latvian classification – Sod-stagnogley soil; according to international soil classification (WRB 2015) – Endocalcaric Katostagnic Glossic Retisol (Aric, Cutanic, Drainic, Katoloamic, Ochric). Soil texture – fine sandy loam. The main agrochemical parameters: organic matter content – medium (29.1–34.3 g kg⁻¹); reaction pH KCl 5.9–6.5; very high phosphorus content (235.3–352.3 mg kg⁻¹ P₂O₅) and medium plant available potassium content (127.5–155.9 mg kg⁻¹ K₂O).

The soil of the micro-trial was Sod-stagnogley (Latvian classification) or Eutric Retisol (Aric, Cutanic, Drainic, Loamic, Ochric) according to the WRB 2015, loam. Organic matter content – 25.1 g kg⁻¹; pH KCl 6.4; high content of phosphorus (187.2 mg kg⁻¹ P₂O₅) and medium content of plant available potassium (110.4 mg kg⁻¹ K₂O).

Fertiliser use. In Pardenci field trial, different kinds of fertiliser for reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.) ‘Bamse’ and festulolium (*Festulolium*) ‘Felina’ were compared. Altogether, five different treatments were compared. A randomised block design in four replicates was used. Fertiliser treatments were as follows:

- 1) control plot (K), fertilisers were not used;
- 2) commercial (mineral) fertilisers (Mm);
- 3) wood ash (P);
- 4) digestate (D1) – full application rate – used once per season, early spring after the renewal of vegetation;
- 5) digestate (D2) – split application of digestate – early spring, and in autumn after harvesting of grass biomass.

The grasses were sown in rows using the seeder “Nordsten NS-1025” in July 2012. Seeding rate for reed canary grass – 12 kg ha⁻¹; for festulolium – 15 kg ha⁻¹. The total area of one plot – 43.2 m²; of the harvest check plot – 10 m².

Fertiliser application rates were calculated taking into account that equal amounts of nitrogen (N), phosphorus (P₂O₅), and potassium (K₂O) should be applied: 100, 80, and 160 kg ha⁻¹ per year, respectively. In plots with digestate

and wood ash, for the balancing of nutrients mineral fertilisers (ammonium nitrate, 34.4% N, single superphosphate, 20.0% P₂O₅, potassium sulphate, 51% K₂O, and potassium chloride, 60% K₂O) were used, the same materials as in the plot with commercial fertiliser treatment.

In the year of grass sowing, fertiliser rates were reduced and only 50 kg ha⁻¹ N, 40 kg ha⁻¹ P₂O₅, and 80 kg ha⁻¹ K₂O were applied.

Fertilisers were incorporated into the soil before grass sowing (the first year of experiment). Afterwards, in the following years, all kinds of fertilisers were top-dressed and left without incorporation. In treatment D2, the calculated rate of digestate was split into two parts: one half was applied at the beginning of vegetation, and the other part – at the end of vegetation after the harvesting of biomass.

Six treatments were compared in the micro-trial. Different rates of digestate (according to the nitrogen) and different timing of application were examined. The rates of nitrogen were from zero (0) to 150 kg ha⁻¹ N, and application method – once, two, or three times for vegetation. The application scheme is presented in Table 1.

A randomised block design in four replicates was used. Each plot with the size of one m² was marked off using plastic borders 20 cm deep. Before sowing the reed canary grass, the digestate was incorporated into the soil. In the following years it was top-dressed on plants without incorporation. The sowing of reed canary grass (15 kg ha⁻¹) was performed using a small hand-driven seeder.

The digestate used as a fertiliser was its liquid fraction obtained at the end of fermentation after separation. In order to adjust fertiliser rates to NPK content in digestate and wood ash, their chemical analysis was done before each fertilisation treatment. Plant nutrient contents in digestate were as follows, g L⁻¹: N 2.08–5.10, P₂O₅ 0.47–1.76, and K₂O 2.20–4.44 (Table 2). Ammonium nitrogen (N–NH₄) was the dominating form, and its content was 1.69–2.47 g L⁻¹ or 58–85% from the total nitrogen found in digestate.

Observations, registrations, analysis. The grass swards were used for three years. Dry matter yield was measured in one-cut and two-cut regime. If one-cut regime was used, the biomass was harvested at the end of September or the beginning of October at the stage of senescence. If two cuts were used, then the first cut was at the stage of full panicle/spike development (middle of June), and the second cut was at the stage of senescence.

The structural analysis was done to determine the weight of different fractions: leaves, culms, panicles/spikes. The chemical analysis of biomass was performed in the Laboratory of Forest Environment, Latvia State Forest Research Institute “Silava”. The parameters analysed were ash content and total carbon (C), sulphur (S), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), and magnesium (Mg). The following methods (according to the LVS ISO standard) were employed: ash content – combustion in a muffle furnace; carbon and

sulphur – elemental analyser (dry combustion); total nitrogen – the Kjeldahl method; phosphorus and potassium – in acid extract after dry combustion.

Soil agrochemical properties were tested before the set-up (2012) as well as at the end (2016) of the experiment. Methods for the determination of soil agrochemical parameters are presented in Table 3.

In the Thesis, the concentration of phosphorus and potassium in soil, indicators of plant nutrient removal and balances, as well as fertiliser application rates are expressed as P_2O_5 and K_2O ; whereas, the chemical composition of grass biomass including phosphorus and potassium content is shown in the elemental form (N, P, K, C).

Efficiency of fertiliser use. Plant nutrient (NPK) removal was calculated taking into account the dry matter yield of grasses (harvested) and its chemical composition. The plant nutrient balance was calculated using two methods: 1) as a difference of input (plant nutrients applied) and output (removal by harvested biomass), $kg\ ha^{-1}$, and 2) as a percentage of output against the input, %.

Plant nutrient use efficiency was also expressed using two different indicators: yield indicator N_R – the amount of harvested dry matter yield (kg) per one kg of nitrogen applied; yield increase indicator N_{RP} – the amount of harvested dry matter yield increase due to fertiliser use (kg) per one kg of nitrogen applied. In both cases, the results are only comparative, because all grass biomass yield is related to the effect of nitrogen, ignoring the role of phosphorus and potassium.

To assess the efficiency of fertiliser use, the so-called “apparent recovery” of plant nutrients was calculated (N_{sk} , P_{sk} , and K_{sk}). An assumption was to calculate the difference between NPK uptake in fertilised and unfertilised plots and to divide it with the amount of nutrients applied using the following procedure: $[N\ (PK)\ crop\ uptake\ fertilised - N\ (PK)\ crop\ uptake\ unfertilised] / N\ (PK)\ fertiliser\ input$.

To assess the economy of fertilisation, the actual costs of the use of mineral fertilisers, wood ash, and digestate were calculated assuming that equivalent amounts of plant nutrients were applied in all cases. The economy of increasing digestate application rates was also calculated. The transportation and application costs were taken from the five-year survey (2016–2020) published by the Latvian Rural Advisory and Training Centre.

Data processing. Descriptive statistics and analysis of variance were used for the processing of experimental data (Microsoft Office Excel software). The variance of $V < 10\%$ was assumed as low, but $> 20\%$ was assumed as high. F-test was used for the assessment of significance of means using the least significance difference level (LSD) 0.05.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Grass yield depending on fertiliser use

The species of grasses, applied fertiliser, and mowing regime had a significant effect on grasses dry matter yield. No-fertiliser treatment gave significantly lower yields: on average 3.87 t ha⁻¹ and 4.60 t ha⁻¹ for reed canary grass, and 2.09 t ha⁻¹ and 2.43 t ha⁻¹ for festulolium in a two-cut and one-cut mowing regime, respectively. The application of all fertilisers produced considerably higher dry matter yields compared to the control treatment (without fertiliser). As a three-year average in a two-cut mowing regime depending on the fertiliser applied, the dry matter yield varied from 5.64 t ha⁻¹ to 8.14 t ha⁻¹ for reed canary grass, and from 3.63 t ha⁻¹ to 5.34 t ha⁻¹ for festulolium; whereas in one-cut regime, the yield varied from 6.24 t ha⁻¹ to 8.11 t ha⁻¹ for reed canary grass, and from 3.98 t ha⁻¹ to 7.02 t ha⁻¹ for festulolium (Table 4).

The research showed that application of mineral fertilisers (Mm) and wood ash (P) in a three-year period produced higher yields: 7.14 t ha⁻¹ (P) and 6.98 t ha⁻¹ (Mm) for both grass species on average (Fig. 1). Also, digestate fertiliser gave a significant ($p < 0.05$) increase in dry matter yields compared to the control (on average +1.73 t ha⁻¹ for both species); however, the application of digestate did not ensure the amount of dry matter obtained in the treatments of ash and mineral fertiliser. This might have been caused by possible emissions of nitrogen in the form of ammonia, taking into consideration the fact that nitrogen in such a form was present in digestate. Digestate as well as other fertilisers were top-dressed without incorporation in the years of sward use. Although nitrogen emissions were not determined in our experiments, findings of other researchers have proved that ammonium nitrogen present in digestate is partly emitted if not incorporated into the soil.

The application of both full rate and split rate of digestate ensured similar dry matter yields. However, significant differences in yield were found among the species of grasses: on average in a three-year period in both mowing regimes and in all fertilisation treatments, the sward of reed canary grass produced a significantly ($p < 0.05$) higher yield – 6.47 t ha⁻¹, whereas the yield of festulolium was notably lower – 4.46 t ha⁻¹. The differences among mowing regimes cannot be evaluated unambiguously – the yields differed by mowings, years of sward use, grass species, and fertilisation treatments; though, overall, in three years of sward use, higher yields were obtained in one-cut regime.

Factor analysis showed that fertiliser had the greatest effect on the dry matter yield of grasses: fertiliser impact percentage on average for both species was 56.6%. The second important factor was the species of grasses (27.7%). The impact percentage of mowing regime was on average 4.1% (Fig. 2).

All digestate fertiliser rates ensured significantly ($p < 0.05$) higher dry matter yields compared to the control (Fig. 3). The yield of reed canary grass in

the micro-trial with different digestate rates and application regimes in the two-cut mowing regime on average in three years of sward use varied from 4.99 t ha⁻¹ in no-fertiliser (control) treatment to 8.99 t ha⁻¹ in the treatment with highest digestate rate (N150 (50+50+50)). The application of N120 (40+40+40) (8.75 t ha⁻¹) and N60 (8.45 t ha⁻¹) digestate rates gave insignificantly lower yields. Significantly higher reed canary grass yields on average in three years of sward use were produced in one-cut regime compared to two cuts: 10.09 t ha⁻¹ and 7.49 t ha⁻¹, respectively. In one-cut mowing regime, application of the highest digestate rate N150 (50+50+50) (12.67 t ha⁻¹) gave a significantly higher dry matter yield. The obtained data demonstrated the benefits of plant nutrient cycling characteristic to reed canary grass, allowing to relocate plant nutrients from aboveground biomass to roots in the stage of senescence.

2. Structure of grass yield

The quality of grass dry matter can differ significantly depending on the structure of sward – the percentage of leaves and culms –, which can vary due to different factors. Swards with higher percentage of culms are most preferable for the production of biofuel. In the present research, the highest percentage (68.9–74.9%) of culms for reed canary grass was found in the autumn cut in one-cut regime. In the two-cut regime on average in three years of sward use, a significantly higher culm percentage (61.0–70.2%) was determined in the first cut; in the second cut, it fluctuated between 46.6% and 51.6% (Table 5). The lowest culm percentage was established in control treatment in all mowing regimes. It was significantly higher in the first mowing in mineral fertiliser (Mm) and wood ash (P) treatments. Similar tendencies were also observed in the autumn mowing in one-cut regime. Inflorescences (panicles/spikes) in one-cut regime were found only in small amounts, 0.2–0.3%, as they were partially destroyed (broken, fallen off, etc.) due to the late harvesting time.

For festulolium, culm percentage in sward was lower compared to reed canary grass (44.0–50.5% in the first cut, 6.1–12.1% in the second cut, and 22.1–34.8% in autumn cut). There were no significant differences in culm percentages among the treatments. Festulolium showed a considerably higher percentage of inflorescences in the first cut (9.8–13.5%). Also for festulolium, the late harvesting time affected the yield structure – the percentage of inflorescences in autumn cut was notably lower compared to the first cut, ranging between 2.3% and 4.3%; differences among fertiliser treatments were not statistically significant. Overall, the sward of reed canary grass and one-cut regime (for both species) gave a significantly higher culm percentage in yield structure.

Also in the micro-trial, a considerably higher culm percentage was found in one-cut regime – on average 63.8% compared to 56.0% in two-cut regime. The increase in the rate of digestate application to reed canary grass increased

the percentage of inflorescences – from 1.4% to 5.1% in the first cut, which indicated a regularity: the higher the digestate rate, the higher the percentage of inflorescences. This feature is especially important in seed growing sowings.

3. Chemical composition of yield

Ash content varied depending on the plant part, the grass species and the mowing time. Compared to festulolium, the leaves of reed canary grass had a significantly ($p < 0.05$) lower ash content, which is a positive characteristic for fuel: 7.7% and 8.5% in the first cut, and 6.3% and 7.2% in autumn cut, respectively for reed canary grass and festulolium. Both the reed canary grass and festulolium culms had a significantly lower ash content compared to leaves, and it varied from 5.8% in the first cut, to 3.5–4.3% in autumn cut. The time of mowing had a decisive effect on ash content: both reed canary grass and festulolium had a significantly lower ash content in autumn cut – on average 5.4%; whereas in the first and second cut, it was 6.5% and 8.4%, respectively. This can be due to translocation of plant nutrients from aboveground biomass parts to roots at the stage of plant senescence as well as possible leaching of mineral compounds from the biomass together with precipitation. Summarising the data for both species, it was found that ash content in the first and autumn cut made respectively 8.1% and 6.7% in leaves, and 5.8% and 3.9% in culms. The obtained data suggest that mowing at the stage of plant senescence, when culms percentage in sward is higher, allows obtaining a qualitative source material for the production of fuel. At that stage, ash content in culms was notably lower – around 5%. Ash contents in the inflorescences of reed canary grass and festulolium were almost equal – on average 5.3% and 5.4%. Evaluation of the importance of fertiliser revealed that the lowest ash content for reed canary grass was found in the most productive swards in mineral fertiliser (Mm) and ash (P) treatments; whereas for festulolium, no significant differences among treatments were found. Ash content in reed canary grass was significantly lower than in festulolium: 6.54% and 7.06%, respectively (Table 6).

Carbon (C) is the main combustible element in the fuel. Depending on plant part, grass species, mowing time, and applied fertiliser, the amount of carbon ranged on average between 454 and 539 g kg⁻¹ C. Application of mineral fertilisers (Mm) produced a significantly ($p < 0.05$) higher carbon content (Table 6). The part of the plant had major importance – culms produced noticeably more carbon. Depending on the time of mowing, a higher carbon content was found in autumn cut: on average 505.9 g kg⁻¹ C. In the sward of first and second cut, carbon contents were almost equal: 475.1 and 477.1 g kg⁻¹ C, respectively. A considerably higher carbon content was established for reed canary grass – on average 488.0 g kg⁻¹ in all cuts (on average 514.2 g kg⁻¹ in autumn cut, and 471.7 g kg⁻¹ and 478.1 g kg⁻¹ in the first and second cut,

respectively); whereas for festulolium, it was on average 484.1 g kg⁻¹ (from 476.2 g kg⁻¹ in the second cut to 497.6 g kg⁻¹ in autumn cut) (Table 6).

Nitrogen (N) is not recommended in the dry matter of grasses considered for fuel production, as it is emitted in the combustion process. Depending on grass species and fertiliser, the average nitrogen amount varied from 11.11 g kg⁻¹ to 20.73 g kg⁻¹ in the first cut, from 11.04 g kg⁻¹ to 14.26 g kg⁻¹ in the second cut, and from 6.53 g kg⁻¹ to 11.45 g kg⁻¹ in autumn cut. A significantly ($p < 0.05$) higher nitrogen content was found in the ash (P) and mineral fertiliser (Mm) treatments: on average 13.10 g kg⁻¹ N and 12.65 g kg⁻¹ N, respectively in both mowing regimes (Table 6). Significant differences in the content of nitrogen were found also between the species: reed canary grass contained less nitrogen – on average 10.91 g kg⁻¹ N (12.88 g kg⁻¹ N in the first cut, 12.82 g kg⁻¹ N in the second cut, and 7.03 g kg⁻¹ N in autumn cut); for festulolium, the average nitrogen content was 12.74 g kg⁻¹ N (from 10.46 g kg⁻¹ N in autumn cut, to 16.25 g kg⁻¹ N in the first cut). Culms contained on average 2.5 times less nitrogen than leaves.

Phosphorus (P) content in grass dry matter was comparatively low and varied on average from 0.5 g kg⁻¹ to 2.5 g kg⁻¹ P. A higher amount of phosphorus was found in leaves; moreover, it was considerably higher in the leaves of first cut (1.97–2.66 g kg⁻¹ P) compared to autumn cut, where it ranged between 1.68 and 2.11 g kg⁻¹ P. The lowest phosphorus content was found in the culms of festulolium in autumn cut (0.48–0.79 g kg⁻¹ P), whereas in the culms of reed canary grass it was higher (2–3 times) and varied from 1.12 to 2.20 g kg⁻¹ P. Overall, no significant differences in the content of phosphorus were found in the grass yield of first and second cut, but it was considerably lower in autumn cut. It can be concluded that the dry matter yield of reed canary grass had a significantly higher phosphorus content in all mowing regimes.

Potassium (K) decreases ash melting temperature, which is evaluated as a negative process; therefore, for the production of biofuel, grass dry matter with as low potassium content as possible should be obtained. A significantly ($p < 0.05$) lower (on average 2–4 times compared to first cut) potassium content was found in autumn cut. Comparison of grass species revealed that a lower potassium content in all cuts both in culms and leaves was in reed canary grass; moreover, it was almost equivalent in leaves and culms. In contrast, for festulolium in all cuts, a considerably higher (on average 22.1 g kg⁻¹ K) potassium content was found in leaves, compared to culms (13.65 g kg⁻¹ K). Although results varied by mowings, in general, grass dry matter with the lowest potassium content was obtained in the control variant. A higher potassium content was observed in the sward with digestate application, which can be explained with the higher potassium availability in digestate. A lower potassium content was found in the dry matter of reed canary grass of all cuts, compared to festulolium: on average 14.05 g kg⁻¹ K and 17.53 g kg⁻¹ K, respectively (Table 6). Similar trends – a higher potassium content due to fertiliser application compared to

no-fertilisation, as well as due to higher potassium fertiliser rates – have been reported also by other researchers.

It can be concluded that the chemical composition of grass dry matter was influenced by several factors. Ash content was greatly dependent on plant part (49.2%) and mowing regime (34.2%). The impact of grass species on ash content was estimated at 6.1%, and that of fertiliser – at 3.3% (Fig. 4). Also, the content of carbon and nitrogen was mostly dependent on sward fraction or plant part (43.9% and 54.9%, respectively) and mowing regime (26.3% and 27.9%, respectively). Carbon content was influenced by grass species at 10.3%, whereas nitrogen content was influenced by fertiliser treatment at 9.6%.

Different digestate rates did not significantly influence the chemical composition of reed canary grass – the average ash content in dry matter in one-cut and two-cut regime varied from 6.2% to 6.9% by fertiliser treatments. Similarly, no significant differences between treatments were found regarding the content of carbon, nitrogen, and potassium.

4. Plant nutrient removal by yield

Plant nutrient (NPK) removal or the amount of plant nutrients that was removed from the field together with the harvest during the whole research period largely varied by years and was closely related to the obtained dry matter yield and its chemical content. Therefore, factors affecting these values were also reflected in the quantity of removal. The researched grass species and mowing regime had the greatest effect on plant nutrient removal.

Nitrogen (N) removal on average per year in a two-cut regime for reed canary grass varied from 54.0 kg ha⁻¹ N without fertiliser to 142.9 kg ha⁻¹ N with full rate of fertiliser (Table 7). In one-cut regime, nitrogen removal was two times lower and varied from 39.0 kg ha⁻¹ N without fertiliser to 69.1 kg ha⁻¹ N with fertiliser application.

For festulolium in both mowing regimes, nitrogen removal was considerably lower compared to reed canary grass, which was mainly due to the low dry matter yield of festulolium in this trial. In the two-cut regime, nitrogen removal on average per year varied from 23.2 kg ha⁻¹ N without fertiliser, to 73.3 kg ha⁻¹ N applying ash fertiliser. In contrast to reed canary grass, nitrogen removals in festulolium in both mowing regimes were very similar: in one-cut regime nitrogen removal varied from 22.1 kg ha⁻¹ N without fertiliser to 78.7 kg ha⁻¹ with fertiliser application. The obtained data demonstrate significant differences in nitrogen uptake and utilisation between both grass species.

Phosphorus (P₂O₅) removal, compared to nitrogen removal, was notably lower. For reed canary grass in two-cut regime, it varied on average from 24.2 kg ha⁻¹ P₂O₅ in the control to 48.0 kg ha⁻¹ P₂O₅ in ash treatment. Phosphorus removal in one-cut regime for reed canary grass was almost two times lower than in two-cut regime; whereas among fertiliser treatments in one-cut regime,

variations in phosphorus removal were not so pronounced: from 22.2 kg ha⁻¹ P₂O₅ without fertiliser to 26.5 kg ha⁻¹ P₂O₅ with ash application. Phosphorus removal with festulolium yield was on average two times lower than with reed canary grass yield, and in two-cut regime it varied from 9.4 kg ha⁻¹ P₂O₅ without fertiliser to 19.8 kg ha⁻¹ P₂O₅ with ash application. Phosphorus removal in one-cut regime for festulolium was on average 50% lower than in two-cut regime, and it varied from 6.0 kg ha⁻¹ P₂O₅ in the control to 12.9 kg ha⁻¹ P₂O₅ in mineral fertiliser treatment.

Potassium (K₂O) removal was the highest and exceeded the nitrogen (N) removal approximately 1.5–2 times. On average by mowings, it made 191%, 154%, and 151% from nitrogen removal in the first, second, and autumn cut, respectively. Significant differences in potassium removal were found both among mowing regimes and grass species: the greatest potassium amounts per year (207.3 kg ha⁻¹ K₂O) in reed canary grass were removed in two-cut regime with application of mineral fertilisers, whereas in one-cut regime, the highest potassium removal (75.1 kg ha⁻¹ K₂O) was established in ash application (P). For festulolium, the highest potassium removal was determined in both mowing regimes with ash (P) application: 115 and 134.6 kg ha⁻¹ K₂O in two-cut and one-cut mowing regime, respectively (Table 7). Application of ash and mineral fertilisers resulted in a significantly ($p < 0.05$) higher potassium removal, compared to those in both digestate treatments, where potassium removal ranged between 152.0 and 170.5 kg ha⁻¹ K₂O. In general, in reed canary grass in one-cut regime and in all fertiliser treatments, even 2–3 times less potassium amounts were removed with harvest, compared to two-cut mowing. In contrast to reed canary grass, potassium removals in festulolium did not differ significantly by mowing regimes.

Plant nutrient removal depending on application of different digestate rates varied in a broad range. Nitrogen removal per year in one-cut regime ranged on average between 69.56 and 103.7 kg ha⁻¹ N, and in two-cut regime – between 81.19 and 158.21 kg ha⁻¹ N (Fig. 5).

The lowest nitrogen removal in both mowing regimes was determined in no-fertiliser treatment, whereas the highest nitrogen removal was found when digestate fertilisers N60 and N120 (40+40+40) were used in one-cut and two-cut regimes, respectively. Phosphorus (P₂O₅) removal in three years of sward use in two-cut regime was on average 26.46–51.81 kg ha⁻¹ P₂O₅ per year, and in one-cut regime – 26.32–43.47 kg ha⁻¹ P₂O₅ per year. Compared to the removal of nitrogen and potassium, there were no significant differences in phosphorus removal by mowing regimes. The highest phosphorus removal in one-cut regime was observed in digestate N150 (50+50+50) and N60 treatments: 43.47 kg ha⁻¹ P₂O₅ and 42.54 kg ha⁻¹ P₂O₅ per year, respectively; whereas in two-cut regime, the largest phosphorus amount was removed when digestate N120 (40+40+40), N90 (30+30+30), and N150 (50+50+50) was applied: 51.81 kg ha⁻¹ P₂O₅, 46.67 kg ha⁻¹ P₂O₅, and 46.28 kg ha⁻¹ P₂O₅ per year, respectively. Depending on

the applied digestate rate, potassium (K_2O) removal ranged between 122.74 and 246.02 $kg\ ha^{-1}\ K_2O$ per year. In one-cut regime, potassium removal was similar to nitrogen removal and ranged between 69.74 and 105.84 $kg\ ha^{-1}\ K_2O$ per year. Similarly to nitrogen removal, the lowest amounts of potassium removal in both mowing regimes were found in no-fertiliser treatment, but the highest amounts were found in two-cut regime in digestate N60 (217.95 $kg\ ha^{-1}\ K_2O$) and N120 (40+40+40) (246.02 $kg\ ha^{-1}\ K_2O$) treatments, and in one-cut regime in digestate N60 (105.84 $kg\ ha^{-1}\ K_2O$) treatment. On average in all fertiliser treatments in three years of sward use, the amount of potassium removal in one-cut regime was approximately two times smaller than in two-cut regime: 92.54 and 202.32 $kg\ ha^{-1}\ K_2O$ per year.

Plant nutrient balance. The balance of plant nutrients NPK was calculated as the difference between nutrient – nitrogen (N), phosphorus (P_2O_5), and potassium (K_2O) – input to the field with fertilisers and that nutrient output which was removed with the harvest. Calculations were made for the whole period of experiment – starting from the establishment of grass sward until the last harvesting at the end of third-year use. If there was a plant nutrient surplus in the experimental period, i.e., input exceeded the output, the balance was positive (in percent – $>100\%$), and vice versa – if output exceeded the input, the balance was negative ($<100\%$). Evaluation of NPK balance in three years of sward use suggested that it was positive in one-cut regime in all fertilisation treatments – the input of plant NPK nutrients was greater than the output with dry matter yield. NPK balance in two-cut regime was lower, and in some fertiliser treatments – even negative.

Nitrogen balance was positive almost in all fertiliser treatments. The total amount of nitrogen used during the period of experiment was 350 $kg\ ha^{-1}\ N$. In one-cut regime, nitrogen balance varied pronouncedly depending on the fertiliser applied: for reed canary grass – from 131 $kg\ ha^{-1}\ N$ or 160% with mineral fertiliser application, to 244 $kg\ ha^{-1}\ N$ or 330% with split rate of digestate application (D2); for festulolium – from 95 $kg\ ha^{-1}\ N$ or 137% with mineral fertiliser application, to 237 $kg\ ha^{-1}\ N$ or 312% with split rate of digestate (D2) (Fig. 6).

Differences in nitrogen balance were mostly dependent on grass dry matter yield. Overall, nitrogen balance in two-cut regime was lower and notably more nitrogen was removed with dry matter yield; therefore, the amount of nitrogen output was approximately the same as nitrogen input. In some fertiliser treatments, even a negative nitrogen balance was determined: for reed canary grass – from -55 $kg\ ha^{-1}\ N$ or 86% with ash application (P), to 121 $kg\ ha^{-1}\ N$ or 153% with split application of digestate (D2). Whereas for festulolium, nitrogen balance was positive – from 78 $kg\ ha^{-1}\ N$ or 129% with ash application (P), to 206 $kg\ ha^{-1}\ N$ or 244% with split application of digestate (D2). Comparison of nitrogen balance between species showed that larger amounts of nitrogen were used by reed canary grass as its dry matter yield was considerably higher. The

obtained data revealed that nitrogen balance for reed canary grass in two-cut regime was significantly lower than in one-cut regime, and in that case, nitrogen amount in reed canary grass at harvesting was of primary importance. This was possibly influenced by the ability of reed canary grass to translocate nitrogen from aboveground biomass to roots at the stage of senescence. Nitrogen balances for festulolium in both mowing regimes were not significantly different.

Phosphorus balance. During the experiment, the total amount of phosphorus applied was $280 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$. Phosphorous balance in fertiliser treatments varied depending on grass species and mowing regime. Although differences were not significant, certain trends could be observed. In one-cut regime for reed canary grass, phosphorus balance varied from $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ or 351% with mineral fertiliser application, to $225 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ or 511% with split application of digestate (D2). For festulolium, phosphorus balance varied from $238 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ or 668% with mineral fertiliser application, to $252 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ or 998% with full rate of digestate application (D1) (Fig. 7). Phosphorus balance was lower in two-cut regime and varied for reed canary grass – from $143 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ or 205% with mineral fertiliser application, to $178 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ or 276% with split application of digestate (D2), and for festulolium – from $206 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ or 382% with mineral fertiliser application, to $224 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ or 503% with split application of digestate (D2).

Also, regarding phosphorus balance, a similar conclusion can be made – although much lower amounts of phosphorus were removed, the formation of phosphorus balances by mowing regimes differed considerably.

Potassium balances. The total amount of potassium used as a fertiliser in the experiment over the three-year period of sward use was $560 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$. Potassium balances in one-cut regime in fertiliser treatments for reed canary grass were similar and varied from $336 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ or 250% with mineral fertiliser treatment, to $377 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ or 307% with full rate of digestate application (D1) (Fig. 8). For festulolium, potassium balances varied pronouncedly by fertiliser treatments: from $136 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ or 132% with ash application, to $399 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ or 348% with split rate of digestate application (D2). In two-cut regime, potassium balance was considerably lower and even negative in some variants: for reed canary grass in fertilised plots, it varied from $-39 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ or 93% with mineral fertiliser treatment, to $131 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ or 131% with split rate of digestate application (D2); for festulolium – from $136 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ or 132% with ash application, to $245 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ or 178% with split rate of digestate application (D2). Evaluation of potassium balance indicated the importance of mowing regime in plant nutrient turnover – in a three-year period, potassium balances at equal NPK fertiliser rates and similar reed canary grass yields differed several times, even up to 375 kg ha^{-1} .

The obtained data revealed that the amount of nutrients (NPK) removed from the field with grass yield during the period of experiment in two-cut regime was notably greater than in one-cut regime. Pronounced differences were

determined for reed canary grass – in two-cut regime, nutrient NPK balance was approximately half as low as in one-cut regime. This was influenced by differences in the chemical composition of grass dry matter: for reed canary grass in autumn cut, NPK content was substantially lower than in two-cut regime, but for festulolium, the contents of NPK in different mowings varied considerably less; moreover, the yield of festulolium in one-cut regime was higher, which, to a certain extent, equalled the NPK balance in both mowing regimes. The negative NPK balance in the control variant illustrates the plant nutrient amount available in soil for grasses. The high positive phosphorus balance indicators in the fertilised plots allow concluding that lower phosphorus fertiliser rates should be applied to soils with medium and high phosphorus content, especially when applying split rate of digestate (D2).

5. Nitrogen use efficiency

Different assumptions can be used to evaluate the agronomic efficiency of the use of applied nitrogen, which can result in different reference values characterising the efficiency. For these purposes, they can be called efficiency indicators. One of efficiency indices for grasses can be grass yield (kg) calculated as the amount of dry matter per one kg nitrogen applied (yield indicator – N_R). The second indice can be yield increase due to the use of fertilisers, calculated as the amount of dry matter (kg) per one kg of nitrogen applied (yield increase indicator – N_{RP}). Both indicators are relative, because the whole yield amount or yield increase is calculated against nitrogen only, excluding the influence of phosphorus and potassium.

Yield indicator (N_R). A higher yield indicator (N_R) for both grass species was in one-cut regime – on average 63.9, compared to 56.6 in two-cut regime. On average in three years of sward use in one-cut regime, N_R indicator varied: for reed canary grass – from 62.4 applying full rate of digestate (D1), to 81.1 applying mineral fertilisers; for festulolium – from 39.8 applying split rate of digestate (D2), to 70.2 applying ash fertiliser. On average for the three-year period, in two-cut regime N_R indicator was lower: for reed canary grass – from 56.4 applying split rate of digestate (D2), to 81.4 applying ash fertiliser; for festulolium – from 36.3 applying full rate of digestate (D1), to 53.4 applying ash fertiliser. On average in three years of sward use, a significantly higher N_R indicator was determined for reed canary grass both in two-cut and one-cut regimes: on average 68.5 and 72.2, respectively; whereas for festulolium, N_R indicator was notably lower: on average 44.6 and 55.6 in two-cut and one-cut regimes, respectively. Comparison of differences among fertilised treatments showed that the highest N_R indicator for both species in both mowing regimes was established when ash was used: on average 81.1 for reed canary grass and 61.8 for festulolium. Only slightly lower N_R indicators were obtained in mineral fertiliser treatments: 80.1 and 59.6, respectively. In several experiments with

cereals, it has been found that a similarly calculated N_R indicator varied around 40–70 (kg grain per kg N). Nitrogen use efficiency for grasses was comparatively higher, because the whole aboveground biomass amount was taken into consideration, while similar calculations for cereals take into account only the yield of grain.

Yield increase indicator (N_{RP}) better reflects the influence of fertiliser use on crop yield obtained, because soil fertility factor is excluded from the total plant nutrient supply. Using increasing fertiliser rates, this indicator allows studying the crop productivity curve, i.e., better understand the yield's increase within a certain fertiliser rate interval. Thus, N_{RP} indicator shows the efficiency with which plants use each additionally applied fertiliser unit. N_{RP} varied: for reed canary grass – from 16.4 (D1) to 35.1 (Mm) in one-cut regime, and from 17.7 (D2) to 42.7 (P) in two-cut regime; for festulolium – from 15.5 (D2) to 45.9 (P) and from 15.4 (D1) to 32.5 (P), respectively. A higher N_{RP} for reed canary grass was found in two-cut regime – 29.8 and 26.2, respectively; whereas for festulolium, a higher N_{RP} was in one-cut regime – 31.3 and 23.7, respectively (Fig. 9). On average for both grass species, a higher N_{RP} was determined in one-cut regime: 28.7 and 26.7, respectively. N_{RP} indicator increased by years of sward use – from 24.8 to 33.4 in the first and third year, respectively. No significant differences were found between both grass species in both mowing regimes: on average N_{RP} for reed canary grass was 28.0, and for festulolium – 27.5. Summarizing the findings, a conclusion can be drawn that N_{RP} indicators for grasses were high compared to cereals. N_{RP} for cereals ranges between 10 and 30, and indicator >30 is considered as very high, which is usually obtained either in efficiently managed systems or at low nitrogen rates, or at low soil nitrogen supply. N_{RP} indicator can be increased by optimizing the application of nitrogen fertilisation, the selection of crops, and soil management practices.

In the micro-trial, a higher yield increase indicator (N_{RP}) was determined in one-cut mowing: on average 64.7 in all fertiliser treatments; for comparison – 38.3 in two-cut regime. N_{RP} indicator in one-cut regime by fertiliser treatments varied from 39 applying nitrogen rate N120 (40+40+40), to 106 applying nitrogen rate N30 (Fig. 10). N_{RP} indicator had negative correlation with nitrogen rate: -0.35 and -0.39 in one cut and two cut regime, respectively. Also other researchers have observed a tendency that the efficiency of nitrogen fertiliser calculated in such a way usually decreases with the increase of fertiliser rate.

Plant nutrient (NPK) recovery from applied fertiliser. The so called “difference method” was used for calculations, assuming that grasses equally use soil plant nutrients in no-fertiliser (control) treatment and in treatments applying those nutrients. Therefore, the plant nutrient removed from the non-fertilised plot was subtracted from the same nutrient removed from the fertilised plot, and the remainder was divided by the amount of applied plant nutrient. The obtained value is usually called plant nutrient apparent recovery (Fig. 11).

Using such calculation method, apparent recovery of nitrogen use (N_{sk}) closely correlated with nitrogen removal – considerably lower it was in one-cut regime, since nitrogen content in grass (especially reed canary grass) dry matter had markedly decreased at the time of mowing. The coefficients of nitrogen recovery for reed canary grass in three years of sward use by mowing regimes differed approximately by half: 23.4 and 49.5 in one-cut and two-cut regime, respectively. *Festulolium* does not possess a high ability to translocate plant nutrients from aboveground biomass to roots at the stage of senescence; therefore, differences by mowing regimes were less pronounced: on average in three years, N_{sk} was 38.4 and 43.6 in one-cut and two-cut regime, respectively.

Calculating the coefficients of apparent recovery of potassium and phosphorus in a similar way, it was found that apparent recovery of potassium use (K_{sk}) for reed canary grass in two-cut regime was three times higher than in one-cut regime – 91.3 and 28.7, respectively; whereas for *festulolium*, the differences were insignificant – 55.9 and 60.7 in two-cut and one-cut regime, respectively. The coefficient of apparent recovery of phosphorus use (P_{sk}) for reed canary grass in two-cut regime was four times higher than in one-cut regime – 16.6 and 4.0, respectively; for *festulolium*, P_{sk} was on average 11.0 and 5.2 in two-cut and one-cut mowing regime, respectively.

6. Fertilisation effect on soils' agrochemical properties

Soil analyses were performed before setting up the trials and repeatedly after four years to assess the possible changes in soil agrochemical properties due to fertiliser application and the management of grasses. Obtained results showed insignificant ($p < 0.05$) changes in some soil parameters, including soil pH (pH KCl), by fertiliser treatments. Although different kinds of fertilisers were applied, the soil pH practically did not change in the four-year research period. The obtained results do not support the assumption that regular use of digestate application can significantly change the soil pH level. Probably, such processes take place very gradually, but in our trials in the four-year period, no statistically significant changes were established. Similar results have been obtained also in other researches, proving that digestate application practically does not affect the soil pH. A comparatively higher soil pH level was found in wood ash treatment, which reveals the effect of ash on soil acidity neutralization; however, also in this case, differences mostly were not significant. This might have been caused by using ash together with mineral fertilisers to compensate the missing nutrients, mainly N. Wood ash neutralised soil acidification due to mineral fertiliser application.

A higher content of organic matter was found in digestate treatment, which suggests the positive effect of organic fertiliser use on the increase of soil organic carbon supply. Compared to the control, a higher plant-available phosphorus content was determined in fertilised plots; it was substantially higher

($p < 0.05$) when ash was applied. The analyses for potassium content revealed that it had increased (on average $+27.15 \text{ mg kg}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$) in all fertilised plots, resulting in a significant increase of potassium content in soil. The best results were obtained due to digestate application, which had positively affected the increase in soil potassium pool. Consequently, the lowest phosphorus and potassium contents were found in treatments without fertiliser use. The obtained results demonstrate that soil has high buffering capacity; therefore, changes in agrochemical properties were insignificant in the four years of the experiments.

The effect of digestate fertiliser on soil parameters revealed positive changes in the content of plant nutrients: the higher the digestate rate applied, the higher the plant available phosphorus and potassium amounts in the soil (Fig. 12).

A close correlation was established between the applied digestate rate and: organic matter content ($r=0.93$), soil reaction pH KCl ($r=0.64$), phosphorus content ($r=0.92$), and potassium content (with the closest correlation – $r=0.99$). The increase in the majority of parameters was not significant ($p < 0.05$); however, the positive trends reveal that regular use of digestate in grass fertilisation can improve soil agrochemical properties in the long term. Digestate application over the four years resulted in a notable increase of plant available potassium (K_2O) content in soil practically in all digestate treatments. Compared to the control and the lowest digestate rate (N30) treatments, a significant phosphorus (P_2O_5) content increase in soil was determined applying the highest digestate rate – N150 (50+50+50). In other fertilised plots, the established differences were not statistically significant, though plant available phosphorus content had increased due to fertiliser application. Positive trends were observed also in soil reaction – higher digestate rates increased the soil pH level, which suggests that the use of digestate in an intensive grass growing system excludes soil acidification due to fertilisation, but higher digestate rates can promote gradual increase in soil pH level.

7. Economics of fertiliser use

In the agronomic and ecological assessment of the growing of energy grasses, the economic aspect is also very important, which, to a great extent, determines the use of certain agrotechnical measures in the long term. The costs of the use of different soil amendments, including mineral fertilisers, wood ash, and digestate, were compared taking into account that equivalent amounts of main plant nutrients (NPK) were used in all fertilised plots. Also, grass fertilisation costs were compared using different digestate rates.

The following expenditures were taken into account for calculating fertiliser use costs:

- 1) fertiliser purchase costs;
- 2) costs for fertiliser transportation from the purchase place to the field;

3) fertiliser application costs.

Fertiliser purchase costs. Ash in boiler houses usually can be obtained for free, as it mostly should be deposited as waste, which makes additional costs. According to the data of LVMI³ “Silava”, ash deposition costs make approximately 39.50 EUR per ton; therefore, boiler house managers willingly cooperate with farmers and foresters by covering ash loading costs. Usually, also transportation costs from boiler houses to the farm are partially or fully covered; however, it was not taken into account in our calculations. Also digestate purchase costs were not taken into account as digestate is continuously accumulated in biogas plants and it is necessary to regularly empty the storage lagoons. Purchase costs of mineral fertilisers – ammonium nitrate (34.4% N), single superphosphate (19% P₂O₅), and potassium chloride (60% K₂O) – were calculated according to average mineral fertiliser prices in the year 2020; purchase costs of one kg of plant nutrients were: N=0.844 EUR kg⁻¹; P₂O₅=1.684 EUR kg⁻¹; and K₂O=0.267 EUR kg⁻¹.

Transportation costs were calculated basing on the survey of average prices for technical services in Latvia in the last five years (2016–2020). The costs were calculated assuming that transportation distance was 20 km.

Calculations of fertiliser application costs were made based on the average prices of technical support services in the last five-year period. For ash, calculations were made assuming that granulated wood ash was used, as in the technological process of many boiler houses the ash from the furnace is immediately mixed with water, thus obtaining granulated ash. They are friable enough to be applied with a mineral fertiliser spreader. Transportation and fertiliser application made the largest share of total costs for the use of plant nutrients present in wood ash and digestate. The choice of an appropriate kind is of great importance for commercial fertilisers, since, in this case, the price of a fertiliser makes the largest share of total costs. According to mineral fertiliser prices in 2020, the costs of using one kg of plant nutrients for grass fertilisation (including transportation and application) were: 1.021 EUR kg⁻¹ N (ammonium nitrate), 1.861 EUR kg⁻¹ P₂O₅ (superphosphate), and 0.443 EUR kg⁻¹ K₂O (potassium chloride).

Comparison of the costs of using different fertilisers with equal amounts of main plant nutrients (NPK) revealed that the highest costs were in mineral fertiliser treatment: 163.48 EUR ha⁻¹ in the seeding year and 314.48 EUR ha⁻¹ in the years of sward use. Comparatively lower costs were in ash treatment: 138.08 EUR ha⁻¹ in the seeding year and 260.75 EUR ha⁻¹ in the years of sward use. The costs for using digestate per area unit were the lowest: 63.59 EUR ha⁻¹ in the seeding year and 192.53–235.31 EUR ha⁻¹ in the years of sward use. Compared to mineral fertilisers, the use of wood ash allowed to save 25.40 EUR ha⁻¹ in the seeding year and 54.15 EUR ha⁻¹ in the years of sward use,

³ Latvian State Forest Research Institute

whereas digestate use allowed to save 99.89 EUR ha⁻¹ in the seeding year and 79.59–122.37 EUR ha⁻¹ in the years of sward use. Figure 13 graphically illustrates the costs of fertiliser use, assuming that mineral fertiliser use costs are the baseline or zero line.

Calculations of fertiliser costs per ton of reed canary grass dry matter showed that on average in a three-year period in two-cut regime, they varied from 32.28 EUR t⁻¹ applying wood ash, to 40.94 EUR t⁻¹ with full rate of digestate application (D1); in a two-cut regime, the costs were very similar and varied from 33.17 EUR t⁻¹ applying ash, to 39.44 EUR t⁻¹ with mineral fertiliser application.

Fertilisation costs per ton of festulolium yield were higher – on average in a three-year period in two-cut regime, they varied from 52.36 EUR t⁻¹ with ash application, to 68.48 EUR t⁻¹ applying full rate of digestate (D1); in a two-cut regime they were notably lower than for reed canary grass and varied from 37.92 EUR t⁻¹ with ash application, to 56.65 EUR t⁻¹ applying full rate of digestate (D1). It can be concluded that lower fertilisation costs were in one-cut regime. Reed canary grass fertilisation costs per ton of yield in two-cut regime were on average 40% lower than for festulolium; whereas in one-cut regime, they were on average 10–40% lower than for festulolium.

Economic justification of digestate use. Costs of digestate use for reed canary grass depending on the rate and digestate composition varied by years: from 35.29 EUR ha⁻¹ to 176.43 EUR ha⁻¹ in the first year of sward use, from 28.23 EUR ha⁻¹ to 141.10 EUR ha⁻¹ in the second year of sward use, and from 39.52 EUR ha⁻¹ to 197.60 EUR ha⁻¹ in the third year of sward use (Fig. 14). In the year of reed canary grass seeding, when equal digestate rates were applied in all fertiliser treatments (40 kg ha⁻¹ N), fertilisation costs were 63.33 EUR ha⁻¹. The lower the digestate rate, the proportionally lower fertiliser application costs per hectare, and vice versa, because the main costs in digestate use were made by transportation and application.

The assessment of fertilisation costs per ton of reed canary grass dry matter showed that comparably lower costs were in one-cut regime: from 3.73 EUR t⁻¹ in the treatment with lowest digestate rate, N30, to 13.74 EUR t⁻¹ applying the highest digestate rate, N150 (50+50+50); whereas in two-cut regime, the costs varied from 5.61 EUR t⁻¹ applying the lowest digestate rate, N30, to 19.52 EUR t⁻¹ applying the highest digestate rate, N150 (50+50+50). On average in one-cut regime, fertilisation costs per ton dry matter yield were around 40% (varying from 30% to 60% depending on fertiliser treatment) lower than in two-cut regime.

Accordingly, a conclusion can be drawn that the use of bioenergy production by-products in the fertilisation of grasses reduces the costs of fertilisation per hectare. The more concentrated the fertiliser with a higher plant nutrient content, the lower the fertilisation costs, because the greatest share of costs for the use of by-products (especially digestate) was made by their application costs. Fertilisation costs per ton of grass dry matter were closely

connected with obtained dry matter yield. The lowest fertilisation costs were in wood ash application which gave the highest dry matter yields of grasses. In digestate treatments, comparatively lower yields were obtained; therefore, also fertilisation costs per ton of grass dry matter were higher. However, it should be taken into account that digestate as an organic fertiliser exerts positive effect on soil properties especially as a source of organic carbon. By using modern digestate application technologies, which can incorporate the fertiliser into the soil it is possible at least partially to reduce the plant nutrient losses and increase the fertiliser use efficiency, thus raising the yield level of grasses. This leads to a conclusion that the use of digestate and wood ash in grasses fertilisation is prospective also from the economic point of view.

CONCLUSIONS

1. Wood ash fertilisation showed practically equal effect on dry matter yield of grasses if compared with the use of mineral fertilisers; on average, it was 8.11 t ha⁻¹ (ash) and 8.01 t ha⁻¹ (mineral fertilisers) for reed canary grass, and 6.18 t ha⁻¹ and 5.96 t ha⁻¹, respectively, for festulolium.
2. The use of digestate provided a significant dry matter yield increase in grasses (on average for both cutting regimes) – 42% for reed canary grass, and 75% for festulolium compared to the non-fertilised plot; however, it was lower than the yield level obtained by the use of mineral fertilisers. The methods of digestate application did not show significant differences, which suggests that the main effect was exerted by application rate.
3. Higher rates of digestate provided higher dry matter yields of reed canary grass – on average, from 6.53 to 8.99 t ha⁻¹ if two-cut regime was used, and from 9.25 to 12.67 t ha⁻¹ if only one-cut regime was employed. The most effective application rate for two-cut regime was N60. For one-cut regime, the dry matter yield of reed canary grass increased proportionally to the fertiliser application rate and the increment of 30 kg ha⁻¹ N given with the digestate provided on average an additional one ton per hectare of dry matter.
4. On average, one-cut regime provided a significantly higher dry matter yield level in all treatments for both grasses – 5.81 t ha⁻¹ compared to two-cut regime (5.12 t ha⁻¹). In the trial where different rates of digestate were used, the yield level was 10.09 and 7.49 t ha⁻¹, respectively. Reed canary grass was more productive and provided a 6.47 t ha⁻¹ dry matter yield on average for both cutting regimes compared to 4.46 t ha⁻¹ for festulolium.
5. The yield structure depended mainly on: a) species of grass; b) cutting regime; c) time of harvesting; d) kind of fertiliser. The highest proportion of culms was: a) in reed canary grass swards; b) in one-cut regime; c) in the first cut compared to the second one; d) applying mineral fertilisers or wood ash.
6. Chemical composition of grasses significantly depended on: a) grass species – a lower ash content was for reed canary grass – 6.5% compared to 7.1% for

festulolium; b) time of harvesting – a lower ash and nitrogen content but a higher carbon content was for the autumn cut; c) part of grass – a lower ash and nitrogen content but a higher carbon content was in culms. A linear and significant decrease of potassium content in dry matter yield was observed depending on the harvesting time: 26.21 g kg⁻¹ K in the first cut, 15.32 g kg⁻¹ K in the second cut, and 7.64 g kg⁻¹ K in the late autumn cut.

7. Plant nutrient removal by yield depended on: a) grass species; b) harvesting regime; c) kind of fertiliser. Higher NPK removals were: a) with reed canary grass; b) when two cuts were done; c) using mineral fertilisers or wood ash. Potassium was the most removed nutrient with the grass yield; moreover, using two-cut regime, potassium removal was twice higher (202.32 kg ha⁻¹ K₂O) than in one-cut regime (92.54 kg ha⁻¹ K₂O). Similar tendencies were observed also for nitrogen and phosphorus, confirming a conclusion regarding the ability of reed canary grass to transfer nutrients from aboveground biomass to roots in the stage of senescence.
8. Nitrogen use efficiency for both grass species was significantly higher when wood ash was applied and one-cut regime was used. The use of increasing application rates of digestate negatively correlated with NIE: -0.44 and -0.48 for one-cut and two-cut regimes, respectively.
9. The three-year use of digestate and wood ash significantly reduced the costs for grass fertilisation: from 1108.18 EUR ha⁻¹ applying mineral fertilisers, to 920.33 EUR ha⁻¹ using wood ash or to 718.98 EUR ha⁻¹ using digestate. The lowest fertilisation costs on a unit of obtained dry matter yield were in wood ash application: for reed canary grass – 32.28 EUR t⁻¹ (two-cut regime) and 33.17 EUR t⁻¹ (one-cut regime); for festulolium – 52.36 EUR t⁻¹ and 37.92 EUR t⁻¹, respectively. There was a strong correlation between the costs of one fertilisation unit and the obtained dry matter yield, using bioenergy by-products as fertilisers.

RECOMMENDATIONS

1. Harvesting of grasses for fuel production is recommended only once per season – in late autumn – to obtain a greater dry matter yield with a higher biomass quality (as a fuel) and to promote a better plant nutrient reuse, especially for rhizomatous grasses, taking into account their ability to transfer plant nutrients from aboveground biomass to roots in the stage of senescence.
2. In the process of fertiliser planning for rhizomatous grasses, it is important to consider the planned grass harvesting regime. Very late harvesting will stimulate plant nutrient translocations from the aboveground biomass to the roots; therefore, it is possible to reduce NPK application rates up to 50% if reed canary grass is cut only once per season.
3. For reduction of nitrogen emissions, the incorporation of digestate into the soil is important. This will increase the effectiveness of fertiliser use as well

as prevent environmental pollution. It is not reasonable to split the moderate digestate application rates because the late application cannot compensate the missing nutrients in spring.

4. It is reasonable to combine the application of wood ash with the use of mineral fertilisers, thus providing grasses with the necessary nitrogen amounts. In such a way it is possible to substantially reduce the fertilisation costs and to stimulate the reuse of plant nutrients.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my thanks to my colleagues of the Institute of Agriculture, especially from the Section of Grass Breeding for their support and practical assistance in the process of field experiment realisation.

Many thanks to Dr. agr. Pēteris Bērziņš for his advice, consultations and practical help in data processing, as well as for his valuable suggestions, moral support and wise words.

Thanks to my colleagues from the Laboratory of Forest Environment, Latvia State Forest Research Institute “Silava”, for helping me with the chemical analyses of the grass biomass as well as for the excellent cooperation.

And, finally, many, many thanks to my family and relatives for their support, practical help, encouragement and belief in me.