



EESTI MAAÜLIKOOL
Põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Annika Jaanimägi

**LUHAHEINA KUI LIGNOTSELLULOOSSE BIOMASSI
VÄÄRINDAMISE VÕIMALUSED ALAM-PEDJA NÄITEL**

VALORISATION POTENTIAL OF FLOODPLAIN MEADOW
HAY AS LIGNOCELLULOSIC BIOMASS: A CASE STUDY OF
ALAM-PEDJA

Magistritöö
Ökonoomika ja ettevõtluse õppekava

Juhendajad: Ülle Roosmaa, *MSc*
Rando Värnik, *Dr (Econ)*
Timo Kikas, *PhD*

Tartu 2025

Eesti Maaülikool F. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Annika Jaanimägi		Õppekava: Ökonoomika ja ettevõtlus	
Pealkiri: Lahaheina kui lignotselluloosse biomassi väärindamise võimalused Alam-Pedja näitel			
Lehekülgi: 93	Jooniseid: 13	Tabeleid: 11	Lisasid: 16
ETIS-e valdkond ja CERCS-i kood: Põllumajandusökonoomika, S187 Juhendajad: Ülle Roosmaa, <i>MSc</i> ; Rando Värnik, <i>Dr (Econ)</i> ; Timo Kikas, <i>PhD</i> Osakond või õppetool: Maamajanduse ökonoomika õppetool Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2025			
Alam-Pedja pärandniitude hooldamisel kogutakse igal aastal märkimisväärses koguses lahaheina, mille kasutusväärtust loomasöödana piirab eeskätt hilise niitmisaja tõttu madal toiteväärtus. Seetõttu on oluline otsida alternatiivseid võimalusi lahaheina väärindamiseks viisil, mis toetaks ressurside kestlikku kasutamist ja võimalusel rakendaks kaskaadkasutuse põhimõtteid. Magistritöö eesmärk oli saada ülevaade Alam-Pedja pärandniitude biomassi väärindamise tehnilistest ja majanduslikest aspektidest ning anda hinnang lahaheina kui lignotselluloosse biomassi väärindamispotentsiaalile, keskendudes ligniini eraldamise võimalusele protoonsete ioonsete vedelike (<i>protic ionic liquids</i>, PIL) abil. Töö tugines kombineeritud uurimismeetodile ning 2023. ja 2024. aastal kogutud andmetele, mis hõlmasid lahaheina keemilise koostise analüüsi, intervjuusid pärandniitude majandajatega, toetuste andmestikku ning teavet hooldustegevuste kohta. Ligniini eraldamise võimalusi käsitleti teoreetilisel tasandil, tuginedes teaduskirjandusele ja ekspertarvamustele. Töö tulemused näitavad, et kuigi lahahein leiab tüüpiliselt kasutust loomasöödana, jääb märkimisväärne osa sellest väärindamata või realiseeritakse väga madala väärtusega. Saadud tulemused viitavad, et lahahein sobib oma keemilise koostise poolest potentsiaalselt lignotselluloosseks sisendmaterjaliks, mida võiks väärindada näiteks ligniini selektiivse eraldamise kaudu protoonsete ioonvedelike abil. Töö raames kaardistati ka PIL-protsessi rakendatavust mõjutavad tehnökonoomilised tegurid. Tehnilise teostatavuse seisukohalt on olulised nii sobiva PILi valik kui ka protsessitingimuste määramine, sealhulgas biomassi osakeste suurus, biomassi ja PILi suhe, temperatuur ning ekstraktsiooniaeg – need mõjutavad otseselt ligniini saagist ja kvaliteeti. Ligniini eraldamise efektiivsus ja saadava produkti omadused omakorda määravad, kas protsess võiks olla majanduslikult põhjendatud. Üheks kriitilisemaks aspektiks kogu protsessi juures on ioonvedeliku taaskasutusmäär, mis mõjutab oluliselt nii kuluefektiivsust kui ka keskkonnamõju. Kuigi magistritöö ei võimalda teha lõplikke järeldusi tehnoloogilise teostatavuse ega majandusliku tasuvuse kohta, loob see tugeva aluse edasiseks uurimistööks ning suunab tähelepanu lahaheina kasutamata väärindamispotentsiaalile biomajanduse kontekstis.			
Võtmesõnad: pärandniitude majandamine, biomassi kaskaadkasutus, protoonsed ioonsed vedelikud, tehnökonoomilised aspektid, biorafineerimise potentsiaal			

Estonian University of Life Sciences F. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Master's Thesis	
Author: Annika Jaanimägi		Curriculum: Economics and Entrepreneurship	
Title: Valorisation potential of floodplain meadow hay as lignocellulosic biomass: a case study of Alam-Pedja			
Pages: 93	Figures: 13	Tables: 11	Appendixes: 16
ETIS research field and (CERCS) code: Agricultural economics, S187 Supervisors: Ülle Roosmaa, MSc; Rando Värnik, Dr (Econ); Timo Kikas, PhD Department / Chair: Chair of Economics in Rural Economy Place and year of defence: Tartu 2025			
<i>Regular management of the Alam-Pedja heritage meadows generates a considerable amount of floodplain meadow hay each year. Due to the late mowing period, the forage quality of this biomass is low, which limits its value and usability as fodder. Therefore, it is important to explore alternative valorisation pathways that support sustainable resource use and, where possible, follow the principles of cascading use. The aim of this master's thesis was to assess the technical and economic aspects of biomass valorisation in the Alam-Pedja heritage meadows and to evaluate the potential of floodplain meadow hay as a lignocellulosic resource, with a focus on lignin extraction using protic ionic liquids (PILs). The study applied a mixed-method approach and was based on data collected in 2023 and 2024, including chemical composition analyses of hay samples, interviews with land managers, agri-environmental support data, and information on grassland management practices. The potential for lignin extraction was examined on a theoretical level, based on scientific literature and expert insights. The results show that although floodplain hay is typically used as fodder, a significant share remains unutilised or is sold at a very low value. The chemical composition of the hay indicates its potential suitability as a lignocellulosic input for biorefining, particularly for selective lignin extraction using PILs. The study identified key techno-economic factors influencing the feasibility of the process, including PIL selection and process parameters such as particle size, biomass loading ratio, temperature, and extraction time – all of which directly affect lignin yield and quality. These parameters are critical in determining whether the process could be economically viable. One of the most important factors is the recyclability of the ionic liquid, which significantly influences both cost-efficiency and environmental impact. While the study does not allow for definitive conclusions regarding technological feasibility or profitability, it provides a strong basis for further research and highlights the untapped valorisation potential of floodplain meadow hay within the bioeconomy framework.</i>			
Keywords: management of heritage meadows, cascading use of biomass, protic ionic liquids (PILs), techno-economic aspects, biorefining potential			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	3
1. PÄRANDNIITUDE BIOMASS JA SELLE VÄÄRINDAMISE VÕIMALUSED.....	7
1.1. Pärandniitude säilitamise vajadus ja bioressursside väärindamise põhimõtted.....	7
1.1.1. Pärandniidud ja nende säilitamise vajadus.....	7
1.1.2. Bioressursside väärindamise põhimõtted ringbiomajanduse kontekstis.....	11
1.2. Lahahein ja selle kasutusvõimalused	14
1.2.1. Lahahein kui lamminiitude biomass.....	14
1.2.2. Lahahein kui lignotselluloosne biomass	16
1.2.3. Lahaheina väärindamisvõimalused	18
1.2.4. Lignotselluloosse biomassi väärindusvõimalused.....	21
1.2.5. Lignotselluloosse biomassi eeltöötlusmeetodid	23
1.2.6. Ioonsete vedelike kasutamine lignotselluloosse biomassi väärindamisel.....	25
1.3. Biomassi väärindamise majanduslik kontekst	27
1.3.1. Pärandniitude majandamise kuluarvestuse alused.....	27
1.3.2. Lignotselluloosse biomassi väärindamistehnoloogiate hindamise alused	29
2. ALAM-PEDJA LAMMINIITUDE BIOMASSI VÄÄRINDAMISE TEHNO- ÖKONOOMILISED ASPEKTID.....	33
2.1. Andmed ja metoodika.....	33
2.1.1. Andmete iseloomustus	33
2.1.2. Pärandniitude majandamise kulude hindamine	35
2.1.3. Lahaheina väärindamispotentsiaali hindamine	37
2.2. Alam-Pedja pärandniitude majandamise senine praktika	39
2.2.1. Alam-Pedja pärandniitude iseloomustus.....	39
2.2.2. Alam-Pedja pärandniitude majandamine aastatel 2023–2024	41
2.2.3. Alam-Pedja aladelt kogutud biomassi kasutamise senine praktika	42
2.2.4. Pärandniitude majandamise majanduslik tulem aastatel 2023 ja 2024.....	45
2.3. Lahaheina väärindamisvõimaluste hindamine	51
2.3.1. Lahaheina biokeemiline koostis ja selle potentsiaal.....	51
2.3.2. Lahaheinast ligniini eraldamise protsess protoonsete ioonvedelike abil.....	53
2.3.3. Lahaheina väärindamisega seotud tehno-ökonomilised aspektid	57
2.4. Järeldused ja ettepanekud	61
KOKKUVÕTE	64
ALLIKALOEND	67
LISAD	76
Lisa 1. Pärandniitude levik elupaigatüüpide kaupa kaitsvatel aladel 2020. a. seisuga	77
Lisa 2. Kaitsvatel aladel hooldamist ja taastamist vajavad pärandniidud	78
Lisa 3. Lamminiitude taimkatte iseloomustus Eesti taimkatte kasvukohatüüpide klassifikatsiooni järgi.....	79
Lisa 4. Varasemad uuringud rohtse biomassi väärindamise võimalustest	81
Lisa 5. Protoonsete ja mitte-protoonsete ioonvedelike põhierinevused, eelised/puudused LCB väärindamisel	82
Lisa 6. Toetuste taotlejate struktuur pindala alusel 2023. ja 2024. aastal	83

Lisa 7. Lahaheina tootmise masinakulude kalkulatsioonide eeldused	84
Lisa 8. Traktorite kulud.....	85
Lisa 9. Töomasinate kulud	86
Lisa 10. Masinakulud tegevuste lõikes	87
Lisa 11. Lahaheina niite proovide asukohad 2023. aastal.....	88
Lisa 12. Lahaheina niite proovide asukohad 2024. aastal.....	89
Lisa 13. Kogutud proovide keskmine kuivainesisaldus	90
Lisa 14. Kiuanalüüsi tulemused kuivaine baasil aastatel 2023 ja 2024	91
Lisa 15. Alam-Pedja linnu- ja loodusala geograafiline asukoht	92
Lisa 16. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	93

SISSEJUHATUS

Meie planeedi ökoloogilised piirid on määratlenud raamistiku, mille sees peab inimkond leidma võimalusi jätkusuutlikuks arenguks. Kestliku arengu saavutamiseks on viimase kümnendi jooksul sõlmitud mitmeid globaalseid kokkuleppeid ja algatatud poliitikaid, mis peegeldavad kasvavat teadlikkust keskkonna, majanduse ja ühiskonna omavahelisest seotusest. Aastal 2015 võtsid ÜRO liikmesriigid vastu kestliku arengu tegevuskava aastani 2030 ja 17 ülemaailmset säästva arengu eesmärki (*Sustainable Development Goals, SDGs*), mis on suunatud olukorra parendamisele nii majandus-, sotsiaal- kui ka keskkonnavaldkonnas (ÜRO 2015a). Samal aastal allkirjastati Pariisi kliimakokkulepe, mis seab eesmärgiks pidurdada ja peatada globaalne soojenemine, millest tulenevalt peavad riigid panustama kasvuhoonegaaside (KHG) heite vähendamisse (ÜRO 2015b). Euroopa Liidu (EL) tasandil sõlmiti 2019. aastal roheline kokkulepe, mille eesmärk on muuta EL konkurentsivõimelise ja ressursitõhusa majandusega õiglaseks ja kaasaegseks ühiskonnaks, kus saavutatakse 2050. aastaks kliimaneutraalsus ning majanduskasv ei sõltu enam ressursikasutusest (EK 2019). Eesti vabariigi pikaajalise arengustrateegia (Eesti 2035) eesmärk on teha Eestist 2050. aastaks konkurentsivõimeline ja kliimaneutraalne riik, kus on kvaliteetne ja mitmekesine elukeskkond ning kliimamuutuste mõjusid suudetakse tõhusalt leevendada. Selle eesmärgi saavutamiseks soodustatakse keskkonnasõbralikke tootmis- ja tarbimismudeleid, mis toetavad materjalide taaskasutust ja teisese toorme kasutamist.

Pärandniidud ehk poollooduslikud kooslused on kujunenud sajanditepikkuse inimtegevuse tulemusel ning kuuluvad tänapäeval Euroopa ja Eesti liigirikkaimate ökosüsteemide hulka. Maakasutuse muutuste tõttu on pärandniitude pindala viimase sajandi jooksul märkimisväärselt vähenenud, mis ohustab niiduelupaikade ja nendega seotud elurikkuse säilimist. Pärandniitude säilimine eeldab nende järjepidevat hooldamist, mille käigus tekkiv hein on väärtuslik, ent sageli alakasutatud bioressurss.

Alam-Pedja looduskaitsealal moodustavad pärandniidud märkimisväärselt osa kogu kaitseala pindalast, kus nende niidukoosluste säilitamiseks on sobivaimad hooldusviisid karjatamine ning niitmine koos niite kokkukogumisega. Alam-Pedja aladelt kogutud luhahaina on valdavalt

kasutatud loomasöödana, kuid niitmise ajapiirang, mis võimaldab seda teha alates 15. juulist, toob sageli kaasa taimiku vananemise enne selle kogumist, mille tõttu langeb sööda toiteväärtus. Lisaks on Eestis täheldatav loomakasvatuse vähenemise üldine trend, mis võib omakorda vähendada nõudlust loomasööda järele. Seetõttu kerkib esile küsimus, kas looduskaitselistel eesmärkidel kogutavat biomassile oleks võimalik leida alternatiivseid väärindusvõimalusi.

Magistritöö on ajendatud LIFE integreeritud projekti „Kliimamuutustega kohanemise tegevuste elluviimine Eestis“ (edaspidi AdaptEst) eesmärkidest ja tegevustest. AdaptEst projekti keskmes on ökosüsteemide vastupanuvõime suurendamine ning ühiskonna valmisoleku parandamine kliimamuutustega kohanemiseks, millele lisandub positiivse sotsiaalmajandusliku mõju saavutamine ressursside säästva kasutamise kontekstis (AdaptEst s.a.). Üheks AdaptEst projekti oluliseks alaeesmärgiks on pakkuda välja Alam-Pedja luhahainale alternatiivseid kasutusviise, võttes arvesse nii keskkonna kui ka majanduslikke aspekte.

Luhahain kui kohalik ja taastuv bioressurss sobitub hästi biomajanduse kontseptsiooniga, mille keskmes on bioloogiliste ressursside kestlik tootmine ja väärindamine toidu, energia ning kõrgema lisandväärtusega toodete loomiseks. Luhahaina kasutusvõimalused ei piirdu üksnes loomasöödana rakendamisega – luhahain on väärtuslik lignotselluloosne biomass, millest sobiva töötlemise abil saab toota näiteks ligniini, tselluloosi ja bioenergiat. Taoline väärindamine võib oluliselt suurendada ressursside kasutamise tõhusust, aidata kaasa jäätmetekke vähendamisele ning toetada mitmete ÜRO säästva arengu eesmärkide (nt SDG 8, 12, 13 ja 15) täitmist. Viimastel aastatel on teadusuuringutes kasvanud huvi ligniini kui kõrgema lisandväärtusega biopõhise lähteaine eraldamise vastu, sealhulgas ka rohtsest biomassist nagu luhahain. Luhahaina väärindamise potentsiaal ligniini tootmiseks vajab aga täiendavat uurimist. Üheks uuenduslikuks lähenemiseks selles kontekstis on ligniini eraldamine protoonsete ioonvedelike (PIL) abil, kasutades neid eeltötlusmeetodina lignotselluloosse biomassi fraktsioneerimiseks.

Magistritöö eesmärk on saada ülevaade Alam-Pedja pärandniitude biomassi väärindamise tehnilistest ja majanduslikest aspektidest ning anda hinnang luhahaina kui lignotselluloosse biomassi väärindamispotentsiaalile, keskendudes ligniini eraldamise võimalusele protoonsete ioonsete vedelike abil.

Eesmärgi täitmiseks on püstitatud järgmised uurimisülesanded:

- 1) Selgitada pärandniitude ökoloogilist, kultuurilist ja majanduslikku tähtsust ning anda ülevaade Alam-Pedja lamminiitude eripäradest.
- 2) Selgitada bioressursside väärindamise põhimõtteid ringbiomajanduse ja kaskaadkasutuse kontekstis.
- 3) Anda ülevaade luhahainast kui lignotselluloosest biomassist ning selle senistest kasutusviisidest ja alternatiivsetest väärindamise võimalustest.
- 4) Kaadistada Alam-Pedja pärandniitude majandamise praktika ja hinnata hooldustööde käigus kogutava luhahaina koguseid ja omadusi.
- 5) Käsitleda luhahaina tootmise majanduslikku tasuvust ja toetuste rolli pärandniitude hoolduskuludes.
- 6) Hinnata Alam-Pedja luhahaina biokeemilist koostist ja saagikust, tuginedes kiuanalüüsidele ja pärandniitude majandajatelt kogutud andmetele.
- 7) Kaardistada peamised tehno-ökonoomilised tegurid, mis mõjutavad ligniini eraldamise protsessi protoonsete ioonvedelike abil ning hinnata luhahaina väärindamispotentsiaali ringbiomajanduse kontekstis.

Magistritöö esimene peatükk põhineb peamiselt teemakohasel teaduskirjandusel, empiiriline osa põhineb kombineeritud uurimismeetodil ja mitmesugustel andmeallikatel. Töö aluseks on aastatel 2023 ja 2024 kogutud andmestik, mis hõlmab poolstruktureeritud intervjuusid pärandniitude majandajatega, ekspertarvamusi, PRIA andmeid toetuste kohta, Keskkonnaameti teavet teostatud hooldustegevuste kohta ning Alam-Pedja pärandniitudelt kogutud luhahaina biomassi proove. Andmete kogumiseks kasutatakse intervjuusid, kirjalikke päringuid ja proovivõttu. Biomassi keemilise koostise hindamiseks viiakse läbi kiuanalüüsid, mille tulemused võimaldavad hinnata luhahaina sobivust potentsiaalseks väärindamiseks biomajanduse kontekstis. Ligniini eraldamise võimalusi protoonsete ioonvedelike abil käsitletakse teoreetilisel tasandil, tuginedes olemasolevale teaduskirjandusele ja ekspertarvamustele.

Tegemist on juhtumiuuringuga Alam-Pedja looduskaitsealal ja töö tulemused on eelkõige kontekstipõhised, kuid neid saab teatud piirides laiendada ka teiste sarnaste poollooduslike koosluste väärindamispotentsiaali hindamiseks Eesti tingimustes.

Autor avaldab siirast tänu kõigile intervjueeritavatele, kes panustasid töö valmimisse oma teadmiste ja kogemustega. Samuti tänab autor oma juhendajaid toetuse, tagasiside ja usalduse eest kogu uurimisprotsessi vältel.

Magistritöö on valminud projekti „Kliimamuutustega kohanemise tegevuste elluviimine Eestis“ (Implementation of national climate change adaptation activities in Estonia, LIFE21-IPC-EE-LIFE-SIP AdaptEst/101069566) raames, mida rahastavad Euroopa Liidu liikmesriikide keskkonnaprojektide kaasrahastamise programm LIFE ja Eesti riik kasvuhoonegaaside lubatud heitkoguse ühikutega kauplemise tulust. Euroopa Liit ega abiandvad asutused ei vastuta magistritöös oleva informatsiooni õigsuse ja sisu kasutamise eest.

1. PÄRANDNIITUDE BIOMASS JA SELLE VÄÄRINDAMISE VÕIMALUSED

1.1. Pärandniitude säilitamise vajadus ja bioressursside väärindamise põhimõtted

1.1.1. Pärandniidud ja nende säilitamise vajadus

Rohumaade omadusi, elupaiga- ja liigirikkust, ökosüsteemiteenuseid ning kujunemisprotsesse arvesse võttes on LIFE Viva Grass projektis eristatud kolme peamist tüüpi rohumaid: kultuurrohumaa, püsirohumaa ja poollooduslik rohumaa. Kultuurrohumaa on külvinga rajatud ja regulaarselt uuendatud rohumaa, mida iseloomustab tavaliselt intensiivne kasutus ja väetamine ning need on suhteliselt liigivaesed. Püsirohumaa on rohumaa, mida ei ole vähemalt viis aastat kaasatud põllumajandusliku majapidamise külvikorda. Sageli on see kujunenud looduslikult endisest kultuurrohumaa või põllumaast ning omab üldjuhul kõrgemat liigirikkust ja loodusväärtust võrreldes kulturniitudega. Poollooduslik rohumaa on pikaajalise niitmise või karjatamise tulemusel kujunenud niidukooslus, mis on ekstensiivselt majandatud ja selle tulemusena oluliselt liigirikkam, pakkudes seeläbi ka kõige mitmekesisemaid ökosüsteemiteenuseid. (Rohumaatüübid 2025)

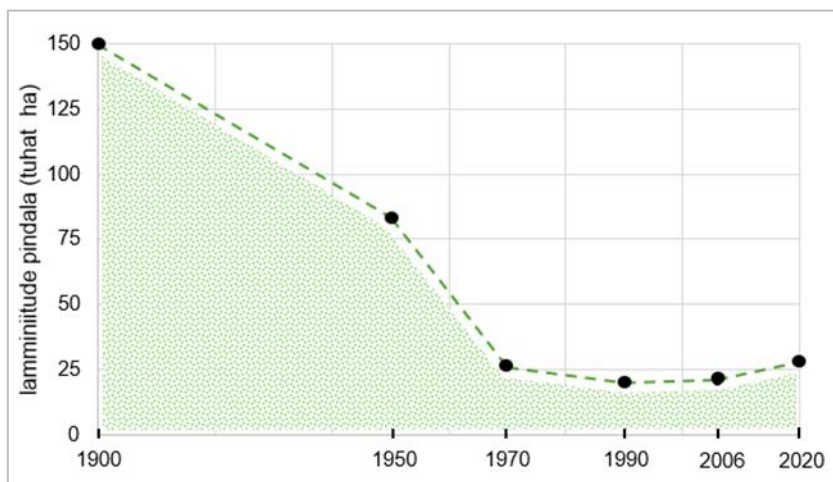
Pärandniitude tegevuskavas 2021–2027 on poollooduslikud kooslused (edaspidi PLK) ehk pärandniidud ehk pärandkooslused defineeritud kui loodusliku elustikuga rohttaimkattega alad, mis on kujunenud pikaajalise inimtegevuse mõjul (Pärandniitude tegevuskava 2021: 4). Poollooduslikke alasid tuntakse ka pärandkultuurmaastikena ning PLK nimetatakse pärandkooslusteks, rõhutades traditsioonilist ja looduslähedast inimtegevust, mis on püsinud tuhandeid aastaid (Talvi, Talvi 2012: 6). Ühelt poolt on pärandniidud majandatavad alad, kus inimtegevus on piirdunud peamiselt saagi koristamisega (Kasari-Toussaint *et al.* 2023: 15; Talvi, Talvi 2012: 5), seejuures pole PLKdele teadaoleval ajal külvatud kultuurtaimede seemneid ning neid alasid pole küntud ega väetatud (Pärandniitude tegevuskava 2021: 6). Ekstensiivse majandamise tulemusena on pärandniitudel säilinud looduslik taimestik ja rohukamar (Talvi, Talvi 2012: 5), mis pakub väärtuslikke elupaiku looduslähedast ja avatud maastikku vajavatele liikidele (Kasari-Toussaint *et al.* 2023: 15). Eestis peamiselt levinud PLKd

on loopealsed, soostunud niidud, aru-, soo-, ranna-, lammi- ja puisniidud ning puiskarjamaad (Helm, Toussaint 2020: 5). Selge *et al.* (2022) on nimetatud kooslused liigitanud looduslikeks rohumadeks, kus taimik kujuneb välja inimsekkumiseta, sest inimene pole väetamise, harimise, külvamise või teiste võtetega mõjutanud rohumaa saagi suurust ja väärtust ning taimed kasvavad ja levivad seal looduslikult. Poollooduslikeks loetakse Selge *et al.* (2022) määratluse alusel selliseid rohhtaimkattega alasid, mida kasutatakse ekstensiivselt ehk vähese sekkumisega, st karjatamise või niitelise kasutamise mõjul langevad taimikust välja kõrgekasvulised rohundid (nt ohakad, naat, putked jne) mis asenduvad ajapikku võsundiliste liikidega (nagu punane aruhein, aas- ja harilik nurmikas). Käesolevas töös on lähtutud pärandniitude tegevuskavas (2021) toodud määratlusest, et tegemist on poollooduslike kooslustega, kuna inimsekkumine on siiski mänginud asendamatu rolli nende niidukoosluste kujunemisel ja säilimisel.

Poollooduslikke rohumaid peetakse liigirikkaimateks kooslusteks Euroopas ning neil on kõrge looduskaitseline ja ka sotsiaalmajanduslik väärtus (Grinienė *et al.* 2019: 3). Sellest hoolimata on viimase sajandi jooksul PLK pindala Euroopas märgatavalt vähenenud. Selleks, et tagada niitudega seotud elurikkuse ja ökosüsteemiteenuste säilimine ka tulevikus, on Helm ja Toussaint (2020: 48) hinnangul vajalik säilitada vähemalt 20% ulatuses kunagistest niiduliikidele sobivatest elupaikadest, mis eeldaks, et PLK-de ja nendega seotud tugikoosluste pindala Eestis peaks kokku ulatuma ca 200 000 ha-ni. Niisuguse pindala saavutamiseks tuleb esmajärjekorras säilitada ja taastada veel säilinud PLKd. Keskkonnaportaali andmetel oli Eestis 2020. aasta seisuga hinnanguliselt 130 000 ha pärandniite, millest enam kui 67% paiknevad kaitstavatel aladel ja neist ca 41 000 hektaril teostati hooldus- ja taastamistegevusi. Lisas 1 on esitatud Eesti pärandniitude levik elupaigatüüpide kaupa. On näha, et suurem osa Eesti lamminiitudest (LoD 6450) ja nende servaniitudest (LoD 6430) paiknevad Matsalu ja Soomaa rahvusparkides ning Alam-Pedja LKA-l, kuid neid esineb hajusalt ka mujal Eestis. Kaitstavatel aladel on pärandniite kokku üle 87 tuhande hektari, neist oli 2020. aastal hoolduses ca 43% (lisa 2). Lisast 2 selgub, et kaitstavatel aladel on kõige rohkem ranna- ja lamminiite ning nendel elupaigatüüpidel teostatakse ka kõige suuremas mahu hooldustegevusi. Pärandniitude tegevuskavas on seatud eesmärgiks suurendada kogu hooldatava ala pinda 2027. aastaks vähemalt 50 000 ha-ni, sh on kavandatud lamminiitude (LoD 6450) hooldatava pinna suurendamine 8900 ha-lt (2020.a) 10 900 ha-ni (Pärandniitude tegevuskava 2021: 8, 38).

Lamminiidud (*floodplain meadows*) ehk luhad on poollooduslikud kooslused, mida võib käsitada nii rohumaade kui ajutiste märgaladena (Metsoja 2020: 3). Euroopa Liidu loodusdirektiivi (LoD) mõistes ja Natura 2000 elupaigatüübina on Eesti lamminiidud käsitatavad eelkõige elupaigatüübina 6450 (Põhjamaised lamminiidud, *Northern boreal alluvial meadows*), mis on rohumaad suurte jõgede kallastel vaikselt vooluga lõikudes, mis igal talvel külmuvad kinni, kevadsuveperioodil aga on tulvaveega üle ujutatud (Metsoja 2020: 6). Bowskill *et al.* (2023: 1) sõnul tuleneb lamminiitide liigirikkus sellest, et üleujutuseladelt pärinevate toitainete sissevool on tasakaalus toitainete väljavooluga iga-aastase heinasaagi kaudu. Talvi ja Talvi (2012: 20) sõnul sõltuvad lamminiitidele iseloomulikud kooslused üleujutusperioodi kestusest ja üleujutusega kaasnevate setete koostisest. Üleujutuseladena täidavad luhad mitmeid funktsioone, sealhulgas setete kinni püüdmist ja süsiniku säilitamist (Rothero *et al.* 2016: 12). Nende funktsioonide tähtsus suureneb veelgi kliimamuutuste kontekstis, kus üleujutuselad mängivad olulist rolli veeringluse reguleerimisel ja ökosüsteemi vastupidavuse tagamisel.

Joonis 1 iseloomustab luhtade ehk lamminiitide levikut Eestis ajavahemikul 1900–2020. Jooniselt 1 nähtub, et 20. sajandi vältel on lamminiitide pindala Eestis oluliselt vähenenud. Alates 2000. aastate algusest on aga looduskaitseliste meetmete rakendamine aidanud seda langustrendi pidurdada ning sellele järgnenud aktiivsete taastamistegevuste tulemusel ületas lamminiitide pindala 2020. aastaks taas 1970. aasta taseme.



Joonis 1. Hinnanguline lamminiitide (LoD 6450) pindala Eestis, tuhandetes hektarites (autori koostatud, Metsoja 2020: 12 ja Helm, Toussaint 2020: 15 põhjal)

Peamiseks luhtade levikut ja nende seisundit mõjutanud teguriks peetakse nende traditsioonilise kasutusviisi, niitmise ja karjatamise, lakkamist (Metsoja 2020: 12; Talvi, Talvi 2012: 20; Helm *et al.* 2023: 226). Niidukooslused vajavad aga säilimiseks mõõdukat inimtegevust, sest muidu need alad roostuvad või võsastuvad ning selle tulemusena muutub neile omane taimestiku liigiline koosseis ja väheneb liikide arv (Helm, Toussaint 2020: 4). Seega on niiduökosüsteemi pikaajalise säilimise ja hea seisundi tagamiseks vajalik hooldamine mõõduka karjatamise või sobiva režiimiga niitmise näol (Helm *et al.* 2023: 61).

Pärandniitude kaitseks ja säilimiseks vajalikke hooldustegevusi toetatakse ühise põllumajanduspoliitika strateegiakava (ÜPP SK 2023–2027) raames antava pärandniidu hooldamise toetuse (NIIT 2023–2027) kaudu. NIIT toetus on seotud viieaastase kohustusperioodiga, mille vältel tuleb täita NIIT määruses ja/või kaitsekorras esitatud nõudeid. Keskkonnaamet määrab kindlaks hooldamistingimused, mida toetuse menetlemisel jälgib Põllumajanduse Registrate ja Informatsiooni Amet (PRIA). Toetatavad hooldustegevused on karjatamine või niitmine koos niite koristamisega. Niidetavad pärandniidud tuleb niita ja niide kokku koguda hiljemalt 1. septembriks ning kokku kogutud niide tuleb alalt eemaldada hiljemalt järgmise aasta 1. aprilliks. Juhul, kui pärandniidul leidub keskkonnaregistrisse kantud kaitsealuste maas pesitsevate linnuliikide elupaiku, on niitmise algus lubatud alates 15. juulist. Ühelt poolt tagab hiline niitmine linnustiku elutingimuste kaitse, kuid Maher (2018: 4) peab seda oluliseks ka botaanilise mitmekesisuse säilitamiseks, sest siis jõuavad taimed külvata seemneid ja talletada juurtesse järgmiseks kasvuperioodiks toitaineid. Heina niitmisjärgne kokku kogumine on oluline nii taimede kui ka teiste ökosüsteemi osade seisukohalt. Ühelt poolt aitab see tagada aeglaselt kasvavatele taimedele parema valguse kättesaadavuse (Neuenkamp *et al.* 2013: 854), teisalt võib koristamata hein viia multšikihi kujunemiseni ja toitainete rikastumisele, mis omakorda vähendab liigirikkust (Maher 2018: 8). Lisaks võib niitmisjärgselt koristamata jäänud biomass üleujutuse korral kanduda veekogudesse, kahjustades selgrootute ja kalade elupaiku (Metsoja 2020: 37).

Pärandniite on võrreldes kultuurrohumaa tavaliselt keerulisem hooldada, sest reeglina paiknevad need maastikus killustatuna ning need ei pruugi olla kergesti ligipääsetavad (Kasari-Toussaint *et al.* 2023: 17). Alam-Pedja pärandkooslustest umbes pooled paiknevad kas teineteisest eraldatud väikeste aladena, asuvad võsastunud või metsastunud alade taga,

vanajõgede käärudes või väga pehmel pinnasel, seega peetakse neid raskesti ligipääsetavateks aladeks (Alam-Pedja linnu- ja ... 2015: 79-80). Seega võib nendel alade majandamine osutuda töömahukamaks, ajakulukamaks ja tehniliselt keerukamaks kui kultuurrohumaaadel. Nõudlikumad tingimused võivad vähendada motivatsiooni alade hooldamiseks, eriti kui kogutava biomassi kasutusvõimalused on piiratud või selle väärtus madal. Sellest tulenevalt muutub eriti oluliseks leida võimalusi niidetava heina väärindamiseks viisil, mis tooks kaasa kõrgemat lisandväärtust ja suurendaks hooldustegevuste majanduslikku tasuvust.

Alam-Pedja linnu- ja loodusala kaitsekorralduskavas (2015: 82–83) on ühe tegurina, mis piirab hoolduses olevate pärandniitude pinna suurendamist, nimetatud heina vähesed kasutusvõimalused. Lahendusena soovitatakse teha koostööd heina potentsiaalsete tarbijate, teadusasutuste ja ettevõtetega, et leida jätkusuutlikke majandamisviise ja laiemat kasutust pärandniitudelt kogutavale heinale.

1.1.2. Bioressursside väärindamise põhimõtted ringbiomajanduse kontekstis

Biomajandus on Euroopa Komisjoni (EK) poolt määratletud kui taastuva biomassi tootmine ja selle muutmine toiduks, söödaks, bioenergiaks ning teisteks biotoodeteks. Biomajandus tugineb eelkõige esmatootmissektoritele ja nendega seotud tööstustele, mis tegelevad bioloogiliste ressursside tootmise, majandamise või muul viisil kasutamisega (EK 2018). Seega biomajandus hõlmab endas nii bioressursside tootmist kui ka nende edasist väärindamist lisandväärtusega toodeteks. Ehkki bioressursside väärindamine on biomajanduse keskne komponent, ei tähenda see automaatselt, et kõik sellega seotud tegevused oleksid kestlikud või keskkonnasäästlikud. Traditsiooniline lineaarne majandusmudel – „tooda, tarbi, viska ära“ – ei ole jätkusuutlik, kuna see eeldab suurt hulka sisendmaterjale ja toob kaasa märkimisväärse koguse jäätmeid, mis avaldavad tugevat survet keskkonnale (nt loodusvarade ammendumine, elurikkuse vähenemine ja saastetaseme tõus) (Ellen MacArthur ... 2019). Seetõttu on oluline minna üle kestlikule ja ressursitõhusale ringmajandusele, mille eesmärk on siduda majanduskasv lahti esmase toorme kasutamisest ning luua ringne tootmis- ja tarbimissüsteem võimalikult väikeste kadudega (Ringmajanduse valge ... 2022: 1-2). Ringmajandus keskendub toodete elutsükli pikendamisele, jäätmetekke ennetamisele ning kestlike, korduskasutatavate ja ringlussevõetavate lahenduste edendamisele eri sektorites (EK 2020). Ringmajanduse põhimõtete kohaselt tuleb kõik ringlusesse toodud ressursid kasutada läbimõeldult ja vastavalt

tegelikele vajadustele, hoides samal ajal toodete, materjalide ja ressursside väärtust majanduses võimalikult kaua ning minimeerides jäätmeteket (Ellen MacArthur ... 2019).

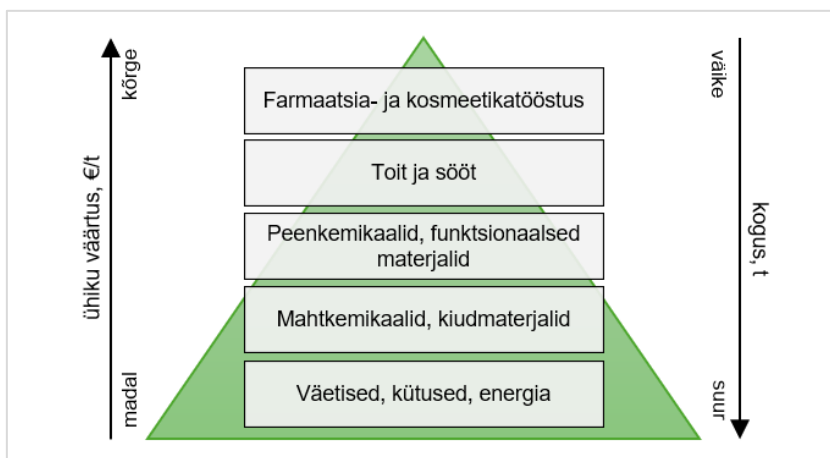
Euroopa Liidu biomajanduse strateegia seab eesmärgiks majanduskasvu toetamise viisil, mis tugevdab sidet majanduse, ühiskonna ja keskkonna vahel. Selle keskmes on kestlik, ringluspõhine biomajandus, mis tugineb kohalikele taastuvatele ressurssidele ning võimaldab samal ajal luua uusi väärtusahelaid ja töökohti maapiirkondades (EK 2018). Strateegia rõhutab vajadust edendada teadus- ja arendustegevust, mis võimaldab väärindada bioloogilisi ressursse senisest tõhusamalt ja keskkonnasõbralikumalt.

Kestlik biomajandus eeldab, et ressursikasutus ja -taaskasutus toimuvad viisil, mis ei kahjusta looduslikke ökosüsteeme, toetavad bioloogilist mitmekesisust ja vähendavad keskkonnamõju, aidates samal ajal tagada sotsiaal-majandusliku heaolu ja keskkonnakvaliteedi ka tulevastele põlvkondadele. Kuna biomajanduse kontseptsioon põhineb ringmajanduse põhimõtetel ja on suunatud kestlikkusele, majandusarengule ning lisandväärtuse tõstmisele, on kasutusele võetud mõiste "ringbiomajandus", mis rõhutab selle interdistsiplinaarset olemust (Ringbiomajanduse teekaart 2023: 3). Ringbiomajandusele omistatakse järjest olulisem roll Euroopa kliima- ja majandusstrateegias, sest see aitab vähendada kasvuhoonegaaside heidet, sõltuvust fossiilsetest ressurssidest ning toetab kestlikku majanduskasvu (European Commission *et al.* 2021: 4).

Eesti biomajanduses on tööjõu tootlikkus madalam kui Lääne- ja Põhja-Euroopa riikides, mis viitab sellele, et bioressursside põhistes sektorites domineerib peamiselt primaarse biomassi tootmine (Porc *et al.* 2024: 16-17). ADDVAL-BIOEC (2021) raportis rõhutatakse, et biomassi kasutamine üksnes toorainena kipub jääma madala lisandväärtusega tegevuseks, samas kui suurem väärtus luuakse valdavalt järgnevates töötlemis- ja väärindamisetappides. Lisandväärtuse suurendamiseks on oluline keskenduda innovatiivsetele tehnoloogiatele ja väärtusahelate mitmekesistamisele, mis võimaldavad bioressursside tõhusamat kasutamist ning tugevdavad biomajanduse konkurentsivõimet (ADDVAL-BIOEC 2021: 28–40).

Lisandväärtuse tõstmisel on oluline mõista, millist rolli mängivad erinevad biotooted biomajanduse väärtusahelas. Sageli esineb biopõhiste toodete mahu ja väärtuse vahel pöördvõrdeline seos ehk mida kõrgem on toote ühikuväärtus, seda väiksem on selle turumaht ning vastupidi (Stegmann *et al.* 2020: 5-6). Seda seost illustreerib nn väärtuse–mahu püramiid,

mille tipus on kõrge ühikuväärtusega, kuid väikese mahuga farmaatsia- ja kosmeetikatööstuse tooted ning alumises osas madala väärtusega, kuid suure mahuga rakendused, näiteks bioenergia (joonis 2). Joller-Vahter *et al.* (2021: 7) sõnul peaks Eesti biomajanduse kontekstis piiratud kohaliku ressursibaasi tõttu eelistama väiksema mahu ja kõrgema lisandväärtusega tooteid.



Joonis 2. Biopõhiste toodete väärtuse-mahu püramiid (autori koostatud, Joller-Vahter *et al.* 2021: 7 põhjal)

Kuna loodusressursid on piiratud ja neid saab kasutada väga erineva lisandväärtusega toodete tootmiseks, on biopõhistes väärtusahelates oluline rakendada kaskaadkasutuse põhimõtet. Kaskaadkasutus tähendab biomassi järjestikkust ehk astmelist kasutamist erinevatel eesmärkidel, aidates sel viisil maksimeerida ressursi väärtust ja vähendada jäätmeteket (Rehberger, Hiete 2020: 2–3; Stegmann *et al.* 2020: 5–6; Joller-Vahter *et al.* 2021: 7). Väärtuse–mahu püramiidi loogikast lähtuvalt tuleks bioressurss esmalt suunata kõrgema taseme rakendustesse ning liikuda seejärel järk-järgult madalama lisandväärtusega kasutusvalade poole (Stegmann *et al.* 2020: 5–6). Kui väärtuslikumad komponendid on eraldatud, saab järelejäänud kõrvalsaadustele otsida rakendusi püramiidi järgmistel tasanditel, suunates alles viimasena energiatootmisse need osad, millel puudub sobiv alternatiivne kasutus (Joller-Vahter *et al.* 2021: 7, 54). Ollakse seisukohal, et kaskaadkasutus avaldab ühelt poolt positiivset mõju keskkonnale, soodustades ressurside säästlikku kasutust, ning teiselt poolt võimaldab suurendada biomassi majanduslikku väärtust kõrgema lisandväärtusega toodete kaudu, mis omakorda tugevdab biomajanduse konkurentsivõimet (Keegan *et al.* 2013: 202–203; Rehberger, Hiete 2020: 6–7).

Zabaniotou (2018: 201–202) sõnul aitavad biorefineerimistehnoloogiad suurendada ressursikasutuse tõhusust ja vähendada jäätmeteket, võimaldades samal ajal biomassist

valmistada mitmesuguseid suurema lisandväärtusega tooteid. Seega on kaskaadkasutuse ja biorefineerimise põhimõtete rakendamine ringbiomajanduse kontekstis oluline, et tagada bioressursside maksimaalne väärindamine viisil, mis toetab nii majanduslikku arengut kui ka loodusvarade säästvat kasutust.

1.2. Lahahein ja selle kasutusvõimalused

1.2.1. Lahahein kui lamminiitude biomass

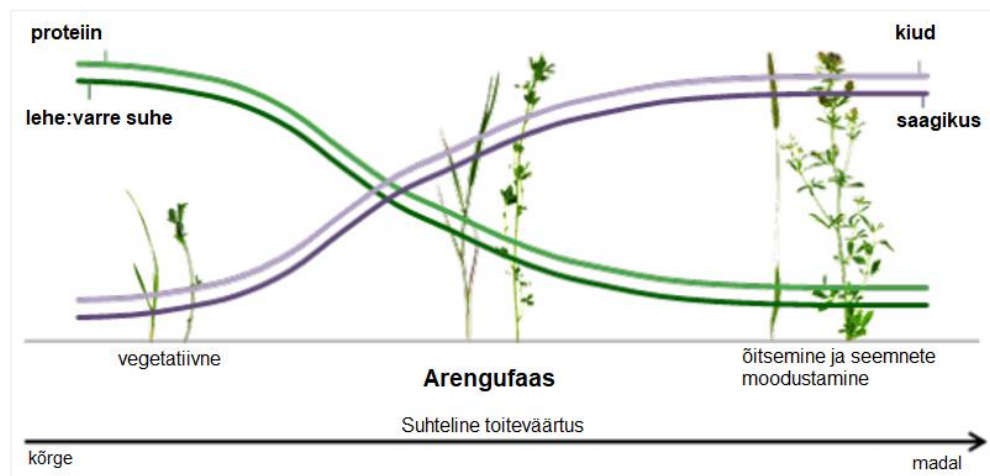
Kirjanduses on heina käsitletud peamiselt rohusöödana. Hein on rohumaadelt saadav haljasmass, mis on konserveeritud aeroobselt ehk kuivatamise teel, tulemuseks pikaajaliselt säiliv koresööt (Kass *et al.* 2021: 105; Older 2011: 105). Eesti keele seletava sõnaraamatu järgi on hein defineeritud kahel viisil: 1) niitudel, põldudel vm kasvav rohi, mida kasutatakse tavapäraselt loomasöödaks; 2) või see sama rohi pärast niitmist ja kuivatamist (EKSS 2009, s. v. hein). Kippa *et al.* (2011: 49) sõnul on lahahein lamminiitudel looduslikult kasvav hein, mida on looduskaitsealistel eesmärkidel vajalik niita. Käesolevas magistritöös kasutatakse mõistet lahahein üldistavalt, viidates lamminiitudel tekkivale rohtsele biomassile sõltumata selle niitmise, säilitusviisi või lõppkasutusest.

Heina kvaliteeti ja toiteväärtust mõjutavad mitmed tegurid, sealhulgas taimiku liigiline koosseis, taime arengustaadium niitmise ajal, kuivatamise ajal valitsenud ilmastikutingimused ning heina ladustamise ja säilitamise viisid (Kass *et al.* 2021: 105). Eesti taimkatte kasvukohatüüpide klassifikatsiooni (Paal 1997) järgi vastavad elupaigatüübile 6450 (Põhjamaised lamminiidud, *Northern boreal alluvial meadows*) niiske ja märja lamminiidu kasvukohatüübid. Lamminiitude taimkatte iseloomustust ja peamisi taimekooslusi on käsitletud lisas 3, kust nähtub, et luhtadel esineb suur liigiline ja koosluseline mitmekesisus. Märjematel aladel domineerivad tavaliselt erinevad tarnad (*Carex spp.*), kastikud (*Calamagrostis spp.*) ja luht-kastevars, samas kui kuivemates osades on levinumad lamba-aruhein, lubikas, harilik kastehein, jusshein ja värvmadar. Need liigid esinevad erinevates kooslustes kas domineerivate (D) või karaktersete (K) liikidena ning kujundavad suuresti lahaheina struktuuri ja koosseisu.

Eesti lamminiitude kujunemist ja iseloomu on käsitlenud Metsoja (2020: 9–10), kelle sõnul on luhad peamiselt sekundaarsed taimkattetüübid, mis on tekkinud inimtegevuse tulemusena primaarsete koosluste, nagu metsade, asemele. Inimene on mänginud otsustavat rolli nende

niidukoosluste kujunemisel, eemaldades puud ja võsa ning jätkates alade hooldamist niitmise teel. Lisaks inimtegevusele on lamminiitude arengut mõjutanud ka suured rohusööjad nagu põdrad, kes piiravad puittaimede kasvu, ja koprad, kes loovad üleujutusalasid, edendades sellega niidukoosluste teket ja säilimist. Luhtadel kujunes esialgne niidutaimkate algselt metsade maharaiumisest asulate läheduses, hiljem laienes see koos karjakasvatusega ka kaugematesse piirkondadesse. Tänapäeval sisaldab luhataimestik mitmeid liike, mis on levinud ka lammimetsades, lammitammikutes ja kaldalepikutes, sealhulgas sellised taimed nagu päideroog, sookastik, varsakabi ja suur kastehein. Samuti esineb lamminiitudel madalsoode ja pajustike liike nagu soopihl ja ubaleht. Seega luhtadel esineb väga palju erinevaid taimekooslusi ning tüpoloogiliselt on luhad vägagi mitmekesised. See mitmekesisus johtub otseselt luhtade varieeruvatest niiskustingimustest, mis omakorda on seotud luha (mikro)reljeefiga. Lamminiitude kõige iseloomulikumaks tunnuseks ongi perioodilised üleujutused. Üleujutusega kantakse luhale alluviaalsed setted, mille erinev jaotumine luhal tingib ka muldade tsonaalsuse, vööndilisuse. Samas võivad luhad, eriti oma märjemas osas, olla suhteliselt liigivaesed.

Kass *et al.* (2021: 105) toovad esile, et pärandniitude heina toiteväärtus on madalam võrreldes kultuurrohumaadelt varutud heinaga, kuna reeglina niidetakse pärandniitudel hiljem. Joonis 3 illustreerib taimede arengufaasi mõju nende toiteväärtusele ja saagikusele, samuti on näha, et taimede mass ja toiteväärtus on omavahel pöörvõrdelises seoses.



Joonis 3. Arengufaasi mõju heintaimede toiteväärtusele ja saagile (autori kohandused, Pomerleau-Lacasse *et al.* 2017: 3)

Taimede kasvuperioodi kestvuse pikenedes suureneb küll üldine biomassisaak, kuid vähenevad järk-järgult sööda toiteväärtuse põhinäitajad nagu proteiinisaldus ja seeduvus, kuna taime vananedes suureneb kiudainete osakaal ja lignifitseerumine (Pomerleau-Lacasse *et al* 2017: 3; Tamm 2017: 5; 10; 55). See tähendab, et kuigi hilisem niitmine võib anda suurema koguse biomassi, on selle väärtus loomasöödana madalam, mis omakorda vähendab nõudlust luhahainale loomasöödana (Kippa *et al.* 2011: 49).

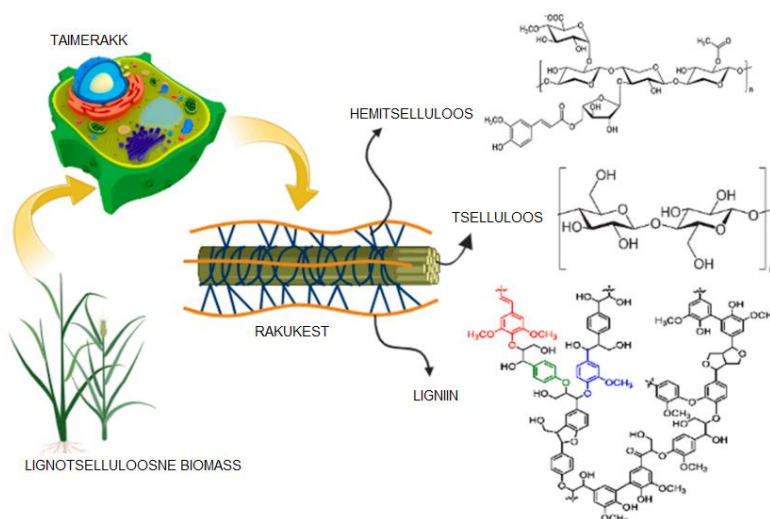
Seega võib luhahaina pidada liigiliselt mitmekesiseks biomassiks, mille koosseis varieerub nii piirkonniti kui ka niiskusrežiimi, mullastiku ja hooldusrežiimi järgi. Samas võib Alam-Pedja pärandniitudelt kogutava luhahaina väärtus loomasöödana olla sageli piiratud, kuna looduskaitseelised niitmispiirangud võimaldavad heina koguda alles pärast taimiku toiteväärtuse langust.

1.2.2. Luhahain kui lignotselluloosne biomass

Ehkki luhahaina käsitletakse traditsiooniliselt rohusöödana, on selle potentsiaal oluliselt laiem, kui seda vaadelda biokeemilisest vaatenurgast. Nimelt on luhahain keemiliselt tüüpiline lignotselluloosne biomass (*lignocellulosic biomass*, edaspidi LCB), mis koosneb peamiselt kolmest struktuursest biopolümeerist: tselluloosist, hemitselluloosist ja ligniinist (Hasanov *et al.* 2022: 2). Lisaks põhikomponentidele esineb LCB-s väiksemas koguses valke, lipiide, pektiine, ekstraktiivaineid ja mineraale, mille sisaldus varieerub sõltuvalt biomassi allikast ja kasvutingimustest (Periyasamy *et al.* 2022: 1135).

LCB põhikomponendid – tselluloos, hemitselluloos, ligniin – on omavahel tihedalt seotud ning moodustavad taimeraku seinte mehaanilise ja keemilise karkassi (joonis 4). Tselluloos toimib skeletina, hemitselluloos ühendab tselluloosikiude teiste ühenditega ning ligniin tugevdab kogu struktuuri, lisades sellele jäikust, vett tõrjuvaid omadusi ja kaitset lagunemise eest (Brienza *et al.* 2024: 39; Kaur *et al.* 2024: 3; Hasanov *et al.* 2020: 4). Üldiselt sisaldab LCB umbes 25–50% tselluloosi, 15–35% hemitselluloosi ja 10–30% ligniini (Hasanov *et al.* 2022: 2; Segers *et al.* 2024: 3733; Kaur *et al.* 2024: 3). Nende komponentide tegelik sisaldus võib aga oluliselt varieeruda sõltuvalt biomassi liigist, kasvukeskkonnast, kogumisajast ja ka rakendatud töötlemisviisidest (Tanis *et al.* 2024: 2). Võrreldes puiduga on rohtse biomassi koostis üldiselt ühtlasem, kuna see koosneb valdavalt tselluloosist ja hemitselluloosist ning sisaldab vähem

ligniini (Karo et al. 2021: 43; Brienza *et al.* 2024: 39). Mohapatra *et al.* (2019: 396) toovad esile, et kõrrelistes (*grasses*) varieerub LCB komponentide sisaldus järgmiselt: tselluloos 29–50%, hemitselluloos 25–43% ja ligniin 5–18%. Kuna luhahain koosneb valdavalt rohtsetest ja kõrrelistest taimedest, võib eeldada, et ka selle biokeemiline koostis jääb ligikaudu samadesse piiridesse.



Joonis 4. Lignotselluloosse biomassi molekulaarne struktuur (Kaur *et al.* 2024: 3)

Märkus: Ligniini struktuuris esinevad kolm peamist monolignooli/ fenüülpropaanühendit: p-kumarüülalkohol (H-ühikud) – roheline, koniferüülalkohol (G-ühikud) – sinine ja sinapüülalkohol (S-ühikud) – punane.

Kuigi tselluloos, hemitselluloos ja ligniin esinevad lignotsellulooses biomassis koos, on need keemiliselt väga erinevad. Tselluloos ja hemitselluloos on polüsahhariidid, mis koosnevad pikematest sirge või hargnenud ahelaga suhkru monomeeridest ning neid saab erinevate protsesside abil muundada lihtsuhkruteks, mistõttu kasutatakse neid sageli etanooli jt biokütuste tootmise lähteainena (Norfarhana *et al.* 2024: 1). Ligniin on seevastu keeruka struktuuriga aromaadne polümeer, mis koosneb fenüülpropaanühikutest ning on biokeemiliselt märksa vastupidavam ja raskemini lagundatav (Kaur *et al.* 2024: 2; Hasanov *et al.* 2020: 3).

Ligniini täpsem koostis sõltub suurel määral biomassi tüübist. Nagu joonisel 4 näidatud, koosneb ligniin kolmest peamisest monolignoolist ehk fenüülpropaanühikust: p-kumarüülalkoholist (H-ühikud), koniferüülalkoholist (G-ühikud) ja sinapüülalkoholist (S-ühikud), mis on joonisel vastavalt tähistatud rohelise, sinise ja punase värviga (Kaur *et al.* 2024: 3). Rohtses biomassis domineerivad üldjuhul H-ühikud, lehtpuidus esinevad enamasti S-ühikud

ja okaspuidus G-ühikud (Segers *et al.* 2024: 3734; Rashid *et al.* 2018: 1103). Need erinevused mõjutavad ligniini töötlemise keerukust ja sobivust erinevate väärandamisviiside jaoks.

Ligniin on ainus looduslik biopolümeer, mis sisaldab aromaatsid (fenoolseid) struktuurielemente ehk nn aromaatsed tuuma – see on keemiline ehitusplokk, mida tavaliselt saadakse naftast (Khan *et al.* 2022: 2; Ragauskas *et al.* 2014: 153). Aromaatsed ühendid, mida on seni toodetud peamiselt fossiilkütustest, moodustavad suure osa keemiatööstuse põhilistest lähteainetest (Bajwa *et al.* 2019: 211). Ligniinist saadavad ühendid ja vaheproduktid on rakendatavad mitmetes tööstussektorites, sealhulgas biopõhiste polümeeride, liimide, vaikude, farmaatsiatoodete, aga ka süsinikmaterjalide nagu aktiivsöe ja süsinikkiudude tootmisel (Ragauskas *et al.* 2014: 153; Bajwa *et al.* 2019: 210). Peale selle on ligniinil kasutusvõimalusi bioenergia tootmises, kus see võib asendada fossiilseid lähteaineid nt vedelkütuste valmistamisel (Nadányi *et al.* 2022: 2; Kocaturk *et al.* 2023: 5). Ligniin, kui taimse päritoluga ja taastuv ressurss, pakub seega paljulubavat võimalust asendada naftapõhiseid aromaatsid ühendeid ning toetada ringbiomajanduse arendamist.

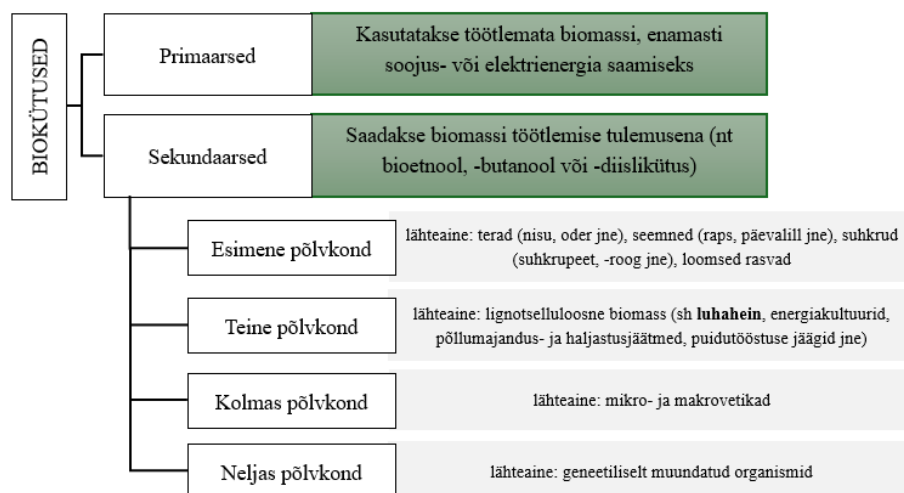
1.2.3. Luhaheina väärandamisvõimalused

Ajalooliselt on luhtasid kasutatud eelkõige heinamaadena, ühelt poolt seetõttu, et luhad olid tänu suurele saagikusele hinnatuimad söödavarumisalad ja teisalt asusid luhad suurelt jaolt taludest eemal, mistõttu oli karjatamine keerulisem (Metsoja 2020: 11, 38). Tulenevalt põllumajanduslike majapidamiste struktuuri muutusest ei ole luhaheinale enam traditsioonilist nõudlust loomasöödana, sest suuremad tootjad kasutavad söödavarumiseks tüüpiliselt kultuurrohumaid ning väiketalusid on jäänud vähemaks (Melts 2014: 62). Samas on Metsoja (2020: 37–38) hinnangul viimastel kümnenditel järjest enam hakatud luhtadel ka karjatama ning ideaalis võiks hooldusaladel niitmist ja karjatamist vaheldada. Tänapäeval kasutatakse luhaheina tüüpiliselt lihavede söödaks, kuid see sobib ka hobustele ja lammastele, madalama kvaliteediga hein leiab enamasti kasutust allapanuna (Metsoja 2020: 45).

Väikeses mahus leiab Eestist näiteid selle kohta, kuidas on leitud viise anda pool-looduslikelt kooslustelt kogutud heinale lisandväärtust. Näiteks pakuvad Eesti turul mitu ettevõtet pressitud heinagraanuleid ehk heinapelleteid või väikepakendites palliheina, mille väärtuspakkumine on peamiselt suunatud hobusekasvatusele (Maaritsa Graanul s. a.; Imperial Equine ... s. a.;

Biohansa s. a.). Looduskaitsealade hooldamise käigus kogutud heinast valmistatakse komposti ja heina kasutatakse katteviljeluses (Heinamaa – mahedad ... s.a.).

Tulenevalt vajadusest asendada fossiilsed ressursid taastuvate alternatiividega on üha enam hakatud uurima lignotselluloosse biomassi potentsiaali bioenergia tootmiseks (nt Rocha-Meneses 2020; Koppel *et al.* 2023; Sepp *et al.* 2024). Biokütused on mistahes taimsest või loomsest biomassist toodetud kütused, mille peamiseks eeliseks fossiilkütuste ees on see, et need tekitavad vähem kasvuhoonegaase ning nende tootmiseks kasutatakse taastuvaid toormaterjale (Rial 2024: 2). Biokütused jagunevad primaarseteks ja sekundaarseteks (joonis 5). Primaarkütused toodetakse biomassist looduslikul kujul ja neid kasutatakse peamiselt soojuse ning elektrienergia tootmiseks. Eestis kasutatakse näiteks Lihula katlamajas luhahaina soojusenergia tootmiseks (Lihula soojus 2023). Sekundaarsed biokütused saadakse näiteks biomassi termokeemilise või bioloogilise töötlemise tulemusel ning nende hulka kuuluvad ka nn teise põlvkonna biokütused (Raud *et al.* 2019: 45).



Joonis 5. Biokütuste klassifikatsioon (autori koostatud Raud *et al.* 2019: 45–46 ja Rial 2024: 2–3 põhjal)

Luhahein kuulub lignotselluloosse biomassi hulka ning sellest on võimalik toota teise põlvkonna biokütuseid, nt bioetanooli, mis erinevalt esimese põlvkonna toormetest ei konkureeri otseselt toidutootmisega (Sjulander, Kikas 2020: 1; Tutt 2015: 70). Taimede kasvamisel muundatakse fotosünteesi käigus süsihappegaas (CO₂) orgaaniliselt seotud süsinikuks, LCB-st toodetud kütuse põletamisel toimub sisuliselt fotosünteesi pöördreaktsioon, seega ei kaasne olulist

muutust atmosfääri CO₂ kogustes (Velling, Vaasmaa 2013). Seega peetakse teise põlvkonna biokütuseid sageli kliimanetraalseteks.

Tabel 1 koondab valiku varasematest uuringutest, milles on käsitletud rohtse biomassi, sealhulgas poollooduslikelt kooslustelt pärineva biomassi väärindamise võimalusi. Tabelist 1 on näha, milliseid LCB allikaid erinevates uuringutes kasutati ja millistele väärindamissuundadele keskenduti. Täpsem teave selle kohta, mida konkreetsetes uuringutes analüüsiti ja millised olid olulisemad järeldused käesoleva töö seisukohast, on esitatud lisa 4.

Tabel 1. Rohtse biomassi väärindamise suunad varasemates uuringutes (vt täpsemalt lisa 4)

Autor(id), aasta	LCB allikas				Fookuses olnud väärindamissuund
	1	2	3	4	
Ding <i>et al.</i> 2024		X	X		valgu ekstraheerimine, paberitootmine, biosöe tootmine
Heinsoo <i>et al.</i> 2010	X	X			bioenergia - põletamine, biogaas
Jørgensen <i>et al.</i> 2022			X		<i>green biorefinery</i> - valgukontsentraat; jääkfraktsioonid
Kikas <i>et al.</i> 2016			X		bioenergia - etanool, biogaas
Melts <i>et al.</i> 2013	X	X			bioenergia - biogaas, põletamine
Rocha-Meneses 2020			X	X	bioenergia - etanool, biometaan
Tutt 2015	X		X		bioenergia - etanool
Tutt, Olt 2010	X	X	X		bioenergia - etanool
Zobel 2016	X				bioenergia - põletamine katlas või KTJ-s

LCB allikas: 1 - luhad e lamminiidud (LoD 6450); 2 - PLK (v.a. lamminiidud); 3 - rohumaad, sh püsirohumaad, kultuurniidud, energiakultuurid; 4 - põllumajanduse kõrvalsaadused, nt põhk, silojäägid jm

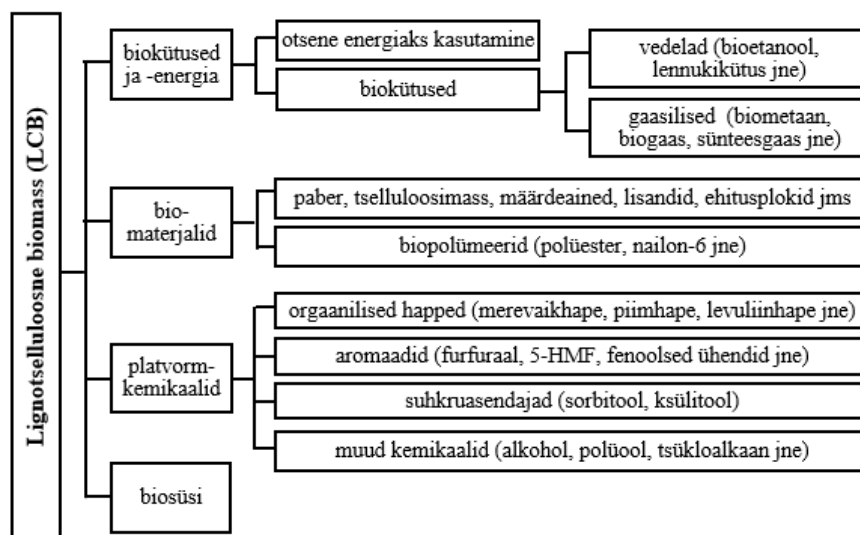
Tabelist 1 on näha, et konkreetsetelt lühaheina väärindamisele keskenduval teadusuuringul on Eestis tehtud vähe ning need pärinevad peamiselt umbes kümnendi tagusest ajast. Põhiliselt on uuritud poollooduslikes kooslustes tekkiva biomassi energiaks kasutamise võimalusi, sealhulgas selle otsest põletamist katlas või koostootmisjaamas (KTJ) ning sobivust teise põlvkonna biokütuste, näiteks bioetanooli, biogaasi ja biometaan tootmiseks.

Viimastel aastatel on rahvusvaheliselt hakatud rohkem tähelepanu pöörama rohtse biomassi väärindamisele mitmesugustel eesmärkidel. Näiteks analüüsisid Ding *et al.* (2024) mitteintensiivses kasutuses olevatelt rohumaadelt kogutud biomassi väärindamist kolme erineva ringbiomajanduse väärtusahela kaudu: valgu ekstraheerimine, paberitootmine ja biosöe tootmine. Jørgensen *et al.* (2022) käsitlesid rohumaade biomassi kasutusvõimalusi nn *green biorefinery* lähenemises ning tõid esile, et hilises staadiumis varutud ja väetamata rohumaadelt pärit biomassi puhul on madala proteiinisalduse tõttu mõistlik keskenduda pigem kiuosa väärindamisele, mitte valgufraktsioonile.

Lisaks on Eestis läbi viidud mitmeid laiapõhjalisi analüüse, mis käsitlevad laiemalt bioressursside, muuhulgas poollooduslike koosluste, püsirohumaade ja põllumajanduslike kõrvalsaaduste potentsiaali bioenergia tootmises (nt ADDVAL-BIOEC 2021; Sepp *et al.* 2024). Kuigi need uuringud ei keskendu konkreetselt lühaheinale või üksikutele väärindamistehnoloogiatele, annavad nad olulise aluse kohaliku biomassi kasutuselevõtu strateegia planeerimiseks.

1.2.4. Lignotselluloosse biomassi väärindusvõimalused

Lignotsellulooset biomassi on võimalik mitmesuguste meetodite abil muundada erinevateks lõpptoodeteks, mis jaotuvad nelja kategooriasse: biokütused ja -energia, biomaterjalid, platvormkemikaalid ning biosüsi (joonis 6). Tuleb siiski arvestada, et paljud lõpptooted ei kuulu rangelt ainult ühte kategooriasse. Näiteks on biomaterjalide tootmisel sageli lähteaineteks keemilised ühendid, mis kuuluvad platvormkemikaalide hulka. Samamoodi võib biosüsi toimida nii energiaallikana (tahke kütus) kui ka materjalina, näiteks süsinikupulbrina erinevates tööstuslikes rakendustes. (Segers *et al.* 2024: 3734) Seega on LCB-l mitmekesine rakendatavus, kus energia-, materjali- ja keemiatooted on omavahel tihedalt põimunud.



Joonis 6. Lignotselluloosse biomassi väärindamisvõimalused lõpptoodeteks (Segers *et al.* 2024: 3734)

Selleks, et LCB-st oleks võimalik toota mitmesuguseid funktsionaalseid lõpptooteid (joonis 6), tuleb biomassi esmalt sobival viisil töödelda. Laias plaanis saab LCB-d väärindada kahel viisil: otse või fraktsioneerituna. Otsese kasutamise alla kuuluvad näiteks põletamine (*combustion*),

pürolüüs (*pyrolysis*) ja gaasistamine (*gasification*), mille puhul biomassi keemiline koostis töötamise käigus oluliselt ei muutu (Banerjee *et al.* 2024: 16393). Fraktsioneerimise puhul jagatakse biomass esmalt selle põhikomponentideks – tselluloosiks, hemitselluloosiks ja ligniiniks –, mida saab edasi väärintada sihtotstarbeliselt erinevates keemilistes või bioloogilistes protsessides (FitzPatrick *et al.* 2010: 8918). Huang *et al.* (2008: 5) rõhutavad, et just fraktsioneerimine on eeltingimus biomassi muundamiseks kõrgema lisandväärtusega toodeteks. Sama toovad esile ka Pin *et al.* (2021: 2), kelle hinnangul ei tohiks biomassi käsitleda üksnes energiaallikana, vaid tuleks senisest enam keskenduda selle kasutamisele keemiatööstuse ja biomaterjalide lähtena.

Seoses vajadusega asendada fossiilsel toorainel põhinevad tooted jätkusuutlikumate alternatiividega on ELi biomajanduse strateegia seadnud eesmärgiks biorafineerimistehaste arendamise kogu Euroopas (EK 2022: 20). Rahvusvahelise Energiaagentuuri (IEA) määratluse kohaselt tähendab biorefineerimine biomassi jätkusuutlikku töötlemist erinevateks toodeteks ja energiaks. Biorafineerimistehas kasutab mitmesuguseid tehnoloogiaid biomassi lahutamiseks selle koostisosadeks, mida seejärel töödeldakse edasi väärtuslike biotoodete, biokütuste ja kemikaalide valmistamiseks (IEA 2013: 7). Sarnaselt nafta rafineerimisele ühendab biorafineerimistehase kontseptsioon erinevad tööstusetapid ühtsesse süsteemi, mis võimaldab maksimeerida ressursi kasutust ning toetab säästva arengu edendamist (Mohammad *et al.* 2024: 2; IEA 2013: 7). Koppel *et al.* (2023: 74) sõnul seisneb Eesti biorafineerimise potentsiaal eelkõige kohaliku toorme väärintamises ning ekspordis kõrgema lisandväärtusega toodetena.

Lignotselluloosse biomassi väärintamine on varasemalt keskendunud peamiselt sellest saadava tselluloosi osa kasutamisele, näiteks paberi või bioetanooli tootmiseks, samas on ligniini osa, mis on LCB komponentidest suurima süsinikusisaldusega, olnud pigem alaväärtustatud (Korányi *et al.* 2020: 1). Pikka aega peeti ligniini peamiselt tselluloositehase jääkproduktiks ja selle tüüpiline rakendus oli primaarenergia tootmine (st kateldes põletamine) (Stewart 2008: 202). Tänapäeval peetakse ligniini aga atraktiivseks ressursiks, mida saab muuta mitmesugusteks lisandväärtusega toodeteks (Bajwa *et al.* 2019: 1). Viimastel kümnenditel on ligniinipõhised teadusuuringud ja uute toodete arendamine biorafineerimistehaste kontseptsiooni raames märkimisväärselt kasvanud. John *et al.* (2022: 1-2) rõhutavad, et ligniini muundamine mitmesugusteks funktsionaalseteks toodeteks on kooskõlas ringbiomajanduse

põhimõtetega, kuna see vähendab toormaterjalide kasutust ja toetab jäätmete taaskasutust. Viimastel aastakümnetel on paljulubavaks strateegiaks kujunenud „ligniini esimesena” (*lignin-first*) lähenemine, mille puhul eraldatakse lignotselluloosist biomassist esmalt ligniini, enne kui keskendutakse süsivesikute väärimisele (Korányi *et al.* 2020: 1). Selles lähenemisviisis on keskne tähelepanu ligniini eraldamisele sellisel viisil, mis säilitab süsivesikud nende loomulikus vormis (Abu-Omar *et al.* 2021: 262) ja võimaldab seeläbi toota ühtlasema kvaliteediga lõppsaadusi (Luo *et al.* 2023: 2). Majanduslikult optimaalne lähenemine näeb ette, et biomassist eraldatakse esmalt kõrgeima väärtusega komponendid, millele järgneb järjest madalama väärtusega fraktsioonide kasutamine (Koppel *et al.* 2023: 74). See põhimõte haakub ka käesoleva töö fookusega, kus käsitletakse lühaheinast ligniini eraldamise võimalusi kui üht võimalikku suunda kohaliku LCB väärimisel.

1.2.5. Lignotselluloosse biomassi eeltöötlusmeetodid

Valdavalt ollakse seisukohal, et sõltumata sellest, kas LCB-d kasutatakse bioekütuste või kemikaalide valmistamiseks, on tõhusa väärimise eelduseks sobiv eeltöötlusprotsess, mis muudab biomassi struktuuri ja parandab selle töödeldavust (Usmani *et al.* 2020; John *et al.* 2022; Periyasamy *et al.* 2022; Sjulander *et al.* 2023; Shafiei-Alavijeh *et al.* 2024). Lignotselluloosse biomassi eeltöötluseks on väga palju erinevaid võimalusi. Tavaliselt liigitatakse eeltöötlusmeetodid nelja kategooriasse: bioloogilised, füüsikalised, keemilised ja füüsikalise-keemilised (joonis 7).

Bioloogiline	Füüsikaline	Keemiline	Füüsikalise-keemiline
• mikroorganismid • ensüümid	• purustamine/peenestamine (<i>milling</i>) • kiiritamine (<i>microwave irradiation</i>)	• happed (<i>acid pretreatment</i>) • alused (<i>alkali pretreatment</i>) • orgaanilised lahustid (<i>organosolv</i>) • ioonsed vedelikud (<i>ionic liquids</i>)	• aurlõhkamine (<i>steam explosion</i>) • AFEX (<i>ammonia fiber expansion</i>) • lämmastiklõhkamine • CO₂ lõhkamine • torrefitseerimine (<i>torrefaction</i>)

Joonis 7. Valik lignotselluloosse biomassi eeltöötlusmeetodeid (autori koostatud, Aftab *et al.* 2019; Sjulander *et al.* 2023: 929 põhjal)

Bioloogilised eeltöötlusmeetodid kasutavad LCB struktuuri avamiseks ensüüme ja mikroorganisme, füüsikaliste meetodite puhul rakendatakse nt füüsilist jõudu või mikrolaineid,

keemilise eeltöötuse korral kasutatakse kemikaale, nt happed, leelised, orgaanilised lahustid ja ioonsed vedelikud ning füüsikalise-keemilised eeltöötlusmeetodid ühendavad keemiliste ja füüsikaliste jõudude eelised, et avada biomassi struktuur (Sjulander *et al.* 2023: 929).

Biomassi eeltöötuse peamine eesmärk on lignotselluloosi struktuuri muutmise, et parandada selle ensümaatilist seeduvust (Sjulander *et al.* 2023: 928), kuid lisaks on veel mitmeid tegureid, millega tuleks eeltöötusmeetodi valikul tähelepanu pöörata. Sjulander ja Kikas (2020) toonitavad, et eeltöötusmeetodi valikul tuleb arvestada erinevate inhibiitoritega, mis võivad oluliselt vähendada järgnevate bioetanooli tootmisprotsesside efektiivsust. Peamiselt mõjutavad inhibiitorite teket näiteks kõrgete temperatuuride või reaktiivsete kemikaalide kasutamine eeltöötusel, aga ka pikk inkubatsiooni- ehk eeltöötusaeg (Sjulander, Kikas 2020: 2). Usmani *et al.* (2020: 3-4) soovib arvestada sellega, et mõne meetodi puhul võib eeltöötuse käigus tekkida toksilisi ühendeid, mis nõuab lisaprotsessi ehk detoksitseerimist, mis suurendab tootmisprotsessi kogukulusid. Enamik eeltöötusmeetodeid kasutavad LCB struktuuri avamiseks tugevaid kemikaale, nagu väävelhape ja ammoniaak, mis ei ole keskkonnasõbralikud ja võivad põhjustada erinevaid riske, mis ohustavad töötajate tervist ning nõuavad spetsiaalseid kaitsevahendeid ja seadmeid (Sjulander *et al.* 2023: 928). Usmani *et al.* (2020: 1) on välja toonud, et paljude eeltöötusmeetodite puuduseks on see, et nad on madala saagisega või põhjustavad mürgiseid kõrvalsaadusi. John *et al.* (2022: 2) sõnul on eeltöötuse efektiivsuse saavutamiseks olulised kolm aspekti: 1) protsess peab olema kulutõhus; 2) see peab võimaldama suures osas eraldada lignotselluloosse materjali eraldi kasutatavateks fraktsioonideks; 3) ning tooraine ettevalmistamise etapid enne eeltöötust, nagu suuruse vähendamine, peaksid olema minimaalsed. Selleks, et lignotsellulooset biomassi oleks võimalik vedelkütuste, biokemikaalide või biopõhiste materjalide allikana laialdasemalt kasutusele võtta, peaks eeltöötus olema kuluefektiivne (Brandt-Talbot *et al.* 2017: 3078). Siiani ei ole välja töötatud eeltöötusmeetodit, mis oleks üheaegselt nii tehniliselt efektiivne, majanduslikult soodne kui ka keskkonnasõbralik ning iga meetodil puhul saab esile tuua arendamist vajavaid külgi (Sjulander *et al.* 2023: 929). Seega ideaalis võiks eeltöötusprotsess olla võimalikult kiire, madalatel temperatuuridel ning selle käigus ei tohiks tekitada toksilisi ega ka järgnevaid protsesse pidurdavaid/ takistavaid ühendeid ja peale selle peab olema ka majanduslikult jätkusuutlik.

Oma koostise ja struktuuri tõttu lahustub ligniin enamikes tavalistes lahustites halvasti, kuid paljulubava lahendusena on välja pakutud ioonseid vedelikke (Norfarhana *et al.* 2024: 1). Ioonseid vedelikud on näidanud erinevatest biomassi allikatest pärit LCB töötlemisel väga häid tulemusi. Brandt-Talbot *et al.* (2017: 3078–3079) toovad esile, et ligniini ekstraheeriva lahustiga fraktsioneerival eeltöötlusel on mitmeid eeliseid ning ligniini edasine väärtustamine on lihtsam.

1.2.6. Ioonsete vedelike kasutamine lignotselluloosse biomassi väärimisel

Ioonseid vedelikud (*ionic liquids*, IL) on soolad, mis on alla 100°C temperatuuril vedelas olekus (Brienza *et al.* 2024: 53), kusjuures paljud levinud IL-id on vedelad juba toatemperatuuril (Colussi *et al.* 2023: 2; Swami *et al.* 2024: 12876).

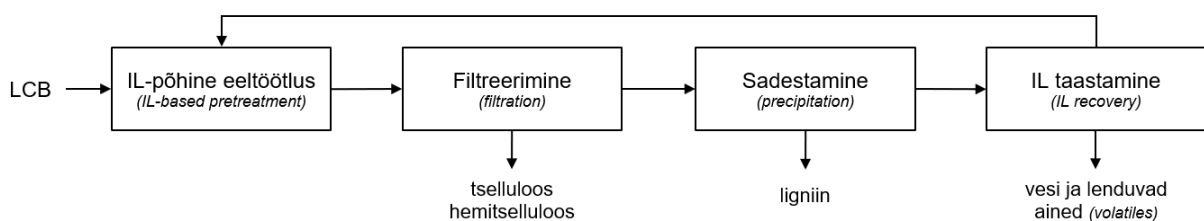
IL-eeltöötlus lignotselluloosse biomassi puhul toimub sageli atmosfäärirõhul ja madalamatel temperatuuridel võrreldes traditsiooniliste keemiliste meetoditega (Norfarhana *et al.* 2024: 6), mis omakorda võimaldab vähendada energiakulu (Achinivu 2018: 2; Hasanov *et al.* 2020: 12). Tänu nende madalale aururõhule ja keemilisele stabiilsusele on ioonsete vedelike kasutamine LCB väärimisprotsessides atraktiivne (Palomar *et al.* 2024: 1672).

Ioonseid vedelikud koosnevad erinevatest katioonidest ja anioonidest, mida on võimalik omavahel kombineerida, tänu sellele saab edukalt reguleerida vedeliku erinevaid omadusi, näiteks lahustuvusvõimet, hüdrofoobsust, polaarsust jm (Tanis *et al.* 2024: 10). Lahusti võimekus ligniini lahustamisel sõltub suurel määral katiooni ja aniooni kombinatsioonist (Amini *et al.* 2021: 7). Lisaks katioonidele ja anioonidele mõjutavad IL ja biomassi vahelisi koostoimeid eeltöötamise aeg ja temperatuur (Aftab *et al.* 2019: 12). Sisuliselt konkureerivad ioonseid vedelikud lignotselluloosi komponentidega vesiniksideme pärast ja selle tulemusena toimuvad biomassi struktuuris katkestused ehk struktuur lõhustub (Aftab *et al.* 2019: 11). Tänu sellele omadusele soodustavad ioonseid vedelikud ensümaatilist hüdrolyüüsi (Norfarhana *et al.* 2024: 2), mis on oluline etapp LCB-st etanooli tootmisel. Peale selle on ioonseid vedelikke võimalik disainida selliselt, et nad suudaksid selektiivselt eraldada ligniini teistest biomassi komponentidest, mistõttu nimetatakse IL-e tihti „disainerlahustiteks“ (Colussi *et al.* 2023: 2).

Ioonseid vedelikud liigitatakse tüüpiliselt nende keemilise struktuuri alusel protoonseteks (*protic ionic liquids*, PIL) ja mitte-protoonseteks (*aprotic ionic liquids*, AIL) ioonvedelikeks.

Magistritöö autor on lissasse 5 koondanud erinevate autorite poolt välja toodud protoonsete ja mitte-protoonsete ioonvedelike peamised erinevused ning nende eelised ja puudused seoses LCB-st ligniini eraldamisega. PIL ja AIL erinevus seisneb peamiselt Brønstedti prootoni olemasolus või puudumises vedeliku struktuuris – kui AIL-id on täielikult ioonsed vedelikud, siis PIL-id sisaldavad lisaks ioonidele ka prootoneid, mis võimaldavad neil moodustada vesiniksidemeid ja selektiivselt mõjutada LCB komponentide lahustamist. PIL-ide süntees on üldjuhul lihtsam, nad põhinevad odavamatel ja kättesaadavamatel lähteainetel ning nende taaskasutamine ja regenereerimine on sageli tehniliselt vähem keerukas. Tänu nendele omadustele sobivad PIL-id eriti hästi ligniini selektiivseks eraldamiseks. (lisa 5)

Ioonsete vedelike abil LCB eeltöötlemisel on välja kujunemas kaks peamist strateegiat: (1) kogu biomassi, sealhulgas kristalse tselluloosi lahustamine, mis põhineb varasematel IL-dega tselluloosi lahustamise uuringutel; (2) biomassi fraktsioneerimine, mille käigus lahustatakse ligniin ja hemitselluloos, jättes tselluloosi tahke jäägina alles (nn *ionoSolv*-protsess) (Brandt-Talbot *et al.* 2017: 3079). Fraktsioneerimise strateegia sobib hästi juhtudel, kus eesmärgiks on ligniini selektiivne eraldamine viisil, mis säilitab selle keemilised omadused edasiseks väärimdamiseks ning võimaldab samal ajal hoida tselluloosi struktuuri puutumatusena (joonis 8).



Joonis 8. Plokkskeem ioonsetel vedelikel põhinevast lignotselluloosse biomassi eeltötlusprotsessist koos ioonvedeliku taaskasutusega (Palomar *et al.* 2024: 1719, autori kohandustega)

Joonisel 8 kujutatud protsessis toimub pärast eeltötlust fraktsioonide eraldamine (filtreerimine), mille tulemusena eraldatakse tahke fraktsioonina tselluloos ja osa hemitselluloosist ning vedelasse faasi jääb ioonvedelikus lahustunud ligniin. Ligniini taastamiseks lisatakse IL+ligniini-segule vastulahustit, mille abil ligniin sadestub ning pärast seda toimub ioonvedeliku taastamine, mille tulemusena saab vedelikku taaskasutada järgmistes tsüklites. Selline lähenemine vähendab protsessijääkide hulka ja võimaldab lahustite korduvat kasutamist (Palomar *et al.* 2024: 1719).

Varasemates uuringutes on protoonseidioonvedelikke (PIL) edukalt kasutatud ligniini selektiivseks ekstraheerimiseks lehtpuu biomassist (Hasanov *et al.* 2022), okaspuu biomassist (Khan *et al.* 2022) ja rohtsest biomassist, näiteks suhkruroo bagassist (Achinivu 2018). Nende uuringute tulemused näitavad, et PIL-ide abil on võimalik lignotselluloosest biomassist edukalt ligniini eraldada, säilitades seejuures valdav osa tselluloosist tahkes fraktsioonis. Peale selle toodi esile, et PIL-idega saab ligniini eraldada suhteliselt madalatel temperatuuridel ja ilma intensiivsete keemiliste tingimusteta, mis aitab vähendada kogu protsessi energiakulu ja lihtsustab lahusti taaskasutamist. Siiski tuleb rõhutada, et PIL-ide rakendamine tööstuslikus mahu on veel varajases arenguetapis ning nende tehnoloogilise valmiduse tase (TVT) vastab valdavalt laborimastaabis katsetuste tasemele TVT 3–4 (Eesti Teadusagentuur 2019).

Kuigi luhahain kuulub samuti lignotselluloosse biomassi hulka, erineb selle keemiline koostis ja struktuur teataval määral varasemalt sellistes protsessides uuritud biomassiallikatest. Seetõttu on vajalik viia läbi sihipärased laboratoorsed katsed, et hinnata PIL-ide sobivust ja eraldamise efektiivsust just luhahaina puhul. Siiski võib varasemate uuringute tulemuste põhjal eeldada, et tänu biomasside teatud struktuurilisele ja koostiselisele sarnasusele võiks PIL-ide kasutamine luhahaina väärindamisel anda sarnaseid positiivseid tulemusi.

1.3. Biomassi väärindamise majanduslik kontekst

1.3.1. Pärandniitude majandamise kuluarvestuse alused

Pärandniitude hooldamine niitmise teel koosneb mitmest järjestikkusest mehhaniseeritud tegevusest ning iga tööprotsessi jaoks kasutatakse spetsiifilist tehnikat, mille kasutamisega kaasnevad kulud, mida on võimalik analüüsida ja hinnata ettevõtte kuluarvestuse kaudu. Kuluarvestus seob endas elemente nii finants- kui ka juhtimisarvestusest: ühelt poolt on see seotud aruandekohustuse täitmisega väliskeskkonna ees, teiselt poolt sisemiselt suunatud otsustusprotsessidega (Kaplan, Cooper 2002: 18; Voo 2013). Efektiivseks majandamiseks peab kuluarvestus võimaldama kulude detailset jaotust kululiikide, kulukohtade ning kuluobjektide lõikes (Haldma, Karu 1999: 12).

Kulude liigitamine loob aluse nende mõtestamiseks ja juhtimiseks. Näiteks funktsionaalse põhimõtte alusel jagunevad kulud tootmiskuludeks (põhi- ja lisakulud) ja tootmisvälisteks kuludeks, nagu turundus- ja halduskulud. Käitumusliku liigituse alusel eristatakse kulud

sõltuvalt tegevusmahu muutustele reageerimisest muutuv- ja püsikuludeks. Kuluobjektile kirjendamise põhimõttel jagatakse kulud otsekuludeks, mis on otseselt seotud konkreetse toote või teenusega ning kaudkuludeks, mis tuleb jaotada mitme kuluobjekti vahel. (Karu 2008: 105–106; Alver, Reinberg 2002: 39)

Kuluobjektide kulude määramiseks kasutatakse kuluarvestuses erinevaid lähenemisi, millest levinumad on traditsiooniline ja tegevuspõhine kuluarvestus. Traditsioonilise kuluarvestuse korral jaotatakse üldkulud kuluobjektidele mahupõhiste kulukäituri alusel, keskendudes sisendite tarbimisele ja tuginedes kulude käitumisele (muutuv vs püsiv) (Karu 2008: 250–252). Tegevuspõhise kuluarvestuse puhul määratakse üldkulud konkreetsete tegevuste kaudu kuluobjektidele, võimaldades täpsemalt jälgida tootmiskulusid ning juhtida protsesse lähtudes ettevõtte tegelikust tegevusloogikast (Karu 2008: 250; Huynh *et al.* 2013: 558). Viimane lähenemine on eriti kasulik mitmeotstarbeliste tegevuste ja teenuste korral, kus kaudkulude täpne jaotus on majanduslike otsuste tegemisel kriitilise tähtsusega.

Kuna pärandniitude hooldus toimub põllumajandusettevõtetes, kehtivad seal ka maa- ja loodusressursside kasutamisele omased kuluarvestuse eripärad. Näiteks sõltub sööda või muu biomassi omahind eeskätt toodangu mahust ja selleks tehtud kulutustest, mistõttu tuleb kulude hindamisel arvestada konkreetsete tööprotsesside ja nendega seotud kulukohtadega. Praktikas tähendab see, et pärandniitude hoolduse, sh luhahaina tootmise kulude hindamisel tuleb kulud liigitada nii tegevuste (nt niitmine, kogumine) kui ka toodangu (nt hein, silo) alusel. Omahinna leidmisel eristatakse seejuures tavapäraselt kahte lähenemist: tootmisomahind kajastab üksnes tootmisega otseselt seotud kulusid, täisomahind aga hõlmab ka ettevõtte üldhalduskulusid ning realiseerimisega seotud väljaminekuid. (Vooro 2013; Haldma, Karu 1999: 109)

Pärandniitude hooldamise kulud sõltuvad märkimisväärselt tööde mahust, maastiku- ja mullatingimustest ning kasutatavast tehnikast, mistõttu võib detailse kuluarvestuse koostamine olla keerukas. Masinatööde kulud sõltuvad konkreetse ettevõtte tehnilistest võimalustest ning töö iseloomust, mistõttu on soovitatav need eraldi välja arvutada (Koik, Vettik 2024). Kuna pärandniitude majandajate tehniline baas ja töökorraldus on tihti väga erinevad (Metsoja 2020: 10), on kulude võrdlemiseks otstarbekas kasutada standardiseeritud ja üldistatavaid meetodikaid. Üheks selliseks lahenduseks on Maaelu Teadmuskeskuse (METK) poolt arendatud masinakulude arvutusmudel, mida rakendatakse näiteks taime- ja loomakasvatuse

kattetulu arvestuste koostamisel (Koik, Vettik 2024). See metoodika võimaldab masinakulude kaudu anda hinnang erinevatele tööprotsessidele, pakkudes neutraalset alusandmestikku kulude üldistamiseks.

Pärandniitude hooldamise majanduslik tasuvus sõltub suuresti põllumajandustoetustest, mille abil on võimalik katta arvestatav osa hoolduskuludest. Vooro (2013) on rõhutanud toetuste tähtsust põllumajandustegevuse jätkusuutlikkuse tagamisel ning majandamise stabiilsuse suurendamisel. Mitmed autorid (sh Lepasaar ja Ehrlich 2015; Grinienė *et al.* 2019; Metsoja 2020) on esile toonud, et ilma toetusteta ei oleks poollooduslike koosluste majandamine enamasti majanduslikult tasuv. Seega on toetustel keskne roll mitte üksnes tootmiskulude osalisel kompenseerimisel, vaid ka otsustusprotsessis, kas vastavat ala üldse hooldusesse võtta.

1.3.2. Lignotselluloosse biomassi väärindamistehnoloogiate hindamise alused

Lignotselluloosse biomassi väärindamise tehnoloogiate arendamisel ja rakendamisel on oluline hinnata nende tehnilist teostatavust, keskkonnamõju ning majanduslikku tasuvust. Selliste hinnangute andmiseks on kujunenud kolm peamist metoodilist raamistikku: tehnomajanduslik hindamine (*techno-economic assessment, TEA*), elutsükli hindamine (*life cycle assessment, LCA*) ning nende kahe integreeritud lähenemised, mis võimaldavad protsesse hinnata süsteemselt ja teaduspõhiselt (Amini *et al.* 2021: 43; Fernández-Rodríguez *et al.* 2021: 5; Segers *et al.* 2024: 3742). Iga raamistik käsitleb väärindamisprotsessi erinevast vaatenurgast ja aitab hinnata sobivust nii tehnoloogiate arenduse varajastes etappides kui ka skaleerimisel tööstuslikku mastaapi (Amini *et al.* 2021: 40).

Tehnomajanduslik analüüs (TEA) on meetod tootmisprotsessi või tehnoloogia tehnilise teostatavuse ja majandusliku tasuvuse hindamiseks, mis põhineb protsessiskeemidel, massi- ja energiabilanssidel ning kulude ja tulude prognoosil (Segers *et al.* 2024: 3743). Tavapäraselt eristatakse TEA raames kolme kulude ja tulude hindamise kategooriat (Palomar *et al.* 2024: 1662; Amini *et al.* 2021: 43; Segers *et al.* 2024: 3743):

- Kapitalikulud (*CAPEX, capital expenditures*) – investeeringud, mis on seotud rajatiste, seadmete, paigalduse ja infrastruktuuriga.
- Tegevuskulud (*OPEX, operating expenditures*) – käituskulud, sh tooraine, energia, vesi, tööjõud, hooldus, jäätmekäitlus.

- Tuluallikad ja kõrvaltooted – lisaks põhitootete hinnatakse ka kõrvalsaaduste võimalikku väärimist.

Mitmed autorid (da Silva *et al.* 2018: 112; Norfarhana *et al.* 2024: 16; Banerjee *et al.* 2024: 16395) toovad esile, et IL-põhiste eeltötlusprotsesside puhul on majandusliku teostatavuse seisukohalt eriti oluline lahusti hind ja selle taaskasutamise efektiivsus, kuna IL-id on üldjuhul kallid ning moodustavad märkimisväärse osa protsessi tegevuskuludest. Madala taaskasutussaagise või kõrge energiakuluga regenereerimisprotsessid võivad kogu väärimisahela majanduslikku tasuvust oluliselt vähendada, sõltumata saadava ligniini kogusest või kvaliteedist (Colussi *et al.* 2023: 8; Norfarhana *et al.* 2024: 16). TEA koostamisel kasutatakse sageli spetsiaalseid protsessimudeleid, nagu *Aspen Plus* või *SuperPro Designer*, millega simuleeritakse protsesside materjali- ja energiavood (Palomar *et al.* 2024: 1662). Nende andmete alusel arvutatakse tasuvusnäitajad, nagu nüüdispuhasväärtus (NPV), sisemine tasuvusmäär (IRR) ja tasuvusaeg, mis võimaldavad hinnata, kas arendatav väärimistehnoloogia on majanduslikult põhjendatud (Fernández-Rodríguez *et al.* 2021: 6; Amini *et al.* 2021: 43).

Elutsükli hindamine (LCA) on standardiseeritud metoodika, mille eesmärk on hinnata toote või protsessi keskkonnamõju kogu selle elutsükli jooksul – alates tooraine hankimisest kuni kasutuse lõpu ja jäätmekäitluseni (Mohammad *et al.* 2024: 7; Fernández-Rodríguez *et al.* 2021: 6). LCA analüüs hõlmab mitmesuguseid keskkonnanäitajaid, nagu kasvuhoonegaaside (KHG) heide, energiakasutus, vee tarbimine, eutrofeerumise ja happevihmade potentsiaal ning ökoloogiline jalajälg (Koppel *et al.* 2023: 26). Protsessi hindamise täpsus sõltub süsteemipiiride määratlemisest, andmete kvaliteedist ja valitud keskkonnamõju kategooriatest. IL-põhiste tehnoloogiate kontekstis on oluline arvesse võtta ka lahustite elutsüklilist jalajälge, sealhulgas nende tootmise, kasutamise, regenereerimise ja võimaliku kõrvaldamise mõju (Banerjee *et al.* 2024: 16396; da Silva *et al.* 2018: 113).

Viimastel aastatel on kasvanud huvi integreeritud hindamismeetodite vastu, mille puhul kombineeritakse TEA ja LCA, et toetada teaduspõhist ja tasakaalustatud otsustamist bioressursside väärimise tehnoloogiate arendamisel (Amini *et al.* 2021: 42; Luo *et al.* 2023: 18; Mohammad *et al.* 2024: 8). Integreeritud lähenemise eesmärk on korrigeerida arvesse võtta nii

majanduslikke kui ka keskkonnaaspekte, et (Kumar *et al.* 2024: 17; Fernández-Rodríguez *et al.* 2021: 6):

- tuvastada kompromisse majandusliku tasuvuse ja ökoloogilise jätkusuutlikkuse vahel;
- hinnata, millised protsessiparameetrid (nt temperatuur, ajafaktor, biomassi ja ILi suhe) mõjutavad samaaegselt nii kulusid kui ka keskkonnamõju;
- teha paremini informeeritud otsuseid tehnoloogiliste protsesside optimeerimisel ja skaleerimisel.

Sellised lähenemised on eriti olulised varajases tehnoloogiaarenduse etapis, kui puuduvad veel täpsed eksperimentaalsed andmed, kuid on vaja hinnata protsessi üldist potentsiaali ja tuvastada kitsaskohad (Luo *et al.* 2023: 18). PIL-põhiste eeltötlusprotsesside puhul võimaldab integreeritud TEA-LCA analüüs tuvastada optimaalsed tööparameetrid, mis maksimeerivad ligniini saagise, minimeerides samal ajal energiakulu, materjalikadusid ja võimalikke negatiivseid keskkonnamõjusid (da Silva *et al.* 2018: 114; Banerjee *et al.* 2024: 16396). Samuti aitab selline analüüs hinnata, millised muudatused – näiteks lahusti regenereerimise tõhususe suurendamine või protsessi skaleerimine – võivad olla kriitilised kommertsialiseerimise seisukohalt.

Kuigi ligniini eraldamise tehnoloogiad, sealhulgas PIL-põhised eeltötlusprotsessid, on laboratoorsetes tingimustes näidanud paljutöotavaid tulemusi, ei saa neid automaatselt üle kanda tööstuslikku mastaapi. Suuremahulise tootmise korral võivad ilmnedä täiendavad tehnilised ja majanduslikud piirangud, sealhulgas keerukused soojusüleandes, segamise efektiivsuses, energiavajaduses ning süsteemide töökindluses (Luo *et al.* 2023: 18). Eriti oluline on arvestada ka PILide ja muude kriitiliste komponentide taaskasutamise võimalusi ja sellega kaasnevaid kulusid, mis mõjutavad otseselt kogu protsessi skaleeritavust ja tasuvust (da Silva *et al.* 2018: 112; Banerjee *et al.* 2024: 16395).

Ligniini väärindamine keemiatööstuse toorainena paikneb kaasajal tehnoloogilise valmiduse tasemel (TVT) 3–5, mis viitab sellele, et kuigi tehnoloogiad on laboratoorsel tasemel tõendatud, vajavad need veel olulist arendust enne tööstuslikku rakendamist (Koppel *et al.* 2023: 73–74). Ligniini-esimesena strateegia, mille fookuses on ligniini selektiivne eemaldamine juba varajases tötlusetapis, pakub selles kontekstis perspektiivikaid arengusuundi. Selle eduka rakendamise

eelduseks on sobivate toorainete, kulutõhusate lahustite ning skaleeritavate ja taastuvate protsesside väljatöötamine (Luo *et al.* 2023: 18).

Samuti on ligniini ja muude biopõhiste toodete väärimisel oluline tagada nende konkurentsivõime võrreldes fossiilse päritoluga alternatiividega, arvestades nii tootmiskulusid kui ka turunõudlust (Koppel *et al.* 2023: 22). Kui need tingimused on täidetud, võivad sellised väärimistehnoloogiad luua uusi ärivõimalusi, toetada töökohtade loomist maapiirkondades ning suurendada kohalike taastuvate ressursside kasutusväärtust, aidates ühtlasi kaasa ringbiomajanduse eesmärkide saavutamisele.

Kokkuvõtlikult võib öelda, et lignotselluloosse biomassi väärimistehnoloogiate hindamisel pakuvad TEA ja LCA metoodikad koosmõjus tugeva aluse nii majanduslike kui ka keskkonnavalaste tegurite arvestamiseks. PIL-põhiste eeltötlusprotsesside rakendamisel muutub eriti oluliseks lahustite taaskasutuse efektiivsus ja süsteemi skaleeritavus. Integreeritud hindamisraamistikud võimaldavad selliseid parameetreid varakult modelleerida ja hinnata, toetades seeläbi otsustusprotsessi tehnoloogiliste valikute tegemisel ja kommertsialiseerimisvõimaluste hindamisel.

2. ALAM-PEDJA LAMMINIITUDE BIOMASSI VÄÄRINDAMISE TEHNO-ÖKONOOMILISED ASPEKTID

2.1. Andmed ja metoodika

2.1.1. Andmete iseloomustus

Magistritöö koostamisel on kasutatud kombineeritud uurimismeetodit, mis ühendab kvalitatiivseid ja kvantitatiivseid lähenemisi. Mitme meetodi kombineerimine võimaldab uuritavat nähtust käsitleda nii empiiriliste mõõdikute kui ka sisuliste tõlgenduste kaudu. Ghauri ja Grønhaug (2004: 191) on rõhutanud, et mitme lähenemise sidumine aitab kujundada täielikuma ja sisuliselt seostatuma arusaama uurimisobjektist, pakkudes mitmekülgset ja tasakaalustatud käsitlust.

Magistritöö keskmes on Alam-Pedja pärandniitudel kogutav luhahain ning selle väärindamise võimalused. Andmestik põhineb mitmekesistel andmetel ja -allikatel, millest olulisima osa moodustavad perioodil juuni 2023–aprill 2025 läbi viidud poolstruktureeritud intervjuud Alam-Pedja pärandniitude majandajatega. Lisaks viidi läbi sihipäraseid ekspertintervjuusid, mille käigus koguti hinnanguid ja täpsustavat teavet pärandniitude majandamiskulude, biomassi väärindamise tehnoloogiate ning nende potentsiaalse rakendatavuse kohta. Eksperthinnangud pärinesid nii teadlastelt kui ka valdkondlikelt praktikutelt.

Magistritöö raames ei teostatud kvalitatiivset andmeanalüüsi traditsioonilises tähenduses, näiteks avatud kodeerimise või tarkvarapõhise analüüsi kujul. Selle asemel struktureeriti intervjuudest saadud vastused temaatilisteks plokkideks, mis võimaldasid võrrelda eri vastajate hinnanguid ja kogemusi kindlate teemade lõikes. Selline lähenemine võimaldas koondada mitmekesist teavet viisil, mis toetab töö eesmärki anda sisuline ja praktiline ülevaade luhahaina kasutuspraktikatest ning võimalikest väärindamisvõimalustest. Kasutatud andmeallikad ja andmete kogumise viisid on esitatud tabelis 2.

Tabel 2. Kasutatud andmeallikad ja andmete kogumise viisid

Andmed	Allikas	Andmete kogumise viis
Alam-Pedja pärandniitudele taotletud ja väljamakstud toetused ning toetuste ühikumäärad aastatel 2023 ja 2024	PRIA	Kaardikihid: taotletud pärandniidu alad 2023 ja 2024; autori infopäringud ja kirjavahetus
Aastatel 2023 ja 2024 Alam-Pedjal teostatud hooldustegevuste pindala (ha); üldine teave pärandniitude kaitsekorralduse ja majandamistavade kohta	Keskkonnaamet	Autori intervjuud ja kirjavahetus
Pärandniitude majandamise ja luhahaina kasutamise praktikad; 2023–2024 kogutud heina kogused; kulude ja tulude hinnangud	Alam-Pedja pärandniitude majandajad	Autori intervjuud (telefonivestlused, kirjavahetus, kohapealsed kohtumised)
Luhahaina tootmiskulude hindamise aluseks olevate eelduste määratlemine (sh masinapargi valik, tööjõudlus, spetsiifilised tingimused)	METK	Autori intervjuu METKi esindajaga (ekspertarvamuse kogumiseks)
2023. ja 2024. aastal Alam-Pedjalt kogutud luhahaina biokeemiline koostis (tselluloosi, hemitselluloosi ja ligniini sisaldus)	EMÜ biokütuste labor	Autori poolt kogutud biomassi proovid ja EMÜ biokütuste laboris läbiviidud laboratoorsed katsed
Luhahainast ligniini eraldamise võimalused prootonsete ioonvedelike (PIL) abil (tehnoloogiline sobivus, piirangud, regenereerimisvõimalused)	EMÜ biokütuste töörühm	Autori intervjuud ekspertidega

Uuringu esimeses etapis (mai–juuli 2023) viis autor läbi poolstruktureeritud intervjuud Keskkonnaameti looduskaitse korraldamise osakonna eksperdi ning Alam-Pedja looduskaitseala pärandniitude majandajatega. Intervjuu Keskkonnaameti esindajaga keskendus kaitseala hooldustegevustele, niitmise ja taastamise kavadele ning kehtivatele piirangutele, pakkudes vajalikku taustateavet piirkonna haldamise põhimõtete kohta ning võimaldades määratleda esinduslikud proovialad, mis kajastaksid pärandniitude piirkondlikke ja koosluselisi eripärasid. Intervjuud pärandniitude majandajatega keskendusid hooldustegevuste praktilisele korraldusele, niitmise ja kogumise ajastusele, luhahaina kogustele ja saagikusele, logistikale ning heina hilisemale kasutusele. Samuti käsitleti nende hinnanguid ja kogemusi võimalike alternatiivsete väärindamisvõimaluste kohta.

PRIA avaliku veebikaardi kaardikihtide „Taotletud pärandniidu alad: Taotletud alad 2023“ ja „Taotletud alad 2024“ põhjal tuvastas autor, et mõlemal aastal taotles Alam-Pedja LLA-l erinevaid toetusi kokku 14 juriidilist isikut, ülejäänud taotlejad olid füüsilisest isikust ettevõtjad (FIE-d) või eraisikud (lisa 6). Kuna kaadirakendus kuvab taotleja nime vaid juriidiliste isikute puhul, ei ole FIEde ja eraisikute andmed avalikud. PRIA andmetel (tabel 9 lk 49) oli 2023. aastal kokku 19 ja 2024. aastal 20 taotlejat, millest juriidiliste isikute kõrval moodustasid ülejäänud

viis (2023) ja kuus (2024) FIE-d või eraisikud. Valimi representatiivsuse tagamiseks viis autor 2023. aastal läbi intervjuud EV1-EV7 ja EV10-EV11 esindajate ning ühe FIE-ga. Aastal 2024 jäeti EV11 valimist välja, sest ta ei olnud enam toetuse taotlejate hulgas. Seega oli uuringu valimis 2023. aastal esindatud ca 53% ja 2024. aastal 45% kõigist Alam-Pedja LLA pärandniitude majandajatest. Tabelist 3 on näha, et intervjuueeritud isikute poolt majandatava pindala osakaal kogu taotletud Alam-Pedja pärandniitude pinnast oli mõlemal aastal üle 95%, mistõttu võib valimit pidada pindalaliselt esinduslikuks.

Tabel 3. Intervjuuvalimi pindalaline esinduslikkus Alam-Pedja toetusalade lõikes

Näitaja	2023	2024
Intervjuueeritud isikute poolt majandatav pindala, ha	1 439,35	1 511,08
Toetusi taotletud pärandniitude pindala Alam-Pedja LLA-l, ha	1 503,58	1 584,61
Valimi pindalaline esinduslikkus, %	95,73%	95,36%

Seetõttu võib valimit pidada piisavalt esinduslikuks, et teha usaldusväärseid järeldusi Alam-Pedja pärandniitude hooldustavade ning kogutud luhahaina kasutuspraktikate kohta.

2.1.2. Pärandniitude majandamise kulude hindamine

Biomassi koguse hindamisel kasutati pärandniitude majandajatelt intervjuude käigus saadud andmeid, mis esitati erinevates mõõtühikutes, näiteks kogutud heinapallide arvuna või hektari kohta arvutatud keskmise saagikusena. Selleks, et tagada andmete võrreldavus ja ühtsus, teisendati kõik saadud andmed samale alusele. Näiteks tehti eeldus, et üks heina ruloon kaalub keskmiselt 250 kilogrammi ja selle kuivainesisaldus on 85%. Intervjuude käigus saadud haljasmassi (märgmassi) koguseid täiendasid siloproovidest määratud kuivainesisalduse andmed, mida kasutati kogutud heina koguse täpsustamiseks.

Kuna kõigi Alam-Pedja pärandniitude majandajate andmeid ei olnud võimalik koguda, laiendati saadud kaalutud keskmise saagikuse näitaja kogu uuritavale alale. Selleks kasutati Keskkonnaameti andmeid, mis kajastasid 2023. ja 2024. aastal reaalselt niidetud pärandniitude pindala. Niitmata alade osakaalu määramisel lähtuti Keskkonnaameti juhistest, mille kohaselt tuleb lindudele ja loomadele sobivate varjumispaikade tagamiseks niitmata jätta 5–30% alast. Intervjuueeritavate hinnangul varieerub niitmata alade osakaal piirkonniti, jäädes vahemikku 5–20%. Magistritöös lähtuti eeldusest, et keskmiselt jäetakse niitmata 10% kogupindalast, mida arvestati biomassi koguse ja saagikuse arvutamisel.

Luhaheina tootmiskulude hindamisel kasutati üldistatud metoodikat ja kasutati METKi masinakulude algoritme (Koik, Vettik 2024). Tuginedes METKi agrotehnoloogia valdkonna vanemteaduri Raivo Vettiku ja Alam-Pedja pärandniitude majandajate ekspertarvamustele, valiti iga tööetapi jaoks sobiv traktori (jõumasina) ja töömasina kombinatsioon. Kalkulatsioonide aluseks võeti uued keskmise hinnaklassi masinad, kuna nende kohta on kättesaadavad standardiseeritud ja võrreldavad tehnilised ning majanduslikud andmed, mis võimaldasid tagada metoodilise ühtsuse ja tulemuste võrreldavuse. Masinate keskmise soetusmaksumuse ja tööressursi määramisel kasutati MaKost (2025) andmebaasi. Kuna lamminiitude majandamisel esineb mitmeid erinevusi võrreldes kultuurniitudega, näiteks raskemad niitmisolud ja ebatasane maastik, kohandati kalkulatsioonides agregaadid tootlikkust, arvestades pärandniitude hoolduse spetsiifilisi tingimusi.

Luhaheina tootmisega seotud masinakulud jagunevad püsi- ja muutuvkuludeks. Püsikulud ei sõltu otseselt tehtud tööde mahust, vaid on seotud masinate olemasoluga ja nende pikaajalise kasutamisega, seega nende maht kahe aasta võrdluses ei muutunud. Püsikulude hulka arvestati masinakulude kalkuleerimisel: kulum, intressikulud, kindlustuse ja hoiuruumi kulud ning üldkulud. Muutuvkulud on kulud, mis sõltuvad otseselt tehtud töömahust, sh kütuse- ja määrdeainete kulud, masinate korrashoiu- ja hoolduskulud ning traktoristi tööjõukulud. Luhaheina hinnanguliste tootmiskulude kalkulatsiooni kulukomponentide detailsemad andmed on koondatud lisadesse 7–10. Lisas 7 on esitatud peamised masinakulude arvutamiseks tehtud eeldused ja lähtetingimused, sh masinate tööressursside, intressi- ja kindlustuskulude ning tööjõukulude arvestamise põhimõtted. Lisas 8 on toodud erinevate võimsusklasside traktorite ehk jõumasinate hinnangulised tunnikulud (€/h) ning lisas 9 on esitatud töömasinate kulud hektari (€/ha) või heinarulooni (€/ruloon) kohta. Lisa 10 annab ülevaate hinnangulistest masinakuludest erinevate tööetappide lõikes, näidates töö- ja jõumasinate kombinatsioone ning tööprotsesside ühikuhindu.

Tootmiskulude hindamisel on oluline arvestada mitte ainult tööprotsesside otseste kuludega, vaid ka toetustega, mis võivad oluliselt mõjutada pärandniitude majandamise tasuvust. Alam-Pedja pärandniitudele 2023. ja 2024. aastal taotletud ja väljamakstud toetuste ning nende ühikumäärade kohta koguti andmeid PRIA-lt infopäringute ja ametliku kirjavahetuse teel.

2.1.3. Lahaheina väärindamispotentsiaali hindamine

Laboratoorsed analüüsid on käesolevas uuringus olulised biomassi keemilise koostise täpseks määramiseks, mis võimaldab hinnata lahaheina sobivust erinevate väärindamisvõimaluste jaoks. Kiuanalüüs annab ülevaate tselluloosi, hemitselluloosi ja ligniini sisaldusest, mis on määravad biomassi kasutamisel loomasöödana, biorafineerimisel, biokütuste tootmisel ning muudes kõrgema lisandväärtusega rakendustes. Täpsed koostise andmed aitavad hinnata, millised väärindamisvõimalused on tehnoloogiliselt teostatavad ja majanduslikult realistlikud ringbiomajanduse kontekstis.

Perioodil august–september aastal 2023 kogus käesoleva magistritöö autor kokku kaheksa lahaheina biomassi proovi seitsmest erinevast asukohast (asukohad on märgitud lisas 11). Proovide kogumine viidi läbi koostöös pärandniitude majandajatega, kellega lepiti eelnevalt kokku sobiv aeg ja koht. Enamik proove (1–4 ja 6–7) koguti aladelt, kus hein oli eelnevalt pressitud ruloonidesse (tabel 4).

Tabel 4. Aastal 2023 kogutud biomassi proovide niitmise ja kogumise aeg ning kogumisviis

Asukoha nr ¹	Niitmise aeg	Proovi kogumise aeg	Kogumise viis
1	13.07.2023	16.08.2023	ruloonist
2	29.07.2023	16.08.2023	ruloonist
3	10.06.2023	16.08.2023	ruloonist
4	05.07.2023	16.08.2023	ruloonist
5.1	15.08.2023	10.09.2023	maast
5.2	10.09.2023	10.09.2023	värskelt
6	18.07.2023	05.09.2023	ruloonist
7	02.08.2023	05.09.2023	ruloonist

Märkus: ¹ – lisa 11 kaardile märgitud asukohale vastav number

Iga proov koguti mitmest ruloonist, et saada keskmistatud esinduslik proov, mis pakiti ühte 200-liitrisesse kotti. Erandiks oli asukoht 5, kus 2023. aastal toimus taastamisjärgne hooldustegevus ja hein hekseldati ilma kokku kogumiseta. Sellest asukohast koguti kaks proovi: esimene (5.1) võeti 10. septembril 2023, pärast seda, kui hein oli olnud maas ligi kuu aega ning teine (5.2) koguti samal päeval värskelt lammi servalt. Viieandast asukohast kogutud proovide kogused olid väiksemad kui teistel aladel. Kõik proovid toimetati laborisse edasiseks analüüsiks.

Aastal 2024 koguti Alam-Pedja pärandniitudelt üheksa luhaheina niite proovi (asukohad on märgitud lisas 12). Uuritava ala ruumilise katvuse parandamiseks laiendati proovivõttu kahe lisakohaga (asukohad 8 ja 9 tabelis 5).

Tabel 5. Aastal 2024 kogutud biomassi proovide niitmise ja kogumise aeg ning kogumisviis

Asukohta nr ¹	Niitmise aeg	Proovi kogumise aeg	Kogumise viis
1	18.07.2024	22.08.2024	ruloonist
2	16.07.2024	22.08.2024	ruloonist
3	25.06.2024	22.08.2024	ruloonist
4	25.06.2024	22.08.2024	ruloonist
5	21.08.2024	22.08.2024	maast
6	17.07.2024	20.09.2024	ruloonist
7	10.08.2024	20.09.2024	ruloonist
8	14.08.2024	14.08.2024	värskelt
9	17.07.2024	02.08.2024	ruloonist

Märkus: ¹ – lisa 12 kaardile märgitud asukohale vastav number

Proovid koguti peamiselt aladelt, kus hein oli niidetud ja pressitud ruloonidesse, kuid kaasatud oli ka üks taastamisjärgne ala (asukoht 5), kus hein hekseldati ilma kokku kogumiseta. See võimaldab hinnata selliste alade biomassi koostist ja potentsiaali edaspidiseks kasutuseks, kui seal hakatakse heina koguma. Karjatatavatelt pärandniitudelt proove ei võetud, mistõttu uuring keskendub ainult niidetava luhaheina omadustele ja väärimisvõimalustele.

Biomassi laboratoorsed analüüsid viidi läbi Eesti Maaülikooli biokütuste laboris. Aastal 2023 teostas laboratoorsed analüüsid Biomajandustehnoloogiate õppetooli teadur Vahur Rooni ja 2024. aastal viis analüüsid läbi magistritöö autor Vahur Rooni juhendamisel.

Kõiki niitudelt kogutud päikesekuivatatud materjale säilitati enne töötlemist toatemperatuuril ($T \approx 21^{\circ}\text{C}$). Värskelt kogutud biomass järelkuivatati toatemperatuuril. Biomass (hein) jahvatati veskiga Retch SM 100 (Retch GmbH) kuni 0,2 mm osakesteni. Seejärel mõõdeti niiskusesisaldus Kern MLS 50-3D elektroonilise niiskusanalüsaatoriga (Kern & Sohn GmbH), millega kuumutati proovid 105°C juures püsiva kaalu saavutamiseni. Niiskusesisalduse määramine viidi läbi kolmes korduses ning iga proovi keskmine kuivainesisaldus on esitatud lisas 13. Kuivainesisaldus 2023. aasta proovides jäi keskmiselt vahemikku 87–91% ja 2024. aasta proovides vahemikku 90–94%.

Luhaheina biomassi proovide kiuanalüüsid viidi läbi kasutades automaatset kiuanalüsaatorit Ankom 2000 Fiber Analyzer (ANKOM Technology, Fairport, NY, USA). Tselluloosi ja hemitselluloosi sisaldust hinnati neutraalkiu (NDF) ja happekiu (ADF) sisalduse määramise kaudu vastavalt ANKOMi standardmetoodikatele (NDF Method, 2017; ADF Method, 2017). Ligniini sisaldus määrati happekiu jäägile järgneva 72% väävelhappega hüdrolüüsamise ja proovi tuhastamise teel, lähtudes ANKOMi happesuligniini metoodikast (Lignin Method, 2022). Kiuanalüüsid viidi läbi kolmes korduses, iga proovi keskmised väärtused koos standardhällbega on esitatud lisas 14.

Luhaheina väärindamispotentsiaali hindamisel kombineeriti mitmeid andmekogumise ja analüüsi viise, et kaardistada selle kasutusvõimalusi biomajanduses. Kasutati kombineeritud lähenemist, mis hõlmas nii teaduskirjanduse ülevaadet kui ka ekspertarvamusi ja praktikute kogemusi. Teaduskirjanduse analüüs keskendus eelkõige lignotselluloosse biomassi eeltötluse tehnoloogiatele, sealhulgas protoonsete ionvedelike (PIL) kasutamisele ligniini selektiivseks eraldamiseks, samuti etanooli ja biogaasi tootmisele. Kuna magistritöö raames ei viidud läbi laboratoorseid väärindamiskatseid, tugineb potentsiaali hindamine kirjanduses avaldatud eksperimentaalsetele andmetele, milles käsitletakse protsesside saagiseid, tehnoloogilist sobivust ja efektiivsust. Lisaks viidi läbi ekspertintervjuud Eesti Maaülikooli Biomajandustehnoloogiate õppetooli biokütuste töörühma liikmetega. Arutelud keskendusid tehnoloogilistele võimalustele ja piirangutele, sobivate PIL-ide valikule, lahusti regenereerimisvõimele ning protsessiparameetritele, mida tuleks edasistes katsetes optimeerida. Saadud hinnangud aitasid täiendada teoreetilist käsitlust praktiliste rakenduste vaatenurgast.

2.2. Alam-Pedja pärandniitude majandamise senine praktika

2.2.1. Alam-Pedja pärandniitude iseloomustus

Alam-Pedja linnu- ja loodusala (edaspidi LLA) asub Kesk-Eestis, Võrtsjärvest kirdes (lisa 15). Kaitseala kuulub alates 1997. aastast rahvusvahelise tähtsusega märgalade (Ramsari alad) hulka ning 2004. aastast üle-euroopalisel Natura 2000 kaitsealade võrgustikku. Tänu mitmekesistele looduslikele aladele ja vähestele inimõjule pakub Alam-Pedja LLA elupaika suurele hulgale kaitsealustele liikidele. Alam-Pedja LLA eesmärk on kaitsta 48 linnuliiki, mis on nimetatud linnudirektiivi (LiD) I lisas ning 20 elupaika, mis on toodud loodusdirektiivi (LoD) I lisas, eraldi

on korraldatud 14 LoD II lisa liigi kaitse. Alam-Pedja LLA teeb unikaalseks jõgede süsteem, mis ühendab Võrtsjärve ja Peipsi järve. Erilisust rõhutab ka asjaolu, et kaitsealal asuvad sood, metsad, lamminiidud ja jõed moodustavad ühtse maastikukompleksi, mis on intensiivselt majandatud põllu- ja metsamaadest ümbritsetud. Alam-Pedja LLA pindalast (34 671,2 ha) hõlmavad ca 11% erinevad niidukooslused, millest omakorda 97% moodustavad lamminiidud. (Alam-Pedja linnu- ja...2015: 8, 38, 74-75)

Alam-Pedjal on ca 3940 ha pärandniite ning esindatud on viis LoD I lisa elupaika: lamminiidud (6450), liigirikkad niidud lubjavaesel mullal (6270), puisniidud (6530), niiskuslembelised kõrgrohusid (6430) ning aas-rebasesaba ja ürt-punanupuga niidud (6510). Kõige rohkem esineb Alam-Pedjal lamminiite ehk luhtasid, see elupaigatüüp on Natura 2000 standardandmebaasi järgi esindatud 3835 ha-l. Kaitsekorralduskava (2016–2025) eesmärgiks on tagada lamminiitude eesmärgipärane majandamine vähemalt 2000 hektaril, kuid pikemas perspektiivis peetakse realistlikuks ka 2100–2300 hektari suuruse pinna regulaarset hooldamist. (Alam-Pedja linnu- ja...2015: 75-83)

Maa- ja Ruumiameti (2025) mullastiku teemakaardi ja selle seletuskirja (Vabariigi digitaalse ... 2001: 26) põhjal selgub, et Alam-Pedja luhtadel on peamiselt esindatud erinevad lammimullad. Tüüpiline gleistunud lammimuld reageerib perioodilistele üleujutustele kiire kuivamisega kõrgemal asuvates piirkondades, lammi-gleimuld paikneb jõesängiäärsetel tasandikel, kus esineb püsivam üleujutus. Lisaks leidub aladel pikaajalise veemõjuga turvastunud muldi, millele on iseloomulik arenenud turbahorisont, samuti on eristatav lammi-madalsoomuld, mis on levinud jõgede alamjooksu avaratel lammidel ja mullaprofiili iseloomustab turba kihiline ehitus, kus turvas on segatud mineraalsete kihtidega. (Eesti mullastiku ... 2025; Vabariigi digitaalse ... 2001: 26) Alam-Pedja lamminiitude mullastik on tulenevalt geoloogilistest protsessidest lubjarikas, sest jõgede vesi läbib Pandivere kõrgustiku ja Kesk-Eesti tasandiku karbonaatseid ehk lubjakivist aluspõhju (Alam-Pedja linnu- ja ... 2015: 7).

Alam-Pedja pärandniidud on liigirikkad ja ökoloogiliselt olulised kooslused, mis pakuvad elupaiku paljudele kaitsealustele liikidele ning toetavad mitmesuguseid ökosüsteemiteenuseid, sealhulgas maastikulist mitmekesisust ja looduslike protsesside toimimist. Nende säilimine ei ole aga võimalik ilma regulaarse hoolduseta. Tegemist on poollooduslike elupaikadega, mis on

kujunenud pikaajalise inimõju tulemusel ning vajavad ka tänapäeval sihipärast majandamist, et vältida kinnikasvamist ja liigikoosluste muutumist.

2.2.2. Alam-Pedja pärandniitude majandamine aastatel 2023–2024

Alam-Pedja LLA-l paiknevate pärandniitude pindala oli 2023. aasta lõpu seisuga 3980 ha. Keskkonnaameti ekspordilt saadud andmetest nähtub, et kokku teostati 2023. aastal hooldustegevusi 1507 hektaril ehk ca 38 %-l kaitsealal paiknevate pärandniitude pindalast (tabel 6). Aastal 2024 suurenes hoolduses olev pindala 1583 hektarini, tähistades ca 5% kasvu võrreldes eelneva aastaga ning ca 2-protsendipunktilist tõusu pärandniitude kogupindala osakaalus.

Tabel 6. Hooldustegevused Alam-Pedja pärandniitudel 2023. ja 2024. aastal (Keskkonnaameti andmed)

Hooldustegevused	2023		2024	
	Pindala, ha	Osakaal, %	Pindala, ha	Osakaal, %
Karjatamine	213	14,13	290	18,32
Niitmine	923	61,25	1 148	72,52
Taastamisjärgne hekseldamine	371	24,62	145	9,16
Kokku	1 507	*	1 583	*

Märkus: * – hooldatud alade pindala osakaal Alam-Pedja LLA-l paiknevate pärandniitude kogupindalast

Tabeli 6 andmetest ilmneb, et nii 2023. kui 2024. aastal oli peamiseks hooldusviisiks niitmine, mille osakaal oli vastavalt 61,25% ja 72,52% kogu hooldatud pindalast. Niitmine hõlmab siinkohal lisaks niitmisele ka niite kokku kogumist, mis on kooskõlas NIIT meetme tingimustega ning toetab pärandniitude ökoloogilise seisundi säilimist. Karjatamise teel hooldatav pind suurenes 2024. aastal võrreldes eelneva aastaga 77 hektari võrra, taastamisjärgse hekseldamise pindala seevastu vähenes 226 hektari võrra. Pärandniitude hooldamisvõttena ei ole hekseldamine iseenesest lubatud tegevus, kuna see ei taga piisavalt elupaikade avatust ja liigirikkuse säilimist. Siiski võib Keskkonnaamet määrata niidetavatele aladele ajutise lisatingimusena võimaluse biomass pärast niitmist hekseldada ja jätta alale. Taastamisjärgse hekseldamise tingimust rakendatakse eelkõige juhtudel, kus taimestik või pinnas on tugevalt kahjustunud (näiteks tugeva mätlikkuse või umbrohtumise tõttu) ning traditsiooniline niitmine koos niite kokku kogumisega ei ole veel otstarbekas. Alam-Pedja LLA pärandniitude hooldustegevuste andmetest nähtub, et hekseldatud pindala vähenemine 2024. aastaks viitab

mitmete taastamisjärgselt hooldatud alade seisundi paranemisele, mis võimaldas seal rakendada juba tavapäraseid hooldusvõtteid – niitmist koos niite kokku kogumisega või karjatamist.

Niidetava ala suurenemine loob potentsiaalselt paremad võimalused biomassi kogumiseks ja väärindamiseks. Samas tuleb arvestada, et karjatatava ala kasv võib mõningal määral vähendada kokku kogutava biomassi kogust. Karjatamine toetab aga pärandniitude loodusväärtuste ja ökosüsteemi jätkusuutlikkust, mistõttu on selle hooldusviisi järjepidev rakendamine oluline. Optimaalse hoolduspraktika saavutamiseks peaksid niidetavad ja karjatatavad alad ajas vahelduma, et tagada pärandniitude ökoloogilise seisundi ja elurikkuse säilimine. Tulevikus võib taastamisvajadusega alade lisandumine suurendada taas ka taastamistegevuste mahtu. Samal ajal võimaldavad taastatud alad pärast hoolduse stabiliseerumist järk-järgult suurendada kogutava biomassi hulka. Siiski tuleb arvestada, et mitte kõiki pärandniidualasid ei ole võimalik majandada traditsiooniliste meetoditega. Eriti madalamatel ja jõgede äärsetel aladel, kus ligipääs masinatega on piiratud, võib niitmine osutuda keeruliseks või teostada vaid osaliselt. Seetõttu on biomassi potentsiaali hindamisel oluline arvestada tehniliste ja looduslike piirangutega, kuigi nende täpsem analüüs jääb edasiste uuringute teemaks.

Aastatel 2023–2024 suurenes hoolduses olevate pärandniitude pindala, sh nende alade ulatus, kust niide koguti kokku. See tähendab, et saadaval on rohkem biomassi ehk luhahaina. Samal perioodil toimusid väiksemad muutused pärandniite majandavate isikute struktuuris (lisa 6), kus väikesel määral kasvas väiksemate majandajate osakaal, kuid valdava osa pindalast majandasid endiselt viis suuremat juriidilist isikut. Need suundumused viitavad hooldustegevuste mõningasele mitmekesisustumisele, kuid samas võivad väiksemate ja hajusamate hooldusalade kasvuga kaasneda täiendavad väljakutsed biomassi kogumise ja väärindamise seisukohalt. Edasises analüüsis keskendutakse peamiselt pärandniitudelt niitmise ja niite kokku kogumise tulemusel saadud biomassile ehk luhahainale ning selle kogumise ja kasutamise praktikatele.

2.2.3. Alam-Pedja aladelt kogutud biomassi kasutamise senine praktika

Alam-Pedja LLA pärandniitudelt kogutud biomassi kogus aastatel 2023–2024 oli otseselt mõjutatud nii hooldatava pinna suurusest kui ka aastatevahelistest ilmastikutingimuste erinevustest. Aastal 2023 mõjutas rohukasvu negatiivselt jahe ja hiliste öökülmadega kevad ning sellele järgnenud põuane periood maikuuks, mille tulemusel jäi taimekasv tagasihoidlikuks ja

biomassi saagikus keskmisest madalamaks (Saue 2023). Aastal 2024 algas kasvuperiood erakordselt vara ning mai teisest poolest kujunes soodne kõrge temperatuuriga ja hiljem piisava sademete hulgaga kasvuperiood, mis soosis biomassi tootlikkust, kuigi sademete ebaühtlane jaotus võis kohati mõjutada saagi kvaliteeti (Saue 2024).

Aastatel 2023 ja 2024 oli niidetavate pärandniitude pindala Alam-Pedjal Keskkonnaameti andmetel vastavalt 923 ja 1148 hektarit. Hinnanguliselt koguti niide kokku 831 hektarilt 2023. aastal ja 1033 hektarilt 2024. aastal, arvestades, et osa aladest jäeti vastavalt looduskaitseliste nõuetele niitmata (tabel 7).

Tabel 7. Alam-Pedja luhahaina saagikus kuivaines (t, KA/ha) aastatel 2023 ja 2024 (autori koostatud)

Näitaja	2023	2024	Märkused
Niidetud pind, ha	923	1148	Keskkonnaameti andmed
Korrigeeritud pindala, ha	831	1033	eeldati, et 10% alast jäetakse niitmata (tuleneb Keskkonnaameti nõudest ja intervjuueritute hinnangutest)
Kogutud hein, t	1746	2607	EV1-3, EV5-7, EV10-11 ja ühe FIE andmed + üldistus ülejäänud pindalale (st taotlejad, keda ei intervjueritud)
Heina keskmine KA, kg/kg	0,85	0,85	eeldati, et heina keskmine niiskusesisaldus on 15%
Heina kogus kuivaines, t, KA	1484,1	2216,0	heina kogus, t * keskmine KA, kg/kg
Kogutud silo, t	260	1141	EV1,3,4 andmed
Silo keskmine KA, kg/kg	0,41	0,47	EV4 siloproovide alusel
Silo kogus kuivaines, t, KA	106,6	536,3	silo kogus, t * keskmine KA, kg/kg
Luhahaina kogus kuivaines kokku, t, KA	1590,7	2752,3	heina kogus kuivaines, t, KA + silo kogus kuivaines, t, KA
Keskmine saagikus kuivaines, t, KA/ha	1,91	2,66	luhahaina kogus kuivaines kokku, t / korrigeeritud pindala, ha

Kokku kogutud heina ja silo hinnanguline kogus kuivaines oli 2023. aastal arvutuslikult 1590,7 t, KA ja 2024. aastal 2752,3 t, KA. Seega kujunes keskmiseks luhahaina saagikuseks kuivaines 2023. aastal 1,91 ja 2024. aastal 2,66 t, KA/ha (tabel 7).

Intervjuude käigus pärandniitude majandajatega selgus, et Alam-Pedjalt kogutud luhahaina kasutusviisid sõltuvad suurel määral nii koristusperioodi ilmastikutingimustest, mis mõjutavad heina kvaliteeti, kui ka kohalike loomapidajate söödavajadustest. PLK-de majandajate hinnangul mõjutavad ilmastikutingimused otseselt luhahaina edasist kasutamist, kuna sademete hulk määrab, kas niidet saab koguda piisavalt kuivana. Kui juulis-augustis esineb rohkelt sademeid, tuleb heina sageli mitu korda kaarutada, et tagada selle kuivamine enne rullimist.

Enamik pärandniitude majandajaid on seadnud eesmärgiks koguda hein igal võimalusel maksimaalselt kvaliteetsena, et seda oleks võimalik kasutada loomasöödana. Siiski ilmnes, et kaks ettevõtet (EV2, EV5) ei kogunud aastatel 2023 ja 2024 luhuheina eesmärgiga toota loomasööta. Põhjendusena toodi välja, et ebasoodsate ilmastikuolude ja looduskaitseliste piirangute tõttu ei olnud võimalik koguda piisavalt hea kvaliteediga heina, mistõttu peeti täiendavate kulutuste tegemist biomassi kogumisse majanduslikult põhjendamatuks. EV2 ja EV5 esindajate sõnul raskendas heina kasutamist loomasöödana asjaolu, et niitmine on lubatud alles alates 15. juulist, kui taimestik on juba vananenud ja toiteväärtus langenud ning 2023. ja 2024. aasta suvel esines koristusperioodil sageli sademeid. Selle tulemusena pressiti nende ruloonidesse ja toimetati põllule. Kuna suurem osa heinast ei olnud sobiv loomasöödaks, jäeti see sinna lagunema, et hiljem koos sõnnikuga kompostina põllule laotada. EV2 ja EV5 esindajad märkisid, et soodsate ilmastikutingimuste korral on varasematel aastatel olnud võimalik koguda parema kvaliteediga heina ja seda ka müüa, kuid luhuheina üldine kvaliteet on madal ning turustamisvõimalused piiratud.

EV2 ja EV5 poolt majandatav korrigeeritud niidetav pindala (vt tabel 7) oli 2023. ja 2024. aastal vastavalt ca 305 ja 381 hektarit, millelt koguti neil aastatel vastavalt 762 ja 1237 tonni heina (kuivaines). Kuna nimetatud ettevõtted ei suunanud kogutud biomassi loomasöödaka, saab esile tuua, et 2023. aastal jäi kasutamata ca 48% ja 2024. aastal 45% Alam-Pedja pärandniitudelt kogutud luhuheina kogusest.

Autori poolt 2023. aastal intervjuueeritud Alam-Pedja pärandniite majandavate isikute seas oli viis loomakasvatajat, kelle hulka kuulus üks hobusekasvataja, üks piimakarjakasvataja ja kolm lihasekasvatajat. Hobusekasvataja lõpetas 2024. aastaks loomapidamise, mistõttu kadus ka vajadus pärandniitudelt heina varuda. Piimakarjakasvataja (EV4) kasutas nii 2023. kui ka 2024. aastal Alam-Pedja pärandniitudelt kogutud biomassi silo valmistamiseks. Ettevõtte esindaja sõnul on olnud biomassi kasutusviis aastati erinev, sõltudes peamiselt olemasolevatest söödavarudest ja -vajadusest. Kui varasemate aastate söödavarumine on olnud edukas (st ilmastikutingimused on olnud soodsad), on osa biomassist kogutud ka heinana, mida on kasutatud nii loomasöödaks kui ka allapanuna. Samas on esinenud olukordi, kus kogutud hein jääb esialgu kasutuseta ning laguneb aja jooksul looduslikult või kasutatakse hiljem kompostina.

Kolm intervjuueeritud lihavedikasvatajat (EV1, EV3 ja üks FIE) tegutsevad mahetootjatena ning karjatavad oma loomi muuhulgas ka Alam-Pedja pärandniitudel. Talvised söödavarud varutakse nii Alam-Pedja pärandniitudelt kui ka lähipiirkonna poollooduslikelt kooslustelt ja püsirohumaadelt.

Ülejäänud intervjuueeritud pärandniitude majandajad tõid esile, et valdavalt kasutatakse nende poolt hooldatud aladelt kogutud lühaheina loomasöödana, müües seda edasi kohalikele loomakasvatajatele. Samas on varasematel aastatel esinenud olukordi, kus hein jääb seisma ning seda on antud ka tasuta ära, näiteks allapanuks või kasutatud ralliradadel piirdeks.

Biomassi koguse ja kasutamise võrdlus 2023. ja 2024. aasta lõikes tõi intervjuude põhjal esile mitmeid muutusi, mis olid seotud nii saagikuse kui ka ilmastikutingimustega. Näiteks EV1 ja EV3 esindajad märkisid, et kui 2023. aastal kulus kogu varutud hein ära, siis 2024. aasta saagist jääb hinnanguliselt ca 100 tonni heina varuks, mida plaanitakse kasutada tulevikus loomasöödana. EV7 esindaja tõi välja, et 2023. aastal müüdi kogu kogutud hein kohalikele loomakasvatajatele, kuid 2024. aastal suudeti realiseerida ligikaudu pool saagist, ülejäänud ca 30 tonni heina suunatakse kompostimiseks. EV6 esindaja sõnul raskendas 2024. aasta vihmane ilm ja pehme pinnas heinaruloonide väljavedu, mistõttu jäi hinnanguliselt 5–8 tonni ulatuses heina lühaaladele ning see osa biomassist võib veekahjustuste tõttu jääda lõplikult kasutamata. Need näited kinnitavad, et isegi biomassi kasvule soodsate tingimuste korral (nagu 2024. aastal) võivad ilmastiku- ja koristustingimustest tingitud probleemid oluliselt piirata biomassi realiseerimisvõimalusi.

2.2.4. Pärandniitude majandamise majanduslik tulem aastatel 2023 ja 2024

Pärandniitude hooldamine niitmise teel eeldab minimaalsete tegevustena niitmist ja niite kokku kogumist, kuna vastavalt NIIT määrusele tuleb niide alalt eemaldada. Samas ei sätesta määrus täpselt, millisel kujul peab niide olema kokku kogutud, mis jätab taotlejale teatava valikuvabaduse töömeetodites. Intervjuudest Alam-Pedja pärandniitude majandajatega selgus, et niidetavate alade hooldamisel kasutatakse peamiselt kahte viisi niite kogumiseks. Levinum on heinapallide ehk ruloonide valmistamine, kus niide kuivatatakse sobiva niiskustasemeni ning pressitakse seejärel suurtesse silindrilistesse rullidesse. Täpne töökorraldus varieerub sõltuvalt hooldaja praktikast ja ilmastikuoludest. Teine variant on niite kogumine haljasmassina. Sellisel

juhul lastakse heinal pärast niitmist veidi närbuda, seejärel vaalutatakse, purustatakse liikurhekseldiga ning transporditakse haagistega kokku, et seejärel sileerida. Arvestades, et Alam-Pedja pärandniitudelt kogutud biomassist moodustas hein 2023. aastal ligikaudu 93% ja 2024. aastal umbes 81% kogumassist (tabel 7 lk 43), keskendutakse edasises analüüsis eelkõige kuiva heina ehk luhahaina tootmise protsessile (joonis 9).



Joonis 9. Luhahaina tootmiseks teostatavad tööetapid

Niitmine koos niite kokku kogumisega on peamine võte, millega tagatakse alade avatus ja liigirikkuse säilimine Alam-Pedja pärandniitudel. Magistritöös on hinnatud pärandniitude niitelise hooldustegevuse käigus tekkivate kulude suurusjärku, tuginedes standardiseeritud masinatööde ja materjalikulude kalkulatsioonidele. Arvutused ei kajasta ühegi konkreetse ettevõtte tegelikke kulusid, vaid esindavad üldistatud hinnangut, mille aluseks on keskmise hinnaklassi masinate tüüpilised töötingimused ja hinnatasemed. Kulude arvestuses on lisatud ka masinate püsikulud (nt kulum, kindlustus, hoiuruumikulud), mistõttu ei saa neid käsitleda üksnes otseste tootmiskuludena. Arvestamata on jäetud sellised komponendid nagu transpordikulud, käibemaks, riski- ja kasumimarginaalid, mistõttu võivad tegelikud hoolduskulud sõltuvalt hooldaja töökorraldusest ja turutingimustest erineda.

Kalkulatsioonide tulemusena leiti hinnangulised luhahaina tootmiskulud Alam-Pedja pärandniitudel. Aastal 2023 kujunes keskmiseks tootmiskuluks 146,57 €/ha ning 2024. aastal 179,22 €/ha, mis tähendab kulude suurenemist 32,65 € võrra ehk 22,3% võrreldes eelneva aastaga (tabel 8). Samas luhahaina tootmise ühikukulud olid 2024. aastal 12,1% madalamad kui eelneval aastal.

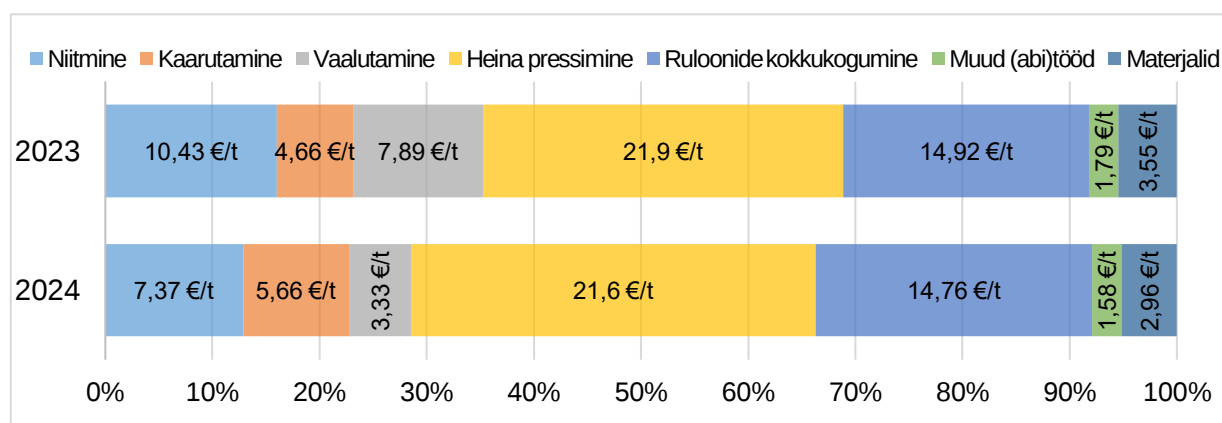
Niitmise, kaarutamise ja vaalutamise kulud hektari kohta olid 2024. aastal (51,20 €/ha) veidi madalamad kui 2023. aastal (51,69 €/ha) (tabel 8). Peamiseks kulude vähenemise põhjuseks oli erimärgistatud diislükütuse hinna langus, mis 2023. aastal oli keskmiselt 0,72 €/l ja 2024. aastal 0,62 €/l. Energiakandjate hinnad on teadaolevalt väga kõikumad, sõltudes globaalsetest

poliitilistest ja majanduslikest arengutest, mis omakorda avalduvad kiiresti ka tootmissisendite hindades.

Tabel 8. Lahaheina tootmise hinnangulised kulud Alam-Pedjal 2023–2024 (autori arvutused)

Näitaja	2023	2024
Keskmine toodang, t/ha	2,25	3,13
Niitmine, kaarutamine ja vaalutamine, €/ha	51,69	51,20
Heina pressimine ja ruloonide kokku kogumine, €/ha	82,85	113,81
Muud (abi)tööd, €/ha	4,04	4,95
Masinatööd kokku, €/ha	138,58	169,96
Materjalid, €/ha	7,99	9,26
Kulud kokku, €/ha	146,57	179,22
Lahaheina tootmiskulud, €/t	65,14	57,26

Aastal 2024 olid heina pressimise ja ruloonide kogumise kulud 113,81 €/ha ehk 37,4% suuremad kui 2023. aastal, mil need ulatusid 82,85 euron hektari kohta (tabel 8). Nende kulude kasvu põhjuseks oli peamiselt aastate vaheline erinevus saagikuses. Kui lahaheina keskmine toodang (15% niiskusesisaldusega) hektari kohta oli 2023. aastal 2,25 tonni, siis 2024. aastal suurenes see 3,13 tonnini hektari kohta. Saagikuse kasv tähendab, et ühe hektari kohta tekib rohkem biomassi, mille kogumiseks ja käitlemiseks kulub rohkem tööaega ja ressursse. Kui aga vaadata lahaheina tootmise ühikukulud tegevuste lõikes, selgub siiski, et keskmised kulud ühe tonni heina pressimiseks ja ruloonide kokkuveoks olid 2024. aastal ca 1% väiksemad kui 2023. aastal (joonis 10).



Joonis 10. Lahaheina tootmise tööprotsesside ühikukulud (€/t) ja kulude struktuur (%) aastatel 2023 ja 2024 (autori arvutused)

Jooniselt 10 on näha, et mõlemal aastal moodustasid suurima osa luhahaina tootmise kuludest heina pressimise (rullimise) ja ruloonide kokku kogumisega seotud masinakulud, mille osakaal oli 2023. aastal 57% ja 2024. aastal 63% kogukuludest. Kui lisada juurde heina rullimisel kasutatava võrgu maksumus (materjalikulud), siis suurenes nende töödega seotud kulude osakaal vastavalt 62% ja 69%-ni luhahaina tootmise kogukuludest.

Aastal 2023 olid luhahaina tootmise kulud 146,57 €/ha ja 65,14 €/t ning 2024. aastal 179,22 €/ha ja 57,26 €/t. Kuigi kalkulatsioonid annavad hinnangu luhahaina tootmise kuludest Alam-Pedja pärandniitudel, tuleb rõhutada, et tegemist on üldistatud arvestustega, mis ei seostu otseselt ühegi konkreetse ettevõtte tegelike kuludega. Kalkulatsioonides ei ole arvesse võetud riski-, kasumi- ega käibemaksukomponente, mistõttu kajastuvad kulud ilma käibemaksuta sisendihindade põhjal. Samas tuleb arvestada, et paljud pärandniitude majandajad ei ole käibemaksukohustuslased ning tegelikkuses suureneb nende jaoks sisendite maksumus vastavalt kehtivale käibemaksumäärale (20% 2023. aastal ja 22% 2024. aastal). Lisaks ostavad mitmed pärandniite majandavad isikud osaliselt või täielikult sisse masinatöid, mis tähendab, et tegelikud kulud sisaldavad sageli ka teenusepakkujate riskimarginaale ja kasumiosa. Käesolevas magistritöös ei ole arvesse võetud ka heina transpordikuluseid, kuna Alam-Pedja pärandniitud paiknevad hajusalt ning teedevõrgu ja hoiukohtade kauguste erinevuste tõttu ei olnud võimalik transpordikuluseid usaldusväärselt üldistada. Transpordikulude analüüs ning logistiliste lahenduste hindamine võiksid olla edasiste uuringute fookuses. Samuti tuleb arvestada, et osa kulusid (nt masina ettevalmistus, logistika ja töö organiseerimine) jaotub suurema toodangu korral efektiivsemalt, aidates ühikuhinda teataval määral vähendada.

Alam-Pedja pärandniite majandavate isikute kogemused luhahaina realiseerimisel varieerusid oluliselt. Näiteks EV1 ja EV3 esindajate sõnul oli 2023. ja 2024. aastal kvaliteetselt kogutud kuiva luhahaina võimalik müüa keskmise heina turuhinnaga, mis jäi mõlemal aastal ca 100 €/t kanti. Samas mõned väiksemas mahus tegutsejad tõid välja, et luhahain realiseeriti sageli madalama hinnaga ehk 10–20 €/t või anti ära tasuta. Kirjanduse andmetel (nt Kippa *et al.* 2011; Kass *et al.* 2021) on looduskaitselistel eesmärkidel hilises kasvustaadiumis niidetud heina kvaliteet tüüpiliselt madalama toiteväärtusega kui kultuurrohumaadelt varutud hein. Seetõttu võib eeldada, et luhahaina realiseerimishind võib jääda madalamaks kui kuiva heina üldine turuhind, mis omakorda vähendab võimalusi katmaks tootmiskulusid pelgalt müügitulu abil.

Pärandniitude hooldamine sõltub suures osas toetustest, mis aitavad katta alade majandamisega seotud kulud ja toetada poollooduslike koosluste säilitamist ka majanduslikust vaatepunktist. Toetustel on oluline roll, kuna tüüpiliselt osutub pärandniitude majandamine ilma toetusteta mittetasuvaks. Seepärast käsitletakse toetusi kui üht osa pärandniitude väärtusahelast ning arvestatakse neid biomassi tootmise kulude ja tasuvuse hindamisel.

Aastatel 2023 ja 2024 oli PRIA andmetel Alam-Pedja LLA pärandniitudega seotud taotluste koguarv vastavalt 19 ja 20, kusjuures taotletud pindala suurenes selle aja jooksul 81 hektari võrra – 1503,6 hektarilt 1584,6 hektarini (tabel 9). Ühise põllumajanduspoliitika strateegiakava (ÜPP SK 2023–2027) raames on pärandniite majandavatel isikutel võimalik taotleda mitut liiki toetusi. Põhiliseks hooldustegevusi toetavaks meetmeks on pärandniidu hooldamise toetus (NIIT), millele võivad lisanduda samade alade puhul ka põhisissetuleku toetus (PST), ümberjaotav toetus (ÜJT) ning mahepõllumajandusliku taimekasvatuse toetus (MAHE). Erinevalt 2023. aastast taotles 2024. aastal üks isik Alam-Pedja pärandniidu alale keskkonnasõbraliku majandamise toetust (KSM), mida on võimalik saada üksnes juhul, kui NIIT toetust ei ole samale alale taotletud.

Tabel 9. Toetused Alam-Pedja pärandniitudele aastatel 2023–2024 (autori koostatud, PRIA andmed)

Toetusliik	Taotlejate arv		Toetusi taotletud pindala, ha		Määratud summa kokku, €	
	2023	2024	2023	2024	2023	2024
NIIT *	17	18	1 495,56	1 579,35	235 117	248 713
PST	18	20	1 499,84	1 583,72	161 142	170 570
ÜJT	18	20	782,5	855,58	17 974	20 057
MAHE	6	6	815,16	870,19	16 695	23 490
KSM	0	1	0	4,74	0	203
Kokku	19	20	1 503,58	1 584,61	430 928	463 033

Märkus: *- 2023. a. jäeti NIIT taotluse puhul üks taotlus mahus 25,76 ha rahuldamata, sest tingimusi ei täidetud

PRIA määras Alam-Pedja LLA pärandniitudega seotud toetusteks 2023. ja 2024. aastal kokku vastavalt 430 928 ja 463 033 eurot. Tabelist 9 ilmneb, et 2024. aastal suurenes pindala, millele taotleti toetusi kõikide toetusliikide puhul võrreldes 2023. aastaga. Toetusaluse pindala kasv tõi kaasa nii üksikute toetusliikide kui ka kogu toetussumma suurenemise. Üldistatult võib öelda, et 2023. ja 2024. aasta eest maksis PRIA Alam-Pedja LLA pärandniitude majandajatele toetusi keskmiselt vastavalt 286,6 ja 292,2 eurot hektari kohta.

Mõlemal aastal moodustas toetustest suurima osa NIIT toetus, hõlmates 2023. aastal 99,5% taotletud pindalast ja 54,7% määratud summast ning 2024. aastal vastavalt 99,7% ja 53,7%. NIIT põhitegevuse elluviimise eest makstav ühikumäär sõltub niitmise kuupäevast: 100 €/ha varasema ja 150 €/ha hilisema niitmise korral. Kaitsealuse maas pesitseva linnuliigi elupaigas on Keskkonnaamet määranud niitmise lubatuks alates 15. juulist, kuid taotleja võib hilisema niitmise valida niidetavale pärandniidule ka vabatahtlikult. PRIA-le esitatud NIIT taotlustel, kus põhitegevuseks oli märgitud niitmine, oli mõlemal aastal üle 90% juhtudest tegevuse teostamise algusajaks märgitud 15. juuli või hilisem kuupäev. Seetõttu lähtutakse käesolevas töö edasistes arvutustes eeldusest, et NIIT toetuse ühikumääraks on 150 €/ha.

Seega üldistatult võib öelda, et NIIT toetuse ühikumääraks on tüüpiliselt 150 €/ha. Peale selle on kõigil pärandniitude majandajatel võimalik taotleda PST-d, mille ühikumäär oli 2023. aastal 107,77 €/ha ja 2024. aastal 107,22 €/ha (tabel 10). Teised toetusmeetmed (ÜJT, MAHE, KSM) ei hõlma kogu pärandniitude pindala ja nende osakaal moodustab alla 10% määratud toetuste kogusummast, seega neid ei ole mõistlik üldistada kogu ala peale.

Tabel 10. Pärandniitude majandamise kulud ja toetused Alam-Pedjal 2023–2024

Näitaja	2023	2024	Andmeallikas
Keskmine PLK rendihind Alam-Pedja LLA-l, €/ha	-15,00	-15,00	PLK-de majandajad
Luhaheina tootmiskulud, €/ha	-146,57	-179,22	autori arvutused
Otsesed PLK majandamisega seotud kulud kokku, €/ha	-161,57	-194,22	
NIIT ühikumäär, €/ha	150,00	150,00	PRIA; autori üldistus
PST ühikumäär, €/ha	107,77	107,22	PRIA
Otseselt PLK-ga seostatavad toetused kokku, €/ha	257,77	257,22	
Tulem, €/ha	96,20	63,00	

Tabelist 10 ilmneb, et NIIT ja PST toetuste kogusumma ületas mõlemal aastal pärandniitude hooldamise otseseid kulusid Alam-Pedja LLA-l. Aastal 2023 ületasid toetused otseseid kulusid keskmiselt 96,20 euro võrra hektari kohta ning 2024. aastal 63,00 euro võrra hektari kohta. See tähendab, et toetuste abil oli võimalik katta nii luhaheina tootmisega kui ka rendihinnaga seotud kulud ja saavutada tagasihoidlik positiivne majanduslik tulemus. Samas tuleb arvestada, et arvestatud kulud ei hõlmanud näiteks transpordi- ega logistikakulusid, mistõttu võivad tegelikud majanduslikud tulemused sõltuvalt konkreetse majandaja töökorraldusest ja heina realiseerimisvõimalustest oluliselt erineda.

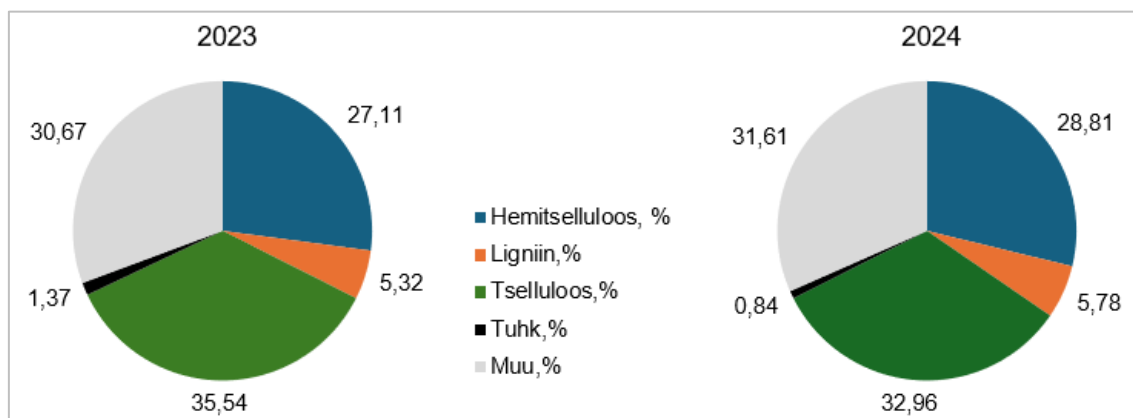
2.3. Lahaheina väärindamisvõimaluste hindamine

2.3.1. Lahaheina biokeemiline koostis ja selle potentsiaal

Lignotselluloosse biomassi väärindamispotentsiaal sõltub oluliselt selle biokeemilisest koostisest, mis määrab biomassi sobivuse erinevateks biorafineerimisprotsessideks. Alam-Pedja pärandniitudelt kogutav lahahein on lignotselluloosse biomassi allikas, mille puhul nähakse potentsiaali asendada fossiilseid ressursse erinevates kestlikumates ja ringmajanduse põhimõtteid järgivates tootmisprotsessides. Töö eelnevates osades käsitletud aspektidele toetudes võib välja tuua kolm peamist põhjust, miks lahahein on perspektiivikas toore biorafineerimisel. Esiteks on tegemist igal aastal uueneva biomassi vooga, mis tagab tooraine kättesaadavuse ja stabiilsuse. Teiseks on lahaheina kasutamine majanduslikult ja keskkonnaalaselt põhjendatud, sest pärandniitude hooldamine on vajalik ka looduskaitsest aspektidest lähtuvalt. Kolmandaks näitab üldine trend, et loomakasvatuse maht on pigem väheneva trendiga, mistõttu võib tulevikus suureneda kasutuseta jääva lahaheina kogus.

Peale selle kehtivad suurel osal Alam-Pedja lamminiitudel maaspesitsevate linnuliikide kaitseks seatud niitmispiirangud, millest tulenevalt kogutakse hein hilises kasvufaasis. Varasemates uuringutes (nt Jørgensen *et al.* 2022) on toodud esile, et hilises kasvufaasis niidetud ning väetamata rohtse biomassi puhul on mõistlik keskenduda eelkõige kiu osa väärindamisele.

Alam-Pedja pärandniitudelt kogutud lahaheina koostise määramiseks viidi aastatel 2023 ja 2024 läbi kiuanalüüsid, mille täpsemad tulemused on esitatud lisas 10 ning mõlema aasta keskmine kiu koostis on esitatud joonisel 11.



Joonis 11. Keskmine lahaheina koostis aastatel 2023 ja 2024, % KA kg kohta (autori koostatud kiuanalüüside tulemuste põhjal)

Kiuanalüüsi tulemused näitavad, et 2023. ja 2024. aastal Alam-Pedja pärandniitudel kogutud luhhein sisaldas keskmiselt 33–36% tselluloosi, 27–29% hemitselluloosi ja 5–6% ligniini (joonis 11). Mohapatra *et al.* (2019) andmetel varieerub kõrreliste lignotselluloosse biomassi keemiline koostis tselluloosi puhul vahemikus 29–50% ning hemitselluloosi ja ligniini puhul vastavalt 25–43% ja 5–18%. Alam-Pedja luhheina tulemused jäävad üldjoontes samadesse vahemikesse, kinnitades selle keemilise profiili vastavust teaduskirjanduses kirjeldatud kõrreliste biomassile. Aastate võrdluses varieerusid luhheina põhikomponentide sisaldused vaid 1–2 protsendipunkti ulatuses, mis viitab selle keemilise koostise suhtelisele stabiilsusele sõltumata võimalikest erinevustest taimiku koosseisus. See omakorda toetab luhheina sobivust väärindamisprotsesside sisendina, kus on oluline tagada tooraine kvaliteedi ja koostise järjepidevus.

Samas võrreldes puitmaterjalidega, milles võib ligniinisaldus ulatuda kuni 30%-ni, sisaldab luhhein ligniini märgatavalt vähem. Väiksem ligniinisaldus võib osutada soodsaks eelkõige siis, kui eesmärgiks on tselluloosi ja hemitselluloosi kättesaadavuse suurendamine, näiteks bioetanooli tootmiseks vajalikes protsessides. Samal ajal ei välista ligniini suhteliselt tagasihoidlik osakaal selle sihipärasest väärindamist kõrgema lisandväärtusega toodeteks, näiteks aroomaatsete ühendite või muude biopõhiste kemikaalide tootmise tarbeks. Autori hinnangul võib just ligniinifraktsiooni väärindamine kõrgema puhtusastmega keemiatööstuse sisendina kujutada endast tüüpilist väärtuspüramiidi rakendamise näidet, kus ka väikse osakaaluga biomassi komponent leiab kasutuse kõrge lisandväärtusega toodete tootmisel.

Et paremini mõista luhheina potentsiaali lignotselluloosse biomassi allikana, on allpool toodud teoreetiline hinnang selle põhikomponentide absoluutkoguste kohta aastatel 2023 ja 2024 kogutud kuivaines. Tabelis 11 on esitatud hinnangulised hemitselluloosi, tselluloosi ja ligniini kogused (tonnides), eeldades, et kogu kogutud biomass (2023.a 1590,7 t, KA; 2024.a 2752,3 t, KA) oleks maksimaalse efektiivsusega fraktsioneeritud.

Tabel 11. Hinnanguline hemitselluloosi, tselluloosi ja ligniini kogus 2023. ja 2024. aastal kohutud luhheinas (autori koostatud)

Komponent	2023. a. kogus (t)	2024. a. kogus (t)
hemitselluloos	431	793
tselluloos	565	907
ligniin	85	159

Tabeli 11 andmetest selgub, et kahe aasta jooksul oleks olnud teoreetiliselt võimalik eraldada kokku ligikaudu 1224 tonni hemitselluloosi, 1472 tonni tselluloosi ning 244 tonni ligniini. Sellised kogused pakuvad esmast kvantitatiivset ettekujutust piirkonnas kogutud luhahaina potentsiaalset biorafineerimise sisendmaterjalina ning selle võimalikust panusest biomassiressursside väärindamisse. Eeldusel, et fraktsioneerimisprotsessid toimuvad maksimaalse efektiivsusega, viitab see märkimisväärsele lähteainete mahule, mida saaks suunata näiteks bioetanooli tootmisse, ligniinil põhinevate biopõhiste kemikaalide või bioplastide tootmisse.

Oluline on tähelepanu pöörata asjaolule, et kiuanalüüsi tulemused ei näita otseselt seda, kui palju tselluloosi, hemitselluloosi ja ligniini on tegelikult võimalik biomassist eraldada, kuna see sõltub kasutatavast väärindamistehnoloogiast ja selle efektiivsusest. Erinevad töölusmeetodid mõjutavad oluliselt seda, kui suur osa biomassi koostisosadest on praktikas eraldatav ja väärindatav. Tuleb arvestada ka materjalikadude, protsessi jääkide ning sisendbiomassi kvaliteedist tulenevate erinevustega, mis sõltuvad tehnoloogilistest, majanduslikest ja keskkonnatingimustest. Seetõttu tuleb neid hinnanguid käsitleda kui indikatiivseid lähteandmeid, mis aitavad paremini mõista piirkondliku biomassi väärindamise potentsiaali ja selle mõju kestlikele tootmispraktikatele ringbiomajanduse kontekstis.

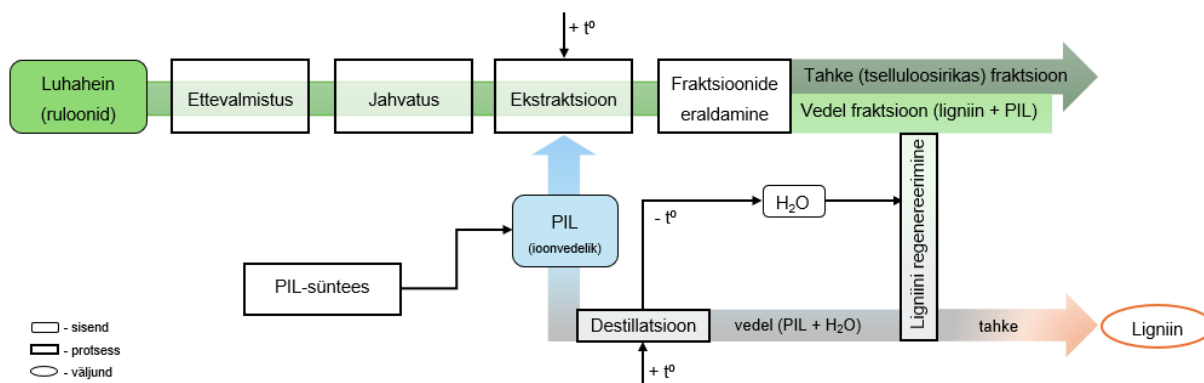
2.3.2. Luhahaenast ligniini eraldamise protsess protoonsete ioonvedelike abil

Luhahaina kui lignotselluloosse biomassi väärindamisel on keskse tähtsusega sobiv eeltöötlus. Viimase kümnendi jooksul on üheks paljulubavaks lähenemiseks kujunenud ioonsete vedelike kasutamine. Ligniini eraldamiseks peetakse kõige sobivamateks just protoonseid ioonseid vedelikke, sest need võimaldavad ligniini selektiivselt lahustada ning jätta alles tselluloosirikka fraktsiooni. Nii saadakse kaks eraldi voogu, mida on hiljem lihtsam edasi töödelda või erinevates rakendustes kasutada.

Käesoleva magistritöö raames ei viidud läbi laboratoorseid katseid luhahaina ligniini eraldamiseks PIL-ide abil ning kirjanduses ei ole seni raporteeritud analoogseid katseid, kus biomassi allikana kasutatakse poollooduslikel niitudel kasvanud mitmeliigilist taimekooslust. Eesti Maaülikooli biokütuste töörühmas on läbi viidud uuringuid, mis keskenduvad protoonsete ioonvedelike kasutamisele biomassi eeltöötlemisel. Lehtpuidu biomassi puhul on näidanud häid

tulemusi püridiiniumformiaadi kasutamine (Hasanov *et al.* 2022) ning okaspuu biomassi puhul on edukaks osutunud 2-hüdroksüetüüldimetüülammooniumlaktaat (Khan *et al.* 2022). Autorile teadaolevalt on EMÜ biokütuste laboris käimas ka edasised uuringud järgmiste protoonsete ioonvedelikega. Kuigi luhhein, kui rohtne biomass, erineb oma keemiliselt koostiselt leht- ja okaspuidu biomassist, muuhulgas sisaldab luhheina ligniini p-kumariülühendeid, on tõenäoline, et mainitud uuringutes kasutatud ioonvedelikud võivad olla efektiivsed ka heina töötlemisel, arvestades biomassis esinevate keemiliste sidemete sarnasusi. Siiski võib heina puhul esineda teatud erinevusi, kuna ligniinis leidub lisamonomeer.

Alam-Pedja luhheina väärindamise majandusliku tasuvuse ja üldise potentsiaali hindamine eeldab selget ülevaadet väärindamisahela põhietappidest ning nende kulukandjatest. Protoonsetel ioonvedelikel põhinev ligniini eraldamine on mitmeastmeline tehnoloogiline protsess, mille käigus biomass fraktsioneeritakse erinevateks komponentideks. Selleks, et illustreerida, kuidas võiks luhheina biorafineerimise protsess tööstuslikul või pilootskaalal toimida, on joonisel 12 esitatud vooskeem, mis koondab peamised tehnoloogilised etapid koos olulisemate sisendite ja väljunditega.



Joonis 12. Luhheinast ligniini eraldamise protsess protoonsete ioonvedelike abil (autori koostatud)

Luhheinast ligniini eraldamise protsess PIL-ide abil algab toorme vastuvõetuga. Hein saabub ruloonidena, mille ümber on plast- või nöörvõrk. Võrk eemaldatakse ning ruloon rullitakse lahti, et välja sortida võõrised (plastitükid, kivid, oksad). Puhastatud hein juhitakse seejärel jahvatusveskisse, kus kiud peenestatakse. Ühtlane ja peen fraktsioon tagab parema segunemise ioonvedelikuga ja ühtlase soojusülekande järgnevas etapis.

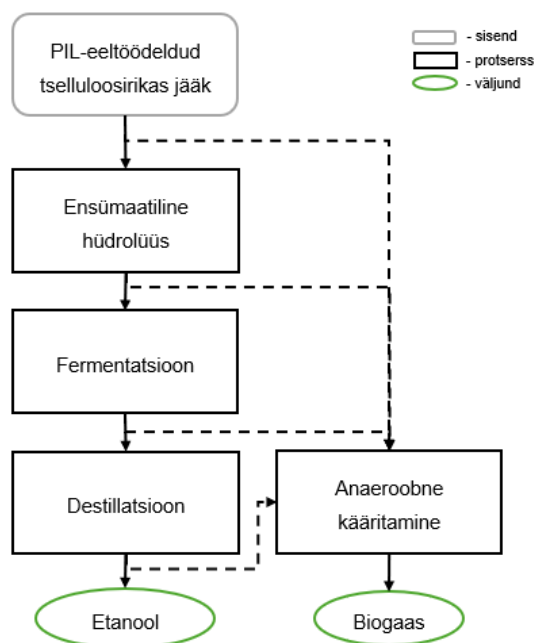
Jahvatatud biomass suunatakse suletud ekstraktorisse koos valitud PIL-iga. Segu kuumutatakse kindla temperatuurini ja hoitakse mõõdukal segamiskiirusel. Nendes tingimustes lahustub suurem osa ligniinist vedelasse PIL-faasi, samal ajal kui tselluloosi- ja hemitselluloosirikas pulp jääb tahkeks. Ekstraktsiooni lõppedes eraldatakse tahke ja vedel fraktsioon sõelumise või filtreerimise teel. Filtrile jääb kiuline pulp ning filtraat koosneb PIL-ist ja selles lahustunud ligniinist.

Ligniini regenerereerimiseks lisatakse vedelale fraktsioonile kindlaksmääratud kogus puhast vett, mis toimib vastulahustina. Vee lisamisel kaotab ligniin lahustuvuse PIL-is, moodustab helbeid ning sadestub. Tekkinud ligniinisade eemaldatakse filtreerimise või tsentrifuugimise teel, mille tulemusena saadakse tahke puhas ligniin ning vedel segu, mis sisaldab PIL-i ja vett. Ekstraheeritud tahke ligniinifraktsioon kujutab endast protsessi peamist väljundit, mis võiks potentsiaalselt olla sobiv tooraine kõrgemat lisandväärtust loovates rakendustes, näiteks aromaatsete kemikaalide, vaikude või süsinikkiudude tootmiseks.

Viimases etapis toimub PIL-i regenerereerimine ja ringlussevõtt. Ioonvedeliku taaskasutamiseks juhitakse PIL-H₂O segu madalsurve-destillaatorisse. Kuumutamisel aurustub vesi, mis kondenseeritakse ning kogutakse eraldi, samal ajal kui veevaba PIL jääb destillaatorisse ja suunatakse tagasi järgmisesse ekstraktsioonitsükklisse. Selline suletud lahustiring vähendab nii keemilikaalikulu kui ka keskkonnamõju.

PIL-ide süntees on suhteliselt lihtne: üheastmeline happe-aluse neutralisatsioon toimub madalatel temperatuuridel ($\approx 20\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$) ning ei vaja eriseadmeid ega lenduvaid lahusteid. Kuna PIL-i saab pärast iga ekstraktsioonitsükli destillatsiooni teel kuni $\approx 99\%$ ulatuses taastada, tekib vajadus värske lahusti järele alles siis, kui regeneratsioonipuhutus langeb või lahustisse koguneb kõrvalaineid. Sellisel juhul on kõige kulutõhusam uuendada lahus kohapeal, lisades vajaduse korral värsket happe- või alusekomponenti ning eemaldada liigne vesi vaakum-aurustiga. Kohapealne PIL-süntees: vähendab tarnekulusid ja logistikariske; võimaldab kiirelt kompenseerida paratamatut, kuid väikest PIL-kadu; hoiab protsessi suletud ringina, minimeerides keskkonnamõju; kasutab laialt kättesaadavaid ja suhteliselt odavaid lähteaineid (nt sipelghape, püridiin). Seetõttu on autor seisukohal, et PIL-ide sünteesi- ja taastamisplakk on mõistlik kavandada samasse väärindamisüksusesse, kus toimub lühaheina fraktsioneerimine.

Ligniini tootmise kõrvalsaadus ehk pärast ekstraheerimist eraldatud tahke fraktsioon on tselluloosirikas jääk, millest on võimalik toota näiteks etanooli või biogaasi (joonis 13). Etanooliraja puhul läbib materjal ensümaatilise hüdrolyüsi, kus tsellulaasid lõhustavad tselluloosi glükoosiks. Seejärel kääritatakse glükoos pärmiga etanooliks ning puhastatakse destillatsiooni abil kütuseetanooli (bioetanooli) kvaliteedini. Kui hüdrolyüüsaak on kõrge, eraldatakse vedel suhkrulahus tahkest jäägist ning tahke jääk suunatakse edasiseks energia- või mullaparandus-kasutuseks (nt anaeroobsesse kääritamisse biogaasi tootmiseks või komposti tooraineks). Biogaasiraja puhul viiakse hüdrolyüsimata või vaid osaliselt hüdrolyüsitud kiuline mass otse anaeroobse kääritamise reaktorisse, kus mikroobid muundavad selle biogaasiks (peamiselt $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$). See lahendus nõuab väiksemat investeeringut ja on protsessi poolest lihtsam, kuid annab väiksema energiatihedusega lõppsaaduse kui etanoolirada.



Joonis 13. Tselluloosirikka kõrvalfraktsiooni võimalikud väärimisrajad (autori koostatud, ekspertarvamuste ja Rocha-Meneses 2020 põhjal)

Etanooliraja puhul on tulenevalt hüdrolyüsi efektiivsusest kaks varianti, kuidas saadud massiga edasi käituda. Lihtsam variant on see, et kogu hüdrolyüsitud mass läheb fermenteerimisele. Teine variant, kui hüdrolyüs on olnud efektiivne, siis on mõistlik tahke ja vedel fraktsioon teineteisest eraldada. Sel juhul läheks ainult vedel osa fermenteerimisele ning tahke osa on mõistlik saata biogaasistamisele. Siinkohal on oluline arvesse võtta, et iga lisanduv tööstusetaap

toob paratamatult kaasa lisakulud. Seetõttu tuleks luhakeina väärimdamisel eraldi hinnata, milline kombinatsioon on majanduslikult tasuvam ning kaaluda võimalusi kasutada osa vooge olemasolevates biogaasijaamades või teistes regionaalsetes tarneahelates. Rocha-Meneses (2020) doktoritöös on analoogsete biomassivoogude puhul näidatud, et bioetanooli ja biogaasi järjestikune tootmine võib kogu energiasaaki märgatavalt kasvatada ning aidata katta ensüümide ja destilleerimisega seotud kulusid. Lõplik rajavalik sõltub ärimudeli valikust, turuolukorrast ja soovitud toodanguprofiilist. Kõrvalfraktsiooni võimalik suunamine nii etanooli-, biogaasi- kui ka komposti tootmisesse näitab, et PIL-eeltöödeldud luhakein omab märkimisväärset väärimdamispotentsiaali ning seda on võimalik kasutada kaskaadselt.

2.3.3. Luhakeina väärimdamisega seotud tehno-ökonoomilised aspektid

Protoonsete ioonvedelike kasutamine ligniini selektiivseks eraldamiseks lignotselluloosest biomassist on paljulubav tehnoloogia, kuid selle rakendatavus Alam-Pedja pärandniitudel pärit luhakeinaga on veel varajases uurimisjärgus. PIL-ide rakendamine LCB eeltöötusel on alles katsestaadiumis, mis tähendab, et olemas on laboratoorsed alusuuringud ja funktsionaalsed prototüübid, kuid konkreetse toorainega (st luhakein) ei ole veel optimeeritud katseid läbi viidud. See seab vajaduse selgelt esile tõsta tehnilisi parameetreid, mis mõjutavad protsessi edukust, tootlikkust ning taaskasutatavust. PIL-tehnoloogia üldised protsessi etapid on kirjeldatud eelmises osas (2.3.2.), kuid iga etapi juures on oluline arvesse võtta mitmeid tehnilisi muutujaid, mis määravad kogu protsessi efektiivsuse, kulukuse ja ka võimaliku skaleeritavuse.

PIL-i valik ja keemiline koostis mõjutavad üheaegselt nii protsessi tehnilist efektiivsust, majanduslikku tasuvust kui ka keskkonnamõju. Erinevad PIL-id omavad erinevat ligniini lahustumisvõimet. PIL valikul on oluline arvestada selle viskoossust, toksilisust ning selle sünteesi- ja regenereerimiskulusid. Kuna Alam-Pedja luhakeinaga pole veel laboratoorseid katseid läbi viidud, vajab sobiva PIL-i määramine ja optimeeritud parameetrite leidmine edasist uurimist.

Biomassi osakeste suurus ehk jahvatamise aste mõjutab otseselt ligniini ekstraheerimise tõhusust. Väiksemad osakesed võimaldavad PIL-il paremini biomassi sisse tungida ja rohkem ligniini lahustada. Samas põhjustab peenem jahvatus kõrgemat energiakulu ja võib muuta

protsessi majanduslikult ebaefektiivsemaks. Seega tuleb leida kompromiss kuluefektiivsuse ja ekstraktsioonitõhususe vahel.

Biomassi ja PIL-i massisuhe (BM:PIL suhe) on üks kriitilisemaid protsessiparameetreid, kuna suurema PIL-i koguse kasutamine tähendab ka suuremaid kulusi, kuid võib parandada ligniini lahustumist ja protsessi kiirust. Liiga madala BM:PIL massisuhte korral võib PIL muutuda küllastunuks ja ligniini saagis väheneb. Ideaalne massisuhe sõltub tooraine koostisest, kuid uuringud on näidanud, et suhe 1:3 kuni 1:10 (kuivainemass : PIL mass) on tavaliselt optimaalses vahemikus.

Ekstraktsiooni temperatuur mõjutab protsessi kiirust ja energiakulu. Kõrgem temperatuur suurendab ligniini lahustumise kiirust ning lühendab inkubatsiooniaega. Samas võib liiga kõrge temperatuur põhjustada hemitselluloosi lagunemist ja soovimatute kõrvalühendite teket, mis võivad inhibeerida järgneva protsessi. Temperatuur mõjutab ka PIL stabiilsust – osad PIL-id võivad kõrgemal temperatuuril laguneda või muutuda vähem efektiivseks.

Ekstraktsiooni kestvus ehk inkubatsiooniaeg määrab kui palju ligniini jõutakse ühe tsükli jooksul eraldada. Liiga lühike aeg võib anda väikese saagise, kuid liiga pikk aeg suurendab energiakulu ja kõrvalreaktsioonide riski. Seetõttu on oluline määrata optimaalne ajavahemik, kus ligniini lahustumine küllastub.

PIL taaskasutamise määr on üks olulisemaid tegureid kogu protsessi majandusliku ja keskkonnamõju seisukohalt. Efektiivne PIL-i regenereerimine võimaldab vähendada materjalikulusid kemikaalidele ja minimeerida jäätmeid. Samas võivad regenereerimisprotsessi käigus tekkida kaod, sõltuvalt sadestusaine tüübist, töötlustemperatuurist ja kasutataud puhastustehnoloogiast. Näiteks Khan *et al.* (2022) on leidnud, et PIL-i majanduslik potentsiaal suureneb märkimisväärselt, kui seda saab taaskasutada vähemalt viis tsükli ilma eraldusvõime languseta.

Ligniini saagis ja kvaliteet on väärindamise seisukohalt keskse tähtsusega. Mida suurem on ligniini eraldusmäär ja mida puhtam on saadud fraktsioon, seda rohkem võimalusi avaneb selle kasutamiseks keemiatööstuses, näiteks aromaatsete ühendite, biovaikude või süsinikmaterjalide tootmisel. PIL-tehnoloogia üheks tugevuseks peetaksegi seda, et õigesti valitud

protsessitingimustel võimaldab see ligniini keemilist struktuuri paremini säilitada kui traditsioonilised happelised või aluselised eeltötlused. On oluline, et väärimisahelas pöörataks tähelepanu just sellele ligniinifraktsioonile, sest ligniini turuväärtus sõltub otseselt selle puhtusest. Nadányi *et al.* (2022) andmetel on madala puhtusastmega ligniini turuväärtus suhteliselt odav, jäädes vahemikku 92–276 eurot tonni kohta. Samas võib kõrge puhtusastmega ligniini hind ulatuda mitmesaja euron juba 100 grammi kohta, näiteks 2025. aasta seisuga on see 56,20–166,00 € 100 g kohta ehk 562–1660 € kilogrammi kohta (Lignin, alkali 2025). See näitab, et kvaliteetne ligniin võib olla väga väärtuslik tooraine, eeldusel et see vastab tööstuses nõutavatele puhtus- ja struktuurikriteeriumitele. Seetõttu on ka PIL-tehnoloogia rakendamisel oluline, et kogu protsess, alates PIL-i valikust kuni eraldustingimusteni, oleks suunatud just sellise ligniinifraktsiooni saavutamisele, mida saab kasutada kõrgema lisandväärtusega toodetes.

Luhaheina väärimise majandusliku tasuvuse hindamisel tuleb arvesse võtta ka toormega seotud kulusid. Toormekulude alla kuulub mitte ainult luhaheina maksumus, vaid ka selle transpordi- ja hoiustamiskulud. Heinaruloonide keskmine turuhind 2024. aasta andmete põhjal oli ligikaudu 100 €/t. Transpordikulud maanteel sõltuvad vahemaast ja kasutatavast transpordiviisist. Kui hein transporditakse ruloonidena ning eeldada, et veokile mahub keskmiselt 10 tonni, siis kujunes ühe tonni transportimise hinnaks ca 0,125 €/km (transpordi koguhind vahemikus 1,2–1,3 €/km, sõltuvalt pakkujust). Alternatiivina on võimalik hein transportida lahtisena hakkevannis, mille puhul oleks kilomeetri hind ligikaudu 9% madalam (0,114 €/km). Samas tuleb arvestada, et lahtise heina hoiustamine on keerulisem ja kulukam, sest selle kvaliteedi säilitamiseks tuleb tagada väga head ladustamistingimused, mis väldivad niiskuse, hallituse ja saaste tekkimist. Ruloonid seevastu võimaldavad heina hoida ka lihtsustatud tingimustes, näiteks katuse all või varjualuses, kus ilmastiku mõju on välditud, kuid ei ole tingimata vaja ventilatsiooniga sisetingimusi.

Luhahein, nagu ka enamik teisi rohtseid biomasse, on hooajaline ressurss, mis on kättesaadav vaid piiratud ajavahemikul suve teisel poolel. See tähendab, et biorafineerimistehas peab suures mahus tooret varuma üsna lühikese aja jooksul ning tagama selle aastaringse töötlemise võimaldamiseks piisava hoiustamisvõimekuse. Hooajalisus suurendab vajadust efektiivse logistika ja ladustamislahenduste järele.

Madala energiatiheduse ja mahuka iseloomu tõttu on rohtse biomassi (sh heina) transportimine suhteliselt kallis. Karo *et al.* (2021) uuringu põhjal peetakse optimaalseks heina transportimist kuni 50 km raadiuses väärindamistehasest – kaugem vedu muudab toorme kulukaks ning vähendab projektide majanduslikku tasuvust. Seega on üheks oluliseks küsimuseks lühaheina väärindamise juures tootmisüksuse paiknemine. Käesoleva töö raames tootmise paigutuse aspekte põhjalikult ei käsitletud, kuid tulevastes uuringutes on mõistlik analüüsida erinevaid asukohastsenaariumeid, arvestades nii biomassi ruumilist jaotust, olemasolevat infrastruktuuri kui ka võimalikke tarneahela optimeerimisvõimalusi.

Lignotselluloosse biomassi väärindamistehnoloogiate arendamisel on oluline hinnata mitte ainult nende tehnilist teostatavust, vaid ka majanduslikku ja keskkonnavalast jätkusuutlikkust. Selleks kasutatakse järjest enam süsteemseid hindamismeetodeid, nagu TEA ja LCA, mille kombineerimine võimaldab teha teaduspõhiseid järeldusi ka arendusjärgus olevate tehnoloogiate kohta. TEA raames eristatakse tüüpiliselt kapitalikulud (CAPEX) ja tegevuskulud (OPEX).

Kapitalikulud hõlmavad tehase rajamisega seotud investeeringuid ning tehase käivitamiseks vajalike seadmete ja süsteemide soetamist. PIL-protsessi puhul on peamised vajalikud seadmed näiteks reaktsioonimahutid, kuumutus- ja segamissüsteemid, tahke ja vedela faasi eraldusseadmed ning lahusti regenereerimisüksus. Ekspertarvamuste ja kirjanduse põhjal on PIL-protsessis võimalik kasutada kommertsiaalselt kättesaadavaid ja keemiatööstuses levinud seadmeid, mistõttu ei ole tõenäoliselt vaja arendada spetsiaalselt PIL-protsessile kohandatud eriseadmeid. See võimaldab vähendada arenduskulud ning võib kiirendada protsessi viimist piloot- või tööstuslikule tasemele.

Tegevuskulud hõlmavad kõiki igapäevaseid tootmisega seotud kulud, mis tekivad pärast tehase käivitamist. PIL-protsessi puhul on peamised tegevuskulude komponendid energia (nt kuumutamine, segamine), tööjõud, PIL-i sünteesi ja täiendamise kulud, biomassi ettevalmistus (nt jahvatamine), vee ja muude tarbekemikaalide kulu, seadmete hooldus ning toorme (lühaheina) hankimisega seotud kulud. Energiakulud on märkimisväärsed just ligniini ekstraheerimise ja PIL-i regenereerimise etappides, kus kasutatakse soojusprotsesse. Samuti on oluline arvestada sellega, et PIL-e ei kasutata ühekordselt ning nende taaskasutamine mõjutab oluliselt tegevuskulud. Kuigi kirjanduses on näidatud, et mitmeid PIL-e on võimalik

regenereerida korduvalt, sõltub nende kasutusega valitud protsessitingimustest ning regenereerimismeetodist. Eriti just lahusti korduvkasutuse efektiivsus ja sellega seotud ainete kao määr on määrav nii majandusliku tasuvuse kui ka keskkonnamõju seisukohalt. PIL-tehnoloogia arendamisel on seetõttu oluline juba varases staadiumis kaardistada, millised kululiigid kujunevad oluliseks ning kuidas need on seotud protsessiparameetrite ja tootmismahuga. Need andmed on vajalikud ka järgmise etapi – tehnomajandusliku modelleerimise (TEA) – jaoks, et hinnata kogu süsteemi kuluefektiivsust erinevates realistlikes stsenaariumides.

Et liikuda edasi pelgalt laboratoorsetest katsetest realistliku majandusliku analüüsini, tuleb järgmises etapis: koostada laboratoorsetes katsetulemustes saadud andmete põhjal materjali- ja energiabilansid; määratleda kriitilised sisend- ja väljundvood; ning kasutada neid tehnomajanduslikus modelleerimises (nt *Aspen Plus*, *SuperPro Designer* või muud spetsialiseeritud tarkvarad), et hinnata tootmismahute, kulude struktuuri ja tasuvust erinevates stsenaariumides.

Kuna tänapäevased hindamismudelid ei piirdu ainult majandusarvutustega, siis on oluline väärimisvõimaluste hindamisse integreerida ka keskkonnamõõde (LCA). Selleks tuleb esmalt määratleda süsteemi piirid: kas LCA hõlmab ainult biomassi väärimise osa või kogu ahelat alates niitmisest ja transpordist. Alam-Pedja luhahaina puhul võiks sobivaks lähenemiseks olla „väravast-väravani“ (*gate-to-gate*) mudel, millele saab tulevikus lisada ka laiemad sotsiaalsed ja ökosüsteemiteenuste mõõtmised.

2.4. Järeldused ja ettepanekud

Luhahain on biomajanduse kontekstis seni olnud pigem alakasutatud taastuv lignotselluloosne bioressurss, mille sihipärasem väärimine võiks toetada nii pärandniitude majandamise jätkusuutlikkust kui ka laiemat ringbiomajanduse arengut.

Töö tulemused näitavad, et kuigi luhahain leiab tüüpiliselt kasutust loomasöödana, jääb märkimisväärne osa sellest väärimata või realiseeritakse väga madala väärtusega. Samal ajal on tegemist igal aastal uueneva kohaliku toormega, mille laiem väärimine võiks pakkuda täiendavat tuluallikat pärandniitude majandajatele. Töö käigus läbi viidud analüüsi põhjal saab

öelda, et Alam-Pedja pärandniitude majandamine on paljude hooldajate jaoks võimalik üksnes tänu toetustele. Aastatel 2023 ja 2024 ületasid otseselt pärandniitudega seostatavad toetused hinnangulisi niitmise ja luhahaina kogumisega seotud kulusid keskmiselt 60–90 euro võrra hektari kohta. See tähendab, et toetused aitasid küll katta olulise osa kuludest, kuid täiendavate kulude, nagu transport, hoiustamine, teenustasud ja maksud arvestamisel ei ole tegemist majanduslikult tasuva tegevusega. Väärindamisvõimaluste laienemine võiks suurendada majandajate motivatsiooni ja toetada niitude laiemat hooldust, millel on oluline roll ka keskkondlikust aspektist, eelkõige elupaikade säilimisel.

Töö tulemuste põhjal võib järeldada, et luhahain sobib oma keemilise koostise poolest mitmesugusteks väärindamisviisideks. Tselluloosi ja ligniini sisaldus luhahaina biomassis jäävad vahemikku, mida peetakse sobivaks biorafineerimise sisendmaterjaliks. Eriti võiks luhahain teoreetiliselt sobida protoonsete ioonvedelike (PIL) abil teostatava selektiivse ligniini eraldamise jaoks. Kuna PIL-protsess võimaldab suure saagisega ja keemiliselt vähem kahjustatud ligniini eraldamist, avaks see võimaluse toota kõrgema lisandväärtusega biotooteid, säilitades samas ka tselluloosirikka jäägi edasiseks väärindamiseks. Samas ei ole luhahainaga veel eksperimentaalseid PIL-katseid läbi viidud, mistõttu jääb selle sobivus hetkel teoreetiliseks ning vajab edasist laboratoorset tõestust ja protsessiparameetrite täpsustamist.

Luhahainast ligniini väärindamise teostatavus sõltub aga suurel määral toormebaasi kättesaadavusest. Autor arvab, et Alam-Pedja piirkonna luhahain üksi ei pruugi olla piisav, et õigustada eraldiseisva biorafineerimisüksuse rajamist. Seetõttu tasuks edasistes uuringutes hinnata, millises ulatuses saaks väärindamisprotsessi sisendina kasutada ka teisi analoogseid lignotselluloosseid bioressursse. Potentsiaalse lisatoormena võiks kaaluda teiste poollooduslike koosluste ja püsirohumaade heina ning põllumajandustootmise kõrvalsaadusi, näiteks põhku. Selline kombineeritud toormestruktuur suurendaks väärindamiseks sobiva biomassi kättesaadavust ja looks tugeva aluse regionaalse biomajandusüksuse väljakujunemiseks.

Lisaks vajavad edasist analüüsi transpordi ja tootmise asukoha küsimused. Varasemad bioressursside uuringud soovivad rohtse biomassi transpordiraadiuse hoida ca 50 kilomeetri piires, kuid Alam-Pedja luhahaina puhul võib kaaluda ka paindlikumat lähenemist. Arvestades, et pärandniitude biomassi kogumise ja majandamisega ei kaasne olulisi sisendeid (nt väetised) ega intensiivset mullaharimist, on selle süsiniku- ja keskkonnajalajalg väiksem kui paljudel

teistel toormetel. Samuti täidab luhahaina kogumine ökosüsteemiteenuseid toetavat funktsiooni. Seega võib mittemajanduslik kasu osaliselt kompenseerida majanduslikke piiranguid, eriti looduskaitseliste eesmärkide kontekstis.

Magistritöö autori ettepanekud edasiseks uurimiseks:

- viia läbi sihipärased laboratoorsed katsed, et hinnata luhahaina sobivust PIL-põhiseks ligniini eraldamiseks ja täpsustada protsessi parameetreid;
- võrrelda Alam-Pedja kontekstis erinevaid väärimisviise (nt kuivkäritamine, kompostimine, biosüsi, väikemahulised mobiilsed lahendused), mis võiksid olla tehniliselt lihtsamad ja kiiremini rakendatavad kui PIL-tehnoloogia;
- kaardistada laiem regionaalne toormepotentsiaal, kaasates ka teised hooldatavad rohumaad ja põllumajanduse kõrvalsaadused;
- analüüsida väärimisüksuse võimalikku paiknemist arvestades nii logistilisi kui ka keskkonnategureid.

Magistritöö ei võimalda veel teha lõplikke järeldusi luhahaina väärimise tehnoloogilise teostatavuse ega majandusliku tasuvuse kohta, kuid loob tugeva lähtekoha edasiseks uurimistööks. Luhahain kui taastuv ressurss sobitub hästi biomajanduse põhimõtetega ning väärib edasist tähelepanu Eesti kestliku arengu ja rohepöörde kontekstis. Kuivõrd töö käsitleb konkreetset juhtumiuuringut, peegeldavad tulemused eelkõige Alam-Pedja piirkonna olusid ja potentsiaali. Samas on mitmed analüüsitud aspektid, nagu luhahaina keemiline koostis, saagikus, kulude käsitlemine ja väärimisvõimaluste potentsiaal, üldistatavad ka teistele Eesti poollooduslikele kooslustele. Seetõttu võivad käesoleva töö tulemused olla kasulikud sisendina ka laiemateks aruteludeks pärandniitude biomassikasutuse, majandamise jätkusuutlikkuse ning biomajanduse arendamise võimaluste üle teistes sarnastes piirkondades.

KOKKUVÕTE

Pärandniidud, sealhulgas Alam-Pedja lamminiidud, on kujunenud sajanditepikkuse inimtegevuse tulemusel ning on tänapäeval olulised elurikkuse kandjad ja mitmete ökosüsteemiteenuste pakkujad. Nende roll on oluline ka kliimamuutuste leevendamisel ja maastike mitmekesisuse säilitamisel. Et pärandniidud püsiksid, tuleb neid regulaarselt hooldada, eeskätt karjatamise või niitmise teel. Niitmise käigus kogutakse Alam-Pedja pärandniitudelt igal aastal märkimisväärne kogus luhahaina, mida on traditsiooniliselt kasutatud loomasöödana, kuid hiline niitmisperiood ning loomakasvatuse vähenemine piiravad selle kasutusvõimalusi ja vähendavad selle väärtust. Sellest tulenevalt on oluline otsida luhahainale alternatiivseid rakendusi.

Magistritöö keskmes oli Alam-Pedja pärandniitudelt kogutav luhahain ja selle väärindamise võimalused biomajanduse kontekstis. Biomajanduse kontseptsioonist lähtuvalt tuleks kohalikke bioloogilisi ressursse kasutada võimalikult tõhusalt ja kestlikult, suunates need seal, kus võimalik, kõrgema lisandväärtusega rakendustesse. Luhahain on kohalik ja taastuv ressurss, mille kasutus ei pea piirduma üksnes loomasöödana, vaid sobiva töötlemise abil saab sellest eraldada lignotselluloosse biomassi põhikomponente, nagu tselluloos ja ligniin, või kasutada seda energia tootmiseks.

Magistritöö esimene peatükk tugines teemakohasele teaduskirjandusele, mille põhjal käsitleti pärandniitude ökoloogilist, kultuurilist ja majanduslikku olulisust ning üldiseid bioressursside väärindamise põhimõtteid kaskaadkasutuse ja ringbiomajanduse kontekstis. Lisaks anti varasemate uuringute põhjal ülevaade luhahainast kui lignotselluloossest biomassist ning selle väärindamise võimalustest. Teoreetilise käsitluse põhjal selgus, et pärandniidud on kõrge looduskaitse väärtusega kooslused, mille säilimine sõltub regulaarsest majandamisest. Luhahain, mida nende majandamisel kogutakse, sisaldab märkimisväärses koguses lignotselluloosi komponente ning on seetõttu potentsiaalne tooraine nii biopõhiste toodete kui ka energia tootmiseks. Väärindamisel tuleks eelistada lähenemisi, mis võimaldavad biomassi kasutada võimalikult tõhusalt ja mitmetasandiliselt, vähendades ühekordset kasutust ning toetades taastuvate ressursside pikaajalist kasutamist.

Teoreetilise osa põhjal selgus ka, et ligniin pakub oma aromaatses struktuuri tõttu märkimisväärsed potentsiaali keemiatööstusele fossiilsete toorainete asendamisel, võimaldades toota näiteks aromaatsed kemikaale, vaikusid või süsinikkiudu. Ligniini eraldamine eeldab biomassi eelnevat fraktsioneerimist, mille käigus lignotselluloosse biomassi põhikomponendid eristatakse. Üheks paljulubavaks eeltötlusmeetodiks on prootonsete ioonvedelike kasutamine, mis võimaldab ligniini lahustada mõõdukate temperatuuride juures, säilitades samal ajal tselluloosirikka fraktsiooni edasiseks kasutuseks.

Töö empiiriline osa põhines kombineeritud uurimismeetodil ning mitmekesistel andmeallikatel. Uurimistöö raames kasutati poolstruktureeritud intervjuusid pärandniitude majandajatega, ekspertarvamusi, PRIA andmeid pindalapõhiste toetuste kohta, Keskkonnaameti teavet teostatud hooldustegevuste kohta ning Alam-Pedja niidualadelt kogutud luhahaina proove. Luhahaina keemilise koostise hindamiseks viidi läbi kiuanalüüsid, mille tulemused võimaldasid hinnata selle sobivust väärindamiseks biomajanduse kontekstis. Ligniini eraldamise võimalusi prootonsete ioonvedelike abil käsitleti teoreetilisel tasandil, tuginedes olemasolevale teaduskirjandusele ja ekspertarvamustele.

Töö tulemustest selgus, et Alam-Pedja pärandniitudel kogutakse igal aastal suurtes kogustes luhahaina, mille kogus ja saagikus sõltuvad nii ilmastikutingimustest kui ka niidetava ala pindalast. Aastal 2023 jäi keskmine saagikus suhteliselt madalaks (2,25 t/ha), aastal 2024 olid kasvutingimused soodsamad ning saagikuseks kujunes 3,13 t/ha. Majandajate hinnangul ei ole niitmine ja heina kogumine ilma toetusteta majanduslikult tasuvad. Seda kinnitasid ka autori poolt tehtud arvutused: 2023. aastal kujunes luhahaina tootmise kuluks 146,57 €/ha ja 2024. aastal 179,22 €/ha. Aastatel 2023 ja 2024 ületasid otseselt pärandniitudega seotud toetused neid kulusid keskmiselt 60–90 euro võrra hektari kohta. See tähendab, et toetused aitasid küll katta olulise osa töödega seotud kuludest, kuid arvestades täiendavaid kulusid, nagu transport, hoiustamine, teenustasud ja maksud, ei saa tegevust pidada majanduslikult tasuvaks.

Kiuanalüüsi tulemused näitasid, et 2023. aastal kogutud Alam-Pedja luhahaina kuivaine sisaldas keskmiselt 35,54% tselluloosi, 27,11% hemitselluloosi ja 5,31% ligniini. 2024. aasta proovides olid samade komponentide sisaldused vastavalt 32,96%, 28,81% ja 5,61%. Luhahaina biokeemiline koostis varieerus aastate lõikes suhteliselt vähe, mistõttu võib seda pidada stabiilseks ja sobivaks biorafineerimise sisendmaterjaliks, eriti selektiivse ligniini eraldamise

puhul, mida teoreetiliselt võimaldab protoonsete ioonvedelike kasutamine. Ligniini toimiks sellisel juhul põhitootena, samas kui ülejäänud fraktsioonide (nt tselluloosirikka pulbi) edasine väärimine looks eeldused kaskaadkasutuseks. PIL-tehnoloogia rakendatavust mõjutavad mitmed tehnoloogilised tegurid, sealhulgas kasutatava lahusti koostis ja hind, selle regenereerimise efektiivsus, energia- ja kemikaalikulud, aga ka protsessi skaleeritavus ning seadmete sobivus. Töö käigus selgus, et PIL-protsessides on võimalik kasutada keemiatööstuses juba olemasolevaid seadmeid, mis võiks vähendada arenduskulusid. Samas moodustavad olulise osa tegevuskuludest just energia tarbimine ligniini eraldamise ja lahusti regenereerimise etappides, mistõttu mõjutab lahusti taaskasutusmäär oluliselt kogu protsessi tasuvust ja keskkonnamõju. Arvestades, et tehnoloogia on veel arendusjärgus ning lühiajaliselt pole laboratoorseid PIL-katseid tehtud, on vajalik edasine uurimine, et hinnata protsessi sobivust ja optimeerida kriitilisi parameetreid.

Magistritöö eesmärk oli hinnata lühiajaliselt väärimisvõimekuse Alam-Pedja parandniitudel, keskendudes eelkõige ligniini eraldamise võimalustele protoonsete ioonvedelike abil ning sellega seotud tehniliste ja majanduslike aspektide kaardistamisele. Autori hinnangul sai töö eesmärk saavutatud, kuna töö käigus hinnati lühiajaliselt väärimisvõimekuse nii koguse, keemilise koostise kui ka kasutuspraktikate põhjal, käsitleti ligniini eraldamise võimalusi protoonsete ioonvedelike abil ning kaardistati väärimisega seotud tehnilised ja majanduslikud tegurid. Kuigi magistritöö tulemused ei võimalda teha lõplikke järeldusi lühiajaliselt väärimise tehnoloogilise teostatavuse ja majandusliku tasuvuse kohta, pakuvad need sisulist lähtekohta edasiseks uurimistööks.

ALLIKALOEND

1. **Abu-Omar, M. M., Barta, K., Beckham, G. T., Luterbacher, J. S., Ralph, J., Rinaldi, R., Romań-Leshkov, Y., Samec, J. S. M., Sels, B. F., Wang, F.** (2021). Guidelines for performing lignin-first biorefining. – *Energy & Environmental Science*. Vol. 14(1), pp. 262-292. <https://doi.org/10.1039/D0EE02870C>.
2. **Achinivu, E. C.** (2018). Protic Ionic Liquids for Lignin Extraction—A Lignin Characterization Study. – *International Journal of Molecular Sciences*. Vol 19(2): 428, 14p. <https://doi.org/10.3390/ijms19020428>.
3. AdaptEst. (s.a). LIFE integreeritud projekt „Kliimamuutustega kohanemise tegevuste elluviimine Eestis“ (Implementation of national climate change adaptation activities in Estonia), LIFE21-IPC-EE-LIFE-SIP AdaptEst/101069566. [veebileht]. <https://lifeadapttest.ee/> (29.01.2025).
4. ADDVAL-BIOEC. (2021). Lisandväärtuse tõstmine ja toorme tõhusam kasutamine Eesti biomajanduses. ADDVAL-BIOEC uuringu lõppraport, Tallinn & Tartu, 72 lk. https://www.etag.ee/wp-content/uploads/2021/11/ADDVAL-BIOEC-loppraport_FINAL.pdf (02.03.2025).
5. ADF Method. (2017). Acid Detergent Fiber Method (A2000). ANKOM Technology. 2 p. https://www.ankom.com/sites/default/files/document-files/Method_12_ADF_A2000.pdf (20.04.2025).
6. **Aftab, M. N., Iqbal, I., Riaz, F., Karadag, A., Tabatabaei, M.** (2019). Different Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass for Use in Biofuel Production. – *Biomass for Bioenergy - Recent Trends and Future Challenges*. 24 p. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.84995>.
7. Alam-Pedja linnu- ja loodusala kaitsekorralduskava 2016–2025. (2015). Keskkonnaamet. 184 lk. <https://infoleht.keskkonnainfo.ee/getdok/-1550975002>. (19.01.2025).
8. **Alver, J., Reinberg, L.** (2002). Juhtimisarvestus. Tallinn: Deebet. 431 lk.
9. **Amini, E., Valls, C., Roncero, M. B.** (2021). Ionic liquid-assisted bioconversion of lignocellulosic biomass for the development of value-added products. – *Journal of Cleaner Production*. Vol. 326: 129275, 24 p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129275>.
10. **Asim, A. M., Uroos, M., Muhammad, N.** (2020). Extraction of lignin and quantitative sugar release from biomass using efficient and cost-effective pyridinium protic ionic liquids. – *RSC Advances*. Vol. 10, pp. 44003-44014. <https://doi.org/10.1039/D0RA09098K>.
11. **Bajwa, D. S., Pourhashem, G., Ullah, A. H., Bajwa, S. G.** (2019). A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact. – *Industrial Crops and Products*. Vol. 139: 111526, 11 p. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111526>.
12. **Banerjee, S., Pandit, C., Gundupalli, M. P., Pandit, S., Rai, N., Lahiri, D., Chaubey, K. K., Joshi, S. J.** (2024). Life cycle assessment of revalorization of lignocellulose for the development of biorefineries. – *Environment, Development and Sustainability*. Vol. 26, pp. 16387-16418. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03360-4>.
13. Biohansa. (s. a.). [veebileht]. <https://biohansa.ee/et> (04.04.2025).
14. **Bowskill, V., Bhagwat, S., Gowing, D.** (2023). Depleting soil nutrients through frequency and timing of hay cutting on floodplain meadows for habitat restoration and nutrient neutrality. – *Biological Conservation*. Vol. 283: 110140, 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110140>.
15. **Brandt, A., Gräsvik, J., Hallett, J., Welton, T.** (2013). Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids. – *Green Chemistry*. Vol. 15(3), pp. 550-583. <https://doi.org/10.1039/C2GC36364J>.

16. **Brandt-Talbot A., Gschwend F. J. V., Fennell P. S., Lammens T. M., Tan B., Weale J., Hallett J. P.** (2017). An economically viable ionic liquid for the fractionation of lignocellulosic biomass. – *Green Chemistry*. Vol. 19(13), pp. 3078-3102. <https://doi.org/10.1039/C7GC00705A>.
17. **Brienza, F., Cannella, D., Montesdeoca, D., Cybulska, I., Debecker, D. P.** (2024). A guide to lignin valorization in biorefineries: traditional, recent, and forthcoming approaches to convert raw lignocellulose into valuable materials and chemicals. – *RSC Sustainability*. Vol. 2(1), pp. 37-90. <https://doi.org/10.1039/d3su00140g>.
18. **Colussi, F., Rodríguez, H., Michelin, M., Teixeira, J. A.** (2023). Challenges in Using Ionic Liquids for Cellulosic Ethanol Production. – *Molecules*. Vol. 28(4): 1620, 12p. <https://doi.org/10.3390/molecules28041620>.
19. **da Silva, A. R., Errico, M., Rong, B.-G.** (2018). Techno-economic analysis of organosolv pretreatment process from lignocellulosic biomass. – *Clean Technologies and Environmental Policy*. Vol 20, pp. 1401-1412. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1389-y>.
20. **Ding, Z., Hamann, K. T., Grundmann, P.** (2024). Enhancing circular bioeconomy in Europe: Sustainable valorization of residual grassland biomass for emerging bio-based value chains. – *Sustainable Production and Consumption*. Vol. 45, pp. 265–280. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.01.008>.
21. Eesti 2035. Eesti riigi pikaajaline arengustrateegia "Eesti 2035". Riigikogu poolt vastu võetud 12.05.2021. 31 lk. https://valitsus.ee/sites/default/files/documents/2021-06/Eesti%202035_PUHTAND%20%C3%9CLDOSA_210512_1.pdf (02.03.2025).
22. Eesti Teadusagentuur. (2019). Tehnoloogilise valmiduse tasemed, TVT. <https://www.etag.ee/wp-content/uploads/2019/01/Tehnoloogilise-valmiduse-tasemed.pdf> (27.04.2025).
23. EKSS. (2009). Eesti keele seletav sõnaraamat. Eesti Keele Instituut. <http://www.eki.ee/dict/ekss/index.cgi> (02.04.2025).
24. EK. (2018). Komisjoni teatis Euroopa Parlamendile, Nõukogule, Euroopa Majandus- ja sotsiaalkomiteele ning Regioonide Komiteele. Kestlik biomajandus Euroopas: majanduse, ühiskonna ja keskkonna vaheliste sidemete tugevdamine. COM(2018) 673. – *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/et/TXT/?uri=CELEX:52018DC0673> (01.03.2025).
25. EK. (2019). Komisjoni teatis Euroopa Parlamendile, Euroopa Ülemkogule, Nõukogule, Euroopa Majandus- ja sotsiaalkomiteele ning Regioonide Komiteele. Euroopa roheline kokkulepe. – *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (01.03.2025).
26. EK. (2020). Komisjoni teatis Euroopa Parlamendile, Nõukogule, Euroopa Majandus- ja sotsiaalkomiteele ning Regioonide Komiteele. Uus ringmajanduse tegevuskava: Puhtama ja konkurentsivõimelisema Euroopa nimel. COM(2020) 98 final. – *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0098> (10.04.2025).
27. EK. (2022). Komisjoni aruanne Euroopa Parlamendile, Nõukogule, Euroopa majandus- ja sotsiaalkomiteele ning Regioonide komiteele. ELi biomajanduse strateegia eduaruanne Euroopa biomajanduspoliitika: ülevaade ja edasine areng. COM(2022) 283. 29 lk. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10095-2022-INIT/et/pdf> (02.04.2025).
28. Ellen MacArthur Foundation. (2019). The circular economy in detail. [veebileht]. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-circular-economy-in-detail-deep-dive> (22.03.2025).
29. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Platt, R., Bauen, A., Reuerman, P., Geier, C., Van Ree, R., Vural Gursel, I., Garcia, L., Behrens, M., Bothmer, P., Howes, J., Panchaksharam, Y., Vikla, K., Sartorius, V., Annevelink, B. (2021). EU biorefinery outlook to 2030: studies on support to research and innovation policy in the area of bio-based products and services. – *Publications Office of the European Union*. 396 p. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/103465> (11.04.2025).
30. **Fernández-Rodríguez, J., Erdocia, X., Alriols, M. G., Labidi, J.** (2021). Techno-economic analysis of different integrated biorefinery scenarios using lignocellulosic waste streams as source

- for phenolic alcohols production. – *Journal of Cleaner Production*. Vol. 285: 124829, 14 p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124829>.
31. **FitzPatrick, M., Champagne, P., Cunningham, M. F., Whitney, R. A.** (2010). A biorefinery processing perspective: Treatment of lignocellulosic materials for the production of value-added products. – *Bioresource Technology*. Vol. 101(23), pp. 8915–8922. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.125>.
 32. **Ghuri, P., Grønhaug, K.** (2004). Äriuuringute meetodid: praktilisi näpunäiteid. Tallinn: Külim. 222 lk.
 33. **Grininė, R., Gulbinas, J., Kuris, M., Rimmelgas, L., Veidemanė, K., Prižavoite, D., Ruskule, A., Fammler, H., Strigune, D.** (2019). Kui palju maksab rohumaa? Rohumaade pakutavate hüvede hindamine ja visualiseerimine uuendusliku GIS töövahendi abil. LIFE Viva Grass projekti (LIFE13 ENV/LT/000189) tulemuste kokkuvõte. Balti Keskkonnafoorum. 24 lk. https://vivagrass.eu/wp-content/uploads/2019/04/layman_est.pdf (09.02.2025).
 34. **Haldma, T., Karu, S.** (1999). Kuluarvestuse süsteemi loomine ettevõttes. Tartu: Rafiko. 192 lk.
 35. **Hasanov, I., Raud, M., Kikas, T.** (2020). The Role of Ionic Liquids in the Lignin Separation from Lignocellulosic Biomass. – *Energies*. Vol. 13: 4864, 24 p. <https://doi.org/10.3390/en13184864>.
 36. **Hasanov, I., Shanmugam, S., Kikas, T.** (2022). Extraction and isolation of lignin from ash tree (*Fraxinus exselsior*) with protic ionic liquids (PILs). – *Chemosphere*. Vol. 290: 133297, 9 p. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133297>.
 37. Heinamaa - mahedad tooted heinast. (s. a.). [veebileht]. <https://heinamaa.wordpress.com/> (07.04.2025).
 38. **Heinsoo, K., Melts, I., Sammul, M., Holm, B.** (2010). The potential of Estonian semi/natural grasslands for bioenergy production. – *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 137(1-2), pp. 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.01.003>.
 39. **Helm, A., Kull, A., Kiisel, M., Poltimäe, H., Rosenvald, R., Veromann, E., Reitalu, T., Knoch, A., Virro, H., Mõisja, K., Nurm, H.-I., Prangel, E., Vain, K., Sepp, K., Lõhmus, A., Linder, M., Otsus, M., Uemaa, E.** (2023). Eesti maismaaökosüsteemide hüvede (ökosüsteemiteenuste) majandusliku väärtuse üleriigiline hindamine ja kaardistamine. Tehniline lõpparuanne. Tartu Ülikool. Eesti Maaülikool. 258 lk.
 40. **Helm, A., Toussaint, A.** (2020). Poollooduslike koosluste ökoloogilise toimimise hinnang. Tartu Ülikool, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut. 61 lk.
 41. **Huang, H.-J., Ramaswamy, S., Tschirner, U. W., Ramaro, B. V.** (2008). A review of separation technologies in current and future biorefineries. – *Separation and Purification Technology*. Vol. 62(1), 1–21 p. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.12.011>.
 42. **Huynh, T., Gong, G., Tran, P.** (2013). Integrating ABC with Standard costs - a Strategic Management Tool. – *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. Vol. 7(6), pp. 556-562. <http://ajbasweb.com/old/ajbas/2013/April/556-562.pdf> (02.05.2025).
 43. IEA. (2013). Biorefineries: adding value to the sustainable utilisation of biomass. IEA Bioenergy task 42 booklet. 16 p. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Task-42-Booklet.pdf> (08.04.2025).
 44. Imperial Equine Solutions OÜ. (s. a.). [veebileht]. <https://www.imperial-one.com/et/home> (04.04.2025).
 45. **John, M. J., Lefatle, M. C., Sithole, B.** (2022). Lignin fractionation and conversion to bio-based functional products. – *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. Vol. 25: 100594, 14 p. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100594>.
 46. **Joller-Vahter, L., Kotta, J., Meri, G., Eschbaum, R., Värnik, R., Lillemets, R., Järvik, O., Konist, A., Braid, Z. S., Neuhaus, R., Kuusik, L., Kiisk, T., Ohvril, T., Reissaar, R., Leming, R., Lahtvee, P.-J., Loit, E., Mäeorg, U., Vares, L., Salumäe, A., Krumme, A.** (2021). Uudsed võimalused Eesti biomajanduse väärtusahelate mitmekesistamiseks ja lisandväärtuse tõstmiseks. ADDVAL-BIOEC uuringu tööpaketi 3 raport, Tallinn & Tartu, 103 lk.

47. **Jørgensen, U., Jensen, S. K., Ambye-Jensen, M.** (2022). Coupling the benefits of grassland crops and green biorefining to produce protein, materials and services for the green transition. – *Grass and Forage Science*. Vol. 77(4), pp. 295–306. <https://doi.org/10.1111/gfs.12594>.
48. **Kaplan, R. S., Cooper, R.** (2002). Kulu ja tulemus: Kuidas integreeritud kulusüsteemidega suurendada kasumlikkust ja tulemust. Tallinn: Fortese Kirjastus. 407 lk.
49. **Karu, S.** (2008). Kulude juhtimine ja arvestus tulemuslikkusele suunatud organisatsioonis I osa. Tartu: Rafiko Kirjastus OÜ. 333 lk.
50. **Kasari-Toussaint, L., Kaldra, M., Trepp, R., Helm, A.** (2023). Eesti pärandniitude taimed. Teatmik. Valminud Life IP projekti „Loodusrikas Eesti“ (ForEst&FarmLand LIFE18IPE/EE/000007) raames. Tartu Ülikool, maastike elurikkuse töörühm. 212 lk.
51. **Kass, M., Olt, A., Ots, M.** (2021). Ohutu sööda tootmise hea tava juhend. 202 lk. <https://epkk.ee/wp-content/uploads/2021/12/Ohutu-sooda-hea-tava-juhend.pdf> (06.04.2025).
52. **Kaur, K., Kaur, R., Kaur, H.** (2024). A systematic review of lignocellulosic biomass for remediation of environmental pollutants. – *Applied Surface Science Advances*. Vol. 19: 100547, 28 p. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100547>.
53. **Karo, E., et al.** (2021). Biomajanduse tehnoloogiate trendid ja teekaardid. ADDVAL-BIOEC projekti tööpaketi 2.2 vaheanalüüs. Tallinn & Tartu. 130 lk. <https://haldus.taltech.ee/sites/default/files/2021-11/ADDVAL-BIOEC-2.2-teekaardid-FINAL.pdf> (13.03.2025).
54. **Keegan, D., Kretschmer, B., Elbersen, B., Panoutsou, C.** (2013). Cascading use: a systematic approach to biomass beyond the energy sector. – *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. Vol. 7(2), pp. 193-206. <https://doi.org/10.1002/bbb.1351>.
55. Keskkonnaportaali. (2024). Niidud. [veebileht]. <https://keskkonnaportaali.ee/et/niidud> (02.04.2025).
56. **Khan, S., Rauber, D., Shanmugam, S., Kay, C. W. M., Konist, A., Kikas, T.** (2022). Efficient Lignin Fractionation from Scots Pine (*Pinus sylvestris*) Using Ammonium-Based Protic Ionic Liquid: Process Optimization and Characterization of Recovered Lignin. – *Polymers*. Vol. 14: 4637, 13 p. <https://doi.org/10.3390/polym14214637>.
57. **Kikas, T., Tutt, M., Raud, M., Alaru, M., Lauk, R., Olt, J.** (2016). Basis of energy crop selection for biofuel production: Cellulose vs. lignin. – *International Journal of Green Energy*. Vol. 13, pp. 49-54. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.909359>.
58. **Kippa, R., Josing, M., Vanamölder, A., Kadarik, K., Martens, K., Reiman, M.** (2011). Ülevaade Eesti bioenergia turust 2010. aastal. Tallinn: Eesti Konjunkturiinstituut. 92 lk.
59. **Kocaturk, E., Salan, T., Ozelik, O., Mehmet, A., Candan, Z.** (2023). Recent Advances in Lignin-Based Biofuel Production. – *Energies*. Vol. 16: 3382, 17 p. <https://doi.org/10.3390/en16083382>.
60. **Koik, E., Vettik, R.** (2024). Masinakulude kalkulaatorid. METK. [veebileht]. <https://metk.agri.ee/masinakulude-kalkulaatorid> (02.02.2025).
61. **Koppel, K., Kuusik, A., Arrak, K., Raik, J., Niidu, A., Kõks, K., Lahtvee, P.** (2023). Süvatehnoloogiate alternatiivsed arengutrajektorid ja nende tähendus Eestile. Civitta Eesti AS. 97 lk. https://arenguseire.ee/wp-content/uploads/2023/09/2023_suvatehnoloogiate-arengutrajektorid-ja-nende-tahendus-eestile_uuring_1.pdf (03.02.2025).
62. **Korányi, T. I., Fridrich, B., Pineda, A., Barta, K.** (2020). Development of ‘Lignin-First’ Approaches for the Valorization of Lignocellulosic Biomass. – *Molecules*. Vol. 25(12): 2815, 22 p. <https://doi.org/10.3390/molecules25122815>.
63. **Kumar, K. R., Anusha, B., Satyavathi, B.** (2024). Isolation of lignocellulosic components from corncob residue through industrially viable cleaner processes and their techno-economic analysis. – *Biomass Conversion and Biorefinery*. Vol. 14, pp. 26371–26385. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04677-w>.
64. KSM. Perioodi 2023–2027 keskkonnasõbraliku majandamise toetus. (vastu võetud 21.12.2022, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 30.03.2025). – *Riigi Teataja*. <https://www.riigiteataja.ee/akt/129122022012> (22.04.2025).

65. **Lepasaar, H., Ehrlich, Ü.** (2015). Non-Market Value of Estonian Seminatural Grasslands: A Contingent Valuation Study. – *Estonian Discussions on Economic Policy*. Vol. 23(2), 16 p. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2708778>.
66. Lignin Method. (2022). Acid Detergent Lignin Method (in Beakers). ANKOM Technology. 3 p. https://www.ankom.com/sites/default/files/document-files/Method_8_Lignin_in_beakers_120922.pdf (20.04.2025).
67. Lignin, alkali. (2025). Merck KGaA [veebileht]. <https://www.sigmaaldrich.com/EE/en/substance/ligninalkali123458068051> (04.04.2025).
68. Lihula Soojus. (2023). Lääneranna vallavalitsuse koduleht [veebileht]. /Toim. E. Sakh. <https://www.laanerannavald.ee/lihula-soojus> (04.04.2025).
69. Linnudirektiiv (LiD). Nõukogu direktiiv 79/409/EMÜ loodusliku linnustiku kaitse kohta. (vastu võetud 02.04.1979, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 03.12.2008). – *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1979L0409:20081223:ET:PDF> (02.04.2025).
70. Loodusdirektiiv (LoD). Nõukogu direktiiv 92/43/EMÜ, 21. mai 1992, looduslike elupaikade ning loodusliku loomastiku ja taimestiku kaitse kohta. (vastu võetud 21.05.1992, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 20.12.2006). – *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1992L0043:20070101:ET:PDF> (02.04.2025).
71. **Luo, Z., Qian, Q., Sun, H., Wei, Q., Zhou, J., Wang, K.** (2023). Lignin-First Biorefinery for Converting Lignocellulosic Biomass into Fuels and Chemicals. – *Energies*. Vol. 16(1): 125, 25 p. <https://doi.org/10.3390/en16010125>.
72. Maaritsa Graanul. (s. a.). [veebileht]. <https://maaritsa.com/> (04.04.2025).
73. MAHE. Perioodi 2023–2027 mahepõllumajandusliku taimekasvatuse toetus ja mahepõllumajandusliku loomakasvatuse toetus. (vastu võetud 23.12.2022, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 03.03.2025). – *Riigi Teataja*. <https://www.riigiteataja.ee/akt/129122022023> (22.04.2025).
74. **Maher, C.** (2018). Best Practice Guidelines for Shannon Callows: Species-rich Floodplain Meadows. Report prepared for the European Union, Agreement No. 07.027722/2014/697042/SUB/B2. 16 p. https://rbapseu.files.wordpress.com/2019/01/rbaps_bp03_callows_meadows.pdf. (11.12.2024).
75. MaKost - Maschinenkosten und Reparaturkosten. (2025). Board of Trustees for Technology and Construction in Agriculture (KTBL). [veebileht]. <https://www.ktbl.de/home/webanwendungen/makost> (11.04.2025).
76. **Melts, I.** (2014). Poollooduslike rohumaade biomassi kasutamine bioenergia tootmiseks. Doktoritöö. Eesti Maaülikool. Tartu. 125 lk.
77. **Melts, I., Heinsoo, K., Nurk, L., Pärn, L.** (2013). Comparison of two different bioenergy production options from late harvested biomass of Estonian semi-natural grasslands. – *Energy*. Vol. 61, pp. 6-12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.016>.
78. **Metsoja, J.-A.** (koost.) (2020). Luhtade hoolduskava. Tartu: Pärandkoosluste Kaitse Ühing. 57 lk.
79. **Mohammad, R. E. A., Abdullahi, S. S., Muhammed, H. A., Musa, H., Habibu, S., Jagaba, A. H., Birniwa, A. H.** (2024). Recent technical and non-technical biorefinery development barriers and potential solutions for a sustainable environment: A mini review – *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. Vol. 9: 100586, 10 p. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100586>.
80. **Mohapatra, S., Mishra, S. S., Bhalla, P., Thatoi, H.** (2019). Engineering grass biomass for sustainable and enhanced bioethanol production. – *Planta*. Vol. 250, pp. 395–412. <https://doi.org/10.1007/s00425-019-03218-y>.
81. **Nadányi, R., Ház, A., Lisý, A., Jablonský, M., Šurina, I., Majová, V., Baco, A.** (2022). Lignin Modifications, Applications, and Possible Market Prices. – *Energies*. Vol. 15(18): 6520, 16 p. <https://doi.org/10.3390/en15186520>.

82. Natura 2000. Vabariigi Valitsuse 5. augusti 2004. a korraldus nr 615-k Euroopa Komisjonile esitatav Natura 2000 võrgustiku alade nimekiri. (vastu võetud 05.08.2004, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 31.03.2017). – *Riigi Teataja*. <https://www.riigiteataja.ee/akt/790098> (02.04.2025).
83. NDF Method. (2017). Neutral Detergent Fiber Method (A2000). ANKOM Technology. 2 p. https://www.ankom.com/sites/default/files/document-files/Method_13_NDF_A2000.pdf (20.04.2025).
84. **Neuenkamp, L., Metsoja, J.-A., Zobel, M., Hölzel, N.** (2013). Impact of management on biodiversity-biomass relations in Estonian flooded meadows. – *Plant Ecology*. Vol. 214, pp. 845–856. <https://doi.org/10.1007/s11258-013-0213-y>.
85. NIIT. Perioodi 2023–2027 pärandniidu hooldamise toetus. (vastu võetud 23.12.2022, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 30.03.2025). – *Riigi Teataja*. <https://www.riigiteataja.ee/akt/105052023012> (22.04.2025).
86. **Norfarhana, A. S., Ilyas, R. A., Ngadi, N., Othman, M. H. D., Misenan, M. S. M., Norahim, M. N. F.** (2024). Revolutionizing lignocellulosic biomass: A review of harnessing the power of ionic liquids for sustainable utilization and extraction. – *International Journal of Biological Macromolecules*. Vol. 256(1): 128256, 22 p. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128256>.
87. **Nunes, L. J. R., Causer, T. P., Ciolkosz, D.** (2020). Biomass for energy: A review on supply chain management models. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 120: 109658, 8 p. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109658>.
88. **Older, H.** (Koost.). (2011). Kohalikud söödad. Eesti Rohumaade Ühing: AS Rebellis. 332 lk.
89. **Paal, J.** (1997). Eesti taimkatte kasvukohatüüpide klassifikatsioon. Tallinn: Tartu Ülikooli Botaanika ja Ökoloogia Instituut. 297 lk.
90. **Palomar, J., Lemus, J., Navarro, P., Moya, C., Santiago, R., Hospital-Benito, D., Hernández, E.** (2024). Process Simulation and Optimization on Ionic Liquids. – *Chemical Reviews*. Vol. 124(4), pp. 1649-1737. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00512>.
91. **Periyasamy, S., Karthik, V., Kumar, P. S., Isabel, J. B., Temesgen, T., Hunegnaw, B. M., Melese, B. B., Mohamed, B. A., Vo, D.-V. N.** (2022). Chemical, physical and biological methods to convert lignocellulosic waste into value-added products. A review. – *Environmental Chemistry Letters*. Vol. 20, pp. 1129–1152. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01374-w>.
92. **Pin, T. C., Nakasu, P. S. Y., Rabelo, S. C., Costa, A. C.** (2021). Structural features of protic ionic liquids and their impact on pretreatment performance for 2G ethanol production. – *Energy*. Vol. 235: 121279, 8 p. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121279>.
93. **Pomerleau-Lacasse, F., Seguin, P., Tremblay, G., Mongrain, D.** (2017). Developmental stages of timothy and alfalfa. Agriculture and Agri-Food Canada. 22 p. https://publications.gc.ca/collections/collection_2017/aac-aafc/A72-135-2017-eng.pdf (05.03.2025).
94. **Porc, O., Hark, N., Carus, M., Carrez, D.** (2024). European Bioeconomy in Figures 2014–2021. Bio-based Industries Consortium, nova-Institut. 29 p.
95. PRIA avalik veebikaart. <https://kls.pria.ee/kaart/> (20.02.2025).
96. PST/ÜJT. Otsetoetuste saamise üldised nõuded, põhisissetuleku toetus, ümberjaotav toetus ja noore põllumajandustootja toetus. (vastu võetud 21.12.2022, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 30.03.2025). – *Riigi Teataja*. <https://www.riigiteataja.ee/akt/118042023006> (22.04.2025).
97. **Putra, A. S., Anita, Y.** (2024). Integrated Life Cycle Assessment and Techno-economic Analysis for Ionic Liquids-based Biomass Delignification Process. – *E3S Web of Conferences*. Vol. 503: 04001, 5 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450304001>.
98. Pärandniitude tegevuskava 2021–2027. (2021). Kinnitatud Keskkonnaameti peadirektori asetäitja 24.03.2021 käskkirjaga nr 1-1/21/60. 51 lk. https://keskkonnaamet.ee/sites/default/files/documents/2021-09/parandniitude_tegevuskava_2021-2027_1.pdf (27.03.2025).

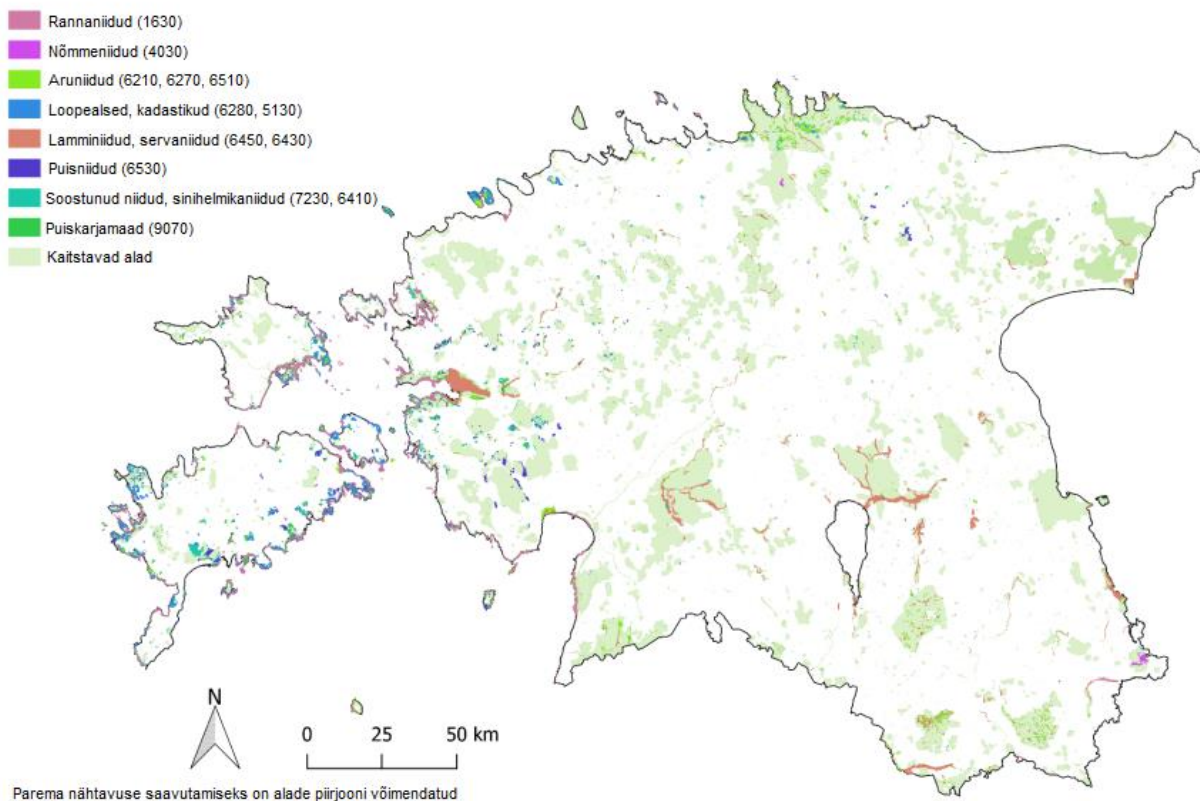
99. **Ragauskas, A., Beckham, G., Biddy, M., Chandra, R., Chen, F., Davis, M., Davison, B., Dixon, R., Gilna, P., Keller, M., Langan, P., Naskar, A., Saddler, J., Tschaplinski, T., Tuskan, G., Wyman, C.** (2014). Lignin Valorization: Improving Lignin Processing in the Biorefinery. – *Science*. Vol. 344(6185): 1246843, 12 p. <https://doi.org/10.1126/science.1246843>.
100. Ramsari alad. Vabariigi Valitsuse 4. märtsi 1997, a. määrus nr 48. Rahvusvahelise tähtsusega märgalade, eriti veelindude elupaikade konventsiooni täitmise riikliku programmi kinnitamine. (vastu võetud 04.03.1997). – *Riigi Teataja*. <https://www.riigiteataja.ee/akt/25273> (02.04.2025).
101. **Raud, M., Kikas, T., Sippula, O., Shurpali, N.J.** (2019). Potentials and challenges in lignocellulosic biofuel production technology. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 111, pp. 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.020>.
102. **Rehberger, M., Hiete, M.** (2020). Allocation of Environmental Impacts in Circular and Cascade Use of Resources—Incentive-Driven Allocation as a Prerequisite for Cascade Persistence. – *Sustainability*. Vol. 12: 4366, 28 p. <https://doi.org/10.3390/su12114366>.
103. **Rial, R. C.** (2024). Biofuels versus climate change: Exploring potentials and challenges in the energy transition. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 196: 114369, 10 p. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114369>.
104. Ringbiomajanduse teekaart. (2023). Regionaal- ja Põllumajandusministeerium, Kliimaministeerium. 18 lk. <https://www.agri.ee/media/7979/download> (03.03.2025).
105. Ringmajanduse valge raamat. (2022). Keskkonnaministeerium, Keskkonnaagentuur. Tallinn, 21 lk. https://ringmajandus.envir.ee/sites/default/files/2022-06/Ringmajandus_valge_raamat.pdf (03.03.2025).
106. **Rocha-Meneses, L.** (2020). Teise põlvkonna bioetanooli tootmine: kõrvalvoogude volariseerimine jätkusuutliku ringmajanduse kontseptsioonis. Doktoritöö. Eesti Maaülikool. Tartu. 206 lk.
107. Rohumaatüübid. (2025). LIFE Viva Grass [veebileht]. <https://vivagrass.eu/ee/grasslands/variety-of-grassland/> (03.03.2025).
108. **Rothero, E., Lake, S., Gowing, D. (eds).** (2016). Floodplain Meadows – Beauty and Utility. A Technical Handbook. Milton Keynes, Floodplain Meadows Partnership, The Open University, 117 p. <https://oro.open.ac.uk/82788/1/Floodplain%20Meadows%20-%20Beauty%20and%20Utility%20A%20Technical%20Handbook.pdf>. (25.02.2025).
109. **Shafiei-Alavijeh, R., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Denayer, J. F. M., Karimi, K.** (2024). A critical review of sustainable biorefineries utilizing high-solid processing for industrial crop lignocellulosic wastes valorization. – *Industrial Crops and Products*. Vol. 211: 118236, 16 p. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118236>.
110. **Saue, T.** (2023). 2023 vegetatsiooniperiood. Agrometeoroloogia [veebileht]. <https://agrometeoroloogia.blogspot.com/2023/11/2023-vegetatsiooniperiood.html> (20.01.2025).
111. **Saue, T.** (2024). 2024. a. vegetatsiooniperioodi meteoroloogilised olud Jõgeval. Agrometeoroloogia. [veebileht]. <https://agrometeoroloogia.blogspot.com/2024/11/2024-vegetatsiooniperioodi.html> (22.04.2025).
112. **Segers, B., Nimmegeers, P., Spiller, M., Tofani, G., Jasiukaityte-Grojzdek, E., Dace, E., Kikas, T., Marchetti, J. M., Rajic, M., Yildiz, G., Billen, P.** (2024). Lignocellulosic biomass valorisation: a review of feedstocks, processes and potential value chains and their implications for the decision-making process. – *RSC Sustainability*. Vol. 2, pp. 3730–3749. <https://doi.org/10.1039/D4SU00342J>.
113. **Selge, A., Viiralt, R., Parol, A.** (2022). Rohumaaviljelus. METK nõuandeteenistuse teabesalv. <https://teabesalv.pikk.ee/taimekasvatus/rohumaaviljelus/> (06.03.2025).
114. **Sepp, V., Teiter, S., Mötte, M., Saaroja, A., Kuusk, I., Konist, A., Kask, Ü., Järvik, O., Reinik, J., Latõšov, E., Ummik, M.-L., Krupenski, I., Laht, J.** (2024). Kestliku biogaasi tootmise ja kasutuselevõtu suurendamise võimaluste analüüs. Lõpparuanne. Kliimaministeerium, Tartu Ülikool, Tallinna Tehnikaülikool. 245 lk.

115. **Sjulander, N., Kikas, T.** (2020). Origin, Impact and Control of Lignocellulosic Inhibitors in Bioethanol Production—A Review. – *Energies*. Vol. 13: 4751, 20 p. <https://doi.org/10.3390/en13184751>.
116. **Sjulander, N., Rooni, V., Rocha-Meneses, L., Kikas, T.** (2023). Comparison of different chemical-free pretreatment methods for the production of sugars, ethanol and methane from lignocellulosic biomass. – *Agronomy Research*. Vol. 21(2), pp. 928-939. <https://doi.org/10.15159/AR.23.060>.
117. Statistikaameti palgarakendus. [veebileht] <https://palgad.stat.ee/> (18.04.2025).
118. **Stegmann, P., Londo, M., Junginger, M.** (2020). The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. – *Resources, Conservation & Recycling: X*. Vol. 6: 100029, 17 p. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>.
119. **Stewart, D.** (2008). Lignin as a base material for materials applications: Chemistry, application and economics. – *Industrial Crops and Products*. Vol. 27(2), pp. 202–207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.008>.
120. **Swami, S., Suthar, S., Singh, R., Thakur, A. K., Gupta, L. R., Sikarwar, V. S.** (2024). Potential of ionic liquids as emerging green solvent for the pretreatment of lignocellulosic biomass. – *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 31, pp. 12871–12891. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32100-y>.
121. **Talvi, T., Talvi, T.** (2012). Poollooduslikud kooslused. Kaitse ja hooldus. Viidumäe–Tallinn: Põllumajandusministeerium. 36 lk.
122. **Tamm, U.** (2017). Parema toiteväärtusega rohusööd. Saku: Eesti Taimekasvatuse Insituut. 59 lk.
123. **Tanis, M. H., Wallberg, O., Galbe, M., Al-Rudainy, B.** (2024). Lignin Extraction by Using Two-Step Fractionation: A Review. – *Molecules*. Vol. 29(1): 98, 27 p. <https://doi.org/10.3390/molecules29010098>.
124. **Tutt, M.** (2015). Lignotselluloosse biomassi biokeemilist koostist mõjutavad tegurid ning biokeemilise koostise mõju eeltöötlemismeetodi valikule ja bioetanooli tootlikkusele. Doktoritöö. Eesti Maaülikool. Tartu. 154 lk.
125. **Tutt, M., Olt, J.** (2010). Rohtsest biomaterjalist vedela biokütuse tootmisvõimaluste uurimine. – *Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine: TEUK XII*. /Toim. E. Vollmer, A. Normak. Tartu: Eesti Maaülikool, lk 106-114.
126. **Usmani, Z., Sharma, M., Gupta, P., Karpichev, Y., Gathergood, N., Bhat, R., Gupta, V. K.** (2020). Ionic liquid based pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced bioconversion. – *Bioresource Technology*. Vol. 304: 123003, 13 p. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123003>.
127. Vabariigi digitaalse suuremõõtkavalise mullastiku kaardi seletuskiri. (2001). Tallinn: Maa-amet. 46 lk. https://geoportaal.maaamet.ee/docs/muld/mullakaardi_seletuskiri.pdf?t=20091211092214 (19.01.2025).
128. **Velling, S., Vaasmaa, T.** (2013). Energiaallikas biomass. Õpiobjekt. Tartu Ülikool. <https://dspace.ut.ee/norepo/30198/index.html> (04.04.2025).
129. **Vooro, A.** (2013). Omahinna arvestamine põllumajanduses. Raamatupidamis- ja maksuinfoportaal. [veebileht]. <https://www.rmp.ee/ettevotlus/kasulik/omahinna-arvestaminepollumajanduses-2013-11-25> (30.04.2025).
130. ÜPP SK 2023–2027. Euroopa Liidu ühise põllumajanduspoliitika Eesti strateegiakava 2023–2027. Versioon 4.1 (18.12.2024). 735 lk. <https://www.agri.ee/sites/default/files/documents/2024-12/%C3%BCpp-2023-tervitekst-2024-12-16-v4-1.pdf> (01.04.2025).
131. ÜRO. (2015a). Muudame maailma: säästva arengu tegevuskava aastaks 2030. https://www.riigikantselei.ee/sites/default/files/documents/2020-09/saastva_arengu_tegevuskava_2030_uro_et.pdf (25.02.2025).
132. ÜRO. (2015b). Pariisi kokkulepe. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (22.03.2025).

133. **Zabaniotou, A.** (2018). Redesigning a bioenergy sector in EU in the transition to circular waste-based Bioeconomy-A multidisciplinary review. – *Journal of Cleaner Production*. Vol 177, pp. 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.172>.
134. **Zoobel, K.** (2016). Energia tootmine lamminiitude heina põletamisel – kliima soojenemise potentsiaali muutus läbi olelusringi. Magistritöö. Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Tartu. 62 lk.

LISAD

Lisa 1. Pärandniitude levik elupaigatüüpide kaupa kaitstavatel aladel 2020.
a. seisuga
 (Helm, Toussaint 2020: 14)



Lisa 2. Kaitstavatel aladel hooldamist ja taastamist vajavad pärandniidud
(autori koostatud, Pärandniitude tegevuskava 2021: 38; Helm, Toussaint 2020: 15 andmete põhjal)

LoD kood	Elupaigatüüp	Kaitstavatel aladel (ha)	Hoolduses 2020. aastal (ha)	Eesmärk 2027 (ha)	Hoolduses olevate PLKde osakaal
1630	rannaniit	20 968	11 400	14 000	54%
5130	kadastik	3 616	500	650	14%
6210	lubjarikas aruniit	4 397	2 500	3 200	57%
6270	lubjavaene aruniit	3 993	1 500	2 500	38%
6280	loopealne	10 262	4 800	8 000	47%
6410	sinihelmika-niit	1 800	700	800	39%
6430	servaniit	3 258	1 200	1 400	37%
6450	lamminiit	18 652	8 900	10 900	48%
6510	viljakas aruniit	4 551	2 600	2 850	57%
6530	puisniit	4 958	940	2 000	19%
7230	soostunud niit	6 761	1 650	2 200	24%
9070	puiskarjamaa	4 116	1 080	1 500	26%
Kokku		87 332	37 770	50 000	43%

Lisa 3. Lamminiitude taimkatte iseloomustus Eesti taimkatte kasvukohatüüpide klassifikatsiooni järgi
(autori koostatud, Paal 1997: 172–186 põhjal)

Tabel A. Niiske ja märja lamminiidu kasvukohatüüpide üldiseloomustus

	Niiske lamminiidu kasvukohatüüp	Märja lamminiidu kasvukohatüüp
Reljeef:	kõrgemad lammiosad, kaldavallid	lammi terrassiäärne- või keskosa, harvem madal kaldaosa, jõeoru laiendid, deltid
Muld:	jõeuhte kogunemine kaasajal puudub või on tühine, mullad suhteliselt toitevaesed; iseloomulikud on lammi-kamarmullad (AK) või kihilised lammi-gleimullad (AGk)	ohtra pealeuhte tõttu viljakad lammi-gleimullad (AG), pikema üleujutusega aladel turvastunud mudajad lammimullad (At) või lammi-madalsoomullad (AM)
Veerežiim:	üleujutus lühiajaline ja ebaregulaarne	üleujutus pikaajaline, toimub regulaarselt igal aastal
Rohurinne:	madalakasvuline, liigiliselt koosseisult on kooslused sarnased niisketele pärisaruniitudele	kõrge, lopsakas, suhteliselt liigivaene, domineerivad kõrrelised või suurtarnad

Tabel B. Niiske lamminiidu kasvukohatüübi tähtsamad taimekooslused

Jrk	Taimekooslus	Levik	Domineerivad (D), karakterised (K) liigid
1.	Lamba-aruheina - nõmm-liivatee kooslus	lammi kuivadel, harva üleujutatavatel kaldavallidel ja kühmuldel jõeloogete vahel kergema lõimisega lammi-kamarmullal (AK)	D: lamba aruhein; K: nõmm-liivatee
2.	Maarjaheina - kasteheina kooslus	esineb karjatataval lammil liivase lõimisega lammi-kamarmullal (AK)	D: lõhnav maarjahein, harilik kastehein
3.	Lubika - lamba-aruheina kooslus	lühiajaliselt üleujutataval, kuid varem ladestunud lubjarikkal alluviaalsel jõeuhtel kujunenud teralisel lammi kamarmullal (AKt)	D: lubikas, lamba-aruhein; K: villtarn
4.	Lubika - jussheina kooslus	enamasti üleujutustest kõrgemale jäävatel kühmuldel, lammi-kamarmullal (AK), mille kihisemine ilmneb sügavamal kui 30 cm	D: lubikas, jusshein
5.	Värvmadara - hariliku kasteheina kooslus	lühiajaliselt üleujutataval karbonaadivaesel kihilisel lammi-gleimullal (AGk) või lammi-kamarmullal (AK)	D: värvmadar, harilik kastehein
6.	Suure kasteheina kooslus	enamasti kitsa ribana kaldalammil kergema lõimisega kihilisel lammimullal (Akk)	KD: suur kastehein
7.	Kastekaera - jussheina kooslus	kihilisel lammi-gleimullal (AGk), kus üleujutus esineb ebareeglipäraselt, ega rikasta mulda oluliselt toiteelementidega	K: kastehein, jusshein, tedremaran

Tabel C. Märja lamminiidu kasvukohatüübi tähtsamad taimekooslused

(Lisa 3. järg)

Jrk	Taimekooslus	Levik	Domineerivad (D), karakterseid (K) liigid
1.	Luht-kastvarre - punase aruheina kooslus	mõõduka jõeuhtega kaldavallidel ja keskklammil teralisel lammi-gleimullal (AGt)	D: luht-kastvars, punane aruhein
2.	Luht-kastvarre - mätastarna kooslus	sage keskklammil, ka väiksemate jõgede kaldalammil mudasel lammi-gleimullal (AGm)	D: mätastarn, luht-kastvars
3.	Aas-rebasesaba kooslus	kohati teralisel lammi-gleimullal (AGt)	KD: aas-rebasesaba
4.	Hariliku orasheina - mustja rebasesaba kooslus	ulatuslikumalt vaik Kasari alamjooksul, lammi-gleimullal (AG)	KD: mustjas rebasesaba; D: harilik orashein, luht-kastvars
5.	Angervaksa - soo-kurereha kooslus	madalatel jõe- ja ojakallastel, harvem keskklammil, lammi-gleimullal (AG); lopsakas, kuid liigivaene kooslus	D: angervaks; K: soo-kurereha, pikalehine mailane
6.	Soo-tähtheina - luht-kastvarre kooslus	pikaajaliselt märjal vähesetelisel lammil, lammi-gleimullal (AG); võib kujuneda saleda tarna kooslusest viimase kuivendamisel	D: luht-kastvars; K: soo-tähthein, kannasmailane
7.	Päideroo kooslus	ohtrama settega suuremate jõgede lammidel, teralisel lammi-gleimullal (AGt)	KD: päideroog; D: luht-kastvars
8.	Sookastiku kooslus	eelmisega enam-vähem sarnastes tingimustes, kuid piiratud levikuga	KD: sookastik
9.	Lüinktarna kooslus	madalal kesk- või terrassiäärsel lammil teralisel lammi-gleimullal (AGt) või turvastunud mudajal lammimullal (Atm); liigiliselt koosseisult võib olla peaaegu monodominantne	KD: lüinktarn; D: sale tarn
10.	Seaohaka - ussitatra kooslus	tavaline pidevalt niiskete madalate oja- ja väiksemate jõgede kallastel, turvastunud mudajal lammimullal (Atm), turvastunud lammi-madalsoomullal (AM)	KD: seaohakas; D: metskõrkjas, angervaks; K: ussitatar
11.	Saleda tarna kooslus	madalatel jõekallastel, soisel kesk- või terrassiäärsel lammil, turvastunud mudajal lammimullal (Atm) või lammi-madalsoomullal (AM)	KD: sale tarn
12.	Pudeltarna - põistarna kooslus	lammi-madalsoomullal (AM), sage Lõuna-Eestis väiksemate jõgede kallastel	KD: pudeltarn, põistarn
13.	Lubika - kirsstarna kooslus	lammisoodes serval vähesetelisel alal turvastunud lammimullal (At) või lammi-madalsoomullal (AM); sekundaarne kooslus, tekkinud kuivendamise tagajärjel	D: lubikas, kirsstarn, harilik tarn, soo-kastehein
14.	Hariliku tarna - ümartarna kooslus	turvastunud lammimullal (At), harvem lammi-madalsoomullal (AM); primaarne kooslus, või tekkinud saleda tarna koosluse asemele kuivendamise tagajärjel	D: harilik tarn, püstkastik, sale tarn; K: ümartarn
15.	Mätastarna - eristarna kooslus	liikuva põhjaveega turvastunud lammi-glei- (AGt) või lammi-madalsoomullal (AM); kohati üsna rohkesti puid, eelkõige sookaske, samuti põõsaid, pajud, madal kask	KD: mätastarn, eristarn; D: angervaks, sookastik
16.	Luhttarna kooslus	väga märjas kasvukohas, kus tulvaveega kantav toiterohke sete on suhteliselt levinud; lammi-madalsoo- (AM) või turvastunud mudajal lammimullal (Atm); turbakihi tusedus enamasti alla 30 cm; primaarne kooslus	KD: luhttarn; D: püstkastik
17.	Sirbiku - niitja tarna kooslus	halvasti lagunenud turbaga lammi-madalsoomullal (AM), harvem küllastumata turvastunud lammimullal (At); kasvab üksikuid sookaski, iseloomulik küllaltki tihe põõsasinne	KD: niitjas tarn; D: luhttarn
18.	Pilliroo kooslus	väga märjal lammi-madalsoomullal (AM); kohati ohtralt pajupõõsaid	KD: pilliroog; D: sale tarn, luhttarn
19.	Järvkaisla - pilliroo kooslus	jõe- ja järvekallastel veepiiril ja kaldaäärses madalas vees	KD: järvkaisel; D: pilliroog; K: kalmus, vesi-kirburohi, ahtaleheline hundinui

Lisa 4. Varasemad uuringud rohtse biomassi väärimise võimalustest

(autori koostatud)

Autor(id), aasta	LCB allikas				Mida uuriti?	Olulisemad tulemused/ järeldused
	1	2	3	4		
Ding <i>et al.</i> 2024		X	X		Analüüsi mitteinensiivses kasutuses olevate rohumaade (<i>residual grasslands</i>) biomassi väärimise võimalusi kolmes ringbiomajanduse väärtusahelas: valgu ekstraheerimine, paberitootmine ja biosöe (<i>biochar</i>) tootmine.	Tuvastati tehnoloogilised, majanduslikud ja institutsionaalsed kitsaskohad; rõhutati vajadust paindlike lahenduste järele ning turuarenduse ja kohaliku koostöö olulisust.
Heinsoo <i>et al.</i> 2010	X	X			Hinnati Eestis levinud poollooduslike rohumaade, sh lamminiitide, biomassi tootlikkust ja keemilisi omadusi, eesmärgiga selgitada välja nende sobivus bioenergia tootmiseks (sh põletamine, biogaas).	Suurim saagikus ja energiapotentsiaal oli luhtadel (kuni 5,7 t kuivainet/ha); energiasisaldus 18,1–18,6 kJ/g. Soovitati sõltuvalt kooslustüübist kaaluda erinevaid bioenergia tootmise tehnoloogiaid.
Jørgensen <i>et al.</i> 2022			X		Uuriti mitmeaastaste rohumaade biomassi väärimist rohelise biorafineerimise (<i>green biorefinery</i>) kontekstis, keskendudes valgu ekstraheerimisele ja kõrvalfraktsioonide kasutamisele bioenergia, loomasööda ning biomaterjalide tootmisel.	Rohtsest biomassist saab kvaliteetset valgukontsentraati, mis sobib soja asendamiseks nii lindude kui ka sigade söötmisel. Ülejäänud kiuline fraktsioon sobib nii mäletsejaliste söödaks kui ka bioenergia või -materjalide tootmiseks.
Kikas <i>et al.</i> 2016			X		Uuriti erinevate eeltötlusmeetodite mõju erinevate rohtsete energiakultuuride biomassile, keskendudes bioetanooli ja biogaasi tootmise saagikusele. Lisaks hinnati biomassi saagikust, keemilist koostist ja sobivust töötlemiseks Eesti tingimustes.	Bioetanooli tootmisel mängib olulist rolli tselluloosi ja hemitselluloosi sisaldus ning ligniini osakaal. Eeltötlusmeetodite sobivus sõltub biomassi keemilisest koostisest. Energiakultuurid näitasid head potentsiaali nii bioetanooli kui ka biogaasi tootmiseks
Melts <i>et al.</i> 2013	X	X			Uuriti poollooduslike koosluste, sh lamminiitide biomassi energeetilist potentsiaali (biogaas ja põletamine) ning võrreldi seda energiakultuuridega Eesti tingimustes, pöörates tähelepanu metaanisagikust mõjutavatele teguritele ja eeltötluse vajadusele.	Lamminiitidelt saadud biomass andis madalaima metaanitootlikkuse, kuid selle energeetiline potentsiaal on võrreldav energiakultuuridega; biomassi tõhusam väärimine eeldab sobivat eeltötlust, nt leostamist (<i>leaching</i>).
Rocha-Meneses 2020			X	X	Uuriti kahest erinevast LCB allikast (Eesti päritolu odra põhk ja Nigeeriast pärit hiidhirss) bioetanooli ja sellele järgneva biometaanitootmise võimalusi. Töö keskendus kolmele erinevale tehnoloogilisele protsessile ning hinnati eeltötlusviiside mõju toodangu saagikusele ja energiatootlikkusele.	Mõlemad biomassi liigid sobisid bioetanooli ja biogaasi tootmiseks, kuid hiidhirss andis odra põhust kõrgemad saagised. Saagikust ja energiaefektiivsust mõjutasid eeltötlusviisid ja valitud protsess. Parima tulemuse andis skeem, kus bioetanooli tootmisele järgnes digestioonijääkide anaeroobne lagundamine biometaaniks.
Tutt 2015	X		X		Uuriti eri eeltötlusmeetodite mõju rohtsele biomassile (sh lamminiidult pärinev hein) bioetanooli tootmisel, et leida sobivaim tehnoloogia Eesti tingimustesse.	Luhahein andis madala teoreetilise, kuid kõrge eksperimentaalse bioetanooli saagikuse. Eeltötlusviisid mõjutasid tugevalt glükoosi- ja etanoolisaagikust; parimad tulemused saadi aurulõhkamise ning lämmastikulõhkamise meetoditega.
Tutt, Olt 2010	X	X	X		Uuriti etanooli tootmise võimalusi erinevatelt rohumaadelt pärinevast biomassist ning selle sõltuvust keemilisest koostisest ja osakeste suuruselt.	Etanooli saagis sõltub eeskätt tselluloosi sisaldusest, kuid mõjutavad ka ligniini ja hemitselluloosi kogused. Väiksem osakeste suurus lihtsustab ja kiirendab protsessi, kuigi ei pruugi suurendada saagist.
Zoobel 2016	X				Uuriti lamminiitide heinast energia tootmist põletamise teel ning selle mõju kliima soojenemise potentsiaalile kahe stsenaariumi alusel: katelpõletis ja koostootmisjaamas. Hindamine viidi läbi oleringringi analüüsi (LCA) meetodil.	Mõlemad stsenaariumid vähendasid kliimasoojenemise potentsiaali; koostootmisjaamas toodetud energia mõju oli ligi kaks korda väiksem võrreldes katlas põletamisega. Luhahein sobib energiaks, kuid piiranguks on ligipääs ja koristusaeg.

LCB allikas: 1 - luhad e lamminiidud (LoD 6450); 2 - PLK (v.a. lamminiidud); 3 - rohumaad, sh püsirohumaad, kultuurniidud, energiakultuurid; 4 - põllumajanduse kõrvalsaadused, nt põhk, silojäägid jm

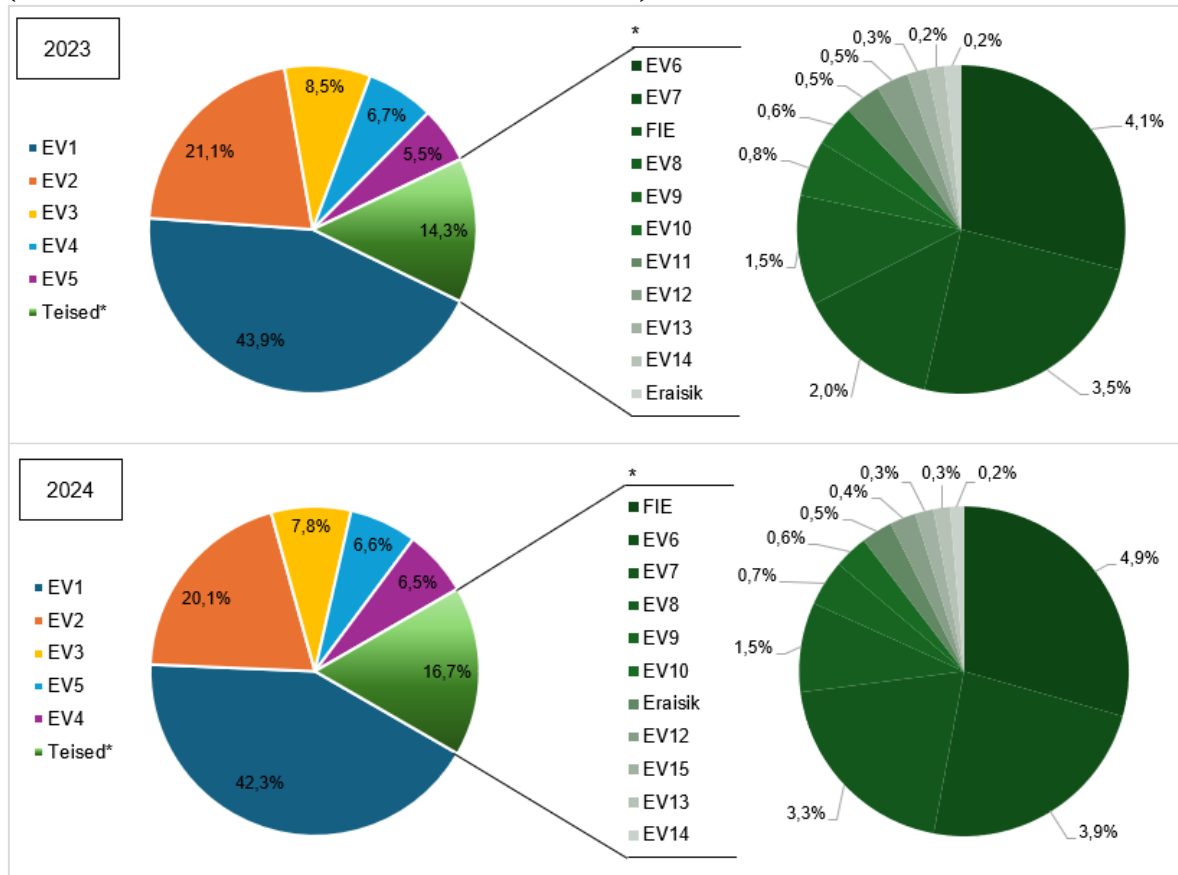
Lisa 5. Protoonsete ja mitte-protoonsete ioonvedelike põhierinevused, eelised/puudused LCB väärindamisel (autori koostatud)

Protoonsed ioonvedelikud (<i>Protic Ionic Liquids, PIL</i>) Sünteesitakse üheastmelise happe ja aluse vahelise reaktsiooni tulemusena (Brønsted'i happe-aluse neutralisatsioon); Sisaldab Brønsted'i prootonit (st katioon on protoneeritud), mis annab PIL-idele unikaalse keemilise aktiivsuse (nt võime moodustada vesiniksidemeid) [1][3][5]	
Eelised: - Parem selektiivsus - paljud uuritud PIL-id on disainitud lahustama selektiivselt ligniini, jättes tselluloosi peaaegu puutumatuks, mis muudab fraktsioonide eraldamise lihtsamaks ja võimaldab tselluloosi kasutada edasistes protsessides, nt suhkru saamiseks või materjalide tootmiseks [1][2][3][5][6] - PIL-id on odavamad ja lihtsamini sünteesitavad – kasutatakse lihtsaid, laialt kättesaadavaid lähteaineid ning protsess on üheastmeline [1][5][6] - PIL-idel on väiksem toksilisus ja parem biolagunevus [1][4][7] - Lihtsam regenereerimine ja korduvkasutamine – PIL-id võimaldavad lahusti lihtsat ja energiatõhusamat taaskasutamist [1][4][6] - Taastamine vee abil – ligniini saab sadestada lisatava veega, seega pole vaja keerukaid eraldusmeetodeid [2][4][6]	Puudused: - Tselluloosi lahustuvus üldiselt piiratud – enamik PIL-e ei suuda katkestada tselluloosi kristallilist struktuuri, mistõttu tselluloosi lahustamine on piiratud [1][3][4] - PIL-idel võib esineda tugev sisene vesiniksidemete võrgustik, mis tõstab viskoossust ja raskendab segamist [1][6] - Termiline stabiilsus mõnel juhul madalam kui AIL-idel, mis piirab nende kasutust kõrgematel temperatuuridel [5][6] - Vähem uuritud võrreldes AIL-idega – PIL-ide rakendusuuringuid on vähem ja nende mõju biomassile pole nii laialdaselt kaardistatud [1][5]
Mitte-protoonsed ioonvedelikud (<i>Aprotic Ionic Liquids, AIL</i>) Saadakse tavaliselt mitmeetapilise sünteesi teel; Tüüpiliselt on AIL-id täielikult ioonsed vedelikud, kus katioonil ei ole kergesti loovutatavat prootonit [1][3][8]	
Eelised: - Väga hea tselluloosi lahustuvus – paljud AIL-id (nt [EMIM]Cl) suudavad katkestada tselluloosi hüdroksüülrühmade vahelised vesiniksidemed, võimaldades täielikku lahustumist [1][3][10] - Väga hea termiline ja keemiline stabiilsus – sobivad töötlemiseks kõrgematel temperatuuridel ning püsivad paljudes keemilistes keskkondades [1][3][10] - Rohkem uuritud ja kirjeldatud – AIL-ide toimemehhanismid ja mõju biomassile on laialdasemalt teaduskirjanduses käsitletud [1][2][3][8][10]	Puudused: - Madal selektiivsus fraktsioonide lõikes – paljud AIL-id lahustavad korraga kõiki kolme biomassi põhikomponenti (tselluloos, ligniin, hemitselluloos), mis muudab fraktsioonide eraldamise keerukamaks ja võib vähendada lõppsaaduste puhtust [2][3][8] - Paljudel AIL-del kõrge hind – keerulisem süntees ja kallimad lähteained muudavad tootmise kulukaks [1][5][8] - Regenereerimine ja korduvkasutamine sageli tehniliselt keerukam, aeganõudvam ja kulukam kui PIL-del [1][5][6][8] - Võivad olla toksilised ja ei ole tüüpiliselt biolagunevad [4][7][9][10]

Märkused: Täpne lahustuvus- ja selektiivsuskäitumine sõltub konkreetse IL-i struktuurist (katioon + anioon), reaktsioonitingimustest ning töödeldava biomassi tüübist. Tabelis esitatud eelised ja puudused põhinevad enimuuritud ja tüüpilistel AIL-idel ning PIL-idel lignotselluloosse biomassiga töötamisel.

Allikad: [1] – Achinivu 2018; [2] – Asim *et al.* 2020; [3] – Brienza *et al.* 2024; [4] – Hasanov *et al.* 2020; [5] – Hasanov *et al.* 2022; [6] – Khan *et al.* 2022; [7] – Norfarhana *et al.* 2024; [8] – Palomar *et al.* 2024; [9] – Putra, Anita 2024; [10] – Swami *et al.* 2024.

Lisa 6. Toetuste taotlejate struktuur pindala alusel 2023. ja 2024. aastal
(autori koostatud, PRIA kaardirakenduse andmed)



Taotleja	2023 pindala (ha)	2024 pindala (ha)	muutus 24/23 (ha)
EV1	659,70	670,66	10,96
EV2	317,75	317,75	0,00
EV3	127,55	124,10	-3,45
EV4	100,74	102,88	2,14
EV5	83,09	105,15	22,06
EV6	62,22	62,22	0,00
EV7	52,84	52,84	0,00
FIE	29,94	77,61	47,67
EV8	23,24	23,24	0,00
EV9	11,85	11,85	0,00
EV10	8,81	8,81	0,00
EV11	7,65	0,00	-7,65
EV12	6,78	6,78	0,00
EV13	4,29	4,29	0,00
EV14	3,61	3,61	0,00
EV15	0,00	4,74	4,74
Erasisik	3,52	8,08	4,56
KOKKU	1 503,58	1 584,61	81,03

Lisa 7. Luhaheina tootmise masinakulude kalkulatsioonide eeldused

(autori koostatud)

Püsikulud:

- Kulumi arvestamisel võeti aluseks keskmise hinnaklassi uute masinate hinnad ja nende tööressurss. Traktorite tööressurss on arvestuslikult 10 000 tundi, töömaht aastas 1000 tundi ja eeldatav kasutusaeg 10 aastat; töömasinate kasutuseaks on arvestatud 10–13 aastat. Kulumi arvestamisel on kasutatud lineaarset meetodit.
- Intressikulude leidmisel eeldati, et kõik masinad on ostetud 2023. aasta hindades uuena ning nende soetamiseks on võetud laen tähtajaga 5 aastat, intressimääraga 3% aastas. Traktorite puhul on omafinantseeringu määr 25% ja töömasinate puhul 50%. Laenuintress tööühiku kohta on arvutatud masina kasutusea keskmisena.
- Hoiuruumi kulude alla kuuluvad kulum, kindlustus, küte, elekter ja muud kulud, mis jaotatakse masinate vahel vastavalt masina poolt hõivatud pindala suurusele (m² kohta).
- Kindlustuskuludeks (traktorite liiklus- ja varakindlustus ning ülevaatustasu) on arvestatud 1,5% masina soetusmaksumusest aastas ning jaotatud proportsionaalselt kogu aastase tööaja peale.
- Üldkuludeks on arvestatud 7% muutuvkulude ja muude püsikulude summast.

Muutuvkulud:

- Kasutatakse kahte neliveolist ratastraktorit: kaarutamisel ja vaalutamisel 120 hj (88 kW) ning niitmisel, heina pressimisel ja ruloonide kokkuveol 166 hj (122 kW). Traktorite võimsuse kasutamise koefitsiendiks on niitmise ja pressimise puhul 0,75 ning ülejäänud tööde puhul 0,50.
- Diislikütuse hinnaks on arvestatud erimärgistusega diislikütuse maksumus: 2023. aastal 0,72 €/l ja 2024. aastal 0,62 €/l (ilma km-ta). Diislikütuse erikulu on 0,22 kg/kWh ja tihedus 0,861 kg/l.
- Määrdeainete kuluks on arvestatud 2% kütusekulust ning määrdeainete hinnaks 5 €/l. Arvesse on võetud ainult igapäevaselt lisatavaid õlisid.
- Masinate korrashoiukuludeks on arvestatud regulaarse hoolduse ja remondi kulud: traktoritel 3% soetusmaksumusest 1000 töötunni kohta, töömasinatel 5–10% masina soetusmaksumusest 1000 töötunni kohta.
- Statistikaameti palgarakenduse andmetel oli traktoristi keskmine brutokuupalk III kvartalis 2023. aastal 1825 € ja 2024. aastal 1981 €. Eeldatud on, et traktorijuht töötab kõrghooajal 11 tundi päevas ehk keskmiselt 238,3 töötundi kuus. Seega kujunes keskmiseks tunnitasuks 2023. aastal 7,7 € ja 2024. aastal 8,3 €.
- Töötasudele on lisatud tervisekindlustuse, sotsiaalkindlustuse ja puhkusetasu juurdearvestus.

Märkus: Kalkulatsioonides ei ole masinatööde kuludesse arvestatud riski, kasumit ega käibemaksu.

Lisa 8. Traktorite kulud

(autori arvutused)

Näitaja	2023			2024		
	Traktor 120 hj	Traktor 166 hj		Traktor 120 hj	Traktor 166 hj	
<i>Võimsuse kasutamise koefitsient</i>	0,50	0,50	0,75	0,50	0,50	0,75
Püsikulud						
Kulum, €/h	8,50	14,50	14,50	8,50	14,50	14,50
Laenuintress, €/h	0,48	0,82	0,82	0,48	0,82	0,82
Hoiuruumi kulud, €/h	0,19	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20
Kindlustus, €/h	1,28	2,18	2,18	1,28	2,18	2,18
Püsikulud kokku, €/h	10,45	17,70	17,70	10,45	17,70	17,70
Muutuvkulud						
Diislikütuse maksumus, €/h	8,09	11,22	16,83	6,97	9,66	14,5
Määrdeainete maksumus, €/h	1,12	1,56	2,34	1,12	1,56	2,34
Korrashoiukulud, €/h	2,55	4,35	4,35	2,55	4,35	4,35
Traktorijuhi töötasu, €/h	7,7	7,7	7,7	8,3	8,3	8,3
Juurdearvestused töötasule, €/h	3,24	3,24	3,24	3,49	3,49	3,49
Muutuvkulud kokku, €/h	22,7	28,07	34,46	22,43	27,36	32,98
Püsi- ja muutuvkulud kokku (ilma üldkuluta), €/h	33,15	45,77	52,16	32,88	45,06	50,68
Ettevõtte üldkulud, €/h	2,32	3,2	3,65	2,3	3,15	3,55
Jõumasina kulud kokku koos üldkuludega omal tööol, €/h	35,47	48,97	55,81	35,18	48,21	54,23

Lisa 9. Töomasinate kulud

(autori arvutused)

Niiduki, vaaluti ja kaaruti hinnangulised kulud (€/ha) aastatel 2023–2024

Näitaja	Niidukomplekt (8,5 m)	Kaaruti (13,0 m)	Vaaluti (12,5 m)
Kulum, €/ha	5,19	1,83	5,39
Laenu intress, €/ha	0,19	0,07	0,20
Hoiukulu, €/ha	0,13	0,13	0,17
Korrashoiukulu, €/ha	3,38	2,42	5,48
Töomasina kulud kokku (ilma üldkuluta), €/ha	8,89	4,45	11,24
Ettevõtte üldkulud, €/ha	0,62	0,31	0,79
Töomasina kulud kokku oma töö (koos üldkuludega), €/ha	9,51	4,76	12,03

Ruloonpressi ja ruloonide kogurhaagise hinnangulised kulud (€/ruloon) aastatel 2023–2024

Näitaja	Ruloonpress (ruloon 1,5 m)	Ruloonide kogurhaagis (12 rulooni)
Kulum, €/ruloon	1,21	0,69
Laenu intress, €/ruloon	0,07	0,03
Hoiukulu, €/ruloon	0,02	0,00
Korrashoiukulu, €/ruloon	1,21	0,48
Töomasina kulud kokku (ilma üldkuluta), €/ruloon	2,51	1,20
Ettevõtte üldkulud, €/ruloon	0,18	0,08
Töomasina kulud kokku oma töö, €/ruloon	2,69	1,28

Lisa 10. Masinakulud tegevuste lõikes

(autori arvutused)

Hinnangulised masinakulud luhahaina niitmisel, kaarutamisel ja vaalutamisel

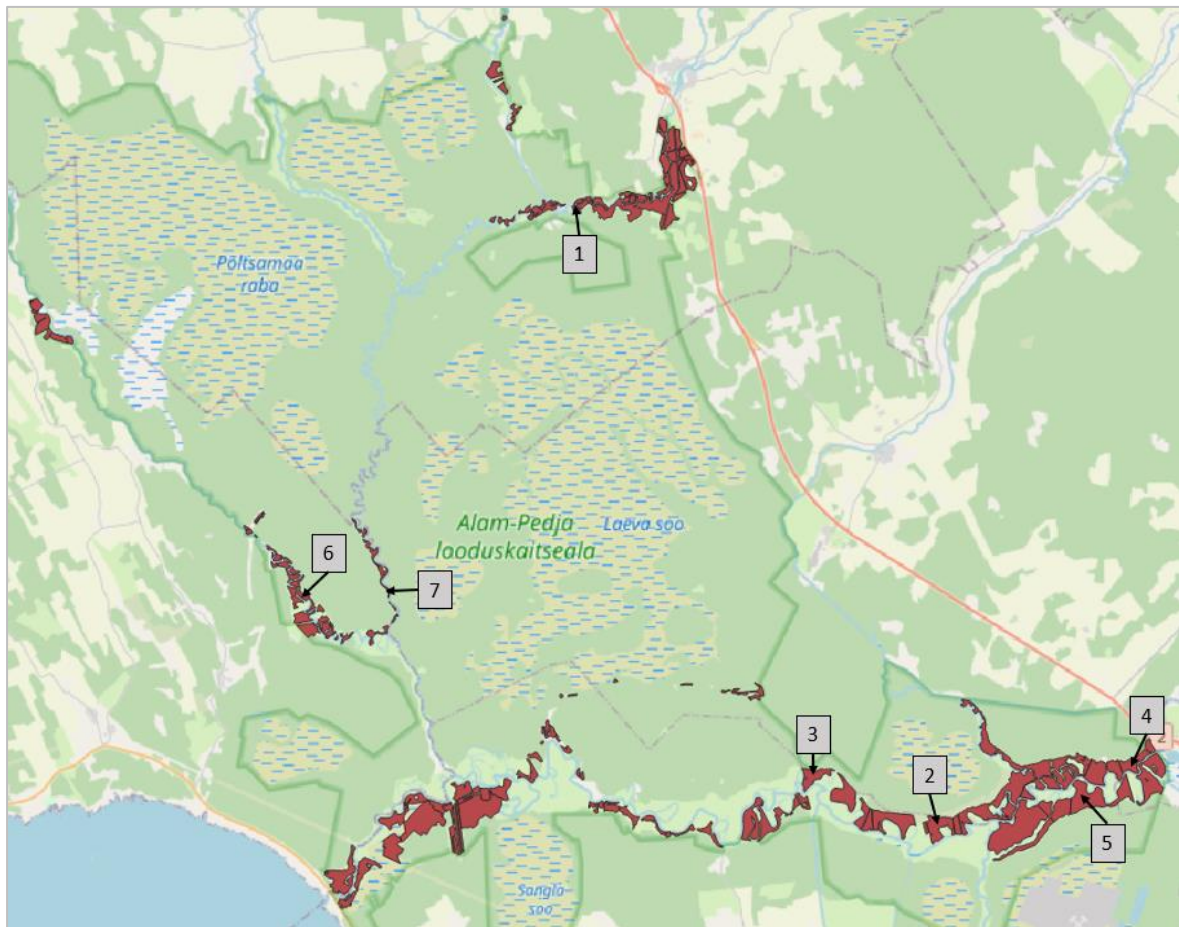
Näitaja	Niitmine		Kaarutamine		Vaalutamine	
Kasutatav jõu- ja töömasina kombinatsioon	Traktor (166 hj) + Niidukomplekt (8,5 m)		Traktor (120 hj) + Kaaruti (13,0 m)		Traktor (120 hj) + Vaaluti (12,5 m)	
Aasta	2023	2024	2023	2024	2023	2024
Töömasina kulud kokku oma töö (koos üldkuludega), €/ha	9,51	9,51	4,76	4,76	12,03	12,03
Jõumasina kulud kokku koos üldkuludega omal töö, €/h	55,81	54,23	35,47	35,18	35,47	35,18
Agregaadi (jõu- + töömasin) tootlikkus, ha/h	4,0	4,0	6,2	6,2	6,2	6,2
Traktoritöö maksumus, €/ha	13,95	13,56	5,72	5,67	5,72	5,67
Töö- ja jõumasinate kulud kokku, €/ha	23,46	23,07	10,48	10,43	17,75	17,70

Hinnangulised masinakulud luhahaina pressimisel ja ruloonide kokkuveol

Näitaja	Heina pressimine (rullimine)		Ruloonide kokkuvedu	
Kasutatav jõu- ja töömasina kombinatsioon	Traktor (166 hj) + Ruloonpress (ruloon 1,5 m)		Traktor (166 hj) + Ruloonide kogurhaagis (12 rulooni)	
Aasta	2023	2024	2023	2024
Töömasina kulud kokku oma töö (koos üldkuludega), €/ruloon	2,69	2,69	1,28	1,28
Jõumasina kulud kokku koos üldkuludega omal töö, €/h	55,81	54,23	48,97	48,21
Agregaadi (jõu- + töömasin) tootlikkus, rulooni/h	20	20	20	20
Traktoritöö maksumus, €/ruloon	2,79	2,71	2,45	2,41
Töö- ja jõumasinate kulud kokku, €/ruloon	5,48	5,40	3,73	3,69

Lisa 11. Luhaheina niite proovide asukohad 2023. aastal

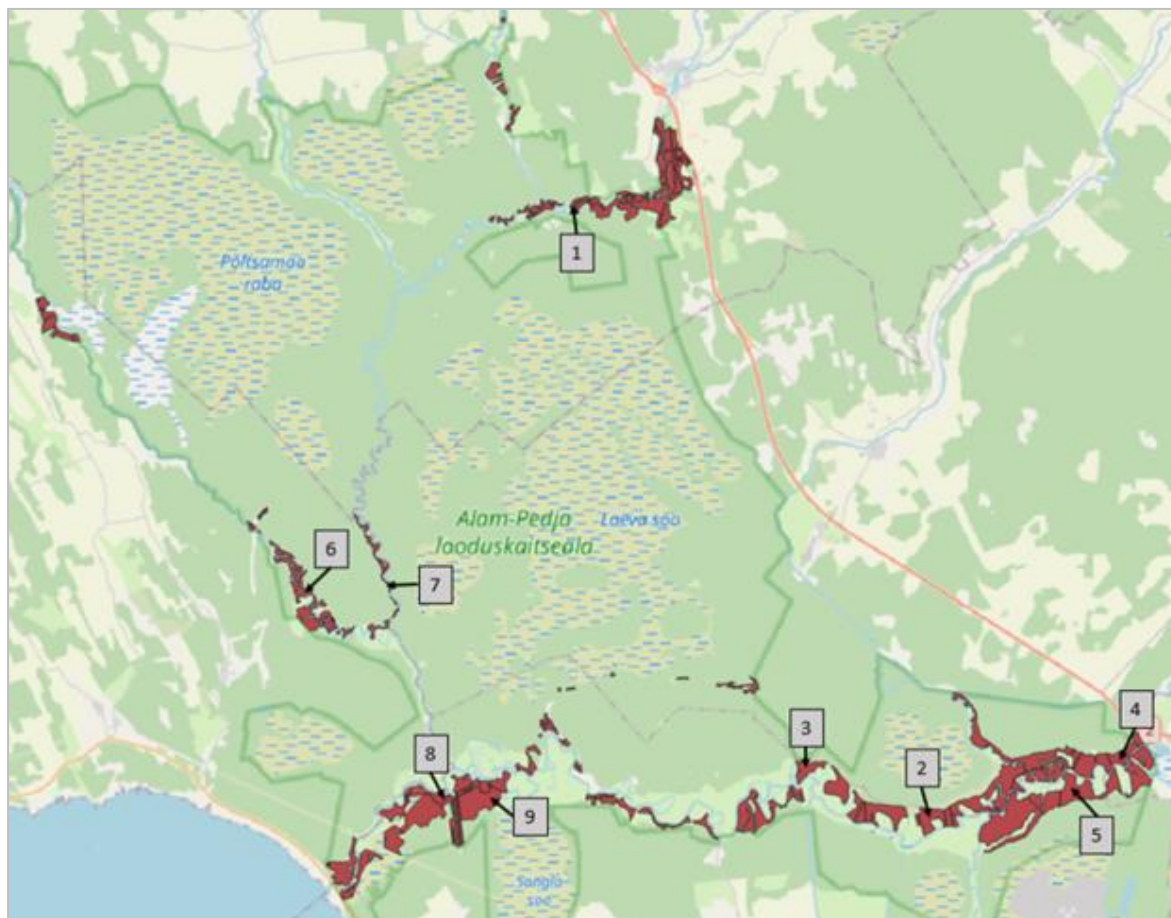
(autori koostatud, Keskkonnaameti aluskaart)



Alam-Pedja LLA-l asuvad pärandniidud, mille hooldamiseks taotleti 2023. aastal toetust (joonisel märgitud punasega) ning 2023. aastal kogutud luhaheina niite proovide asukohad (märgitud numbritaega).

Lisa 12. Luhahaina niite proovide asukohad 2024. aastal

(autori koostatud, Keskkonnaameti aluskaart)



Aastal 2024 Alam-Pedja LLA-lt kogutud luhahaina niite proovide asukohad (märgitud numbritega).

Lisa 13. Kogutud proovide keskmine kuivainesisaldus

Asukoha nr	Kuivainesisaldus (%)	
	2023	2024
1	94,183	88,887
2	93,466	87,543
3	92,109	89,532
4	90,644	90,305
5.1	93,583	89,997
5.2	93,763	—
6	90,418	89,440
7	92,221	88,088
8	—	90,690
9	—	89,753

Lisa 14. Kiuanalüüsi tulemused kuivaine baasil aastatel 2023 ja 2024

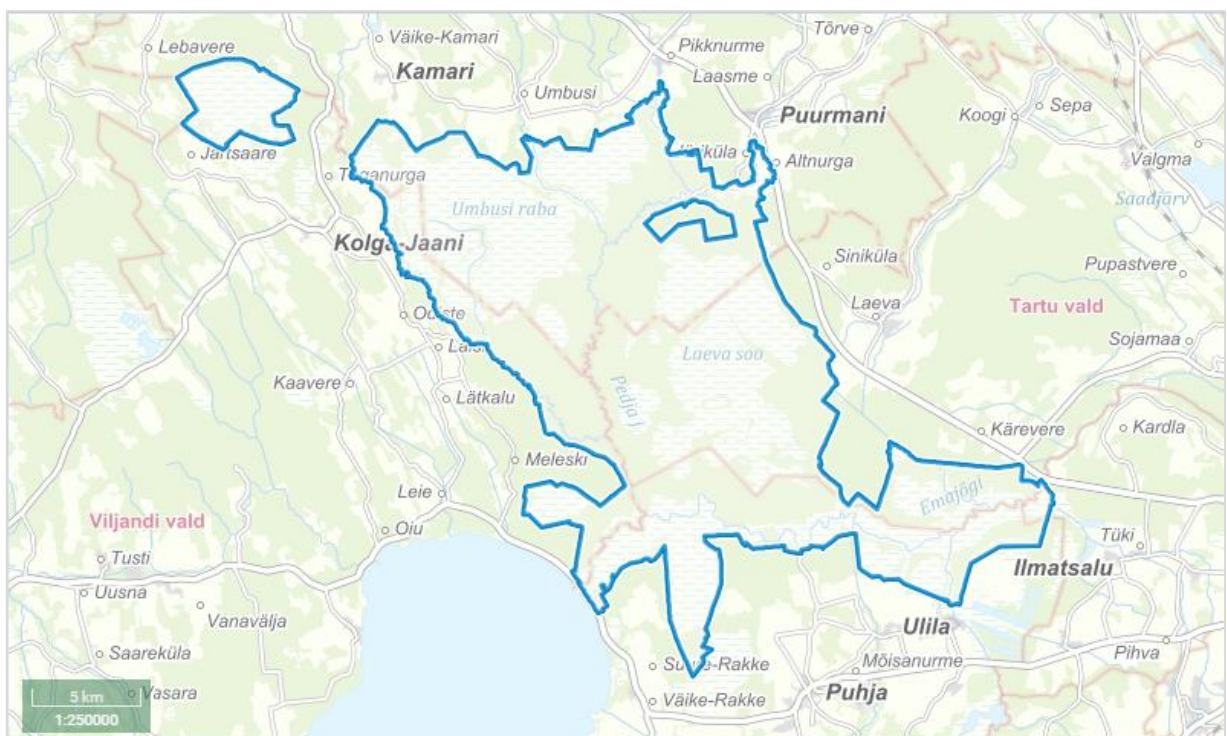
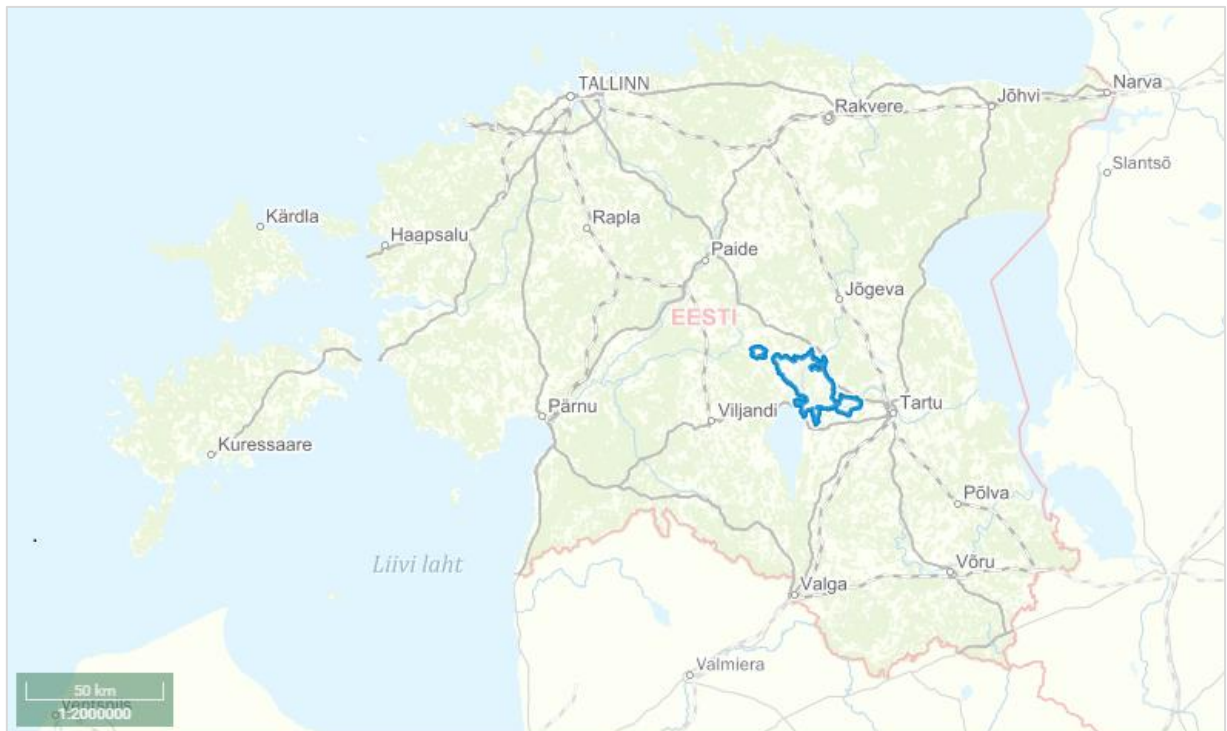
Kiuanalüüsi tulemused kuivaine baasil 2023. aastal kogutud biomassist

Asukoha nr	Hemitselluloos		Ligniin		Tselluloos		Tuhk	
	Average (%)	Std	Average (%)	Std	Average (%)	Std	Average (%)	Std
1	25,58	0,13	5,32	0,31	38,78	0,80	1,60	0,29
2	25,20	0,07	5,93	0,03	35,79	0,46	0,93	0,37
3	32,39	0,64	4,86	0,11	35,78	0,04	0,71	0,16
4	31,01	0,49	4,48	0,00	38,06	0,05	1,38	0,01
5.1	23,82	0,45	8,76	0,72	36,85	0,26	2,14	0,05
5.2	20,69	0,54	4,36	0,42	29,30	0,06	1,64	0,20
6	30,49	0,11	4,32	0,07	35,78	0,29	1,42	0,10
7	27,73	0,48	4,51	0,04	33,94	0,21	1,13	0,19

Kiuanalüüsi tulemused kuivaine baasil 2024. aastal kogutud biomassist

Asukoha nr	Hemitselluloos		Ligniin		Tselluloos		Tuhk	
	Average (%)	Std	Average (%)	Std	Average (%)	Std	Average (%)	Std
1	29,60	0,72	6,02	2,02	36,34	3,11	1,35	0,30
2	29,78	1,05	5,15	0,16	30,84	0,51	0,73	0,06
3	28,56	0,83	3,74	0,21	30,29	0,09	0,76	0,23
4	26,45	0,80	3,53	0,33	26,81	0,08	0,46	0,27
5	29,37	0,74	5,82	0,34	32,57	0,54	0,66	0,16
6	31,43	0,74	5,95	0,35	31,86	0,52	0,59	0,07
7	26,32	0,16	8,53	0,25	36,72	0,56	0,55	0,09
8	27,38	0,16	5,98	0,13	34,06	0,31	1,17	0,15
9	30,39	0,85	7,31	0,17	37,16	0,43	1,32	0,38

Lisa 15. Alam-Pedja linnu- ja loodusala geograafiline asukoht
(Maa- ja Ruumiamet 2025)



Alam-Pedja linnu- ja loodusala (sinise joonega piiritletud alad), pindala 34 671,2 ha.

Lisa 16. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Annika Jaanimägi,

sünniaeg 29.07.1990,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Luhaheina kui lignotselluloosse biomassi väärindamise võimalused Alam-Pedja näitel,

mille juhendajad on Ülle Roosmaa, Rando Värnik ja Timo Kikas,

salvestamiseks säilitamise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi EMU DSpace lisamiseks ja Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates lõputööd reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;

2. olen teadlik, et lihtlitsentsiga antavad õigused jäävad alles ka mulle;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Annika Jaanimägi (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaallkirjas)

Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Ülle Roosmaa (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaallkirjas)

Rando Värnik (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaallkirjas)

Timo Kikas (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaallkirjas)