

LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
MEŽA FAKULTĀTE
*LATVIA UNIVERSITY OF AGRICULTURE
FOREST FACULTY*

LATVIJAS VALSTS MEŽZINĀTNES INSTITŪTS “SILAVA”
LATVIA STATE FOREST RESEARCH INSTITUTE “SILAVA”

DAGNIJA LAZDIŅA

**NOTEKŪDEŅU DŪŅU IZMANTOŠANAS IESPĒJAS
KĀRKĻU PLANTĀCIJĀS**

*USING OF WASTEWATER SEWAGE SLUDGE IN SHORT
ROTATION WILLOW COPPICE*

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS
Dr. silv. zinātniskā grāda iegūšanai Mežzinātnes nozarē
Meža ekoloģijas un mežkopības apakšnozarē

*RESUME OF THE PhD PAPER
for the scientific degree of Dr. silv.
in Forest Ecology and Silviculture*

ISBN 978-9934-8016-4-8

Jelgava 2009

Promocijas darba zinātniskais vadītājs:
Academic advisor:

Imants Liepa
Dr.habil.biol.

Pētnieciskais darbs izpildīts Latvijas Valsts Mežzinātnes institūtā "Silava" laika posmā no 2004. līdz 2008. gadam. Doktora studiju laiks Latvijas Lauksaimniecības Universitātes, Meža fakultātē no 2005. - 2008. gadam.

The research has been carried out at the Latvia State Forestry Research Institute 'Silava' in the time period 2004 to 2008. The doctoral studies at Latvia University of Agriculture, Forest Faculty have been performed between 2005-2008.

Oficiālie recenzenti/ Official reviewers:

Prof., Dr.habil.sc.ing. **Arnolds Šķēle** Latvijas Lauksaimniecības Universitātes, Latvijas Zinātnes padomes eksperts/ *Professor at Latvia University of Agriculture, expert of the Scientific Board of Latvia*

Dr.silv. **Tālis Gaitnieks**, Latvijas Valsts Mežzinātnes institūta "Silava" vadošais pētnieks, Latvijas Zinātnes padomes eksperts/ *Senior researcher of Latvia State Forest Research Institute 'Silava', expert of the Scientific Board of Latvia*

Dr.sc. (agr. & for.) **Jyrki Hytönen** Somijas mežzinātnes institūta METLA, Kannus meža pētīšanas stacijas vadošais pētnieks/ *Senior Researcher of The Finnish Forest Research Institute METLA, Kannus Research Unit*

Darba izstrāde veikta ar Eiropas Sociālā fonda granta atbalstu.

The doctoral Thesis has been worked out by financial support of European Social Fund



Promocijas darba aizstāvēšana notiks LLU Mežzinātņu un Materiālzinātņu nozares promocijas padomes atklātā sēdē 2009. gada 17.aprīlī, plkst. 11 00, Jelgavā, Dobeles ielā 41, sēžu zālē.

The promotion paper will be presented for public criticism in an open session of the Promotion Council of the Forest Sciences and Material sciences of Latvia University of Agriculture held on 17 April 2009 at 11 00 in the conference hall, Dobeles street 41, Jelgava.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Lauksaimniecības Universitātes Fundamentālajā bibliotēkā Lielā ielā 2, Jelgavā vai <http://llu.fb.llu.lv/llu-theses.htm>. Atsauksmes sūtīt Latvijas Lauksaimniecības Universitātes Mežzinātņu un Materiālzinātņu nozaru promocijas padomes sekretāram Latvijas Lauksaimniecības Universitātes profesoram Dr. sc. ing. A. Drēskam Akadēmijas ielā 11, Jelgava, Latvija, LV-3001 vai mfd@llu.lv

The thesis and resume are available at the Fundamental Library of Latvia University of Agriculture, Liela street 2, Jelgava, or <http://llu.fb.llu.lv/llu-theses.htm>.

References welcome to be sent to professor, Dr.sc.ing. A.Drēska, the Secretary of the Promotion Council of the Forest Sciences and Material sciences of Latvia University of Agriculture, Akadēmija street 11, Jelgava, LV-3001, Latvia or mfd@llu.lv

SATURS

| | |
|---|----|
| 1. Darba vispārējs raksturojums..... | 5 |
| 1.1. Tēmas aktualitāte..... | 5 |
| 1.2. Promocijas darbā veiktā pētījuma mērķis..... | 7 |
| 1.3. Promocijas darba uzdevumi..... | 7 |
| 1.4. Darba novitāte, zinātniskā un praktiskā nozīmība..... | 7 |
| 1.5. Zinātniskā darba aprobācija..... | 8 |
| 1.6. Promocijas darba struktūra un apjoms..... | 10 |
| 2. Pētījuma materiāls un metodika..... | 10 |
| 2.1. Pētījuma objektu un stādmateriāla raksturojums..... | 10 |
| 2.2. Mēslošanas izmēģinājumu varianti un plantāciju uzturēšana..... | 13 |
| 2.3. Kokaugu biomasas noteikšanas metodika..... | 14 |
| 2.4. Ķīmisko analīžu metodes..... | 16 |
| 2.5. Datu statistiskās apstrādes metodes..... | 16 |
| 3. Rezultāti un diskusija..... | 17 |
| 3.1. Notekūdeņu dūņu izmantošana plantācijās..... | 17 |
| 3.1.1. Augsnes īpašības pirms un pēc mēslošanas..... | 17 |
| 3.1.2. Plantāciju augsnes un augu biomasas piesārņojums..... | 24 |
| 3.2. Dažādu kārkļu šķirņu produktivitātes pārbaude..... | 25 |
| 3.2.1. Plantāciju ražība dažādās augsnēs..... | 25 |
| 3.2.2. Dūņu mēslojuma ietekme uz kārkļu produktivitāti..... | 26 |
| 3.2.3. Kārkļu plantāciju produktivitātes dinamiku ietekmējošie faktori..... | 28 |
| 3.3. Agrotehniskā specifika, izstrādes tehnoloģijas un notekūdeņu dūņu izmantošanas modeļa ekonomiskais vērtējums..... | 31 |
| 3.3.1. Plantāciju ierīkošana un uzturēšana..... | 31 |
| 3.3.2. Ierīkošanas, agrotehniskās kopšanas un uzturēšanas izmaksas..... | 32 |
| 3.3.3. Izstrādes izmaksas..... | 33 |
| 3.3.4. Potenciālie ienākumu avoti..... | 35 |
| 4. Galvenie secinājumi un ieteikumi..... | 36 |

TABLE OF CONTENTS

| | |
|--|-----------|
| <i>1. General description.....</i> | <i>38</i> |
| <i>1.1. Topicality of the theme.....</i> | <i>38</i> |
| <i>1.2. Aim of the thesis.....</i> | <i>40</i> |
| <i>1.3. Research objectives.....</i> | <i>40</i> |
| <i>1.4. Practical significance and scientific novelty.....</i> | <i>40</i> |
| <i>1.5. Approbation of research results.....</i> | <i>41</i> |
| <i>1.6. Structure and coverage of thesis.....</i> | <i>41</i> |
| <i>2. Material and methods.....</i> | <i>41</i> |
| <i>2.1. Characterization of research objects and planting material.....</i> | <i>41</i> |
| <i>2.2. Variants of fertilizer applications and management the plantations.....</i> | <i>43</i> |
| <i>2.3. Methodology of estimation of woody biomass.....</i> | <i>44</i> |
| <i>2.4. Methods of chemical analyses.....</i> | <i>45</i> |
| <i>2.5. Methods of statistical evaluation.....</i> | <i>46</i> |
| <i>3. Results.....</i> | <i>46</i> |
| <i>3.1. Utilization of wastewater sludge in the plantations.....</i> | <i>46</i> |
| <i>3.1.1. Soil properties before and after fertilization.....</i> | <i>46</i> |
| <i>3.1.2. Pollution of soil and biomass in the plantations.....</i> | <i>50</i> |
| <i>3.2. Estimation of productivity of different willow varieties.....</i> | <i>51</i> |
| <i>3.2.1. Productivity of plantations in different soils.....</i> | <i>51</i> |
| <i>3.2.2. Effect of sludge applications on productivity of willows.....</i> | <i>51</i> |
| <i>3.2.3. Factors affecting productivity of willow plantations.....</i> | <i>52</i> |
| <i>3.3. Crop management, harvesting technologies and economical evaluation of the model of utilization of wastewater sludge.....</i> | <i>53</i> |
| <i>3.3.1. Establishment and management of plantations.....</i> | <i>53</i> |
| <i>3.3.2. Costs of establishment and management of plantations.....</i> | <i>54</i> |
| <i>3.3.3. Harvesting costs.....</i> | <i>54</i> |
| <i>3.3.4. Potential sources of income.....</i> | <i>55</i> |
| <i>4. Conclusions and recommendations.....</i> | <i>56</i> |

1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

1.1. Tēmas aktualitāte

Arvien pieaug pasaules valstu interese par atjaunojamās enerģijas iegūšanas veidiem, tajā skaitā, koksni. Aizvien aktuālāka kļūst ne tikai enerģētiskās koksnes ražošana, bet arī organisko atkritumvielu, tajā skaitā dūņu utilizācija. Promocijas darbā veikto pētījumu nolūks ir risināt šīs problēmas vienlaicīgi, izmantojot dūņas īscirtmeta kārkļu plantāciju mēslošanai, tādējādi paaugstinot to produktivitāti. Darbā pētītas iespējas, kā palielināt dūņu mēslojuma izmantošanas efektivitāti kombinējot to iestrādi ar koksnes pelnu un citu kaļķošanas materiālu izmantošanu.

Pēdējo 5-8 gadu laikā interese par kārkļu plantācijām pieaugusi vairākās Eiropas valstīs. Šo interesi veicinājuši vairāki faktori, bet svarīgākais ir atjaunojamo energoresursu patēriņa pieaugums, kas veicinājis resursu cenu kāpumu, jaunu notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģiju ieviešanu un organisko atkritumu utilizācijas jautājumu saasināšanās siltumnīcas efektu izraisošo gāzu (turpmāk SEG) emisiju kontekstā (Piebalgs 2008).

Oglekļa dioksīda piesaistes apjomus var palielināt, gan paplašinot mežu platības, gan palielinot jau esošo mežu ražību. Ierīkojot ātraudzīgo koku un krūmu plantācijas tiek izpildīti abi šie nosacījumi. Kārkļu plantāciju ierīkošana visintensīvāk notiek Lielbritānijā, Zviedrijā, Īrijā un Polijā, interese par tām pieaug Latvijā, Lietuvā, Igaunijā, Grieķijā un citās valstīs (Forest Service 2005, Ericsson et al. 2006, Komarowski et al. 2005, Wisniewska et al. 2006). Par iespējam ierīkot ātraudzīgo koku sugu plantācijas Latvijā interesējas Lielbritānijas un Dānijas investori.

Enerģētiskās koksnes plantācijās Ziemeļeiropā dominē dažādas vītolu (*Salicaceae*) dzimtas vītolu (*Salix*) ģints un apšu (*Populus*) ģints sugas un to hibrīdi Šādu izvēli nosaka to ātraudzība, vieglā pavairošana un pieticība attiecībā pret klimatiskajiem apstākļiem. Sevišķi populāras ir vītolu ģints kārkļu sugas, kurām iespējams dažāds saimnieciskais pielietojums (atkarībā no tirgus pieprasījuma) un kurām raksturīgas vidi, tajā skaitā augsni, uzlabojošas īpašības (Weih & Nordh 2002, Everts-Bunders 2005, Weih 2004, Tuck et al. 2006). Plantācijās audzētās kārkļu šķirnes veido lielu biomasu, saistot tajā CO₂, izdalot atmosfērā skābekli un veidojot organiskās vielas. Kārkļu plantācijas neļauj lauksaimniecības zemēs savairoties mazvērtīgiem krūmājiem; pasargā augsni no vēja un ūdens erozijas; pateicoties intensīvai transpirācijai, samazina mitrumu augsnē, tādējādi uzlabo augsnes struktūru un mitruma režīmu. Tāpēc kārkļu plantācijas izmanto ne tikai kurināmās koksnes ieguvei, bet arī sadzīves un lopkopības notekūdeņu biofiltrācijai (Saarsalmi 1995, Hasselgren 2003, Mangalis 2004, Smaliukas & Noreika 2005, McCormick & Käberger 2007).

Pieaugot iedzīvotāju labklājības līmenim un uzlabojoties notekūdeņu attīrīšanas efektivitātei, Latvijā būs pieejams aizvien lielāks kvalitatīvu, vides nekaitīguma prasībām atbilstošu sadzīves notekūdeņu dūņu daudzums un arvien aktuālāka kļūs notekūdeņu utilizācijas problēma. Šādas dūņas, kas satur dažādas augiem uzņemamas barības vielas, izmantojamas augsnes ielabošanai pirms kokaugu plantāciju tipa stādījumu ierīkošanas kā arī īscirtmeta plantāciju ražības kāpināšanai. Vietējās siltumapgādes sistēmās, kas izmanto dažāda veida enerģētisko koksnī, veidojas bāziski, kāliju un citus augiem nepieciešamus elementus saturoši, pelni, kas būtu izmantojami intensīvi apsaimniekojamu mežu, izstrādātu kūdras atradņu, kā arī neizmantoto lauksaimniecības zemju kaļķošanai un mēslošanai (Jones et al. 1994, Uebel & Heinsdorf 1997, Dilly 1999, Hytonen 1998, Kāposts et al. 2002, Komarowski et al. 2005, Schreffler & Sharpe 2003, Jacobs et al. 2005, Huotari et al. 2007, Gemste & Vucāns 2007).

Lauksaimniecībā neizmantotās zemes ir piemērotas enerģētisko lauksaimniecības augu un īscirtmeta kokaugu (kārkļu, apšu, baltalkšņu un citu ātraudzīgo koku sugu) plantāciju ierīkošanai (Hytonen 1995, Tahvanainen & Rytönen 1999, Heinso et al. 2002). Neraugoties uz lauksaimnieciskās ražošanas intensifikāciju un plašām diskusijām par iespējamo pārtikas deficītu enerģētisko augu aizņemto platību palielināšanās rezultātā, liela daļa lauksaimniecības zemju Latvijā, tāpat kā citās Austrumeiropas valstīs, vēl joprojām netiek izmantotas, bet aizaug un apmežojas, veidojot mazvērtīgas mežaudzes. Viens no šo teritoriju izmantošanas veidiem ir kokaugu plantāciju ierīkošana, kas ļauj veikt saimniecisko darbību īpašniekam izdevīgā laikā, nesagaidot cirtmeta vecuma sasniegšanu, vai atgriezt zemi lauksaimnieciskajā aprītē, ja to nosaka ekonomiski vai citi apstākļi. Ātraudzīgu un ražīgu īscirtmeta enerģētiskās koksnes plantāciju ierīkošana, izmantojot notekūdeņu dūņu un koksnes pelnu mēslojumu, ir risinājums, kā racionāli izmantot zemi šobrīd, nodrošinot Apvienoto Nāciju Organizācijas konvenciju par klimata izmaiņām un Kioto protokolā iekļauto prasību (industriāli attīstītajās valstīs līdz 2012. gadam samazināt SEG emisiju par 5,2 %, salīdzinot ar 1990. gadu.) izpildi, neizslēdzot zemes lietošanas un izmantošanas veida maiņu nākotnē (Weih 2004, Hytonen & Wall 2006). Sadzīves notekūdeņu dūņu un koksnes pelnu komposti ir piemēroti lietošanai virsmēslojumā, kas ļauj būtiski samazināt mēslojuma iestrādes izmaksas (Aronsson & Perttu 2001, Weih & Nordh 2002, Hasselgren 2003, Hytonen 2003, Komarowski et al. 2005).

Pašreizējā situācija Latvijā ir veicinoša izvērstai enerģētiskās koksnes un īscirtmeta plantāciju ierīkošanai un izmantošanai (Piebalgs 2008), vienlaicīgi būtiski sekmējot enerģētiskās koksnes nodrošinājuma, notekūdeņu dūņu un koksnes pelnu utilizācijas problēmas risināšanu (Gemste & Vucāns 2007).

1.2. Promocijas darbā veiktā pētījuma mērķis

Izstrādāt ekoloģiski un ekonomiski pamatotu notekūdeņu dūņu izmantošanas modeli īsirtmeta kārkļu plantācijās, noskaidrojot kārkļu īsirtmeta energoplantāciju produktivitāti dažādos augšņu tipos un augšanas apstākļos, novērtējot notekūdeņu dūņu mēslojuma izmantošanas ietekmi uz vidi, piedāvājot risinājumus videi drošu dūņu izmantošanas tehnoloģiju ieviešanai praksē un veicot dūņu mēslojuma izmantošanas ekonomiskā efekta novērtējumu, atbilstoši ES augsnes aizsardzības direktīvu grupas prasībām.

1.3. Promocijas darba uzdevumi

1. Noskaidrot augsnes īpašību izmaiņas atkarībā no dūņu lietošanas intensitātes un tehnoloģijas kārkļu plantācijās.
2. Novērtēt plantāciju augšņu, mēslošanas veida un izvēlēta stādāmā materiāla atbilstību īsirtmeta plantāciju ierīkošanai Latvijā.
3. Pārbaudīt Zviedrijā selekcionēto kārkļu šķirņu piemērotību Latvijas apstākļiem.
4. Izstrādāt notekūdeņu dūņu izmantošanas modeli.
5. Plantāciju kultūru produktivitātes kāpināšanas iespēju un piedāvājamā modeļa ekonomiskais izvērtējums.

1.4. Darba novitāte, zinātniskā un praktiskā nozīmība

Lauksaimniecības ražošanas apjomu samazināšanās rezultātā apmēram 1.5 miljoni ha lauksaimniecības zemju Latvijā vairs neizmanto pārtikas produkcijas ieguvei, tās atstātas novārtā jau gandrīz divdesmit gadus¹.

Promocijas darbā tiek pētītas ātraudzīgo kārkļu sugu un šķirņu plantāciju izveides iespējas Latvijā, ierīkojot plantācijas neizmantotās lauksaimniecības zemēs un rekultivējamās platībās. Pārbaudīta Latvijā dabiskajās audzēs atlasītu un Zviedrijā selekcionētu kārkļu ražība un augšanas gaita, modelējot plantāciju ierīkošanu neizmantotā lauksaimniecības zemē, un rekultivējamās platībās. Pētītas iespējas plantāciju ražības kāpināšanai – mēslošanai izmantojot gan augu barošanās vielām bagātu sadzīves nelikvīdu – notekūdeņu dūņas, gan to kompostus, kas pagatavoti no dūņu, kūdras un koksnes pelnu maisījuma.

Plantāciju tipa stādījumu ierīkošana, veicot augsnes ielabošanu ar komunālās saimniecības nelikvīdiem (koksnes pelni, notekūdeņu dūņas un to komposti), ir Latvijā jauns risinājums ne tikai neizmantoto lauksaimniecības zemju, bet arī degradētu platību (karjeri, izstrādātās kūdras atradnes) rekultivācijai, pirms kura ieviešanas praksē nepieciešams veikt šo aktivitāšu ekonomiskā efekta un ietekmes uz vidi novērtējumu.

¹ [http://www.vzd.gov.lv/-/Zemes_sadalijums_pa_nekustama_ipasuma_lietošanas_merku_grupam_\(pec_nekustama_ipasuma_lietošanas_merka\)_un_pa_zemes_lietošanas_veidiem_\(ha\)_uz_01.01.2008._,_forma_K-1,_apmeklets_2008.03.05](http://www.vzd.gov.lv/-/Zemes_sadalijums_pa_nekustama_ipasuma_lietošanas_merku_grupam_(pec_nekustama_ipasuma_lietošanas_merka)_un_pa_zemes_lietošanas_veidiem_(ha)_uz_01.01.2008._,_forma_K-1,_apmeklets_2008.03.05)

1.5. Zinātniskā darba aprobācija

Zinātniskās publikācijas par darba tēmu:

Lazdiņa D., Lazdiņš A., Kariņš Z., Kāposts V. Notekūdeņu dūņu mēslojuma efektivitāte un augsnes ķīmiskā sastāva izmaiņas enerģētiskās koksnes plantācijās. *Mežzinātne*, 2006, 16 (49), 30.-58.lpp.

Лаздиня Д., Лаздиньш А., Мартинсоне К., Кариньш З., Капостс, В., Лиєпа И., Хрол Ю., Долацис Я. Соответствие некоторых пород ивовы (Salix) и их селекционных клонов для получения энергетической древесины. In: *Annals of Warsaw Agricultural University-SGGW, Forestry and Wood Technology*, 2006, No 59, p. 39-43.

Lazdiņa D. First rotation season in birch, black alder, pine, spruce and willow plantations fertilized with waste water sewage sludge in mineral and peat soils in Latvia. In: *Annals of Warsaw Agricultural University -SGGW, Forestry and Wood Technology*, 2006, No 59, p. 34-38.

Lazdina, D., Lazdins, A., Karins, Z., Kāposts, V. Effect of sewage sludge fertilization in short-rotation willow plantations. In: *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2007, Vol XV., p. 105-111.

Starptautisko konferenču, kongresu, semināru, darba sanāksmju recenzēto referātu pilnu tekstu (Proceedings) izdevumos:

Lazdiņa D., Lazdiņš A., Martinsone K., Kariņš Z., Kāposts V., Liepa I., Hrolis J., Dolacis J. Suitability of Latvia willow species and willow clones selected in Sweden for the establishment of energy wood plantations in Latvia. In: *Proceeding of 5th IUFRO Symposium 'Wood Structure and Properties '06*, Zvolen, Slovakia, 2006, p. 293-298.

Lazdiņa D., Liepa I., Lazdiņš A. Wastewater sewage sludge fertilization effect on soil properties and short rotation tree plantation productivity. In: *Proceedings of International Scientific Conference 'Research for Rural Development'* Jelgava, Latvia, 2007, p. 143-150.

Lazdina D., Lazdins A., Karins Z. Short rotation plantations of fast-growing tree species as source of bioenergy in Europe and Latvia. In: *Proceedings of 6th International Scientific Conference 'Engineering for Rural Development'* Jelgava, Latvija, 2007, p. 90-95.

Lazdina D., Lazdins A., Karins Z., Komorovska A. Waste water sewage sludge usage as fertilizer of short rotation forest plantations. In: *Proceedings of International Scientific Conference 'Rural Development 2007'*, Kaunas, Lithuania, 2007, p. 287-293.

Lazdiņa D. Prospects of short - rotation forestry in Latvia. In: *Proceedings of the 5th UEAA General Assembly and the Associated Workshop*, Riga, Latvia, 2008, p. 123-130.

Lazdiņa D., Lazdiņš A. Organic fertilizers and wood ash impact on growth of energy crops in peat – a laboratory study. In: *Proceedings of International Scientific Conference 'Research for Rural Development'* Jelgava, Latvia, 2008, p.165-174.

Dalība konferencēs:

The 9 th Conference for Young Scientists 'Engineering of Environmental Protection', 30.03.2005. Viļņas Tehniskā universitāte, Lietuva, referāts: *“Effect of sewage sludge fertilization in short rotation willows’ plantations”*.

LLU konference 'Zinātne un inovācijas -Zemgales attīstībai', 17.02.2006. Jelgava, Latvija, stenda referāts: *„Dūņu mēslojuma pielietošanas efekts kārkļu īscirtmeta plantācijās un plantāciju mežos”*

Meža fakultātes zinātniski praktiskā konference 'Mežzinātne un prakse nozares attīstībai' 15.-17.03.2006. Jelgava, Latvija, referāts: *“Dūņu mēslojuma efektivitātes izvērtējums dažādu koku sugu stādījumos”*.

The 9th Conference of Young Scientists 'Science – Future of Lithuania', 29.03.2006. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas, Lithuania, referāts: *“Effect of sewage sludge fertilization in short-rotation willow plantations”*.

5th IUFRO Symposium Wood Structure and Properties' 06 03.-06.09.2006. Sliac –Sielnica, Slovakia, Stenda referāti: *“Suitability of Latvian willow species and willow clones selected in Sweden for the arrangement of energy wood plantations in Latvia”* and *“Wood properties comparison of willows from plantations and alders from native stands”*.

The 10th Conference of Young Scientists Science – Future of Lithuania', 27.- 28.03.2007. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Lithuania, Referāts: *“Effect of waste water sewage sludge fertilization on energy wood plantations on cut away peat lands and mineral soils”*.

4th International conference 'Research and conservation of biological diversity in Baltic region, 25.-27.04.2007. Daugavpils, Latvia, University Institute of Systematic Biology, Stenda referāts: *“Comparison of native Latvia willow species and breded willow clones in short rotation energy plantations”*.

International scientific conference 'Research for Rural Development', 16.-18.2007. Jelgava, Latvia, LLU, referāts: *“Waste water sewage sludge fertilization effect on soil properties and short rotation plantation productivity”*.

6 th International Scientific Conference 'Engineering for Rural Development 2007', 24.-25.06.2007. Jelgava, Latvia, referāts: *“Short rotation plantations of fast-growing tree species as source of bioenergy in Europe and Latvia”*.

The third international scientific conference 'Rural Development 2007', 23.11.2007. Kaunas, Lithuania, referāts: *“Competitiveness of short rotation energy crops on arable lands in Latvia”* un stenda referāts *“Waste water sewage sludge usage as fertilizer of short rotation forest plantations”*.

International Scientific conference 'Research for Rural Development 2008', 21.05.2008. Jelgava, Latvia, referāts: *“Organic Fertilizers and Wood Ash Impact on Growth of Energy Crops in Acid Peat”*.

1.6. Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darba struktūra pakārtota darba pētnieciskajiem uzdevumiem. Darbs sastāv no trīs nodaļām.

Pirmajā nodaļā divās apakšnodaļās apskatīti citu autoru iepriekšējos gados veiktie pētījumi. Pirmā apakšnodaļa veltīta jautājumiem, kas saistīti ar ātraudzīgo koku sugu plantāciju ierīkošanas pieredzi, produktivitāti un mēslošanu citās valstīs. Otrajā apakšnodaļā, pamatojoties uz esošajiem resursiem (īkģadējais deponētais notekūdeņu dūņu un pelnu apjoms), tiesisko vidi un pieejamajiem atbalsta mehānismiem, analizētas īscirtmeta plantāciju ierīkošanas perspektīvas Latvijā. Nodaļas beigās secinājumu veidā formulētas galvenās citu autoru pētījumos gūtās atziņas un situācijas raksturojums Latvijā.

Otrajā nodaļā raksturots pētījumā izmantotais stādmateriāls un mēslošanas līdzekļi, aprakstīta stādījumu ierīkošanas, uzmērtjumu veikšanas, ķīmisko analīžu un datu statistiskās apstrādes metodika.

Trešajā nodaļā analizēti iegūtie rezultāti. Izpildot pētījuma darba uzdevumus, iegūtie rezultāti secīgi atspoguļoti piecās apakšnodaļās. Pirmajā apakšnodaļā aprakstītas augsnes īpašības pirms plantācijas ierīkošanas, bet otrajā apakšnodaļā analizētas augsnes īpašību izmaiņas mēslošanas un kaļķošanas ietekmē. Trešajā apakšnodaļā analizēta kārkļu produktivitāte dažādos augšanas apstākļos, un plantāciju ierīkošanas ietekme uz vidi, izmantojot sadzīves notekūdeņu dūņu, to kompostu un pelnu mēslojumu. Ceturtajā nodaļā tiek piedāvāts notekūdeņu dūņu izmantošanas modelis, savukārt piektajā apakšnodaļā dots tā ekonomiskais vērtējums.

Promocijas darba apjoms 123 lapaspuses; informācija apkopota 68 tabulās un 57 attēlos; izmantoti 163 literatūras avoti. Darba noslēgumā formulēti 5 secinājumi un 8 ieteikumi praksei.

2. PĒTĪJUMA MATERIĀLS UN METODIKA

2.1. Pētījuma objektu un stādmateriāla raksturojums

Izmēģinājuma objekti izvietoti nelielā attālumā viens no otra, klimatiskie apstākļi, gaisa temperatūra, nokrišņu daudzums, vēja ātrums visos objektos ir līdzīgi. Pētījumi veikti izmēģinājuma stādījumos, kas ierīkoti Rīgas rajonā, Jaunolaines (Olaines kokaudzētava un Vīrši) un Mārupes pagastos, dažādos edafiskos apstākļos, no 2004. līdz 2006. gadam. Visi trīs izmēģinājumi atrodas Viduslatvijas zemienes Tīreļu līdzenumā 4...5 km no Rīgas pilsētas robežas D virzienā, attālums starp objektiem ir 5...8 km (2.1. att). Platības ir līdzenas, bez izteiktām mikroreljefa formām. Augstums virs jūras līmeņa ir dažī metri. Platības savstarpēji atšķiras pēc augšņu fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām, kā arī hidroloģiskā režīma.



2.1. att. Izmēģinājuma objektu izvietojums, aerofoto no www.googleearth.com

Fig. 2.1. Location of research objects - aerofoto from www.googleearth.com

Pētījumā izmantotas Zviedrijās selekcionētas kārkļu šķirnes. Šķirne *Tora* (CPVO Nr. EU0627) iegūta krustojot Sibīrijas, jeb tā saukto Šverina, un klūdziņu kārkļa šķirni *Orm* (*Salix schwerinii* x *S. viminalis*), tās raksturīga pazīme ir gari dzinumi, kuru skaits ir mazāks, nekā citām šķirnēm, kā arī trausla, viegli šķeldojama koksne. No Zviedrijā pieejamajām šķirnēm *Torai* ir vislielākā ražība, šķirne ir neieņēmīga pret lapu rūsu, tās dzinumus mazāk bojā pangodiņi, retāk apgrauz zaķi un stīrnas. Šķirne *Torhild* (CPVO Nr. EU5286) (*Salix schwerinii* x *S. viminalis*) x *S. viminalis*) ir šķirņu *Tora* un *Orm* krustojums, tikpat produktīva kā *Tora*, bet raksturojas ar augstāku izturību pret lapu rūsu. Šķirne *Sven* (CPVO Nr. EU5285) (*Salix viminalis* x (*S. schwerinii* x *S. viminalis*)) iegūta, krustojot šķirnes *Jorunn* un *Bjorn*. Šķirnei *Gudrun* (*Salix dasyclados*), raksturīga augsta salcietība un teicama apsākšanās, bet šīs šķirnes stādījumi biežāk cieš no zaķiem un stīrnām. No LVMI *Silava* iepriekšējos gados ierīkotajiem vietējo kārkļu sugu stādījumiem izmēģinājumam izvēlēta ātraudzīgākā suga ar salīdzinoši mazāko dzinumu skaitu *Salix burjatica*.

Olaines kokaudzētavā (turpmāk tekstā Olaines izmēģinājums) salīdzināta dažādu kārkļu šķirņu ražība, izmantojot sadzīves notekūdeņu dūņu mēslojumu, un pētītas augsnes īpašību izmaiņas. Augsne ir smilšmāls un platība ilgstoši kultivēta.

2004. gadā marta beigās ierīkotajā izmēģinājumā pārbaudīta trīs Zviedrijā par perspektīvākajām atzīto un ražošanai ieteikto kārkļu šķirņu *Tora*, *Torhild* un *Sven* piemērotība Latvijas apstākļiem sadzīves notekūdeņu dūņu mēslojuma kontekstā. Kopējais iestādīto spraudņu skaits ir 14 040, tajā skaitā, šķirnes *Tora* – 4 800 spraudņi, *Sven* – 4 320 un *Torhild* – 3 840 spraudņi. Izmantots dubultrindu stādījums – rindas platums 70 cm, spraudņi stādīti pa pāriem 50 cm attālumā viens

no otra, bet attālums starp dubultrindām ir 150 cm. Dūņu mēslojums $10 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$ rindstarpās iestrādāts 2005. gada martā jau pēc stādījuma ierīkošanas. 2006. gadā aprīļa sākumā, lai salīdzinātu Zviedrijā selekcionētās kārklu šķirnes (*Tora*, *Torhild*, *Sven*, *Gudrun*, *Smithensis*) un vietējo villainzaru kārklu, iestādīti 16 759 spraudeņi, tai skaitā, *S. burjatica* - 1 600 spraudeņi, *Tora* – 5 500 spraudeņi, *Torhild* – 4 600 spraudeņi, *Sven* – 4 600 spraudeņi, *Smithensis* – 430 un *Gudrun* – 29 spraudeņi. Platība mēsloja 2007. gada maijā, dūņu mēslojums $10 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$ iestrādāts rindstarpās.

Izmēģinājuma objektos Mārupē un Viršos pētīta dažādu mēslojuma veidu ietekme uz kūdras un minerālaugšņu fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām un kārklu plantāciju ieaugšanos un ražību.

Mārupes izmēģinājuma objektā smilts augsnē 2005. gada aprīlī stādīta šķirne *Sven*. Pirms izmēģinājuma ierīkošanas, daļā platības vienmērīgi izklidēts un iestrādāts sadzīves notekūdeņu dūņu mēslojums $10 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$. Kontroles daļā veikta vienlaidus augsnes apstrāde. Kopā iestādīti 2 400 šķirnes *Sven* spraudeņi.

Izmēģinājuma stādījums Viršos ierīkots izstrādātā kūdras atradnē ar biezu kūdras slāni. Pēc kūdras izstrādes platībā saglabājušies grāvji, kas to sadala šauros taisnstūrveida laukos, stādījumi ierīkoti 10 m attālumā no grāvja malas, lai mazinātu grāvja efektu. Platībā stādīta kārklu šķirne *Sven*. Šajā platībā izmantoti divi mēslojuma veidi – sadzīves notekūdeņu dūņas $10 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$ un $3.5 t \text{ ha}^{-1}$ minerālmēsli NPK (10-10-20). Kārklu stādījums ierīkots dubultrindās, kopumā iestādot 2 080 šķirnes *Sven* spraudeņus.

Lai modelētu dažādu notekūdeņu dūņu kompostu un koksnes pelnu devu ietekmi uz kūdras ķīmiskajām īpašībām, tajā skaitā, smago metālu izskalošanās intensitāti un kārklu spraudeņu apsākņošanas, pielietojot maksimāli pieļaujamās pelnu un notekūdeņu dūņu devas, ierīkots izmēģinājums veģetācijas traukos. Komposta, pelnu un kūdras maisījuma pagatavošanai 2006. gada maijā izmantota kūdra no izmēģinājuma objekta Virši un ierīkots veģetācijas trauku izmēģinājums. Pagatavoti 7 dažāda veida substrāti, kas atšķīrās pēc komposta un pelnu piedevas proporcijām. Kontrolei izmantoja kūdras substrātu no izmēģinājuma objekta Virši kontroles paltības bez piedevām. Komposta piedeva kūdrai dažādos variantos atbilda $170 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$ (1:4) un $340 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$ (1:1). Pētījuma izmantotās kompostu devas izmanto teritoriju rekultivācijā augsnes auglīgā slāņa atjaunošanai. Koksnes pelnu deva atbilda $10 t \text{ ha}^{-1}$ un $20 t \text{ ha}^{-1}$. Eksperimentā izmantoja 15...20 cm garus kārklu spraudeņus, ko stādīja 25 cm dziļos veģetācijas traukos ar 3 l substrāta. Katrā veģetācijas traukā stādīja 4 spraudeņus. Kopumā eksperimentā izmantoja 168 veģetācijas traukus un iestādīja 672 spraudeņus.

2.2. Mēslošanas izmēģinājumu varianti un plantāciju uzturēšana

Kārķļu izmēģinājuma stādījumi, kuri ierīkoti 2004. un 2006. gadā Olaines kokaudzētavas teritorijā, stādīšanas gadā netika mēsloti. Pirmajā sezonā stādījumos veica rindstarpu rušināšanu un nezāļu apravēšanu ar rokām. Veģētācijas sezonas beigās - 2004. un 2006. gada novembrī - dzinumus nogrieza, lai sekmētu spēcīgākas sakņu sistēmas veidošanos un atvieglotu mēslojuma ienešanu augsnē nākošajā sezonā. Mēslojuma deva $10 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$ ienesta nākoša gada pavasarī pēc sniega segas nokušanas. Mēslojumu izkliedēja ar horizontālo mēsļu ārdītāju ROU-6 (ietilpība 6 t). Pēc izkliedēšanas mēslojumu iestrādāja augsnē, veicot rindstarpu kultivēšanu.

Olaines kokaudzētavā ierīkotajā izmēģinājumā mēslošana sekmēja ne tikai kārķļu dzinumu augšanu, bet arī nezāļu sazēšanu, kārķļiem veidojās gari un spēcīgi dzinumi, kas spēja konkurēt ar nezālēm, tāpēc nebija nepieciešami papildus kopšanas pasākumi. Lielāko nezāļu izpļaušana tika veikta tikai plantācijas malējās rindās.

Pirms stādījuma ierīkošanas Mārupes izmēģinājuma objektā, veikta visas platības aršana, lai likvidētu apaugumu. Pēc uzaršanas daļā platības ar mēsļu ārdītāju tika izkliedētas sadzīves notekūdeņu dūņas (deva $10 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$), pēc dūņu izkliedēšanas platību kultivēja, iestrādājot mēslojumu augsnē. Mārupes izmēģinājuma objektā minerālaugsnē nezāles sāka strauji dīgt tūlīt pēc 2006. gada jūnija lietavām. Tiklīdz to atļāva laika apstākļi, Mārupes plantācija tika ravēta ar rokām, apravējot kārķļu rindas 40 cm platumā.

Izmēģinājumu objektā Viršos biezais kūdras slānis apgrūtināja smagās lauksaimniecības tehnikas izmantošanu. Veicot augsnes analīzes, konstatēts, ka kūdras pH_{KCl} bija 2.5...3. Lai novērtētu dažādu mēslošanas līdzekļu ietekmi tik skābā augsnē, parauglaukumu sadalīja. Vienā daļā izmantoja dūņu mēslojumu, bet otrā - ekvivalentu daudzumu (pēc fosfora) fizioloģiski bāziska fosfora un kālija minerālmēslojuma. Sezonas sākumā, 2005. gadā, dūņu iestrāde augsnē nebija iespējama, tāpēc tika pieņemts lēmums dūņas izkliedēt virsmēslojumā. Maijs bija nokrišņiem bagāts, bet tiklīdz augsne bija pietiekoši izžuvusi, lai tehnika varētu pārvietoties pa kūdras lauku, tika veikta dūņu izkliedēšana ar mēsļu ārdītāju. Mēslojuma izkliedēšana notika 2005. gada jūlijā, izkliedējot maksimālo atļauto notekūdeņu dūņu devu $10 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$. Minerālmēslojumu izkliedēja vienlaicīgi ar dūņu mēslojumu. Minerālmēslojuma izkliedēšana ar tehniku nebija iespējama nesakārtotās ceļu infrastruktūras dēļ, tāpēc to veica ar rokām, starp dubultrindā stādītajiem spraudņiem

Pirmajā sezonā pēc mēslojuma izkliedēšanas un stādījuma ierīkošanas, nenotika strauja nezāļu sazēšana. Tikai otrajā sezonā radās nepieciešamība apkarot nezāles, kas tika darīts ap spraudņiem apravējot nezāles ar rokām (izraujot galvenokārt lielāka auguma nezāles). 2006. gadā daļā kārķļu stādījuma veikta kaļķošana.

Izmēģinājumu objektos izmantoto mēslojumu veids, devas un mēslošanas laiks, kā arī turpmāk grafikos izmantotie kodi dažādu izmēģinājumu objektu apzīmēšanai doti 2.1. tabulā.

2.1. tabula / Table 2.1.

Mēslošanas izmēģinājumu varianti / Variants of fertilization trials

| Objekts, stādīšanas gads/ <i>Planting site, year of planting</i> | Kods/ <i>Code</i> | Izmantotais mēslojums/ <i>Fertilizer</i> | Mēslošanas laiks <i>Date (year, moth) of fertilizer application</i> |
|--|----------------------|---|--|
| Virši, 2005 | VD | notekūdeņu dūņas, 10 t _{sausnas} ha ⁻¹ / <i>wastewater sewage sludge 10 t_{DM} ha⁻¹</i> | 2005 06 |
| | VDD | notekūdeņu dūņas, 10 t _{sausnas} ha ⁻¹ / <i>wastewater sewage sludge 10 t_{DM} ha⁻¹</i> | 2005 06 |
| | | dolomītmilti 10 t ha ⁻¹ / <i>dolomite 10 t ha⁻¹</i> | 2006 05 |
| | VK | kontrole/ <i>control</i> | kontrole/ <i>control</i> |
| | VKD | dolomītmilti 10 t ha ⁻¹ / <i>dolomite 10 t ha⁻¹</i> | 2006 05 |
| | VM | minerālmēsli, 0.5 t N ha ⁻¹ / <i>minerals 0.5 t N ha⁻¹</i> | 2005 05 |
| | VMD | minerālmēsli, 0.5 t N ha ⁻¹ / <i>minerals 0.5 t N ha⁻¹</i> | 2005 06 |
| dolomītmilti 10 t ha ⁻¹ / <i>dolomite 10 t ha⁻¹</i> | | 2006 05 | |
| Mārupe, 2005 | MD | notekūdeņu dūņas, 10 t _{sausnas} ha ⁻¹ / <i>wastewater sewage sludge 10 t_{DM} ha⁻¹</i> | 2005 05 |
| | MK | kontrole/ <i>control</i> | kontrole/ <i>control</i> |
| Olaine, 2004 | OD ₂₀₀₄ | notekūdeņu dūņas, 10 t _{sausnas} ha ⁻¹ / <i>wastewater sewage sludge 10 t_{DM} ha⁻¹</i> | 2005 04 |
| Olaine, 2006 | OD ₂₀₀₆ | notekūdeņu dūņas, 10 t _{sausnas} ha ⁻¹ / <i>wastewater sewage sludge 10 t_{DM} ha⁻¹</i> | 2007 04 |

2.3. Kokaugu biomasas noteikšanas metodika

Lai novērtētu notekūdeņu dūņu efektu, 2005., 2006., 2007. gada veģetācijas sezonas beigās veikti uzmērījumi atbilstoši 2001.02.27 Ministru kabineta noteikumu Nr.90 "Mežaudzes novērtēšanas kārtība" prasībām.

Izmēģinājuma objektos uzskaitīts un uzmērīts:

- izdzīvojušo stādīņu skaits;
- kociņu augstums;
- caurmēru pie sakņu kakla un krūšu augstumā.

Apkopojot uzmērījumu rezultātus, aprēķināta stādu ieaugšanās procentos, vidējais kārkļu dzinumu skaits cerā, faktiskais biežums, vidējais augstums, caurmērs pie sakņu kakla, viena dzinuma tilpums, kārkļu biomasa un tās pieaugums.

Dzinumu tilpums cm^3 noteikts, aprēķinot katra dzinuma tilpumu ar nošķelta konusa tilpuma formulu:

$$V = \frac{1}{3} * \pi * H * (R_1^2 + R_1 * R_2 + R_2^2); \quad (1)$$

kur:

R_1 -galotnes rādiuss, cm;

R_2 -caurmēra pie sakņu kakla rādiuss, cm;

H-dzinuma augstums, cm.

Uzmērot trīsgadīgus un divgadīgus kārkļu dzinumus 2004. gadā ierīkotā kārkļu plantācijā, veikta caurmēra uzmērīšana pie dzinuma pamatnes un krūšu augstumā 25 m^2 laukumā visām šajā pētījumā izmantotajām šķirnēm. Trīsgadīgo un divgadīgo kārkļu dzinumu krājas aprēķins 2007. gadā veikts pēc nošķelta konusa formulas (1), un izmantojot uzmērījumu datus krūšu augstumā (2), vēlāk summējot visu dzinumu tilpumu (m^3ha^{-1}).

$$V = \frac{1}{3} * \pi * H * \left(\frac{H^2 * D^2 - 2 * H * D * B * C + B^2 * C^2}{4 * (H^2 - 2 * H * B + B^2)} + \frac{H * D * C - B * C^2}{4 * (H - B)} + \frac{C^2}{4} \right) \quad (2)$$

kur: D - caurmērs krūšu augstumā, cm;

C - tievgaļa caurmērs, cm;

B - krūšu augstums (130 cm);

H - augstums, cm.

Kārkļu dzinumu biomasa aprēķināta, izmantojot pārreķina koeficientus no krājas (1. un 2. formula). Uz lauka noteikta dabiski mitru dzinumu masa ar lapām un bezlapu stāvoklī (30 dzinumi). Laboratorijā kārkļu dzinumi un lapas izžāvēti līdz nemainīgai masai 105 °C temperatūrā. Izmantojot laboratorijā iegūtos datus, veikti aprēķini par koksnes un lapu biomasu. Empīriski iegūts regresijas vienādojums ar kura palīdzību, izmantojot trīsgadīgu un vecāku kārkļu dzinumu caurmēru krūšu augstumā, aprēķināma to biomasa.

Veģetācijas traukos ierīkotā izmēģinājuma laikā kārkļu dzinumu augstums mērīts ik pēc 2 nedēļām. Pētījuma ietvaros veikts kārkļu sakņu biomasas attīstības monitorings veģetācijas izmēģinājumos, ar divu nedēļu intervālu, no katra veģetācijas izmēģinājuma varianta 12 kārkļu spraudņiem, nosakot dzinumu un sakņu masu.

Substrātu no saknēm atdalīja skalojot, pēc tā noskalošanas saknes nogrieza no spraudņa. Dzinumus un saknes žāvēja termostatā 105 °C līdz nemainīgai masai. Pēc tam sakņu un dzinumu masu noteica ar analītiskajiem svariem. Veģetācijas sezonas beigās sakņu un dzinumu masa tika noteikta visiem atlikušajiem kārkļu spraudņiem.

2.4. Ķīmisko analīžu metodes

Augsnes paraugi analīzēm ievākti ar zondi 0...20 cm, 20...40 cm, 40...60 cm un 60...80 cm dziļumā veģetācijas sezonas sākumā un beigās, atbilstoši LVS ISO 11464:2005 standarta prasībām.

Kārķļu dzinumumu analīzēm parauga sagatavošanai ņemts pa vienam vidēja izmēra dzinumam no katra nogrieztā cera (kopā 5 dzinumi katrā paraugā). Pēc tam dzinumi sagriezti 5...10 cm garos nogriežņos, izžāvēti līdz nemainīgai masai un sasmalcināti augsnes dzirnāvās. Augu materiāla ķīmiskās īpašības (N, P, K, un smago metālu daudzums) noteiktas kārķļu koksnes paraugiem, kas ievākti objektā Mārupe 2006. gadā. Bet 2007. gada oktobrī Olainē un Mārupē, pēc aktīvās augšanas fāzes izbeigšanās ievāktajiem koksnes paraugiem, aprēķināts to zemākais sadegšanas siltums, noteikts C, S saturs. Analīžu rezultāti pārrēķināti uz masas vienībām. Koksnes un augsnes analīzes veiktas LVMI *Silava*.

Vides reakcija (pH_{KCl}) noteikta atbilstoši LVS ISO 10390 standarta prasībām.

Kopējā oglekļa daudzums noteikts atbilstoši LVS ISO 10694 standarta prasībām. Kopējā sēra daudzums noteikts ar CS-500 Carbon/Sulfur Determinator – sēra elementār-analizatoru, izmantojot iekārtas ražotāja ieteikto metodiku. Kopējā slāpekļa noteikšanai izmantota modificēta Kjeldāla metode, selēna vietā kā katalizatoru izmantojot titāna oksīdu, atbilstoši LVS ISO 11261 standarta prasībām

Apmaiņas slāpekļlis amonija formā noteikts kolorimetriski ar Neslera reaģentu, 0.1 n NaCl izvilkumā. Apmaiņas fosfāti noteikti kolorimetriski 0.2 n HCl izvilkumā ar amonija molibdatu reducētāja (0.1% SnCl_2 šķīdums) klātbūtnē. Apmaiņas kālija savienojumi noteikti ar liesmas fotometru Perkin Elmer AAnalyst 200 1n CH_3COONa izvilkumā (Pāvule 1978).

Kompleksometriskā kalcija un magnija savienojumu noteikšana veikta 1 n NaCl izvilkumā ar titrēšanas metodi indikatoru mureksīda un hromogēnmelnā klātbūtnē (Pāvule 1978).

Smago metālu (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) ekstrakcija no augu materiāla un augsnes veikta atbilstoši LVS ISO 11466 standarta prasībām, bet ķīmiskās analīzes – atbilstoši LVS ISO 11047 standarta prasībām.

2.5. Datu statistiskās apstrādes metodes

Datu statistiskā apstrāde un grafiskais attēlojums veikts izmantojot SPSS, Microsoft Exell, OpenOffice.org Calc un Gretl datorprogrammas. Izmantojot aprakstošās statistikas metodes, aprēķinātas lielākās, mazākas un vidējās vērtības, standartklūda un variācijas rādītāji. Dati savstarpēji salīdzināti, izmantojot T- testu, dispersijas un korelācijas analīzes (Liepa 1974, Arhipova & Bāliņa 2003).

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Notekūdeņu dūņu izmantošana plantācijās

3.1.1. Augsnes īpašības pirms un pēc mēslošanas

Pirms plantācijas mēslošanas ar sadzīves notekūdeņu dūņām augsnes nodrošinājums ar makroelementiem bija nepietiekošs, lai augi spētu strauji augt un veidot lielu biomasu. Ilgstošas saimnieciskas izmantošanas un nepārdomātas minerālmēslojuma lietošanas rezultātā nodrošinājums ar augu barošanās vielām nesabalansēts, augsne pārāk liesa intensīvas augšanas un straujas biomasas veidošanai. Izmēģinājuma objektā Mārupē barības vielu savstarpējās proporcijas augsnē sabalansētas, tomēr nodrošinājums ar barības vielām, nepietiekams, lai varētu notikt strauja ātraudzīgo kārkļu augšana, platībā ieviesušās graudzāles, galvenokārt ciesa. Savukārt, Viršos kūdras augsnē galvenās problēmas, kas rada augu augšanai un attīstībai nelabvēlīgus apstākļus ir augsnes skābums un nepietiekamais nodrošinājums ar fosforu un kāliju (3.1. tabula).

3.1. tabula /Table 3.1.

Augsnes ķīmiskās īpašības pirms kārkļu stādījumu mēslošanas 2005. gadā
Chemical properties of soil before fertilizing of plantations at 2005

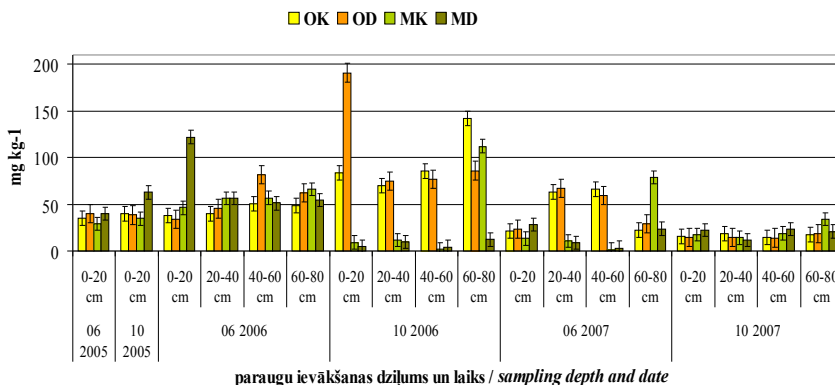
| Makroelementa koncentrācija / <i>Macronutrients concentration</i> | Olaine | Virši | Mārupe | Optimums / <i>Optimal</i> |
|--|------------|-------------|------------|------------------------------|
| N, mg kg ⁻¹ | 35.1 ± 5.0 | 247.2 ± 3.8 | 29.4 ± 0.5 | 80.0...84.0 |
| P, mg kg ⁻¹ | 41.8 ± 6.0 | 0.60 ± 0.1 | 21.4 ± 0.3 | 74.0...77.0 |
| K, mg kg ⁻¹ | 26.0 ± 0.4 | 45.05 ± 6.9 | 23.5 ± 0.4 | 76.9...78.9 |

Visos lauka izmēģinājumu objektos trūkst fosfors un kālijs. Sadzīves notekūdeņu dūņu mēslojums satur, ne tikai organisko vielu un straujai augšanai nepieciešamo slāpekli, bet arī fosforu un kāliju; bioloģiskajās attīrīšanas iekārtās saražoto sadzīves notekūdeņu dūņas satur vidēji 51 g kg⁻¹ N_{kop.}, 17 g kg⁻¹ P_{kop.}, bet 65% no to masas ir organiskā viela. Koksnes pelni var kalpot kā minerālvielu avots, tie ir bagāti ar kāliju (~30 g kg⁻¹), kalciju (125 g kg⁻¹) un magniju (20 g kg⁻¹), kā arī satur fosforu (10 g kg⁻¹). Visvienkāršākais paņēmiens papildus barības vielu ienešanai augsnē ir minerālmēsli izmantošana, jo iespējams precīzi dozēt nepietiekamo barības vielu daudzumu, bet šādā veidā augsnē tiek ienestas tikai minerālvielas, turpretī izmantojot organiskas izcelsmes mēslojumu, augsne tiek bagātināta arī ar trūdu, kam būtiska nozīme augsnes mitruma regulācijā. Izmantojot dažādu kultūru mēslošanai

sadzīves notekūdeņu dūņas un pelnus, tiek nodrošināta augu barošanās vielu atpakaļatgriešana bioloģiskajā apritē.

Pirmajā gadā pēc kārkļu stādījuma ierīkošanas un mēslošanas augsnes paraugi analizēm ievākti no augsnes virskārtas (0...20 cm), bet pēc platības mēslošanas ar dūņām otrajā gadā augsnes analīzes veiktas paraugiem, kas ievākti arī no dziļākajiem slāņiem (20...40 cm; 40...60 cm; 60...80 cm). Augsnes ķīmiskās īpašības analizētas līdz 80 cm dziļumam ne tikai, lai noskaidrotu augiem pieejamo augu barības vielu koncentrāciju augsnē, bet arī, lai novērtētu dažādu elementu patēriņu vai ieskalošanās intensitāti dziļākajos augsnes slāņos. Pirmajā sezonā pēc mēslošanas ar dūņām būtiski mainās nodrošinājums ar galvenajiem augu barošanās elementiem augsnes virsējā slānī ($p < 0.05$).

Salīdzinot *apmaiņas slāpekļa* koncentrāciju augsnes virskārtā un dziļākajos slāņos, konstatēts, ka pirmajā gadā pēc mēslošanas būtiski pieaug ($p = 0 < 0.05$) viegli šķīstošo slāpekļa formu koncentrācija augsnes virskārtā. Tomēr katrā izmēģinājumu objektā slāpekļa dinamika augsnē ir atšķirīga. Olaines izmēģinājumā (minerālaugsnē) ierīkotajos objektos 2006. gada rudenī un 2007. gada pavasarī un 2006. un 2007. gada pavasarī apmaiņas slāpekļa koncentrācija augsnes virskārtā (0-20 cm) mēslotajā platībā lielāka un būtiski atšķiras ($p = 0.001 < 0.05$) no kontroles laukiem (3.1.att.).



3.1. att. Apmāiņas slāpekļa dinamika izmēģinājumu objektu minerālaugsnēs

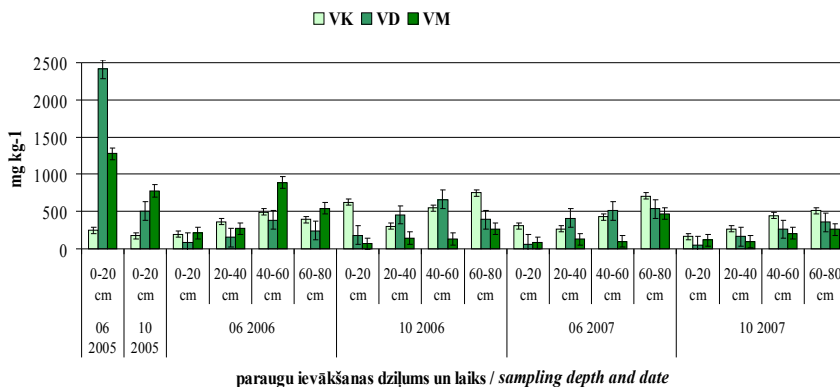
Fig. 3.1. Dynamic of exchangeable nitrogen concentration in mineral soils

Kūdras augsnēm raksturīga lielāka slāpekļa koncentrācija, nekā minerālaugsnēm. Pēc notekūdeņu dūņu mēslojuma izkļiedēšanas virsmēslojumā, apmaiņas slāpekļa koncentrācija kūdras virskārtā strauji pieaug ($p < 0.05$) (3.2. att.). Slāpekļa koncentrācija mēslotajā un nemēslotajā daļa būtiski atšķiras tikai augsnes virskārtā

0...20 cm, bet starp slāpekļa koncentrāciju nemēslotās un mēslotās platības augsnēs 20...80 cm dziļumā tika konstatētas mazāk būtiskas atšķirības. Slāpekļa ieskaļošanās augsnes dziļākajos slāņos ir nenozīmīga. Salīdzinot slāpekļa koncentrāciju dažādos augsnes slāņos, konstatēts, ka izmantojot minerālmēslojumu, būtiskas atšķirības nodrošinājumā ar N parādās līdz otrās sezonas sākumam, bet trešajā veģetācijas sezonā krājumi jau izsmelti un 0...80 cm dziļumā tie pieejami līdzīgā koncentrācijā kontroles un mēslotajā variantā (3.2.att.).

Divus gadus pēc mēslošanas kūdras augsnes nodrošinājums ar apmaiņas barības vielām būtiski atšķiras ($p < 0.05$) ne tikai starp kontroles un mēsloto, bet arī starp abām mēslotajām platībām, atšķirības vērojamas ne tikai augsnes virskārtā, bet līdz pat 80 cm dziļumam.

Trešajā gadā pēc mēslošanas apmaiņas slāpekļa koncentrācija intensīvas sakņu augšanas dziļumā (20...40 cm) ar minerālmēsliem mēslotajā platībā ir mazāka, nekā kontroles un ar dūņām mēslotajās, kas liecina par to, ka ar minerālmēsliem ienestais mēslojums tiek izmantots straujāk. Tomēr trīs gadus pēc mēslošanas nav būtisku atšķirību slāpekļa nodrošinājumā ar minerālmēsliem un notekūdeņu dūņām mēslotajās platībās ($p > 0.05$).

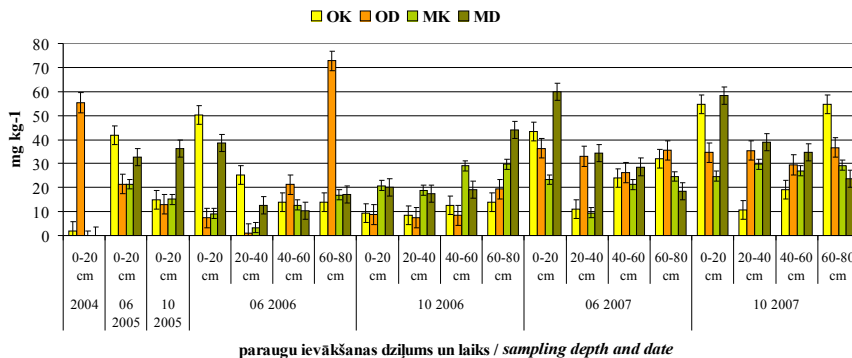


3.2. att. Apmaiņas slāpekļa dinamika izstrādātas atradnes kūdras augsnē

Fig. 3.2 Dynamic of exchangeable nitrogen concentration in peat soil

Mēslotajās platībās slāpekļa koncentrācija augsnē (20...80 cm slānī) ir mazāka nekā kontroles platībā. Tas skaidrojams ar apauguma veidošanos un slāpekļa saistīšanu biomasā, kamēr kontroles platībās apaugums neveidojas, līdz ar to slāpekļa krājumi no augsnes netiek iznesti.

Visos stādījumos tūlīt pēc mēslošanas, fosfora koncentrācija mēsloto platību augsnes virskārtā ir būtiski lielāka nekā nemēslotajā ($p < 0.05$) (3.3.un 3.4. att.).

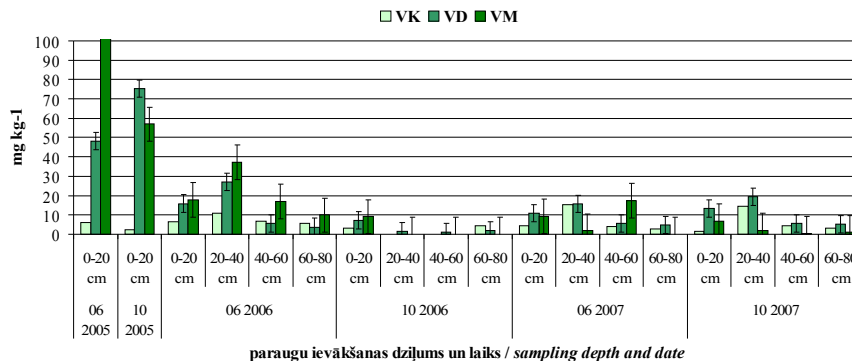


3.3. att. Apmaiņas fosfora dinamika izmēģinājumu objektu minerālaugsnēs

Fig. 3.3. Dynamic of exchangeable phosphorus concentration in mineral soil

Mēslotajā platībā, kur strauji aug kārkļu dzinumi, fosfora rezerves augsnē otrajā gadā, salīdzinot ar kontroles platību, samazinās. Līdz 2007. gadam apmaiņas fosfora krājumi augsnē ir lielāki mēslotajā platībā.

Ar dūņām mēslotajā platībā *Viršu izmēģinājumā* (kūdras augsne) fosfora koncentrācija ir augstāka nekā kontroles platībā. (3.4. att.).



3.4. att. Apmaiņas fosfora dinamika izstrādātas atradnes kūdras augsnē

Fig. 3.4. Dynamic of exchangeable phosphorus concentration in peat soil

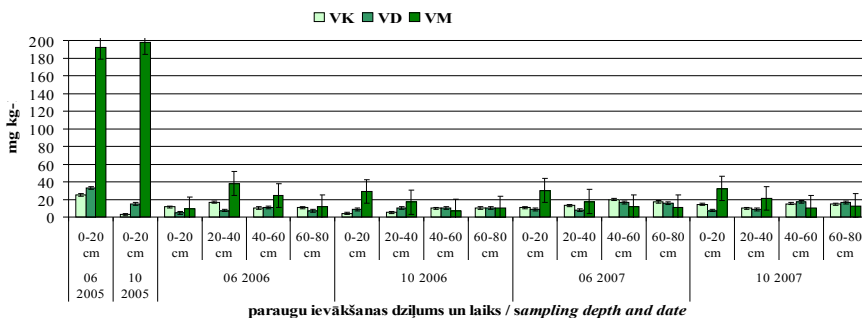
Fosfora nodrošinājumā vērojamas atšķirības, izmantojot minerālmēslus un dūņas. Būtiskas fosfora koncentrācijas atšķirības ($p < 0.05$) kontroles un mēslotajā platībā, izņemot otrās sezonas rudeni, konstatētas līdz 40 cm dziļumam. Dziļāk

fosfora koncentrācijas atšķirība nebūtiska. Fosfora koncentrācija augsnē ir lielāka ar dūņām mēslotajā platībā. Ar minerālmēsliem mēslotajā platībā trešās veģetācijas sezonas beigās fosfora koncentrācija ir salīdzinoši lielāka virskārtā un 40...60 cm dziļumā

Neraugoties uz salīdzinoši nelielo *kālija koncentrāciju* notekūdeņu dūņās, pirmajā sezonā pēc mēslošanas, kālija koncentrācija minerālaugšnes virskārtā mēslotajos laukos ir lielāka, nekā kontroles platībā ($p < 0.05$).

Kūdras augsnē Viršu izmēģinājumu objektā pirmajā gadā pēc mēslošanas *kālija koncentrācija* augsnes virskārtā ar minerālmēsliem mēslotajā platībā ir ievērojami lielāka nekā ar notekūdeņu dūņām mēslotajā (3.5. att.). Ar sadzīves notekūdeņu dūņām mēslotajā izstrādātajā kūdras atradnē kālija koncentrācija augsnē otrajā gadā pēc mēslošanas visos dziļumos lielāka, nekā kontroles variantā, tomēr ievērojami mazāka nekā ar minerālmēsliem mēslotajā platībā. Arī otrajā gadā pēc mēslošanas apmaiņas kālija koncentrācija ar minerālmēsliem mēslotajā platībā augsnes virskārtā ir būtiski ($p < 0.05$) lielāka nekā kontroles un ar notekūdeņu dūņām mēslotajās platībās (3.5. att.).

Arī trešajā gadā pēc mēslošanas ar minerālmēsliem mēslotajā platībā kālija koncentrācija ir lielāka nekā ar dūņām mēslotajā platībā.



3.5. att. Apmāiņas kālija dinamika izstrādātas atradnes kūdras augsnē

Fig. 3.5. *Dynamic of exchangeable potassium concentration in peat soil*

Ar dūņām mēslotajā platībā augsnes dziļākajos slāņos (40-80 cm) kālija ir vairāk nekā virskārtā, elementa koncentrācijas samazināšanos augsnes virskārtā var skaidrot gan ar tā ieskalošanos augsnē, gan akumulāciju augu biomasā.

Tātad, notekūdeņu dūņu mēslojuma efekts augu nodrošinājumam ar N un P saglabājas vismaz trīs - četrus gadus, bet K – tikai vienu gadu, kas skaidrojams ar salīdzinoši mazāku kālija saturu dūņu masā.

Barības elementu koncentrāciju izmaiņu būtiskums (p -vērtības) apkopotas tabulā, ar sarkanu krāsu izceltas p vērtības, kas lielākas nekā kontrole (3.2. tabula).

**P-vērtību atšķirības apmaiņas barības vielu koncentrācijai izmēģinājuma
objektos mēslotajās un kontroles platībās /
P-values of exchangeable macronutrients in different soil depth in fertilized and
non fertilized plots**

| Elements, datums/ Element, date | Olaine, minerālaugsne <i>Olaine, mineralsoil</i> | | | | Virši, kūdras augsne <i>Virši, acid peat soil</i> | | | | Mārupe, minerālaugsne <i>Mārupe, mineralsoil</i> | | | |
|---------------------------------------|---|-------------|-------------|-------------|--|-------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | 0-20 cm | 20-40 cm | 40-60 cm | 60-80 cm | 0-20 cm | 20-40 cm | 40-60 cm | 60-80 cm | 0-20 cm | 20-40 cm | 40-60 cm | 60-80 cm |
| N, 06 2005 | 0.00 | - | - | - | 0.00 | - | - | - | 0.00 | - | - | - |
| N, 10 2005 | 0.09 | - | - | - | 0.00 | - | - | - | 0.00 | - | - | - |
| N, 06 2006 | 0.31 | 0.20 | 0.01 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 0.01 | 0.00 | 0.98 | 0.28 | 0.09 |
| N, 10 2006 | 0.00 | 0.54 | 0.29 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.00 |
| N, 06 2007 | 0.11 | 0.29 | 0.11 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 |
| N, 10 2007 | 0.68 | 0.19 | 0.06 | 0.49 | 0.11 | 0.03 | 0.02 | 0.19 | 0.36 | 0.38 | 0.07 | 0.22 |
| P, 06 2005 | 0.00 | - | - | - | 0.00 | - | - | - | 0.00 | - | - | - |
| P, 10 2005 | 0.00 | - | - | - | 0.00 | - | - | - | 0.00 | - | - | - |
| P, 06 2006 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.37 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.97 |
| P, 10 2006 | 0.58 | 0.25 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.75 | 0.41 | 0.01 | 0.01 |
| P, 06 2007 | 0.04 | 0.00 | 0.19 | 0.34 | 0.00 | 1.00 | 0.33 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| P, 10 2007 | 0.22 | 0.00 | 0.09 | 0.03 | 0.13 | 0.03 | 0.05 | 0.09 | 0.10 | 0.18 | 0.20 | 0.02 |
| K, 06 2005 | 0.00 | - | - | - | 0.00 | - | - | - | 0.02 | - | - | - |
| K, 10 2005 | 0.00 | - | - | - | 0.00 | - | - | - | 0.00 | - | - | - |
| K, 06 2006 | 0.00 | 0.96 | 0.01 | 0.00 | 0.18 | 0.04 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.80 | 0.01 |
| K, 10 2006 | 0.12 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 0.11 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.09 | 0.01 | 0.80 | 1.00 |
| K, 06 2007 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.86 | 0.15 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| K, 10 2007 | 0.14 | 0.05 | 0.61 | 0.20 | 0.42 | 0.31 | 0.15 | 0.13 | 0.23 | 0.31 | 0.36 | 0.46 |

Pētījumā konstatēts, ka kontroles platībā atšķirības slāpekļa, fosfora un kālija nodrošinājumā dažādos augsnes slāņos mazāk izteiktas, nekā mēslotajā platībā. Trešajā gadā pēc dūņu mēslojuma ienešanas atšķirības kļūst mazāk izteiktas, tas saistīts ar viegli pieejamo barības vielu krājumu samazināšanos to saistīšanas augu biomasā rezultātā, nevis sakarā ar to ieskalošanos augsnes dziļākajos slāņos. Konstatēta tikai fosfora ieskalšanās dziļākajos augsnes slāņos nelielos apjomos, kas var būt saistīta ar viegli šķīstošo fosfātu paaugstinātu saturu dūņās. Fosfora izcelsmes avots sadzīves notekūdeņos ir galvenokārt dažādi mazgāšanas līdzekļi.

Savukārt, fosfora koncentrācija augsnē ar minerālmēsliem mēslotajā platībā dažādos dziļumos atšķiras tikai otrās un trešās sezonas pavasarī. Kālija koncentrācija ir atšķirīga kontroles un mēslotajā variantā līdz 60 cm dziļumam.

Augsnes virskārtas skābums izstrādātajā kūdras atradnē pēc mēslošanas un apstrādes ar dolomītmiltiem, būtiski atšķiras tikai ar minerālmēsliem un dūņām mēslotajās platībās ($p < 0.05$). Starp kontroles un ar minerālmēsliem mēsloto platību augsnes skābumu nav būtiskas atšķirības, nedaudz atšķiras virskārtas pH tikai pirmajā gadā pēc kalpošanas, vēlāk efekts zūd (3.3. tabula).

3.3. tabula / Table 3.3.

Augsnes skābuma un Ca, Mg koncentrācijas atšķirību p-vērtības pēc kalpošanas ar dolomītmiltiem /
P-values of pH, Ca and Mg concentration after liming with dolomite

| Mēslojums /Fertilizer | Analīze, paraugu ievākšanas laiks / Analyze, date | | | | | | | |
|--|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | pH _{KCl} | | | | Mg | | Ca | |
| | 06 2006 | 10 2006 | 06 2007 | 10 2007 | 06 2006 | 06 2007 | 06 2006 | 06 2007 |
| Nemēslots/ <i>nonfertilized</i> | 0.09 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| Dūņu mēslojums/ <i>wastewater sewage sludge</i> | 0.76 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.51 | 0.00 |
| Mēslojums ar minerālmēsliem/ <i>minerals</i> | 0.11 | 0.00 | 0.05 | 0.20 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |

Izmēģinājumā ar dolomītmiltiem iegūtie rezultāti liecina, ka arī salīdzinoši lielas šī materiāla virsmēslojuma devas ir nepietiekošas, lai izstrādātās kūdras atradnēs nodrošinātu kārkliem optimālus augšanas apstākļus (pH 5.5 līdz 6.5). Dūņām piemīt augsnes skābumu samazinošas īpašības, kas nav konstatētas minerālmēslojumam. Dūņu mēslojuma neitralizējošās īpašības aprakstītas arī citu autoru pētījumos (Kāposts & Kariņš 1998, Kāposts et al. 2002, Hasselgren 2003, Dimitriou & Aronsson 2005, Komarowski et al. 2005, Vucans et al. 2005).

Somijā un citās valstīs, kā kāliju saturošs mēslojums un augsnes skābumu samazinošs aģents, ar labām sekmēm tiek izmantoti pelni (Hytonen 2003, Leupold 2006, Shen et al. 2008). Izmēģinājumā, kas ierīkots *veģētācijas traukos*, sajaucot dūņu kompostu, kūdru un pelnus, panākts vēlams *kalpošanas* rezultāts. Vislielākais efekts panākts, pievienojot pelnus kūdras un komposta maisījumam, kurā izejmateriālu attiecība pēc tilpuma ir 4:1. Ar pelnu devu, kas ekvivalenta 10 t ha^{-1} substrāts kļūst bāziskāks par 2.4 vienībām, bet pelnu piedeva, kas atbilst 20 t ha^{-1} samazina substrāta skābumu par 2.8 vienībām. Savukārt kūdras un

komposta maisījumam proporcijās 1:1, pelnu pievienošanas rezultātā skābumu izdevās samazināt attiecīgi par 1.4 un 1.9 vienībām. Optimālu substrāta pH iespējams panākt, lietojot pelnu devu 10 t ha^{-1} (substrāta pH_{KCl} veģetācijas sezonas beigās bija 6.5-7.0). Nosakot substrāta pH_{KCl} ik pēc divām nedēļām, konstatēts, ka sezonas laikā substrāta pH_{KCl} svārstības ir nebūtiskas, izņemot substrātiem ar maksimālo pelnu piedevu ($p=0.99>0.05$). Substrātu variantu pH_{KCl} vērtības sezonas beigās atšķiras būtiski.

Veicot korelācijas analīzi barības vielu koncentrācijai substrātā un virszemes un pazemes biomasai, konstatēts, ka starp visiem rādītājiem pastāv statistiski būtiskas sakarības. Fosfora koncentrācija substrātā cieši korelē ar visiem bioloģiskajiem rādītājiem ($r=0.63\dots 0.81$), komposta piedevas daudzums korelē ar dzinumu augstumu un fosfora koncentrāciju substrātā ($r=0.76$), kā arī vides reakciju ($r=0.72$). Pelnu piedeva cieši korelē tikai ar substrāta vides reakciju ($r=0.79$). Dzinumu augšanu garumā veicina augstāka slāpekļa koncentrācija substrātā.

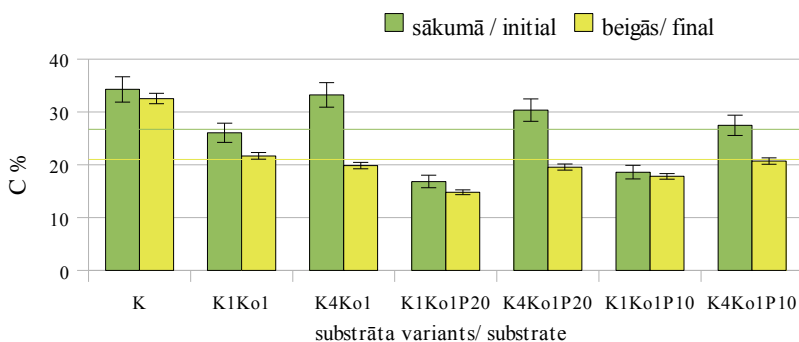
3.1.2. *Plantāciju augsnes un augu biomasas piesārņojums*

Izmēģinājumos izmantotie mēslošanas līdzekļi, pelni un dūņas, satur ne tikai augiem nepieciešamās barības vielas, bet arī smagos metālus lielākā koncentrācijā, nekā tas nepieciešams augu minerālajai barošanai.

Šajā pētījumā konstatētā smago metālu koncentrācija *kārķļu dzinumos*, salīdzinot ar citos literatūras avotos sniegto informāciju, (Máthé-Gáspár et al. 2005, Adlera et al. 2005, Wishniewska et al. 2006) ir neliela. Kaut gan kārķļu koksnei raksturīga spēja saistīt no augsnes kadmiju, promocijas darba ietvaros veiktās analīzes neuzrādīja būtisku kadmija koncentrācijas pieaugumu kārķļu koksne kas iegūta no izmēģinājuma mēslotajā variantā.

Lietojot sadzīves notekūdeņu dūņu mēslojumu, augsnē drīkst ienest smago metālu devas, kas nepārsniedz Ministru kabineta noteikumos (Nr. 804 2005. gada 25. oktobra un Nr. 362 no 2006. gada 2. maija) noteiktās limitējošās vērtības, kas tika ievērots šī darba ietvaros ierīkotajos *lauka izmēģinājumos*. Ar dūņām *mēsloto izmēģinājumu augsnes virskārtā* (0...20 cm) smago metālu koncentrācija nepārsniedz piesardzības robežlielumus, minerālaugsnē 2005. un 2006. gadā nav konstatētas būtiskas izmaiņas smago metālu koncentrācijā. Arī sēra, kurš pārvietojas augsnē kopā ar smagajiem metāliem, saturs dziļākajos minerālaugsnes un kūdras slāņos nepalielinās, norādot uz to, ka smago metālu ieskalos augsnes dziļākajos slāņos izmēģinājumu laikā nav notikusi. Kūdras augsnē vērojama izteiktāka smago metālu koncentrācijas pieauguma tendence, tas saistīts galvenokārt ar organiskās vielas mineralizēšanos augsnes virskārtā un minerālās frakcijas pieaugumu, jo organiskā oglekļa daudzums samazinās tieši kūdras virskārtā, kas liecina par to, ka mēslojums veicinājis bioloģisko organisko vielu noārdīšanās - mineralizēšanās procesu un attiecīgi, arī smago metālu, īpatsvara pieaugumu.

Veģetācijas traukos ierīkotajā eksperimentā summējas ar dūņu kompostu un koksnes pelniem ienesto smago metālu koncentrācija. Eksperimenta beigās smago metālu koncentrācija substrātos ar pelnu un komposta piedevām nedaudz samazinās vai saglabājas sākotnējā stāvoklī, izņemot kārkļu stādījumu ar maksimālo komposta un pelnu devu, kur smago metālu koncentrācija pieaug par 7...24 %, kas, līdzīgi kā lauka izmēģinājumos, saistīts ar organiskās vielas mineralizāciju un pelnvielu satura palielināšanos (3.6. att.). Organiskās vielas daudzums dažādos variantos samazinājies par 4 līdz 40%, salīdzinot ar sākotnējo stāvokli. Šī paša iemesla dēļ smago metālu koncentrācija substrātā palielinājusies līdz 3 reizes arī kontroles variantā.



3.6. att. Oglekļa koncentrācijas izmaiņas substrātā

Fig. 3.6. Concentration of carbon in substrates before and after experiment

Viens no faktoriem, kas visvairāk ietekmēja smago metālu koncentrācijas izmaiņas substrātā, ir organiskās vielas mineralizācija.

3.2. Dažādu kārkļu šķirņu produktivitātes pārbaude

3.2.1. Plantāciju ražība dažādās augsnēs

Visos 2005. gadā izmēģinājumu stādījumos, kuros salīdzināta augsnes veida ietekme uz kārkļu augšanu, izmantoja šķirni *Sven*, kas pirmajā gadā uzrādīja labākos augšanas rādītājus.

Salīdzinot vienāda vecuma kārkļu dzinumu morfoloģiskos rādītājus 2006. un 2007. gada beigās (3.4. tabula), redzams, ka skābas augsnes ar biezu kūdras slāni kārkļu audzēšanai nav piemērotas.

**Nemēslotu kārkļu dzinumu morfoloģiskie rādītāji dažādos objektos/
Measurement data of non fertilized shoots of *Salix* on different sites**

| Uzmērījums / Measurement | Augsne / Soil type | \bar{x} | $S_{\bar{x}}$ |
|---|-----------------------------|-----------|---------------|
| 2006. gads – divgadīgi / 2006 biennial sprouts | | | |
| Caurmērs pie pamata, mm / Sprout base diameter, mm | minerālaugsne / mineralsoil | 9.27 | 0.08 |
| | kūdra / peat | 3.23 | 0.14 |
| Augstums, cm / Height, cm | minerālaugsne / mineralsoil | 165.32 | 4.19 |
| | kūdra / peat | 23.38 | 1.16 |
| 2007. gads – trīsgadīgi / 2007 triennial sprouts | | | |
| Caurmērs pie pamata, mm / Sprout base diameter, mm | minerālaugsne / mineralsoil | 10.92 | 0.30 |
| | kūdra / peat | 4.86 | 0.38 |
| Augstums, cm / Height, cm | minerālaugsne / mineralsoil | 246.02 | 0.06 |
| | kūdra / peat | 35.23 | 1.62 |

Minerālaugsnēs ierīkotajos izmēģinājumos nav būtisku atšķirību ($p=0.95>0.05$) starp dažādiem kārkļu dzinumu augšanas rādītājiem, bet atšķirības starp minerālaugsnē un kūdrā izaugušo kārkļu dzinumu garumiem un caurmēriem būtiskas ($p<0.05$).

3.2.2. *Dūņu mēslojuma ietekme uz kārkļu produktivitāti*

Pirmajā augšanas gadā *minerālaugsnē* notekūdeņu dūņu mēslojuma ietekmē kārkļu dzinumi auguši ātrāk, veidojuši vairāk un resnākus dzinumus nekā kontrole, tomēr atšķirības nav būtiskas ($p>0.05$) (3.5. tabula).

Atšķirības starp mēslojamiem un nemēslojamiem dzinumiem izmēģinājuma objektā *minerālaugsnē* konstatētas tikai otrajā sezonā, kad būtiski atšķiras dzinumu diametrs ($p<0.05$), bet dzinumu garuma atšķirības vēl ir statistiski nebūtiskas ($p=0.41>0.05$). Trīsgadīgiem dzinumiem 2007. gadā būtiski atšķiras gan dzinumu garums, gan caurmērs (3.5. tabula).

Izmēģinājumos konstatēts, ka kūdras augsnē notekūdeņu dūņu virsmēslojums neatstāj pozitīvu ietekmi uz kārkļu spraudeņu apsākšanās un dzinumumu attīstību.

3.5. tabula/ Table 3.5.

**Kārkļu dzinumumu morfoloģiskie rādītāji mēslošanā un kontroles platībā /
Growth parameters of *Salix* in control and under wastewater sludge fertilization**

| Rādītājs / <i>Measurement</i> | Mēslojums / <i>Fertilizer</i> | \bar{x} | S_x |
|--|--|-----------|-------|
| 2005. gads – viengadīgi / <i>2005 annual sprouts</i> | | | |
| Caurmērs pie pamata, mm / <i>Sprout base diameter, mm</i> | kontrolē / <i>control</i> | 5.19 | 0.15 |
| | notekūdeņu dūņas / <i>wastewater sewage sludge</i> | 5.06 | 0.08 |
| Augstums, dm / <i>Height, cm</i> | kontrolē / <i>control</i> | 62.34 | 2.39 |
| | notekūdeņu dūņas / <i>wastewater sewage sludge</i> | 63.39 | 1.38 |
| 2006. gads – divgadīgi / <i>2006 biennial sprouts</i> | | | |
| Caurmērs pie pamata, mm / <i>Sprout base diameter, mm</i> | kontrolē / <i>control</i> | 9.27 | 0.8 |
| | notekūdeņu dūņas / <i>wastewater sewage sludge</i> | 10.59 | 0.09 |
| Augstums, dm / <i>Height, cm</i> | kontrolē / <i>control</i> | 165.32 | 4.19 |
| | notekūdeņu dūņas / <i>wastewater sewage sludge</i> | 161.98 | 1.63 |
| 2007. gads – trīsgadīgi / <i>2007 triennial sprouts</i> | | | |
| Caurmērs pie pamata, mm / <i>Sprout base diameter, mm</i> | kontrolē / <i>control</i> | 10.92 | 0.30 |
| | notekūdeņu dūņas / <i>wastewater sewage sludge</i> | 12.26 | 0.15 |
| Augstums, cm / <i>Height, cm</i> | kontrolē / <i>control</i> | 246.02 | 0.06 |
| | notekūdeņu dūņas / <i>wastewater sewage sludge</i> | 266.81 | 1.25 |

Galvenais iemesls kārkļu bojāejai kūdras augsnēs ir tas, ka kārkli iekalst un tiek sala izcilāti, bet vēlāk sāk iedarboties kūdras augsnes zemā pH reakcija. Kūdras augsnē 2005. ierīkotais un 2006. gadā atjaunotais kārkļu stādījums ieaudzis vāji veidotās biomasas atšķirtības starp mēslojamiem un nemēslojamiem dzinumumiem nebūtiskas ($p > 0.05$). Tāpēc *veģetācijas traukos* ierīkotajā eksperimentā tika modelēta situācija, kad mēslojumu iestrādā augsnē. Šajā izmēģinājumā konstatēts, ka visos substrātos, izņemot kontroli spraudeņiem veidojas spēcīgi dzinumumi un apsākšanās notiek labi.

Izstrādātajā kūdras augsnē ierīkotā stādījumā mēslotie kārkļu dzinumumi ir sīki – būtiski mazāki, nekā minerālaugsnē stādītie ($p < 0.05$) (3.6. tabula). *Minerālaugsnē* ierīkotajos Mārupes un Olaines mēslotajos izmēģinājumu objektos augušo kārkļu

dzinumu garumu un caurmēru atšķirības ir statistiski būtiskas tikai divgadīgiem dzinumiem 2006. gadā ($p < 0.05$). Bet 2007. gadā statistiski būtiskas atšķirības netika konstatētas ($p = 0.43 > 0.05$) (3.6. tabula).

3.6. tabula / Table 3.6.

**Ar notekūdeņu dūņām mēsloju kārķu dzinumu morfoloģiskie rādītāji /
Measurement data of fertilizer Salix sprouts on different growth conditions**

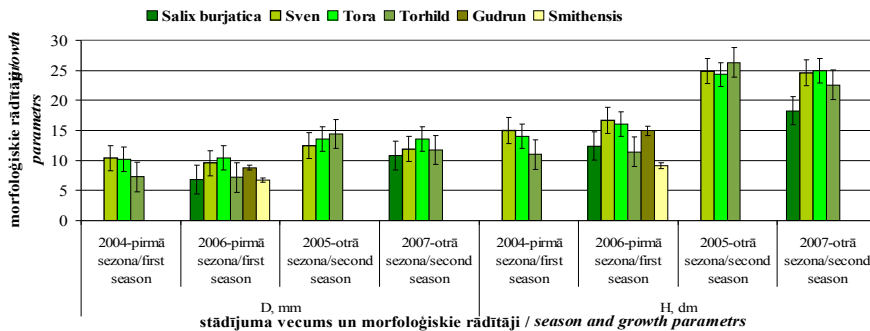
| Rādītājs / Measurement | Izmēģinājumu objekts / Object | | \bar{x} | $S_{\bar{x}}$ |
|---|-------------------------------|--------|-----------|---------------|
| 2006. gads – divgadīgi / 2006 biennial sprouts | | | | |
| Caurmērs pie pamata, mm / Sprout base diameter, mm | minerālaugsne / mineralsoil | Olaine | 11.42 | 0.17 |
| | | Mārupe | 10.59 | 0.09 |
| | kūdra / peat | Virši | 3.39 | 1.60 |
| Augstums, cm / Height, cm | minerālaugsne / mineralsoil | Olaine | 236.70 | 17.74 |
| | | Mārupe | 161.98 | 1.63 |
| | kūdra / peat | Virši | 42.75 | 14.11 |
| 2007. gads – trīsgadīgi / 2007 triennial sprouts | | | | |
| Caurmērs pie pamata, mm / Sprout base diameter, mm | minerālaugsne / mineralsoil | Olaine | 15.43 | 2.50 |
| | | Mārupe | 12.26 | 0.15 |
| | kūdra / peat | Virši | 4.86 | 0.38 |
| Augstums, cm / Height, cm | minerālaugsne / mineralsoil | Olaine | 276.07 | 3.74 |
| | | Mārupe | 266.81 | 1.25 |
| | kūdra / peat | Virši | 81.63 | 7.89 |

Iegūtie rezultāti liecina, ka dūņu mēslojumu var izmantot vieglu minerālaugšņu bagātināšanai ar trūdvielām, slāpekli, fosforu un citiem augu barošanās elementiem, ierīkojot ātraudzīgo kārķu plantācijas un vienlaicīgi atgriežot dūņās deponētās barības vielas bioloģiskajā apritē.

3.2.3. Kārķu plantāciju produktivitātes dinamiku ietekmējošie faktori

Ne mazāk svarīga nozīme, kā augsnes veidam un barības vielu nodrošinājumam tajā, ir iedzimtībai, tāpēc notiek ātraudzīgu un viegli šķeldojamu kārķu šķirņu izveide, veicot selekcijas darbu. Promocijas darba ietvaros, šķirņu salīdzināšanai uzmērīti divi izmēģinājumu stādījumi, kas Olaines kokaudzētavā ierīkoti 2004. un 2006. gadā.

Šķirne *Sven* pirmajā gadā apsakņojās labāk un auga straujāk, nekā citas šķirnes. Pirmajā un otrajā gadā dažādām šķirnēm viengadīgu dzinumu morfoloģiskie rādītāji būtiski atšķiras ($p < 0.05$) (3.5. att.). Salīdzinot morfoloģiskos rādītājus viengadīgiem dzinumiem pirmajā gadā pēc iestādīšanas, piemēram, (2006. gadā) un otrajā gadā pēc nozāģēšanas ataugušiem (2007. gadā), redzams, ka otrajā gadā kārklū augšanas rādītāji ir labāki, sevišķi strauju ražības kāpinājumu sasniedza šķirne *Torhild*.



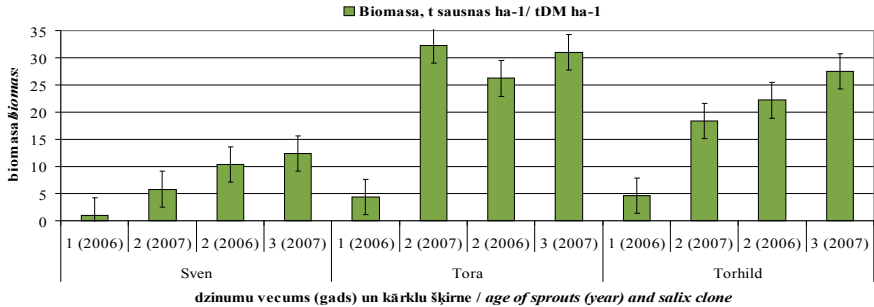
3.7. att. Dažādu kārklū šķirņu viengadīgu dzinumu morfoloģiskie rādītāji pirmajā un otrajā sezonā

Fig. 3.7. Growth parameters of one year old sprouts of different salix clones

Šķirnes *Sven* salīdzinoši labākā augšana pirmajā sezonā rada maldīgu iespaidu par tās potenciālo ražību, jo, kā to novēroja vecākās plantācijās, turpmākajos gados tas strauji atpaliek augšanā un 2-3 gadā *Sven* virszemes biomasas krāja uz smilšainām skābām augsnēm ir aptuveni 2 reizes mazāka, nekā *Tora* un *Torhild* līdzīgos augšanas apstākļos.

Produktivitātes pētījumu veikšanai 2004. gadā ierīkotajā plantācijā, pētīta viengadīgu, divgadīgu un trīsgadīgu dzinumu veidotā krāja dažādām kārklū šķirnēm, kā arī dzinumu ataugšana un produktivitāte, praktizējot 1, 2 un 3 gadu rotācijas ciklu. Konstatēts, ka kārklū augšana visstraujāk notiek otrajā gadā, bet trešajā gadā turpinās dzinumu nobriešana un augšana garumā notiek lēnāk (3.8. att.). Šķirnes *Sven* divgadīgie un trīsgadīgie dzinumi ir mazāki un būtiski atšķiras ($p < 0.05$) no *Toras* un *Tornhild* dzinumiem. Latvijas apstākļos ierīkotajos izmēģinājumos kārklū biomasa viengadīgā plantācijā ir 4...5 $t_{sausnas}$, bet divgadīgā plantācijā 12...30 $t_{sausnas}$ ha^{-1} , tātad pieaugums gadā 6...15 $t_{sausnas}$, kas ir ļoti labs rādītājs.

Olaines izmēģinājumā, vieglā augsnē ar dūņām mēslojiem un barības vielām nodrošinātiem kārklēm, vislabākos augšanas rādītājus 3 gadu rotācijas ciklā uzrādīja šķirne *Tora*. Trešajā gadā samazinās dzinumu skaits, jo tie tiek noēnoti un atmirst sīkākie dzinumi



3.8. att. Kārklū šķirņu ražība

Fig. 3.8. Productivity of salix clones

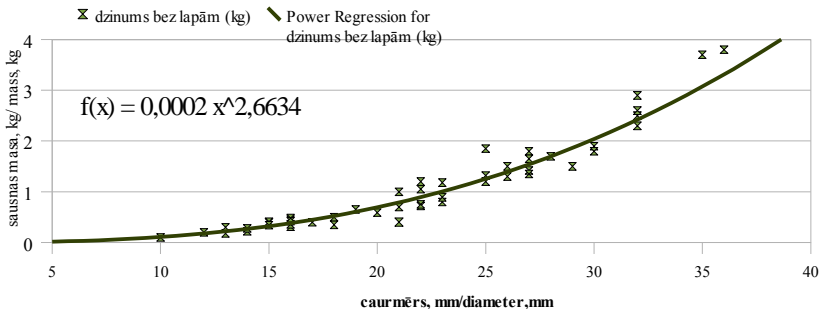
Kārklū šķirņu *Sven*, *Tora* un *Torhild* trīsgadīgiem dzinumiem 2007. gada augustā, pirms veģetācijas sezonas beigām, noteikta dzinumu zaļā masa ar un bez lapām, kā arī - atsevišķi lapu masa. Visām šķirnēm viena dzinuma un lapu masa būtiski neatšķiras, nav būtiskas arī mitruma atšķirības ($p < 0.05$) Sausnas noteikšanai ievāktajiem dzinumiem starp pārējām šķirnēm izceļas *Torhild* caurmērs krūšu augstumā ($p = 0.006 < 0.05$) un pie pamata ($p = 0.003 < 0.05$), kā arī masa ($p = 0.001 < 0.05$). Būtiski atšķiras visu šķirņu dzinumu garumi *Tora* un *Torhild* ($p = 0.007 < 0.05$) (3.7. tabula).

3.7. tabula / Table 3.7.

Dažādu kārklū šķirņu 3 gadīgu dzinumu bioloģiskie rādītāji / Biological parameters of tre-year-old sprouts of different Salix clones

| Šķirne / Clone | DBH, mm | | Garums, m / Height, m | | Masa, kg / Biomass, kg | | Lapu masa, kg / Leaves weight, kg | | Dpam., mm / Dbase, mm | | Relatīvais mitrums % / Moisture % | |
|----------------|-----------|---------------|-----------------------|---------------|------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
| | \bar{x} | $S_{\bar{x}}$ | \bar{x} | $S_{\bar{x}}$ | \bar{x} | $S_{\bar{x}}$ | \bar{x} | $S_{\bar{x}}$ | \bar{x} | $S_{\bar{x}}$ | \bar{x} | $S_{\bar{x}}$ |
| <i>Sven</i> | 19.95 | 1.05 | 5.23 | 0.26 | 0.78 | 0.12 | 0.54 | 0.26 | 25.00 | 1.69 | 49.00 | 1.53 |
| <i>Torhild</i> | 26.69 | 1.80 | 6.11 | 0.33 | 1.81 | 0.28 | 0.46 | 0.05 | 35.19 | 2.05 | 46.67 | 0.88 |
| <i>Tora</i> | 19.69 | 1.42 | 4.78 | 0.22 | 0.75 | 0.13 | 0.22 | 0.03 | 25.50 | 1.71 | 48.67 | 0.67 |
| \bar{x} | 21.98 | 0.92 | 5.37 | 0.17 | 1.09 | 0.12 | 0.41 | 0.10 | 28.35 | 1.22 | 48.11 | 0.66 |

Starp kārkļu dzinumu caurmēru krūšu augstumā (DBH) un biomasu pastāv ciešas sakarības, kas izmantojamas uzmērīšanas procesa atvieglošanai divgadīgiem un trīsgadīgiem kārkļu dzinumiem (3.9. attēls).



3.9. att. Kārkļu dzinumu masas un caurmēra krūšu augstumā sakarības

Fig. 3.9 Interdependence of salix sprouts DBH and biomass

Kārkļu biomasas un krājas aprēķinam izmantojama pakāpes formula, ko izveido, izmantojot nejaušas izvēles rezultātā ievāktu dzinumu uzmērījumus.

3.3. Agrotehniskā specifika, izstrādes tehnoloģijas un notekūdeņu dūņu izmantošanas modeļa ekonomiskais vērtējums

3.3.1. Plantāciju ierīkošana un uzturēšana

Noteicošais faktors veiksmīgai kārkļu plantāciju ierīkošanai, izmantojot spraudņus, ir nezāļu konkurences novēršana pirmajā sezonā, kas visefektīvāk panākama, iepriekšējā gadā veicot dziļaršanu, un turot plantācijai paredzēto platību melnajā papuvē vismaz vienu gadu. Pirms stādījumu ierīkošanas plantācija apstrādājama ar sistēmas iedarbības herbicīdiem, kas paredzēti vārpatas, graudzāļu un divdīgļlapju nezāļu iznīcināšanai. Olaines izmēģinājumā augsnē, kas iepriekšējā gadā tika turēta melnajā papuvē un mēsloja ar dūņām tikai otrajā gadā pēc kārkļu iestādīšanas, nezāļu apkarošanu veica ar frēzi, apstrādājot augsni rindstarpās. Rezultātā šajā izmēģinājumā ieaugums bija 89...95%. Otrajā gadā pēc mēslošanas dzinumi atauga tik strauji, ka pietika ar vienu rindstarpu frēzēšanu, turpmākajos gados kopšanas pasākumi nav jāveic.

Mārupes izmēģinājumā kontroles variantā ieauguši 75% spraudeņu, bet ar dūņām mēslotajā daļā – 71%. Galvenais iemesls spraudeņu bojāejai kontroles variantā ir sausums pirmajā augšanas sezonā, bet mēslotajā variantā – nezāļu konkurence. Otrajā sezonā veikta kultūru kopšana izplaujot zāli.

Viršu izmēģinājumā parcelās, kur izkliedētas dūņas un dolomītmilti, kūdras skābums samazinās, tomēr izstrādātajā kūdras atradnē lielākā daļa kārkļu spraudeņu pēc apsākņošanās un pirmo dzinumu parādīšanās nespēj tālāk augt, dzinumi nokalst un saknes atmirst. Pirmajā gadā kaļķotajās parcelās izmēģinājuma objektā Virši ieaug 71% spraudeņu, bet otrajā gadā saglabājās tikai 15%. Ar minerālmēsliem mēslotajā un kaļķotajā platībā ieauguši tikai 39% spraudeņu, bet 2007. gadā no tiem saglabājas tikai puse. Saglabājušies dzinumi, neraugoties uz mēslošanu, ir tievi un īsi. Otrajā gadā pēc mēslojuma ionešanas sadīgst bērza, apses un priedes un dažādu lakstaugu sēklas. Šie augi rada konkurenci nelielajiem kārkļu dzinumiem, nomācot tos.

Iegūtie rezultāti liecina, ka dūņu mēslojumu var izmantot vieglu minerālaugšņu bagātināšanai ar trūdvielām, slāpekli, fosforu un citiem augu barošanās elementiem, ierīkojot ātraudzīgo kārkļu plantācijas, vienlaicīgi atgriežot dūņās deponētās barības vielas bioloģiskajā apritē.

Kārkļu plantācijas pirmajos gados prasa lielākus kapitālieguldījumus un intensīvāku kopšanu, toties pirmo produkciju un ienākumus var gūt jau 3. līdz 5. gadā pēc plantācijas ierīkošanas.

3.3.2. Ierīkošanas, agrotehniskās kopšanas un uzturēšanas izmaksas

Aprēķini veikti atbilstoši lauksaimniecības pakalpojumu cenām 2007. gadā, pieņemot, ka visa ierīkošanai nepieciešamā tehnika tiks nomāta un mazkvalificētos darbos strādājošie laukstrādnieki saņems vidējo darba algu, kāda tā bija Pierīgas reģionā 2007. gada beigās.

Atkarībā no īpašnieka rīcībā esošas tehnikas un platības aizzēluma, viena ha kārkļu plantācijas ierīkošana, neskaitot mēslojuma izmaksas, svārstās robežās no 698 līdz 1152 LVL ha⁻¹. Stipri aizzēlušās platībās jāreķinās ar papildus izdevumiem ~ 60 LVL ha⁻¹, citādi stādījuma ieaugšanas var būt apdraudēta un uz platības sagatavošanu iekonomētie līdzekļi neattaisnosies, jo, neieaugot stādījumam, zaudējumos ieskaitāmi ne tikai 529...762 LVL par stādījuma ierīkošanu, bet arī pirmajā gadā platības aršanai iztērētie 134...233 LVL, kopumā zaudējumi ap 1000 LVL ha⁻¹.

Ar sagatavošanas darbiem pirms kārkļu plantāciju ierīkošanas saistītās izmaksas un tieši ar ierīkošanu un apsaimniekošanu saistītās izmaksas dotas 3.8. tabulā.

**Plantācijas ierīkošanas un apsaimniekošanas izmaksas /
Costs of plantation establishment and management**

| Gads / Year | Veicamais pasākums / Activity | Izmaksas LVL1 ha ⁻¹ no – līdz / Interval of costs | |
|--|---|---|------|
| 1. gads / first year | - sagatavošana izmantotā lauksaimniecības zemē kopā / Soil preparation on cropland (total) | 75 | 127 |
| | - ja sagatavošana neizmantotā lauksaimniecības zemē stipri aizzēlušā platībā ir jāveic papildus pasākumi / soil preparation on abandonen grass-covered agricultural | 59 | 125 |
| | sagatavošana neizmantotā lauks. zemē kopā / Soil preparation (total) | 134 | 233 |
| 2. gads / second year | Stādmateriāla sagāde 12 - 15000/ha, (0,03 Ls gab.) kultivēšana, apstrāde ar herbicīdiem (smidzināšana + herbicīds) atkārtota kultivēšana (ja platība aizzēlusī - daudz nezāļu) pievelšana, platības marķēšana, stādīšana, ravēšana, rindstarpu pļaušana, dzinumu pļaušana (krūmgriezis, pļaujmašīna)/ Planting material, soil treatment, herbicides, tillage, rolling down, designation, planting, weed management, grass cutting, first harvest etc. | | |
| | kopā / total | 529 | 762 |
| 3. gads / third year | mēslojuma izkliešana; rindstarpu frēzēšana; rindstarpu pļaušana / Spreading of fertilizer, milling between rows, grass cutting between rows | | |
| | kopā / total | 24 | 72 |
| 4.-5. gads / fourth - fifth year | oktobris – marts / October -March dzinumu pļaušana + šķeldošana = (pašgājējs+savācējpiekabe) / Harvesting+chipping = harvester + container | 70 | 85 |
| 1. aprīte kopā (LVL) / First rotation | | 698 | 1152 |

3.3.3. Izstrādes izmaksas

Promocijas darba izmēģinājuma objektos izstrāde, izmantojot roku darba spēku, veikta 2004., 2005. un 2006. gadā ierīkotajās plantācijās, bet pašgājēju smalcinātāju - 2004. gada ierīkotajā plantācijā. Kārkli zāgēti ar krūmgriežiem un savākti ar rokām, veidojot nelielas kaudzītes, kuras pēc tam ar pievedējtraktoru tika novestas lauka malā. Pēc apzāvēšanas kārkli sašķeldoti ar mobilo šķeldotāju ar rokas padevi.

Lielās plantācijās izstrādi veic ar pašgājējiem smalcinātājiem, kas vienlaicīgi nopļauj un sasmalcina kārķļu dzinumus. Salīdzinot ar mobilo šķeldotāju iegūto šķeldu kvalitāti ar pašgājēja smalcinātāja sagatavotajām kārķļu šķeldām, promocijas darba izmēģinājuma objektā ar pašgājēju smalcinātāju iegūtajās šķeldās ir lielāks sīko daļiņu frakcijas īpatsvars. Sadegšanas siltums Olaines izmēģinājumā iegūtajām šķeldām ir 18.89...18.93 MJ/kg.

Kopējās izmaksas 1 ber.m³ nopļaušanai, savākšanai, pievešanai (vidēji 300 m), sašķeldošanai ar mobilo šķeldotāju un piegādei uz patēriņa vietu (vidēji 50 km) ir 4.68 LVL (3.9. tabula).

3.9. tabula / Table 3.9

**Enerģētiskās koksnes sagatavošanas izmaksas/
Costs of energy wood production**

| Oerācija/ <i>Operation</i> | Izstrāde / <i>Harvesting</i> | Savākšana / <i>Collection</i> | Šķeldošana/ <i>Chhiping</i> | Pievešana/ <i>Supplaying</i> | Transports/ <i>Transport</i> | Kopā/ <i>Total</i> |
|--|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Izmaksas, LVL gadā ⁻¹ / <i>Costs LVL Yearly</i> | | | | | | |
| Investīcijas/ <i>Investments</i> | 116 | - | 54 693 | 23 673 | 16 326 | 94 808 |
| Atalgojums/ <i>Salaries</i> | 11 180 | 7 985 | 31 747 | 31 747 | 28 747 | 111 407 |
| Darbs/ <i>Operation costs</i> | 1 171 | | 151 832 | 38 464 | 38 539 | 230 006 |
| Kopā/ <i>Total</i> | 12 467 | 7 985 | 238 272 | 93 884 | 83 613 | 436 221 |
| Darba produktivitāte/ <i>Productivity</i> | | | | | | |
| ber.m ³ E _{0-h} ⁻¹ | 5.24 | 5.64 | 50.00 | 38.44 | 26.25 | - |
| ber.m ³ gadā | 10 947 | 12 176 | 178 600 | 137 305 | 96 401 | - |
| Rezultāts / <i>Result</i> | | | | | | |
| LVL m ³ ber. ⁻¹ | 1.14 | 0.66 | 1.33 | 0.68 | 0.87 | 4.68 |

Salīdzinot ar jaunaudzū kopšanā iegūtajiem datiem (Lazdiņš et al. 2007), laika patēriņš enerģētiskās koksnes plantāciju izstrādei ar rokas darba instrumentiem optimālos apstākļos ir 2.5 reizes mazāks. Optimālos darba apstākļos degvielas patēriņš ir 0.17 l ber.m⁻³, salīdzinājumam, jaunaudzū kopšanas izmēģinājumos degvielas patēriņš uz 1 ber.m⁻³ ir 0.3 l. Izstrādes vecumā esošajās plantācijās (2- 3gadi), kurās izmantots selekcionēts stādāmais materiāls, vidējais laika patēriņš 1 ber.m³ nozāģēšanai ir 15...18 minūtes, bet kopā ar savākšanu – 22...28 minūtes.

Pārrēķinot uz 1 ha, laika patēriņš kārkļu nogriešanai un savākšanai ir 68 stundas. CLAAS Jaguar 680 pašgājēja smalcinātāja ar HS-2 hederi ražība līdzīgos darba apstākļos ir 2..3 stundas uz ha⁻¹.

Izteikta korelācija konstatēta starp kopējo krāju, 1 dzinuma nogriešanai patērēto laiku ($r=0.81$) un 1 ha nopļaušanai patērēto laiku ($r=0.79$). Tas liecina, ka pļaušanas ātrums atkarīgs galvenokārt no kopējās krājas un vidējā dzinuma izmēra. Stkkoku savākšanas etapā konstatēta korelācija starp vidējā dzinuma tilpumu un laika patēriņu 1 dzinuma savākšanai ($r=0.72$) – jo lielāki dzinumi, jo vairāk laika aizņem to savākšana.

Kārkļu plantāciju apsaimniekošanai izmanto lauksaimniecības tehniku, pie kam ierīkošanas un kopšanas darbi kalendārajā laika grafikā tikai daļēji pārklājas ar tehnikas noslogojumu tradicionālo lauksaimniecības kultūru audzēšanai.

3.3.4. Potenciālie ienākumu avoti

Kārkļu plantācijās ražo beramo kurināmo (šķeldas), ko vēlāk var pārstrādāt briketēs, granulās vai izmantot tāpat šķeldu veidā. Tomēr šķeldas var izmantot arī kā mulčas materiālu daiļdārzniecībā. Savukārt, kārkļu klūgas var izmantot kāpu un stāvu nogāžu nostiprināšanā, kā arī nožogojumu ierīkošanai.

Otrajā gadā pēc stādījuma ierīkošanas no 1 ha var iegūt stādmateriālu 10...15 tūkst.LVL vērtībā. Izmantojot kārkļu plantācijas enerģētiskās koksnes ieguvei, vidējais biomasas krājas pieaugums gadā ir 8...10 t_{sausnas} (20...25 m³). Vienā aprītē vidēji iegūst 28...30 t_{sausnas} (70...75 m³) optimāli līdz 150 m³.

Rēķinot valsts mērogā, teorētiskais bruto peļņas ieguvums no kārkļu plantāciju ierīkošanas sadzīves notekūdeņu dūņu utilizācijas un enerģētiskās koksnes ieguves šo jautājumu kompleksai risināšanai ir 1 728 111 Ls. Izmantojot kārkļu mēslošanai, notekūdeņu dūņas 10 t_{sausnas} ha⁻¹ reizi 5 gados (2 t_{sausnas} ha⁻¹ gadā) atbilstoši esošajiem dūņu ražošanas apjomiem, gadā iespējams ierīkot 14 589 ha plantāciju, kas ik gadu dotu vidēji 10 t_{sausnas} ha⁻¹ biomasas pieaugumu. Šajās platībās ik gadu varētu saražot 138 596 t_{sausnas} šķeldu gadā, kas pie realizācijas cenas 35 LVL par t_{sausnas}, ir 4 850 843 Ls. Sadedzinot šo kurināmo, iespējams saražot 554 384 MWh enerģijas. Lai apkurinātu privātmāju ar apkurināmo platību 150 m², nepieciešami 3.5 ha kārkļu plantāciju.

4. GALVENIE SECINĀJUMI UN IETEIKUMI

Secinājumi:

1. Plantāciju ierīkošanu Latvijā ierobežo nepilnīgas zināšanas un pieredzes trūkums par :
 - notekūdeņu dūņu ietekmi uz vides kvalitāti;
 - piemērotākajām kārkļu šķirnēm;
 - plantāciju ierīkošanas un apsaimniekošanas tehnoloģijām.
2. Dūņu mēslojuma efekts:
 - minerālaugsnēs tiek ienesta papildus organiskā viela, kā arī būtiski papildināti minerālās barošanās elementu (N, P, Ca un Mg) krājumi un uzlabots augsnes hidroloģiskais režīms;
 - kūdras augsnēs būtiski papildinātas fosfora rezerves, kas sekmē vietējo koku sugu pašsēju un dabīgo apmežošanu; strauju zemeszemes veidošanu
 - tiek nodrošināta augstas produktivitātes un rentablu īscirtmeta plantāciju apsaimniekošana;
 - mēslojuma izmantošana nepasliktina vides kvalitāti (būtiski nemainās smago metālu daudzums un nenotiek minerālo barošanās vielu infiltrēšanās dziļākajos augsnes slāņos).
3. Notekūdeņu dūņām ir salīdzinoši neliels kaļķošanas efekts. Dūņu mēslošanas efektivitāti paaugstina koksnes pelnu un dolomītmiltu piedeva. Šīs piedevas samazina augsnes skābumu un ir minerālās barošanās elementu papildus avots. Izmantojot dolomītmiltus kūdras augšņu neutralizēšanai, deva 10 t ha^{-1} nodrošināja pH izmaiņas par 0.6...1.2 vienībām. Būtiskas pH izmaiņas konstatētas tikai dažus centimetrus biežā augsnes virskārtas slānī. Izmantojot kūdras neutralizēšanai līdzvērtīgu devu koksnes pelnus, substrāta neutralizēšanas efektu iespējams panākt ātrāk.
4. Noskaidroti sekojoši produktivitātes rādītāji - kārkļu plantācijas 3 gadu rotācijas ciklā šķirnes *Tora* un *Torhild*, kas promocijas darbā atzītas par piemērotākajām Latvijas apstākļiem, iespējams iegūt 28...31 t_{sausnas} ;
5. Promocijas darba atziņu praktiskai izmantošanai izstrādāts īscirtmeta plantāciju ierīkošanas un apsaimniekošanas modelis, kā arī veikts tā ekonomiskais izvērtējums.

Ieteikumi:

1. Pieņemot lēmumu par plantācijas ierīkošanu, jāveic: augsnes un iespējamo risku izpēte; jānosaka optimālais mēslojuma veids, deva un iestrādes paņēmieni; jāizvēlas atbilstošākais stādmateriāls; jānoskaidro dūņu un pelnu piegādes nosacījumi, tanī skaitā transportēšanas un iestrādes izmaksas un produkcijas realizācijas iespējas.
2. Ieteicamās dūņu mēslojuma devas:
 - minerālaugsnēs izmantojamā deva $10 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$ ar iestrādi augsnē reizi 5 gados;
 - kūdras augsnēs virsmēslojumā lietojami dūņu – koksnes pelnu komposti $20 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$.
3. Pirms kārkļu plantācijas ierīkošanas lauksaimniecības augsnes turamas melnajā papuvē vienu gadu. Mēslojums ienesams otrajā sezonā, to iestrādājot rindstarpās. Atkārtotu mēslošanu veic katra rotācijas cikla (2...4 gadi) beigās pēc kārkļu dzinumu novākšanas.
4. Kārkli nav piemēroti audzēšanai skābās kūdras augsnēs ar biezu kūdras slāni.
5. Kārkļu plantāciju ierīkošanā noteicoša nozīme platības sagatavošanai. Kārkļu plantācijas ierīkošanas izmaksas ir 698...1 152 LVL.
6. Tālākai pavairošanai un plantāciju ierīkošanai Latvijā izmantojamas ražīgākās šķirnes *Tora* un *Torhild*. Produktīvākajās plantācijās vēlams samazināt rotācijas ciklu no 3 uz 2 gadiem. Būtisks ir ne tikai mēslojuma, bet arī šķirnes efekts, piemēram, nemēslošanās kārkļu plantācijas trīsgadīgu dzinumu un mēslošanās plantācijas šķirnes Sven divgadīgo dzinumu krājas līdzīgas $9...11 t_{\text{sausnas}} \text{ ha}^{-1}$.
7. Nelielu plantāciju izstrādei lietojami rokas darba instrumenti. Kārkļu plantācijas izstrāde ar rokas darba instrumentiem izmaksā 4.68 LVL par kubikmetru. Selekcionētu kārkļu plantācijas darba ražīgums ievērojami augstāks, tomēr, ja nolemts audzēt kārkļus rūpnieciskos apjomos, iegādājamas iekārtas, kas paredzētas kārkļu pļaušanai un montējamas uz pašgājējiem smalcinātājiem, kurus izmanto lauksaimniecības kultūru biomasas novākšanai vai mežizstrādē.
8. Potenciālie ienākumi otrajā gadā veidojas no jauno dzinumu pārdošanas stādmateriālam jaunu plantāciju ierīkošanai un apzaļumošanas darbiem (0.08 LVL vica). Sākot ar trešo gadu pēc plantācijas ierīkošanas, vienā rotācijas ciklā iegūstami vismaz $150 \text{ ber} \cdot \text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ koksnes, kas atbilstoši 2007. gada cenām ir 900 LVL.

1. GENERAL DESCRIPTION

1.1. Topicality of the theme

An interest about the production of renewable energy from different source including wood is growing among the world countries. Topical issues become not only production of solid biofuel, but also utilization of organic wastes, including wastewater sludge. The aim of the studies summarized in this dissertation is to solve both of these problems simultaneously by using of the wastewater sludge as a fertilizer in short rotation willow plantations thus increasing a productivity of the plantations. Opportunities to increase efficiency of the sludge fertilizer combining with wood ash and other liming materials are studied in this work.

An interest about willow plantations is increased in several European countries during the last 5-8 years. It is promoted by several factors, but the most important are increase of consumption of renewable energy resources, which raised prices of the resources, introduction of modern wastewater treatment technologies and escalation of the issues related to management to biodegradable organic waste in relation to the greenhouse gas (further in text GHG) emissions (Piebalgs 2008).

The rate of sequestration of carbon dioxide in biomass can be increase by expanding forest of cover and by increasing of productivity of the already existing forest. Establishment of plantations of the fast-growing trees and shrubs met both of these conditions. Establishment of willow plantations takes place generally in Britain, Sweden, Ireland and Poland, the interest about these crops is growing in Latvia, Lithuania, Estonia, Greece and other countries (Forest Service 2005, Ericsson et al. 2006, Komarowski et al. 2005, Wisniewska et al. 2006). British and Danish investors are interested in the opportunities of establishment of plantations of fast-growing trees in Latvia.

Different species and hybrids of osier (*Salicaceae*) family willow (*Salix*) and aspen (*Populus*) genus are dominating in energy wood plantations in the Northern Europe. Decision for those species is determined by fast growing, easy regeneration and tolerance to different climatic conditions. Especially popular are those species of willow genus, which can be utilized in different ways (depending from market conditions) and which have characteristics improving growing environment, including soil (Weih & Nordh 2002, Everts-Bunders 2005, Weih 2004, Tuck et al. 2006). Willow breeds used in the plantations produces significant biomass, sequestering at the same time atmospheric CO₂ and releasing oxygen into atmosphere. Willow plantations avoid overgrowing of agricultural lands with invaluable shrubs; protect soil against wind and water erosion; due to intense transpiration reduce residual amount of water in soil thus improving water regime and soil structure. Therefore willow plantations are used not only to produce biomass for incineration, but also to utilize and to treat household and agricultural wastewater using bio-filtration technology (Saarsalmi 1995, Hasselgren 2003, Mangalis 2004, Smaliukas & Noreika 2005, McCormick & Kåberger 2007).

Increasing of welfare rate and improvement of wastewater treatment efficiency secures production of increasing amount of considerably good quality, environmentally safe wastewater sludge and the problem of utilization of this material becomes more and more topical. The wastewater sludge, which contains different plant nutrients, can be utilized to improve growing conditions before establishment of plantations as well as to increase growing rate of existing short rotation plantations. Local heating systems, which utilize different kinds of energy wood, produce alkaline ash, which is rich with potassium and other elements and can be used in the intensively managed forests, recultivated peat quarries as well as in agricultural soils as a fertilizer and liming material (Jones et al. 1994, Uebel & Heinsdorf 1997, Dilly 1999, Hytonen 1998, Kāposts et al. 2002, Komarowski et al. 2005, Schreffler & Sharpe 2003, Jacobs et al. 2005, Huotari et al. 2007, Gemste & Vucāns 2007).

Abandoned agricultural lands represents suitable area for establishment of plantations of annual and perennial energy crops (willows, aspen, grey alder and other fast growing tree species) (Hytonen 1995, Tahvanainen & Rytönen 1999, Heinso et al. 2002). In spite of intensification of agricultural production and broad discussions about risk of shortage of food supplies due to increase of area used for the energy crops, huge areas of agricultural lands in Latvia as well as in other East European countries aren't used at all and low quality forest stands and shrubs comes to those areas instead.

One of the opportunities to utilize of these lands is establishment of short rotation plantation forests, which brings opportunity to start harvesting when it is the most profitable with no respect to regulations dictating ordinary forest management, or to return the land to agricultural production, if it becomes economically beneficial or necessary due to other factors. Establishment of fast growing and productive energy wood plantations, using wastewater sludge and wood ash as a fertilizer provide a solution, how to use abandoned areas rationally at this moment, implementing at the same time requirements of the United Nations Framework Convention on Climate Change and Kyoto Protocol (to reduce greenhouse gas emissions in the industrially developed countries by 5,2 % until 2012 in compare to 1990) and not excluding opportunity to change land use in future (Weih 2004, Hytonen & Wall 2006). Composts produced from wastewater sludge and wood ash can be used as a surface fertilizer, which simplifies significantly and reduces costs of spreading of the fertilizers (Aronsson & Perttu 2001, Weih & Nordh 2002, Hasselgren 2003, Hytonen 2003, Komarowski et al. 2005).

Current conditions in Latvia promote increasing use of energy wood and establishment as well as utilization of the short rotation plantations (Piebalgs 2008), at the same time reducing risk of supplies of energy wood and providing favourable options to utilize wastewater sludge and wood ash (Gemste & Vucāns 2007).

1.2. Aim of the thesis

To elaborate ecologically and economically grounded model for utilization of the wastewater sludge in the short rotation willow plantations by estimation of productivity of the plantations in different soils and under different growing conditions, by evaluation of environmental effects of the sludge applications, by providing of solutions for environmentally safe utilization of the sludge and by estimation of economical effect of applications of this fertilizer, according to the requirements of the EC Directives on soil protection.

1.3. Research objectives

1. To estimate changes of soil properties depending from intensity of the sludge applications and plantation management technology.
2. To evaluate suitability of different soils, fertilizer applications and planting material for establishment of the short rotation plantations in Latvian conditions.
3. To check suitability of Swedish willow planting material to the Latvian conditions.
4. To elaborate a wastewater utilization model.
5. To evaluate possibilities to increase productivity of the short rotation plantations and to provide economical evaluation of the proposed model.

1.4. Practical significance and scientific novelty

As a result of decrease of agricultural production approximately 1,5 mill. ha of agricultural lands in Latvia aren't used anymore for food production. Instead they are left aside for nearly 20 years.

Opportunities of establishment of the willow plantations and plantations of the fast growing tree species on abandoned agricultural lands in Latvia is evaluated in this dissertation. Productivity and growing possibilities of different natural willow clones and commercial willow breeds are tested in this study, developing models for establishment of the plantations on agricultural lands and disturbed areas. Opportunities to improve productivity of the plantations are studied using nutrient rich waste materials, like wastewater sludge as well as composts produced from sludge, peat and wood ash.

Establishment of plantation type stands using different waste materials (wood ash, wastewater sludge and composted biomass) as fertilizers is new solution for Latvia not only in relation to utilization of abandoned agricultural lands, but also in relation to recultivation of degraded areas (gravel and peat quarries), which have to be tested using economical and environmental criteria before broaden industrial scale implementation.

1.5. Approbation of research results

The research results have been presented in nine international and two national conferences.

Seven articles have been published in proceedings of international conferences and three articles have been published in international scientific journals. One article has been published in national scientific journal.

1.6. Structure and coverage of thesis

The structure of the dissertation is subordinated to the research objectives. The thesis consists of three parts.

The first chapter consists of literature review of results obtained by other researchers during previous years. The first sub-chapter devoted to evaluation of experience of establishment of plantations of fast growing tree species in other countries. A second sub-chapter is devoted to analysis of perspectives of the short rotation plantations in Latvia on the basis of availability of fertilizers (yearly amount of produced wastewater sludge and wood ash), regulatory requirements and locally available support schemes. In the end of the first chapter of the thesis the most important findings and characterization of situation is added in form of conclusions.

A second chapter contains information about planting material, fertilizers, structure of experiments, measurement and analytical methodologies as well as statistical methods used in data evaluation.

A third chapter is devoted for results of the study. The results are explained accordingly to the research objectives in five sub-chapters. Properties of soil prior to establishment of plantations is described in the first sub-chapter, but a second sub-chapter contains analysis of changes of soil properties after fertilization and liming. A productivity of willow plantations in different growing conditions, as well as environmental effects of the sludge, wood ash and compost applications are evaluated in a third sub-chapter. A fourth sub-chapter provides a model for utilization of the wastewater sludge and a fifth sub-chapter – to economical evaluation of this model.

This thesis contains 123 pages; information is summarized in 68 tables and 54 figures; 163 literature references are used. At the end of the thesis 5 conclusions and 8 recommendations are formulated.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Characterization of research objects and planting material

Research objects are located rather close, therefore climatic conditions like temperature, amount of precipitations and wind speed, are similar in the all objects. The studies were implemented in experimental plantations located in Rīgas district Jaunolaines (Olaine

nursery and Virši objects) and Mārupes parishes (object Mārupe) in different growing conditions. The plantations were established from 2004 to 2006. Geographically all experiments are located in Viduslatvijas lowland's Tīreļu plain 4...5 km from the Riga city border in S direction, distance between the objects is 5...8 km (Fig. 2.1.).

All objects are plain, without significant micro-relief forms. Elevation above sea level is only few meters. The objects differs by chemical and physical properties of soil and water regime.

Clones of willows originated in Sweden were used in the experiment. Variety *Tora* (CPVO Nr. EU0627) bred by crossing Sybirian or so called Schverin willow and previously produced Common Osier clone *Orm* (*Salix schwerinii* x *S. viminalis*), characteristic properties of this clone are limited in number in compare to other clones, but long shoots, as well as crunchy, easy to crush wood. In compare to other Swedish commercial clones *Tora* is the most productive, it doesn't suffer from smut, shoots usually have less gall midge damages, they also suffer less from hares and roes. Variety *Torhild* (CPVO Nr. EU5286) (*Salix schwerinii* x *S. viminalis*) x *S. viminalis*) is crossing of *Tora* and *Orm*. It is equally productive in compare to *Tora*, but it is more tolerant to smut. Variety *Sven* (CPVO Nr. EU5285) (*Salix viminalis* x (*S. schwerinii*. x *S. viminalis*)) bred by crossing previously produced commercial varieties *Jorunn* and *Bjorn*. Variety *Gudrun* (*Salix dasyclados*) characterizes with high frost tolerance and very good development of roots after planting, but this variety suffers more from hares and roes. Additionally, from the previous studies implemented by LSFRI *Silava* with local natural willow species, the most productive specie with comparable smaller number of main shoot, *Salix burjatica*, was selected for this study.

Productivity of different clones, using wastewater sludge as a fertilizer, and changes in soil properties were evaluated in Olaine nursery (further in text, object Olaine). Soil texture in Olaine corresponds to loam, it is cultivated for several decades.

In the experiment, established at the end of March, 2004 suitability of three the most prospective willow varieties in Swedish conditions (*Tora*, *Torhild* and *Sven*) were evaluated according to Latvian conditions, using wastewater sludge as a fertilizer. Total number of planted cuttings is 14 040, including variety *Tora* – 4 800 cuttings, *Sven* – 4 320 and variety *Torhild* – 3 840 cuttings. A common two rows planting scheme with 50 cm distance between cuttings in row and 70 and 150 cm distance between rows is used in the experiment. 10 t_{dry} ha⁻¹ of wastewater sludge were applied in space between rows one year after planting, in March, 2005. In the beginning of April, 2006 additionally planted 16 759 cuttings, including *S. burjatica* – 1 600 cuttings, *Tora* – 5 500 cuttings, *Torhild* – 4 600 cuttings, *Sven* – 4 600 cuttings, *Smithensis* – 430 and *Gudrun* – 29 cuttings. Aim of the experiment – to compare Swedish commercial varieties (*Tora*, *Torhild*, *Sven*, *Gudrun*, *Smithensis*) and local *Salix burjatica*. This area is fertilized in May, 2007, dosage of wastewater sludge – 10 t_{dry} ha⁻¹, application in space between rows.

Effect of different fertilizers on physical and chemical properties of mineral and peat soils, as well as to productivity of plantations were studied in the research objects Mārupe and Virši.

Variety *Sven* was planted in Mārupe in April, 2005. Soil texture class – sandy loam. Prior to establishment of experiment 10 t_{dry} ha⁻¹ of wastewater sludge were spread and ploughed into soil, except control area, where only ploughing took place. 2 400 cuttings of variety *Sven* were planted.

Experimental plantation Virši was established on abandoned peat quarry with thick residual peat layer. The area was divided by contour ditches into narrow rectangles. Willows were planted 10 m from the ditches to reduce effect their on plantations. Only variety *Sven* was used in Virši. Two types of fertilizers were applied – sludge 10 t_{dry} ha⁻¹ and 3.5 t ha⁻¹ mineral fertilizer NPK (10-10-20). Willows were planted in the two row scheme, 2 080 cuttings of *Sven* were planted in total.

Vegetation experiment in partially controlled conditions were established to model effect of different doses of wastewater sludge compost and wood ash on chemical properties of peat, including leaching of heavy metals and intensity of root development under maximal load of compost and wood ash. Peat from Virši was used to prepare mixtures of compost, wood ash and peat. The experiment was started in May, 2006. Seven different by proportion of the ash and compost substrates were prepared for the experiment. Pure peat was used as a control. Admixture of compost in different variants corresponded to 170 t_{dry} ha⁻¹ (1:4) and 340 t_{dry} ha⁻¹ (1:1). Maximal dose can be used according to regulations in recultivation of degraded area to re-establish fertile soil layer. Admixture of wood ash corresponded to 10 t ha⁻¹ and 20 t ha⁻¹. 15...20 cm long cuttings planted in 25 cm deep vegetation pots with 3 l volume of substrate were used in the experiment. Four cuttings were planted into each pot. 672 cuttings were planted into 168 planting pots in total.

2.2. Variants of fertilizer applications and management the plantations

Experimental plantations established in 2004 and 2006 in Olaine initially weren't fertilized. Only loosening of space between rows and manual weeding control were done during the first growing season. At the end of vegetation season, accordingly, November, 2004 and 2006, all plantations were cut down to secure development of stronger root system and to simplify spreading of fertilizer during next season. Fertilizer (10 t_{dry} ha⁻¹ of sludge) applied during next spring after melting of snow cover. The fertilizer was spread using horizontal manure spreader ROU-6 (capacity 6 t). After spreading fertilizer was ploughed into space between rows by cultivation.

Before establishment of plantation in Mārupe, area of the experimental plantation was ploughed completely to remove vegetation. After ploughing wastewater sludge were

applied (dose $10 \text{ t}_{\text{dry}} \text{ ha}^{-1}$), after spreading of sludge area was cultivated to plough fertilizer into soil.

In Virši deep peat layer complicated use of heavy agricultural machinery. Soil analyses showed that pH_{KCl} of peat is 2.5...3. To evaluate effect of different fertilizers on soil the experimental area was divided into parts. In one part wastewater sludge were used, in other – equal amount (by phosphorus) of physiologically alkaline mineral fertilizer containing significant amount of phosphorus and potassium. During a beginning of vegetation season (2005) spreading and ploughing of fertilizers weren't possible, therefore the decision was to use fertilizers later on surface of soil without ploughing.

May, 2005 was rich with rain and as soon as soil was dry enough to use machinery on a peatland wastewater sludge was spread over already planted cuttings using horizontal manure spreader. The spreading took place in July, 2005, using maximal permissible dose of sludge ($10 \text{ t}_{\text{dry}} \text{ ha}^{-1}$). Mineral fertilizer was applied simultaneously with spreading of sludge. Mechanized spreading wasn't possible due to destroyed road infrastructure, therefore it was done manually in space between rows.

Types of fertilizers used in different experiments, doses and time of application as well as codes of further in figures used abbreviations of experiments is shown in Table 2.1.

In Olaine application of fertilizer promoted growth of willows and development of ground vegetation, willow shoots grew long and healthy and could compete with weeds, therefore no additional weed control was necessary during second year. The highest weeds were cut down manually only in side rows.

In peat soil (Virši) during the first vegetation season after planting and spreading of fertilizers, rapid development of ground vegetation took place. But weed control was necessary only during second vegetation period, and it was done manually by pulling out the highest weeds.

In Mārupe in mineral soil weeds started to growth directly after raining period in June, 2006. Manual weed control was done as soon as it was possible after raining period, 40 cm wide track around rows of willows were cleaned from weeds.

2.3. Methodology of estimation of woody biomass

To estimate effect of fertilizers at the end of vegetation seasons of 2005, 2006 and 2007 all plantations were measured accordingly to regulations of Cabinet of Ministers No. 90 (2001.02.27) "Procedure of evaluation of forest stands". Measured and accounted parameters:

- number of survived cuttings;
- height of shoots;
- diameter of shoots at the ground level.

After validation of results, percentage of survival, average number of shoots in a coppice, actual density of planting, average height, average diameter at the ground level, volume of single shoot, stock and increment biomass were calculated.

Volume of shoots estimated in cm³ using equation of volume of truncated cone:

$$V = \frac{1}{3} * \pi * H * (R_1^2 + R_1 * R_2 + R_2^2); \quad (1)$$

where:

R₁ – top radius, cm;

R₂ – radius of shoots at the ground level, cm;

H – height of shoot, cm.

During measurement of two and three years old shoots in plantation established in 2004 diameter of all varieties used in the experiment was measured at the ground level and at breast height (1.3 m) in 25 m² random sample plots. Volume of shoots in 2007 were calculated using the equation of truncated cone (1) and accordingly to diameter at the breast height (2), later all values were summarized to obtain total volume (m³ ha⁻¹).

$$V = \frac{1}{3} \pi * H * \left(\frac{H^2 * D^2 - 2 * H * D * B * C + B^2 * C^2}{4 * (H^2 - 2 * H * B + B^2)} + \frac{H * D * C - B * C^2}{4 * (H - B)} + \frac{C^2}{4} \right) \quad (2)$$

where:

D – diameter at the breast height, cm;

C – top diameter, cm;

B – the breast height (130 cm);

H – height of shoots, cm.

Biomass of willow shoots calculated, using coefficients from the volume equations (1) and (2).

Naturally wet biomass of 30 shoots with and without leaves estimated on the field. In laboratory these shoots and leaves were dried out until unchanging mass at 105 °C temperature. These data were used to estimate dry biomass of leaves and shoots and to elaborate regression equations.

Height of willow shoots in the vegetation pots was measured once per two weeks. Within the scope of the study monitoring of development of root system was done by weighting of roots and shoots of 12 willow cuttings every 2 weeks. Substrate were removed from roots by washing, later roots were cut down from cutting. Roots and shoots were dried at 105 °C until unchanging mass. Dry biomass were weighted using analytical scales. At the end of vegetation season above and underground biomass of all residual willow cuttings were measured.

2.4. Methods of chemical analyses

Soil samples were collected by destructive method using soil auger from 0...20, 20...40, 40...60 and 60...80 cm depth at the beginning and the end of all vegetation seasons accordingly to requirements of LVS ISO 11464:2005 standard. In the first year after establishment of plantations and application of fertilizers samples were collected from topsoil (0...20 cm), but in second year after fertilization samples from deeper horizons (20...40; 40...60 and 60...80 cm) were taken and analysed as well.

Five average willow shoots from from several coppices from all varieties were taken for chemical analyses of biomass. Then these shoots were split into 5...10 cm long cuttings, dried out and crushed into powder using analytical mills. Chemical properties of biomass (N, P, K and concentration of heavy metals) were estimated in samples collected in Mārupe in 2006. A net heat value, total C, S and ash content were estimated additionally in samples collected in Olaine and Mārupe at the end of vegetation period in October, 2007

Results of analyses were recalculated to dry biomass. Analyses of wood and soil were done in LSFRI Silava.

Reaction (pH_{KCl} and $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$) estimated accordingly requirements of LVS ISO 10390 standard. Total carbon estimated accordingly to requirements of LVS ISO 10694 standard. Total sulphur estimated using elemental analyser CS-500 Carbon/Sulfur Determinator and following to recommendations provided by producer of the equipment. Total nitrogen estimated using modified Kjeldahl method using oxide of titan instead of selenium accordingly to requirements of LVS ISO 11261 standard.

Exchangeable ammonia estimated with colorimeter using Nesler reactive in 0.1 n NaCl extraction. Exchangeable phosphorus estimated with colorimeter using ammonia molybdenite reactive in presence of reduction agent (0.1% SnCl_2 solution) in 0.2 n HCl extraction. Exchangeable potassium estimated using flame photometer Perkin Elmer AAnalyst 200 in 1 n sodium acetate extraction (Pāvule 1978).

Exchangeable calcium and magnesium estimated complexometrically in 1 n sodium chloride extraction using titration method in presence of indicators chromogenblack and murexide (Pāvule 1978).

Heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) extracted from plant material and soil accordingly to requirements of LVS ISO 11466 standard and chemical analyses – accordingly to requirements of LVS ISO 11047 standard.

2.5. Methods of statistical evaluation

Statistical evaluation and graphical rendering of obtained data realized using SPSS, Microsoft Exell, OpenOffice.org Calc and Gretl software tools. The highest, the smallest and average values, as well as standard error and measures of variation estimated using methods of describing statistics Relation between different data compared using T- test, variance and correlation analysis (Liepa 1974, Arhipova & Bāliņa 2003).

3. RESULTS

3.1. Utilization of wastewater sludge in the plantations

3.1.1. Soil properties before and after fertilization

Prior to application of fertilizers resources of macro-nutrients in soil of the plantation in Olaine were insufficient for rapid growth of plants and formation of significant biomass.

As a result of long agricultural history of land and heavy applications of mineral fertilizers during the agricultural period concentration of nutrients was dis-balanced, the soil was too poor for fast growing plants and production of significant biomass. In Mārupe nutrients in soil were well-balanced, but resources of macro-nutrients were insufficient for the fast growing willows. There were lot of grasses, generally small-reed. In peat soil in Virši the most significant soil properties related problem was acidic reaction and insufficient resources of potassium and phosphorus (Table 3.1).

Insufficient resources of potassium and phosphorus before fertilization found in all experimental plantations. Wastewater sludge contain organic material, nitrogen, phosphorus and some amount of potassium, which are necessary for rapid growth of energy crops. In average wastewater sludge produced in biological wastewater treatment plant contains $51 \text{ g kg}^{-1} \text{ N}$, $17 \text{ g kg}^{-1} \text{ P}$ and 65% of dry mass consists of organic substances. Wood ash can be used as a source of mineral nutrients, because they contains significant amount of potassium ($\sim 30 \text{ g kg}^{-1}$), calcium (125 g kg^{-1}) and magnesium (20 g kg^{-1}) as well as phosphorus (10 g kg^{-1}). The simplest way how to apply nutrients to soil is to use mineral fertilizers, because it is possible to calculate exact doses of certain nutrients according to soil properties. But only mineral nutrients can be applied in that way, whereas using of organic fertilizers enrich soil with biologically active organics, which have also significant role in regulation of water regime. Utilization of wastewater sludge and wood ash as a fertilizer for different crops secures that nutrients locked in these materials are returned to biological circulation.

Properties of soil estimated down to 80 cm depth not only to calculate resources of nutrients, but also to evaluate biological consumption and leaching into deeper soil layers of different elements.

Resources of the main nutrients change significantly during the first growing season after fertilization. Significant fluctuations of concentration of the chemical elements found in the upper soil layer ($p < 0.05$).

Comparison of concentration of exchangeable nitrogen in topsoil and deeper soil layers one year after fertilization demonstrated, that concentration of exchangeable nitrogen increased significantly in topsoil ($p = 0 < 0.05$), however dynamics of concentration of the nitrogen in different objects is not equal. In experiments established on mineral soil in Olaine in autumn, 2006 and 2007, and in spring of the same years concentration of exchangeable nitrogen in topsoil (0...20 cm) in fertilized area significantly differs from control area ($p = 0 < 0.05$) (Figure 3.1).

Higher concentration of nitrogen found in peat soil. After application of sludge on surface of peatland concentration of exchangeable nitrogen significantly increased ($p < 0.05$) (Figure 3.2). Concentration of nitrogen significantly differs in fertilized and control areas only in topsoil (0...20 cm), but in deeper layers (20...80 cm) no significant differences found in fertilized and control plots. Leaching of nitrogen into deeper soil layers is insignificant. Comparison of nitrogen concentration in different soil layers demonstrated,

that significant differences in provision of this element can be found until beginning of the second vegetation season, but in third vegetation season all reserves are utilized and concentration of nitrogen doesn't differ in 0...80 cm layer in fertilized and control plots, if mineral fertilizer is used (Figure 3.2). Two years after fertilization concentration of exchangeable nutrients in peat soils differs significantly between control and fertilized area and between both fertilized areas ($p < 0.05$), differences found not only in topsoil layer, but also down to 80 cm depth. During the third year after fertilization concentration of exchangeable nitrogen in 20...40 cm deep soil layer is smaller in area treated with mineral fertilizers, which demonstrates more rapid utilization of nutrients applied with mineral fertilizers. But three years after fertilization there are no significant difference in concentration of exchangeable nitrogen in the areas fertilized with sludge and mineral fertilizers ($p > 0.05$).

Concentration of exchangeable nitrogen in fertilized area of mineral soils is smaller under topsoil (20...80 cm soil layer) in fertilized area. It can be explained by more active biological utilization of these resources in fertilized area, whereas development of vegetation in control areas is much slower and nitrogen resources aren't utilized.

In all experiments concentration of exchangeable phosphor in topsoil after fertilization is significantly higher in compare to control plots ($p < 0.05$) (Figure 3.3 and 3.4).

Difference in concentration of exchangeable phosphor between fertilized and control plots reduces during second year after fertilization. In 2007 concentration of exchangeable phosphor is still significantly higher in fertilized plots.

In the area where sludge fertilizer were applied on peat surface (Virši) concentration of phosphor in topsoil is higher in compare to control fields. Concentration of exchangeable phosphor is different in the fields where sludge and mineral fertilizers were applied. Significant difference between control and fertilized areas in concentration of exchangeable phosphor ($p < 0.05$) found down to 40 cm depth. In deeper layers this difference isn't significant. Concentration of exchangeable phosphor is higher in fields fertilized with sludge. In areas treated with mineral fertilizer concentration of exchangeable phosphor in the end of third vegetation period is higher in topsoil and in 40-60 cm depth (Figure 3.4).

In spite of relatively small concentration of potassium in wastewater sludge, amount of exchangeable forms of this element in topsoil of fertilized mineral soils is significantly higher in compare to control areas ($p < 0.05$).

In peat soil in Virši concentration of exchangeable potassium at the end of the first vegetation season is significantly higher in topsoil in areas treated with mineral fertilizer in compare to other variants (Figure 3.5). In peatland areas where sludge is used as a fertilizer in second vegetation period concentration of potassium is higher in all soil layers in compare to control, but the difference isn't so high as in plots, where mineral fertilizer was used. In second year after application of fertilizers concentration of exchangeable potassium in areas treated with mineral fertilizer is significantly higher ($p < 0.05$) than in other areas (Figure 3.5).

In third year after fertilization, too, concentration of exchangeable potassium is significantly higher in peatland areas treated with mineral fertilizer in compare other areas.

In areas fertilized with sludge in deeper soil layers (40...80 cm) concentration of exchangeable potassium is higher, than in topsoil. Reduction of the concentration in topsoil can be explained by leaching of potassium into deeper soil layers, as well as by accumulation in biomass of plants.

Thus, nutritional effect of wastewater sludge (increased concentration of nitrogen and phosphor) persists at least 3...4 years, but concentration of exchangeable potassium returns to the control level after one year, which is associated with relatively small concentration of potassium in wastewater sludge.

It is estimated within the scope of this study, that difference in concentration of exchangeable nitrogen, phosphor and potassium are less significant in control areas in compare to fertilized areas. During third year after fertilization the difference decreases, which is associated with utilization of easily soluble nutrients into plant biomass and not so much – with leaching of those elements into deeper soil layers.

Signs of leaching into deeper soil layers found only in case with phosphor, which can be explained with significant concentration of exchangeable phosphor in wastewater sludge. A source of phosphor in the sludge is different detergents. But concentration of exchangeable phosphor in different soil layers in areas where mineral fertilizers were applied is different only in spring of second and third vegetation period. Concentration of exchangeable potassium is different in fertilized and control areas only down to 60 cm deep soil layer. In Table 3.2 those p values are marked with red colour, where they are higher in fertilized areas.

Acidity of topsoil in peatland doesn't differs significantly after application of dolomite in compare to areas where only sludge or mineral fertilizer is used ($p < 0.05$). No significant difference found between acidity of soil in control area and areas treated with mineral fertilizer, except small difference found in topsoil during the first year after application of fertilizer. In later years this effect disappears (Table 3.3).

Experiments with dolomite applications demonstrates, that even considerably high doses of this liming material if used on surface aren't sufficient to secure proper growing conditions for willows (pH 5.5...6.5) in abandoned peatlands.

Wastewater sludge characterizes with neutralising effect, which wasn't detected for mineral fertilizer. This neutralizing effect of sludge is described in studies of other authors as well (Kāposts & Kariņš 1998, Kāposts et al. 2002, Hasselgren 2003, Dimitriou & Aronsson 2005, Komarowski et al. 2005, Vucans et al. 2005).

In Finland and other countries wood ash are tested a good source of potassium and liming material (Hytonen 2003, Leupold 2006, Shen et al. 2008). In the vegetation experiment implemented within the scope of this study mix of wastewater sludge compost, wood ash and peat secured necessary liming effect. The most significant alkalisng of pH found, if wood ash added to substrate, where proportion of peat and compost by volume

is 4:1. A dose corresponding to 10 t ha⁻¹ of wood ash alkalise substrate by 2.4 units, but dose of wood ash corresponding to 20 t ha⁻¹ alkalise substrate by 2.8 units. Adding of wood ash to peat and compost mix with proportion by volume 1:1 in it's turn reduced acidity by 1.4 units and 1.9 units. Optimal pH can be reached, using wood ash dose corresponding to 10 t ha⁻¹ (substrate's pH_{KCl} at the end of experiment was 6.5...7.0). Measurement of pH every second week demonstrated, that fluctuations of pH during the vegetation period aren't significant, except variants, where maximal dose of wood ash was applied ($p=0.99>0.05$). pH_{KCl} of different substrates differs significantly at the end of vegetation period.

Correlation analysis of concentration of nutrients in substrates with above and underground biomass demonstrated significant relations between certain parameters. Concentration of exchangeable phosphor in substrate correlates with all biological parameters ($r=0.63...0.81$), proportion of compost correlates with height of shoots and concentration of exchangeable phosphor ($r=0.76$) as well as with pH_{KCl} ($r=0.72$). Dose of wood ash closely correlates only with pH_{KCl} of substrate ($r=0.79$). Rate of growth of shoots positively correlates with concentration of exchangeable nitrogen in substrate.

3.1.2. Pollution of soil and biomass in the plantations

Wastewater sludge and wood ash, which were used in the experiments contains not only nutrients, but also exceeding amount of heavy metals, which are not used in biological processes.

Concentration of heavy metals in willow shoots found in this study corresponds to findings of other authors (Máthé-Gáspár et al. 2005, Adlera et al. 2005, Wishniewska et al. 2006) and relatively small. Although willows characterizes with ability to bind cadmium from soil, analyses that were done within the scope of this study didn't show significant increase of concentration of cadmium in willow wood, which were obtained from the fertilized plots.

When wastewater sludge are used as a fertilizer, doses of heavy metals applied to soil with the fertilizer can't overreach limit values marked in regulations of Cabinet of Ministers (No. 804 from 25.10.2005. and No. 362 from 02.05.2006.). These limit values were taken in account also in the field experiments implemented in this study. Concentration of heavy metals in topsoil (0...20 cm soil layer) in fertilized fields is smaller than so called caution limit in mineral soils. In 2005 and 2006 no significant changes were found in concentration of heavy metals in soil. Concentration of sulphur, element, which moves in soil together with heavy metals, doesn't increases in deeper layers of mineral and peat soils. This points to to the fact that no leaching of heavy metals into deeper soil layers took place during the experiment. Considerable increase of concentration of heavy metals found in peat soils, but this phenomenon is associated with mineralization of organic material in increase of mineral fraction in upper peat layer. Mineralization of organic material found generally in

upper peat layer, which demonstrates that fertilizers favoured biological decomposition of organic material and, consequently, increase of concentration of heavy metals.

In the vegetation experiment amount of heavy metals applied by compost and wood ash summarizes. At the end of experiment concentration of heavy metals in substrates with compost and wood ash admixtures decreases a bit or stays in the initial stage, except substrate with maximal doses of wood ash and compost, where concentration of all heavy metals increases by 7...24 %. This phenomenon, like in field experiments on peat soil, is associated with decomposition of organic material and increase of mineral fraction as a result. One of factors, which affected fluctuations of concentration of heavy metals in substrate, is decomposition of organic substances. Amount of organics in different variants decreased by 4...40 %, in compare to initial values (Figure 3.6).

Due the same reason concentration of heavy metals increased up to three times in control variant, too.

3.2. Estimation of productivity of different willow varieties

3.2.1. Productivity of plantations in different soils

Variety *Sven* was used in all experimental plantations established in 2005 to compare effect of soil texture and origin on growth of willows, because this variety demonstrated the best growth potential during the first year after planting in 2004 (Table 3.4).

No significant differences found between growing of willows on mineral soils ($p=0.95>0.05$), but difference between growing of willows on mineral and peat soil is significant ($p<0.05$). Comparison of morphological parameters of willow shoots of the same age at the end of 2006 and 2007 demonstrated, that peatlands with deep peat layer aren't suitable for establishment of willow plantations (Table 3.4).

3.2.2. Effect of sludge applications on productivity of willows

During the first growing season willow shoots grew faster and produced thicker and more in number shoots on mineral soils in Märupe in compare to control areas due to effect of wastewater sludge, but difference is not statistically significant ($p>0.05$) (Table 3.5).

Significant difference ($p<0.05$) between diameter of shoots in fertilized and control on mineral soils in Märupe area found only in second season, but difference in height is still statistically insignificant ($p=0.41>0.05$). Significant differences between height and diameter of fertilized and non-fertilized willow shoots found only in third vegetation period in 2007 (Table 3.5).

Field experiments demonstrated that in peat soils surface spreading of wastewater sludge doesn't have positive effect on survival and development of willow shoots. The most common reason for extinction of willows on peat soils is drying of willow cuttings due to lifting of cuttings during winter and acidic pH.

Experimental plantation, which was established in 2005 and then replanted in 2006 on peat soil, grew poorly and difference between biomass in fertilized and control plots is insignificant ($p > 0.05$). Therefore vegetation experiment was used to model situation, when fertilizer is mixed with parent soil material. This experiment demonstrated, that good survival and growing rate can be obtained in all substrates, except control.

Willow shoots are poorly developed in experimental plantation established on peat soil, significantly smaller than on mineral soils ($p < 0.05$) (Table 3.6).

In experimental plantations Mārupe and Olaine difference between height and diameter of willow shoots found statistically significant in 2006 only in case of two years old shoots ($p < 0.05$). But in 2007 statistically significant differences weren't observed ($p = 0.43 > 0.05$) (Table 3.6). Obtained results demonstrates, that wastewater sludge can be used to enrich sandy mineral soils with organics, nitrogen, phosphor and other nutrients during establishment of fast growing willow plantations and simultaneously returning nutrients locked in wastewater sludge into biological cycle.

3.2.3. *Factors affecting productivity of willow plantations*

Inheritance has at least the same significance in determination of productivity as soil properties and provision with nutrients. This is the reason why breeders are working on development of new even more productive varieties of fast growing willows. Two experiments with aim to compare potential of several varieties were implemented within the scope of this study – the first in 2004 and second – in 2006.

Variety *Sven* demonstrated better rooting capabilities and grew faster during the first year. During the first and second year morphological properties of shoots of different willow clones significantly differs ($p < 0.05$) (Figure 3.5). Comparison of morphological properties of one year old shoots in the first year after planting, for instance, in 2006, and in second year after planting (and the first coppicing in winter) demonstrates, that in second year willows grow better and the highest increment in growth rate reached variety *Torhild*.

Comparably better growing results of variety *Sven* during the first season created wrong impression about productivity of this clone, because in further years in older plantations this variety fall behind other varieties and in 2nd to 3rd year above ground biomass of *Sven* on sandy acidic soils was twice less then of *Tora* and *Torhild*.

With aim to evaluate productivity of different willow clones, growing stock of one, two and three years old shoots, as well as regrowth and productivity of willows in one, two and three years rotation cycle were estimated in the plantation established in Olaine in 2004. It is found in the study, that the most intense regrowth of willows takes place during second year after harvesting, but during third year continues maturing of willow shoots and growing becomes slower (Figure 3.8).

Two and three years old shoots of variety *Sven* are considerably smaller and differs significantly from ($p < 0.05$) shoots of *Tora* and *Tornhild*. In experimental plantations established in Latvian conditions biomass of one year old plantations is 4...5 t_{dry}, but in two

years old plantations – $12...30 \text{ t}_{\text{dry}} \text{ ha}^{-1}$, consequently yearly increment is $6...15 \text{ t}_{\text{dry}} \text{ ha}^{-1}$, which is rather good value. In Olaine experimental plantation, in light loamy soil which was enriched by wastewater sludge the best growing potential in three years old plantation demonstrated variety *Tora*. Number of shoots decreased during the third year, because poorly developed shoots were overshadowed and die.

Naturally wet biomass of three years old shoots of varieties *Sven*, *Tora* and *Torhild* with and without leaves, as well as biomass of leaves were estimated in August, 2007. No significant differences found in biomass of single shoots, leaves or moisture of biomass ($p < 0.05$). Variety *Torhild* is outstanding in compare to other varieties due to high diameter at breast height ($p = 0.006 < 0.05$) and at the ground level ($p = 0.003 < 0.05$), as well as because of heavier shoots ($p = 0.001 < 0.05$). difference between shoots height was significant ($p = 0.007 < 0.05$) (Table 3.7).

Significant correlation found between diameter at breast height and biomass. It can be used in measurement and estimation of biomass of two and three years old shoots (Figure 3.9). Power function using results of measurements of randomly selected shoots as input data can be used to estimate biomass of willow plantations.

3.3. Crop management, harvesting technologies and economical evaluation of the model of utilization of wastewater sludge

3.3.1. Establishment and management of plantations

The key factor securing successful establishment of willow plantations, using cuttings, is weed control during the first year of growing. The most efficient approach to secure good results is deep ploughing one year before planting and keeping the area in “black ley” for at least one summer. In spring before planting plantation should be treated with herbicides, which eliminates bluegrass, other grasses and dicotyledons. In Olaine object a land were kept for one summer in “black ley” and fertilized with wastewater sludge only in second year after planting. Weed control were done using ordinary garden cultivator. Survival in this object was 89...95%. In second year, after fertilization willows grew so rapid, that one treatment with cultivator was sufficient. No need for weed control was found in further years in this object.

In Mārupe survival is 75 % in control area and 71 % – in fertilized area. The most common reason for loss of cuttings is drying out during the first growing season in control field, and weeds – in fertilized area.

In Virši, in area where wastewater sludge and dolomite were applied, peat become less acidic, but in spite of that the most of willow cutting die soon after appearing of the first shoots and roots. In areas, where liming material were applied 71% survived during the first year, but at the end of second year only 15% of live cuttings were found.

In area, where mineral fertilizer and liming material were applied, during the first year survived 39% of cuttings, but at the end of 2007 half of them disappeared. Surveyors were thin and short, in spite of fertilization. During the second year after application of fertilizers, rapid development of ground vegetation and natural afforestation with birch, aspen and pine from seeds started in fertilized areas. Trees and grasses competed with willows and suppressed growth of the residual plants.

Results obtained in this study approves, that wastewater sludge can be used to enrich poor mineral soils with organics, nitrogen, phosphor and other nutrients securing returning of the nutrients back to biological cycle during establishment of short rotation willow plantations

Willow plantations requires significant investments and accurate after-care during the first years, but they can produce the first income starting from 3rd to 5th year after establishment.

3.3.2. *Costs of establishment and management of plantations*

Calculations of costs of establishment of willow plantations are done in accordance to average costs of contracting of agricultural machinery in 2007 and with assumption, that all necessary machinery will be rented and a salary of filed workers will be at average level in Riga region at the end of 2007. Calculation of costs of preparatory actions and direct costs of establishment of willow plantations have provided in Table 3.8.

Depending from technical characteristics of available machinery and coverage of natural vegetation, costs of establishment of 1 ha of willow plantation varies between 698 and 1152 LVL. In areas with well developed natural grass vegetation establisher of willow plantation should consider additional approximately 60 LVL ha⁻¹, otherwise establishment and growth of plantation can be seriously endangered due to fast growth of weeds and savings on soil preparation will not prove ourself and already spent funds (529...762 LVL for establishment and 134...233 LVL for soil preparation and chemical analyses, in total approximately 1000 LVL ha⁻¹) will be lost.

3.3.3. *Harvesting costs*

Within the scope of this study manual harvesting of willows in the experimental objects were done in plantations established in 2004, 2005 and 2006, but mechanized harvesting using combined harvester – in plantation established in 2004. Ordinary bush saws were used to cut down willows and manual work – to collect them into piles. Then these piles were forwarded to a temporary storage for drying. After drying willows were crushed using mobile chipper with manual loading. In large plantations this work should be done with specialized harvesters, which are able to cut and to crush biomass in one cycle. Comparison of wood chips produced by the mobile chipper and the harvester demonstrated, that harvester produces significant amount of small fractions. Heat content in

willow chips produced in Olaine is 18.89...18.93 MJ/kg. Total costs of manual harvesting, piling, forwarding (\bar{x} 300 m), crushing using mobile chipper and road transport (\bar{x} 50 km) per 1 loose m³ are 4.68 LVL (Table 3.9).

Average time consumption for manual harvesting in plantations of harvestable age (2...3 years) is 15...18 minutes per 1 loose m³. Average time consumption for harvesting and piling is 22...28 minutes per 1 loose m³. In calculation to 1 ha these values corresponds to 68 working hours. Productivity of CLAAS Jaguar 680 harvester with HS-2 header in similar conditions is 2..3 hours ha⁻¹.

Close correlation found between growing stock, time consumption to cut down 1 shoot ($r=0.81$) and time consumption for manual harvesting of 1 ha ($r=0.79$). This means that time consumption of manual harvesting depends generally from growing stock and average mass of shoots. Significant correlation found between average mass of shoots and time consumption to pick up and pile one shoot ($r=0.72$). This means, that time consumption for manual piling of bigger shoots is higher.

In compare to results obtained in pre-commercial forest thinning (Lazdiņš et al. 2007) time consumption for manual harvesting and piling in willow plantations is 2.5 times smaller in willow plantations. In optimal conditions fuel consumption for manual harvesting is 0.17 l loose m⁻³. For example, fuel consumption in the pre-commercial thinning was 0.3 l loose m⁻³.

Ordinary agricultural machinery is used to establish and to manage willow plantations, moreover field works in willow plantations only partially overlaps with normal use of agricultural machinery during the calendar year, making use of machines more efficient.

3.3.4. Potential sources of income

Willow plantations produce solid biofuel (wood chips), which can be later used as a raw material for pellets, briquettes and charcoal. However wood chips can be used also as a much in greening works. Willow shoots can be used also to strengthen seashore dunes and to establish decorative fences.

In second autumn after planting planting material corresponding to 10...15 th.LVL can be produced from 1 ha. If willow plantations are used for bioenergy production, average yearly increment of biomass in ordinary production conditions is 8...10 t_{dry} (20...25 m³). Thus, 28...30 t_{dry} (70...75 m³) of wood chips can be produced in average within one rotation. In optimal conditions production of wood chips can be up to 150 m³ per rotation.

If recalculate average increment to the state level under assumption, that all accounted wastewater sludge is used as fertilizer in willow plantations and maximal dose of the fertilizer is applied, gross income from willow plantations would be 1 728 111 LVL. If wastewater sludge are used in willow plantations, dose of 10 t_{dry} ha⁻¹ can be applied once per 5 years (corresponding to max. permissible 2 t_{dry} ha⁻¹ yearly). According to the latest data about production of wastewater sludge approximately 14 589 ha of willow plantations could be established using this fertilizer. These plantations every year would produce in

average $10 \text{ t}_{\text{dry}} \text{ ha}^{-1}$ of biomass, including technological losses. When harvested, these areas would provide $138\,596 \text{ t}_{\text{dry}}$ of wood chips yearly, which in calculation to price of wood chips ($35 \text{ LVL t}_{\text{dry}}^{-1}$) would come to $4\,850\,843 \text{ LVL}$. Utilization of this biofuel would provide $554\,384 \text{ MWh}$ of heat energy. About 3.5 ha of willow plantations are necessary to supply heat energy necessary for average private house with 150 m^2 area to heat up.

4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Conclusions:

1. Factors limiting establishment of willow plantations are insufficient knowledge and lack of experience in:
 - environmental effect of wastewater sludge applications;
 - suitable species for Latvian conditions;
 - technologies of establishment and management of plantations.
2. Effects of wastewater sludge applications:
 - additional organic material as well as significant amount of nutrients (N, P, Ca and Mg) is applied to mineral soils improving fertility and water regime;
 - reserves of phosphorus significantly increases in peat soil, providing favourable conditions for natural afforestation and development of ground vegetation on peat soil;
 - fertilizer applications improves productivity and, consequently, feasibility of plantations;
 - fertilizers don't degrade environmental conditions (concentration of heavy metals in soil changes insignificantly, no leaching of nutrients into deeper soil layers detected).
3. Wastewater sludge has comparably small liming effect. Fertilizing effect of sludge can be increased by admixture of wood ash and dolomite. These materials reduces acidity of soil and provides additional nutrients. Use dolomite as a liming material, dose 10 t ha^{-1} , secures change of pH by $0.6\text{...}1.2$ units in peat soil. Significant changes of pH found only in few centimetres deep upper layer of soil. Application of equal dose of wood ash provides faster effect of neutralization.
4. Following productivity measures are estimated – varieties *Tora* and *Torhild*, which are recognized within the scope of this study as the most promising in Latvian conditions, in 3 years rotation cycle produces $28\text{...}31 \text{ t}_{\text{dry}}$.
5. Plantation establishment and management model is elaborated and economically evaluated to implement in practise findings of this study.

Recommendations:

1. Decision making process of establishment of willow plantation involves: risk analysis, including evaluation of soil properties, decision about fertilizers to use, type of application and calculation of fertilizer dose, finding of the most suitable planting material and agreements about transportation, spreading of fertilizers and selling of wood chips.
2. Recommended doses of wastewater sludge:
 - in mineral soils recommended dose is $10 \text{ t}_{\text{dry}} \text{ ha}^{-1}$ once per 5 years, with mandatory ploughing into soil;
 - in peat soils wastewater sludge compost containing wood ash should be used instead as a surface fertilizer, dose – $20 \text{ t}_{\text{dry}} \text{ ha}^{-1}$.
3. Prior to establishment of willow plantation fallow land should be left at least one year in so called “black ley”. Fertilizer should be spread and ploughed into space between rows in the second year after planting. Fertilization should be repeated after every rotation (2...4 years) in next summer after harvesting.
4. Willows aren't suitable for growing on acidic peat soils with deep residual peat layer.
5. The key element of success of establishment of willow plantations is soil preparation. Total costs of establishment of willow plantations, depending from local conditions, are 698...1 152 LVL.
6. The most productive varieties, *Tora* and *Torhild*, can be used in commercial scale in Latvia. Recommended rotation cycle in well managed plantations is 3 to 2 years. Important is not only fertilizer, but also effect of variety, for example, in the study 3 years old non-fertilized and 2 years old fertilized plantations of Sven have nearly the same growing stock $9...11 \text{ t}_{\text{dry}} \text{ ha}^{-1}$.
7. Small plantations can be harvested manually. Costs of manual harvesting are 4.68 LVL per loose m^3 . Productivity of manual harvesting in plantations where commercial varieties are used is much higher, than in cases, where natural willows are used. If it's planned to establish plantations in commercial scale, mechanized harvesting should be used instead. Specialized harvesting and cuminution machinery for bioenergy production mounted on agricultural or forestry tractors or combines can be utilized in willow plantations.
8. The first income from willow plantations can be obtained in second year after planting from selling of planting material for establishment of new plantations or greening purposes (about 0.08 LVL per shoot). Starting from third year after planting, about $150 \text{ loose m}^3 \text{ ha}^{-1}$ of wood chips can be produced in a rotation cycle, which corresponds to 900 LVL according to a forest biofuel prices in 2007.