

# Puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärimise teekaart



Rahastatud Euroopa Liit  
NextGenerationEU



Eesti  
tuleviku heaks



**Tellijad:** Kliimaministeerium

**Täitjad:** Eesti Maaülikool, Tallinna Tehnikaülikool, Tartu Ülikool

**Autorid:**

Eesti Maaülikool	Tallinna Tehnikaülikool	Tartu Ülikool
Ahto Kangur	Allan Niidu	Heili Kasuk
Allar Padari	Andres Krumme	Kaspar Valgepea
Marku Lamp	Heikko Kallakas	Rait Kivi
Paavo Kaimre	Helery Tasane	Siim Salmar
Raul Rincken	Jaan Kers	
Timo Kikas	Kaisa Orgusaar	
	Petri-Jaan Lahtvee	
	Tarmo Tuisk	
	Tiia Plamus	
	Viktoria Gudkova	

## SISUKORD

Lühendid/sümbolid .....	5
Definitsioonid .....	7
Tabelid.....	8
Joonised.....	9
Sissejuhatus.....	11
1. Eestis kättesaadav mehaaniliseks, mikrobioloogiliseks ja keemiliseks töötamiseks sobiv puiduressurss aastani 2050.....	13
1.1 Metsaolemi hindamise meetodika .....	13
1.2 Metsa ümarsortimentide väljatuleku arvutamine aastateks 2025 - 2050 .....	14
1.2.1 Metsa ümarsortimentide väljatulek ühtlase kasutuse langi puhul .....	15
1.2.2 Metsa ümarsortimentide väljatulekud aastatel 2025–2050 aastase raiemahu 10 miljonit m <sup>3</sup> korral 16	16
1.3 Puidu keemilise väärimiseks sobilikud sortimendid saetööstusest ja teistest allikatest.....	18
1.4 Kokkuvõte.....	21
2. Puiduressursi kättesaadavus .....	23
3. Täiendavad ressursid .....	36
3.1 Muud bioressursid .....	36
3.1.1 Sekundaarne puitmaterjal.....	36
3.1.2 Põllumajanduslikud toorained .....	37
3.1.3 Toidu- ja -tööstusjäätmed .....	38
3.2 tselluloossed tekstiilijäätmed .....	39
3.3 Vanapaber .....	40
3.4 Vesi .....	40
3.5 Energia .....	41
3.6 Tehnoloogiates vajalikud materjalid .....	42
3.6.1 Fermentatsioonitehnoloogiateks vajaminevad ressursid .....	42
3.7 Läti, Leedu ja Poola puidubilanss .....	43
3.8 Kokkuvõte.....	44
4. Puidu keemilise ja mikrobioloogiliste tehnoloogiate ja tootegruppide lühiülevaade .....	46
4.1 Ajalooline taust .....	46
4.2 Esimene põlvkond: Traditsioonilised tselluloosi ja puidumassi keemilised tehnoloogiad .....	50
4.2.1 Peamised tehnoloogiad .....	51
4.2.2 Integreeritud Kraft-biorafineerimistehased .....	53
4.2.3 Termomehaaniline ja keemilis-termomehaaniline protsess.....	55

4.3	Teine põlvkond: Kogu biomassi rafineerimine ja kaasaegsed tehnoloogiad .....	56
4.3.1	Peamised teise generatsiooni tehnoloogiad.....	56
4.3.2	Teise põlvkonna biorafineerimise näited .....	57
4.4	Kolmas põlvkond - suunatud väärindamise tehnoloogiad .....	59
4.5	Termokeemilised tehnoloogiad.....	62
4.5.1	Peamised termokeemilised töötlemisviisid: .....	62
4.6	Fermentatsioonitehnoloogiad.....	63
4.7	Kokkuvõtte.....	65
5.	Analüüs enimlevinud puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise tehnoloogiate sobivuse kohta Eesti tingimustesse.....	66
5.1	Ülevaade Euroopa Liidu kliimapoliitika eesmärkidest ja nende arvesse võtmise lühi- ja pikaajalisest mõjust puiduressursile ja selle väärindamisele .....	66
5.2	Esimese põlvkonna tehnoloogial põhinevate tehaste kasv ja laienemine Eestis.....	66
5.2.1	Rakendatavus Eestis .....	66
5.2.2	Vajalike toormete ja lähteainete kättesaadavus ja kvaliteedikriteeriumid .....	67
5.2.3	Tulevikupotentsiaali hindamine .....	70
5.3	Teise põlvkonna tehnoloogial põhinevate biorafineerimistehaste potentsiaal Eestis .....	71
5.3.1	Rakendatavus Eestis.....	71
5.3.2	Vajalike toormete ja lähteainete kättesaadavus ja kvaliteedikriteeriumid .....	72
5.3.3	Tulevikupotentsiaali hindamine .....	72
5.4	Kolmanda põlvkonna tehnoloogial põhinevate biorafineerimistehaste potentsiaal Eestis .....	73
5.4.1	Rakendatavus Eestis.....	73
5.4.2	VAJALIKE TOORMETE JA LÄHTEAINETE KÄTTESAADAVUS JA KVALITEEDIKRITEERIUMID.....	74
5.5	Termokeemilistel tehnoloogiatel põhinevate tehaste potentsiaal Eestis.....	74
5.5.1	Rakendatavus Eestis.....	74
5.5.2	Vajalike toormete ja lähteainete kättesaadavus ja kvaliteedikriteeriumid .....	74
5.5.3	Tulevikupotentsiaali hindamine .....	74
5.6	Fermentatsioonitehnoloogial põhinevate biorafineerimistehaste potentsiaal Eestis .....	75
5.6.1	Rakendatavus Eestis.....	75
5.6.2	Vajalike toormete ja lähteainete kättesaadavus ja kvaliteedikriteeriumid .....	76
5.6.3	Tulevikupotentsiaali hindamine .....	77
5.6.4	Sotsiaal-majanduslike mõjude hinnang.....	78
5.7	Poliitikasoovitused riigipoolsete stiimulite loomiseks biorafineerimistehnoloogiatel põhinevale ettevõtlusele .....	78
5.8	Sotsiaal-majanduslik analüüs.....	79
5.8.1	Metoodika .....	79

5.8.2	Tulemused.....	80
5.9	Kokkuvõte.....	88
6.	Ülevaade ekspertide vajadusest .....	89
6.1	OSKA raporti tulevikuvaade tööjõu- ja oskuste vajadusele metsanduse, puidutööstuse, keemia-, kummi-, plasti- ja ehitusmaterjalide tööstuses .....	89
6.2	Teekaardi põhjal kaardistatud kompetentsid .....	91
6.3	Õppekavade kaardistamine keemilise ja mikrobioloogilise puidu väärindamise suunal.....	95
6.3.1	Keemia ja biotehnoloogia baaskompetentsid ülikoolide bakalaureuse ja magistri õppekavadest 95	
6.3.2	Doktoriõppe roll puidupõhiste tehnoloogiate arendamises .....	97
6.4	Viie aasta keskmised sisseastujate ja lõpetajate arvud ning lõpetamise efektiivsus .....	98
6.5	Ettevõtete poolne tagasiside ülikoolide lõpetajate tööleasumise kohta .....	99
6.6	Antud valdkonda toetavad riigipoolsed meetmed .....	100
6.7	Kokkuvõte.....	104
7.	Labori- ja TA võimekuse kasvatamise vajadus .....	107
7.1	Üksuste ülevaade .....	107
7.2	Üksuste võimekused .....	112
7.2.1	Termokeemiline väärindamine.....	112
7.2.2	Biokeemiline väärindamine .....	112
7.2.3	Keemiline väärindamine .....	113
7.2.4	Toorme ja väärindatud materjali analüüs.....	115
7.3	Teadlaste vanus ja arv, doktorandid ja nooremteadurid, järelkasv.....	115
7.4	Koostöö Teadusarendusasutuste ning ettevõtetega .....	117
7.5	KOKKUVÕTE.....	118
8.	Puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise tehnoloogiate kasutuselevõtu kitsaskohad ja leevendamise võimalused .....	119
8.1	Metoodika .....	119
8.2	Kokkuvõte.....	129
8.3	Strateegilised võimalused edasilikumiseks.....	130
Lisa 4.1.	Fermentatsioon .....	133
Lisa 4.2.	Produktid C5 ja C6 suhkrutest .....	136
Lisa 5.1	Kolme generatsiooni tehnoloogiate detailne kaardistamine .....	138
Lisa 6.1.	TÜ üliõpilaste arvu analüüs (puidu väärindamisega seotud erialadel).....	146
Lisa 6.2.	TalTech üliõpilaste arvu analüüs (puidu väärindamisega seotud erialadel) .....	148
Lisa 6.3.	EMÜ üliõpilaste arvu analüüs (puidu väärindamisega seotud erialadel).....	149

## LÜHENDID/SÜMBOLID

AS – aktsiaselts

BCTMP – pleegitatud kemo-termo-mehaaniline haavapuitmass (Bleached Chemi-ThermoMechanical Pulp)

BECCS – bioenergia koos süsinikupüüdmise ja -salvestamisega (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)

BHKP – pleegitatud lehtpuidust krafttselluloos (Bleached Hardwood Kraft Pulp)

Bio-MEG – bio-monoetüleenglükool

Bio-MPG – bio-monopropüleenglükool

C5 – viie süsinikuga suhkrud (nt ksüloos)

C6 – kuue süsinikuga suhkrud (nt glükoos)

CCS – süsinikupüüdmine ja -salvestamine (Carbon Capture and Storage)

CMC – karboksümetüütselluloos (carboxymethyl cellulose)

CNC – tselluloosinokristallid (cellulose nanocrystals)

CNF – tselluloosi nanokiud (cellulose nanofibrils)

CO – süsiniku monooksiid (carbon monoxide)

COVID – Coronavirus Disease 2019

CTMP – keemilis-termo-mehaaniline puitmass (Chemi-ThermoMechanical Pulp)

DNA – desoksüribonukleiinhape

DOE – USA energeetikaministeerium (Department of Energy)

EDTA – etüleendiamiintetraatsetaat hape (ethylenediaminetetraacetic acid)

EELIS – Eesti keskkonna andmekogu: Eesti Loodus- ja Keskkonnateabe Infosüsteem

EIT – European Institute of Innovation and Technology

EL – Euroopa Liit

EMTAK – Eesti Majanduse Tegevusala Klassifikaator

EMÜ – Eesti Maaülikool

EPS – vahtpolüstüreen (expanded polystyrene)

EU – Euroopa Liit (European Union)

EUDR – Euroopa määrus metsaraie reguleerimiseks (EU Deforestation Regulation)

FSC – Metsahoolekogu (Forest Stewardship Council)

FTIR – Fourier' infrapunaspektroskoopia (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

GC – gaasikromatograafia (gas chromatography)

GW – gigawatt

ha – hektar

HB – haab

HMF – hüdroksümetüülfurfuraal (hydroxymethylfurfural)  
IT – infotehnoloogia (information technology)  
KOH – kaliumhüdroksiid  
KS – kask  
KU – kuusk  
LM – sanglepp  
LULUCF – maakasutus, maakasutuse muutus ja metsandus (Land Use, Land-Use Change and Forestry)  
LV – hall-lepp  
m<sup>3</sup> – tihumeeter (ilma õhuvahedeta puhta puidu mahu mõõtühik)  
MA – mänd  
MFC – mikrofibrillitud tselluloos (microfibrillated cellulose)  
mln – miljon  
MW – megavatt  
NACE – Euroopa tööstusklassifikatsiooni süsteem (Nomenclature of Economic Activities)  
NBKP – leht- või okaspuust krafttselluloos (neutral/bleached kraft pulp)  
NMR – tuumamagnetresonants (nuclear magnetic resonance)  
OSKA – tuleviku tööjõu- ja oskuste prognoosisüsteem  
OÜ – osaühing  
PEFC – Metsasertifitseerimise kinnitusprogramm (Programme for the Endorsement of Forest Certification)  
PET – polüeteentereftalaat (polyethene terephthalate)  
PHB – polühüdroksübutüraat (polyhydroxybutyrate)  
PV – fotogalvaaniline element (photovoltaics)  
RED – EU taastavenergia direktiiv (Renewable Energy Directive)  
RFF – taaste- ja vastupidavusrahadu (Recovery and Resilience Facility)  
RMK – Riigimetsa Majandamise Keskus  
SA – saar  
SAF – kestlik lennukikütus (sustainable aviation fuel)  
SCF – ülekritiline vedelik (supercritical fluid)  
SKP – sisemajanduse koguprodukt  
SKT – sisemajanduse kogutoodang  
SMI – statistiline metsainventeerimine  
SSL – kasutatud sulfitkeetmisvedelik (Spent Sulfite Liquor)  
TA – teadusasutus  
TalTech – Tallinna Tehnikaülikool  
TRL – tehnoloogilise valmidusastme tase (Technology Readiness Level)

TÜ – Tartu Ülikool

UKP – pleegitamata krafttselluloos (Unbleached Kraft Pulp)

USA – Ameerika Ühendriigid (United States of America)

USDA – Ameerika Ühendriikide põllumajandusministeerium (USA Department of Agriculture)

VFA – kergesti lenduvad rasvhapped (volatile fatty acids)

VKG – Viru Keemia Grupp

XX – teised puuliigid

€ - euro

## DEFINITSIOONID

Definitsioon	Selgitus
<b>Ümarsortiment</b>	Metsast saadav ümarmaterjal – palk, pakk, paberipuit, küttepuit jms
<b>Takseerandmed</b>	Andmed metsaeraldiste kaupa boniteet, kasvukohatüüp, pindala jms. Lisaks on andmed rinnete ja puuliikide kaupa: keskmised diameetrid, keskmised kõrgused, vanused, tagavara (maht) jms.
<b>Planetaarne piirang</b> <i>(planetary boundary)</i>	Teaduslikult määratletud ohutu piir, mille piires inimtegevus võib toimuda nii, et Maal säilib stabiilne ja eluks sobiv keskkond. Planetaarsete piiride süsteem hõlmab üheksat valdkonda: kliimamuutus, loodusliku mitmekesisuse kadumine, lämmastiku ja fosfori tsükkel, metsade raadamine ja maakasutus, magevee kasutus, ookeanide happesus, atmosfääri aerosoolid, keemiline saaste ja, troposfääri osooni tase.

## TABELID

Tabel 1.1 Ümarsortimentide protsentuaalne vahekord puuliikide kaupa 2025 aasta arvutuste põhjal .....	18
Tabel 1.2 Aastate 2025-2050 hinnangulised keskmised väljatulekud puuliikide ja sortimentide kaupa (m <sup>3</sup> aastas) .....	21
Tabel 2.1 Metsamaa jagunemine omandivormide vahel.....	23
Tabel 2.2 Haava ja kase puidusortimentide hinnanguline maht omandivormide ja aastate lõikes.....	30
Tabel 2.3 Kuuse ja männi puidusortimentide hinnanguline maht omandivormide ja aastate lõikes .....	31
Tabel 2.4 Sanglepa, hall-lepa ja teiste lehtpuuliikide (ei ole haab, kask ega lepp) puidusortimentide hinnanguline maht omandivormide ja aastate lõikes .....	32
Tabel 3.1 Öilina ja kanepi kasvupind Eestis aastatel 2022-2024, ühik: hektarit.....	38
Tabel 3.2 Tekstiiljäätmete teke aastatel 2018-2022 .....	39
Tabel 3.3 Tekstiilitööstuses tekkinud tekstiiljäätmed (t) aastatel 2018-2022 <sup>61</sup> .....	39
Tabel 3.4 Vesikondade pindalad.....	41
Tabel 3.5 Läti, Leedu ja Poola puidubilanssi väljavõte .....	43
Tabel 5.1 Aastate 2025-2050 hinnangulised keskmised väljatulekud puuliikide ja sortimentide kaupa (kuiva tonni aastas) .....	67
Tabel 5.2 Termokeemiliste tehnoloogiate tulevikupotentsiaali hindamine .....	75
Tabel 5.3 Kütte- ja paberipuidu 2025. aasta hinnastatistika, hinnanguline tihedus ja arvutuslik tonnihind .	80
Tabel 5.4 Sotsiaalmajanduslike mõjude analüüsis kasutatud tooted, põlvkond, turuhind ja väärimise määr .....	84
Tabel 5.5 Puidukulu marginaalid lõpptoote ja sisendi lõikes .....	85
Tabel 5.6 Puidukulu marginaali alusel kasumlike tootekategooriate hinnangulised sotsiaalmajanduslikud mõjud.....	86
Tabel 6.1 Puidukeemia ja biorafineerimise tehnoloogia suundadega seotud põhikompetentsid.....	92
Tabel 6.2 Puidukeemia ja biorafineerimise tehnoloogiate ja õppekavade kompetentside katvus .....	94
Tabel 6.3 Eesti metsa- ja puidutööstuse ja teaduse sektorite vahelist koostööd toetavad meetmed. ....	104
Tabel 7.1 Laborid või üksused Eesti ülikoolides, mis on seotud puidu keemilise või bioloogilise väärimisega: kontaktid ja lühikirjeldus. ....	109
Tabel 7.2 Puidu keemilise ja bioloogilise väärimise alast järelkasvu pakkuvad õppekavad TalTechis, TÜ-s kui ka EMÜ-s. ....	116
Tabel 8.1 Puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärimise tehnoloogiate kasutuselevõtu riskimaatriks .....	121

## JOONISED

Joonis 1.1 Paberpuidu hinnanguline raiemaht aastate ja puuliikide lõikes. ....	19
Joonis 1.2 Küttepuidu hinnanguline raiemaht aastate ja puuliikide lõikes. ....	19
Joonis 1.3 Saetööstusest saadav saepuru hinnanguline maht aastate ja puuliikide lõikes (m <sup>3</sup> aastas). ....	20
Joonis 1.4 Kooreta hakkpuidu hinnanguline raiemaht aastate ja puuliikide lõikes (m <sup>3</sup> aastas). ....	20
Joonis 1.5 Puidu keemiliseks väärimiseks sobilik hinnanguline ressurss aastate ja puuliikide lõikes ...	22
Joonis 2.1 Eesti metsamaa jagunemine omandivormide kaupa. ....	24
Joonis 2.2 Raiemahtude jagunemine omandivormide vahel 10 miljoni m <sup>3</sup> -lise aastase raiemahu korral. ....	25
Joonis 2.3 Hinnangulised raiemahud riigimaadelt puuliikide ja sortimentide kaupa aastatel 2025 kuni 2050 juhul kui raiemaht on 10 miljonit m <sup>3</sup> aastas. ....	26
Joonis 2.4 Hinnangulised raiemahud juriidiliste isikute omanduses olevatelt maadelt puuliikide ja sortimentide kaupa aastatel 2025 kuni 2050 juhul kui raiemaht on 10 miljonit m <sup>3</sup> aastas. ....	27
Joonis 2.5 Hinnangulised raiemahud füüsiliste isikute omanduses olevatelt maadelt puuliikide ja sortimentide kaupa aastatel 2025 kuni 2050 juhul kui raiemaht on 10 miljonit m <sup>3</sup> aastas. ....	28
Joonis 2.6 Hinnangulised raiemahud teiste omandivormidega maadelt puuliikide ja sortimentide kaupa aastatel 2025 kuni 2050 juhul kui raiemaht on 10 miljonit m <sup>3</sup> aastas. ....	29
Joonis 3.1 Likviidse puidu töötlemine .....	36
Joonis 3.2 Puidujäätmete korduskasutus aastatel 2004-2022 vastavalt Puidubilanss 2022 andmetele ...	37
Joonis 4.1 Mehaanilise puitmassi ja keemilise tselluloosi tootmine maailmas, mln t .....	48
Joonis 4.2 Paberi tootmine maailmas, mln t .....	48
Joonis 4.3 Printeri- ja kirjutuspaperi tootmine (ülal) eksport (all) mln t (Hinnangulised väärtused) .....	50
Joonis 4.4 Mehaanilise puidumassi, keemilise ja poolkeemilise tselluloosi tootmine globaalselt põhja regioonis, miljonit tonni .....	54
Joonis 4.5 UPM biorafineerimistehnoloogia, mis muudab puidu biokemikaalideks .....	60
Joonis 4.6 Puidu ja muu biomassist AVAP tehnoloogiaga suhkrute, ligniini, nanotselluloosi ja bioetanooli saamine ning etanoolist katalüütiliste protsesside abil SAF ja biodiisli valmistamine. ....	61
Joonis 4.7 Gaasfermentatsiooni tehnoloogia, mis koos eelneva puidu gasifitseerimisega võimaldab kogu puidu biomass väärimist. ....	64
Joonis 5.1 Skandinaavia tselluloosi- ja biotoodete tehaste pleegitatud kraft-tselluloosi toodangu ja selleks kasutatava toorme maht aastas. ....	69
Joonis 5.2 Toote väärtuse ja tootmismahu seos biotoodetes ja keemiatoodetes .....	76
Joonis 5.3 Puidu tonnihinna statistika 2015-2025 .....	81
Joonis 5.4 Energia lõppkasutus sektorite lõikes tööstuse kogukasutusest .....	83
Joonis 6.1 Sisseastunute (immatrikuleeritud) arv valitud õppekavadel Tallinna Tehnikaülikoolis (TalTech), Tartu Ülikoolis (TÜ) ja Eesti Maaülikoolis (EMÜ) aastatel 2020-2024 (andmed pärinevad ülikoolide poolt kogutud andmestikest). ....	98
Joonis 6.2 Nominaalajaga lõpetanute efektiivsus (%) valitud õppekavadel Tallinna Tehnikaülikoolis (TalTech), Tartu Ülikoolis (TÜ) ja Eesti Maaülikoolis (EMÜ) aastatel 2020-2024 2024 (andmed pärinevad ülikoolide poolt kogutud andmestikest). ....	99

Joonis 6.3 Puidutöötlemise, puittoodete ja mööblitootmise valdkonna ettevõtete jaoks olulised koolitusteemad.....	100
Joonis 6.4 Keemiatehnoloogia ja –protsesside valdkonna ettevõtete jaoks olulised koolitusteemad .....	101
Joonis 6.5 Metsa- ja puidutööstuse ettevõtete jaoks olulised koolitusteemad .....	102
Joonis 7.1 Laborid või üksused Eesti ülikoolides, mis on seotud puidu keemilise või bioloogilise väärindamisega: struktuur, seotus AS Metrosertiga.....	108
Joonis 8.1 Riskimaatriksi aluseks on kahe teguri – tõenäosuse ja mõju – hindamine kolmes astmes. Maatriks aitab määratleda, millised riskid vajavad enim tähelepanu ja millised on vähem kriitilised. ....	120
Joonis 8.2 Riskide tasemete järjestus 3x3 riskimaatriksi põhjal. ....	128
Joonis 8.3. Eesti bioressursside väärindamise strateegilised suunad.....	132

## SISSEJUHATUS

Eesti on metsarikas riik, kus mets katab üle poole maismaast. Metsade pindala ja tagavara on viimase sajandi jooksul märgatavalt kasvanud, eriti endiste põllumaade arvelt. Metsad omavad suurt looduslikku, sotsiaalset (sh kultuurilist) ja majanduslikku väärtust. Metsad on elupaigaks paljudele liikidele, need on avatud inimestele looduskülastuseks ning puit kui taastuv loodusvara on oluline toore puidutööstuses ja energeetikas.

Metsasektori väärtusahel hõlmab maakasutust ja suurt arvu metsa mitmekülgsest kasutavaid inimesi, sh metsaomanikke ja puidutööstuses hõivatuid. Samuti mõjutab metsandus elukeskkonda ja on seotud selliste valdkondadega nagu haridus ja teadus, innovatsioon, majandus, taastuvenergeetika, kultuuripärand, terviseedendus, loodusturism jm.<sup>1</sup>

Looduskaitsealuste metsade osakaal on 31,6 protsenti kogu metsamaast, sealhulgas on range kaitsega ehk majandustegevus täiesti keelatud 18,4 protsendil metsadest<sup>2</sup>. Üleeuroopalise Natura2000 võrgustiku aruandluse järgselt on Eesti ohustatud liikide kaitse edukuse poolest Euroopa Liidus kõrge kolmandal ja elupaikade kaitse edukuse poolest teisel kohal.<sup>3</sup>

Kogu metsa- ja puidusektoriga seotud hinnanguline kogulisandväärtus (sh otsene, kaudne, kaasnev) oli 2022. aastal ligi 3,6 miljardit eurot, mis moodustab ligikaudu 16% kogu Eestis loodavast lisandväärtusest. Kaudset ja kaasnevat mõju arvesse võttes panustas sektor 57 444 töökoha loomisesse, mis moodustas 12% kõikidest töökohtadest. Metsa- ja puidusektoril on oluline panus Kesk-Eesti ja Lõuna-Eesti tööhõives, kus see moodustas 15% regiooni tööhõivest. Metsa- ja puidusektori panusel loodi 1,15 miljardi euro väärtuses maksutulu (sh otsene, kaudne, kaasnev mõju).

Eesti puidu ja puittoodete toomise tööjõu tootlikkus on küll võrreldav Läti või Leeduga, kuid jääb Soome, Rootsi, Hollandi jt arenenud tööstusriikide vastavast näitajast kaks-kolm korda maha. Eesti biomajanduse märksa väiksem konkurentsivõime on suures osas seletatav Eesti eksporttoodete vähesema keerukusega võrreldes Põhjamaadega.<sup>4</sup>

Paberipuuna varutud puidust eksporditakse väärindamata kujul okas- ja lehtpuu puitu kokku 1,52 mln m<sup>3</sup> aastas. Lisaks ümarmaterjalile eksporditakse peamiselt puidugraanuleid (3 mln m<sup>3</sup>) puiduhaket (2,1 mln m<sup>3</sup>) ja küttepuitu (0,2 mln m<sup>3</sup>). Tegemist on materjaliga, mida oleks potentsiaalselt võimalik kasutada kodumaise keemilise ja mikrobioloogilise tootmise toormena<sup>5</sup>.

Puidu keemiline töötlemine on väikseim sektor metsa- ja puidusektorist, koosnedes 50-st ettevõttest, mis moodustab 1% kogu sektorist. Samal ajal toob keemiline töötlemine 5% sektori müügitulust, 3% ärikasumist ja 4% lisandväärtusest. Seega on Eestis tegutsevad keemilise töötlemise ettevõtted keskmiselt suuremad ning toodavad rohkem lisandväärtust töötaja kohta kui puidu mehaanilise töötlemise või mööblitootmise ettevõtted.<sup>6</sup>

Metsandusel on oluline roll kliimamuutuste leevendamisel ning metsade hea tervislik seisund on võtmetähtsusega süsiniku sidumisel ja häiringutele (nt tormid, põuad, kahjurid jt) vastupanuvõimes. Elujõulised metsad seovad süsinikku ja puittooted aitavad seda talletada. Eestis paberipuu ja puithakke töötlemata kujul eksport kajastub süsinikuarvestuses negatiivselt ning nende puidusortimentide kohapealse keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise võimekuse loomisel on oluline panus riigi

<sup>1</sup> Kliimaministeerium. Metsanduse arengukava aastani 2030 eelnõu. [Link](#)

<sup>2</sup> SMI, Keskkonnaagentuur, 2025

<sup>3</sup> State of nature in the EU, 2020. [Link](#)

<sup>4</sup> Milline on eesti bioMajandus aastal 2050?, Marek Tiits, Balti Uuringut Instituut & Erkki Karo, Tallinna Tehnikaülikool, 2021

<sup>5</sup> Puidubilanss. Ülevaade puidukasutuse mahust 2022. Koostanud Feliks Sirkas. Keskkonnaagentuur. 39 lk. [Link](#)

<sup>6</sup> Metsa- ja puidusektori sotsiaalmajanduslik mõju 2022. aastal, Ernst & Young Baltic, 2024

kliimaeesmärkide täitmisel. Kohaliku toorme väärindamine on oluline allikas majanduse konkurentsivõime ja üldise heaolu kasvatamiseks.

Sõltuvalt valitud tehnoloogiast on rajataval tootmisel vaja konkureerida turul eksisteerivate tootmiste või konkurentidega toorme ekspordriikides. Puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise tarbeks rajatavad tootmisüksused konkureerivad peamiselt Läänemere paberitööstuste ning teatud määral (olenevalt valitud tehnoloogiast) ka puitkütustena kasutatava või eksporditava toormega. Täiendav tootmine, mis väärindab kodumaist ning seni eksporditavat paberi- ja küttepuud, puiduhaket või pelletit tootmise sisendina on positiivne nii Eesti majandusele, valdkonna konkurentsivõimale kui kliimaeesmärkide täitmisele. Puidu keemilise töötlemise positiivne mõju avaldub ennekõike täiendava lisandväärtuse loomises, mis on suurem kui investeringukulu, ning samal ajal seotakse toodanguga teatud ajaks täiendav kogus süsinikku.<sup>7</sup>

Käesolev analüüs annab ülevaate Eestis kättesaadavast ressursist ning käsitleb erinevaid võimalusi ja kitsaskohti puidu ja muu biomassi täiendavaks keemiliseks ja mikrobioloogiliseks väärindamiseks.

---

<sup>7</sup> Maakasutuse, maakasutuse muutuse ja metsanduse sektori sidumisvõimekuse analüüs kuni aastani 2050 (Keskkonnaagentuur, Eesti Maaülikool, 2021).

# 1. EESTIS KÄTTESAADAV MEHAANILISEKS, MIKROBIOLOOGILISEKS JA KEEMILISEKS TÖÖTLUSEKS SOBIV PUIDURESSURSS AASTANI 2050

Selles peatükis kaardistatakse detailselt puiduressurss, mis on Eestis kättesaadav keemiliseks ja mikrobioloogiliseks töötluks kuni aastani 2050. Analüüsitakse erinevaid puiduliike, sortimente ja ka saetööstuse jääke.

Eestis on keemiliseks ja mikrobioloogiliseks väärimamiseks stabiilne toormeressurss. 10 miljoni m<sup>3</sup> aastase raiemahu juures on väärimamiseks sobivat puitu (paberi- ja küttepuit, saetööstuse jäägid) keskmiselt 5,48 miljonit m<sup>3</sup>, millele lisandub potentsiaalne ressurss raidmete ja kändude näol.

Toorme struktuur on mitmekesine. Ressurss koosneb nii okaspuust (mänd, kuusk) kui ka lehtpuust (kask, haab), millele lisanduvad väheväärtuslikumad liigid (hall-lepp) ja tööstusjäägid. See mitmekesisus võimaldab rakendada erinevaid väärimistehnoloogiaid.

Analüüsis kasutatud mudelid (nt sortimentide jaotus) põhinevad RMK andmetel, mistõttu võib erametsade puidu kvaliteet ja sortimentide väljatulek tegelikkuses erineda. Näiteks võib kasepalki olla rohkem ja paberipuitu vähem, kui mudel prognoosib.

Osas üks on kaardistatud mehaaniliseks, mikrobioloogiliseks ja keemiliseks töötluks sobiv puiduressurss (sh, ka potentsiaalselt imporditav maht) aastani 2050. Kogu arvutused on tehtud puuliikide ja puidu sortimentide kaupa. Arvestatud on ka looduskaitse ja muid piiranguid. Arvutused teostati kahte stsenaariumit kasutades – üks on ühtlase kasutuse lank, mis arvutati juba varasemate projektide käigus bioatlase koostamiseks (alapeatükk 1.1) ning teine arvutati täpsemalt aasta-aasta kaupa kuni 2050-nda aastani tingliku raiemahuga 10 mln m<sup>3</sup> aastas (alapeatükk 1.2). Vastavalt Metsa korraldamise juhendile arvutatakse ühtlase kasutuse lank jagades puuliigi kõigi puistute pindala keskmise lageraiet lubava vanusega, millele on lisatud 5 aastat. Lisaks toodi välja alapeatükis 1.3 saetööstusest ja teistest ettevõtetest tekkivate puidu keemiliseks väärimamiseks sobivate kõrvalsaaduste mahud.

Tegemist on teoreetiliste tellija poolt määratud raie stsenaariumitega, mille põhjal on arvutatud selle käigus turule toodavad puidu sortimendid omanike lõikes. Raietest on esindatud nii harvendus- kui uuendusraied, kättesaadavatele sortimentidele on lisatud raiete käigus tekkivad raidmed ja töötlemise käigus tekkivad ülejäägid.

**Mõlema stsenaariumi puhul on välja toodud mikrobioloogiliseks ja keemiliseks töötluks sobilik puiduressurss aastate 2025 – 2050 keskmistena. Ühtlase kasutuse stsenaariumi juures on selleks ligikaudu 6 mln m<sup>3</sup> ja 10 mln m<sup>3</sup> raiemahu stsenaariumi juures on selleks 6,8 (raidmete ja kändude potentsiaaliga koos 8,4) mln m<sup>3</sup>.**

## 1.1 METSAOLEMI HINDAMISE METOODIKA

Et hinnata sortimentide väljatulekuid, on vaja teada metsade olemit, st kui palju, millises vanuses, millise boniteediga, milliste puuliikidega ja milliste mõõtmetega metsi Eestis esineb. Selleks on tehtud erinevate projektide (1. Eesti Teadusagentuuri rakenduuringute toetusmeetme RITA ja Euroopa Regionaalarengu Fondist kaasrahastatava projekti „Lisandväärtuse tõstmine ja toorme tõhusam kasutamine biomajanduses ja selle sektorites” ja 2. Interreg-i projekt “Baltic ForBio”) jooksul metsade takseerikirjelduste koostamine kaugseire vahendeid kasutades. Lühike meetodika kirjeldus on järgmine:

Metsamask võeti Põhikaardi puittaimestiku kihist ja märgalade kihist puittaimestikuga alad (tulp PUIS\_T sisaldab väärtust „Jah“)<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Põhikaart. 2018. Maa-amet.

Metsamaskilt lahutatakse teed (põhikaardi joonte kiht, kus vastavalt laiuusele luuakse puhver ehk pinna kiht), kraavid (põhikaardi vooluvee joonte kiht, kus vastavalt laiuusele luuakse puhver ehk pinna kiht), raudtee (põhikaardi rööbasteede joonte kiht, millele tehti 6 m laiune puhver), elektriliinid (energijafirmade andmed, millele tekitatakse puhver vastavalt nimipingele) ning sihid (põhikaardi sihtide joonte kiht, millele tehti 4 m laiune puhver)<sup>8</sup>.

- a) Metsamask jagatakse 12,5x12,5 m suurusteks ruutudeks. Edasine analüüs on nende ruutude põhine.
- b) Puuliikide koosseisud võetakse proovitükkide andmeid, satelliidifotosid ja Eesti mullastiku<sup>9</sup> kaarti kasutades leitud puuliikide kaardilt<sup>10</sup>.
- c) Kõrgused ja tagavarad arvutatakse Tauri Arumäe Aerolidar<sup>11</sup> andmete järgi<sup>12,13</sup>.
- d) Metsa vanuse arvutamiseks kasutati Metsa korraldamise juhendis<sup>14</sup> esitatud H100 arvutamise valemit. Selle valemi sisenditeks on puuliik, vanus ja kõrgus ning väljundiks boniteet H100. Kuna puuliigid ja kõrgused on juba teada, siis selle valemiga vanuse arvutamiseks vajalik H100, mis leiti kahel viisil:
  - ✓ Metsaregistris olevate alade kohta võeti nii kasvukohatüüp kui H100 metsaregistrist<sup>15</sup>.
  - ✓ Väljaspool metsaregistrit asuvate metsade kohta saadi H100 ja kasvukohatüüp mullakaardi kaudu<sup>16</sup>. Selleks leiti esmalt Metsaregistris<sup>15</sup> olevate kasvukohatüüpide ja boniteedi (H100) vastavust mullatüüpidele ning seejärel seda vastavustabelit kasutades leiti kasvukohatüüp ja boniteet H100 ka väljaspool metsaregistrit asuvatele metsaaladele.
- a) Diameetri arvutamiseks kasutati regressioonivalemit, mis koostati Metsaregistri<sup>Error! Bookmark not defined.</sup> andmete järgi. Regressioonivalemi sisenditeks on puuliik, kasvukohatüüp, vanus, kõrgus ja H100.

Ülalkirjeldatud meetodikat kasutades saadi Eesti kõikide alade kohta takseerikirjeldused 12,5x12,5 m suuruste eraldistena. Metsaregistris<sup>Error! Bookmark not defined.</sup> olevate eraldiste kohta arvutati eraldise piiride sisse jäävate ruutude alusel igale eraldisele üks takseerikirjeldus. Väljaspool metsaregistrit olevate metsamaade puhul jäi eraldise suuruseks 12,5x12,5 m. Sellega oli kogu Eesti metsamaa kaetud Aerolidar lendude aegsete takseerandmetega, mis toimusid aastatel 2016 kuni 2018<sup>Error! Bookmark not defined.</sup>.

Lisaks arvutati igale eraldisele sortimentide väljatulekud ja küpsusvanused. Selleks loodi mudelid kasutades RMK harvesterandmeid aastatest 2011-2017<sup>17</sup>.

## 1.2 METSA ÜMARSORTIMENTIDE VÄLJATULEKU ARVUTAMINE AASTATEKS 2025 - 2050

Metsa ümarsortimentide väljatulekute arvutamiseks aastateks 2025 - 2050 kasutati kahte stsenaariumit - ühtlase kasutuse stsenaariumit ja 10 miljonit m<sup>3</sup> aastas raie stsenaariumit. Edaspidistes ressursi arvutustes on soovitatav kasutada alapeatükis 1.2.2 esitatud sortimentide koguseid. Alapeatükis 1.2.1 toodud kogused on informatiivsed ning näitavad, et pikaajalises perspektiivis tekib perioode, kus raie maht langeb alla 10 miljoni m<sup>3</sup> aastas.

<sup>9</sup> Mullastiku kaart. 2018. Maa-amet.

<sup>10</sup> Lang, M., Kaha, M., Laarmann, D., Sims, A. 2018. Construction of tree species composition map of Estonia using multispectral satellite images, soil map and a random forest algorithm. *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 68, 5–24

<sup>11</sup> Kõrgusandmed. 2018. Maa-amet.

<sup>12</sup> Arumäe, T., Lang, M. 2016. Aerolidarilt puistu tüvemahu hindamise mudelid ning võrdlus takseeritud tagavaraga ALS-based wood volume models of forest stands and comparison with forest inventory data. – *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 64, 5–16. ISSN 1406-9954.

<sup>13</sup> Lang, M., Arumäe, T., Anniste, J. 2012. Estimation of main forest inventory variables from spectral and airborne lidar data in Aegviidu test site, Estonia. – *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 56, 27–41. ISSN 1406-9954.

<sup>14</sup> Metsa korraldamise juhend. 2018. Keskkonnaministri määrus 2. Vastu võetud 16.01.2009. Redaktsioon 03.09.2018.

<sup>15</sup> Metsaregister. 2018. Keskkonnaamet.

<sup>16</sup> Mullastiku kaart. 2018. Maa-amet.

<sup>17</sup> Padari, A., Kangur, A. 2023. Validation of saw log and technological wood assortment recovery and reduction predictions based on cut-to-length harvester data. – *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 79, 66 - 89.

### 1.2.1 METSA ÜMARSORTIMENTIDE VÄLJATULEK ÜHTLASE KASUTUSE LANGI PUHUL

Ühtlase kasutuse stsenaariumi järgi toimus arvutuskäik alljärgnevalt:

- a) Arvutati kogu Eesti metsamaadele ühtlase kasutuse lank vastavalt Metsa korraldamise juhendis<sup>Error! Bookmark not defined.</sup> lisas 18 toodud valemitele. Saadi uuendusraie lankide pindalad, mis on igal aastal samad. Vastavalt küpsete metsade tagavaradele ja sortimentide väljatulekule arvutati uuendusraiate pindalade järgi sortimentide mahud (kolmas lõik).
- b) Metsade potentsiaalne sortimentide tootlikkus sõltub ka kaitseeržiimidest. Siinkohal kasutati looduskaitse alade kaardikihti (EELIS 2018)<sup>18</sup>, et jagada metsamaa kolme gruppi – 1) range kaitse all olevaks ehk mittemajandatavaks; 2) piirangutega metsamaaks või 2) majandatavaks kus on lubatud kõik metsamajandustegevused vastavalt metsaseadusele. Range kaitsega metsade puhul korrutati saadud tulemused 0-ga, piiranguga metsade puhul 0,5-ga ja majandatavate metsade puhul 1,0-ga.
- c) Arvutati kaitsekategooriate (range kaitsega, piiranguga ja majandatavad), boniteediklasside (Ia – V) ja enamuspuuliikide (MA, KU, KS, HB, LM, LV, SA, XX) kaupa küpsete metsade keskmised hektaritagavarad ning sortimentatsioon. Enamuspuuliikide kaupa oli küll eraldiste jagamine arvestuslankide arvutustesse, kuid iga eraldise kohta arvutati ka kaaspuuliikide sortimendid.
- d) Esimeses punktis leitud lankide pindalade ja kolmandas punktis saadud hektari tagavarade ja sortimentide väljatulekute korrumtamisel saadi aastate ja stsenaariumite kaupa uuendusraiate mahud ja sortimentide väljatulekud. Sortimentide väljatuleku arvutamisel oli okaspuu palkide minimaalseks läbimõõduks koore alt 14 cm ja lehtpuudel 16 cm. Peenpalkide minimaalne diameeter koore alt oli arvutustes okaspuudel 10 cm, lehtpuudel 12 cm. Ülemõõt 0,1 m arvutati maha jämedamast otsast. Palkide puhul on arvutatud seega kooreta ja ülemõõduta mahud.
- e) Harvendusraiate mahu leidmiseks kasutati eelmiste aastate harvendusraie mahtusid<sup>19</sup>. Aastatel 2007-2016 oli uuendusraiate maht kokku 65 930,1 tuhat m<sup>3</sup> ja hooldusraiate maht 15 645,6 tuhat m<sup>3</sup>. Seega harvendusraiate maht moodustas uuendusraiates 23,73%.
- f) Korrumtades uuendusraiate mahud eelmises punktis leitud osakaaluga (23,73%), saadi harvendusraiate mahud.
- g) Harvendusraiate sortimentide väljatulekute puhul kasutati harvendusraie ealiste metsade (metsad, mille keskmine diameeter on vähemalt 6 cm ning küpsemiseni on rohkem kui 10 aastat aega) keskmiseid sortimentide väljatulekuid. Arvutused tehti kaitsekategooriate (range kaitsega, piiranguga ja majandatavad), boniteediklasside (Ia – V) ja enamuspuuliikide (MA, KU, KS, HB, LM, LV, SA, XX) kaupa.

Ühtlase kasutuse järgi on igal aastal raiemaht sama ja ka sortimentidesse jagunemine on suhteliselt ühtlane. Eelpool kirjeldatud meetodikat kasutades saadi ühtlase kasutuse langi järgi sortimentide kooreta mahuks kokku 8,346 miljonit m<sup>3</sup> aastas. Metsa m<sup>3</sup>-tes, mida kajastatakse metsaregistris ja statistilise metsainventeerimise (SMI) andmetes (ehk puude mahud koos koorega alates juurekaelast kuni ladvatipuni) on ühtlase kasutuse langi suurus kokku 9,556 miljonit m<sup>3</sup> aastas. Ühtlase kasutuse langi järgi saadavad ümarsortimentide mahud on esitatud Tabel 1.1.

<sup>18</sup> EELIS. 2018. Eesti Loodus Infosüsteem. Digitaalsed kaardikihid. Keskkonnaagentuur. Alla laaditud 15.01.2018.

<sup>19</sup> Aastaraamat Mets 2019. 2020. Keskkonnaagentuur. ISSN (e-väljaanne): 2382-7068. 310 lk.

**Tabel 1.1 Ühtlase kasutuse langi järgi saadavad ümarsortimentide aastased mahud (m<sup>3</sup> aastas)**

Raieliik	Puuliik	Palk	Paberipuit	Küttepuit	Raidmed	Kännud	Jäätmed	
Uuendusraie	mänd	1 094 793	209 077	1 824 546	96 334	283 728	1 210 177	
	kuusk	926 558	150 428		87 958	214 768		
	kask	311 004	1 048 536		433 369			
	haab	78 659	796 451					
	sanglepp	151 668						
	teised	621 034						
Harvendusraie	mänd	213 707	55 423	348 517	12 887		1 210 177	
	kuusk	181 262	23 034		8 691			
	kask	3 056	208 212		175 385			
	haab	623	85 965					
	sanglepp	3 431						
	teised	9 998						
<b>Kokku</b>		<b>3 595 793</b>	<b>2 577 126</b>	<b>2 173 064</b>	<b>814 624</b>	<b>498 496</b>	<b>1 210 177</b>	

### 1.2.2 METSA ÜMARSORTIMENTIDE VÄLJATULEKUD AASTATEL 2025–2050 AASTASE RAIEMAHU 10 MILJONIT M<sup>3</sup> KORRAL

Analüüsis jäeti välja range kaitsega metsad ning piiranguvööndite metsad, kus uuendusraied on keelatud. Piiranguvööndite pindala, kus uuendusraied keelatud ja valikraied lubatud, on kokku 74 042 ha<sup>20</sup>. Samas peab arvestama, et see arvutus on tehtud kaitsevööndite kaupa, mis sisaldavad ka mittemetsamaid. Seega turberaieid lubavaid ja uuendusraieid keelavaid metsi on kogu metsamaast ca 3%. Samuti pole meil teadmisi, kuidas need metsad tulevikus puitu toota suudavad. Tänapäevased arvutused näitavad, et nendel aladel on puidu juurdekasv umbes 2 korda väiksem kui lageraiesüsteemis majandatavates metsades. Lisaks on probleem metsauuendusega – esineb katsealaid, kus noori puid ei ole tekkinud ning on ka katsealaid, kus neid on tekkinud. Kuna praegustes arvutustes pole neid alasid kaasatud, siis 10 miljonilise raiemahu arutustes langes uuendusraiatele veidi suurem koorem (umbes 2% suurem uuendusraie maht valikraiate asendusena), kuid ei mõjuta oluliselt ressursi jagunemist erinevate sortimentide vahel. Lisaks pole arvesse võetud metsamaid, mille kohta metsaregistris üldse andmed puuduvad (vananenud andmed jäid arvutustesse sisse). Need on metsad, mille omanikud pole siiani näidanud huvi metsade majandamise vastu ning eeldatavalt suur osa neist metsades ei majandata ka järgneva 25 aasta jooksul. Ka nende metsade välja jätmine ei mõjuta oluliselt sortimentide vahekorda 10 miljoni m<sup>3</sup> raiemahu sees.

Sellest tulenevalt teostati analüüs 1 668 371,8 ha metsamaa kohta. Statistilise metsainventeerimise (SMI) andmetel oli Eesti metsamaa pindala kokku 2 334 200 ha. Seega käesolevas analüüsis käsitleti 71,5% Eesti metsade pindalast - ülejäänud 28,5% metsamaast on range kaitse all ja/või lubatud vaid valikraied ja/või puuduvad andmed metsaregistris.

Teise stsenaariumi (10 miljonit m<sup>3</sup> aastas) arvutuskäik toimus keerulisemalt ja põhines iga aasta kohta raielankide leidmisel ning metsaandmete kasvatamisel. Kogu arvutus toimus eraldiste põhiselt arvestades eraldisel kasvavaid puuliike ja nende takseerandmeid:

- Kasvatati andmed 2025-ndasse aastasse arvestusega, et raiemaht oli igal aastal 11 miljonit m<sup>3</sup>. Lageraieid teostati 8,9 ja harvendusraieid 2,1 miljoni m<sup>3</sup> ulatuses. Alates 2025-ndast aastast arvestati raiemahuga 10 miljonit m<sup>3</sup> aastas.

<sup>20</sup> EELIS. 2024. Eesti Loodus Infosüsteem. Digitaalsed kaardikihid. Keskkonnaagentuur. Alla laaditud 20.04.2024.

- b) Metsa kasvatamisel kasutati valemite komplekti. Kasutati Eesti andmetel koostatud rinnaspindala täisjuurdekasvu mudelid<sup>21</sup>. Viidatud allika lisas 19 on kirjeldatud valemite kasutamine ning rinnaspindala kõrguse juurdekasvu kaudu tagavara juurdekasvu leidmine.
- c) Igal aastal vähendati puude arvu loodusliku väljalangemise võrra (0,3 % aastas).
- d) Puude arvu ja kasvatatud rinnaspindala kaudu arvutati uus puistu diameeter.
- e) Pärast eraldistel olevate puistuelementide andmete kasvatamist arvutati kaalutud keskmine vanus ja kaalutud keskmine küpsusvanus vastavalt "Metsa majandamise eeskirjale"<sup>22</sup>. Need eraldised, mille kaalutud keskmine küpsusvanus osutus väiksemaks kui metsa kaalutud keskmine märgiti küpseks.
- f) Lisaks määrati küpseks need eraldised, mille diameeter ületas eeskirjas<sup>22</sup> uuendusraiet lubavat diameetrit.
- g) Harvendusraie puhul leiti eraldised, mille tihedus vastab harvendusraie eelsele tihedusele<sup>23,24</sup>. Harvendusraie mahu leidmiseks kasutati raiejärgset metsa hõredust samadest allikatest.
- h) Alates 2025.ndast aastast jagati raiemaht (10 miljonit m<sup>3</sup> aastas) harvendus- ja lageraie vahel vastavalt metsade seisundile. Harvendusraie maht ei ületanud ühelgi aastal 2 miljonit m<sup>3</sup>. Ülejäänud maht (8 või rohkem m<sup>3</sup>) täitmiseks valiti langid enamupuuliikide kaupa vastavalt küpsete metsade pindalale ehk raiemaht jagati proportsionaalselt enamupuuliikide kaupa. Esmalt valiti raiesse need eraldised, mille küpsemisest on möödunud rohkem aastaid.
- i) Uuendusraietesse ja harvendusraietesse valitud eraldistel teostati sortimentide väljatuleku arvutused. Arvutused teostati puuliikide kaupa arvestades keskmist kõrgust, keskmist diameetrit, vanust ja boniteeti (H100). Palkide minimaalsed diameetrid koore alt valiti okaspuudel 10 cm, kaskedel 12 cm ning teistel puuliikidel 16 cm. Paberipuidu minimaalse diameetrina kasutati 5 cm ning küttepuidul 3 cm. Keskmine sortimentide väljatulek metsa tagavarast tuli 90%, ülejäänud 10% moodustavad känd, koor, saeteed ja latv. Sortimentide väljatuleku arvutamiseks kasutati mudelid, mille loomiseks kasutati RMK harvesterite andmeid aastatest 2011-2017<sup>17</sup>.

Analüüsi tulemusena saadi puidu sortimendid aastate kaupa kui raiemaht oleks 10 miljonit m<sup>3</sup> aastas. Keskmine sortimentide omavaheline osakaal on toodud Tabel 1.1. Koondtulemused puuliikide kaupa aastate lõikes on esitatud Joonis 1.1 ja Joonis 1.2. Joonis 1.1 on paberipuidu hinnanguline maht ja Joonis 1.2 küttepuidu hinnanguline maht. Tabel 1.1 toodud sortimentide väljatuleku osakaalud näitavad, et okaspuu palkide väljatulek on väga suur, kase palkide väljatulek väga väike ja halli lepa palkide väljatulek samuti üsna suur.

Okaspuu palkide suur väljatulek ei pruugi erametsades olla nii suur kui arvutused näitavad. See tuleneb riigimetsa ja erametsa erinevast olemisest ja kvaliteedist, aga sortimentide mudel on loodud RMK andmete järgi.

Kase palkide väike osakaal ja paberipuidu suur osakaal tuleneb samuti RMK andmete järgi loodud mudelitest kuid andmed olid kogutud 2011-2017 aastal. Viimasel ajal on kase vineeripaku (palgi) minimaalset diameetrit ja kvaliteedinõudeid tugevasti langetatud. 2022. aastal tehti väike analüüs RMK 20 langi kohta, kus oli palkide osakaal raiemahust 48,2% kõikide sortimentide summaarsest mahust. Seega eksperthinnangu järgi võib kase palgi tegelik väljatulek olla 48% ja paberipuidul 37%.

<sup>21</sup> Padari, A., Kiviste, A., Laarmann, D., Kangur, A. 2023. The model of stand basal area gross growth on the data of the Estonian Network of Forest Research Plots. – *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 78, 91–142, ISSN 1406-9954.

<sup>22</sup> Metsa majandamise eeskiri. 2021. Keskkonnaministri määrus 88. Vastu võetud 27.12.2006. Redaktsioon 09.04.2021.

<sup>23</sup> Korjus, H., Padari, A. 1994. Hõreduse piir Soome ja Rootsi hooldusraiete normatiivides. *EPMÜ Teadustööde kogumik* Nr. 173. Tartu: 35-49.

<sup>24</sup> Korjus, H. 1999. Hooldusraiete mudelitest. *EPMÜ Metsandusteaduskonna toimetised* nr. 32. Pidev metsakorraldus. Tartu: 44-49.

**Tabel 1.1 Ümarsortimentide protsentuaalne vahekord puuliikide kaupa 2025 aasta arvutuste põhjal**

Puuliik	Palk	Paberipuit	Küttepuit	Kokku
Haab	5	78	17	100
Kask	29	56	15	100
Kuusk	73	14	13	100
Sanglepp	20		80	100
Hall-lepp	48		52	100
Mänd	79	17	4	100
Teised	28		72	100
<b>Keskmiselt</b>	<b>45</b>	<b>33</b>	<b>22</b>	<b>100</b>

Sanglepa ja hall-lepa palkide väljatuleku suur erinevus võib tulla sellest, et RMK on hall-lepikuid raiunud nooremas eas kui puudel ei ole tekkinud veel punasüdamikku.

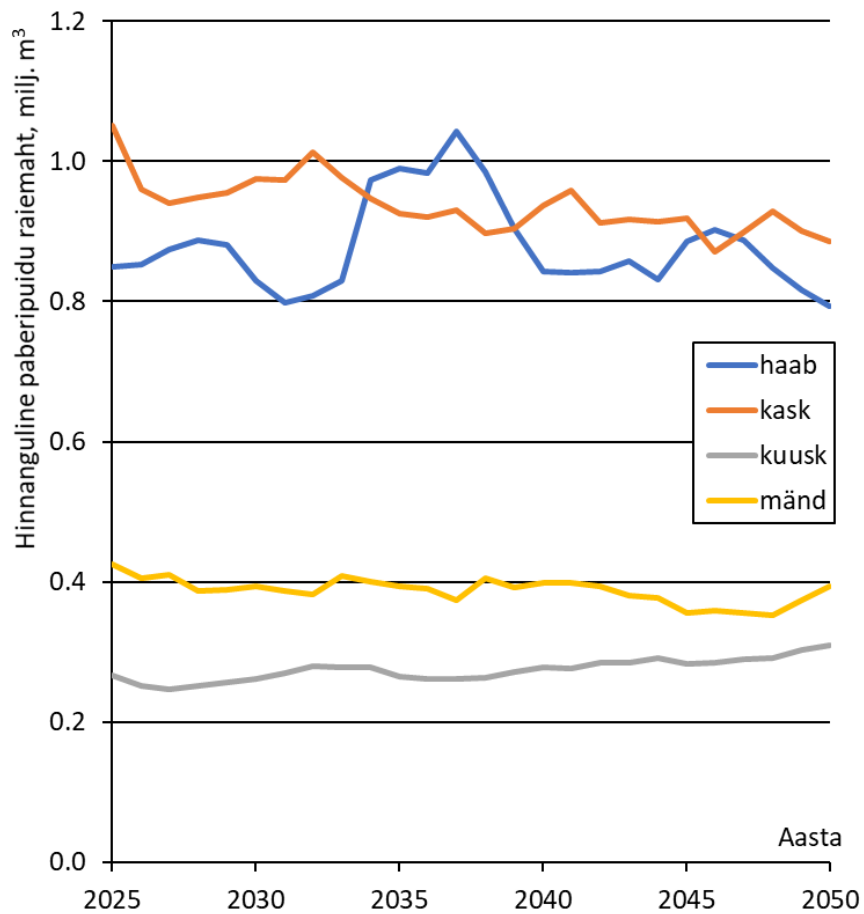
Paljudel lankidel, eriti seal kus hall-lepp esineb kõrvalpuuliigina, ei eraldata palke ning kogu materjal satub küttepuidu hulka. Antud mudelit kasutades on palgid igalt poolt välja eraldatud.

### **1.3 PUIDU KEEMILISE VÄÄRINDAMISEKS SOBILIKUD SORTIMENDID SAETÖÖSTUSEST JA TEISTEST ALLIKATEST**

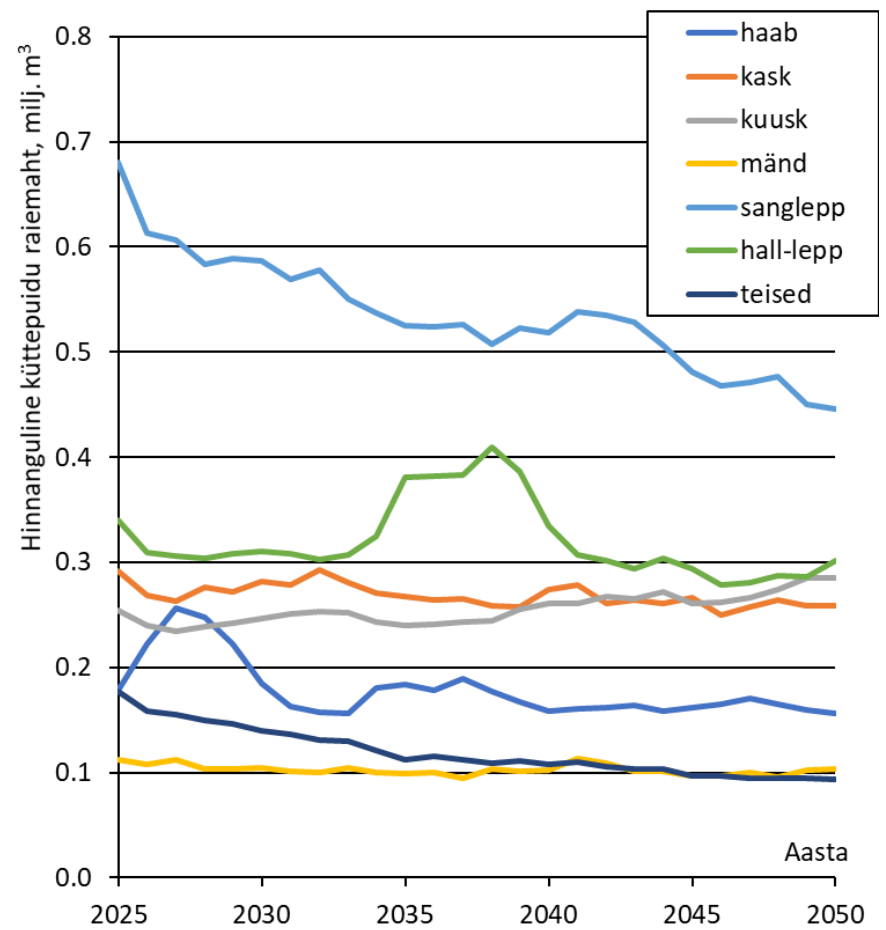
Alapeatükis 1.2.1 arvatud palkide väljatulekute järgi on võimalik arvutada välja ka saetööstusest tekkiva saepuru ja hakkpuidu mahud. Samuti on võimalik välja arvutada koore maht, mis siiani leiab kasutust saetööstuse oma tarbeks energia tootmises. Laudade ja prusside väljatulek saetööstuses sõltub palgi läbimõõdust ja kvaliteedist. Keskmiselt on laudade ja prusside väljatulek palkidest ca 55%. Puidubilansi<sup>25</sup> järgi tootis saetööstus 2022. aastal 1 700 tuhat m<sup>3</sup> saematerjali ja 2 154 m<sup>3</sup> hakkpuitu koos saepuruga. Selle järgi on saematerjali keskmine väljatulek 44,11%. Saepuru maht on palgi mahust keskmiselt ca 10%. Seega kooreta hakkpuidu maht on 45,89%. Palkidest saadav saepuru ja hakkpuidu hinnangulised kogused aastate ja puuliikide kaupa on vastavalt Joonis 1.3 ja Joonis 1.4.

Lisaks metsast saadud toorainele on puitu saadud korduskasutuse näol ning mittemetsamaalt. Korduskasutust on puidubilansi<sup>25</sup> järgi kokku 303 000 m<sup>3</sup>, millest 71 000 m<sup>3</sup> on ehitus- ja lammutusjätmed, 82 000 m<sup>3</sup> pakendijätmed ning 150 000 m<sup>3</sup> muud puidujätmed ning lisaks mittemetsamaalt on arvestuslik raiutud puidu kogus 800 000 m<sup>3</sup>.

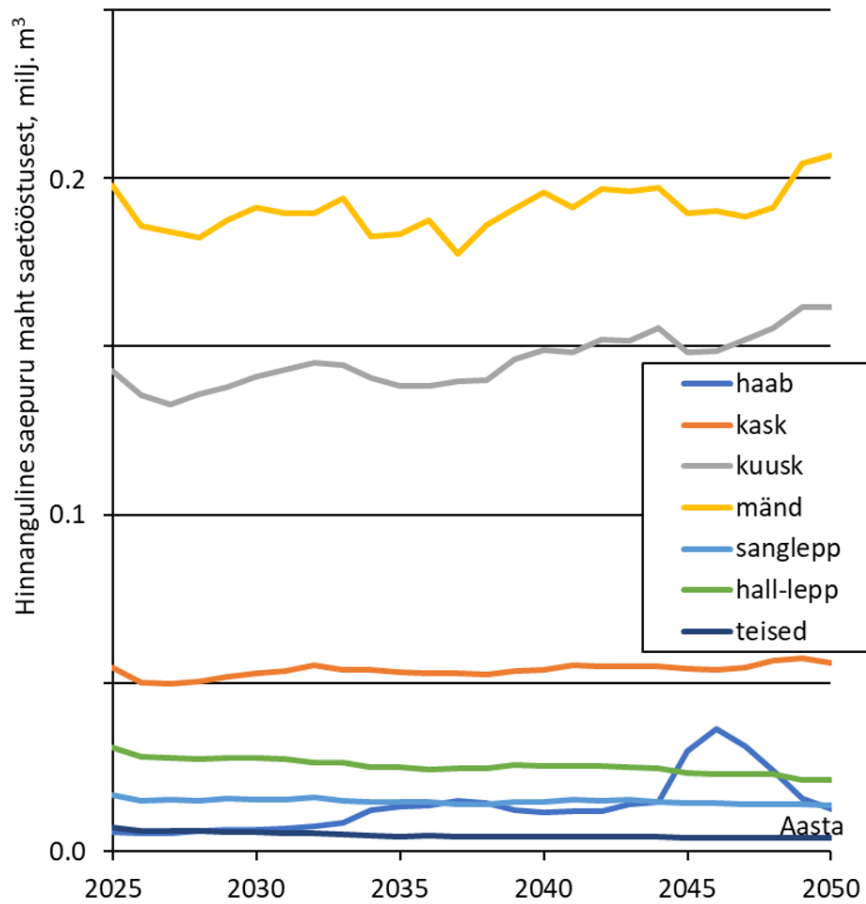
<sup>25</sup> Puidubilanss. Ülevaade puidukasutuse mahust 2022. aastal. 2024. Koostanud Feliks Sirkas. Keskkonnaagentuur. 44 lk.



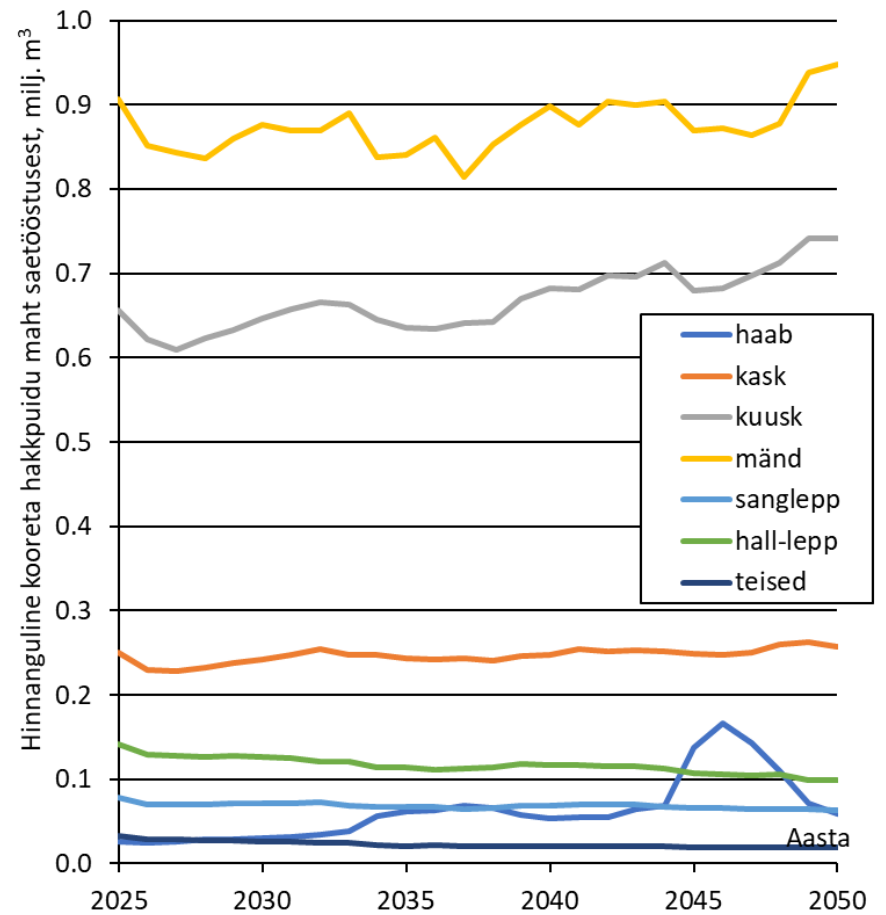
Joonis 1.1 Paberipuidu hinnanguline raiemaht aastate ja puuliikide lõikes.



Joonis 1.2 Küttepuidu hinnanguline raiemaht aastate ja puuliikide lõikes.



Joonis 1.3 Saetööstusest saadav saepuru hinnanguline maht aastate ja puuliikide lõikes (m<sup>3</sup> aastas).



Joonis 1.4 Kooreta hakkpuidu hinnanguline raiemaht aastate ja puuliikide lõikes (m<sup>3</sup> aastas).

## 1.4 KOKKUVÕTE

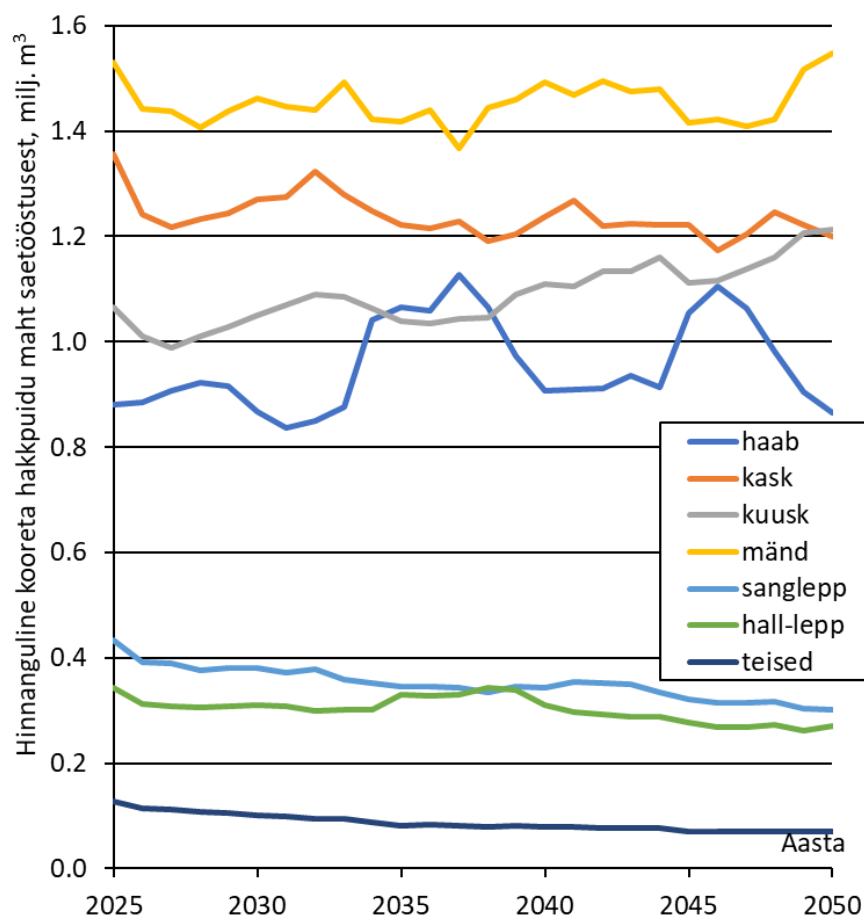
Teise raiestsenaariumi põhjal koostatud aastate 2025-2050 kohta tehtud ressursi analüüsis kasutati raiemahuna 10 miljonit m<sup>3</sup> aastas ning sortimenteerimisel kasutati RMK harvesteri 2011-2017 aasta andmete järgi loodud mudelit. Aastate keskmine hinnanguline väljatulek puuliikide ja sortimentide lõikes on toodud Tabel 1.2. Kui on arvutusi tarvis teha teiste raiemahtude kohta, siis saab seda teha tabelis 1.3 toodud sortimentide proportsioone kasutades.

**Tabel 1.2 Aastate 2025-2050 hinnangulised keskmised väljatulekud puuliikide ja sortimentide kaupa (m<sup>3</sup> aastas)**

Sortiment	Puuliik							Kokku
	haab	kask	kuusk	sanglepp	hall-lepp	mänd	teised	
Paberipuit	878 425	936 950	274 797			387 917		2 478 088
Küttepuit	178 796	268 636	255 459	535 355	320 404	102 582	119 451	1 780 684
Saepuru saetööstusest	13 672	53 842	145 587	14 947	25 439	190 635	4 936	449 057
Hakkpuit saetööstusest	62 739	247 082	668 099	68 591	116 737	874 824	22 651	2 060 723
Raidmed (potentsiaalne)	165 214	156 826	188 486	69 855	67 873	206 975	17 013	872 242
Kännud (potentsiaalne)			283 728			214 768		498 496
<b>Kokku</b>	<b>1 298 846</b>	<b>1 663 336</b>	<b>1 816 156</b>	<b>688 749</b>	<b>530 453</b>	<b>1 977 700</b>	<b>164 050</b>	<b>8 139 291</b>

Tabel 1.2 toodud andmete puhul tuleb arvestada järgmiste aspektidega:

- Okaspuu palkide väljatulek ei pruugi erametsades olla nii kõrge osakaaluga kui RMK metsades. Seega erametsade arvelt võib kuuse ja männi paberipuidu kogus olla suurem ning saepuru ja hakkpuidu saadavus saetööstusest väiksem kui tabelis toodud.
- Kase palkide osakaal võib olla tänu vineeripaku minimaalse diameetri alanemise ja kvaliteedinõuete alandamisele olla kuni arvutuste järgi saadud 29% asemel kuni 48%. Seega kase hakkpuidu osakaal võib olla suurem, aga paberipuidu osakaal võib olla arvatud 56% asemel isegi 37%.
- Hall-lepa palkide osakaal osutus suhteliselt suureks. Ilmselt on hall-lepa küttepuidu osakaal tunduvalt suurem kui tabelis toodud.
- Kändude hulka on arvatud okaspuu kändude kogused uuendusraietelt kui potentsiaal ehk neid on seni praktikas kogutud väga marginaalsetes mahtudes tulenevalt madalast tasuvusest ja pinnase kahjustamise piirangutest.



**Joonis 1.5 Puidu keemiliseks väärindamiseks sobilik hinnanguline ressurss aastate ja puuliikide lõikes**

Puidubilansi<sup>25</sup> järgi oli 2022 aastal raiemaht 12,077 miljonit m<sup>3</sup>, millest likviidne osa on 11,094 miljonit m<sup>3</sup> ja millele lisanduvad raidmed 0,830 miljonit m<sup>3</sup> ja kokku seega varutud kogus 11,924 miljonit m<sup>3</sup>. Puidubilansi<sup>25</sup> järgi oli sortimentidest 42,73% palgid, 24,6% paberipuit ja 32,7% küttepuit. Tabel 1.1 järgi on käesoleva töö arvutuste järgi hinnanguline palkide osakaal 45%, paberipuidul 33% ja küttepuidul 22%. Puidubilansiga võrreldes on antud töös palkide osakaal 2,3% ja paberipuidu osakaal 8,4% võrra suurem ning küttepuidu osakaal 10,7% võrra väiksem.

Eelnevaid andmeid kokku võttes saab arvutada hinnangulise keemiatööstusele sobiliku puiduressursi mahu. Hinnangu saamiseks arvutati kokku paberipuidu, saetööstuse jäägid (saepuru ning kooreta hakke) ja 50% halli lepa, sanglepa ja muude puiduliikide küttepuidust, mida on meie hinnangul võimalik koorida. Tulemused on toodud Joonis 1.5 Puidu keemiliseks väärindamiseks sobilik hinnanguline ressurss aastate ja puuliikide lõikes. Aasta kohta keskmiselt on paberipuidu, saetööstuse jääkide ja osa küttepuidu kogusest kokku 5,48 miljonit m<sup>3</sup>.

Korduskasutust on puidubilansi<sup>25</sup> järgi kokku 303 000 m<sup>3</sup>, millest 71 000 m<sup>3</sup> on ehitus- ja lammutusjätmed, 82 000 m<sup>3</sup> pakendijätmed ning 150 000 m<sup>3</sup> muud puidujätmed ning lisaks on arvestatud mittemetsamaalt raiutud puidu koguseks 800 000 m<sup>3</sup>. Selles lõigus nimetatud kogused olid 2022 aasta puidubilansi järgi energiapuit.

## 2. PUIDURESSURSI KÄTTESAADAVUS

Peatükk analüüsib, kuidas puiduressurss jaguneb erinevate omanikegruppide vahel ja milline on nende potentsiaalne panus turule.

Raiemaht jaguneb riigi ja erasektori vahel ligikaudu pooleks. See tähendab, et stabiilse toorainevoo tagamiseks on vaja arvestada mõlema sektori käitumisega.

Toorme liikide kättesaadavus sõltub omanikust. Riigimetsades domineerib okaspuu, erametsades aga lehtpuu. See on kriitilise tähtsusega teave, kuna paljud uued (teise põlvkonna) väärindamistehnoloogiad on suunatud just lehtpuule.

Väikemetsaomanike majandamisaktiivsus on oluline, kuid ebakindel tegur. Kuigi analüüs eeldab stabiilset raieaktiivsust, võib füüsilisest isikust omanike passiivsus vähendada turule jõudva puidu kogust.

Käesolevas peatükis on alapeatükides 1.2 ja 1.3 hinnatud puiduressursi kättesaadavust arvestades metsaomanike struktuuri. Analüüsil jagati omanikud nelja gruppi: riigiomand, juriidiliste isikute omand, füüsiliste isikute omand ja kõik ülejäänud. Omanike struktuuri on vaja arvestada seetõttu, et omanike käitumine on erinev. Kuna riigimetsa (RMK) majandatakse vastavalt ministri määrustele, siis selle majandamine sõltub suuresti poliitilistest ostustest. Juriidilisest isikust metsaomanikest valdav enamus on suuromanikud, kes kasvatavad metsi tulu teenimise eesmärgil ning seega võib eeldada, et juriidiliste isikute metsade majandamine on intensiivsem kui füüsilisest isikutest väikemetsaomanike metsade majandamine.

Metsamaa jaotumiseks omandivormide vahel kasutati maakatastri kihti<sup>26</sup> ja põhikaardi<sup>27</sup> puittaimestiku ning märgalade kihti. Märgalade kihilt kasutati vaid seda osa kus asusid metsad. Omandivormide vahel metsamaa jagunemine on esitatud Tabel 2.1 Metsamaa jagunemine omandivormide vahel ja Joonis 2.1.

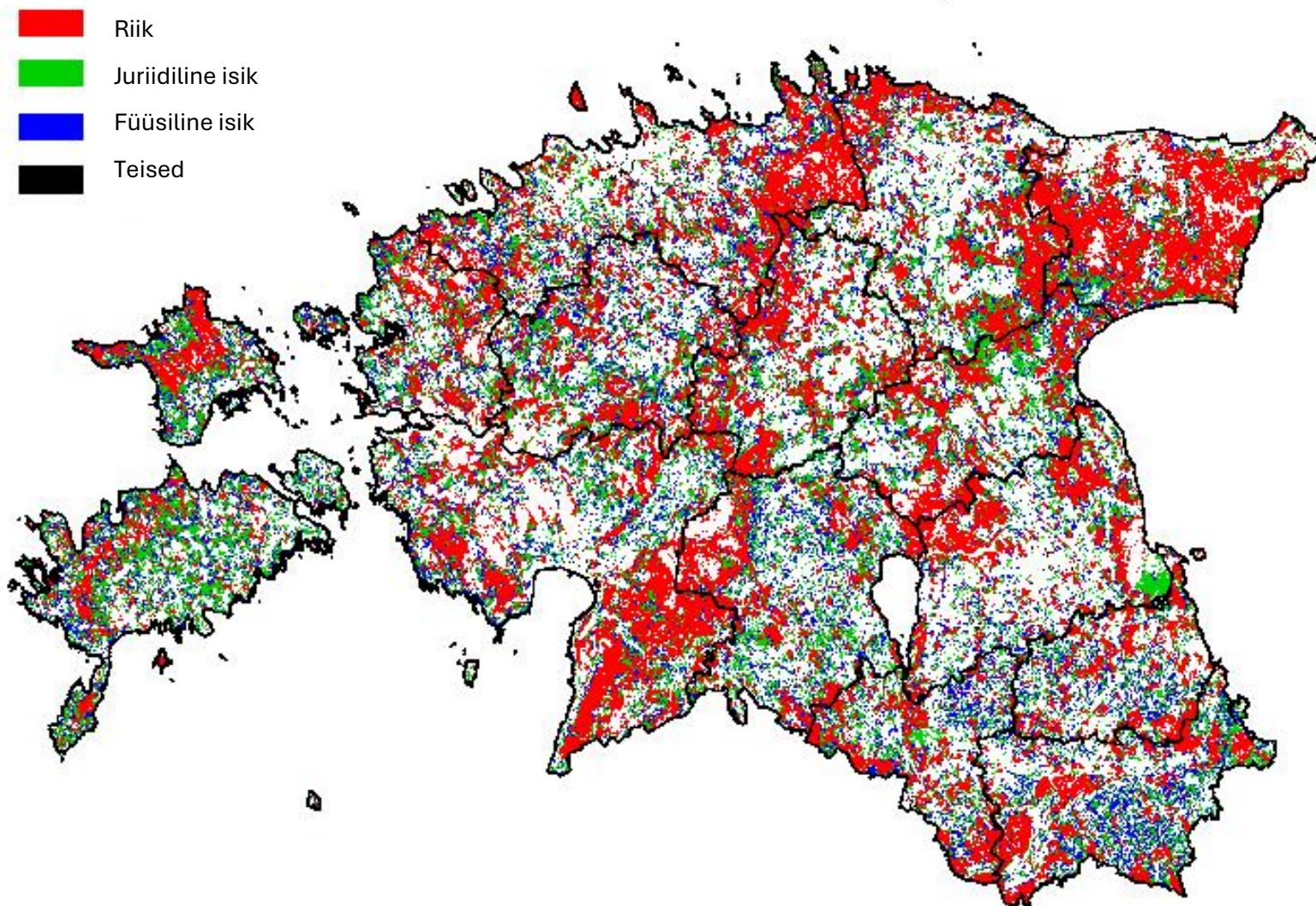
Tabel 2.1 Metsamaa jagunemine omandivormide vahel

Omand	Pindala, ha	Pindala osakaal, %
Riigiomand	1 185 654	50,79
Juriidilise eraisiku omand	663 287	28,42
Füüsilise eraisiku omand	465 525	19,94
Munitsipaalomand	14 989	0,64
Avalik-õiguslik omand	2 309	0,10
Omandi ulatus selgitamisel	1 428	0,06
Segaomand	631	0,03
Puudub	347	0,01
Kinnistamata eraomand	30	0,00
Kokku	2 334 200	100

Eelmises peatükis arvatud raiemahtude põhjal arvutati selle jagunemine omandivormide vahel. Raiemahtude analüüsi tulemusel on suurim puidukasvataja ja tootja riik. Joonis 2.2 on toodud omandivormide kaupa raiemahud aastatel 2025 kuni 2050. Eraomanike aastased raiemahud on 10 miljonilise raiestsenariumi järgi keskmiselt 5 miljoni m<sup>3</sup> juures, mis juriidiliste ja füüsiliste omanike vahel jaguneb peaaegu pooleks. Riigimaade orienteeruv raiemaht jääb keskmiselt veidi alla 5 miljoni m<sup>3</sup> aastas. Keskmiselt jagunevad protsentuaalselt riigiomanduses olevate metsade hinnangulised raiemahud võrrelduna erametsade hinnanguliste raiemahtudega vastavalt 48,6% - 51,4%.

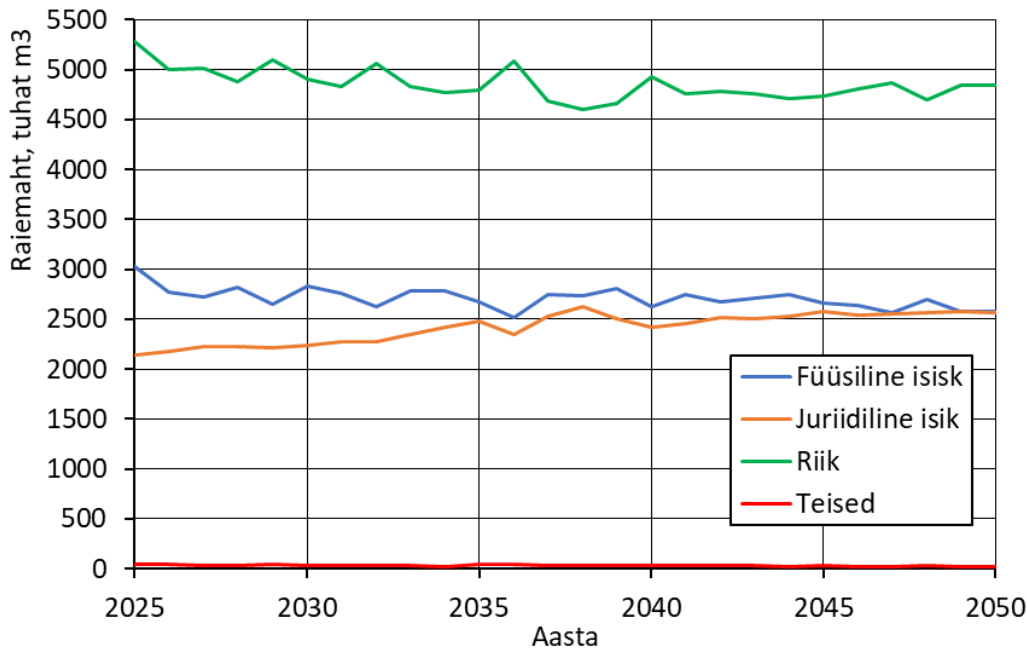
<sup>26</sup> Katastriüksuste piirid. 2025. Maa- ja Ruumiamet. 24.04.2025.

<sup>27</sup> Põhikaart. 2025. Maa- ja Ruumiamet. 24.04.2025.



Joonis 2.1 Eesti metsamaa jagunemine omandivormide kaupa.

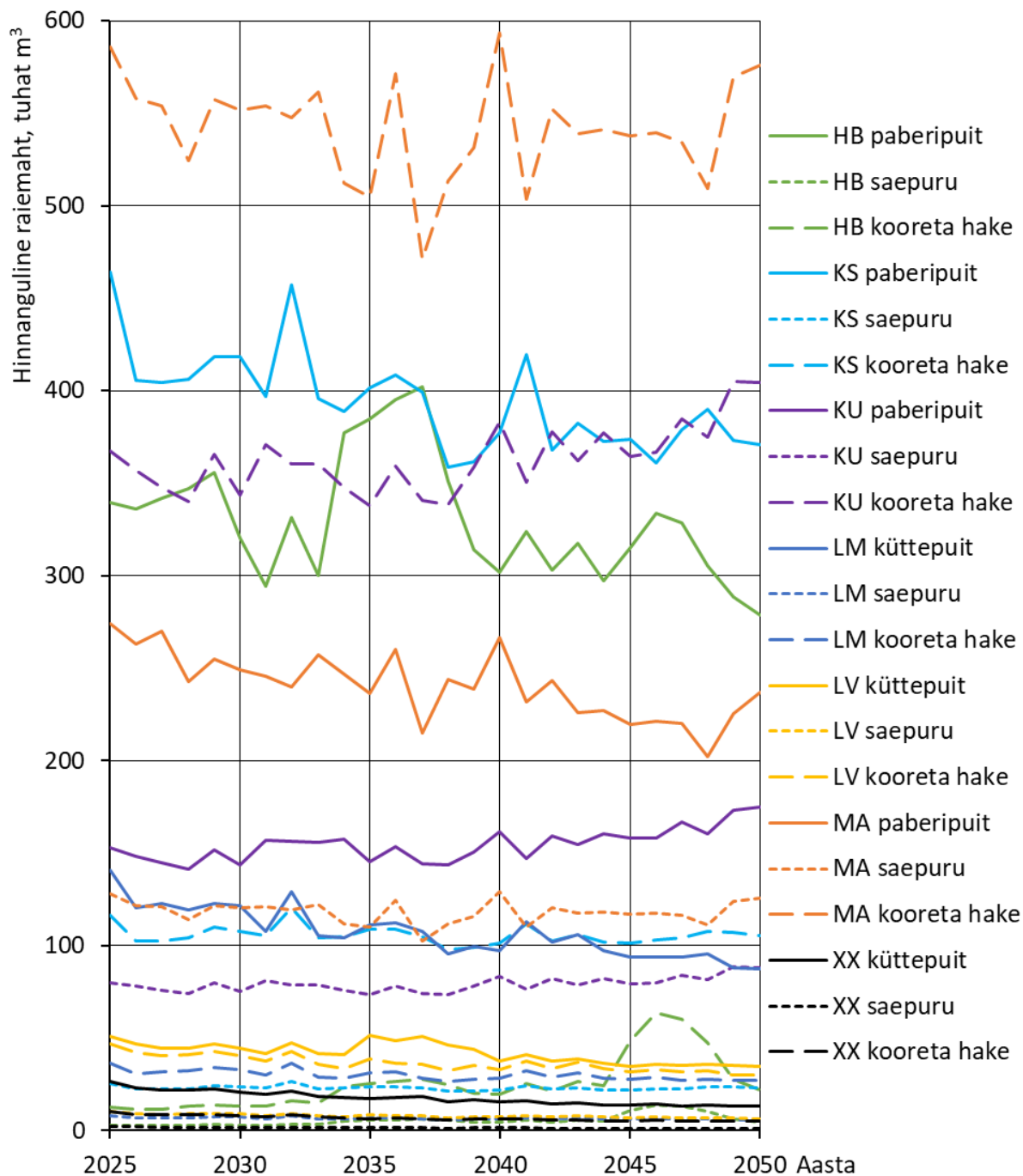
Sortimentide ja puuliikide kaupa on aastate 2025 kuni 2050 raietelt saadavad kogused Joonis 2.3 kuni Joonis 2.6. Joonis 2.3 on esitatud riigiomandis olevatest metsadest saadavad hinnangulised raiemahud, joonistel Joonis 2.4 Joonis 2.6 on sama vastavalt juriidiliste isikute, füüsiliste isikute ja teiste omandivormide omandis olevatelt metsamaadelt. Joonistel esitatud mahud on arvatud analoogselt nagu Tabel 1.2. Seega on seal toodud haava, kase, kuuse ja männi puhul paberipuit ning välja on jäetud küttepuit. Sanglepa, hall-lepa ja muude (va kask, haab ja lepad) lehtpuuliikide puhul on toodud 50% küttepuidu kogustest, mis on sobilikud puidu keemiliseks väärandamiseks. Saetööstusest tulevad hinnangulised kogused on kõikide puuliikide puhul kaasatud.



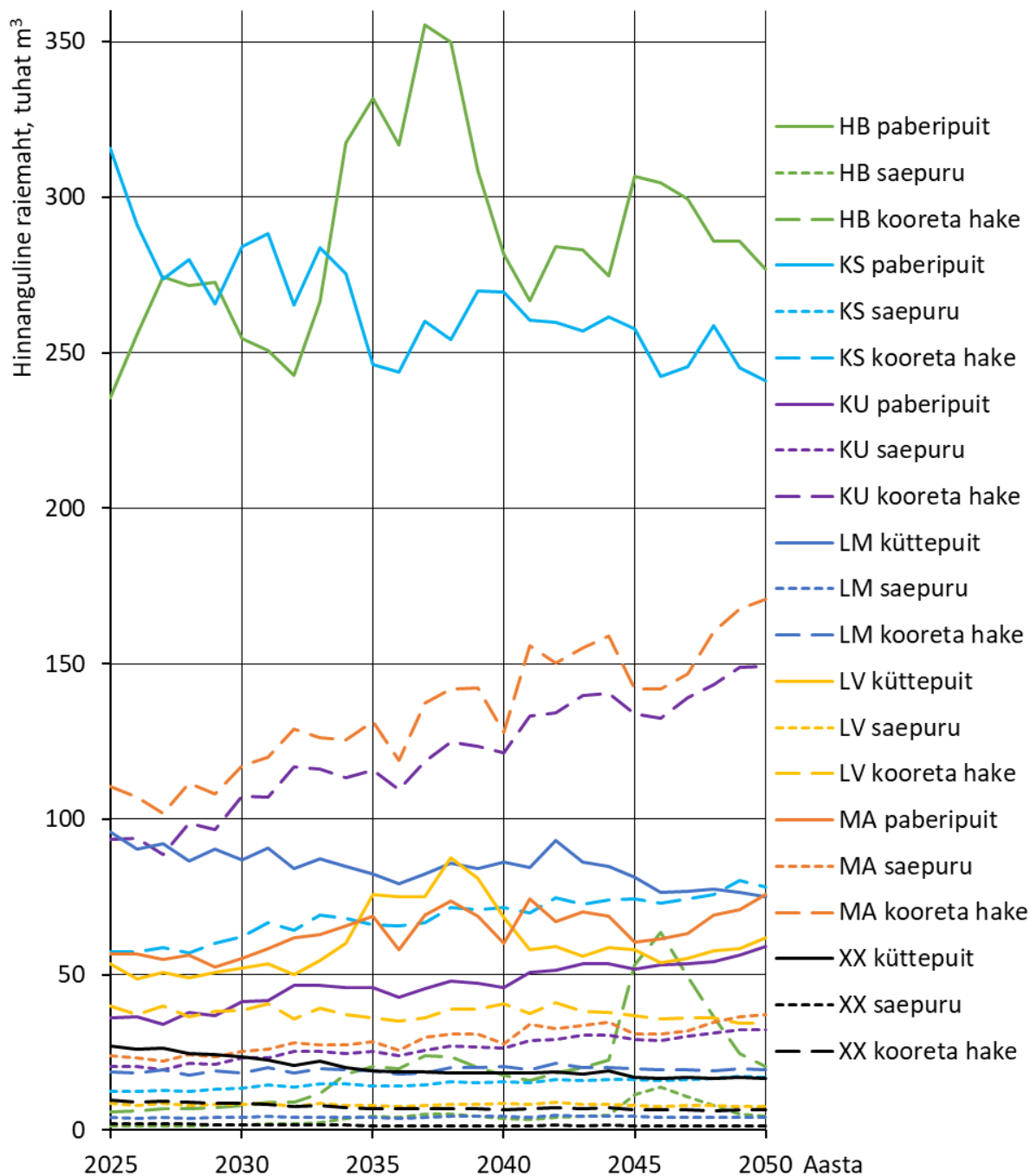
**Joonis 2.2 Raiemahtude jagunemine omandivormide vahel 10 miljoni m<sup>3</sup>-lise aastase raiemahu korral.**

Nagu joonistelt Joonis 2.3 kuni Joonis 2.6 ja tabelites 2.2 kuni 2.4 näha, on okaspuu puitu saadaval riigimetsas tunduvalt rohkem kui erametsades. Samas lehtpuu puitu on tulemas tunduvalt rohkem erametsadest. Peale riigi- ning erametsade on teiste omandivormide hinnanguline tootlus marginaalne. Tabelitesse 2.2 kuni 2.4 on lisatud ka haava, kase, kuuse ja männi küttepuidust 50% nagu teiste lehtpuude puhulgi. Seda seetõttu, et keemiatööstuse tooraineks sobib ka selline puit, mida saab koorida, aga millel on mädanikku rohkem kui paberipuidul. Sama ka metsakuiva materjali kohta, mis paberipuiduks ei sobi.

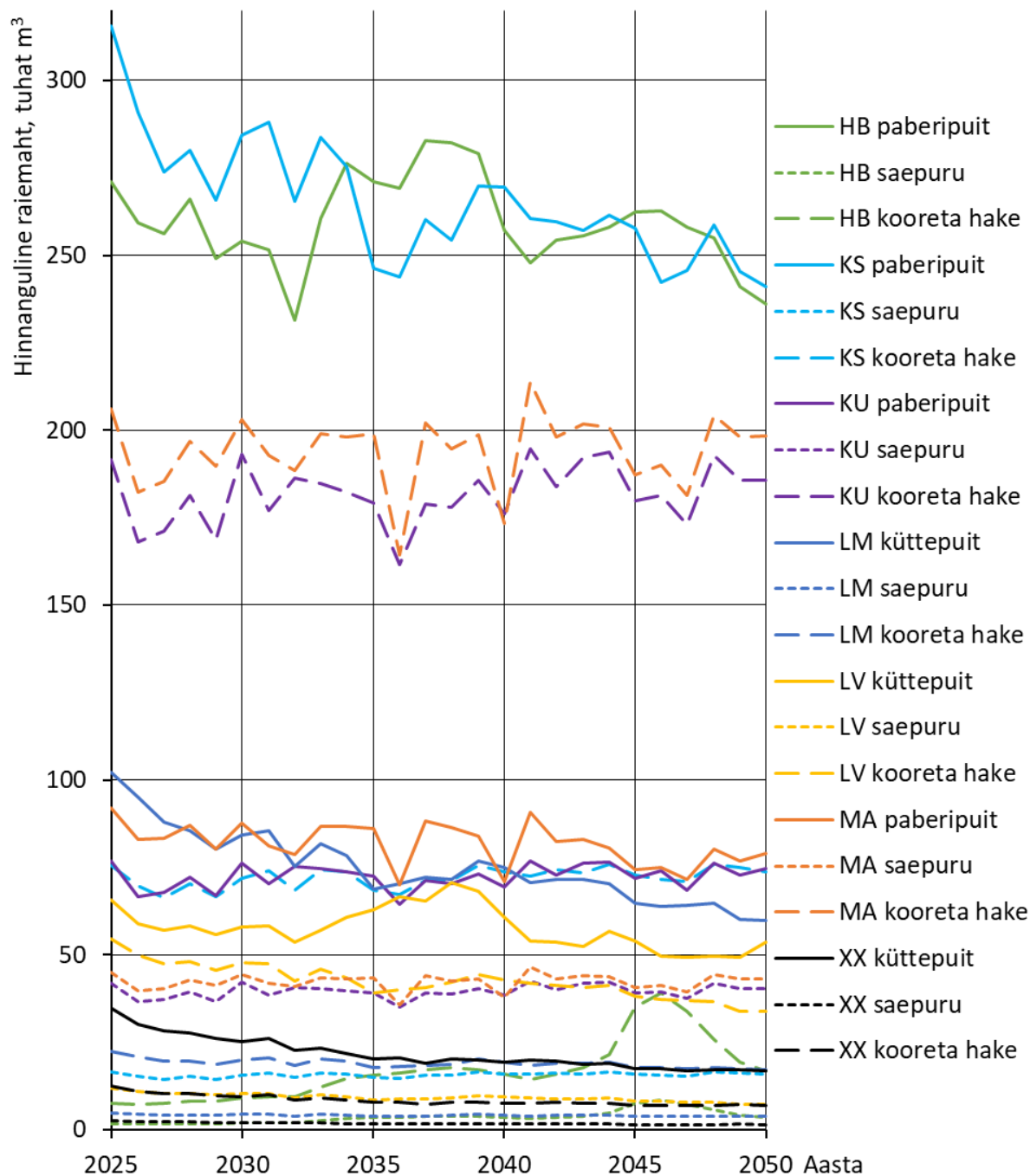
Tabelitesse 2.2 kuni 2.4 on lisatud ka trend, mis näitab palju keskmiselt muutub raiemahu prognoos. Kõige suuremad tõusjad on kuuse kooreta hakkpuit (kasv 4024 m<sup>3</sup> aastas), haava kooreta hakkpuit (kasv 3649 m<sup>3</sup> aastas), männi kooreta hakkpuit (kasv 2021 m<sup>3</sup> aastas) ja kuuse paberipuit (1760 m<sup>3</sup> aastas). Kõige rohkem on langevas trendis kase paberipuit (langus 3870 m<sup>3</sup> aastas), sanglepa küttepuit (3364 m<sup>3</sup> aastas) ja männi paberipuit (1563 m<sup>3</sup> aastas). Ülejäänud sortimentide keskmine muutus ühele või teisele poole on alla 1500 m<sup>3</sup> aastas.



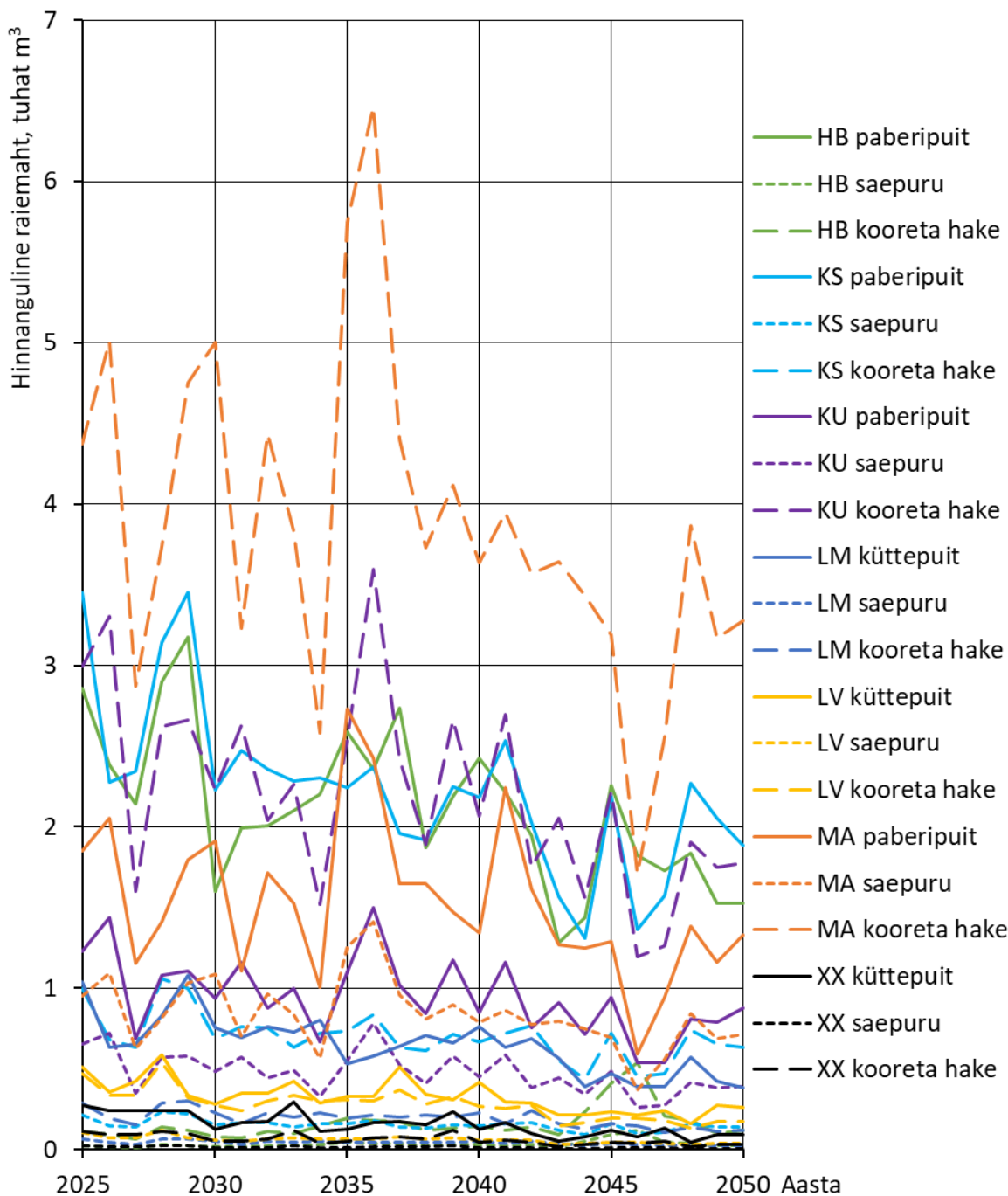
Joonis 2.3 Hinnangulised raiemahud riigimaadelt puuliikide ja sortimentide kaupa aastatel 2025 kuni 2050 juhul kui raiemaht on 10 miljonit m<sup>3</sup> aastas.



Joonis 2.4 Hinnangulised raiemahud juriidiliste isikute omanduses olevatelt maadelt puuliikide ja sortimentide kaupa aastatel 2025 kuni 2050 juhul kui raiemaht on 10 miljonit m<sup>3</sup> aastas.



Joonis 2.5 Hinnangulised raiemahud füüsiliste isikute omanduses olevatelt maadelt puuliikide ja sortimentide kaupa aastatel 2025 kuni 2050 juhul kui raiemaht on 10 miljonit m<sup>3</sup> aastas.



Joonis 2.6 Hinnangulised raiemahud teiste omandivormidega maadelt puuliikide ja sortimentide kaupa aastatel 2025 kuni 2050 juhul kui raiemaht on 10 miljonit m<sup>3</sup> aastas.

Tabel 2.2 Haava ja kase puidusortimentide hinnanguline maht omandivormide ja aastate lõikes

Omandivorm	Puu-liik	Sortiment	Kesk-mine	Mini-maalne	Maksi-maalne	Standard-hälve	Trend
Riik	HB	kooreta hake	25 149	11 431	63 700	14 348	1 333
Juriidiline isik	HB	kooreta hake	20 738	5 870	63 519	14 907	1 429
Füüsiline isik	HB	kooreta hake	16 694	7 384	39 252	8 599	881
Muud omandivormid	HB	kooreta hake	158	63	538	104	6
<b>Kokku</b>			<b>62 739</b>	<b>24 749</b>	<b>167 009</b>	<b>37 958</b>	<b>3 649</b>
Riik	HB	küttepuuit	34 460	28 550	51 873	6 430	-594
Juriidiline isik	HB	küttepuuit	28 952	23 231	43 736	5 089	-336
Füüsiline isik	HB	küttepuuit	25 770	22 288	32 875	2 733	-256
Muud omandivormid	HB	küttepuuit	217	120	357	64	-6
<b>Kokku</b>			<b>89 398</b>	<b>74 189</b>	<b>128 842</b>	<b>14 315</b>	<b>-1 192</b>
Riik	HB	paberipuit	330 080	278 536	402 177	32 778	-1 829
Juriidiline isik	HB	paberipuit	286 692	235 464	355 331	30 616	1 399
Füüsiline isik	HB	paberipuit	259 533	231 439	282 766	12 995	-364
Muud omandivormid	HB	paberipuit	2 120	1 283	3 174	478	-39
<b>Kokku</b>			<b>878 425</b>	<b>746 723</b>	<b>1 043 447</b>	<b>76 866</b>	<b>-833</b>
Riik	HB	saepuru	5 480	2 491	13 881	3 127	290
Juriidiline isik	HB	saepuru	4 519	1 279	13 842	3 249	311
Füüsiline isik	HB	saepuru	3 638	1 609	8 554	1 874	192
Muud omandivormid	HB	saepuru	34	14	117	23	1
<b>Kokku</b>			<b>13 672</b>	<b>5 393</b>	<b>36 393</b>	<b>8 272</b>	<b>794</b>
Riik	KS	kooreta hake	105 728	97 837	120 641	5 054	-179
Juriidiline isik	KS	kooreta hake	68 519	56 937	80 483	6 678	834
Füüsiline isik	KS	kooreta hake	72 132	66 390	75 959	2 907	173
Muud omandivormid	KS	kooreta hake	703	436	1 061	152	-11
<b>Kokku</b>			<b>247 082</b>	<b>221 600</b>	<b>278 144</b>	<b>14 791</b>	<b>817</b>
Riik	KS	küttepuuit	56 949	51 797	66 728	3 869	-325
Juriidiline isik	KS	küttepuuit	38 842	35 701	41 898	1 694	68
Füüsiline isik	KS	küttepuuit	38 187	35 117	43 969	2 212	-196
Muud omandivormid	KS	küttepuuit	340	201	509	80	-7
<b>Kokku</b>			<b>134 318</b>	<b>122 817</b>	<b>153 105</b>	<b>7 856</b>	<b>-460</b>
Riik	KS	paberipuit	394 332	358 616	463 903	26 809	-2 394
Juriidiline isik	KS	paberipuit	275 145	259 730	294 137	9 261	367
Füüsiline isik	KS	paberipuit	265 241	240 955	315 634	17 830	-1 796
Muud omandivormid	KS	paberipuit	2 231	1 308	3 452	524	-47
<b>Kokku</b>			<b>936 950</b>	<b>860 609</b>	<b>1 077 126</b>	<b>54 425</b>	<b>-3 870</b>
Riik	KS	saepuru	23 039	21 320	26 289	1 101	-39
Juriidiline isik	KS	saepuru	14 931	12 407	17 538	1 455	182
Füüsiline isik	KS	saepuru	15 718	14 467	16 552	633	38
Muud omandivormid	KS	saepuru	153	95	231	33	-2
<b>Kokku</b>			<b>53 842</b>	<b>48 289</b>	<b>60 611</b>	<b>3 223</b>	<b>179</b>

Tabel 2.3 Kuuse ja männi puidusortimentide hinnanguline maht omandivormide ja aastate lõikes

Omandivorm	Puu-liik	Sortiment	Kesk-mine	Mini-maalne	Maksi-maalne	Standard-hälve	Trend
Riik	KU	kooreta hake	363 341	337 802	405 037	18 289	1 462
Juriidiline isik	KU	kooreta hake	120 786	88 562	149 161	17 912	2 268
Füüsiline isik	KU	kooreta hake	181 772	161 438	194 524	8 692	336
Muud omandivormid	KU	kooreta hake	2201	1 194	3 597	599	-43
<b>Kokku</b>			<b>668 099</b>	<b>588 995</b>	<b>752 320</b>	<b>45 491</b>	<b>4 023</b>
Riik	KU	küttepuit	70 577	64 764	79 594	3 905	308
Juriidiline isik	KU	küttepuit	22 118	16 226	27 436	3 333	421
Füüsiline isik	KU	küttepuit	34 594	30 505	37 180	1 693	48
Muud omandivormid	KU	küttepuit	441	237	716	120	-9
<b>Kokku</b>			<b>127 730</b>	<b>111 731</b>	<b>144 925</b>	<b>9 051</b>	<b>768</b>
Riik	KU	paberipuit	154 620	141 366	174 679	8 760	793
Juriidiline isik	KU	paberipuit	46 783	34 018	59 231	6 880	861
Füüsiline isik	KU	paberipuit	72 444	64 599	76 911	3 493	122
Muud omandivormid	KU	paberipuit	950	537	1 497	244	-16
<b>Kokku</b>			<b>274 797</b>	<b>240 520</b>	<b>312 318</b>	<b>19 377</b>	<b>1 760</b>
Riik	KU	saepuru	79 176	73 611	88 263	3 985	319
Juriidiline isik	KU	saepuru	26 321	19 299	32 504	3 903	494
Füüsiline isik	KU	saepuru	39 610	35 179	42 389	1 894	73
Muud omandivormid	KU	saepuru	480	260	784	131	-9
<b>Kokku</b>			<b>145 587</b>	<b>128 349</b>	<b>163 940</b>	<b>9 913</b>	<b>877</b>
Riik	MA	kooreta hake	542 018	470 762	593 343	28 217	-439
Juriidiline isik	MA	kooreta hake	134 826	101 862	170 839	19 775	2 397
Füüsiline isik	MA	kooreta hake	194 123	164 311	213 974	10 655	120
Muud omandivormid	MA	kooreta hake	3857	1 708	6 464	1 015	-57
<b>Kokku</b>			<b>874 824</b>	<b>738 643</b>	<b>984 621</b>	<b>59 662</b>	<b>2 021</b>
Riik	MA	küttepuit	31 927	27 361	36 803	2 234	-170
Juriidiline isik	MA	küttepuit	8 125	6 801	10 137	829	78
Füüsiline isik	MA	küttepuit	11 015	9 263	12 982	776	-36
Muud omandivormid	MA	küttepuit	223	90	420	70	-3
<b>Kokku</b>			<b>51 291</b>	<b>43 515</b>	<b>60 341</b>	<b>3 909</b>	<b>-131</b>
Riik	MA	paberipuit	240 665	202 082	274 277	18 268	-1 774
Juriidiline isik	MA	paberipuit	63 950	52 566	75 915	6 735	617
Füüsiline isik	MA	paberipuit	81 768	69 944	91 924	6 002	-382
Muud omandivormid	MA	paberipuit	1534	595	2 731	477	-24
<b>Kokku</b>			<b>387 917</b>	<b>325 186</b>	<b>444 846</b>	<b>31 481</b>	<b>-1 563</b>
Riik	MA	saepuru	118 112	102 585	129 297	6 149	-96
Juriidiline isik	MA	saepuru	29 380	22 197	37 228	4 309	522
Füüsiline isik	MA	saepuru	42 302	35 805	46 628	2 322	26
Muud omandivormid	MA	saepuru	840	372	1 409	221	-12
<b>Kokku</b>			<b>190 635</b>	<b>160 959</b>	<b>214 561</b>	<b>13 001</b>	<b>440</b>

Tabel 2.4 Sanglepa, hall-lepa ja teiste lehtpuuliikide (ei ole haab, kask ega lepp) puidusortimentide hinnanguline maht omandivormide ja aastate lõikes

Omandivorm	Puu-liik	Sortiment	Kesk-mine	Mini-maalne	Maksi-maalne	Standard-hälve	Trend
Riik	LM	kooreta hake	29 990	26 425	36 508	2 797	-254
Juriidiline isik	LM	kooreta hake	19 413	17 698	21 606	859	52
Füüsiline isik	LM	kooreta hake	18 997	17 325	22 322	1 247	-118
Muud omandivormid	LM	kooreta hake	191	104	299	54	-5
<b>Kokku</b>			<b>68 591</b>	<b>61 552</b>	<b>80 736</b>	<b>4 957</b>	<b>-325</b>
Riik	LM	küttepuuit	107 202	87 417	140 839	13 484	-1 545
Juriidiline isik	LM	küttepuuit	84 710	75 178	96 005	5 542	-551
Füüsiline isik	LM	küttepuuit	75 120	59 961	102 131	10 479	-1 250
Muud omandivormid	LM	küttepuuit	645	382	1 083	182	-18
<b>Kokku</b>			<b>267 678</b>	<b>222 939</b>	<b>340 058</b>	<b>29 687</b>	<b>-3 364</b>
Riik	LM	saepuru	6 535	5 758	7 956	610	-55
Juriidiline isik	LM	saepuru	4 230	3 857	4 708	187	11
Füüsiline isik	LM	saepuru	4 140	3 775	4 864	272	-26
Muud omandivormid	LM	saepuru	42	23	65	12	-1
<b>Kokku</b>			<b>14 947</b>	<b>13 413</b>	<b>17 593</b>	<b>1 080</b>	<b>-71</b>
Riik	LV	kooreta hake	36 357	29 853	46 814	4 462	-510
Juriidiline isik	LV	kooreta hake	37 628	34 481	40 905	1 889	-105
Füüsiline isik	LV	kooreta hake	42 475	33 883	54 718	5 009	-595
Muud omandivormid	LV	kooreta hake	277	135	540	96	-10
<b>Kokku</b>			<b>116 737</b>	<b>98 352</b>	<b>142 976</b>	<b>11 456</b>	<b>-1 220</b>
Riik	LV	küttepuuit	42 019	34 829	51 186	5 485	-564
Juriidiline isik	LV	küttepuuit	60 134	48 631	87 484	10 527	342
Füüsiline isik	LV	küttepuuit	57 721	49 305	70 764	6 049	-386
Muud omandivormid	LV	küttepuuit	329	159	587	102	-9
<b>Kokku</b>			<b>160 202</b>	<b>132 924</b>	<b>210 022</b>	<b>22 163</b>	<b>-617</b>
Riik	LV	saepuru	7 923	6 505	10 201	972	-111
Juriidiline isik	LV	saepuru	8 200	7 514	8 914	412	-23
Füüsiline isik	LV	saepuru	9 256	7 384	11 924	1 092	-130
Muud omandivormid	LV	saepuru	60	29	118	21	-2
<b>Kokku</b>			<b>25 439</b>	<b>21 432</b>	<b>31 156</b>	<b>2 496</b>	<b>-266</b>
Riik	XX	kooreta hake	6 658	4 853	10 117	1 415	-174
Juriidiline isik	XX	kooreta hake	7 501	6 410	9 564	993	-113
Füüsiline isik	XX	kooreta hake	8 429	6 965	12 630	1 480	-173
Muud omandivormid	XX	kooreta hake	63	20	118	31	-3
<b>Kokku</b>			<b>22 651</b>	<b>18 248</b>	<b>32 430</b>	<b>3 919</b>	<b>-463</b>
Riik	XX	küttepuuit	17 500	12 957	26 358	3 721	-466
Juriidiline isik	XX	küttepuuit	20 263	16 643	27 257	3 320	-403
Füüsiline isik	XX	küttepuuit	21 807	16 923	34 847	4 704	-565
Muud omandivormid	XX	küttepuuit	155	47	293	70	-7
<b>Kokku</b>			<b>59 725</b>	<b>46 571</b>	<b>88 755</b>	<b>11 815</b>	<b>-1 441</b>
Riik	XX	saepuru	1 451	1 058	2 205	308	-38
Juriidiline isik	XX	saepuru	1 635	1 397	2 084	216	-25

Omandivorm	Puu-liik	Sortiment	Kesk-mine	Mini-maalne	Maksi-maalne	Standard-hälve	Trend
Füüsiline isik	XX	saepuru	1 837	1 518	2 752	323	-38
Muud omandivormid	XX	saepuru	14	4	26	7	-1
<b>Kokku</b>			<b>4 936</b>	<b>3 976</b>	<b>7 067</b>	<b>854</b>	<b>-102</b>

Kõik arvutused on tehtud eeldusel, et omandivormide vaheline metsade osakaal jääb praegusega sarnaseks. Samas eraomandis olevat metsamaad müüakse pidevalt ja seetõttu omandivormide vahelised muutused mõjutavad ka metsamajandamise käigus raiutavate puidusortimentide väljatulekuid. Seega eelpool toodud tabelites ja joonistel toodud puidusortimentide kogused summamana on usaldusväärsemad kui omandivormide kaupa.

Erametsaomanike maast kuulus füüsilistele isikutele 2019. aastal 57,8%, mis näitab olulist langust võrreldes varasemaga (2010. a 75,6%). 2019. aasta lõpu seisuga oli Eestis 104 311 erametsaomanikku (2015. a 113 000), kellest 98 393 (94,3% erametsaomanike koguarvust) olid füüsilised isikud ja 5 918 (5,7%) juriidilised isikud. Keskmise erametsaomandi suurus Eestis oli 10,7 ha, füüsiliste isikute puhul oli see näitaja 6,6 ha ja juriidilisel isikutel 78,6 ha<sup>28</sup> Kümne suurima erametsaomaniku valduses on ligikaudu 10% kogu metsamaa pindalast ja 21% erametsade pindalast.<sup>29</sup>

Kuna omandivormide kaupa võib olla erinevusi metsamajandamisel, siis siin peatükis avaldatud prognoos võib olla kaldu teatud omandivormide poole. Kui füüsilised isikud majandavad keskmiselt vähem intensiivsemalt kui juriidilised isikud, siis sel juhul on füüsiliste isikute raiemahud üle hinnatud ning juriidiliste isikute raiemahud alla hinnatud. Erametsade summaarne raiemahu prognoos on 10 miljoni m<sup>3</sup> aastase raiemahu juures ligikaudselt õige.

Puiduressursi kättesaadavust mõjutab lisaks metsaomanike otsustele ka riiklikud või kohalike omavalitsuste poolt kehtestatud piirangud metsade kasutamisele. Ettevõtete hinnangul on Eesti võetud kohustused (nt kevadsuvine lindude pesitsusrahu, LULUCF) ja keskkonnanõuded (nt heitvee keskkonnanormid) karmimad kui lähiriikides. Selleks, et olla turul konkurentsivõimelised ning võimaldada Eestisse puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise võimekuse tekkimist peavad eesmärgid ja regulatsioonid sarnased lähinaabritega. Euroopa Rohelise leppe raamistikus on mitmeid algatusi ja õiguslikult siduvaid regulatsioone, mis mõjutavad otseselt või kaudselt puidu kui taastuva ressursi kasvatamist ja kasutamist. Viimastel aastatel lisandunud ja lisanduvad algatused:

Maismaa ja mere kaitse (sh range kaitse) lubadus<sup>30</sup>

Looduse taastamise määrus<sup>31</sup>

EL taastuvenergia direktiiv - RED II ja RED III<sup>32</sup>

Raamistik süsiniku sidumise sertifitseerimiseks<sup>33</sup>

EL Taksonoomia raamistik<sup>34</sup>

<sup>28</sup> Metsanduse arengukava aastani 2020 täitmise aruanne 2011 – 2018, Keskkonnaministeerium, Tallinn 2020

<sup>29</sup> Maad.ee maakorraldaja andmebaas, 2023

<sup>30</sup> KOMISJONI TEATIS EUROOPA PARLAMENDILE, NÕUKOGULE, EUROOPA MAJANDUS- JA SOTSIAALKOMITEELE NING REGIOONIDE KOMITEELE ELi elurikkuse strateegia aastani 2030. [Link](#)

<sup>31</sup> EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU MÄÄRUS looduse taastamise kohta. [Link](#)

<sup>32</sup> Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II). [Link](#)

<sup>33</sup> EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU MÄÄRUS (EL) 2024/3012, 27. november 2024, millega kehtestatakse liidu raamistik süsiniku püsiva eemaldamise, süsinikupõllunduse ja toodetes süsiniku säilitamise sertifitseerimiseks [Link](#)

<sup>34</sup> EU Taxonomy Navigator [Link](#)

Ettevõtte jätkusuutlikkuse aruandlus<sup>35</sup>

Ettevõtte jätkusuutlikkuse hoolsuskohustus<sup>36</sup>

EL 2040 kliimaneutraalsuse eesmärk<sup>37</sup>

Puhta tööstuse kokkulepe<sup>38</sup>

LULUCF (Maakasutus, maakasutuse muutus ja metsandus)<sup>39</sup>

Puidu varumine on hooajaline tegevus ning seda tehakse peamiselt talvel kui pinnast on külmunud või kuivadel aastaegadel. Talvised tingimused, nagu külmunud pinnas, võimaldavad raskete masinate liikumist metsas, samas kui kevadised ja sügisesed sademed muudavad metsateed raskesti läbitavaks. See mõjutab otseselt metsamaterjali varumist ja seega ka puidukeemia tooraine kättesaadavust. Tänu muutuvale ilmastikule on talved pehmemad ning viimastel aastatel rakendatud karmimad keskkonnanõuded (nt pesitsusrahu<sup>40</sup>) on kitsendanud metsa ülestöötamiseks sobilikku aega. Metsateede seisukord ja transpordivõimekus varieeruvad hooajaliselt. Kevadised ja sügisesed sademed võivad teed muuta raskesti läbitavaks, piirates seeläbi tooraine väljavedu metsast. Hooajaliste piirangute tõttu on oluline planeerida tooraine varumist ja ladustamist ette. See nõuab investeeringuid ladustamisinfrastruktuuri ja logistika planeerimisse, et tagada puidukeemia tööstuse pidev toorainevaru aastaringelt. Siinne tootmine konkureerib toorme osas Põhjamaadega, kus on tehased suuremad ja seega tasuvus parem, mis võimaldab toorme eest konkurentsivõimelisemat hinda pakkuda.

Ehituslubade, keskkonnalubade ja muude vajalike kooskõlastuste saamata jäämine või viivitused mõjutavad oluliselt Eestisse puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise tööstuse rajamist. Suure mõjuga tootmise rajamiseks on vajalikud mitmed planeeringud ja load nii riigi kui omavalitsuste poolt, täiendavalt lisandub mõjude hindamine lõplike kaalutletud otsuste langetamiseks. Pealiskaudselt ettevalmistatud dokumentatsioon ja näiliselt läbiviidud kaasamisprotsess mõjude hindamisel võivad tekitada vastuseisu ja vaidlustusi. Kõrgema lisandväärtusega investeeringute tegemiseks vajalikud haldusmenetlused kestavad Eestis ebamõistlikult kaua (võrdluses nt Soome ja Rootsi), mistõttu Eestile olulised investeeringud venivad või jäävad ellu viimata ja realiseeritakse teistes riikides. Eestis on juurdunud aastatepikkune praktika, kus projektide menetlemisel liigutakse edasi lähtudes põhimõttest, et üks menetlus ja üks otsustaja/projektijuht korraga. Eestile soodsate investeeringuotsuste tegemine eeldab, et haldusmenetlused on ettenähtavad ja toimuvad mõistliku ajaga.<sup>41</sup> Näiteks VKG Biotoodete tehase eriplaneeringu protsess võttis Eesti planeerimisprotsessi kohmakuse tõttu alates VKG poolsest taotlusest KOV eriplaneeringu algatamiseks aega ligi neli aastat.<sup>42</sup>

Tehase potentsiaalne negatiivne keskkonnamõju (õhk, vesi, müra) ja sellest tulenev kohalike elanike või huvigruppide vastuseis. Demokraatliku ühiskonna tunnuseks on võimalus kaasa rääkida suure mõjuga otsustes. Üha enam on Eestis keskkonnaorganisatsioonid ja kohalikke kogukondi, kes soovivad kaitsta siinseid loodusväärtusi ning on valmis selle nimel seda ohustavaid ettevõtmisi takistama. Keskkonnaorganisatsioonid on motiveeritud keskkonnale potentsiaalselt kahju tekitavaid arendusi

---

<sup>35</sup> Corporate sustainability reporting directive (CSRD) – 2022/2464/EU. [Link](#)

<sup>36</sup> Corporate sustainability due diligence. [Link](#)

<sup>37</sup> 2040 climate target. Reducing net emissions by 90% by 2040. [Link](#)

<sup>38</sup> Puhta tööstuse kokkulepe [Link](#)

<sup>39</sup> EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU MÄÄRUS (EL) 2018/841, 30. mai 2018, millega lisatakse maakasutusest, maakasutuse muutusest ja metsandusest tulenev kasvuhoonegaaside heide ja sellest tulenevate kasvuhoonegaaside sidumine 2030. aasta kliima- ja energiapoliitika raamistikku ning millega muudetakse määrust (EL) nr 525/2013 ja otsust nr 529/2013/EL. [Link](#)

<sup>40</sup> Keskkonnaamet. Pesitsusrahu. [Link](#)

<sup>41</sup> Investeeringute (uute ettevõtete ja üksuste rajamine) teostamiseks vajalike menetlustoimingute tõhustamise juriidiline analüüs (Sorainen, 2023)

<sup>42</sup> VKG artikkel "Lüganuse vald kehtestas Eesti esimese biotootmise eriplaneeringu". Vaadatud 12.06.2025. [Link](#)

vaidlustama, mis võib selgitada tootmise tegelikku mõju ulatust algsest paremini, kuid võib ka peatada hästi kavandatud ehitusprotsessi.<sup>43, 44</sup>

Puidutööstuste rajamisel ja arendamisel on oluline arvestada kestliku metsade majandamise ning puidu päritolu tõendavate sertifikaatide nõuetega. Euroopa Liidu (EL) regulatsioonid ja turupõhised sertifitseerimissüsteemid, nagu FSC (Forest Stewardship Council) ja PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification), mõjutavad märkimisväärselt puidutööstuse toimimist. Eestis on kasutusel kaks peamist rahvusvahelist metsamajandamise sertifitseerimissüsteemi: FSC ja PEFC. Need süsteemid aitavad tõendada, et metsade majandamine toimub keskkonnasäästlikult ja sotsiaalselt vastutustundlikult. Sertifikaatide omamine võib avada uusi turge ja parandada puidutoodete konkurentsivõimet, eriti eksporditurul. EL regulatsioonid on üha enam mõjutamas nii metsade majandamist kui puidu kasutamist. Näiteks ELi määrus „Deforestation-free Products“ (EUDR – Regulation on Deforestation-free Products), mis pidi esialgselt jõustuma 30. detsembril 2024, kuid pikendati aasta võrra, mõjutab puidutööstuse rajamist Euroopas oluliselt. EUDR mõju puidutööstuse rajamisele on oluline nii kapitalikulude, tegevusnõuete kui ka riskide poolest:

- ✓ Tootjad peavad tagama täielikult läbipaistva ja jälgitava toormeahela. Kui uus tehas ei suuda EUDR nõudeid tõendada, kaotab see ligipääsu EL turule.
- ✓ Tooraine kättesaadavus võib väheneda, kui väikemetsaomanikud ei suuda nõudeid täita.

Samas loob määrus võimalusi usaldusväärsema turu loomiseks, kui EUDR-ga vastavus on hästi korraldatud.

---

<sup>43</sup> Kohus peatas esialgse õiguskaitse alusel põlevkiviõlitehase ehitusloa. [Link](#)

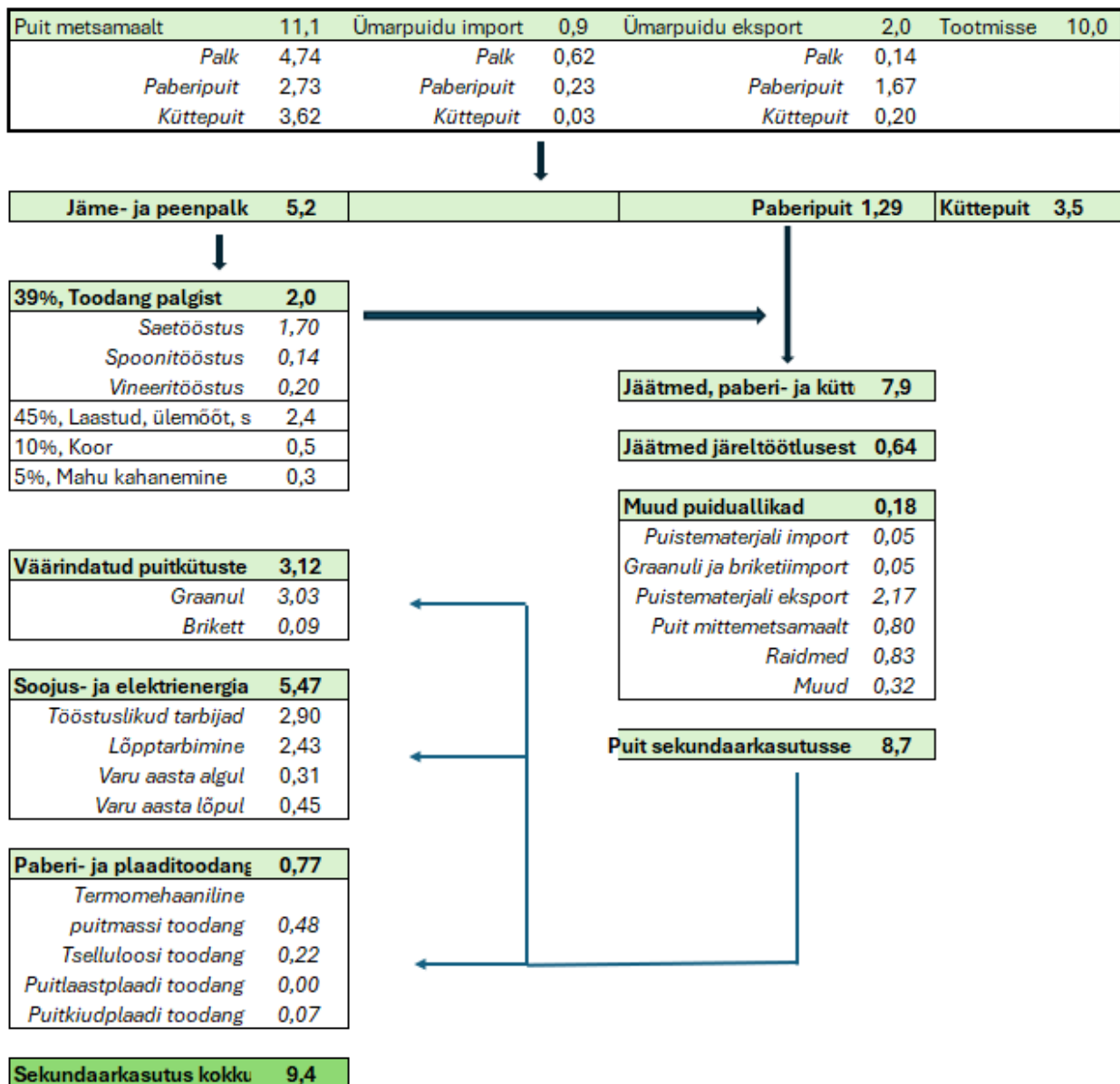
<sup>44</sup> Riigikohus tühistas turba kaevandamise loa: „Keskkonna säästmise on riigi kohustus. [Link](#)

### 3. TÄIENDAVID RESSURSID

Käesolevas peatükis on kaardistatud muud vajalikud täiendavad ressursid, sh bioressursid ning tootmise rajamise olulised eeldused lähtuvalt tehnoloogia vajadustest, sh veetarve, energiatarve. Muuhulgas ka kirjeldatakse ka mõnede olulisemate tehnoloogiliste protsessidega seotud ühikupõhised reagentide kulud. Olulisema käsitletavate ressursid hõlmavad põllumajanduslike toormeid, kus kirjeldatakse erinevate biomassiallikate kasvukohti ja -mahte, toidu- ja tööstusjäätmeid, tselluloosseid tekstiilijäätmeid, energiatootmist ja veevarusid. Samuti on vaadeldud lähiriikide, Läti, Leedu ja Poola puidubilanssi hindamiseks toorme impordipotentsiaali.

#### 3.1 MUUD BIORESSURSID

##### 3.1.1 SEKUNDAARNE PUITMATERJAL

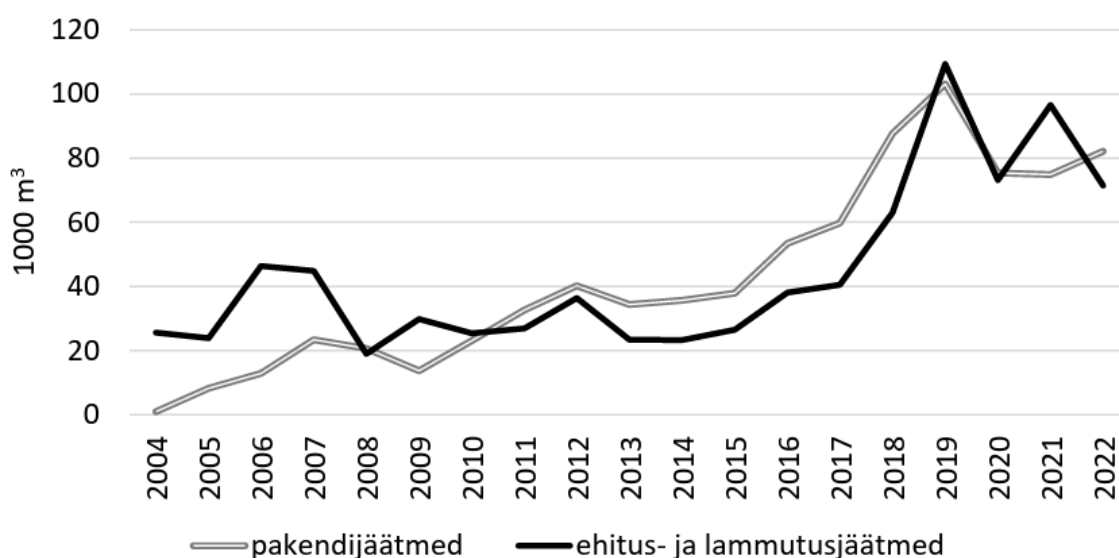


Joonis 3.1 Likviidse puidu töötlemine

Likviidse puidu töötlemist iseloomustab joonis 3.5, millest nähtub, et sekundaarkasutusse läks 2022. a 9,4 mln m<sup>3</sup> puitu. Valdakonniti jaotus sekundaarkasutus väärindatud puitkütuste ekspordi soojus- ja elektrienergia tarbimise ning paberi ja plaaditootmise vahel. Sisuliselt saaks puidu keemilise ja termilise väärindamise toormeks suures mahus peamiselt seniste kasutusvaldkondade arvelt, nt vähem kütta ja rohkem kemikaale toota.

Korduskasutus moodustas 2022. aastal puidubilansi allikate kogumahust 2% (303 000 m<sup>3</sup>).

Pakendijäätmete ning ehitus- ja lammutusjäätmete dokumenteeritud korduskasutuse maht on kasvanud kuni 2019. aastani, kasvu põhjus on järjest suurenev tarbimine ning jäätmete teke. Korduskasutus kahanes järsult 2020. aastal koroonapandeemiast tingitud vähenenud tarbimise tõttu. 2021. aastal kiiresti suurenenud ehitusmahtude tulemusel kasvas ka ehitus- ja lammutusjäätmete korduskasutuse maht, mis järgneval aastal taas vähenes, põhjuseks majanduse jahtumine ja ehitusmahtude vähenemine (Joonis 3.1 Joonis 3.2)



Joonis 3.2 Puidujäätmete korduskasutus aastatel 2004-2022 vastavalt Puidubilanss 2022 andmetele<sup>45</sup>

### 3.1.2 PÖLLUMAJANDUSLIKUD TOORAINED

Eesti biomajanduse ressursside hetkeseisu analüüsi<sup>46</sup> andmetel jaguneb põllumajandusmaa (1,4 mln ha) järgnevalt: 69,3% põllumaa, 30% püsirohumaad ja 0,7% muud kultuurid. Püsirohumaade ja lühiajalise rohumaa pindala on kokku 421 700 ha, mida põhiliselt kasutatakse loomasööda tootmiseks, aga millised on ka olulised loodusliku mitmekesisuse ja mulla orgaanilise aine säilitamisel. Sama uuringu andmetel on kasutusest väljas oleva põllumajandusmaa hulgas umbes 80 000 ha looduslikke rohumaad, mille piiratud majandamine on võimalik ka käesoleval ajal. Teraviljakasvatustes tekib aastas kokku 1,25 mln tonni põhku ja 40 600 tonni jäätmeid. Valdav osa põhust on oluline huumusbilansi säilitamiseks mulda tagastada, enamik loomakasvatajatest kasutab põhku allapanuna. Teoreetilistele arvutustele tuginedes järeldati, et Eestis on aastas võimalik kasutada muuks otstarbeks 37,5% kogu põhusaagist ehk umbes 500 000 tonni põhku. Eestis jääb juba praegu kasutamata ligikaudu 260 000 tonni rohtset biomassi aastas, millele lisaks oleks võimalik kasvatada väheväärtuslikel maadel kõrrelisi heintaimi.<sup>47</sup>

<sup>45</sup> Puidubilanss. Ülevaade puidukasutuse mahust 2022. Koostanud Feliks Sirkas. Keskkonnaagentuur. 12 lk. [Link](#)

<sup>46</sup> ADDVAL-BIOEC (2021). Lisandväärtuse tõstmise ja toorme tõhusam kasutamine Eesti biomajanduses. ADDVAL-BIOEC uuringu lõppraport, Tallinn & Tartu.

<sup>47</sup> Eesti statistika. Uudis "Kartuli kasvupind on väiksem kui kunagi varem". Vaadatud: 10.06.2025. [Link](#)

## LINA, KANEP JA PILLIROOG

Kiulina Eestis praktiliselt enam ei kasvatata. Pigem on orienteeritud õililina ning õlikanepi kasvatamisele. Antud kultuure kasvatatakse hetkel seemnete saamise eesmärgil, millest pressitakse õli. Õililina ja –kanepi varred sisaldavad olulisel määral ka kiudusid, kuid need kiud on oluliselt lühemad ja halvema kvaliteediga kui kiulina ja kiukanepi vartest saadavad kiud. Siiski on õililina ja –kanepi varte näol tegemist olulise biotoormega, mida saaks senisest enam vääridada. Lisaks kiududele saab olulise biotoormena kasutada ka lina- ning kanepiluud. Kanepi- ja linakiudude vääridamiseks oleks oluline luua Eestisse tehas, millel on võimekus nende kiudude töötlemiseks.

Õililina kasvatati 2024. aastal Eestis kokku 88 hektaril (2022. aastal 116 ning 2023. aastal 77 hektaril). Kanepit kasvatati 2024. aastal Eestis kokku 4067 hektaril (2022. aastal 6826 ning 2023. aastal 4243 hektaril)<sup>48</sup>. Täpsemad andmed õililina ja kanepi kasvatamise kohta aastatel 2022-2024 on toodud Kanepi saagikus varieerub 0,7-1,2 t/ha vahel, millest järeldub, et maksimaalne saagikus Eestis 2024 a andmete põhjal oleks umbes 4900 t.

Tabel 3.1. Kanepi saagikus varieerub 0,7-1,2 t/ha vahel, millest järeldub, et maksimaalne saagikus Eestis 2024 a andmete põhjal oleks umbes 4900 t.

**Tabel 3.1 Õililina ja kanepi kasvupind Eestis aastatel 2022-2024, ühik: hektarit<sup>49</sup>**

Aasta	Õililina (ha)	Kanep (ha)
2022	116	6 826
2023	77	4 243
2024	88	4 067

Pilliroog kasvab pea kõikjal Eestis veekogude ääres, kuid suurimad levialad on Lääne-Eesti ja saarte kaldaalad. Hinnanguliselt kasvab pilliroogu 7 900 ha, millest umbes 3 700 ha on niidetavat ala ja võimaldaks saada umbes 74 000 t märga pilliroomassi.<sup>50</sup> Biometaanit saaks antud kogusest toota umbes 5,9 mln Nm<sup>3</sup>, mis moodustaks umbes 30% Eesti 2022. a biogaasi kogutoodangust.<sup>51</sup> Pilliroog sobib kasutada pulpimisel tselluloosimassi saamiseks<sup>52</sup> ja ka suhkru saamiseks ning seeläbi samuti etanooli tootmiseks.<sup>53</sup>

### 3.1.3 TOIDU- JA -TÖÖSTUSJÄÄTMED

Eestis tekib aastas u 774 351 tonni biolagunevaid jäätmeid,<sup>54</sup> millest 167 000 tonni moodustavad toidujäätmeid.<sup>55</sup> Kolmandikust toidujäätmetest toodetakse komposti ja ülejäänud utiliseeritakse koos olmejäätmetega. Toidujäätmete hulka arvestatakse kodumajapidamistes, restoranides ja tööstustes tekivad toidujäätmed, samuti (nt köögijäätmed). Köögi- ja puuviljade tootmisjäätmed, näiteks kartuli koored, porgandid, õunad jms. Toidujäätmete tekkesse panustavad ka toidutööstuse vääridamata kõrvalsaadused – näiteks õlleraba ja rapsikoogid, tootmise või suhkru valmistamise jäätmed, aga ka vana küpsetusõli, jäätmerasvad või loomsed rasvad. Toidujäätmed on lisaks puidujäätmetele suurepäraseks sisendiks fermentatsioonipõhiste komponentide tootmisel, kuna sisaldavad süsivesikuid, valke ja rasvu, mis on kõlblikud mikroorganismidele, nt polühüdrosüalkanoaatide tootmine (Bio-on, Metabolix,

<sup>48</sup> Eesti statistika: põllumajandus. Vaadatud: 10.06.2025. [Link](#)

<sup>49</sup> Eesti statistika: põllumajandus. Vaadatud: 30.05.2025 [Link](#)

<sup>50</sup> T. Menert. "Harilik pilliroo (phragmites australis) biogaasi toorainena kasutamise võimalused", magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool (2015).

<sup>51</sup> Keskkonnaportaali. „Kas biogaasil on Eestis tulevikku?“ [Link](#)

<sup>52</sup> Byrd, M., *The Pulping, Bleaching, and Papermaking Characteristics of Giant Reed (Arundo donax) Compared to Mixed Southern Hardwoods*, Proceedings, 2000 Fourth International Nonwood Fibre Pulping and Papermaking Conference (Jinan), Volume 1, 122-129.

<sup>53</sup> Lu, Jie, Li, XueZhi, Zhao, Jian, Qu, Yinbo, *Enzymatic Saccharification and Ethanol Fermentation of Reed Pretreated with Liquid Hot Water*, BioMed Research International, 2012, 276278, 9 pages, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/276278>

<sup>54</sup> Riigi jäätmekava 2022-2028, Keskkonnaministeerium, 2023.

<sup>55</sup> Piirsalu, E, Moora, H, Väli, K, Aro, K, Värnik, R, Lillemets, J, 2021. *Toidujäätmete ja toidukao teke Eesti toidutarneahelas*. SEI Tallinn.

Monsanto).<sup>46</sup> Kemikaalide tootmisel sobivad sisendiks nii toiduainetest kui ka lignotselluloosete toormete fermentatsiooni saadud suhkrud.

Eestis asub Baltimaade suurim toiduõli tootja Scanola Baltic, mille aastane toodang on ligikaudu 60000 t rapsiõli. Sellest kolmandik jääb kodumaisele turule, millele lisandub teiste tootjate import<sup>56</sup>. Selle õlikoguse tarbimisest nii kodumajapidamistes kui ka toiduainetetööstuses tekib märkimisväärne kogus kasutatud küpsetusõli, mida võiks hinnanguliselt koguda aastas 6000 - 7000 tonni<sup>57</sup>. See potentsiaal on Eestis veel teostamata ja kogutud õli kulub peamiselt biodiisli valmistamiseks. Siiski on taimsetest õlidest (nii kasutatud küpsetusõli kui ka õli tööstusejäätgid) pärit rasvhapped väärtuslik toore näiteks bioplastide valmistamiseks koos tselluloosiga.<sup>58</sup>

### 3.2 TSELLULOOSSED TEKSTIILIJÄÄGID

Eestis tekib aastas ligikaudu 18 000 tonni rõiva- ja tekstiilijäätmeid. Lisaks tekib aastas veidi alla 2000 tonni tekstiilitööstuses tekkinud tekstiilijäätmeid. Eesti elanikud tarbivad igal aastal elaniku kohta umbes 12 kilogrammi uusi rõivaid, mis on soetatud Eestist. Kui lisada siia juurde välismaalt soetatud tekstiilid, siis on tarbimine kuni 20 protsenti suurem. Kasutatud rõivaid ja kodutekstiile tarbitakse umbes 3 kilogrammi ühe elaniku kohta aastas. 2022. aasta seisuga koguti liigiti ligikaudu 39% turule lastud rõivaste ja tekstiilide kogustest<sup>59</sup>. Tabel 3.2 on välja toodud rõiva- ja tekstiilijäätmete teke aastatel 2018-2022 ning Tabel 3.3 on välja toodud tekstiilitööstuses tekkinud tekstiilijäätmed.<sup>60</sup>, võib hinnanguliselt öelda, et kogu jäätmemassist üle kolmandiku moodustavad tselluloossed tekstiilkiud (2023. aastal toodeti taimseid tselluloosseid tekstiilkiude 25% ning tselluloosseid tehiskiude 6% kõikidest maailmas toodetavatest tekstiilkiududest). Arvesse tuleb võtta ka asjaolu, et varasematel aastatel on puuvillakiu tootmise osakaal kõigist toodetavatest kiududest olnud veelgi suurem, seetõttu võib tselluloosete kiudude hulk olla veelgi suurem. Tselluloosseid tekstiilkiude saab kasutada olulise sekundaarse biotoormena näiteks uute tekstiilkiudude tootmiseks (jäätmete keemiline ümbertöötlemine) või siis muude tselluloossed toore vajavate materjalide valmistamiseks (näiteks bioplastid).

Tabel 3.2 Tekstiilijäätmete teke aastatel 2018-2022<sup>61</sup>

Jäätmeliik	2018	2019	2020	2021	2022
Liigiti kogutud rõivajäätmed (20 01 10) (t)	750	762	1154	801	437
Liigiti kogutud tekstiilijäätmed (20 01 11) (t)	947	1 042	1 063	1 464	912
Liigiti kogutud rõiva- ja tekstiilijäätmed kokku (t)	1 697	1 804	2 217	2 265	1 349
Segaolmejäätmetes sisalduvad rõiva- ja tekstiilijäätmed	17 054	17 621	17 045	16 880	16 755
Rõiva- ja tekstiilijäätmed kokku (t)	18 751	19 425	19 262	19 145	18 104
Liigiti kogutud rõiva- ja tekstiilijäätmete osakaal (%)	9	9	12	12	7

Tabel 3.3 Tekstiilitööstuses tekkinud tekstiilijäätmed (t) aastatel 2018-2022<sup>61</sup>

Jäätmeliik	2018	2019	2020	2021	2022
Komposiitmaterjalide (impregneeritud tekstiil, elastomeerid, plastomeerid) jäätmed	23	40	4	0	0
Töötlemata tekstiilkiudude jäätmed	30	12	112	99	81
Töödeldud tekstiilkiudude jäätmed	2 208	1 692	1 626	1 734	1 615
Nimistus mujal nimetamata jäätmed	14	15	10	44	42
Tekstiilitööstusjäätmed kokku	2 275	1 759	1 752	1 877	1 738

<sup>56</sup> Oma Maitse artikkel „Kuidas valmib rapsiõli: 8 tunniga seemnest pudelisse“ Vaadatud: 18.07 [Link](#)

<sup>57</sup> Analysis of the current development of household UCO collection systems in the EU. EWABA [Link](#)

<sup>58</sup> ERR „Teadlased loodavad muuta Eesti puidujäätmed pikaajaliseks plastiks“ [Link](#)

<sup>59</sup> Kliimaministeerium: tekstiilijäätmed. Vaadatud 10.06.2025 [Link](#)

<sup>60</sup> Textile exchange. Materials Market Report 2024. Vaadatud: 10.06. [Link](#)

<sup>61</sup> H. Moora, R. Aus, I. Varov, M. K. Peterson, P. Kuldna. Tekstiili ringlussevõtu tehnoloogiate uuring ja analüüs. EKA ja SEI Tallinn (2024) [Link](#)

Tekstiilijäätmetest maksimaalselt 1/3 on tselluloosne materjal, mida saaks vääridada sünergias puiduga, nt puidusuhkrute tootmisel. Sellisel juhul tuleks tekstiilijäätmeid eraldi sorteerida, milleks on tehnoloogiad ka välja töötatud. Teisalt sobivad kõik tekstiilijäätmed koos puiduga termokeemiliseks vääridamiseks, nt gaasistamise teel. Viimasel juhul poleks sorteerimine vajalik. Elukaareanalüüsi ja vastav majanduslik hinnang erinevatele tekstiilmaterjalide taaskäitlemisviisidele on antud 2023 a ilmunud JRC aruandes<sup>62</sup> ja hilisemas publikatsioonis.<sup>63</sup> Taaskäitluskulu võrreldi baaskuluga, milleks valiti tekstiilijäätmete koos munitsipaaljäätmetega kogumise ja hilisema põletamise kogukulu. Nimetatud uuringu tulemustest nähtub, et keskkonnamõjude poolest on soodsaim taaskasutus, põletamisest parem on ka mehaaniline taaskäitlus ja materjalist sõltuvalt nii keemiline kui ka nn avatud tsükliga taaskäitlus. Seevastu kogukulu ühiskonnale elukaare ulatuses on taaskäitluse puhul suurem kui segaolemejäätmetega koospõletamisel va otsese taaskasutuse korral. Nt, puuvilla puhul on kulud 900-1300 EUT/t ja segupuuvilla puhul 800-1700 EUR/t kõrgemad sõltuvalt taaskäitlusmeetodist. Kõige kulukam on keemiline taaskäitlus, mille kulu on 1300-1700 EUR/t. Autorite tõdemuse kohaselt on tekstiili taaskäitlus hetkel liialt kulukas ja ei suuda veel majanduslikel alustel konkureerida taaskasutuse ja põletamisega.

### 3.3 VANAPABER

Eestis tekib aastas üle 100 000 tonni vanapaberit ja -pappi, sellest alla 1/10 töödeldakse ümber kodumaal ja suurem osa viiakse ümbertöötamisele välismaale, kuna selle ümbertöötlemine ei ole hetkel majanduslikult tulus. Euroopa Liidus kogutud vanapaber hõlmab endas 20-25% pappi, 20% ajalehepaberit, 8-12% kirjapaberit, 5-10% raamatuid ja ajakirju ning 6-8% pabertaskurätikuid.<sup>64</sup> Selline paber on sobilik puidusuhkrute tootmiseks. Selleks on vajalik paberi edukam liigiti kogumine, kuna 60 000 tonni vanapaberit lõpetab endiselt ikka olmeprügis. Seega oleks suhkrute tootmiseks või gasifitseerimiseks saadaval potentsiaalselt veel 90 000 tonni vanapaberit aastas.

### 3.4 VESI

Kuna paljud puidu ja biomassi vääridamise tehnoloogiad vajavad olulisel määral vett, siis on antud töö kontekstis oluline kaardistada Eesti veeressurss, mida ka alljärgnevas teeme. Esmalt vaatleme olulisi mõisteid nagu vesikond ja veekogum ning seejärel kirjeldame vastavaid ressursse Eesti piirkondade lõikes.

Vesikond (valgalapiirkond) on maa- ja mereala, mis koosneb ühest või mitmest kõrvuti asetsevast valgalast koos põhjavee ja rannikuveega, moodustades ühtse terviku. Vesikond on veemajanduse korraldamise põhiüksus. Eestis on kokku kolm vesikonda (Eesti keskmine pinnavee äravoolumaht on 12 897 mln m<sup>3</sup>). Kuigi veekasutus sõltub olulisel määral puidu vääridamise tehnoloogiast, siiski saab näitena tuua puitmassi tootmise tehnoloogia, kus umbes 170 tuh t paberimassi kohta kulub umbes 2,4 mln m<sup>3</sup> vett. Tähele tasub panna, et Eesti keskmine pinnavee äravoolumaht pole siiski ühtlaselt jaotunud ja nii on parimad kohad veemahukate tehnoloogiate rakendamiseks siiski suuremate jõgede nagu **Emajõgi, Pärnu jõgi, Narva jõgi läheduses**. Tehnoloogilises protsessides on eelistatud madala BTH ja elektrolüütide sisaldusega magevesi, sest nõuab oluliselt vähem ressursse vee kvaliteedi vastavusse viimiseks tehnoloogilise protsessi esitatavate nõuetega. Kahtlemata ei tohi tootmise asukoha valikul eirata keskkonnamõjusid.

---

<sup>62</sup> Huygens, D., Foschi, J., Caro, D., Caldeira, C., Faraca, G., Foster, G., Solis, M., Marschinski, R., Napolano, L., Fruergaard Astrup, T. and Tonini, D., *Techno-scientific assessment of the management options for used and waste textiles in the European Union*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/6292, JRC134586

<sup>63</sup> M. Solys, D. Huygens, D. Tonini, T. F. Astrup, *Management of textile waste in Europe: An environmental and socio-economic assessment of current and future scenarios*, *Resources, Conservation and Recycling*, 207, 2024, 107693. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107693>

<sup>64</sup> Sharma, V., Abbas, R., Sodre, J. R., Ayad, S. M. E., Belchior, C. (2022). *Model for Energy Consumption and Costs of Bioethanol production from Wastepaper*. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. Vol 10, 4. <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d10.0431>

Tabel 3.4): Lääne-Eesti, Ida-Eesti ja Koiva. Pindalade lõikes jagunevad vesikonnad järgmiselt:

- ✓ Lääne-Eesti vesikond 45 353 km<sup>2</sup>
- ✓ Ida-Eesti vesikond 23 877 km<sup>2</sup>
- ✓ Koiva vesikond 1 307 km<sup>2</sup>

Eesti keskmine pinnavee äravoolumaht on 12 897 mln m<sup>3</sup>.<sup>65</sup> Kuigi veekasutus sõltub olulisel määral puidu väärindamise tehnoloogiast, siiski saab näitena tuua puitmassi tootmise tehnoloogia, kus umbes 170 tuht paberimassi kohta kulub umbes 2,4 mln m<sup>3</sup> vett. Tähele tasub panna, et Eesti keskmine pinnavee äravoolumaht pole siiski ühtlaselt jaotunud ja nii on parimad kohad veemahukate tehnoloogiate rakendamiseks siiski suuremate jõgede nagu **Emajõgi, Pärnu jõgi, Narva jõgi läheduses**. Tehnoloogilises protsessides on eelistatud madala BTH ja elektrolüütide sisaldusega magevesi, sest nõuab oluliselt vähem ressursse vee kvaliteedi vastavusse viimiseks tehnoloogilise protsessi esitatavate nõuetega. Kahtlemata ei tohi tootmise asukoha valikul eirata keskkonnamõjusid.

**Tabel 3.4 Vesikondade pindalad**

Vesikond	Vesikonna pindala, km <sup>2</sup>	Vooluveekogumite pikkus vesikonnas kokku, km <sup>2</sup>	Maismaa seisuveekogumite veepinna pindala vesikonnas kokku, km <sup>2</sup>	Rannikuveekogumi veepinna pindala vesikonnas kokku, km <sup>2</sup>
Lääne-Eesti vesikond	45353	6055	76	12944
Ida-Eesti vesikond	23877	5223	1896	1552
Koiva vesikond	1307	373	9	0
<b>Kokku</b>	<b>70537</b>	<b>11651</b>	<b>1981</b>	<b>14497</b>

### 3.5 ENERGIA

Eesti on andnud Euroopa Liidule lubaduse 2035. aastaks põlevkivist energia tootmine lõpetada. Samal ajal puudub aga endiselt alternatiiv piisavas koguses stabiilselt taskukohase hinnaga elektri tootmiseks. Statistikaameti kohaselt tootsid Eesti elektrijaamad 2023. aastal kokku 5686 GWh elektrit ja 4323 GWh soojust.<sup>66</sup> Püüeldes Pariisi kliimaleppe eesmärkide poole toota taastuvenergiat, on puidujäätmete kogus taastuvenergia tootmiseks olnud esikohal, ulatudes 2023. aastal 1 312 GW tunnini<sup>66</sup> moodustades pea poole kogu taastuvenergia toodangust (2836 GWh). Seega läheb suur kogus puidujäätmeid, mida saaks kasutada lisandväärtuse loomisel endiselt põletamisele. Taastuvenergia osakaal energia lõpptarbimises oli 2022. aastal 38.5% ja vähemalt pool Eesti elektrist tuleb endiselt põlevkivist<sup>67</sup>. Hetkeolukorras, kus Eesti elekter on kallim lähiriikide omast, olles näiteks Soomes erinevatel ajahetkedel keskmiselt 10-20 korda madalam kui Eestis, on jätkuva konkurentsivõime säilitamiseks taristu arendamine kriitilise tähtsusega.

Energia majanduse arengukava 2035 kohaselt<sup>68</sup>: 2035. aastaks tuleb Elingil tagada Eestile piisava mahuga uute juhitavate elektritootmisvõimsuste rajamine. Juhitava võimsuse vajadus on praegu 1000 MW, pärast 2030 hinnanguliselt 1200-1600 MW. Uute juhitavate maagaasil ja biogaasil töötavate jaamade rajamine võimaldab järk-järgult sulgeda vanimad põlevkiviplokid vähendades seonduvat keskkonnamõju, salvestite rajamine toob alla reserveid hoidmisega seotud kulusid ja vähendab elektri hinna volatiilsust. Samuti on püstitatud eesmärk jõuda tänaselt 35% tasemelt elektrienergia netoimpordis null protsendini.

<sup>65</sup> Keskkonnaagentuur. Vaadatud: 14.07.2025 [Link](#)

<sup>66</sup> Eesti statistika: energeetika. Vaadatud 10.06.2025 [Link](#)

<sup>67</sup> Eesti statistika: põlevkivist elektri tootmine kasvas eelmisel aastal. Vaadatud 25.07.2025 [Link](#)

<sup>68</sup> Eelnõu lühikokkuvõte vaadatud 14.11.2025 [Link](#)

Elektri tootmise investeringute soodustamiseks viiakse 2025-2026 läbi vähempakkumine kuni 2 TWh taastuvelektri turule toomiseks.

Tootmissisendina kulub energiat esimese põlvkonna krahti pulpimise tehastes (kuni 20. saj. 70. a.),<sup>69</sup> termomehaanilises väärimises (nt Estonian Cells puhul elektrienergiat 1,3 MWh/ADT)<sup>72</sup> ja fermentatsioonitehnoloogiates (2-2,9 MWh/t EtOH).<sup>70</sup> Kui fermentatsioonitehnoloogiates kasutada ligniini põletamist energiatootmiseks, siis vähemalt tehase elektrienergia vajadus suudetakse enamasti katta. Teise põlvkonna krahti pulpimise tehastes on saavutatud pea täielik energiaintegratsioon ja seetõttu tekib energia ülejääk, mida saab turustada. Ligikaudne tootmismahu piir energiasõltumatuks tootmiseks on u 1 mln t/a tselluloosi. Vt ka käesoleva töö pkt 4.2.2.

Eesti positsiooni parandamine ja mitmekesistamine nõuab mitmetahulist ja pikaajalist lähenemist. Samuti peab Eesti esmaseks prioriteediks seadma energia salvestusvõimsuse kui ka tootmisvõimsuse tagamise. Omamata taskukohast elektrit ja piisavat tootmisvõimsust, on Eesti tööstuse jätkumine ja edendamine, küsimärgi all, sest praeguste volatilsete energiahindade olukorras ei ole Eesti tehaste rajamiseks atraktiivne piirkond. Asjaolu, et Eesti ettevõtted ei pea kodumaal tootmist otstarbekaks, ilmestab muuhulgas ka Fibenoli tehase rajamine Lätti. Tehast rajada soovivate rohkelt energiat kasutavate ettevõtete vahel käib olemasoleva tootmisvõimaluse üle tugev rebimine ja kõigile seda ei jätkuigi<sup>71</sup>. Olukorra parandamiseks peab riik soodustama salvestusvõimsuse tehnoloogiate adopteerimist ja arendamist, näiteks vee- liiva ja gravitatsioonipatareide ning nano-pulbertehnoloogiaga liitiumioon akude näol. Samuti on oluline jätkuv päikese- ja tuuleenergia, eelkõige meretuuleparkide taristu laiendamine, kuid ka ilmastikust sõltumatute varude tagamine, näiteks biogaasi ja tuumaenergia jaamad. Kuna Eesti ei suuda kogu vajaminevat energiat ise toota, peame tipukoormuste katmiseks hoidma ja tõhusaid sidemeid Läänemere riikidega ning tagama Läänemerealuse taristu kaitse.

### 3.6 TEHNOLOOGIATES VAJALIKUD MATERJALID

Kõigis tehnoloogiates on peale põhitoorme, puidu, tarvis kasutada ka muid materjalisisendeid, mis on seotud kas puidu ettevalmistamise, töötlemise või tselluloosi monomeerideks ehk suhkruteks konverteerimisega.

Näiteks puitmassi tootmisel haavapuidust termokeemilises protsessis on peale puidu (ca 2,6 m<sup>3</sup> puitu puidumassi tonni kohta) tarvis ka vesinikperoksiidi, NaOH, naatriumsilikaati, EDTA ja väävelhapet. Kemikaalide üldkulu on umbes 140 kg/t toodangu kohta ja vee kulu umbes 14 m<sup>3</sup>/t toodangu kohta.<sup>72</sup>

Keemilise pulpimise tehnoloogiate (sulfaat ja sulfitkeedus) juures kasutatakse baaskemikaale NaOH (ca 42% kogumahust), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub> ja S, kokku umbes 30% kogumahust, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>S ja NaHSO<sub>3</sub>, umbes 20% kogumahust ja Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, umbes 6% kogumahust. Baaskemikaalide kulu on keskmiselt 74 kg/t pulbri kohta. Lisaks nn baaskemikaalidele kasutatakse veel kemikaale valgendamiseks, millede kulu on keskmiselt 42 kg/t valgendatud tselluloosimassi kohta ja protsessikemikaale (kogukulu umbes 4,7 kg/t tselluloosimassi kohta), millede ülesanneteks on tselluloosikiu kvaliteedi tõstmine või taaskasutusprotsesside hõlbustamine. Viimasesse rühma kuuluvad sellised reagentid nagu flokulandid, stabiliseerivad reagentid, keeduse lisandid jne.<sup>73</sup>

#### 3.6.1 FERMENTATSIOONITEHNOLOOGIATEKS VAJAMINEVAD RESSURSID

Fermentatsiooni protsessideks läheb lisaks puidust saadavale süsinikule vaja veel mikroorganisme, söötme komponente nagu vitamiinid ja mineraalained, ensüüme (suhkru fermentatsiooni puhul), elektrit ja

<sup>69</sup> A. Orr, *Summer Studi on Energy Efficiency in Industry Proceedings*, 1995, 1, 191-203.

<sup>70</sup> L. R. Lynd, et al. ,*Energy Environ. Sci.*, 2022, 15, 938-990. <https://doi.org/10.1039/D1EE02540F>

<sup>71</sup> Intervjuu ettevõttega UpCatalyst

<sup>72</sup> *Heinz Group Annual Report 2016*. [Link](#)

<sup>73</sup> *Auhorn, W.J. & Niemela, Klaus. (2007). Process chemicals for the production of chemical pulp. Professional Papermaking. 4. 10-20. [Link](#)*

vett. Täpset vajaminevat vee ja energia kogust fermentatsiooni tehnoloogiateks on väga raske hinnata, kuna see sõltub toodetavast produktist, söötme suhkru kogusest, saagisest, mastaabist kui ka järelpuhastuses kasutatavatest protsessidest. Vaba turumajanduse tingimustes on võimatu ennustada, milline tehas võiks ennast Eestisse positsioneerida, saame vaid investeringute meelitamiseks tagada ettevõtetele soodsad tingimused. Kuna kemikaale, mida saaks toota fermentatsioonipõhiselt, ei toodeta praegu Eestis ka konventsionaalsetel meetoditel, ei saa siinkohal esitleda võrdlust ühe või teise ressurside kasutamise kohta, seda taaskord võimalike teoreetiliste tehaste tingimuste kombinatsioonide rohkuse tõttu. Saame vaid esitleda mõned näited. Bioetanooli tootmiseks läheb vaja protsessi maksimaalselt optimeerides minimaalselt 2.8 L vett 1 L toodetud etanooli kohta ja 1,9 kWh/kg EtOH.<sup>74</sup> Biovesiniku tootmiseks mahul 60 kg/h läheb sõltuvalt tehase sisseseadest tarvis 9.13 kuni 34.28 kWh/kg<sup>75</sup> energiat, millest suurem osa on tarvilik soojusena ja väiksem elektri näol. Seejuures tuleb tähele panna, et fermentatsioonitehased toodavad töö käigus rohkelt soojust. Kasutatavat jahutusvett tuleks ära kasutada näiteks Soome eeskujul kasvuhoonete kütmiseks, soodustades nii toidu tootmist; jahutusvee optimaalne ära kasutamine peaks olema projektide hindamisel (näiteks rahastuse taotlemisel) tingimuseks. Samuti toodi välja, et kõige olulisemat rolli bioetanooli vee tarbimises mängib just saagis. Toodud resurssidele lisanduvad puidusuhkrute tootmiseks vajaminevad ressursid. Küll aga on olemas analüüs, mis hindab vanapaberist bioetanooli tootmist, ehk vaatleb sarnast protsessi tervikuna, hõlmates nii tselluloosest materjalist suhkrute hüdrolyüsi kui ka edasist fermentatsiooni. Sellise protsessi energiakuluks saadi 95 kWh 100 g lignotselluloosse biomassi kohta.<sup>64</sup>

### 3.7 LÄTI, LEEDU JA POOLA PUIDUBILANSS

Analüüsides naaberriikide puidubilanssi saame ülevaate toorme kättesaadavusest ja selle hindadest. Regionaalse koostöö ja konkurentsi tingimustes võivad naaberriigid samaaegselt meiega nii konkureerida kui ka pakkuda koostöövõimalusi, st kui mõnes riigis on puidu hind madalam või toodetakse pooltooteid (nt saematerjal, pakke- või paberipuit), siis saab Eesti ettevõtetele väljakutseks, et seda puitu ja/või pooltoodet siin väärindada ja eksportida suurema lisandväärtusega. Tööstusliku planeerimise mõttes on oluline hinnata, milliseid puiduliike ja millistes kogustes võiks Eestisse regulaarselt tuua. Läti, Leedu ja Poola puidubilanssi väljavõte on esitatud Tabel 3.5 Läti, Leedu ja Poola puidubilanssi väljavõte

Tabel 3.5 Läti, Leedu ja Poola puidubilanssi väljavõte

Näitaja / Riik	Läti	Leedu	Poola
Metsade pindala (milj. ha) <sup>76</sup>	3,41	2,200	9,26
Metsade osakaal riigi territooriumist (%) <sup>76</sup>	53	33	29,6
Peamised puuliigid ja osakaal (%) <sup>76</sup>	mänd 39,4; kuusk 20,4; kask 28,4; haab 2,5; lepp 8,0	mänd 42,0; kuusk 22,8	mänd 58,1; kuusk 6,2; kask 7,3; lepp 5,7 tamm 7,7; pöök 5,9;
Puistute kogutagavara (mln m <sup>3</sup> ) <sup>76</sup>	672,32	559,13	2 656

<sup>74</sup> Pfromm, P. H. (2008). The minimum water consumption of ethanol production via biomass fermentation. *The Open Chem. Eng. J.* 2, 1-5. <http://dx.doi.org/10.2174/1874123100802010001>

<sup>75</sup> Markowski, M., et al. (2010), *J. Cleaner Prod.* 18 (1), S81-S87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.02.027>

<sup>76</sup> Andmebaas: *Global Forest Resources Assessments*. Vaadatud 23.07: [Link](#)

Näitaja / Riik	Läti	Leedu	Poola
Aastane raieaht (milj. m <sup>3</sup> )	12–13 <sup>77</sup>	7 <sup>78</sup>	41,66 (2023) <sup>79</sup>
Aastane juurdekasv (milj. m <sup>3</sup> )	~25 <sup>77</sup>	–	–
Tööstuslik kasutus (milj. m <sup>3</sup> )	–	6,1	39,85
Peamised puuliigid ja nende hinnad	2024. aasta kolmandas kvartalis tõusid männi saepalkide hinnad (18–27,9 cm läbimõõduga) umbes 96 €/m <sup>3</sup> -ni ja kuuse saepalkide hinnad umbes 93 €/m <sup>3</sup> -ni. Väiksema läbimõõduga (14–17,9 cm) männi saepalkide hinnad tõusid 95 €/m <sup>3</sup> -ni ja kuuse saepalkide hinnad 88 €/m <sup>3</sup> -ni. <sup>80</sup> Läti lehtpuu saematerjali hinnad varieeruvad sõltuvalt kvaliteediklassist ja turuolukorrast.	saematerjali (kask, kuusk, mänd) hinnad 2024. aasta augustis olid B/C kvaliteediklassi puhul keskmiselt 91,88 €/m <sup>3</sup> , samas kui D klassi hinnad langesid 76,41 €/m <sup>3</sup> -ni. <sup>81</sup> Pakke- ja paberipuidu hinnad olid vastavalt 64,61 €/m <sup>3</sup> ja 56,35 €/m <sup>3</sup>	oli 2023. a eksporditud tööstusliku ümarpuidu hind keskmiselt 52 €/m <sup>3</sup> , mis näitas 32,7% langust võrreldes eelneva aastaga. Tihedama puidu (nt briketid, liimpuit) ekspordihind oli 1 150 €/tonn, kuid hinnad varieerusid oluliselt sihtturgude lõikes. <sup>82</sup>

### 3.8 KOKKUVÕTE

Kokkuvõtteks vaadeldi antud peatükis Eestile olulisi, kuid vähemkasutatud sekundaarsetest ressurssidest, nende kogustest, kasutusvõimalustest ja seotud kitsaskohtadest. Käsitletakse põllumajanduslikke jääke, tööstusjäätmeid, veeressursse, energia tootmise probleeme ning naaberriikide puidubilanssi. Allpool on toodud olulisemad tähelepanekud.

Puidujäätmeid tekib Eestis u 3,9 mln m<sup>3</sup> aastas (vt joonis 3.1), mis moodustab teoreetilise maksimumi puidu keemilise- ja bioloogilise väärindamise toormest. Eeldusel, et muu puidutööstus ei loobu oma tegevusest, st palk, saematerjal, pellet jm tooted jäävad tootmisse ka edaspidi. Sellest johtuvalt võib vaadelda sekundaarseid toormeid kui potentsiaalseid puiduväärindamise sünergiaallikaid. Põhku ja rohtset biomassi tekib umbes 0,76 miljonit tonni aastas (u 19% puidujäätmetest), millest oluline osa jääb kasutamata, kuid mille väärindamise potentsiaal on seotud biogaasi, komposti ja nn puidusuhkrute tootmisega. Tekstiiljäätmeid tekib Eestis umbes 18 000 tonni aastas, millest ringlusse läheb alla 1%. Tulevikus võiks kasutada tekstiiljäätmete ümbertöötamiseks mehaanilisi ja keemilisi meetodeid ja kahtlemata võiks üheks peamiseks väljundiks olla kiudmaterjalid. Kuna tselluloos moodustab kõigest kolmandiku tekstiilmaterjalist, siis ka antud toorme potentsiaal puiduväärindamise toormena on tänasel päeval pigem tagasihoidlik (u 0,15%). Aastas tekib Eestis ca 167 000 tonni toidujäätmeid aastas, milledest osa sobib energia tootmiseks või ümbertöötlemiseks. Samal ajal kui kasutatud toiduõli kogutakse Eestis alla 500 tonni aastas, kuigi potentsiaal on üle 1000 tonni. Pilliroo tootmiskaht oleks u 74 000 t/a, mis kasvataks lignotselluloosse toorme hulka u 2% ja tema kasutusala oleksid peamiselt biokütuste, tselluloosi või ehitusmaterjalide tootmine. Lina ja kanepit toodetakse Eestis väikeses mahus, kuid seevastu on Eestis olemas töötlemistaristu (nt kiudude eraldamine). Potentsiaalsed kasutusala oleksid bioplastide või komposiitmaterjalide tootmine. Toorme mahtude seisukohast on lina ja kanep marginaalse väärtusega. Eestis tekib aastas 100 000 tonni vanapaberit, millest kohapeal töödeldakse ümber vaid

<sup>77</sup> Geography of Latvia. [Link](#).

<sup>78</sup> Jasinevičius, G., Lindner, M., Verkerk, P. J. & Aleinikovas, M. (2017). Assessing Impacts of Wood Utilisation Scenarios for a Lithuanian Bioeconomy: Impacts on Carbon in Forests and Harvested Wood Products and on the Socio-Economic Performance of the Forest-Based Sector. *Forests*, 8(4), 133. [Link](#).

<sup>79</sup> Statistics Poland (2024). *Forestry in 2023*. [Link](#).

<sup>80</sup> Vonwood (2024). *Latvian Sawlog Prices Show Growth but Remain Below Record Highs*. [Link](#)

<sup>81</sup> Baltpool (2024). *Timber Exchange trade statistics August of 2024*. [Link](#).

<sup>82</sup> Indexbox (2025). *Poland - Industrial Roundwood - Market Analysis, Forecast, Size, Trends and Insights*. [Link](#).

10 000 t. Ülejäänud 90 000 t (ca 2,3% puidujäätmete mahust) on sobilik puidusuhkrute tootmiseks. Vesi ja energia: esimene on oluline faktor biomassi töötlemisel, sh biogaasi- ja bioetanoolitehastes ning teine on oluline energiaallikas - puidutööstuse jäägid annavad hinnanguliselt 2,8 TWh energiat aastas. Naaberriikidest olulisema paberipuidu ja keemiliseks ning mikrobioloogiliseks väärindamiseks kasutatava muu toorme kogused on suurimad Rootsis ja Soomes, kuid sealse materjali kasutamiseks Eestis on tõenäosus väikse, sest sealne tööstus kasutab seda ise. Teistest Läänemere riikidest on ülevaates kajastatud peamised lähiriikide metsaressursi näitajad, kuid käesoleva töö juures selle kasutamise võimalusi ei analüüsitud.

## 4. PUIDU KEEMILISE JA MIKROBIOLOOGILISTE TEHNOLOOGIATE JA TOOTEGRUPPIDE LÜHIÜLEVAADE

See peatükk annab põhjaliku ülevaate olemasolevatest ja arenevatest puidu väärindamise tehnoloogiatest, liigitades need põlvkondadesse. Esitatud on puidu keemilise ja mikrobioloogiliste tehnoloogiate ja tootegruppide lühiülevaade generatsioonide vaates (tehnoloogiline valmidusaste 6-9).

### 4.1 AJALOOLINE TAUST

Puidu biomassi keemiline ja biokeemiline töötlemine on olnud olulisel kohal juba sajandeid, pakkudes väärtuslikke materjale ja kemikaale erinevatele tegevustele. Üldistatult koosneb puit keemiliselt kolmest biopolümeerist: tselluloos 40–50%, mis on glükoosijääkidest moodustunud lineaarseahelaga polümeer, hemitselluloos 20–30%, mis on erinevate suhkrute polümeer ja ligniin (20–30%), mis on polüfenoolne polümeer. Veel on lehtpuidus 1-5% ja okaspuidus 2-7% madalamolekulaarseid ekstraktiivaineid<sup>83</sup>. Puidu termokeemiline töötus ja selle tulemitte rakendamine algas juba tule kasutusele võtuga inimeste poolt. Mesopotaamias ja antiikses Egiptuses kasutati puutuhka seebikivi valmistamiseks seebi tegemisel. Antiikajal leidsid puidust saadud tõrv ja pigi kasutust nii ehitistes, esemete valmistamisel liimidena kui ka ravimitena. Keskajal hakkasid levima esimesed keemilised töötlemismeetodid, kus kasutati leeliselisi ja happelisi lahuseid, et eraldada puidu koostisosi. Keskajal kasvas puidu kasutamine koos linnastumise ja käsitöö arenguga. Puit oli oluline mitte ainult ehitus- ja kütusmaterjalina, vaid ka kui keemiliste reaktsioonide lähteaine metallurgias. Puidu kuivdestillatsiooni ehk pürolüüsi tulemusena saadi näiteks puusütt, tõrva ja metanooli, mida kasutati metallide töötlemisel ja mujal. Need puidukeemia arengule aluse pannud protsessid on kasutusel praegugi.<sup>84</sup>

Trükipressi leiutamine ja areng 15. sajandil suurendas paberinõudlust, mis pani aluse uutele keemilistele ja mehhaanilistele uurimustele, et leida sobivaid alternatiive paberi kiudude saamiseks, mis lõppeks andis uue suuna puidu biomassi kasutamiseks. Puidust küll valmistati ajalooliselt kirjutamistahvleid, kuid algset olid paberi tooraineks peamiselt kaltsud ja tselluloosirikad kiudtaimed, nt. lina ja puuvill. 18. sajandi lõpus ja 19. sajandi alguses hakati pöörama rohkem tähelepanu puidule kui paberi lähteainele<sup>85</sup>.

1843. aastal avastas Friedrich Keller jahvatatud puidumassi valmistamise tehnika. Hiljem lisandunud puidu töötlemine kuuma auruga enne jahvatamist pani aluse kaasaegsete mehaaniliste ja termomehaaniliste paberimassiprotsesside arengule. Aastal 1851 tegid keemilised tselluloositehnoloogiad läbimurde, kui Charles Watt ja Hugh Burgess avastasid, et puidus leiduvaid kiudusid siduvat ligniini saab kõrge temperatuuri juures eemaldada naatriumhüdrosiidiga (NaOH). Ameeriklane Benjamin Tilghman võttis patendi kaltsiumvesiniksulfiti  $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$  kasutamiseks puidu paberimassi tootmiseks 1867. aastal, samas peaaegu kümme aastat hiljem ehitati Rootsis esimene magneesiumvesiniksulfitil  $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$  baseeruv tselluloositehas Carl Daniel Ekmani töö põhjal. Carl F. Dahli poolt 1879. aastal väljatöötatud sulfaat- ehk Kraft-protsessil põhinev tehas avati esimesena Rootsis 1890. aastal. Kuni 1900. aastate alguseni domineeris sulfitiprotsess mehaanilise töötlemise ja sulfaatprotsessi ees puidumassi valmistamisel. Aga George H Tomlinsoni poolt 1930. aastatel arendatud (patent 1938<sup>86</sup>) regenererimiskatla kasutusele võtt, mis võimaldas Kraft tehastel protsessikemikaale

<sup>83</sup> E. Sjöström. *WOOD CHEMISTRY: Fundamentals and Applications. SECOND EDITION.*

<sup>84</sup> Z. A. Szydło, "The beginnings of chemistry: from ancient times until 1661," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 94, no. 7, pp. 869–888, Jul. 2022, <https://doi.org/10.1515/pac-2022-0203>.

<sup>85</sup> D. Mboowa, "A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes," *Biomass Conv. Bioref.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2024, <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01243-6>

<sup>86</sup> G. H. Tomlinson, "Waste sulphite liquor recovery," *US2285876A*, Jun. 09, 1942, Accessed: Apr. 09, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

regeneerida ja lisaks veel laiema puidusortimendi kasutamise ja tugevamate kiude tootmise võimalus muutis Kraft-protsessi 1940. aastatest alates domineerivaks tselluloosi valmistamise meetodiks.<sup>85, 87</sup>

Nüüdseks rohkem kui 100 aasta jooksul on tselluloosi- ja paberitööstuses kasutatud tselluloosi valmistamiseks peamiselt puitu, moodustades 90-95% kogu maailmas toodetud tselluloosist (Joonis 4.1).

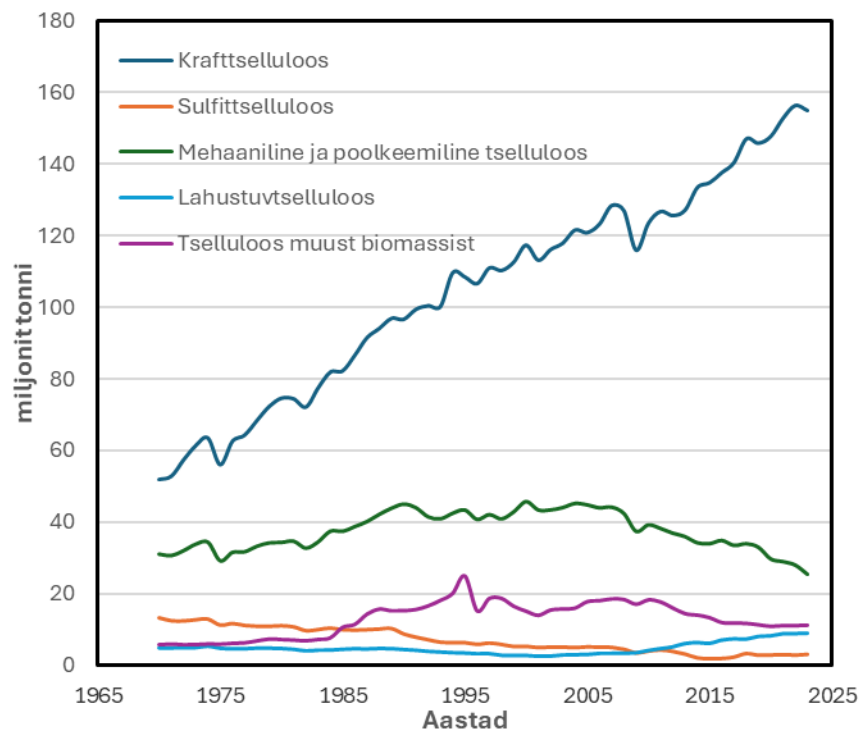
Paberimassi valmistamiseks kasutatavad puuliigid hõlmavad okaspuid, nagu harilik mänd (*Pinus sylvestris*), harilik kuusk (*Picea abies*), nulg (nt palsamnulg – *Abies balsamea*), tsuga (*Tsuga spp.*, kasutusel Põhja-Ameerikas) jm. ning lehtpuid, nagu eukalüpt (*Eucalyptus spp.* – laialdaselt kasutatav Lõuna-Ameerikas, Austraalias ja Lõuna-Euroopas), arukask (*Betula pendula*) ja sookask (*Betula pubescens*), harilik haab (*Populus tremula*). Väiksemas mahu ka vaheer, pappel, lepp<sup>85</sup>. Okaspuu puidust saab tugevama ja pikema puidukiu, mida kasutatakse tugevate paberitoodete (nt pakkepaber ja kartong) valmistamisel. Lehtpuu puit on kõva lühikesekiuline, mis sobib paremini ühtlase struktuuriga siledade ja kvaliteetpaberite jaoks, nagu trükipaber ja tualettpaber. Samas lehtpuit on saanud viimasel paarikümnel aastal suuremaks trükipaberi ja hügieenipaberi tselluloosi toormeks, mille osakaal kasvab jõudsalt. Selle peamiseks põhjuseks on kiiresti kasvavate ja kõrge tootlikkusega eukalüptistanduste rajamine põhiliselt Ladina-Ameerikas – Brasiilias ja Uruguais ning odav tootmise hind. Siiski, seoses ülemaailmselt kasvava nõudluse, puidu toorme kõrgete hindade ja metsade keskkonnasäästlikkuse küsimustega kasutatakse praegu tselluloosi valmistamiseks ka muud toorainet kui puitu nagu põllumajanduse jäägid (riisivarred, õled, puuvill, lina, pilliroog jpm). Maailmas kasvab vanapaberi kasutuselevõtu osakaal (joonis 4.2).

Tänapäev ei ole esimese generatsiooni tselluloosi/puidumassi ja paberi valmistamise protsessid palju muutunud, kuid puitmassi- ja paberitööstus muudab traditsioonilisi tselluloosi töötlemismeetodeid parandamiseks suunatud produktide (peamiselt paber/papp) omadusi<sup>88</sup>. Tselluloosi ja paberitööstust, spetsiifiliste toodete nõudlust ja tehnoloogiate kasutust on alati väga tugevalt mõjutanud ühiskonna üldine areng ja spetsiifilised vajadused. Näiteks saaks tuua esmalt suure ajalehepaberi nõudluse kasvu ja sellele järgnenud printeripaberi vajadus arvutite ja printerite tekkega 20. sajandi lõpus. Samas digiühiskonna tulek on viinud ajalehepaberi ja printimisepaberi nõudluse kahanemisele ja elektroonika areng on tinginud suure pakkepaberi ja -papi vajaduse, mis on vähendanud sulfittselluloosi, mehaanilise ja termomehaanilise puidumassi tähtsuse osakaalu (joonis 4.2).

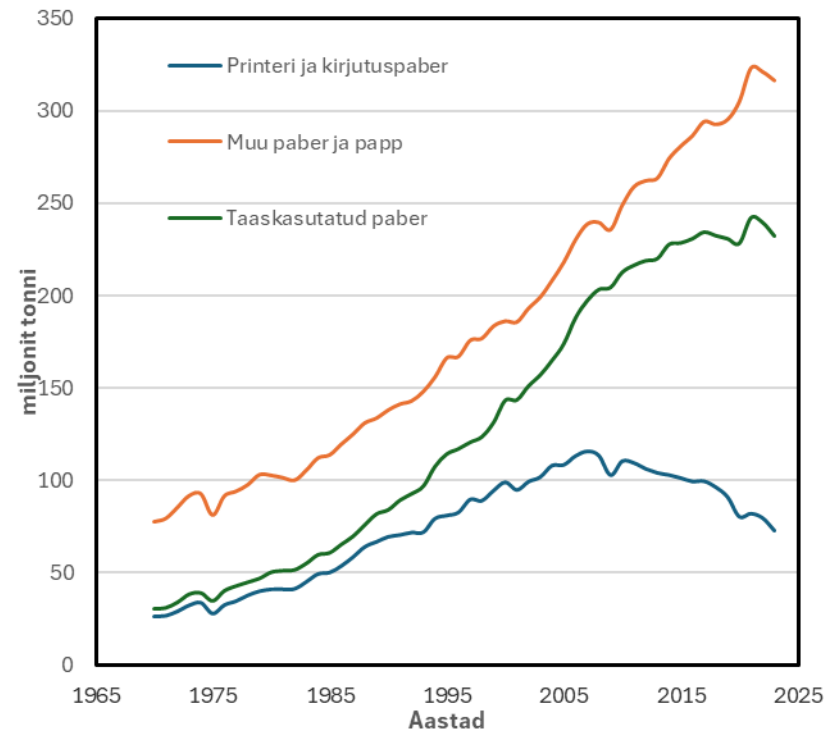
---

<sup>87</sup> R. Rinaldi et al., "Paving the Way for Lignin Valorisation: Recent Advances in Bioengineering, Biorefining and Catalysis," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 55, no. 29, pp. 8164–8215, 2016, <https://doi.org/10.1002/anie.201510351>

<sup>88</sup> M. Ragnar, G. Henriksson, M. E. Lindström, M. Wimby, and R. Süttinger, "Pulp," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, John Wiley & Sons, Ltd, 2013, pp. 1–89. [https://doi.org/10.1002/14356007.a18\\_545.pub3](https://doi.org/10.1002/14356007.a18_545.pub3)



Joonis 4.1 Mehaanilise puitmassi ja keemilise tselluloosi tootmine maailmas, mln t <sup>89</sup>



Joonis 4.2 Paberi tootmine maailmas, mln t

<sup>89</sup> Allikas: FAO. 2025. Forestry production and trade. In: FAOSTAT. Rome. Viidatud 1. märts 2025. [Link](#)

Samuti on muutused mõjutanud traditsiooniliselt kvaliteetse tselluloosi ja paberi tootmisega tegelevaid riike, nt Soome ja Rootsi olid väga suured printeripaberi tootjad ning sisuliselt kogu mahus eksportijad (joonis 4.3). Soomes on olnud traditsiooniliselt vertikaalselt integreeritud tootmine, kus valmistatavast tselluloosist tehti ka soovitud lõpptoode, nüüd aga on tselluloosi poolproduktina eksportimisel suur osa, nt Hiina. Viimase 20. aasta jooksul pole Soomes keemilise tselluloosi tootmine keskmiselt kasvanud, aga eksport poolproduktina on kahekordistunud. Pakkimispaberit ja muid pakendeid on kasulikum/optimaalsem valmistada kasutuskohas, kuna suurem kaal ja maht võrreldes kerge tselluloosiga muudaks transpordi kallimaks. Hiina plahvatuslik tööstuslik areng, tootmise kasv on neist teinud suurima pakendipaberi ja ühiskondlik areng hügieenipaberi tootja, mis tingib ka suure paberitselluloosi impordi Euroopast, Lõuna-Ameerikast jm. Sellest kõigest saab järeldada, et tselluloosi ja paberi sektor on väga tihedalt seotud ülemaailmsete muutustega, majanduse kasvu/jahtumise, globaliseerumise ja riikide vaheliste tollidega, mis mõjutavad kogu tootmisektorit, mille produktid pakendatakse lõpuks paberisse.

Lisaks eelmainitud mõjudele on tselluloosi ja paberi tootmine siiski üks suurimaid tööstussegmente vee- ja energiakasutuse ning kogu keskkonda paisatavate heitmete poolest, mis on olnud üheks peamiseks tõukeks tehnoloogiate moderniseerimiseks selles sektoris nii mehaaniliste, keemiliste kui ka bioloogiliste meetodite arendamisel<sup>90</sup>. Üheks näiteks on väävelorgaaniliste ühendite tekitatud halvalõhnaline heide, mille lahenduseks pakuti juba 1931. aastal esmakordselt orgaaniliste lahustite kasutamist ligniini eraldamiseks tselluloosi saamisel kui alternatiiv väävli põhiste protsessidele<sup>91</sup>. Mason võttis 1926. aastal kasutusele ja patenteeris auruplahvatuse biomassi eeltöötlusprotsessina<sup>92</sup>, mis võimaldas pehmetes tingimustes, ilma tugevate kemikaalide ja ekstreemsete termofüüsikaliste tingimusteta eraldada puidu põhilisi komponente ning kaasata ka tundlikud bioloogilised töötlemise meetodid biomassi väärimiseks. Lisaks võimaldavad sellised lähenemised väärimada puidutööstuse selliseid jääke nagu nt saepuru, mis pole paberikiudude saamiseks sobilikud ja kasutatakse siiani enamasti energiaks. See lõi aluse 20. sajandi lõpul ja 21. sajandi alguses teise generatsiooni biomassi töötlemise tehnoloogiate arengule ja kommertsialiseerimisele, mille fookus on suunatud kogu ressursi täielikule ja jätkusuutlikule kasutamisele võimaldades lisaks tselluloosile väärimada ka ligniini ja hemitselluloosi.

Järgnevalt on toodud koondülevaade puidu biomassi keemiliste, biokeemiliste ja termokeemiliste töötlemistehnoloogiatest. Traditsioonilised keemilised tselluloositehnoloogiad arenesid järk-järgult, võimaldades paremat ressursside kasutust ning laiendades toodete spektrit. Tänapäeval on lisandunud uued, keskkonnasõbralikumad ja efektiivsemad meetodid, mis võimaldavad kogu biomassi väärimist. Lisaks keemilistele ja termokeemilistele protsessidele on hakanud suurenema ka biokeemiliste ja mikrobioloogiliste töötlemistehnoloogiate osakaal, mis võimaldavad veelgi paremat ressursside kasutamist ning keskkonnamõjude vähendamist. Tänapäeval on fookuses kogu biomassi tõhus ja keskkonnasõbralik väärimine.

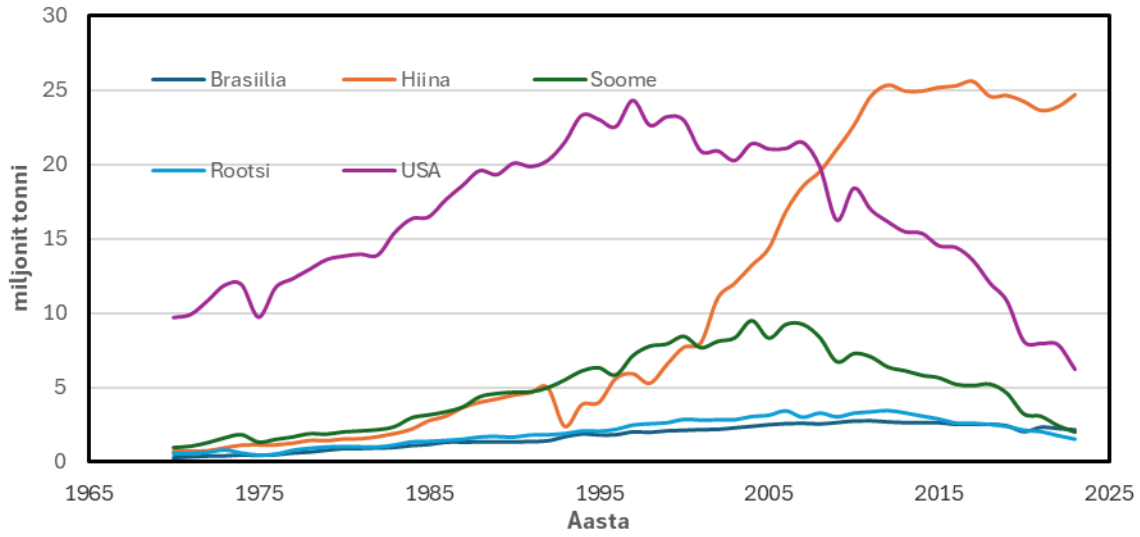
---

<sup>90</sup> T. K. Das and C. Houtman, "Evaluating chemical-, mechanical-, and bio-pulping processes and their sustainability characterization using life-cycle assessment," *Environmental Progress*, vol. 23, no. 4, pp. 347–357, 2004, <https://doi.org/10.1002/ep.10054>

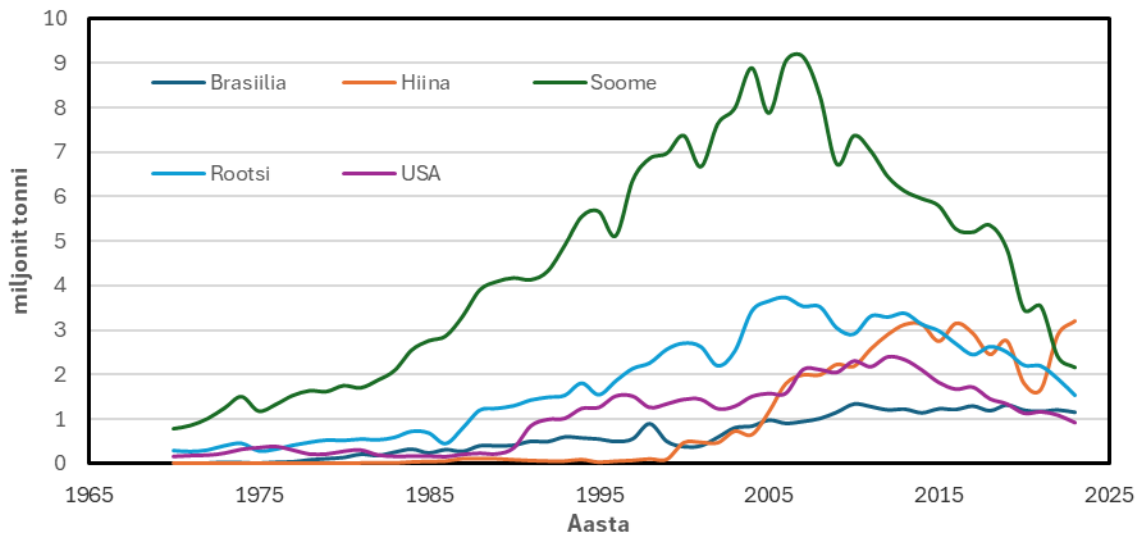
<sup>91</sup> Th. Kleinert and K. v. Tayenthal, "Über neuere Versuche zur Trennung von Cellulose und Inkrusten verschiedener Hölzer," *Angewandte Chemie*, vol. 44, no. 39, pp. 788–791, 1931, <https://doi.org/10.1002/ange.19310443903>

<sup>92</sup> W. H. Mason, "Process and apparatus for disintegration of wood and the like," US1578609A, Mar. 30, 1926, Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

Printeri- ja kirjutuspaberi tootmine, miljonit tonni



Printeri- ja kirjutuspaberi eksport, miljonit tonni



Joonis 4.3 Printeri- ja kirjutuspaberi tootmine (ülal) eksport (all) mln t (Hinnangulised väärtused)<sup>93</sup>

## 4.2 ESIMENE PÕLVKOND: TRADITSIOONILISED TSELLULOOSI JA PUIDUMASSI KEEMILISED TEHNOLOOGIAD

Traditsioonilised tselluloosi tootmise meetodid (vt. Tabel 4.1) on olnud kasutusel juba üle sajandi, pakkudes peamiseid lahendusi paberi ja kartongi tootmiseks. Paberit toodetakse enamasti kolmeastmeliselt sisaldades puidust puidumassi või -tselluloosi (eraldatud kiuline materjal) valmistamist, vajadusel pleegitamist ja paberi tegemist ehk viimistlemist. Paberimassi valmistamise peamine eesmärk on eemaldada ligniin võimalikult suures ulatuses, säilitades samas puiduki struktuuri. Need tehnoloogiad

<sup>93</sup> FAO. 2025. Forestry production and trade. In: FAOSTAT. Rome. Viidatud 01 Märts 2025. [Link](#)

hõlmavad erinevaid keemilisi ja mehaanilisi protsesse, mille valik sõltub paljudest asjaoludest nagu puitmaterjali liik või soovitud omadused paberi rakendamisel.

**Tabel 4.1 Traditsioonilised tselluloosi tootmise meetodid<sup>94</sup>**

Toote nimetus (eesti keeles)	Inglisekeelne nimetus	Tootmismeetod	Saagis puidust (%)	Iseloomustus / märkus
<b>Tselluloos</b>	Chemical pulp	Keemilised meetodid	< 50	Keemiliste meetoditega saadud toode.
<b>Pooltselluloos</b>	Semichemical pulp	Keemilised meetodid	55–80	Keemiliste meetoditega saadud toode.
<b>Puidumass</b>	Mechanical pulp	Mehaanilised meetodid	> 80	Sisaldab enamasti kõiki puidu keemilisi komponente.
<b>Defibröörpuitmass (GW)</b>	Groundwood (GW)	Ainult mehaaniline	95–98	Jahvatatud puit mehaanilisel teel.
<b>Termomehaaniline puitmass (TMP)</b>	Thermo-mechanical pulp (TMP)	Mehaaniline + kuumtöötlus	85–95	Kiudude eraldamine kõrge temperatuuri ja mehaanilise töötuse abil.
<b>Keemiline puitmass (CMP)</b>	Chemi-mechanical pulp (CMP)	Kemikaalidega immutamine + mehaaniline töötus	85–90	Laastud immutatatakse kemikaalidega ja töödeldakse mehaaniliselt.
<b>Keemilis-termiline puitmass (CTMP)</b>	Chemithermomechanical pulp (CTMP)	Kemikaalidega immutamine + mehaaniline jahvatus kõrge temperatuuril	80–90	Võib kaasneda keemiline pleegitus, et saavutada valgedus.
<b>Pleegitatud keemilis-termiline puitmass (BCTMP)</b>	Bleached chemithermomechanical pulp (BCTMP)	CTMP + keemiline pleegitus	80–90	Pleegitatud versioon CTMP-st, et saavutada suurem valgedus.

Tänapäeval kasutatakse endiselt neid klassikalisi mehaanilisi-keemilisi protsesse, kuigi need on läbinud olulisi täiendusi ja modifikatsioone. Tehnoloogiaid on arendatud ning muudetud efektiivsemaks, et suurendada saagikust ja skaleeritud märkimisväärselt. Meetodite arendamine on keskendunud nii energiatõhususele, kemikaaliefektiivsusele, kõrvalsaaduste väärdamisele kui ka keskkonناسäästlikkusele. Tänapäeval moodustab Kraft-protsess hinnanguliselt üle 80% maailma tselluloositootmisest, samas kui sulfitkeet on jäänud 5% tasemele. Termomehaanilised ja keemilis-termomehaanilised protsessid katavad ligikaudu 10–15% turust, peamiselt ajalehepaberi ja odavama kartongi tootmiseks.

#### 4.2.1 PEAMISED TEHNOLOOGIAD

**KRAFT-PROTSESS** – on levinumaid tselluloosi tootmise keemilisi meetodeid, mille käigus keedetakse puitu tugevas leeliselises keskkonnas pH-l üle 12, tavaliselt naatriumhüdroksiidi (NaOH) ja naatriumsulfiidi (Na<sub>2</sub>S) lahuses, temperatuuril 155-180 °C ja kõrgendatud rõhul. Protsessi eesmärk on puitmassist eemaldada ligniin, mis toimib tselluloosikiude siduva "liimina", nii eemaldatakse ka osaliselt hemitselluloos.

Eelised: Kraft-protsessi pikaajaline edu seisneb anorgaaniliste keedukemikaalide taaskasutamises. Regeneerimiskatlas põletatakse must leelis (keedulahus, mis sisaldab eraldatud ligniini, hemitselluloosi ja ekstraktiivaineid, nagu rasvad, vaigud ja terpeenid), et regeneerida Na<sub>2</sub>S läbi taandamisreaktsiooni ligniinis ja hemitselluloosis sisalduva süsinikuga (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 2C → Na<sub>2</sub>S + 2CO<sub>2</sub>). Lisaks toodab regeneerimiskatel protsessis kasutatavat soojusenergiat ja kõrgsurveauru, millega saab toita turbogeneraatoreid elektri tootmiseks.<sup>87</sup> Kaasaegsed skaleeritud kraft-tselluloositehased võivad toota märkimisväärset elektrienergiat ülejääki, mis sageli müüakse kohaliku elektrivõrku. Tulemuseks on

<sup>94</sup> Primary Wood Processing Principles and Practice by JOHN C.F. WALKER

suhteliselt puhas tselluloos saagikusega 40-55%, toote edasine pleegitamine vähendab saagikust. Toorainena sobib nii leht- kui ka okaspuit.

Peamised produktid: pleegitatud lehtpuidu Kraft tselluloos (BHKP): sanitaartooded, printimis- ja kirjutuspaber ning eripaber; pleegitamata Kraft tselluloos (UKP): üldiselt saadakse okaspuidust, peamiselt pakenditoodete valmistamiseks (Horizon Tselluloosi ja Paberi AS); pleegitatud okaspuidu Kraft tselluloos (BSKP): suure tugevusega kartongide ja pakkematerjalide valmistamiseks. Kraft tehnoloogia on aluseks mitmetele spetsiaalkasutusega tselluloosidele nagu näiteks kohev tselluloos (fluff pulp) või mikrofiibrillitud tselluloos (MFC), mille valmistamine vajab lisatöötusi ja eelistatud tooret. Kohevast tselluloosist tehakse vett imevaid hügeenitarbeid nagu mähkmed ja valdavalt tehakse seda vähese vaiguga okaspuidust (nt Tõrvikumänd). Ka lahustuva tselluloosi saamisel kasutatakse Kraft tehnoloogiat (vt. Lahustuv tselluloos). Kraft-protsessist saab osaliselt eraldada ka sulfaattallõli ja -tärpentini, mis leiavad rakendust nt kütuste ja pindaktiivsete ainete tootmises.<sup>95</sup>

Kraft protsessil on ka mitmeid puudusi, millest paljud on seotud keskkonna probleemidega. Efektiivsuse ja majandusliku jätkusuutlikkuse tagamiseks, keskkonnanõuete täitmiseks on tänapäeval skaleerimine oluline, mis nõuab ülisuuri investeeringuid, aga ka puidu ressursi olemasolu. Miinusteks on madal saagikus, suur magevee vajadus, kaasnedavad lõhnareostus (tänapäeval on väävlühendite eraldumine suuresti elimineeritud) jm keskkonda mõjutavad tegurid.

**SULFITKEET** – keemiline meetod tselluloosi tootmiseks, mille käigus keedetakse puiduhaket kõrgel temperatuuril ja rõhul koos vääveldioksiidi (SO<sub>2</sub>) ja happelise (pH 1-2) või neutraalse (pH 4-5) naatrium- (Na), kaltsium- (Ca), magneesium- (Mg) või ammonium(NH<sub>4</sub>) bisulfiti vesilahustega. Suurem osa ligniinist muudetakse vees lahustuvaks sulfoonimise teel ja samuti suur osa hemitselluloosist hüdrolüüsitakse lahustuvateks monosahhariidideks, mis võimaldab tselluloosikiud eraldada.<sup>85</sup> Saadavast keedulahusest (SSL - Spent Sulfit Liqueur), mis sisaldab ligniini ja osa hemitselluloosi, põletatakse protsessi omatarbe energia saamiseks (nagu must leelis Kraft-protsessis). Sulfittselluloosi peamised eelised Kraft tselluloosi ees on heledus, kergesti valgendatav ja kergesti töödeldav tselluloos, mõne võrra suurem tselluloosi saagis (kuni 55%) ja vähem poorsena vett imav ning väiksemad väävlühendid (eriti Mg-aluse korral). Tänu laiale pH tingimuste muutmise võimalustele on võimalik saada eri tüüpi ja kvaliteediga sulfittselluloosi, millel on lai kasutusala. Sulfitpuhastusprotsessi kasutatakse tänapäeval peamiselt spetsiaalsete toodete valmistamiseks, nagu mikrokristalliline- ja nanotselluloos ning lahustuv tselluloos, mida kasutatakse mitmete tekstiili ja muud materjalide valmistamiseks nagu viskooskiud, tsellofaan, tselluloosatsetaat ja filterpaberid.<sup>96,97</sup> Võrreldes Kraft-tehnoloogiaga on võimalik sulfitprotsessis eraldada lihtsamalt mitmeid väärtuslike kõrvalsaadusi, mis tõstab samuti üldist saagikust puust. Protsessis lahustatud lignosulfonaat on ainus suures mahus turul olev ligniin, hinnanguliselt 1 miljonit tonni aastas<sup>98</sup>. Lignosulfonaat, väärtuslik sulfittselluloosi tootmise kõrvalsaadus, on struktuuriliselt vähem modifitseeritud kui Kraft ligniin ja seda kasutatakse mitmesugustes rakendustes, sh sideainetena, dispergendina betoonis jpm. Lignosulfonaat on vanilliini tooraine.<sup>99</sup> Sulfitkeedul hüdrolüüsuvad polüsahhariidid kergelt suhkruteks, mis aga saab fermenteerida bioetanooliks ja biobutanooliks (vt. 6. Fermentatsiooni tehnoloogiad) ning saadakse ka mitmeid orgaanilisi happeid. Sulfittehnoloogia saagis C-salvestavateks toodeteks on suurem kui Kraft-tehnoloogia korral.

Sulfitkeedu puudusteks on pikaajalised keetmistsükliid, tundlikkus tooraine suhtes, suure ekstraktiivainete sisaldusega puit ei sobi (nt mänd), koore suhtes väga tundlik. Vähene tselluloosi tugevus võrreldes Krafti

<sup>95</sup> "UPM Lappeenranta Biorefinery," *The First Wood-based Diesel Producing Biorefinery | UPM Biofuels*. Accessed: May 08, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>96</sup> "Speciality Cellulose - Borregaard." Accessed: May 08, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>97</sup> "Dissolving Pulp (Sulfite) | Chemicals | PRODUCTS | Nippon Paper Group." Accessed: May 08, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>98</sup> Dr. Mikhail Yu. Balakshin et al. *New Opportunities in the Valorization of Technical Lignins*. <https://doi.org/10.1002/cssc.202002553>

<sup>99</sup> A. AG, "ANDRITZ LignaRec lignin recovery." Accessed: Apr. 24, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

meetodiga, kuna tselluloosi fiibrid lühenevad protsessis. Tänapäeval on sulfitprotsessi kasutavaid tehaseid maailmas jäänud alles vähe, kuna tööstus liigub efektiivsemate ja keskkonnasõbralikumate meetodite poole. Üldine kemikaalide taaskasutamise tõhusus on tavaliselt 50-70%, sõltuvalt kasutatava aluse tüübist (Ca, Mg, Na, NH<sub>4</sub>). Energia ringkasutus samuti madalam kui Krahti korral; sulfitvedeliku põletamine annab suure vee- ja kombineeritud SO<sub>2</sub>-sisalduse tõttu vähem netoenergiat. Sulfittehnoloogia liinid on kontsernide siseselt kasutusel koos Kraft-tehnoloogiaga, mis võimaldab anorgaanilisi kemikaale taaskasutada ja majandada.<sup>100</sup> Sulfittehnoloogia leiab siiski kasutust kaasaegsel biorafineerimisel (nt. Borregaard, Norra)<sup>96</sup> ja eeltöötusel teise põlvkonna innovaatilises biorafineerimise protsessis (AVAP Biorefinery: Enabling Net Zero™ (Thomaston, Georgia, USA).

**POOLTSELLULOOS** – osalise keemilise töötlemise protsess, mille käigus ei eemaldata kogu ligniini ega hemitselluloosi, vaid säilitatakse need osaliselt kiustruktuuris. Tüüpiliselt kasutatakse leeliselisi või happelisi keetmistingimusi madalamal temperatuuril ja lühema ajaga võrreldes täistselluloosi tootmisega. Kõige levinum on naatriumsulfiti (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) neutraalne lahus. Teised ained, mida mõnel juhul kasutatakse, on happeline sulfit, NaOH ja kraft-keeduvedelik. Pärast immutamist järgneb mehaaniline jahvatamine kiududeks. Tulemuseks on tugevam ja jäigem tselluloosikiud, mis sobib hästi jäikade toodete valmistamiseks, näiteks lainepapi sisekihtideks, pakendikartongiks ning muude mehaanilist tugevust nõudvate materjalide jaoks. Protsessi eelised on väiksem keemiliste ainete kasutamine, lühem keeduaja vajadus ja suurem saagikus (66-80 %).<sup>85</sup>

**LAHUSTUV TSELLULOOS** – saadakse sulfitprotsessiga otse või happelise eelhüdroolüüsiga enne tavalist kraft-protsessi ligniini lahustamiseks. Lahustuvat tselluloosi kasutatakse viskoos-, lyocell-kiudude, tsellofaani, CMC (karboksümetüültselluloos) ja muude tselluloosiderivaatide tootmiseks ja peab olema väga puhas, mistõttu on puidumassist vaja täielikult eraldada hemitselluloos. Happelisel sulfitkeedul hüdroolüüsitakse hemitselluloos hõlpsasti ja tselluloos saab puhtam, mida kasutatakse eelistatult viskoosi valmistamiseks (Borregaard, Norra, Lenzing AG, Austria). Aluselises Kraft-protsessiga ei saa hemitselluloosi täielikult eraldada. Selleks kasutatakse eel- või järelhüdroolüüsi happega (või veeauruga). Esimene meetod on laialt kasutusel, näiteks Bracell (RGE Group), Brasiilia<sup>101</sup>, Nippon Paper Industries, Jaapan)<sup>102</sup>. Suur miinus on väga madal saagikus sõltumata kasutatavast tehnoloogiast, jäädes 30-35% juurde töödeldavast puidumassist. Siiski kasvab lahustuva tselluloosi valmistamine jõudsalt, kuid peamiselt kiirekasvulise eukalüpti põldudega maades ((Sappi (LAV), LD Celulose (Brasiilia)<sup>103</sup>. Hemitselluloosi sisaldus puidus on tihti piirav liikide valikul. Skandinaavias on Kraft-tehnoloogia korral kasutusel olnud vaid kask, Södra Cell Mörrum tehases Rootsis<sup>104</sup> ja Soome viimases Stora Enso Enocell lahustuva tselluloosi tehases Uimaharjus (Nüüdseks enam Soomes lahustuvat tselluloosi ei toodeta). Organosolv-tselluloosi kasutatakse ka lahustuva tselluloosi tootmisel, sest seda saab kasutada erinevate puiduliikide ja taimede puhul.

#### 4.2.2 INTEGREERITUD KRAFT-BIORAFINEERIMISTEHASED

Sõltumata üldisest nõudluse kasvust on maailma põhjaosas (Põhja-Ameerika, Euroopa) tselluloositootmine viimasel kahekümne aastal oluliselt vähenenud (joonis 4.4), kuna tootmine nihkub suuremahulistesse ja odavamatesse tehastesse lõunas, mis on suurendanud motivatsiooni töötada välja uusi protsesse, et lisada tselluloosipuidule ja saeveskites tekkivatele jääkidele lisaväärtust.

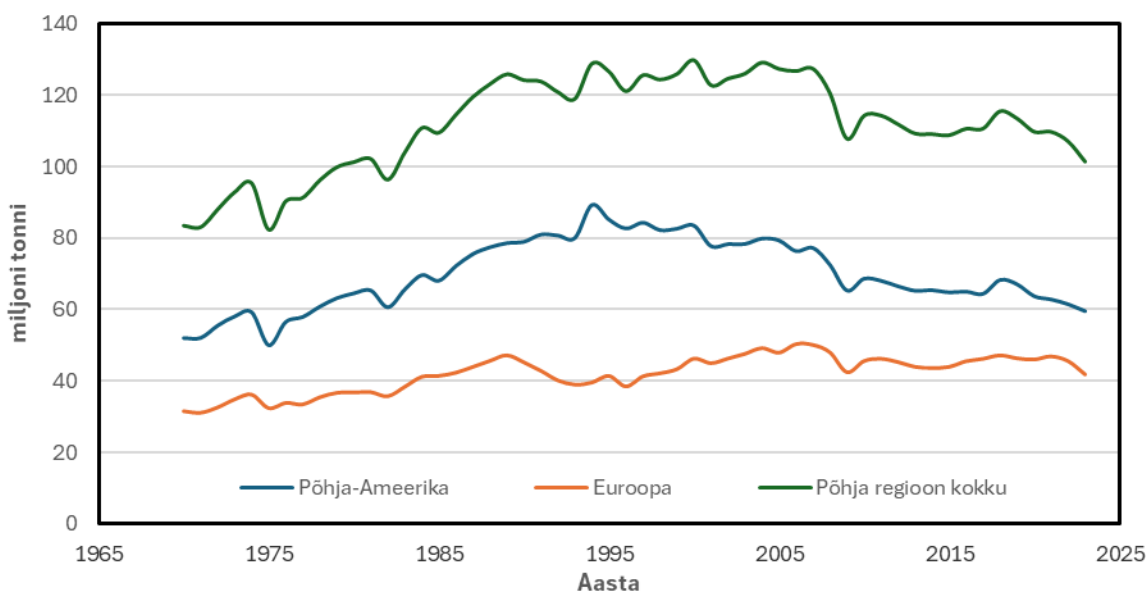
<sup>100</sup> "LignoForce System," *FPI Innovations*. Accessed: Apr. 24, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>101</sup> "Bracell Limited | Specialty Cellulose Industry - RGEI.com." Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>102</sup> "Nippon Paper Group." Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>103</sup> "LD Celulose S.A., LD Celulose SA." Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>104</sup> "Our mill in Mörrum." Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: [Link](#)



**Joonis 4.4 Mehaanilise puidumassi, keemilise ja poolkeemilise tselluloosi tootmine globaalselt põhja regioonis, miljonit tonni**

Aastal 2006 pakuti välja kontseptsioon Kraft tselluloositehase muutmiseks integreeritud metsa biorafineerimistehaseks, kus peale tselluloosi tootmise loodaks lisandväärtust jäätmevoogudest (sh ligniin, hemitselluloos, ekstraktiivid) saadavate uute toodete lisandumise ja peamiselt energiatõhususe parandamise kaudu.<sup>102, 103</sup> Peamised tehnoloogiad jagunevad kolme rühma: 1) ligniini eraldamine ja väärindamine mustast leelisest (black liquor); 2) hemitselluloosi ekstraheerimine ja väärindamine enne tselluloosi keetmist, 3) nanotselluloosi tootmine – nii tselluloosinokristallide (CNC) kui ka -nanokiudude (CNF) kujul. Neid tehnoloogiaid on piloteeritud ja osaliselt ka kommertsrakendustes peamiselt Euroopas (Soome, Rootsi) ja Põhja-Ameerikas. 6) Protsessi energeetika vajaduste rahuldamisel suuremahulisel tootmisel on võimalik ka Kraft ligniini ekstraheerida, mille jaoks on olemas erinevaid tehnoloogiaid (LignoBoost<sup>104</sup>, LignoForce<sup>105</sup>, LignaRec<sup>106</sup>).

Samas kraft-biorafineerimise kontseptsiooni rakendamine on seni olnud osaliselt edukas ainult suur korporatsioonide poolt, kuna investeringu vajadus ja riskid on väga kõrged. Viimase 20 aasta jooksul on Rootsi ja Soome suurimad metsatööstusettevõtted—Stora Enso, UPM, Metsä Group ja Södra—läbinud ulatuslikke ümberkorraldusi, sulgedes vanu tselluloosi- ja paberitehaseid ning investeerinud kaasaegsetesse biorafineerimistehastesse liikumaks traditsioonilisest paberitootmisest kõrgema lisandväärtusega biotoodete suunas.<sup>107, 108</sup> Korporatsioonidel on samuti eelis Kraft protsessist saadavate kõrvalsaaduste edasi väärindamisel, kuna suure väävlisaldusega jääkide töötlemine on väga kulukas ja neist nt biokütuse valmistamine eeldab väga suuri toorme mahtusid, mida ühest biorafineerimistehasest ei saa. UPM-i Lappeenranta biorafineerimistehas (2015) Soomes toodab aastas umbes 130 000 tonni taastuvat diislikütust ja bionaftat kaubamärgi all UPM BioVerno, kasutades peamise toorainena toor-tallõli

<sup>105</sup> J. Shao et al., "Improving performance of bamboo fluff pulp by liquid hot water pretreatment and combination with longer fibers," *Industrial Crops and Products*, vol. 212, p. 118334, Jun. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118334>

<sup>106</sup> "Biorefinery," *Biorefinery | UPM Biochemicals*. Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>107</sup> "UPM Biochemicals acquires SunCoal Industries," *UPM Biochemicals acquires SunCoal Industries | A material solutions company*. Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>108</sup> "Fibanol investeerib Lätis biorafineerimistehasesse 700 miljonit eurot — Kaubavahetus Eestiga." Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

(crude tall oil, CTO).<sup>109</sup> Kuna Lappeenranta tehase oma tselluloositootmisest saadav tallõli ei kata kaugeltki kogu vajadust, hangib UPM lisatoorainet oma Soome tselluloositehastest (nt Kaukas, Kymi, Pietarsaari), teistelt tootjatelt Soomes ja Rootsis ja mujalt maailmast.<sup>110</sup>

Kõrvalsaaduste väärimise kõrval on kraft-biorafineerimise põhielemendiks energeetiline iseseisvus, mis saavutatakse musta leelise põletamisega regenereerimiskatlas ja optimeeritud aurutsüklite ning soojusvahetusega. Seega on võimalik ligniini ekstraheerida mustast leelisest ainult osaliselt ja väga suure energia ülejäägi korral. Ligniini väärimine keemilise tootena peab andma suurema kasumi kui sellest saadav energia – vastasel juhul halvendab see tehase üldist majanduslikku bilanssi. Selle näiteks on aastal 2015 alustanud Stora Enso Sunila tehase, mis tootis ~370 000 t/a tselluloosi ja suurima tootjana maailmas ekstraheeris ligniini 50 000 t/a, aga suleti 2023, kuna ei suutnud olla majanduslikult ega energeetiliselt jätkusuutlik.<sup>111</sup>

Energeetilise iseseisvuse ja efektiivse kõrvalproduktide väärimise saavutamiseks peab tehase ületama teatud lävekoormust, mis on peamine põhjus uute Kraft-biorafineerimise tehaste skaleerimiseks üle 1 miljoni tonni tselluloosi tootmiseks aastas kuna väiksema mahulistel tehastel on spetsiifiline energiatarve suurem ühe tonni tselluloosi tootmiseks. Eesrindlikumaks näiteks on 2017. aastal avatud Metsä Groupi Äänekoski biotoodete tehase, mis on üks esimesi täielikult integreeritud metsaborafineerimistehaseid maailmas.<sup>112</sup> Uus tehase toodab 1,3 miljonit tonni tselluloosi aastas ning kõrvalsaadustena tallõli, tärpentini, väävelhapet ja bioenergiat, olles täielikult fossiilkütuste vaba. Äänekoski kasutab tselluloosi tootmiseks aastas ligikaudu 6,5 miljonit kuupmeetrit puitu, millest 4,5 miljonit m<sup>3</sup> on okaspuit (mänd ja kuusk) ja 2,0 miljonit m<sup>3</sup> on lehtpuit (peamiselt kask). Eesti ligikaudne kogumaht aasta kohta keskmiselt on paberipuidu, saetööstuse jääkide ja osa küttepuidu kogusest kokku 5,48 miljonit m<sup>3</sup>. Lisaks kasutatakse tootmisprotsessis suures osas saematerjali kõrvalsaadusena tekkivaid laaste, mis peamiselt pärit Metsä Groupi oma saeveskitest.<sup>113</sup> Tehase saavutas 240% energiasõltumatus aastal 2023, mis võimaldab müüa ülejäävat elektrit ja soojust teistele tööstustele ning kohalikule kaugküttevõrgule. Selline energia ülejääk saavutati, mitte ainult musta leelise, sh osaliselt tallõli põletamisel vaid samuti suuresti saetööstuse jääkide, saepuru ja raidmete gasifitseerimisega, mis on lubjapõletusahjus täielikult välja vahetanud fossiilsed kütused (87 MW).<sup>113, 114</sup> Samuti ei ekstraheerita mustast leelisest ligniini ega hemitselluloosi produkte, mis on tulevikus osaliselt võimalik. Analoogse lähenemisega ja tehnoloogiatega planeerib Viru Keemia Grupp rajada Eestisse väiksema mahulise biotoodete tehast.<sup>115</sup>

#### 4.2.3 TERMOMEHAANILINE JA KEEMILIS-TERMOMEHAANILINE PROTSESS

Termomehaaniline ja keemilis-termomehaaniline protsess – kiudude eraldamise meetodid, mis ühendavad termilise ja mehaanilise töötuse, kusjuures keemilis-termomehaaniline töötus soodustab jahvatust ja kiudude valgendamist, ligniini eraldamist. Termomehaanilises protsessis kuumutatakse puit rõhu all kuuma auruga (tavaliselt (20-240 psi ja 115–155 °C juures), mis pehmenab ligniini, võimaldades seejärel mehaaniliste jahvatusmasinate abil kiudude eraldamist. See meetod säilitab puidu pikad kiud, aga on samas energiamahukas. Produktiks on termomehaaniline puitmass (thermomechanical pulp, TMP) saagikusega > 93% töödeldavast puidumassist. Termomehaaniline ja keemilis-termomehaaniline protsess võimaldab asendada puhast tselluloosi paljudes paberi sortides, kuid ei vaja suures hulgas kemikaalide kasutust. Keemilis-termomehaaniline protsess täiendab viimast, lisades keemilisi reagente nagu

<sup>109</sup> "Fibonol Latvia – All you need to know | Fibonol." Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>110</sup> "GranBio | Inovação em Biotecnologia Industrial," GranBio | Inovação em Biotecnologia Industrial. Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>111</sup> "U.S. Department of Energy Awards \$118 Million to Accelerate Domestic Biofuel Production," Energy.gov. Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>112</sup> "Ethanol To Jet." Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>113</sup> "Ecofining™." Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>114</sup> "BYOGY RENEWABLES," BYOGY RENEWABLES. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>115</sup> VKG biotoodete tootmine. Vaadatud 25.07. [Link](#)

naatriumkarbonaat või naatriumhüdroksiid ligniini osaliseks lagundamiseks enne mehaanilist töötlust. Produktiks on keemilis-termiline puitmass (chemi-thermomechanical pulp, CTMP) saagisega 85–95%. Selline töötlus vähendab energiatarvet ja parandab kiudude tugevuse kvaliteeti. Mõlemat protsessi kasutatakse peamiselt paberitööstuses, eriti ajalehepaberi ja odavama kartongi tootmisel, kus kõrge valgendusaste pole oluline, kuid vaja on heade trükiomadustega ja piisava tugevusega kiudmaterjali. Keemilis-termomehaaniline protsessi saab lisada veel valgenduse nt vesinikperoksiidi näol, mis küll vähendab saagist (80-90%), kuid tõstab jahvatamise efektiivsust ja annab valgema produkti (bleached chemi-thermomechanical pulp, BCTMP, toodetakse näiteks EstonianCellis. Termomehaaniline ja keemilis-termomehaaniline protsesside eeliseks on väheste kemikaalide kasutus ja suuremad saagised võrreldes keemiliste protsessidega, siiski on puuduseks jahvatusprotsesside suur energiatarve.

### **4.3 TEINE PÕLVKOND: KOGU BIOMASSI RAFINEERIMINE JA KAASAEGSED TEHNOLOOGIAD**

Kaasaegsed teise põlvkonna tehnoloogiad keskenduvad kogu lignotselluloosse biomassi väärimisele, tagades kõrgema tootlikkuse ja keskkonnasõbralikumad lahendused. Erinevalt varasematest lähenemistest, kus keskenduti peamiselt tselluloosi tootmisele, on nüüd eesmärk eraldada ja väärimada kõik biomassikomponendid: tselluloos, hemitselluloos ja ligniin. Näiteks organosolv-protsess võimaldab lahustipõhise eraldamise kaudu saada kõrge puhtusastmega tselluloosi ja ligniini, mis sobivad kemikaalide või komposiitmaterjalide tootmiseks. Auruplahvatus ja hüdrotermiline töötlemine on sobilikud ligniini ja hemitselluloosi eellagundamiseks, muutes need paremini kättesaadavaks ensümaatilistele ja mikrobioloogilistele protsessidele. loonsete vedelike ja sügavate eutektiliste lahustite abil saab efektiivselt lagundada lignotselluloosi, säilitades samal ajal väärtuslikke struktuure edasiseks kasutuseks. Ensümaatilised töötused võimaldavad spetsiifilist hemitselluloosi või tselluloosi lagundamist, sobides hästi suhkrute ja nende edasise fermenteerimisega näiteks biokütuste tootmiseks. Tänu nendele tehnoloogiatele laieneb biomassi väärimise potentsiaal oluliselt kaugemale klassikalistest tselluloositoodetest, avades võimalused biopõhiste kemikaalide, komposiitmaterjalide ja uute funktsionaalsete toodete loomiseks.

#### **4.3.1 PEAMISED TEISE GENERATSIOONI TEHNOLOOGIAD**

**ORGANOSOLV PROTSESS** – puidu biomassi eeltöötlemine orgaaniliste lahustite (nt etanool, metanool, atsetoon) või nende segude, vee ja happega peamiselt ligniini lahustamiseks. Protsess töötab tavaliselt temperatuurivahemikus 120–200 °C ja võimaldab saada kõrge puhtusastmega tselluloosi ning madala molekulmassiga ligniini, mida saab kasutada biopõhiste polümeeride ja kemikaalide tootmiseks. Lahustid on sageli taaskasutatavad, kuid protsessi majanduslik tasuvus sõltub suuresti lahustite ringlussevõtu efektiivsusest ja hindadest.

**AURUPLAHVATUS** – meetod, mille puhul biomass kuumutatakse küllastatud auru abil temperatuurini 160–220 °C ja seejärel lastakse rõhk järsult alla, tekitades auruplahvatuse. Selle tulemusel puidustruktuur laguneb ja ligniin ning hemitselluloos on kergemini kättesaadavad edasiseks töötlemiseks (kasutusel Fibenol OÜ töötlusprotsessis). Auruplahvatust kasutatakse sageli koos ensümaatilise hüdrolüüsiga bioetanooli või muude biokütuste tootmisel. Meetod on tõhus, kuid energiamahukas ja võib põhjustada suhkrute ja ligniini lagunemisel tekkivate inhibiitorite moodustumist, mis mõjutavad mikrobioloogilist töötlemist.

**HÜDROTERMILINE PUIDUMASSISTAMINE (LHW)** – protsess, kus biomassi töödeldakse kõrgel rõhul ja temperatuuril (120–250 °C) vees ilma orgaaniliste lahustiteta. Selle tulemusena hüdrolüüsuvad hemitselluloosid ning osaliselt ka ligniin, tekivad lahustuvad suhkrud ja orgaanilised happed. Protsessi kasutatakse eelkõige biokemikaalide ja fermentatsioonisubstraatide tootmiseks. LHW-l on happelise, auruga ja leelise eeltöötusega võrreldes mitmeid eeliseid: seadmete korrosiooni vähenemine,

tselluloosi lagunemise ja ligniini lahustumise vähenemine. LHW enne Kraft-protsessi saadud tselluloosikiud on paindlikumad, ei vaja lisakemikaale ning minimaalne keskkonnareostust. Võimaldab protsessijääkide tõhusat väärindamist.<sup>105</sup>

**LAHJA HAPPE EELTÖÖTLUS** – lignotselluloosse materjali töötlemine madala kontsentratsiooniga happega (tavaliselt  $H_2SO_4$  või HCl), mille eesmärk on hemitselluloosi hüdroolüüs fermentatsiooniks sobivateks suhkruteks (nt ksüloos, arabiin). Tavaliselt viiakse protsess läbi temperatuuril 120–180 °C (kasutusel Fibenol OÜ töötusprotsessis). Lahja happe eeltöötus on laialdaselt kasutusel bioetanooli tootmisel, kuid nõuab neutraliseerimist ja inhibiitorite eemaldamist edasistes etappides.

**IOONSETE VEDELIKE JA SÜGAVATE EUTEKTILISTE LAHUSTITE KASUTAMINE** – uuemad, selektiivsed lahustid, mis suudavad lahustada ligniini ja mõningal määral ka tselluloosi ning hemitselluloosi. Näiteks kasutatakse ioonseid vedelikke nagu 1-etüül-3-metüülimidazoolium atsetaat või sügavaid eutektilisi segusid (nt koliin-kloriid piimhappega), mis võimaldavad madalamal temperatuuril ja väiksema energiakuluga biomassikomponentide fraktsioneerimist. Need meetodid võimaldavad saada väga puhtaid fraktsioone, kuid tehnoloogia on veel arendamisjärgus ning lahustite taastamine on tehniline väljakutse.

**ENSÜMAATILINE PUIDUMASSI TÖÖTLUS** – biokeemiline protsess, kus biomassi lagundamiseks kasutatakse spetsiifilisi ensüüme (nt tsellulaasid, hemitsellulaasid, ligninaasid). Tsellulaase kasutatakse tselluloosi ja hemitselluloosi lagundamiseks fermentatsiooniks sobivateks suhkruteks. Protsess töötab tavaliselt pehmetel tingimustel madalal temperatuuril (40–60 °C) ja neutraalse pH juures, sobides bioetanooli ja muude fermentatsiooniproduktideil tootmiseks (vt. 6. Fermentatsiooni tehnoloogiad). Ligniini ensümaatilise lagundamise jaoks on leitud mitmeid ensüüme, aga tööstusskaalal neid hetkel ei kasutata. Ensümaatilise töötuse eeliseks on selektiivsus ja keskkonnasõbralikkus, kuid protsess on suhteliselt aeglane (2-3 päeva) ning vajab hästi optimeeritud eeltöötust, et ensüümid suudaksid kogu materjali efektiivselt lagundada.

#### 4.3.2 TEISE PÕLVKONNA BIORAFINEERIMISE NÄITED

Näidetena on toodud valitud teise põlvkonna biorafineerimistehased (TRL7-9), kus on kombineeritud eelnevalt loetletud tehnoloogiad ja toormena kasutusel nii leht- kui okaspuit, puidutöötlemisejätmed ja muu biomass.

#### UPM-I BIOKEEMIATEHAS (LEUNA, SAKSAMAA)

UPM-i biokeemiatehas Leunas, Saksamaal Joonis 4.5), on maailma esimene tööstuslikul skaalal töötav biokeemiatehas, mis toodab puidus sisalduvatest suhkrutest bio-monoetüleenglükooli (Bio-MEG), bio-monopropüleenglükooli (Bio-MPG) ja ligniinist taastuvat funktsionaalset täiteainet (RFF). Toormeks on varem tööstusliku-, kütte- ja saeveskite jääkpuiduna müüdud põõgi biomass. Aastane tootmisvõimsus on 220 000 tonni. Tehnoloogia valmidustase (TRL) on 9, mis tähendab, et tehnoloogia on täielikult arendatud ja valmis kommertskasutuseks. Investeeringu kogumaht on 1275 miljonit eurot. Kasutuselevõtu ja käivitamisega alustati 2024. aasta lõpus. Täielik integreeritud kaubanduslik tootmine peaks algama 2025. aasta teises pooles.<sup>106</sup>

UPM Leuna biokeemiatehase eeltöötusprotsessi täpset tehnoloogiat ei ole avalikult üksikasjalikult kirjeldatud. Kuid saadaoleva teabe põhjal on võimalik teha mõningaid järeldusi. Kuna UPM omandas ettevõtte SunCoal Industries, mis on patenteerinud hüdrotermilise töötlemise tehnoloogia<sup>107</sup>, siis viitab see võimalusele, et Leuna biokeemiatehases kasutatakse just sellist eeltöötust. **Hüdrotermiline töötlemine** hõlmab biomassi töötlemist kõrge temperatuuril ja rõhul vees, mis võimaldab ligniini ja hemitselluloosi eraldamist tselluloosist. See protsess võib toimuda ilma kemikaalideta või lahjas happelises keskkonnas (nt  $H_2SO_4$ , HCl. Lisatud võib olla ka **orgaanilisi lahusteid** (nt EtOH). Tulemusena saadakse tahke rikastatud tselluloosi fraktsioon (**fermenteeritav**), vesilahuses hemitselluloosi hüdroolüüsi

saadused ja ligniini fraktsioon eraldub kas lahuses või jääb kolloidina. Eeltöödeldud mass jagatakse tahkeks ja vedelaks fraktsiooniks filtreerimise või tsentrifuugimisega. Ligniini sadestatakse või eraldatakse lahustist nt lahustivahetuse või pH muutmise abil. Tselluloos (tahke fraktsioon) muudetakse glükoosiks biokatalüütilise hüdrolüüsi abil. Seejärel fermenteeritakse glükoos bio-MEG või bio-MPG-ks (saagikus ~350–400 kg Bio-MEG/tonn puitu). Ligniini töödeldakse (kuivatus, jahvatamine, modifitseerimine) ning seda saab kasutada täiteainena (RFF) plastides ja kummides. Saagikus ~100–150 kg RFF/tonn puitu. Hemitselluloosist pärinevad suhkrud (tööstuslikud suhkrud), peamiselt ksüloos – osaliselt kasutatakse energiaks või kõrvalsaadusteks (biometanool, furaanid jm.) Bio-MEG (UPM BioPura™): kasutatakse tekstiilides, PET-pudelites, pakendites, jahutusvedelikes, komposiitides, farmaatsiatoodetes, kosmeetikas ja pesuvahendites.

Bio-MPG: rakendused hõlmavad farmaatsiatööstust, kosmeetikat ja muid tööstuslikke vedelikke.

Taastuvad funktsionaalsed täiteained (RFF): ligniini põhised täiteained, mis pakuvad jätkusuutlikku alternatiivi süsinikmustale ja sadestatud ränidioksiidile kummide ja plastide tööstuses.

### FIBENOL OÜ (IMAVERE, EESTI)

Fibenol on rajanud Imaverre demotehase (TRL 7-8), kus kasutab puitmassi eeltöötamiseks Sunburst tehnoloogiat. Projekt sai toetust ELi teadus- ja innovatsiooniprogrammist „Horisont 2020“. Demotehase koguinvesteering on nüüdseks ulatunud umbes 70 miljoni euroni, millest Euroopa Liit panustas erinevate teadus- ja arendusprojektide kaudu ligi 20 miljonit eurot<sup>108</sup>. Eeltöötuses on kombineeritud **mehaaniline ja lahja happe** töötus koos **auruplahvusega**. Eeltöötuse tulemusena lagundatakse puitmassis hemitselluloos lahustuvateks C5 suhkruteks, mille saab tahkest ligniini-tselluloosi massist eraldada. Ligniini-tselluloosi massist saab edasiste tööstustega toota C6 suhkruid (tselluloosi **ensümaatilise lagundamisega**), kõrge puhtusastmega ligniini ning mikrokristalset tselluloosi. Sunburst™ tehnoloogia võimaldab töödelda üle 90% sisendmaterjalist kasutatavateks toodeteks. Suhkrud sobivad fermentatsiooniks, ligniini kasutamist on testitud vineeriliimi komponendina, asfaldis bituumeni asendusena, plastitööstuses, isolatsioonimaterjalides, mis võimaldavad osaliselt asendada fossiilsetest allikatest toodetud kemikaale ja materjale. Mikrokristalne tselluloos sobib näiteks pakendite barjäärikilede ja liimide valmistamiseks. Fibenol kasutab toorainena kooritud lehtpuidu haket. Demotehase aastane tootmisvõimsus on 6500 t/a ligniini ja 20 000 t/a puidusuhkruid. Ettevõtte plaanib laiendada tootmist Lätis ja rajada sinna esimese kommertsiaalskaalas tehase (TRL 9) mastaabiga 300 000 tonni lehtpuitu aastas. Investeering on 600-700 miljonit eurot, ehituse algus 2027 aastal ja planeeritud käivitamine 2030 aastal.<sup>109</sup>

### AVAP BIOREFINERY: ENABLING NET ZERO™ (THOMASTON, GEORGIA, USA)

GranBio rajab Ameerika Ühendriikides Georgia osariigis Thomastoni linnas uue tehase, mille eesmärk on toota jätkusuutlikku lennukikütust (SAF – Sustainable Aviation Fuel) biomassijäätmetest.<sup>110</sup> See projekt on osa GranBio tütarettevõtte AVAPCO algatusest "Enabling Net Zero", millele 2023. aastal eraldas USA Energeetikaministeerium (DOE) 80 miljoni dollari suuruse toetuse.<sup>111</sup> Projekti koguinvesteering ulatub 220 miljoni dollarini, millesse panustavad ka GranBio ise ja teised investorid. Demotehas peaks alustama tööd 2026. aasta kolmandas kvartalis ning selle aastane tootmisvõimsus on umbes 4,5 miljonit liitrit SAF-i. AVAP® (American Value-Added Pulping, Joonis 4.6) biomassi fraktsioneerimine - on tehnoloogiate rühm, mis võimaldab muuta mis tahes liiki biomassi, **sealhulgas okaspuitu**, puidusuhkrudeks (glükoosiks ja ksüloosiks), ligniiniks, tselluloosimassiks ja nanotselluloosiks.<sup>110</sup> Tehnoloogia ühendab **organosolv** ja **sulfittehnoloogia** ligniini fraktsioneerimiseks, **happelise hüdrolüüsi** hemitselluloosist C5 suhkrute ja **ensümaatilise hüdrolüüsi** tselluloosist glükoosi saamiseks. AVAP® suhkrute saagikus tselluloosist + hemitselluloosist on 85-95% teoreetilisest. Tselluloosi jäägist saadakse mehhaanilisel või keemilisel töötusel nanotselluloosi, mida kasutatakse plastide ja autorehvide omaduste parandamisel. Ligniini sadestatakse etanooli eemaldamisega, kuivatatakse ja kasutatakse komposiitmaterjalides, liimides jne.

SAF saadakse kasutades GranBio AVAP®-tehnoloogiat ja Honeywelli etanool-reaktiivkütuseks (ethanol-tojet - ETJ) protsessi.<sup>112, 113, 114</sup>

#### **TMP-BIO PILOOTTEHAS (THUNDER BAY, ONTARIO, KANADA)**

2019. aastal avasid FPIInnovations ja Resolute Forest Products Kanadas Thunder Bays 23 miljoni Kanada dollari suuruse TMP-Bio piloottehas, mis võib töödelda 100 tonni biomassi aastas. Tehas toodab ligniini (H-ligniini) ja suhkruid, mida kasutatakse uute biotoodete, näiteks puiduliimide, loomasööda ja komposiitmaterjalide arendamiseks.<sup>116</sup> TMP-Bio on FPIInnovationsi poolt välja töötatud patenteeritud tehnoloogia kasutab 1 põlvkonna termomehaanilise puidumassi (TMP) töötlust koos pehmete aluseliste tingimustega.<sup>117</sup> Tehnoloogia töötab eraldiseivana või integreerituna TMP, CTMP ja BCTMP olemasolevate tehastega. Protsessi on odav rakendada, eriti kui olemasolevaid rafineerimisseadmeid saab ümber kohandada.<sup>118</sup> Seda protsessi iseloomustab madal kemikaalide kasutus ja mõõdukas temperatuur ning võimekus toota kõrge saagisega fermenteeritavaid suhkruid ja peaaegu naturaalselt ligniini ilma väävlita. FPIInnovations'i poolt välja töötatud majanduslikud andmed näitavad, et ligniin on peamine produkt ja suhkrud kõrvalsaadus. TMP-Bio kasutab peamiselt lehtpuude puitlaastu (haab, kask), aga on arendajate väitel kergelt seadistatav samuti okaspuidu töötlemiseks 5C suhkrute saagise tõstmiseks.<sup>118</sup> Puuduseks hetkel on C5 ja C6 suhkrute saamine seguna ja H-ligniinis on suur jääk karbohüdraatide jääk.

#### **4.4 KOLMAS PÕLVKOND - SUUNATUD VÄÄRINDAMISE TEHNOLOOGIAD**

Kolmanda generatsiooni biorafineerimise all peetakse antud kontekstis silmas sihitud väärindamist, kus puitmassi keemilise fraktsioneerimise käigus on eesmärgiks saada kõrge selektiivsusega väga kõrge lisandväärtusega produkt, kusjuures kõrvalsaadused on sobivad ka teistesse integreeritud biorafineerimistehase protsessidesse. Puidu fraktsioneerimisel on peamiseks väljakutseks ligniini eraldamine viisil, et see oleks kasutatav kõrge lisandväärtustega toodeteks. Kuna ligniin oma olemuselt on väga habras, siis puidu fraktsioneerimisel kipub see lagunema ning laguproduktid kondenseeruma-protsess, mis antud juhul on juhuslik ning eraldatud ligniin on kontrollimatu struktuuriga. Nii on eelnevalt väljatoodud tehnoloogiate puhul peamiseks väljakutseks just ligniini fraktsioonile majanduslikult mõistliku rakenduse leidmine. Antud generatsioon siin kontekstis keskendub just fraktsioneerimistehnoloogiatele, mis võimaldavad puidust eraldada ligniin-tuletatud tooted, mis on kontrollitud struktuuriga ning mida saab seeläbi rakendada toormena aromaatsete (peen)kemikaalide sünteesiks.

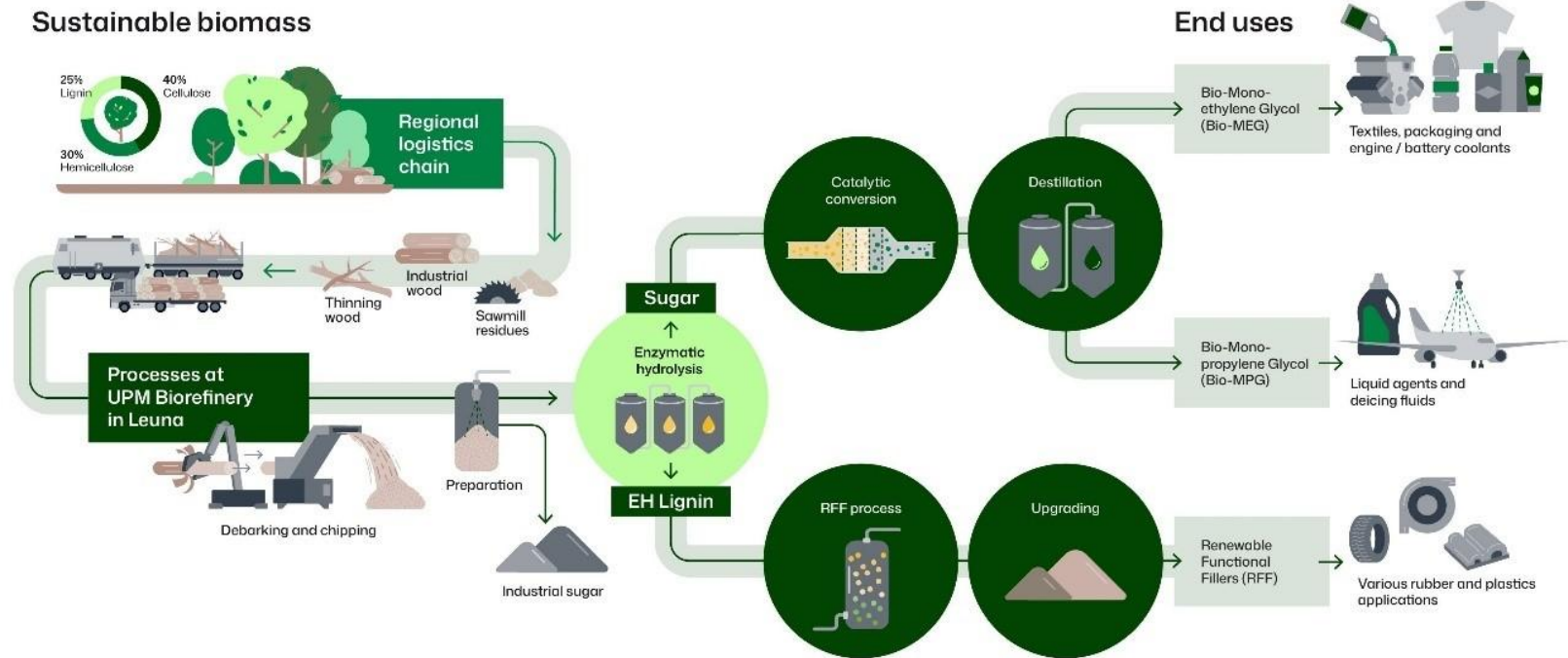
<sup>116</sup> "FPIInnovations and Resolute Inaugurate TMP-Bio plant in Thunder Bay," FPIInnovations. Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>117</sup> Z. Yuan, T. C. Browne, and X. Zhang, "(71) Applicant: FPIInnovations, Pointe-Claire (CA)".

<sup>118</sup> "3\_forest-based\_bio-products\_a\_review\_of\_potential\_pathways\_for\_the\_city\_of\_quesnel.pdf." Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

UPM biorefinery in Leuna, Germany

# Unique technology converting wood to biochemicals



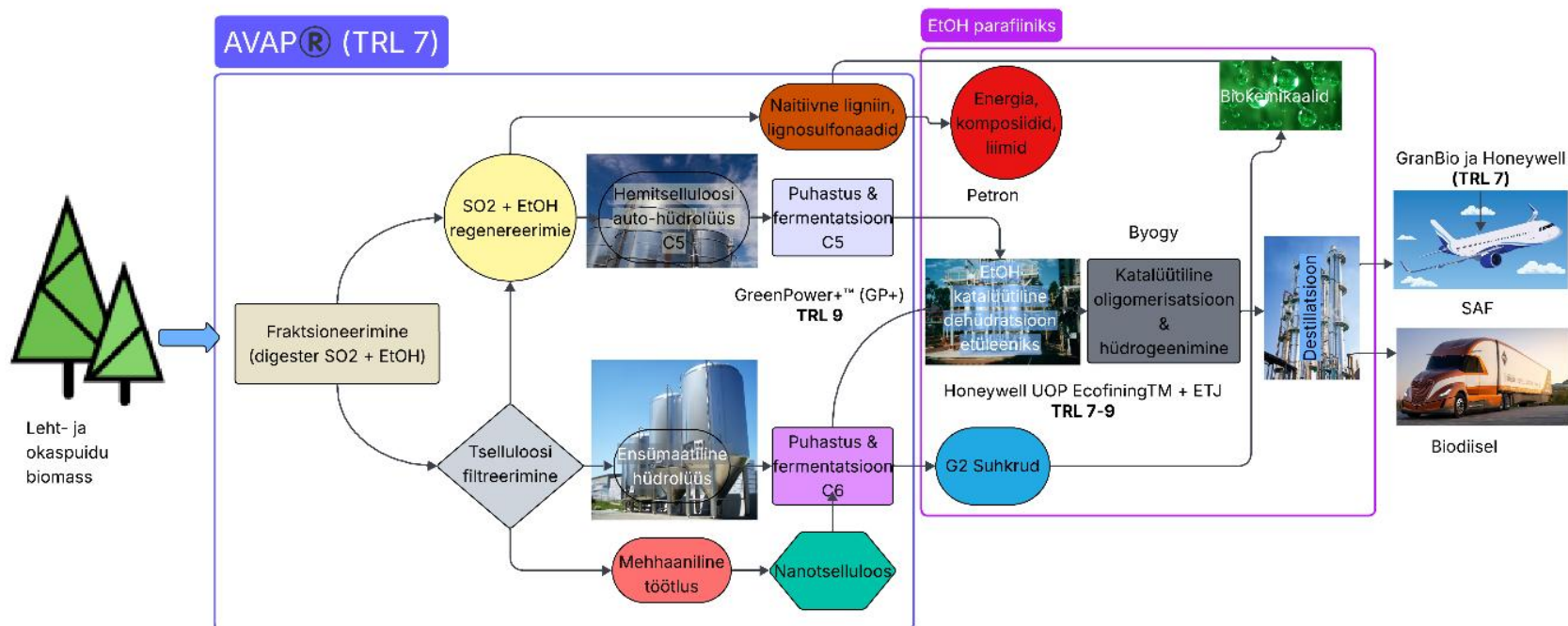
Joonis 4.5 UPM biorafineerimistehnoloogia, mis muudab puidu biokemikaalideks<sup>119</sup>

Joonisel 4.5 olevate terminite tõlge eesti keelde.

**Pealkiri ja alapealkiri:** Unique technology converting wood to biochemicals – Ainulaadne tehnoloogia puidu muundamiseks biokemikaalideks; UPM biorefinery in Leuna, Germany – UPM biotööstus Leunas, Saksamaal; **Vasak pool: Sisend ja protsessid:** Sustainable biomass – Jätkusuutlik biomass; Regional logistics chain – Piirkondlik logistikakett; Thinning wood – Harvendusraie puit; Industrial wood – Tööstuspuit; Sawmill residues – Saeveskite jäägid; Processes at UPM Biorefinery in Leuna – Protsessid UPM biotööstuses Leunas;

<sup>119</sup> Biorefinery Leuna. UPM Biochemicals. [Link](#)

Debarking and chipping – Koorimine ja hakkimine; Preparation – Ettevalmistus; Industrial sugar – Tööstuslik suhkur; Enzymatic hydrolysis – Ensümaatiline hüdroolüüs; Sugar – Suhkur; EH Lignin – EH ligniin; 25% Lignin – 25% ligniini; 30% Hemicellulose – 30% hemitselluloosi; 40% Cellulose – 40% tselluloosi; **Keskmine ja parempoolne osa: Protsessid ja lõpptooted:** Catalytic conversion – Katalüütiline muundamine; Distillation – Destilleerimine; RFF process – RFF-protsess; Upgrading – Edasitöötlus; **Lõpptarbitamine (End uses):** Bio-Mono-ethylene Glycol (Bio-MEG) – Bio-mono-etüleenglükool (Bio-MEG); Textiles, packaging and engine / battery coolants – Tekstiilid, pakendid ning mootori / aku jahutusvedelikud; Bio-Mono-propylene Glycol (Bio-MPG) – Bio-mono-propüleenglükool (Bio-MPG); Liquid agents and deicing fluids – Vedelad kemikaalid ja jäätumistvastased vedelikud; Renewable Functional Fillers (RFF) – Taastuvad funktsionaalsed täiteained (RFF); Various rubber and plastics applications – Erinevad kummi- ja plastirakendused.



Joonis 4.6 Puidu ja muu biomassist AVAP tehnoloogiaga suhkrute, ligniini, nanotselluloosi ja bioetanooli saamine ning etanoolist katalüütiliste protsesside abil SAF ja biodiisli valmistamine.

## 4.5 TERMOKEEMILISED TEHNOLOOGIAD

Termokeemiline töötlemine hõlmab biomassi keemilist ja füüsikalist muundamist kuumuse toimel, sageli piiratud või ilma hapniku juuresolekuta. Lignotselluloosne biomass on oma kõrge tselluloosi- ja ligniinisisalduse tõttu sobiv lähteaine mitmesugusteks termokeemilisteks protsessideks. Erinevalt otsesest põletamisest, mille lõppeesmärgiks on soojuse või elektri tootmine, on termokeemilised konversioonitehnoloogiad suunatud keemiliste ja füüsikaliste omadustega toodete eraldamisele ning nende hilisemale rafineerimisele.

Erinevalt keemilistest ja biokeemilistest tehnoloogiatest, kus sihiks on tavaliselt molekulaarselt selektiivne fraksioneerimine ja suunatud biokonversioon, võimaldab termokeemia kiiremat, laiemat ja energiamahukamat muundamist. Samuti on üks tähtis erinevus kasutatava toorme heterogeensus, termokeemiliste meetoditega on võimalik väärindada puidujäätmeid (raidmeid, koort, ehitusjäätmed), põllumajanduslikke jm., mis ei sobi teiste ülaltoodud tehnoloogiatele. Termokeemiliste töötluste eesmärk on toota energiat, kütuseid (biodiisel), keemilisi toorained (furfuraalid, EtOH, MeOH) või süsinikurikkaid materjale (nt biosüsi).

### 4.5.1 PEAMISED TERMOKEEMILISED TÖÖTLEMISVIISID:

**TORREFITSEERIMINE** – termokeemiline väärindamismeetod kus biomassist toodetakse 200-350 °C juures hapnikuvaeses keskkonnas torrefitseeritud biomassi ja torrefitseerimiskondensaati.

Torrefitseerimist kasutatakse peamiselt biomassi omaduste parendamiseks, näiteks energiatiheduse tõstmiseks, jahvatamisomaduste parendamiseks, hüdrofiilsuse alandamiseks jne.

Torrefitseerimisprotsessis lagundatakse hemitselluloos väikesteks orgaanilisteks hapeteks ja furfuraali derivaatideks, mis koonduvad torrefitseerimiskondensaati koos vee ja ekstraktiivainetega. Tselluloos ja ligniin jäävad biomassi ja nende struktuur muutub vaid vähesel määral.<sup>120, 121, 122, 123</sup>

**PÜROLÜÜS** - termokeemiline väärindamismeetod, kus biomassist toodetakse õhu ligipääsuta 300-1300 °C juures biosütt, bioõli ja põlevgaasi. Tavaline pürolüüs toimub temperatuuri vahemikus 300-500 °C, kuumutuskiirusel 5-100 °C/min 5-30 min jooksul. Kiirpürolüüs toimub märksa kõrgemal temperatuuril 500-1300°C, kuumutuskiirusel kuni 1000 °C/sek vaid sekundi jooksul.<sup>124, 125, 126</sup> Saadused: Bioõli saab rafineerida kemikaalideks või vedelkütusteks, biosütt kasutada filtrimaterjaliks, mulla parandamiseks või metallurgias.

**GASIFITSEERIMINE** - termokeemiline protsess kus temperatuuride vahemikus 800-1000°C (kui oksüdeerijana kasutatakse õhku) või kuni 1500 °C (kui oksüdeerijana kasutatakse hapnikku) biomass muudetakse peamiselt gaasiliseks produktiks – süngaasiks. Gasifitseerimine on mitmejärguline protsess, kus biomass läbib kuivatamise, pürolüüsi, osküdeerimise ja redutseerimise etapid, mille tulemusena muudetakse see süngaasiks. Protsessiks vaja minev energia toodetakse oksüdeerimise etapis. Protsessi efektiivsust on võimalik tõsta lisades reaktsiooni veeauru ja/või vesinikku. Süngaasi on võimalik otse kasutada mootorites või väärindada seda läbi gaasfermentatsiooni (vt. peatükk 3.6.Fermentatsiooni

<sup>120</sup> «» What is Torrefaction.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>121</sup> “Wood Biomass Torrefaction Plant - Servoday Group.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>122</sup> “Torrefaction.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>123</sup> A. AG, “Torrefaction systems.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>124</sup> “Pyrolysis Plant,” APChem. Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>125</sup> “Pyrolysis plants | Carbo-FORCE GmbH.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>126</sup> S. Ecosystems, “Industrial pyrolysis plants for waste and energy recycling.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

tehnoloogiad, Joonis 4.7) või Fischer-Tropschi sünteesi, saadusteks nt sünteetiline diisel, metanool ja dimetüüleeter.<sup>127, 128, 129, 130</sup>

## 4.6 FERMENTATSIOONITEHNOLOGIAD

Puidust saadavatest (nii hemitselluloosetest kui tselluloosetest) suhkrutest väärtuslike kemikaalide ja materjalide tootmiseks on võimalik kasutada fermentatsiooni. Fermentatsiooni teel valmistatakse täna nii mahtkemikaale, näiteks etanooli, aga ka peenkemikaale, näiteks ravimeid ja ensüüme. Põhimõtteliselt on kõiki sahharoosil põhinevaid protsesse võimalik teisendada puidusuhkrutele, mille kasutamine vähendab konkurentsi põllumajanduslikele toiduainetele ning muudab tootmise keskkonnajalajälge väiksemaks. Samas tehnoloogiliselt on see keerukam ning nõuab osaliselt toksiliste ainete sisalduse tõttu spetsiifilisi tolerantseid mikroorganisme või eraldiseisvat tehnoloogilist protsessi suhkrute puhastamiseks. Puidusuhkrute kasutamine on kasvav trend, ent nende tootmise ja puhastamise protsess on kulukam kui traditsioonilise sahharoosi puhul, mis toodetud suhkruroost, maisist või suhkrupeedist<sup>108</sup>. Puidumassist toodetud C5 ja C6 suhkrutel põhinevaid fermentatsioonitehnoloogiaid on erineval TRL tasemel. Lisas 4.1 on toodud näited C5 ja C6 suhkrutest fermentatsiooni teel toodetavatest produktidest. Tööstuslikul tasemel toodetakse C6 suhkrutest väga mitmesuguseid maht- ja peenkemikaale ning C5 suhkrutest toodetakse näiteks etanooli, farneseeni ja laktaati. Arendamist vajavad veel toidu- ja söödakomponentide (valgud, rasvad, pigmendid) arendamine tööstuslikule tasemele. Eestis on puidusuhkrutest fermentatsiooni arendamine TRL tasemel 7 ja selle arendamiseks on suur potentsiaal, kuid vajalik on terviklik poliitika, mis toetaks nii tooraine kättesaadavust, teadus-arendust, infrastruktuuride rahastust kui ka biopõhiste toodete suuremat kasutuselevõttu, mis aitaks suurendada turunõudlust ilma lõpptoote hinda märkimisväärselt kergitamata. Lisaks peaks toetuskeemid arvestama nii tooraine töötlemist kui ka jääktoodete edasist väärimdamist, et tagada biopõhise majanduse edukas areng.

Lisaks puidust eraldatud suhkrute väärimdamisele, võimaldab fermentatsioon ka kogu puidu biomassi väärimdamist läbi gaasfermentatsiooni tehnoloogia, millele eelneb puidu biomassi gasifitseerimine. Puidu gasifitseerimisel tekib sünteesgaas, mille peamised koostisosad on CO, H<sub>2</sub> ja CO<sub>2</sub>. Sünteesgaas puhastatakse ja kasutatakse gaasfermentatsiooni sisendiks, kus gaasi-fermenteerivad mikroobid võimaldavad erinevate bioühendite tootmist. Hetkel on TRL9 tasemel kommertsialiseeritud erinevatest tööstuse heitgaasidest gaasfermentatsiooni läbi etanooli tootmine<sup>109</sup>.

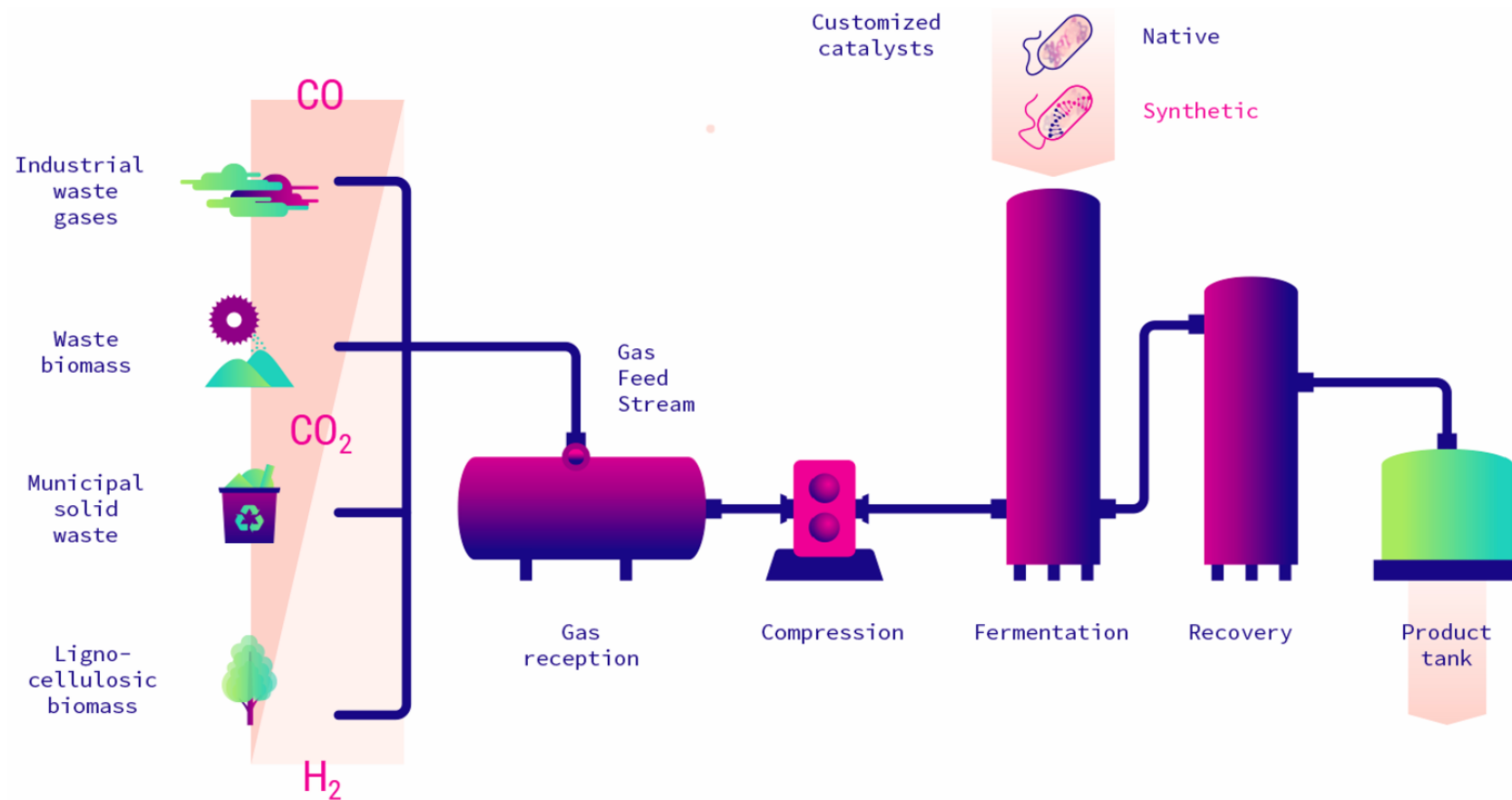
TRL6 tasemel on atsetooni ning isopropanooli tootmine<sup>110</sup>. Gasifitseeritud olmeprügiga protsess on tasemel TRL 8 ning hetkel on samale tasemele viimisel ka puidu biomassiga protsess<sup>111</sup>. Integreeritud gasifitseerimise-gaasfermentatsiooni protsessi eelisteks on kogu puidu biomassi kasutus (k.a. ligniin) ilma komponente eraldamata ja võime kasutada kõiki puu liike ning osiseid. Lisaks on uute mikroobsete rakuvabrikute loomisel võimalik neid kasutada samas infrastruktuuris uute bioühendite tootmiseks ka muudest orgaanilistest jäätmetest. Tehnoloogia puuduseks võib pidada seda, et kuna sünteesgaasis taandatakse puidus olevad süsinikud C1-tasemele, on kõrge süsiniku tasemega ühendite tootmine väljakutsuv. Nende tootmiseks läbi gaasfermentatsiooni on arendamisel peamiselt kaks protsessi: gaasfermentatsiooni integratsioon muud laadi fermentatsiooniga või keemiliste protsessidega. Esimesel juhul on gaasfermentatsiooni protsessi väljund bioühendid substraadiks muule fermentatsioonile (nt atsetaat või etanool pärmile), teisel juhul keemiliseks töötluks (nt etanool lennukikütuse tootmiseks)<sup>112</sup>. Lisa 4.2 annab detailsema tutvustuse fermentatsiooni tehnoloogiatest.

<sup>127</sup> "Convert waste to clean syngas with Oxy-Steam Gasification." Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>128</sup> "Gasification | ThermoChem Recovery International, Inc." Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>129</sup> "Home," SunGas Renewables. Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)

<sup>130</sup> "Homepage," GIDARA Energy. Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [Link](#)



**Joonis 4.7** Gaasfermentatsiooni tehnoloogia, mis koos eelneva puidu gasifitseerimisega võimaldab kogu puidu biomass väärindamist.

Joonisel 4.7 olevate terminite tõlge eesti keelde.

Industrial waste gases - tööstuslikud heitgaasid; waste biomass - biomassi jäätmed; municipal solid waste - olmeprügi; lignocellulosic biomass, lignotselluloosne biomass - gas feed stream, gaasi sisend - gas reception, gaasi kogumine; compression - rõhustamine; fermentation – fermentatsioon; customized catalysts - rakuvabrikud; native - metsikud; synthetic - sünteetilised; recovery - toote kogumine; product tank - toote hoiustus.<sup>131</sup>

<sup>131</sup> ValgepeaLab veebikeskkond: What is gas fermentation? Vaadatud 25.07.2025. [Link](#)

## 4.7 KOKKUVÕTTE

Tehnoloogiate spekter on lai, alates traditsioonilisest tselluloositootmisest (1. põlvkond) kuni kogu biomassi väärimiseni (2. põlvkond) ja kõrge väärtusega peenkemikaalide tootmiseni (3. põlvkond).

**Teise põlvkonna tehnoloogiad** (nt auruplahvatus, organosolv) **on kõige kiiremini arenev ja Eesti jaoks potentsiaalikaim suund, kuna need võimaldavad väärimada kogu puidu komponendid** (tselluloos, ligniin, hemselluloos) **ja on paindlikumad toorme osas.**

Suunad nagu termokeemiline töötlemine ja gaasfermentatsioon pakuvad võimalust väärimada ka kõige madalama kvaliteediga puitu ja jääke, muutes kogu protsessi maksimaalselt ressursitõhusaks.

Kõikide tehnoloogiate detailne analüüs on esitatud peatükis 5.

## 5. ANALÜÜS ENIMLEVINUD PUIDU KEEMILISE JA MIKROBIOLOOGILISE VÄÄRINDAMISE TEHNOLOOGIATE SOBIVUSE KOHTA EESTI TINGIMUSTESSE

Selles peatükis analüüsitakse eelnevalt kirjeldatud tehnoloogiate rakendatavust Eestis, arvestades kohalikke ressursse, majanduskeskkonda ja sotsiaalseid mõjusid.

### 5.1 ÜLEVAADE EUROOPA LIIDU KLIIMAPOLIITIKA EESMÄRKIDEST JA NENDE ARVESSE VÕTMISE LÜHI- JA PIKAAJALISEST MÕJUST PUIDURESSURSILE JA SELLE VÄÄRINDAMISELE

Eestis on välja töötamisel kliimakindla majanduse seadus (edaspidi KKMS), mis loob aluse kliimakindlaks majanduseks, seades kasvuhoonegaaside heitkoguste eesmärgid, soodustades puhaste tehnoloogiate kasutuselevõttu ning ressursside suuremat väärindamist. Ühe valdkonnana, kus Eestil on võimalik saavutada konkurentsieelis kliimakindlas majanduses on välja toodud ressursside (puit jm biomass, jäätmed jm) efektiivsem väärindamine ja seeläbi fossiilsete materjalide väiksem kasutamine (asendusefekti suurendamine). Kasvuhoonegaaside ametliku kalkulaatori<sup>132</sup> andmetel oli 2023. aastal LULUCFi netoheide Eestis 2 130 810 t CO<sub>2</sub> ekv. Kategooriad, mis 2023. aastal LULUCF arvestuses süsinikku sidusid, olid puittooted (–502 070 t CO<sub>2</sub>) ja rohumaad (–175 410 t CO<sub>2</sub> ekv). Käesolevas peatükis ei ole käsitletud tehnoloogiate aspekte LULUCFi vaatest, kuna Eesti pole läbi viinud detailset LULUCFi metoodika analüüsi puidu keemilise ja mikrobioloogise väärindamise kohta ja seega võiksid meie poolt tehtud järeldused olla ebatäpsed. Kui riik soovib arvestada LULUCFiga tehnoloogiate analüüsil, oleks vajalik detailse LULUCF metoodika analüüsi läbiviimine Eestile relevantsetele puidu keemilist ja mikrobioloogist väärindamist puudutavatele stsenaariumitele.

Süsiniku pikema-aegse talletamise vaates on esimese generatsiooni tehnoloogiatel põhinevate toodete, peamiselt paberi, potentsiaal üsna väike, kuna paberitooted kipuvad olema pigem lühikese kasutuseaega. Teise ja kolmanda generatsiooni tehnoloogiate puhul on toodete kasutusvaldkond mitmekesisem, mistõttu on puidus sisalduva süsiniku talletamise potentsiaal suurem. Näiteks puidust toodetavate biokütuste puhul on süsiniku talletusvõime väike. Vastupidiselt aga ligniini kasutamisel teedeehituses, plastikutes ja polüuretaanides ning ehitusmaterjalides liimi komponendina võib süsinik seotuna püsida aastakümneid.

### 5.2 ESIMISE PÕLVKONNA TEHNOLOOGIAL PÕHINEVATE TEHASTE KASV JA LAIENEMINE EESTIS

#### 5.2.1 RAKENDATAVUS EESTIS

Paberi valmistamiseks vajalike tselluloosikiudude tootmise traditsioonilised tehnoloogiad on olnud ajalooliselt Eestis kasutuses. Tehnoloogilisi piiranguid pole ka nüüd nende rakendatavusele Eestis, aga on mitmeid selle sektori arengutest tulenevaid piiranguid, mis osaliselt on kajastatud punktis 3.1.

Lisas 5.1 toodud tabelis esitatud I põlvkonna tehnoloogiad on rakendatavad, samas vastavad kaasaegsetele nõudmistele, arengusuundadele ja majanduslikule jätkusuutlikkusele nendest ainult mõned. Näiteks soodaprotsessi, mida saaks kasutada küll lehtpuidust kiudude tootmiseks, kasutatakse peamiselt mittepuidulise biomassi või väiksemahuliselt vanapaberi ümbertootlusel ja vähese jätkusuutlikuse tõttu seda Eestis traditsioonilisel viisil paberipuidu töötlemiseks ei rakendata. Sulfittselluloos tehnoloogia ei ole Eestis jätkusuutlik paberikiu tootmiseks keskkonna jalajälje ja kemikaalide puuduliku regenereerimise ning lisaks veel toorme tundlikkuse pärast, kuna mänd ei sobiks toormeks.

Tselluloosi ja paberitoodete turul on toimunud märkimisväärne konsolideerumine, kuna suured ühinemised ja ülevõtmised on suurendanud tipptootjate turuosa ning suured tootjad investeerivad

<sup>132</sup> Kasvuhoonegaaside ametlik kalkulaator. Vaadatud: 19.07. [Link](#)

jätakuvalt uutesse tselluloosi tootmisvõimsustesse, mis konsolideerivad tööstusharu veelgi, mistõttu väikestel tootjatel on turule tulekuga seotud riskid suured. Tugeva tselluloosi- ja paberitööstussektoriga maades on tselluloositehased hea vundament uute toodete ja protsesside integreerimisele, kuna Eestis selline baas on praegu nõrk, siis pole see nii lihtne. Samas on meil häid näiteid, kus väliskontsernid on investeerinud ja arendanud siinset puitmassi- ja paberitööstust.

Estonian Cell AS tehases kasutatava tehnoloogia iseärasuseks on samaaegne naatriumhüdroksiidi ja vesinikperoksiidi kasutamine, mis suurendab jahvatusprotsessi efektiivsust ja võimaldab saada suure valgusega puitmassi ehk pleegitatud keemilis-termomehaanilist puitmassi (Bleached chemi thermomechanical pulp - BCTMP). Estonian Cell toodab ~180 000 t pleegitatud BCTMP-d aastas ning kuulub Heinzeli Grupi.<sup>133</sup> Heinzeli Grupp müüb Estonian Celli toodangut globaalselt (Wilfried Heinzeli AG vahendusel), peamiselt Euroopasse ja Aasiasse. Estonian Cell-i võimalik edasine kasv ei jääks toorme puuduse taha, aga paberi turul toimunud muutused ja suur energiavajadus tootmisprotsessis seavad kindlasti laienemisele takistusi.

**Kraffttselluloosi tehnoloogia rakendamine Eestis on esimese põlvkonna tehnoloogiatest kõige jätkusuutlikum, kuna pole niivõrd toorme tundlik ja suudab protsessi suures osas ise energiaga varustada.** Näitena saab siin tuua Horizoni Tselluloosi ja Paberi AS, mis kuulub rahvusvahelisse Tolarami Gruppi peakontoriga Singapuris, kus on täielikult integreeritud tselluloosi- ja paberitehas. Kehra paberivabrikus valmistatakse Krafft-tehnoloogiaga kuusest ja männist pikakiulist pleegitamata krafft-tselluloosi, millest omakorda tehakse erinevat tüüpi jõupaberit. Toodang läheb enamasti Euroopasse aga ka mujale. Väikesemahuline tootmine on oma toodangu suunanud jätkusuutlikult turu nišši, nt ehitusmaterjalide pakendamiseks kasutatavad jõupaberipakkekotid ja ka jaekaubanduse paberkottide turg Euroopas on lähedal.

## 5.2.2 VAJALIKE TOORMETE JA LÄHTEAINETE KÄTTESAADAVUS JA KVALITEEDIKRITEERIUMID

Tabel 5.1 on toodud peatükk 1 tabelis 1.3 esitatud aastate 2025–2050 keskmine hinnanguline puittoorme väljatulek ( $m^3$ ) puuliikide ja sortimentide lõikes teisendatuna **absoluutselt kuiva puidu massiks tonnides** (t) puuliikidele vastavate tiheduse keskväärtuste alusel.<sup>134</sup> See võimaldab esitada ja võrrelda vajaliku toorme kättesaadavust ja vajadust eritüübiliste lähteainete korral erinevate tehnoloogiate rakendamisel. Aastate kohta tehtud ressursi analüüsis kasutati raiemahuna Kliimaministeeriumi poolset stabiilse raiemahu aastast prognoosi 10 miljonit  $m^3$  aastas<sup>135</sup> ning sortimenteerimisel kasutati RMK harvesteri 2011–2017 aasta andmete järgi loodud mudelit.

**Tabel 5.1 Aastate 2025–2050 hinnangulised keskmised väljatulekud puuliikide ja sortimentide kaupa (kuiva tonni aastas)**

Sortiment	Puuliik						Kokku
	haab	kask	kuusk	sang-lepp	hall-lepp	mänd	
Paberipuit	368 236	504 266	103 049			163 973	1 139 524
Küttepuit	74 951	144 580	95 797	235 824	126 880	43 361	721 394
Saepuru saetööstusest	5 731	28 978	54 595	6 584	10 074	80 581	186 544
Hakkpuit saetööstusest	26 300	132 980	250 537	30 214	46 228	369 788	856 047
Raidmed (potentsiaal)	69 258	84 404	70 682	30 771	26 878	87 488	369 481
Kännud (potentsiaal)			106 398			90 782	197 180
<b>Kokku</b>	<b>544 476</b>	<b>895 207</b>	<b>681 059</b>	<b>303 393</b>	<b>210 059</b>	<b>835 974</b>	<b>3 470 169</b>

<sup>133</sup> [Heinzeli Grupp](#)

<sup>134</sup> V. Uri, M. Kukumägi, J. Aosaar, M. Varik, H. Becker, K. Aun, A. Krasnova, G. Morozov, I. Ostonen, Ü. Mander, K. Lõhmus, K. Rosenvald, K. Kriiska, K. Soosaar, *Forest Ecology and Management*, 433 (2019) 248–262.

<sup>135</sup> [Metsa faktiliht | Kliimaministeerium](#)

Tabel 5.1 toodud andmete baasil on võimalik arvutada võimalike tehnoloogiate kasutamiseks sobiva ressursi vajadus tonnides. Esimese põlvkonna puitmassi-, keemilisetselluloosi- ja paberitehastele sobivad puuliigid Eestis on peamiselt kuusk, mänd, kask, ja haab, teisi võimalike liike nagu nt pappel või vaher on liiga vähe majandatavates metsades. Puitmassikiudude ja keemilise tselluloosi saamiseks klassikalistel meetoditel ei sobi saepuru, kuna puidukiud on liiga lühikesed. Küttepuitu, mis pole piisavalt sirge tüvega selle koorimiseks või on mädanikuga, ning ka raidmeid ei saa keemilise tselluloosi tootmiseks kasutada. Ilma kooreta hakkpuitu kasutatakse koos paberipuiduga. Samas on hakkpuit väga varieeruvate omadustega ja kvaliteetse tselluloosikiu saamiseks sorteeritakse sellest sobiva osakese suurusega fraktsioon sõelorterites välja (Vineeritehaste kasespooni jäätmetest tehtav nn tikuhake – pikkusega 3mm ja paksusega 0,1-0,15mm) või tiheduse järgi keerissorterites (hüdrotsüklonid erladavad massist koore, liiva ja metalliosakesed), mis jääb tihti alla 50% kogu valikust. Hakkpuitu kasutatakse enamasti 25-30% segatuna paberipuiduga. Keemilise tselluloosi tootmiseks sobivat ressursi on 2025-2050 mudeldatud andmete alusel ca 1.5 miljonit tonni aastas.

Keemilis-mehaanilise puitmassi (CTMP) tootmismeetodiga sobivad hästi toormeks kuusk ja mänd, aga pleegitatud keemilis-mehaanilise puitmassi (BCTMP) tehnoloogia korral on Eestis parim toore pehme lühikesekiulise ja heleda puiduga haab. Pabli hübriidid sobivad samuti selle tehnoloogiaga, mis eeldaks istanduste rajamist majandatava metsaga aladele, mida tulevikus ei saa välistada. Estonian Cell toodab praegu umbes 188 000 tonnist kuivast haava puidust 165 000-170 000 tonni pleegitatud kemo-termo-mehaanilist haavapuitmassi (BCTMP). Seega toorme kättesaadavus ja tehnoloogia pole takistuseks, et olemasolevat tehast suurendada või väiksemas mahus uue tehase tegemiseks piirkonda, kus toore on lähemal. Peamiseks probleemiks on BCTMP tootmistehnoloogia suur elektrienergia vajadus, mistõttu on piiravad tegurid majanduslikku laadi.

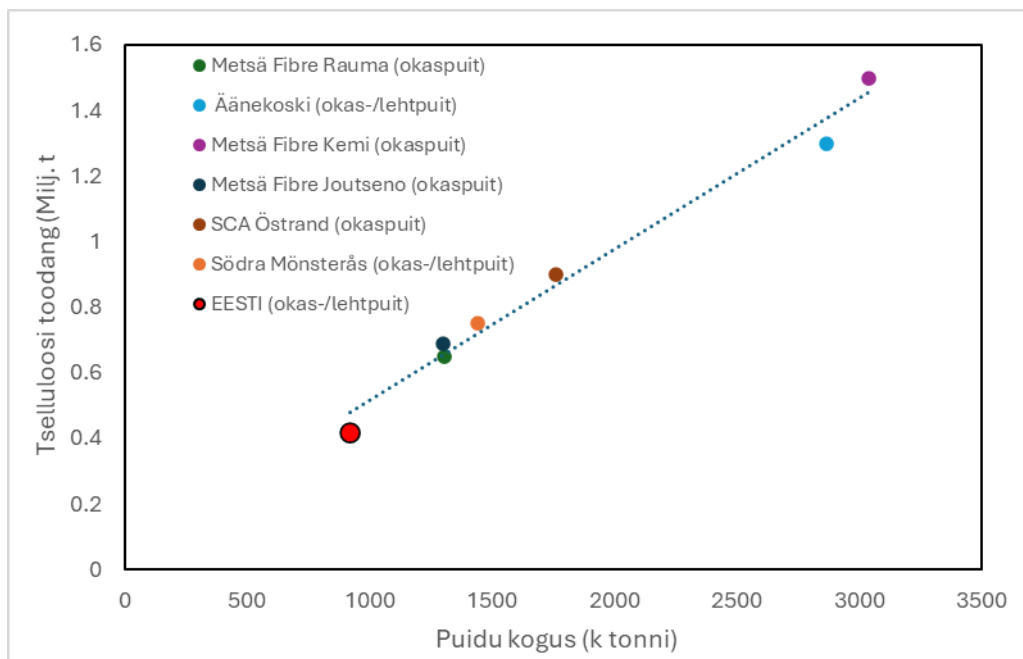
Sulfittselluloosi tehnoloogia rakendamiseks on samuti olemas parim toore kuuse näol (keskmiselt ca 200 000 tonni paberipuiduna ja kuuse hakkepuiduna (tavaliselt 30-50 % on piisavalt kvaliteetne) aastas). Kuusk on toormeks ka Horizon Tselluloosi ja Paberi AS paberivabrikus (~70 000 t). 130 000 t/a kuuske sisendiks eeldab väga hästi optimeeritud väikese tootmismahuga tehast fookusega ainult kõrgema lisandväärtusega toodetele, nt lahustuv tselluloos või spetsiaalselluloos (~45 000 t/a), Maksimaalset kõrvaltoodete voogude väärindamist (ligniin, ekstraktiivained (tallõli jt), energia, bioetanool)- arendada mini-biorafineerimise kontseptsiooni. Jätkusuutliku biorafineerimistehase, nagu on Borregaard Norras,<sup>136</sup> toorme maht on üle kahe korra suurem. Väiksema tehase investeeringud ja ülevälpidamine on kulukamad, sulfiteedukeemia regeneratsioon on vähem efektiivne ja energiakulu isemajandamise saavutamiseks vajab optimeerimist. Lahustuva tselluloosi turunišš on samuti volatiilne ja mõjutatud kasvavast eukalüpti-põhistest lühikesekiulisest odavast toodangust.

Esimese põlvkonna tehnoloogilistest meetoditest, kus eesmärgiks on lõpptootena paberitselluloosi saamine, on kõige jätkusuutlikum kraft-meetod ehk sulfaatkeedu tehnoloogia, mis pole nii puiduliigi tundlik. Toormena sobib väga hästi kasutada kaske, kuuske ja mäнди, kuid ka haaba. Horizon Tselluloosi ja Paberi AS kasutab Kraft-paberi tootmiseks kuuske ja mäнди kokku hinnanguliselt ~125 000 t/a. Seega tehase moderniseerimine ja skaleerimine ligemale kahekordseks on väljatuleva ressursiga võimalik, piirajaks võib saada puhta vee kättesaadavus praeguses asukohas. Samas võimalik skaleerimine ja ka paberiliinide lisamine aitab tootmist efektiivsemaks teha, vähendades sõltuvust fossiilsetest kütustest, keedukemikaalide regeneraerimist tõhustada jne.

Arvestades kraft-biorafineerimis- või biotoodete tehasele vajaminevaid mahtusid, saab kriitiliselt arvestada kokku võimalik toorme väljatuleku pealt maksimaalse võimaliku sisendi Eestist. Kogu olemasoleva ressursi pealt maha arvestades Horizon Tselluloosi ja Paberi AS paberivabriku tarbitava männi ja kuuse ning Fibernol OÜ Imavere arendustehasele potentsiaalselt tarbitava kase paberipuidu on potentsiaalne toorme hulgad järgmised: männi+kuuse paberipuit ~137 000 t/a (~337 700 m<sup>3</sup>/a) + kase paberipuit ~477 000 t/a (887 000 m<sup>3</sup>/a) + männi-kuuse hakkpuit saetööstustest (50%) ~310 000 t/a (~685 000 m<sup>3</sup>/a); kokku 924 000 t/a (1 909 700 m<sup>3</sup>/a), millest massi alusel on okaspuitu 48% ja

<sup>136</sup> Borregaard ettevõtte veebikeskkond. Vaadatud 25.07. [Link](#)

kaske 52%. Põhjamaade kraft-biorafineerimistehaste peamiseks produktiks on okaspuidu tselluloos (*ingl.k. northern bleached softwood kraft*, NBSK) aga ka vähesel määral lehtpuidu, peamiselt kase, pleegitatud tselluloos (*bleached hardwood kraft pulp*, BHKP), mille saagis sõltuvalt hakke osakaalust, valgendusest ja muudest teguritest on 43-45% puidust, seega ilma varuta oleks teoreetiliselt võimalik pleegitatud tselluloosi tootmise maksimaalne maht Eesti toormest ~400 000 t/a. **Error! Reference source not found.** on toodud mõnede Soomes ja Rootsis moderniseeritud tselluloositehaste ja biotoodete tehaste aastane toorme vajadus ja vastavad pleegitatud kraft-tselluloosi toodang võrdluses Eestis võimaliku mahuga ilma toorme impordita. Toodud tselluloositehased on peamiselt suunatud vabaturul müüdava (*ing.k. market pulp*) tselluloosi tootmisele, mis rahuldab nende paberitehaste vajadusi, millel ei ole integreeritud tselluloositootmist või mis ei suuda kogu oma tselluloosinõudlust sisemiselt rahuldada.



**Joonis 5.1** Skandinaavia tselluloosi- ja biotoodete tehaste pleegitatud kraft-tselluloosi toodangu ja selleks kasutatava toorme maht aastas.

Vabaturule tselluloosi müüvad tselluloositehased: Metsä Fibre Rauma (okaspuit),<sup>137</sup> pleegitatud tselluloosi toodang 0,65 milj,t, *energia isevarus* 180%; Metsä Fibre Joutseno (okaspuit)<sup>137</sup>, 0,69 milj,t, 180%; SCA Östrand (okaspuit),<sup>138</sup> 0,9 milj,t, 123%; Södra Mönsterås (okas-/lehtpuit), 0,75 milj,t, 120% (hinnanguline)<sup>139</sup>. Biotoodete tehased: Äänekoski (okas-/lehtpuit),<sup>140</sup> 1,3 milj,t, 240%; Metsä Fibre Kemi (okaspuit),<sup>141</sup> 1,5 milj,t, 250%.

Integreeritud tselluloosi tehase näitena, mis toodab tselluloosi peamiselt oma paberitehase jaoks, on nt UPM Kymi (850 000 t/a).<sup>142</sup> Biorafineerimistehas, võrdlus on nafta rafineerimistehas, peaks väärindama toormest võimalikult suure osa, seega lisaks tselluloosile ka hemitselluloosi suhkruid või ligniini. Uue biorafineerimistehase näitena saab tuua samal joonisel oleva Rootsi metsaomanike ühenduse Södra (Växjö, Rootsi) tehase Monsterås, kus planeeritakse välja arendada ligniini eraldamise võimekus koostöös Andritz'iga aastaks 2027.<sup>143,144</sup> See võib olla suurim kraft-ligniini pakkuv tehas aastase toodanguga 80 000 t. Kuid see on võimalik vaid teatud tingimuste täitmisel, millest peamine on energiasõltumatus. Södra omab kolme tselluloosi tehast, Värö (760 000 t okaspuu tselluloos), Mörrum (300 000 t/a okaspuu tselluloos, 170 000 t/a kase lahustuv tselluloos) ja

<sup>137</sup> Metsä: rauma pulm mill. Vaadatud: 25.07.2025 [Link](#)

<sup>138</sup> SCA veebiartikkel "A world leading NBSK-producer" Vaadatud: 25.07.2025 [Link](#)

<sup>139</sup> Södra veebiartikkel "Södra's green electricity surplus can supply more than 75,000 Swedish households" Vaadatud: 25.07.2025 [Link](#)

<sup>140</sup> Metsä: Äänekoski bioproduct mill. Vaadatud: 25.07.2025 [Link](#)

<sup>141</sup> Metsä: Kemi bioproduct mill. Vaadatud: 25.07.2025 [Link](#)

<sup>142</sup> UPM Pulp: Kymi. Vaadatud 11.06. 2025 [Link](#)

<sup>143</sup> ANDRITZ artikkel "ANDRITZ to supply world's largest lignin production system to Södra pulp mill in Sweden" [Link](#)

<sup>144</sup> Södra veebiartikkel "Södra to become the largest producer of kraft lignin in the world" Vaadatud 11.06. 2025 [Link](#)

Mönsterås (750 000 t/a okapuu ja kase tselluloos), mis kokku on energja ülejäägiga, lisaks omades tuulegeneraatoreid kõigi tehaste juures ja ka hüdroelektrijaama.<sup>139</sup> Koostööleping UPM-ga võimalikuks edasiarenduseks annab samuti kindlust investeringuks.<sup>145</sup> Samas vabaturul müüdava tselluloosi turg on väga heitlik ja Hiinast sõltuv. Metsä Fibre oli sunnitud oma tehase Joutsenos sulgema 09.06.2025 põhjendusega, et Aasiast pärit tellimuste maht on väga madal.<sup>146</sup> Joutseno tehase tootmismahd on 690 000 t/a ja töötajate arv 190.<sup>147</sup>

Eeltoodud Skandinaavia põhine andmete analüüs näitab, et kindlasti saab Eestis teha suuremahulise kraft- tehnoloogial põhineva vabaturule müüva pleegitatud tselluloosi tehase, mis kasutab kohalikku ressursi. Samas analüüsid eksisteerivate tselluloosi tootvate tehaste sõltuvust tootmismahust saab järeldada, et ilma suuremahulise puidu impordita kraft-biotoodete ja seega ka biorafineerimist pole võimalik jätkusuutlikult teha. Eestis on väga suur osa potentsiaalsest paberipuidu ressursist kasepuit, samas Skandinaavias enamasti okaspuit. Üksikud tehased Soomes-Rootsis kasutavad samuti osaliselt kaske ~20%, nt Äänekoski ja Mönsterås. Kasest saadud tselluloos konkureerib eukalüpti tselluloosiga ja selle hind on palju madalam kui okspuidu tselluloosil (NBKP). Jätkusuutliku üksi seisvana kraft-biotoodete tehase töös hoidmiseks Eestis peaks importima okaspuitu mahus, et energja isevarustus oleks tagatud ja hinnanguline tselluloosi tootmise maht oleks lähedane 600 000 t/a. Kraft-ligniini biorafineerimistehase korral peaks turvaline tselluloosi tootmismahd lähenema 800 000t/a. Muidugi on võimalik protsesse lähtuvalt eesmärgist optimeerida ning biomassi või fossiilsete kütuste kasutamisega energiabilanssi suunata.

### 5.2.3 TULEVIKUPOTENTSIAALI HINDAMINE

**KEMO-TERMO-MEHAANILIST HAAVAPUITMASSI** (BCTMP) tootmise kasumlikkus sõltub sisendite turuhinnast, sest vajab tootmiseks palju elektrienergiat. Eestis ei saa tootmisettevõtetest suurtarbijad soodsamat elektri hindu ja ostavad elektri Nordpool börsilt. Seetõttu on Estonian Cell AS olnud sunnitud tehase tööd korduvalt seiskama ning ettevõtte on ka mitmendat aastat kahjumis<sup>148</sup>. Tuuleparkide arendamine võib mingil määral leevendada käesolevaid elektrienergiast lähtuvaid probleeme, samas tootearendus sh teise põlvkonna tehnoloogiate rakendamine omab perspektiivi, kuna ressurss haava puidu näol mahu tõstmiseks on olemas (kaastegevus, mis annab lisandväärtust).

Sulfittehnoloogial tõenäoliselt Eestis potentsiaal puudub vajaliku toorme puudumisel, eelistatud on okaspuudest vaid kuusk, vaigurikas mänd pole eelistatud, arendada biorafineerimise konseptsiooni, kus mahud on märkimisväärselt suured nagu edukalt töötav näide Norras, Borregaard. Toorme tundlikkuse tõttu ei ole nišši turu nagu lahustuv või eritselluloosi tootmine Eesti asukohas piiratud ressursiga jätkusuutlik.

Kraft tehnoloogial on kindlasti tulevikupotentsiaal, kuna see meetod pole toormeliigi tundlik ja Eestis on vajalik ressurss olemas. Suur osa sellest on okaspuit (mänd, kuusk), mis sobib hästi kraft- protsessi. Samuti on Eestis olemas lehtpuidu (kase) ressursid, mida saab kasutada BHKP-i või isegi lahustuva tselluloosi tootmiseks. Tänu paljudele saeveskitele Eestis on samuti suures koguses saetööstuse kõrvalprodukte, laastud kiudude tootmiseks ja nt koor ning raidmed protsessi välisest energiast sõltumatuse saavutamiseks.

Esimene potentsiaalne arendus on olemasoleva Horizon Tselluloosi ja Paberi AS paberivabriku mahu tõstmine või analoogse tehase rajamine, mis potentsiaalselt kasutaks praegu eksporditavat kuuse ja männi paberipuitu, samas kase paberipuitu ei kasutaks. Eelduseks on toodetava jõupaberi turu olemasolu võimalikult lähedal ehk Euroopa turul aga ka mujal. Skaleerimine lisab kindlasti jätkusuutlikkust ja vähendab lisaenergiavajadust, samas ainult okaspuidu toormest lähtuva mahu kasv ei võimalda 100%-st energja sõltumatust. Positiivne on lõpptoodete lähedale jõudmine, paberi tootmine Eestis, uus paberiliin loob lisaks 200-400 töökohta. Keskkonna jalajälje seisukohalt on

<sup>145</sup> Södra veebiartikkel "Södra signs agreement to supply UPM with kraft lignin from world-leading new plant". Vaadatud 11.06. 2025 [Link](#)

<sup>146</sup> Paper Age artikkel "Metsä Fibre Taking Temporary Downtime at Its Joutseno Pulp Mill in Finland" Vaadatud 25.07.2025 [Link](#)

<sup>147</sup> Metsä: Joutseno pulp mill. Vaadatud: 25.07.2025 [Link](#)

<sup>148</sup> ERR artikkel "Estonian Cell jäi teist aastat järjest suurde kahjumisse" Vaadatud: 25.07.2025 [Link](#)

tegemist väga hea lahendusega, ilma pleegituseta on saagis puidust kõrgem, 50% lähedal ja heide keskkonda väiksem. Märkimisväärset lisaväärtust võiks luua sulfaattallõli ja -tärpentini eraldamine eraldi toodetena, mis on aga seotud vajamineva lisaenergia hinnaga.

Teine väga perspektiivne lahendus oleks rajada kaasaegne biorafineerimiskompleks, mitte ainult traditsiooniline tselluloositehas, mis lisaks tselluloosile toodaks kõrvalsaadusi. Realistlik lähtekoht oleks keskmise suurusega (500–600 kt/a) kraft-biotoodetetehas (toorme vajadus 1.1–1.3 milj. t; 2,4–3,0 milj. m<sup>3</sup>) millel on tugevalt integreeritud bioenergia plokk ja kõrvalproduktide väärimise potentsiaal biometanooli, tallõli ja sulfaattärpentini näol. Potentsiaalselt saab tehas pakkuda lähiümbruse asulatele soojusenergia lahendusi. Plussiks on kogu eksporditava paberipuidu sh kase kasutamise vajadus. Lähtuvalt olemasolevatest tehastest võiks olla uute töökohtade arv ~150-200 ja seotud töökohti ~1000.<sup>137</sup> **Samas ressursivajadus jätkusuutlikuks toimimiseks on väga suur, toorme impordita on energiasõltumatus saavutamine väga keeruline.** Peamistele produktidele on olemas väljakujunenud turg, samas nende poolproduktide edasisele väärimisele Eestis on vähe väljavaateid. Üksi seisva tehase puhul on määrava tähtsusega integreerida kõrgelt efektiivseid aurutsükleid ja uusimaid aurustamistehnoloogiasid, nagu Valmeti ja Andritzi poolt välja töötatud viimased süsteemid, mis nõuvad suuri investeeringuid. **Suure toorme vajadusega Kraft-tehnoloogial põhineva tehase miinusteks võib lugeda suuremat lisandväärtust loovate innovaatiliste tehnoloogiate Eestisse tuleku pärssimist ja potentsiaalset negatiivset mõju mehaanilise töötlemisele ressursi kättesaadavusele ja hinnale, mis vajaks eraldi analüüsi.**

### 5.3 TEISE PÕLVKONNA TEHNOLOOGIAL PÕHINEVATE BIORAFINEERIMISTEHASTE POTENTIAAL EESTIS

Teise põlvkonna biorafineerimistehaste all mõeldakse kogu biomassi rafineerimisele suunatud kaasaegseid tehnoloogiasid (nt UPM-i biokeemiatehas (Leuna, Sakasamaa) või ka Borregaard (Norra).

Võrreldes esimese põlvkonna tehnoloogiatega, kus peamisteks toodeteks on tselluloosikiud või puidumass, mis lõpp-produktina annavad mingil kujul paberi, võimaldavad teise põlvkonna tehnoloogial põhinevad biorafineerimistehased kasutusele võtta suurema osa puidu biomassis sisalduvast materjalist - tselluloosist, hemitselluloosist, ekstraktiivainetest ning ligniinist - millest saab toota laiema kasutus-spektriga tooteid, nagu suhkrud või nende derivaadid, ligniin, nano- ja mikrokristalne tselluloos, biogaas, mis on omakorda toormeks mitmekesisele tooteportfellile.

Teise generatsiooni tehnoloogiasid on tehnoloogiliselt keerulisemad võrreldes esimese põlvkonna tehnoloogiatega. Praeguseks hetkeks TRL 8-9 tasemele jõudnud tööstuslikud tehased kasutavad peamiselt lehtpuitu, kuid on juba töötavaid demotehaseid, mis potentsiaalselt saavad kasutada ka okaspuitu (vt. 3.3.2). Okaspuidu väärimise seisukohalt on praegu kraft-tehnoloogial selge eelis. Teise generatsiooni biorafineerimistehased on aga väiksemamahulised ja ei vaja nii suurt investeeringut kui näiteks krafti-põhised biotoodete tehased, mis on jätkusuutlikud ainult väga suurte mahtude juures. Väiksemamahulised biorafineerimistehaseid saab rajada kasutatava puiduressursi, majandatavate metsade ja saeveskite vahetusse lähedusse ning pole vajalik suur magevee olemasolu.

#### 5.3.1 RAKENDATAVUS EESTIS

Eestis on olemas hea potentsiaal 2. generatsiooni tehnoloogiate kasutuselevõtuks, kuid selleks on vaja suurendada innovatsioonivõimekust ning kohaneda uute puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärimise arengusuundadega.

Kaasaegsed teise generatsiooni biorafineerimistehased on planeeritud nii, et nende opereerimiseks vajalik sisendmaterjali hulk on väiksem võrreldes tavapärase esimese generatsiooni tehastega - UPM Leuna toodang Sakasamaal on planeeritud 220 000 tonni aastas, mis 90% saagise ja 40% puidu niiskuse juures tähendaks toormena ca 400 000 m<sup>3</sup> puidumassi, Fibenolil Imaveres asuvas demotehases ~30 000 t ja kavandatavas Läti Valmiera tööstuspargi tehases 300 000 tonni aastas<sup>149</sup>, mis vastab analoogselt 55 000 ja 550 000 m<sup>3</sup> kasepuidule. **Nendele andmetele tuginedes on Eestis**

<sup>149</sup>Fibeno artikkel "Fibenol Latvia – All you need to know" Vaadatud 25.07.2025 [Link](#)

**ruumi mitmetele lokaalsetele tehastele isegi skaleeritud kraft-tehnoloogial põhineva biotoodete tehase kõrval.** Mitme väiksema biotoodete tehase rajamisel võrrelduna ühe suure tehasega väheneb keskkonkakoormus (veetarve), logistiline koormus (vähem transpordist tulenevat müra- ja õhusaastet). Samas suurem potentsiaalne edasine puidu väärimine näiteks läbi puidusuhkrute fermentatsiooni või ligniini/nanotselluloosi kasutamise erinevate materjalide koostisosadena.

Fibenol on Imaverre ehitanud 2. generatsiooni demoskaalas arendustehase, mis toodab kasepuidust ca 20 000 t puidusuhkruid ja 6 500 t erinevate puhtusastmetega ligniini. Lisaks arendavad nad oma eeltööstustehnoloogia baasil alternatiivset protsessi, mille käigus on võimalik toota ka mikrokristalset tselluloosi ja ligniini.

Samuti võib kaaluda olemasolevate puidukeemiatehaste edasiarendust. Näiteks Estonian Celli hetkel kasutuses oleva tehnoloogiaga toodetakse keemilis-termomehhaanilist puidumassi, mis sobiks Põhja-Ameerikas arendatava TMP-Bio protsessi toormeks. TMP-Bio protsess võimaldab toormena kasutada nii leht- kui okaspuud (vt, 4.3.2.)

### **5.3.2 VAJALIKE TOORMETE JA LÄHTEAINETE KÄTTESAADAVUS JA KVALITEEDIKRITEERIUMID**

Teise generatsiooni biorafineerimistehased on toorme osas vähem nõudlikud võrreldes traditsioonilisel tselluloositootmisega, mis nõuab teatava kiupikkuse olemasolu töödeldavas puitmassis. Seetõttu on toormena võimalik kasutada lisaks paberipuidule veel sae- ja vineeritööstusest pärinevaid jäätmeid. UPM-i ja Fibenoli arendatavates 2. generatsiooni biorafineerimistehastes kasutatakse toormena kooritud lehtpuidu haket. Hetkel viiakse suur hulk potentsiaalsest toormest paberipuuna ja pelletina/hakkpuiduna välja. Seda oleks kasulik kohapeal väärimada. 2022. aasta puidubilansi järgi eksporditi Eestist ca 1,3 miljonit m<sup>3</sup> paberipuitu ja 5 miljonit m<sup>3</sup> pelletteid ja puiduhaket. Samas on Eesti metsadest saadava lehtpaberipuidu (kask, haab) osakaal ~3.3 korda suurem kui okaspuudu oma (Tabel 5.1). Kui lisada hall- ja sang-lepp, mis läheb peamiselt kütteks, siis 4,5 korda suurem. Teise põlvkonna tehnoloogiad on enamasti samuti tundlikud puidu koore suhtes, aga saepuru või mädanikust kahjustatud puidu kasutamine pole piirav, kuna pole vaja saada puidu kiudusid vaid tselluloos hüdrolüüsitaakse glükoosiks. Seega samuti kütteks kasutatav puit on kasutatav, kui palkide kuju/mõõtmed võimaldavad koorimist. Kui võtta tinglikult lehtpuude saepurust, hakkpuidust ja küttepuidust 50% kvaliteedilt sobivaks ja liita lehtpuidu paberipuit, siis kasutatava biomassi osakaal võrreldes esimese generatsiooni tehnoloogiatele sobivaga on üle kolmandiku suurem, ~ 1 600 000 t.

Põhja-Ameerikas GranBio poolt arendatav AVAP tehnoloogia ning FPIInnovations poolt arendatud TMP-Bio tehnoloogia võimaldavad toormena kasutada ka okaspuudu. Lisaks puiduressursile läheb tootmiseks vaja energiat elektri ja auru näol. Maailmas liigutakse üldiselt puhtama tootmise ja energia poole, mistõttu oluline ka taastuvatest allikatest saadava energia kättesaadavus (nt Skandinaavias ja Lätis hüdroenergia) ja selle hind. Osaliselt saab vajaminevat energiat toota koostootmisjaamades näiteks koore ja küttepuiduga või tehaste lähedal asuvates veetööstus- või biogaasijaamades biometaanina.

Samuti kasutatakse tootmisprotsessis anorgaanilisi happeid ja aluseid. 2. generatsiooni jätkusuutlikkuse piirajaks oli varemalt tselluloosist puidusuhkrute tootmisel kasutatavate ensüümide kättesaadavus, mis on jõudsasti edasi arenenud, tsellulaaside lähimad tarnijad asuvad Soomes ja Taanis.

### **5.3.3 TULEVIKUPOTENTSIAALI HINDAMINE**

Maailm peab liikuma puhtamate ja keskkonnasõbralikumate lahenduste poole, mis tähendab muuhulgas ka fossiilset päritolu kütuste ja kemikaalide kasutamisele alternatiivide leidmist. Üheks alternatiiviks on puidu biomassi kasutamine – see ressurss on taastuv ning seda on palju.

2. generatsiooni tehastes toimub puidu fraktsioneerimine selle põhiosadeks, mis on oma olemuselt pooltooted. Nende pooltoodete edasine tööstus võimaldab potentsiaalselt toota väga laia spektriga materjale ja kemikaale, mis osaliselt suudavad asendada naftakeemial põhinevaid tooteid.

2. generatsiooni tehnoloogiate abil saadud (pool)tooted – puidusuhkrud, ligniin, mikrokristalne tselluloos. Puidusuhkruid saaks osaliselt kasutada olemasolevate põllumajanduslikke suhkruid kasutatavate fermentatsioonitehnoloogiate juures drop-in komponendina (näiteks etanooli kääritamisel) või biogaasi tootmisel. Ligniin on veel üsna uudne materjal turul ja selle kasutamiseks käivad arendustööd. Kui tekib läbimurre ligniini lagundamisel selle algsadeks, on sellel väga suur potentsiaal erinevate hetkel fossiilset päritolu kemikaalide ja materjalide asendamisel.

Kõik 2. põlvkonna tehnoloogiad on potentsiaalsed suhkrute ressursi tootjad. Kui liita potentsiaalne ressurss puidult ja muudest allikatest, siis mahult oleks võimalik Eestisse rajada ka fermentatsioonil põhinev biorafineerimistehas, mis võib olla baasiks laiemalt keemiatööstusele tootmaks kütuseid ja mahtkemikaale.

#### **5.4 KOLMANDA PÕLVKONNA TEHNOOGLIAL PÕHINEVATE BIORAFINEERIMISTEHASTE POTENTSIAAL EESTIS**

Selle alapunkti all kirjeldatakse pikas ka 10-25 aasta perspektiivis turule tulevaid tehnoloogiad, mis oleksid potentsiaalselt rakendatavad Eestis.

Kolmanda põlvkonna biorafineerimise puhul on oluline märkida, et puidu fraktsioneerimise tehnoloogiate mõttes on selle fookus suuresti ligniinil ning hemitselluloosi ja tselluloosi fraktsiooni edasine töötlus ühtib teise generatsiooniga, kuna fraktsioneerimise käigus toimuvad muutused hemitselluloosi ja tselluloosi struktuuris on samad. Seega kätkeb kolmas põlvkond just meetodeid, mis võimaldavad ligniini lisandväärtust hüppeliselt suurendada läbi selle struktuuri kontrollimise fraktsioneerimise käigus. Siinkohal on oluline eristada puidu fraktsioneerimise ning järeltöötamise vahel- fraktsioneerimine on puidu biopolümeersete komponentide eraldamine, järeltöötamise käigus aga töödeldakse juba eraldatud biopolümeeride fraktsioone. Seega, kui teise põlvkonna biorafineerimine täidab eesmärgi kõik puidu komponendid väärdada, siis kolmanda põlvkonna biorafineerimine adresseerib ligniini struktuuri ning selle sihitud lagundamist ja/või säilitamist, kusjuures hemitselluloosi ja tselluloosi tulemid on sobilikud samadeks järeltöötamise väärtusahelateks nagu samade biopolümeeride tulemid teise generatsiooni biorafineerimisest.

##### **5.4.1 RAKENDATAVUS EESTIS**

Kui Eestisse tuleb juurde 1. põlvkonna ja 2. põlvkonna tehnoloogiatel põhinevat tootmist, kus puit lahutatakse komponentideks, on Eestis on olemas hea potentsiaal 3. generatsiooni tehnoloogiate kasutuselevõtuks piloottehastes, mis hakkavad neid komponente edasi väärdama kõrgema lisandväärtusega toodeteks.

Siinkohal on oluline märkida, et kolmanda põlvkonna tehnoloogiad on veel suuresti laboris ja väikesel pilootskaalal ning nende tööstuslik rakendamine nõuab hulganisti arendustööd ja on vähemalt 10-15 aasta kaugusel. Ei eksisteeri aga ühtki põhjust, miks ei võiks Eestis tulevikus olla 3. generatsiooni biorafineerimise üksusi. Selle tulek sõltub kahest peamisest aspektist:

- ✓ **Inimressurss**- kuna antud tehnoloogiate arendamine ja ka käitamine on teadmusmahukas, siis selle edukaks rakendamiseks Eestis on vajalik valdkonnas kvalifitseeritud tööjõu olemasolu- seda nii puidukeemia kui ka inseneria poole pealt
- ✓ **Arusaamine puiduressurssist keemilisest vaatepunktist.** Kuna kolmanda generatsiooni biorafineerimine sõltub suuresti puidus olevast ligniinist, siis selle omadused on määrava tähtsusega kui konkurentsivõimeline on puiduressuress antud tehnoloogiate raamistikus. Eelistatud on puit, kus ligniini struktuur on võimalikult homogeenne ning eetersidemete rikas. Seega ligniini struktuurile toetuv puidu kaardistamine nagu ka sellest lähtuv sordiaretus on midagi, mis võimaldab antud generatsiooni puhul Eestit tulevikus teistest riikidest diferentseerida.

**Antud kaks punkti loovad eelduse selleks, et Eesti oleks tulevikus atraktiivne sihtkoht välismaistele tehnoloogia arendustele kui ka ise võimeline tegema sellealast arendustööd tööstuslikust perspektiivist.**

#### **5.4.2 VAJALIKE TOORMETE JA LÄHTEAINETE KÄTTESAADAVUS JA KVALITEEDIKRITEERIUMID**

Kolmanda põlvkonna väikesemahuliste niššiturule orienteeritud biorafineerimistehaste rajamiseks vajalike toormete ja lähteainete (keemiline või lahustuv tselluloos, hemitselluloosid, ligniin, ekstraktiivained jt pooltooted) kättesaadavus 1. ja/või 2. põlvkonna biotoodete tehastest sõltub turuhinnast ja kontserniettevõtete puhul ka kontsernisisesest müügipoliitikast.

### **5.5 TERMOKEEMILISTEL TEHNOLOOGIADEL PÕHINEVATE TEHASTE POTENTSIAAL EESTIS**

#### **5.5.1 RAKENDATAVUS EESTIS**

Termokeemiliste lahenduste rakendatavus Eestis on väga hea. Väikeses mahus on seda juba praegu tehtud (biosöe tootmine, Baltania mustpellet), kuid potentsiaali on palju enamaks. Raidmed, koor aga ka kogu kütte- ja pelletipuit oleks võimalik termokeemilistes protsesside kaudu vääridada.

#### **5.5.2 VAJALIKE TOORMETE JA LÄHTEAINETE KÄTTESAADAVUS JA KVALITEEDIKRITEERIUMID**

Termokeemilistele tehnoloogiatele sobib toormeks nii madalakvaliteediline puit, puidujäätmed kui ka raidmed, koor jne. Olenevalt töötlemise eesmärgist võib toore olla ka liigiti täiesti heterogeenne. Hetkel jääb suur osa sellisest toormest vääridamata või kasutatakse otseselt soojusenergia tootmiseks.

#### **5.5.3 TULEVIKUPOTENTSIAALI HINDAMINE**

Termokeemiliste tehnoloogiate tulevikupotentsiaal (Tabel 5.2) on kindlasti märkimisväärne, kuna need tehnoloogiad võimaldavad kasutada vääridamiseks ka selliseid toormeid, mida teised vääridamistehnoloogiad kasutada ei saa. Termokeemiliste tehnoloogiate puhul on tegemist tehnoloogiliselt lihtsate, töökindlate ning nii üles kui alla skaleeritavate tehnoloogiatega, mida saab kasutada energia tootmiseks, energiakandjate tootmiseks aga ka platvormkemikaalide tootmiseks. Võrreldes paljude teiste tehnoloogiatega on termokeemiliste tehnoloogiate esmane investeering ka selgelt madalam.

Termokeemilised tehnoloogiad võimaldavad sobivalt skaleerituna tagada puidu ja põllumajandusjääkide vääridamise. Primaarses kasutuses võib termokeemilisi tehnoloogiaid kasutada väikesemahulise juhitava energiatootmise jaoks. Sekundaarselt pakuvad termokeemilised meetodid ka alternatiivi fossiilsetele toormetele keemia- ja kütusetööstuses.

Tabel 5.2 Termokeemiliste tehnoloogiate tulevikupotentsiaali hindamine

	Torrefitseerimine <sup>150,151,152</sup>	Pürolüüs <sup>153, 154, 155</sup>	Gasifitseerimine <sup>156</sup>	FT süsteem
<b>CAPEX</b>	45-59 MEUR (200Kt/a)	100 MEUR (200 Kt/a)	30 MEUR (1000 Kt/a)	26 MEUR (800 Kt/a)
<b>OPEX</b>	2,7 MEUR/a	17 MEUR/a	70 MEUR/a	81 MEUR/a
<b>Toore</b>	Paberipuit, raidmed, koor, haljastusjäätmed	Paberipuit, raidmed, koor, haljastusjäätmed	Paberipuit, raidmed, koor, haljastusjäätmed	sünteesgaas
<b>Primaarsed saadused</b>	Torrefitseeritud puit Kondensaat	Biosüsi Bioöli 40-80% Süngaas	süngaas	
<b>Sekundaarsed saadused</b>	VFA, HMF, furfuraal, biokemikaalid, EPS	VFA, HMF, furfuraal, fenoolsed ühendid	Vahad, etanool, metanool, lennuki kütused	
<b>Kasutus</b>	Energia tootmine, kütuste tootmine, kemikaalide tootmine	Energia tootmine, kütuste tootmine, süsinikuallikas terase tootmises, kemikaalide tootmine, adsorbent materjalid, katalüsaatorid	Energia tootmine, kütuste tootmine, platvorm kemikaalide tootmine	

## 5.6 FERMENTATSIOONITEHNOLOOGIAL PÕHINEVATE BIORAFINEERIMISTEHASTE POTENTIAAL EESTIS

### 5.6.1 RAKENDATAVUS EESTIS

Biotehnoloogias ning biorafineerimises kehtib pöördvõrdeline seos toote mahu ning selle väärtuse vahel (Joonis 4.3). Suure keskkonna jalajäljega mahtkemikaalid (nt etanool, atsetoon, butadieen), mis kuuluvad laiatarbekaupade alla, omavad seega ka suurt keskkonnamõju, kuid nende müügihind ning kasumimarginaalid on madalad. See muudab nende asendamise bio-põhiste alternatiividega väljakutsuvaks, mis sageli teostatav vaid tööstuse suur-korporatsioonidele (nt IFF, BASF, DSM, Cargill, Corbion). Kuna kallihinnaliste ravimite ja geeniteraapia komponentide tootmiseks vajaminevad toorme mahud on väikesed ning nende fermentatsiooni järgne töötlus väga kulukas, kompleksne ja spetsiifiline, tasuks Eestis kaaluda fermentatsiooni rakendada biopolümeeride või suurema tootmismahuga toodete jaoks (vt **Error! Reference source not found.**). Kuna Eestis on bio-põhise toorme ressursid piiratud fermentatsioonile, mis kasutab substraadina suhkrut, võiks puidusuhkrute fermentatsiooni suunal keskenduda eelkõige keskmise väärtuse ja mahuga kemikaalide tootmisele. Tuues välja mõned näited, võiks sellisteks kemikaalideks olla biopolümeerid, 'drop in' lennukikütuste komponendid, ensüümid (eelkõige tööstuslikud; s.h. toidutööstuses kasutatavad), kemikaalid toidu- ja kosmeetikatööstusele. Gaasfermentatsiooni tehnoloogia on Eestis rakendatav ka kõige suuremate mahtudega toodete (nt etanool, atsetoon) tootmiseks, kuna fermentatsiooni substraati ehk

<sup>150</sup> Maryam Manouchehrinejad et al, *Renewable Energy*, Volume 178, November 2021, Pages 483-493

<sup>151</sup> Laurenz Schmidt, *A Comprehensive Analysis of Torrefaction Technologies for Producing Advanced Wood Pellets*, Report by Council of Western State Foresters, 2021

<sup>152</sup> Laurenz Schmidt, *A Comprehensive Techno-Economic Analysis of Torrefaction*, 2021 by Future Metrics

<sup>153</sup> Riedewald, F. et al., *Waste Management*, Vol 120, 698-707

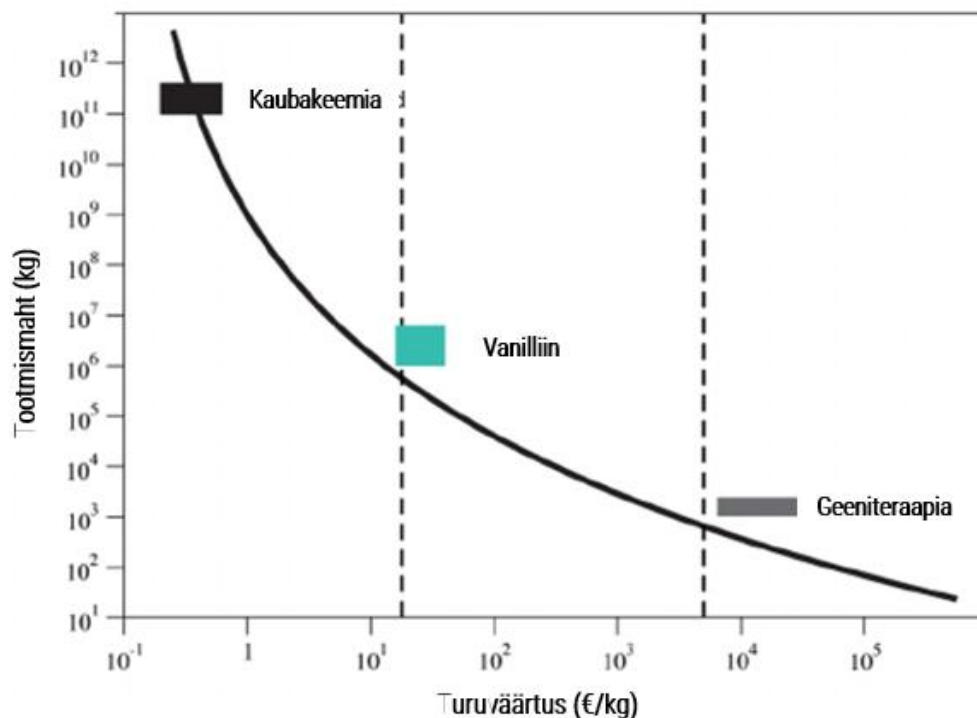
<sup>154</sup> Jerzak, W. et al, *Energies* 2024, 17(20), 5082; <https://doi.org/10.3390/en17205082>

<sup>155</sup> Mark M. Wright et al. *Techno-Economic Analysis of Biomass Fast Pyrolysis to Transportation Fuels*, NREL, Technical Report NREL/TP-6A20-46586

<sup>156</sup> Johannes Lindorfer & Lukas Zeilerbauer, *Technical, Economic and Environmental (TEE) Assessment of Integrated Biorefineries*, IEA Bioenergy: Task 42 & Task 33

sünteesgaasi (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) saab gasifitseerimisega toota piisavas mahus kasutades kõiki puidu liike ja osiseid (vt. 4.5).

**Kuigi Eestis veel 2025. a. biorafineerimisel põhinevad fermentatsiooni tehased puuduvad, pole tehnilisi takistusi nende siinseks loomiseks ning samuti on ülikoolides ning Toidu- ja Fermentatsioonitehnoloogia Arenduskeskuses (TFTAK) olemas tugev fermentatsioonialane kompetents.**



Joonis 5.2 Toote väärtuse ja tootmismahu seos biotoodetes ja keemiatoodetes

### 5.6.2 VAJALIKE TOORMETE JA LÄHTEAINETE KÄTTESAADAVUS JA KVALITEEDIKRITEERIUMID

Kvaliteetne puit sobib esmajärgus eelkõige traditsiooniliste kõrge väärtusega puittoodete valmistamiseks (uksed, aknad, elamud, jne), kuid puidu töötlemisel tekkivad kõrvaltooted nagu puidulaastud ja saetolm, kuid ka madalama kvaliteediga puit sobivad suurepäraselt puidu fraktsioneerimiseks puidusuhkruteks ning nende fermentatsiooni teel kõrgema lisandväärtuse loomiseks biopõhiste kemikaalide näol. Kui tselluloosele biomassi fraktsioonile leidub lisaks fermentatsioonile võimalus vääridada tselluloosi kiududeks, siis hemitsellulooside fraktsiooni lagundamisel tekkivad, peamiselt ksüloosist koosnevad, suhkrud (C5) on sobilikud just fermentatsiooniks või keemiliseks vääridamiseks ka pikemas ajaperspektiivis. Nende tootmise hind on madalam tselluloosist pärit suhkrutest (C6), mille töötlemisel tuleb kasutada ka ensümaatilist hüdrolyüsi. Tööstuslikud protsessid C5 suhkrute vääridamiseks eksisteerivad täna etanooli, laktaadi (polülaktaadi) ning farnesiini tootmiseks, kuid see nimekiri laieneb üha enam koos C5 suhkrute kasvava turule jõudmisega.

Puidusuhkrute eraldamiseks sobivad erinevad puuliigid sõltumata keemilise koostise varieeruvusest. Biomassi hüdrolyüsiks võiks sobida:

- ✓ Puidulaastud (saetööstuse jääk, 15% kogu puidust)
- ✓ Saetolm (saetööstuse jääk, ca 5% kogu puidust)
- ✓ Ning sobiks ka paberipuit, millele on aga loomulikult konkurents paberitööstuse poolt (44% kogupuidust).

Võttes arvesse eelmistes peatükkides kirjeldatud Eesti jätkusuutliku aastase raiemahu põhjal saadaolevat puidumassi 10 miljonit m<sup>3</sup>/a, on potentsiaalselt kasutada 2–6 mln t puitmaterjali. Olenevalt valitud tehnoloogiast, üks biorafineerimise tehas kasutaks suurusjärgus 0,3–3 mln m<sup>3</sup> puitu.

Gaasfermentatsiooni tehnoloogia koos eelneva puidu biomassi gasifitseerimisega (vt. p. 4.5) sünteesgaasiks võimaldab lisaks puidu suhkrute osale kasutada ning väärindada kogu puidu biomassi ning igat liiki puitu, mis teeb tehnoloogia maksimaalselt paindlikuks puidutoorme osas. Teisisõnu, gaasfermentatsiooni tehnoloogiaga ei kaasne otseseid kvaliteedikriteeriumeid toormele. Küll aga sõltub sünteesgaasi makrokoostis (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> sisaldus) puidust, selle eeltötlusest ning gasifitseerimise tingimustest, kuid gaasi-fermenteerivad mikroobid on paindlikud eri makrokoostiste suhtes, võimaldades maksimaalset substraadi kasutust. Oluline limiteeriv kvaliteedikriteerium gaasfermentatsiooni jaoks on aga sünteesgaasi puhtus mikroobidele toksiliste mikrokomponentide osas. Näiteks tsüaniidid, toluen jm ühendid võivad tekkida gasifitseerimise käigus ning seega on vajalik toksiliste ühendite sisalduse vähendamine sünteesgaasi puhastusega. Lisaks sünteesgaasile vajab gaasfermentatsioon mikroobide kasvuks vajalikke söötmekomponente sisaldavat vesilahust (odav mineraalsööde; N, P, S, Fe jne) ning kasvukeskkonna pH reguleerimiseks nt kaaliumhüdroksiidi (KOH), mis on kõik Eestis tehakse opereerimiseks kättesaadavad. Bioreaktorites fermentatsiooni läbiviimiseks on vajalik ka elekter ning ka selle kasutus sisendgaasi rõhu alla panemiseks kompressoriga.

Arvestades esimeses peatükis joonisel “Keemiliseks väärindamiseks sobilik ressurs” toodud Eesti puidu ressursse, on Eestis piisavalt tooret mitmete gasifitseerimisel ja gaasfermentatsioonil põhinevate tehaste rakendamiseks. Täpsed numbrid sõltuvad küll mitmetest geograafilistest ning tehnoloogiad pakkuvate ettevõtete intellektuaalomandisse kuuluvatest parameetritest, kuid keskmiselt on ühe sellise tehase rentaabluks vajalik toorme minimaalne kogus ~200 000 tonni kuiva biomassi.

### 5.6.3 TULEVIKUPOTENTSIAALI HINDAMINE

Mõlemal tehnoloogia puhul - asendades konventsionaalsed suhkrud puidusuhkrutega või fossiilse keemiatööstuse sisendi puidust saadud sünteesgaasiga - on mahukemikaalide tootmisel suurim positiivne keskkonnamõju (asendatakse suure mahuga fossiilne materjal). Samas peenkemikaalide tootmine võimaldab tänu oma kõrgele teadusarenduse tasemele luua veelgi suuremat lisandväärtust ja majanduslikku kasu. Oma väiksema tootmismahu tõttu asendatakse, aga väiksem kogus fossiilset materjali, mis omakorda on ka kliimale väiksema mõjuga. Eestis on arvestatav hulk kohalikku toorainet, millest on fermentatsiooni abil võimalik luua suurt lisandväärtust. Tänu headele teadmistele loodusteaduste vallas, on Eestil suur potentsiaal korrata biotehnoloogia valdkonnas IT sektori edulugu<sup>157</sup>.

Gaasfermentatsiooni tulevikupotentsiaal on suur, kuna nii tehnoloogiat arendav juhtivettevõte LanzaTech kui ka uuemad tulijad (nt Evonik, Siemens, Again) on turule toomas uusi rakendusi, mis võimaldavad veelgi laiendada sama infrastruktuuri kasutust uute bioühendite tootmiseks. See realiseerub siis peamiselt uute rakuvabrikute kasutusega samas tehases. Oluline on märkida ka seda, et gaasfermentatsioonil saadud produktid võivad olla olulised sisendid kohalikule keemia- ning materjalitööstusele (nt atsetoon, bioplast, etanool), tuues seega kaasa ka lisandväärtuse kasvu neis sektorites. Lisaks suudab gaasfermentatsiooni tehas kasutada sisendina ka sünteesgaasi, mis on toodetud muudest orgaanilistest allikatest, sealhulgas jäätmetest (vt peatükk 5). Tehnoloogia rakendatavust toetab ka see, et nii gaasfermentatsioon kui ka produktide eraldamiseks vajalikku järeltötlust viiakse läbi pidevprotsessina, mis alandab protsessi jooksvaid kulusid. Nagu ka tehase rentaabluks vajaliku minimaalse toorme sisendi koguse hindamisel, mõjutavad paljud koht-spetsiifilised ning ettevõtete konfidentsiaalsed parameetrid ka tehase maksumuse prognoosi, kuid keskmiselt peaks ühe gaasfermentatsiooni tehase maksumus jääma ~ 200 mln € juurde.

<sup>157</sup> Schiermeier. (2019). How Estonia blazed a trail in science. - *Nature* 565, 416-418. doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00209-7>

#### 5.6.4 SOTSIAAL-MAJANDUSLIKE MÕJUDE HINNANG

Fermentatsioonitehnoloogiate potentsiaali täielikuks rakendamiseks on vaja koolitada arvestatavas koguses biotehnoloogia spetsialiste, mis eeldab olemasolevate õppekavade populariseerimist ja uute lisamist<sup>158</sup>. Seejuures tuleb enam õpetada nii biotehnoloogia spetsialiste kui ka biotehnoloogiat toetavaid erialasid näiteks biotehnoloogiale keskendunud müügispetsialiste, juriste, biotehnoloogia-alast ettevõtlust, tööstusseadmete hooldajaid jne.

Kui seni on madala lisandväärtusega puitu kasutatud energia tootmiseks, siis stsenaariumi korral, kus see rakendatakse täielikult fermentatsiooniks, **tuleb leida alternatiiv ca 40% taastuenergia allikatele**, näiteks tuule- ja päikeseparkide taristu arendamise näol<sup>159</sup>.

Tänu fermentatsioonitehnoloogiate arendamisele suudetakse toota kohalikke, kõrge lisandväärtusega keemia-, toidu-, kütuse- ja kosmeetikatööstuse komponente, suurendades seeläbi SKT-d ja ekspordituluseid. Lisaks võivad need komponendid olla ka sisendiks kohalikele tööstustele, nt keemia-ning materjalitööstustele, võimaldades seega ka lisandväärtuse kasvu neis sektorites. Lisaks on fermentatsioonil põhinevate biorafineerimisüksustel suur potentsiaal kasvatada oma majanduslikku kasu peale esmase protsessi käivitamist, kuna uute toodete tootmiseks (kasutades uusi rakuvabrikuid) saab kasutada sama infrastruktuuri. Biotehnoloogia tehaste rajamine piirkondadesse, kus on rohkelt puiduressurssi ja vaba tööjõudu, näiteks Lõuna- ja Ida-Eestisse, looks olulisi uusi töökohti ja aitaks edendada elu maapiirkondades.

Suurem nõudlus puidu järele võib põhjustada nõudlust raiemahtude tõstmiseks ja puidu impordiks, avaldades survet elurikkusele. Samas, kuna biotehnoloogiline lahendus on oma olemuselt tsirkulaarne, aitaks see saavutada süsinikuneutraalsuse eesmärgi.

#### 5.7 POLIITIKASOOVITUSED RIIGIPOOLSETE STIIMULITE LOOMISEKS BIORAFINEERIMISTEHNOLOOGIADEL PÕHINEVALE ETTEVÕTLUSELE

Tekitades nõude biopõhise toorme lisamiseks fossiilpõhistele toodetele, tekitab nõudluse innovaatiliste toodete järele, soodustades seeläbi teadus-arendustegevust ja tootmisvõimekuse välja arendamist, mis toob pikas perspektiivis kaasa tehnoloogia kiirema arengu.

Selleks, et Eesti tehnoloogia arengus maha ei jääks, on oluline, et nii Eesti metsapoliitika, teadus-arendustegevuse, innovatsiooni ja ettevõtluse poliitika toetaksid terviklikult tooraine, teadmiste ja finantside vahelist koostööd. Valdkonna toetuste määramisel ei tohiks eelistada kindlat tehnoloogiat, vaid tuleks tugineda konkreetsete lahenduste energia- ja süsinikusäästlikkusele, protsessi keskkonnamõjudele ning leidma tehnoloogiad võimalikult suure hulga kohaliku toorme väärimiseks. Seejuures tuleks arvesse võtta, et enamuse biorafineerimise protsesse on võimalik jagada biomassi töötlemiseks (madalama väärtusega eelproduktiks, näiteks puidumass suhkruteks ja ligniiniks) ning eelproduktide edasiseks väärimiseks (näiteks puidusuhkrute fermenteerimisel valkudeks) kuid on võimalik ka fraksioneerimata puidu biomassi täielik väärimine (näiteks läbi gasifitseerimise-gaasfermentatsiooni). Toetusskeemid peaksid arvestama sellise dünaamikaga, sest tihti ei ole üksik ettevõtte võimeline kogu väärtusahelat toormest lõpp-tooteni üles ehitama. Biovaldkonna arengut toetav rahastus peaks jagunema nii innovatsiooni kui rakenduste toetamisele, et tagada kohalike innovaatiliste ideede teke ja elluviimine. Et suurendada nõudlust bio-põhiste kemikaalide vastu, tuleks toetuste määramisel arvestada ka ettevõtete toetamisega biopõhiste materjalide lõimimiseks oma toodetesse, sest uue koostisega toote stabiilsuse ning funktsionaalsuste testimised võivad olla kulukad. Seejuures toetada tuleks ka just TRL 4-6 tasemete arendustegevust, sest just seal valitseb suurim ressursside puudujääk innovaatiliste tehnoloogiate turule jõudmiseks.

<sup>158</sup> Baltic Biotech Action Plan. <https://biococonnectproject.eu/action-plan/>

<sup>159</sup> Statistikaamet: energeetika. Vaadatud 25.07 [Link](#)

## 5.8 SOTSIAAL-MAJANDUSLIK ANALÜÜS

### 5.8.1 METOODIKA

Sisend-väljundanalüüs (inglise keeles *input-output analysis*) on laialt levinud kvantitatiivne meetod majandusstruktuuri ja sektorite vaheliste seoste analüüsimiseks.<sup>160</sup> Analüüs põhineb sisend-väljund raamistikul, mis kirjeldab sektoritevahelisi tarneahelaid, tootmissisendite kasutust ning lõpptarbimist.<sup>161</sup> Tegevusalasid vaadeldakse üldjuhul majanduse tegevusalade klassifikaatori (nt EMTAK, NACE) kahekohalise koodi tasemel.

Raamistiku abil kvantifitseeritakse ühe sektori väljundid teise sektori sisenditena<sup>162</sup>. Seeläbi võimaldab sisend-väljundanalüüs:

- ✓ hinnata kuidas tootmismahutude muutus ühes sektoris mõjutab teisi sektoreid<sup>163</sup>;
- ✓ analüüsida majandusšokkide mõju kogu majandusele<sup>164</sup>;
- ✓ määratleda sektori panust SKP-sse ning tööhõivesse<sup>165</sup>.

Sisend-väljundanalüüsi käigus on võimalik analüüsida kolme tüüpi mõjusid<sup>166</sup>:

- ✓ otsesed mõjud – šokist tulenevad muutused SKP-s, riigieelarve laekumistes ja tööhõives analüüsitava sektoris;
- ✓ kaudsed mõjud – mõju teistele sektoritele läbi tarneahelate;
- ✓ indutseeritud mõjud – tarbijakäitumise muutusest tulenevad järelmõjud.

Analüüsi aluseks on 2020. aasta andmetel põhinev sisend-väljundraamistik RAT00005, mis on avalikult kättesaadav Statistikaameti andmebaasis. Erinevalt tabelist RAT00001 võimaldab RAT00005 eristada ka impordi osakaalu vahetarbimises. 2020. aasta andmed on hetkel kõige uuemad kättesaadavad sisend-väljundtabelid. Uuendusi tehakse ligikaudu viieaastase intervalliga ning need avaldatakse tavaliselt paar aastat pärast analüüsivat perioodi.

Kuna 2020. aastasse jääb ülemaailmse COVID-19 kriisi algus, võib andmestikus esineda šokist tingitud mõjusid. Siiski näitavad 2015. ja 2020. aasta sisend-väljundraamistike võrdlused, et struktuurid erinevad pigem marginaalsed. Varasemate aastate tabelite kasutamine võiks analüüsi tulemusi rohkem moonutada, kuna need kajastavad oluliselt vananenud majandusstruktuuri.

Tööhõivemõjude hindamiseks inimtööaastates kasutatakse Rahandusministeeriumi pikaajalist prognoosi, mis sisaldab andmeid keskmise brutopalgast ja selle prognoositava arengu kohta. Riigieelarve maksutulude (sh käibemaks ja tööjõumaksud) analüüs baseerub riigieelarve prognoosil, mis arvestab maksupoliitika muutustega ja nende mõjuga maksulaekumistele võrreldes varasemate aastatega. Modelleeritavate sektorite valik tugineb varasemate perioodide analüüsile.

Sisend-väljundanalüüsil on mitmeid kitsendusi, mis võivad mõjutada selle täpsust ja rakendatavust majandusanalüüsis.<sup>167</sup> Üheks peamiseks piiranguks on eeldus lineaarsetest seostest sektorite vahel, mis tähendab, et mudel ei arvesta võimalikke tehnoloogilisi ega struktuurseid muutusi majanduses.<sup>168</sup> Samuti ei võta see arvesse sisendite ja väljunditega seotud otseseid ressursipiiranguid.<sup>169,170</sup>

Lisaks ei hõlma sisend-väljundanalüüs järgmisi aspekte:

<sup>160</sup> Leontief, W., ed. (1986). *Input-output economics*. Oxford University Press.

<sup>161</sup> Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge university press.

<sup>162</sup> Ten Raa, T. (2006). *The economics of input-output analysis*. Cambridge University Press.

<sup>163</sup> Dietzenbacher, E., & Los, B. (1998). *Structural decomposition techniques: sense and sensitivity*. *Economic Systems Research*, 10(4), 307-324.

<sup>164</sup> Acemoglu, D., Carvalho, V. M., Ozdaglar, A., & Tahbaz-Salehi, A. (2012). *The network origins of aggregate fluctuations*. *Econometrica*, 80(5), 1977-2016.

<sup>165</sup> Ghosh, A. (1958). *Input-output approach in an allocation system*. *Economica*, 25(97), 58-64.

<sup>166</sup> Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge university press.

<sup>167</sup> Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge university press.

<sup>168</sup> Leontief, W., ed. (1986). *Input-output economics*. Oxford University Press.

<sup>169</sup> Dietzenbacher, E., & Los, B. (1998). *Structural decomposition techniques: sense and sensitivity*. *Economic Systems Research*, 10(4), 307-324.

<sup>170</sup> Ghosh, A. (1958). *Input-output approach in an allocation system*. *Economica*, 25(97), 58-64.

- ✓ mastaabiefekte, mis võivad tootmistaseme muutudes mõjutada tootlikkust<sup>171</sup>;
- ✓ asümmeetrilisi šokke, mis mõjutavad sektoreid erinevalt ja võivad tekitada majanduslikke tasakaalustusi<sup>172</sup>;
- ✓ regionaalseid eripärasid, mis võivad oluliselt muuta mõjusid riikide või piirkondade lõikes<sup>173</sup>.

Seetõttu on sisend-väljundanalüüs kasulik eeskätt statistilise tööriistana, kuid selle tulemusi tuleks käsitleda hinnanguliste ja lihtsustatud efektide modelleerimisena, mitte täpsete prognoosidena.<sup>174</sup>

## 5.8.2 TULEMUSED

Esimese ja teise põlvkonna puiduväärindustehnoloogiad kuuluvad sisend-väljundanalüüsis erinevatesse majandusharudesse, kuna nende sisendid, protsessid ja toodang on erinevad. Esimese põlvkonna tehnoloogiad (nt Kraft, TMP, BCTMP) on seotud klassikalise paberi- ja tselluloositootmisega ning kuuluvad EMTAK 17 alla. Teise ja kolmanda põlvkonna tehnoloogiad keskenduvad lignotselluloosse biomassi keemilisele või biokeemilisele väärimisele kõrgema lisandväärtusega toodeteks ning liigitatakse keemiatööstuse (EMTAK 20.14) alla.

Sotsiaalmajandusliku mõju hindamisel on aluseks võetud Riigimetsa Majandamise Keskuse (RMK) 2025. aasta jaanuarist aprillini avaldatud metsamaterjali statistikast pärinevad paberipuidu ja küttepuidu keskmised hinnad.<sup>175</sup> Hinnad on esitatud kuupmeetri kohta ning teisendatud tonnipõhiseks, kasutades värsket puidu tihedusi.<sup>176</sup> Paberipuidu sortimentide puhul on kasutatud männi, kuuse, kase ja haava keskmisi hindu ning nendele vastavaid tihedusi, mille tulemusel kujunes paberipuidu keskmiseks sisendhinnaks ligikaudu 116,90 eurot tonni kohta. Küttepuidu puhul on tonnihind saadud, kasutades paberipuidu liikide tiheduse keskmist. Siiski tuleb arvestada, et paberipuit on üldjuhul kõrgema kvaliteediga ja paremini väärimatav kui tavapärane küttepuit. Kasutatud tonnipõhine hind peegeldab seetõttu konservatiivset sisendhinnangut, eeldades, et väärimiseks kasutatakse valdavalt madalama kvaliteediga puidumassi, näiteks harvendusraiate jääke või väiksemamõõtmelist puitu. Paberipuidu ja küttepuidu hinnastatistika, tihedused ja arvutuslik tonnihind on Tabel 5.3.

**Tabel 5.3 Kütte- ja paberipuidu 2025. aasta hinnastatistika, hinnanguline tihedus ja arvutuslik tonnihind**

Puidu tüüp	Jaanuar	Veebruar	Märts	Aprill	2025	Tihedus	Hind tonni
	2025	2025	2025	2025	keskmine		kohta
	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	€/t
<b>Männipaberipuit</b>	52,44	54,25	53,70	54,99	53,85	422,70	127,38
<b>Kuusepaberipuit</b>	51,87	51,16	51,37	52,83	51,81	375,00	138,15
<b>Kasepaberipuit</b>	51,31	49,31	49,70	50,02	50,09	538,20	93,06
<b>Haavapaberipuit</b>	47,05	45,48	44,91	45,34	45,70	419,20	109,01
<b>Paberipuidu keskmine</b>	<b>50,67</b>	<b>50,05</b>	<b>49,92</b>	<b>50,80</b>	<b>50,36</b>	-	<b>116,90</b>
<b>Küttepuit</b>	<b>36,00</b>	<b>36,20</b>	<b>36,21</b>	<b>36,41</b>	<b>49,49</b>	<b>438,78</b>	<b>112,78</b>

Tabelist johtub, et erinevatel puidusortidel on nii kuupmeetri- kui tonnihinnad mõnevõrra erinevad. Kõige tihedam on kasepaberipuit, mille kuupmeetriline hind on küll madal, kuid suur mass teeb selle tonni kohta kõige soodsamaks. Samas on kuuse- ja männipaberipuidul kõrgemad €/m<sup>3</sup> hinnad ning väiksem tihedus, mistõttu on nende tonnihind märgatavalt kõrgem. Haavapaberipuit ja küttepuit jäävad hinna ja tiheduse poolest vahepeale. Üldiselt tähendab madalama kvaliteediga ja vähem tihe puit (nt küttepuit), et ühiku hind on madalam, kuid tonni kohta tuleb maksta rohkem. Seetõttu on

<sup>171</sup> Ten Raa, T. (2006). *The economics of input-output analysis*. Cambridge University Press.

<sup>172</sup> Miranda-Pinto, J., Silva, A., & Young, E. R. (2023). *Business cycle asymmetry and input-output structure: The role of firm-to-firm networks*. *Journal of Monetary Economics*, 137, 1-20.

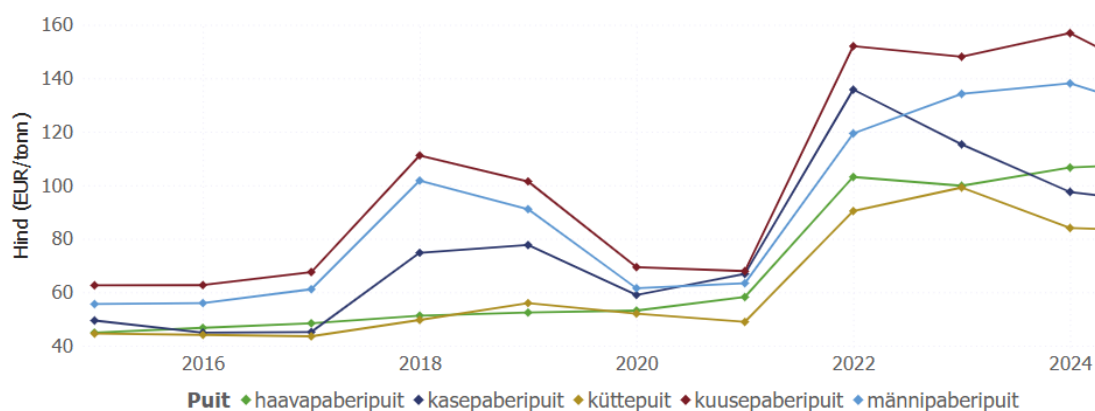
<sup>173</sup> Czamanski, S., & Malizia, E. E. (1969). *Applicability and limitations in the use of national input-output tables for regional studies*. *Papers in regional science*, 23(1), 65-77.

<sup>174</sup> Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge university press.

<sup>175</sup> Hinnastatistika on leitav: <https://rmk.ee/spetsialist/puidu-muuk/puidumuugi-pohimotted/>

<sup>176</sup> Tihedused baseeruvad: Kangur, A., Nigul, K., Padari, A., Kiviste, A., Korjus, H., Laarmann, D., ... & Metslaid, M. (2021). *Composition of live, dead and downed trees in Järvselja old-growth forest*. *Forestry Studies*, 75(1), 15-40.

keskmise tonnihind 116,90 €/t pigem ettevaatlik hinnang, eriti juhul, kui kasutatakse odavamad ja vähemväärtuslikku puitu.



Joonis 5.3 Puidu tonnihinna statistika 2015-2025

**Error! Reference source not found.** on näha, et väärimamiseks kasutatava puidu hind on olnud aastate lõikes varieeruv. Kui 2018. aasta hinnatõus jäi pigem lühiajaliseks, siis alates 2021. aastast on puiduhinnad märgatavalt tõusnud ning püsivad kõrgel tasemel, viidates struktuursele hinnamuutusele, mitte ajutisele kõikumisele. Eriti märgatav on hinnatõus kuuse- ja männipaberipuidul, mille hind püsib kõrgel ka 2024. aastal. Küttepuidu ja kasepaberipuidu hinnad on küll mõnevõrra stabiliseerunud madalamal tasemel, ent jäävad siiski selgelt kõrgemaks võrreldes 2021. aastaga. Kogu perioodi lõikes on näha, et ka madalama kvaliteediga puit, nagu küttepuit, on kallinenud, ehkki aeglasemalt. Hinnataseme üldine nihe ülespoole kõigis sortimentides kinnitab, et kasutatud konservatiivne sisendhind on põhjendatud ning võib osutuda isegi alahinnatuks, kui hinnatõus jätkub.

Sotsiaalmajanduslikud mõjud modelleeritakse tuginedes erineva sisendpuidu hinnale toodetele, mille kohta on kättesaadav usaldusväärne ja turupõhine hinnainfo.<sup>177</sup> Tooded, mille hinnastatistika puudub, jäävad hetkel analüüsist välja.

Modelleerimisel on rakendatud lihtsustatud eeldust tootmiskulude struktuuri kohta, mille kohaselt moodustab puidu osakaal kogukuludest 38%, muu tooraine, varude ja kaupade osakaal 12%, tegevuskulud 37% ning üldkulud 13%. Kulude jaotus tugineb Tschulkowi jt (2020) uurimusele, mis käsitleb lignotselluloosete puidupõhiste toorainete väärimist kõrgema lisandväärtusega toodeteks.<sup>178</sup>

Kuigi puidu osakaal võib konkreetsete toodete või tehnoloogiate lõikes varieeruda, võimaldab nimetatud jaotus pakkuda meetodiliselt ühtset ja võrdlevat alusstruktuuri. Selline käsitlus toetab sotsiaalmajanduslike mõjude hindamise läbipaistvust ja võrreldavust eri tooterühmade vahel. Analüüsis kasutatud tooted, toote väärimise põlvkond, turuhind, saagikus ja väärimise määrad erinevate sisendpuidu tüüpide lõikes on toodud Tabel 5.4. Tabel 5.5 on toodud puidukulu marginaalid erinevate toodete ja sisendpuidu lõikes.

Tabel 5.4 Tabel 5.5 alusel on esimese põlvkonna tooted, nagu pleegitatud kraft-tselluloos ja termomehaaniline puitmass, kõrge väärimise määra ning marginaaliga, mis viitab nende potentsiaalsele majanduslikule tasuvusele eri sisendpuidu tüüpide puhul. Seevastu teise ja kolmanda põlvkonna toodete puhul, eriti biopõhiste kemikaalide ja furaanühendite korral, ilmnevad

<sup>177</sup> On oluline välja tuua, et toodete maailmaturu hinnad on äärmiselt kõikumavad ja kajastatud hinnastatistika kajastab analüüsi teostamise hetkel kättesaadavat infot.

<sup>178</sup> Tschulkow, M., Compernelle, T., Van den Bosch, S., Van Aelst, J., Storms, I., Van Dael, M., ... & Van Passel, S. (2020). Integrated techno-economic assessment of a biorefinery process: The high-end valorization of the lignocellulosic fraction in wood streams. *Journal of Cleaner Production*, 266, 122022.

märkimisväärsed erinevused marginaalides. Vaatamata kõrgele turuhinnale on tootlused sageli madalad, tulenevalt puidu keemilisest koostisest, mille puhul sihtühendeid esineb vaid väikestes kontsentratsioonides, ning keerukatest ja ebatäielikest töötlemisprotsessidest. Sellest tulenevalt jäävad puidusisendi kulumarginaalid negatiivseks.

Sellised tulemused viitavad suurele sõltuvusele tootmiskontseptsioonist: kui neid tooteid ei toodeta kombineeritult, vääridades samaaegselt kogu puit biomassiks erinevateks komponentideks (nt ligniin, hemitselluloos, tselluloos), siis kujuneb majanduslik tasuvus ebatõenäoliseks.

Tõenäoliselt realiseerub selliste kõrge lisandväärtusega, ent madala individuaalse saagikusega toodete potentsiaal üksnes komplekssete ja integreeritud biorafineerimiskontseptsioonide raames, kus kõik fraktsioonid vääridatakse ning risttooted toetavad üksteise tasuvust.

Jätkuna eeltoodud tootetasuvuse analüüsile modelleeritakse sisend-väljundraamistiku alusel valitud toodete sotsiaalmajanduslik mõju, sealhulgas otsene, kaudne ja indutseeritud mõju ning nendega seotud eelduslik täiendav tööhõive inimaastates. Arvutused lähtuvad eeldusest, et toimub 10 000-tonnise lõpptoodangu tootmisšokk.

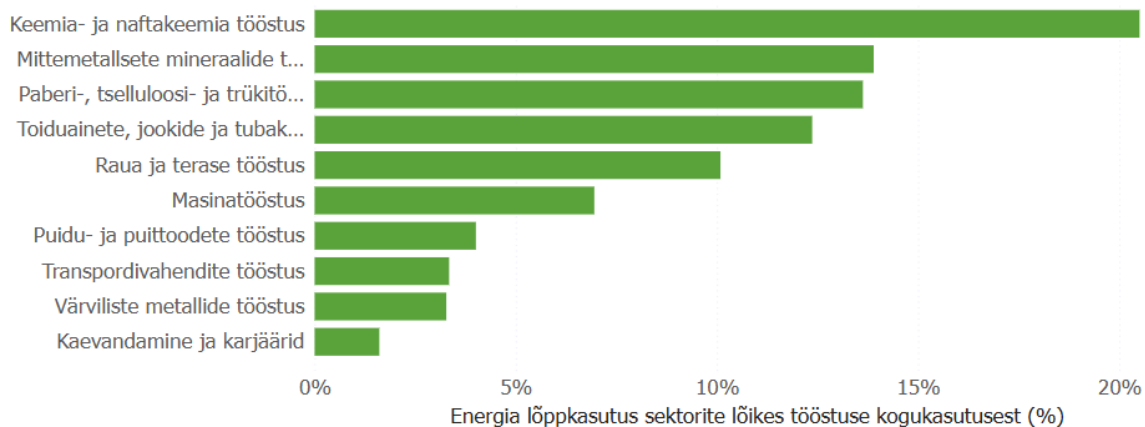
Otsene mõju korrigeeritakse iga toote vääridamise tootluse alusel, võrdluses vastava põlvkonna keskmisega, võimaldamaks paremat võrreldavust eri vääridamisastmetega toodete vahel. Korrigeerimise alusena kasutatakse hinnangulist sisendpuidu hinda 116,90 eurot tonni kohta, mis on tuletatud paberipuidu keskmisest kuupmeetri hinnast. Edasisse analüüsi on kaasatud vaid need tootekategooriad, mille puidukulu marginaalid viitavad potentsiaalselt tasuvale vääridamisele. Tulemused on esitatud **Error! Reference source not found.**

Esimese põlvkonna tooted, nagu pleegitatud kraft-tselluloos ja termomehaaniline puitmass, demonstreerivad stabiilset ja skaleeritavat tootlust koos lisandväärtuse loomise võimekusega. Nende puhul tuleneb mõju eelkõige optimeeritud tootmistehnoloogiast, suurtööstuslikust praktika kasutamisest ja sisendi- ning väljundivoogude laialdasest standardiseeritusest.

**Samas paistavad silma ka kolmanda põlvkonna kõrgväärtuslikud tooted, näiteks monomeersed fenoolid ja oligosahhariidid, mille potentsiaalne sotsiaalmajanduslik panus on märkimisväärne. Nende puhul tuleneb mõju peamiselt väga kõrgest ühikuhinnast, kuid seda tasakaalustab madal saagikus ning keeruline ja ressursimahukas vääridamisprotsess. Need protsessid eeldavad reeglina mitte ainult kõrgtehnoloogilist seadmeparki ja keerulist fraktsioneerimist, vaid ka võimalikke täiendavaid sisendeid (nt keemilised reagentid, energia, katalüsaatorid), mis suurendavad kulustruktuuri tundlikkust.**

Seetõttu on kõrgema põlvkonna toodete rakendamine realistlik peamiselt juhul, kui need integreeritakse laiapõhjalisse biorafineerimiskontseptsiooni, kus kogu biomass vääridatakse mitmeks väljundiks. Selline lähenemine võimaldab hajutada riske, jaotada tootmiskulusid ning saavutada sünergiline majanduslik tasuvus mitme toote koosmõjul. Niisugune kontseptuaalne raamistik eeldab aga süsteemset investeeringuplaani ja tugevat arendustegevust.

Lisaks puidu hinnale on puidu keemilise vääridamise tasuvuse seisukohalt määrava tähtsusega ka energia hind. Kui puidu mehhaaniline vääridamine on suhteliselt lihtne ja energiavajadus tagasihoidlik, siis edasiste, eelkõige keemiliste, vääridamisetappide puhul kasvab energiavajadus märgatavalt. **Error! Reference source not found.** illustreerib energiakasutuse o sakaalu sektorite lõikes tööstussektori kogukasutusest Euroopa Liidu 27 liikmesriigis 2023. aastal. Nagu jooniselt näha, on keemia- ja naftakeemia tööstus üks energiakulukamaid sektoreid, mille energiatarve ületab oluliselt teiste sektorite oma. Seetõttu on puidu vääridamise potentsiaali rakendamine Eestis otseselt seotud tööstustarbijatele konkurentsivõimelise energiahinna tagamisega, ilma milleta on keemiline vääridamine küsitav ka madalama sisendpuidu hinnaga.



**Joonis 5.4 Energia lõppkasutus sektorite lõikes tööstuse kogukasutusest**

\*Allikas: Autorite arvutused tuginedes Eurostati andmetabeli nrg\_bal\_s 2023 andmetele EU-27 kohta.

**Kokkuvõtlikult näitab analüüs, et kuigi esimese põlvkonna tooted pakuvad kindlat ja skaleeritavat majanduslikku mõju, peitub kõrgemate põlvkondade toodetes potentsiaal oluliselt suuremaks sotsiaalmajanduslikuks väärtuseks juhul, kui lahendada kaasnev tehniline ja operatiivne keerukus läbi integreeritud tootmislahenduste.**

Tabel 5.4 Sotsiaalmajanduslike mõjude analüüsis kasutatud tooted, põlvkond, turuhind ja väärindamise määr

Toode	Põlvkond	Lõpptoote turuhind EUR/tonni kohta	Ligikaudne lõpptoote tulem tonni puidu kohta	Väärindamise määr männipaberipuidu hinna alusel	Väärindamise määr kuusepaberipuidu hinna alusel	Väärindamise määr kasepaberipuidu hinna alusel	Väärindamise määr haavapaberipuidu hinna alusel	Väärindamise määr keskmise paberipuidu hinna alusel	Väärindamise määr küttepuidu hinna alusel
Pleegitatud okaspuidu kraft-tselluloos <sup>179</sup>	1	1 346,40	40%	4,23	3,90	5,79	4,94	4,61	4,78
Pleegitamata kraft-tselluloos <sup>180</sup>	1	1 038,40	50%	4,08	3,76	5,58	4,08	4,44	4,60
Lahustuv tselluloos <sup>181</sup>	1	1 173,04	30%	2,76	2,55	3,78	2,76	3,01	3,12
Termomehaaniline puitmass <sup>182</sup>	1	792,00	85%	5,28	4,87	7,23	5,28	5,76	5,97
Pleegitatud keemilis-termomehaaniline puitmass <sup>183</sup>	1	484,00	80%	3,04	2,80	4,16	3,04	3,31	3,43
Naatrium-lignosulfoaat <sup>184</sup>	1	602,80	10%	0,47	0,44	0,65	0,47	0,52	0,53
Toor-tallõli <sup>185</sup>	1	616,00	3%	0,15	0,13	0,20	0,15	0,16	0,16
Tärpentin <sup>182</sup>	1	2 200,00	1%	0,17	0,16	0,24	0,17	0,19	0,20
Lahustuvalt tselluloosilt saadav tselluloos <sup>180</sup>	2	1 173,04	30%	2,76	2,55	3,78	2,76	3,01	3,12
Kõrge puhtusastmega ligniin <sup>186</sup>	2	660,00	15%	0,78	0,72	1,06	0,78	0,85	0,88
Hemitselluloosi hüdrolüsaat <sup>187</sup>	2	880,00	10%	0,69	0,64	0,95	0,69	0,75	0,78
Segatud C5/C6 suhkrud <sup>188</sup>	2	303,60	30%	0,72	0,66	0,98	0,72	0,78	0,81
Mikrokristalne tselluloos <sup>182</sup>	2	2 112,00	5%	0,83	0,76	1,13	0,83	0,90	0,94
Jääkligniin <sup>186</sup>	2	140,80	20%	0,22	0,20	0,30	0,22	0,24	0,25
Monomeersed fenoolid (nt vanilliin) <sup>186, 189</sup>	3	19 360,00	3%	4,56	4,20	6,24	4,56	4,97	5,15
Aromaatsed dikarboksüülhapped <sup>190</sup>	3	1 311,20	2%	0,21	0,19	0,28	0,21	0,22	0,23

<sup>179</sup> PulPaperNews;

<sup>180</sup> Fastmarkets

<sup>181</sup> IndexBox

<sup>182</sup> Alibaba

<sup>183</sup> IndustryIntel

<sup>184</sup> ChemAnalyst

<sup>185</sup> BusinessAnalytiq

<sup>186</sup> Ludmila, H., Michal, J., Andrea, Š., & Aleš, H. (2015). Lignin, potential products and their market value. *Wood Research*, 60(6), 973–986

<sup>187</sup> Melin, K., Sermyagina, E., Saari, J., Lahti, J., Vakkilainen, E., Mänttari, M., & Kallioinen-Mänttari, M. (2025). Techno-economic assessment of hemicellulose extraction of softwood sawdust coupled with pelletising. *Energy*, 134886

<sup>188</sup> Kuo, P. C., & Yu, J. (2020). Process simulation and techno-economic analysis for production of industrial sugars from lignocellulosic biomass. *Industrial Crops and Products*, 155, 112783

<sup>189</sup> Ebrahimpourbora, Z., Mosalpuri, M., Yang, C., Ponukumati, A., Stephenson, C., Foston, M., & Wright, M. M. (2024). Comparative techno-economic and life cycle assessment of electrocatalytic processes for lignin valorization. *Green Chemistry*, 26(22), 11303–11315

<sup>190</sup> Pandey, S., Dumont, M. J., Orsat, V., & Rodrigue, D. (2021). Biobased 2,5-furandicarboxylic acid (FDCA) and its emerging copolyesters' properties for packaging applications. *European Polymer Journal*, 160, 110778

Toode	Põlv-kond	Lõpptoote turuhind EUR/tonni kohta	Ligikaudne lõpptoote tulem tonni puidu kohta	Väärindamise määr männipaberipuidu hinna alusel	Väärindamise määr kuusepaberipuidu hinna alusel	Väärindamise määr kasepaberipuidu hinna alusel	Väärindamise määr haavapaberipuidu hinna alusel	Väärindamise määr keskmise paberipuidu hinna alusel	Väärindamise määr küttepuidu hinna alusel
Oligosahhariidid <sup>191</sup>	3	4 840,00	10%	3,80	3,50	5,20	3,80	4,14	4,29
Ligniipõhised alkaanid <sup>182</sup>	3	4 224,00	5%	1,66	1,53	2,27	1,66	1,81	1,87
Äädikhape <sup>182</sup>	3	642,40	3%	0,15	0,14	0,21	0,15	0,16	0,17
Fenool <sup>189, 182</sup>	3	8 800,00	2%	1,38	1,27	1,89	1,38	1,51	1,56
Metanool <sup>186, 182</sup>	3	374,00	1%	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
n-Propanool <sup>186, 182</sup>	3	1 804,00	1%	0,07	0,07	0,10	0,07	0,08	0,08
Dimetüülformamiid (DMF) <sup>182</sup>	3	792,00	1%	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04
Dimetüülsulfoksiid (DMSO) <sup>182</sup>	3	3 080,00	0%	0,10	0,09	0,13	0,10	0,11	0,11
Süringhape <sup>186, 189</sup>	3	26 400,00	0%	0,41	0,38	0,57	0,41	0,45	0,47
Vanillhape <sup>186, 189</sup>	3	22 000,00	0%	0,52	0,48	0,71	0,52	0,56	0,59
Feruulhape <sup>186</sup>	3	44 000,00	1%	1,73	1,59	2,36	1,73	1,88	1,95
p-Kumaarhape <sup>186</sup>	3	44 000,00	1%	1,73	1,59	2,36	1,73	1,88	1,95

Tabel 5.5 Puidukulu marginaalid lõpptoote ja sisendi lõikes

Toode	Puidukulu marginaal männipaberipuidu hinna alusel (EUR/t)	Puidukulu marginaal kuusepaberipuidu hinna alusel (EUR/t)	Puidukulu marginaal kasepaberipuidu hinna alusel (EUR/t)	Puidukulu marginaal haavapaberipuidu hinna alusel (EUR/t)	Puidukulu marginaal keskmise paberipuidu hinna alusel (EUR/t)	Puidukulu marginaal küttepuidu hinna alusel (EUR/t)
Pleegitatud okaspuidu kraft-tselluloos	193,17	166,25	278,98	239,12	219,38	229,67
Pleegitamata kraft-tselluloos	139,83	118,29	208,47	176,58	160,79	169,03
Lahustuv tselluloos	21,14	-14,76	135,55	82,40	56,09	69,81
Termomehaaniline puitmass	151,10	138,43	191,48	172,72	163,43	168,27
Pleegitatud keemilis-termomehaaniline puitmass	24,69	11,23	67,59	47,66	37,79	42,94
Naatrium-lignosulfonaat	-1 044,77	-1 152,47	-701,54	-860,99	-939,94	-898,77
Toor-tallõli	-4 012,04	-4 371,03	-2 867,93	-3 399,43	-3 662,61	-3 525,36
Tärpentin	-11 902,35	-12 979,33	-8 470,02	-10 064,52	-10 854,06	-10 442,31

<sup>191</sup> Lan, K., Xu, Y., Kim, H., Ham, C., Kelley, S. S., & Park, S. (2021). Techno-economic analysis of producing xylo-oligosaccharides and cellulose microfibrils from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 340, 125726

Toode	Puidukulu marginaal männipaberipuidu hinna alusel (EUR/t)	Puidukulu marginaal kuusepaberipuidu hinna alusel (EUR/t)	Puidukulu marginaal kasepaberipuidu hinna alusel (EUR/t)	Puidukulu marginaal haavapaberipuidu hinna alusel (EUR/t)	Puidukulu marginaal keskmise paberipuidu hinna alusel (EUR/t)	Puidukulu marginaal küttepuidu hinna alusel (EUR/t)
Lahustuvalt tselluloosilt saadav tselluloos	21,14	-14,76	135,55	82,40	56,09	69,81
Kõrge puhtusastmega ligniin	-598,42	-670,22	-369,60	-475,90	-528,54	-501,09
Hemitselluloosi hüdrolüsaat	-939,43	-1047,13	-596,20	-755,65	-834,61	-793,43
Segatud C5/C6 suhkru	-309,24	-345,14	-194,83	-247,98	-274,30	-260,58
Mikrokristalne tselluloos	-1745,11	-1 960,51	-1 058,64	-1 377,54	-1535,45	-1 453,10
Jääkligniin	-583,41	-637,26	-411,80	-491,52	-531,00	-510,41
Monomeersed fenoolid (nt vanilliin)	3 110,68	2 751,69	4 254,79	3 723,29	3 460,11	3 597,36
Aromaatsed dikarboksüülhapped	-5 870,92	-6 409,41	-4 154,75	-4 952,01	-5 346,77	-5 140,90
Oligosahhariidid	565,37	457,67	908,60	749,15	670,19	711,37
Ligniini põhised alkaanid	-942,55	-1 157,95	-256,08	-574,98	-732,89	-650,54
Äädikhape	-4 002,00	-4 361,00	-2 857,89	-3 389,40	-3 652,57	-3 515,32
Fenool	-3 025,17	-3 563,67	-1 309,01	-2 106,26	-2 501,03	-2 295,16
Metanool	-12 596,23	-13 673,21	-9 163,90	-10 758,40	-11 547,94	-11 136,19
n-Propanool	-24 791,18	-26 945,15	-17 926,52	-21 115,53	-22 694,59	-21 871,10
Dimetüülformamiid (DMF)	-25 175,74	-27 329,71	-18 311,08	-21 500,09	-23 079,15	-22 255,66
Dimetüülsulfoksiid (DMSO)	-30 675,47	-33 367,93	-22 094,65	-26 080,91	-28 054,74	-27 025,38
Süüringhape	-53 659,74	-59 044,67	-36 498,10	-44 470,62	-48 418,28	-46 359,55
Vanillhape	-34 101,16	-37 691,11	-22 660,07	-27 975,08	-30 606,86	-29 234,37
Feruulhape	-87 56,70	-10 910,67	-1 892,04	-5 081,05	-6 660,11	-5 836,62
p-Kumaarhape	-87 56,70	-10 910,67	-1 892,04	-5 081,05	-6 660,11	-5 836,62

Märkused: Autorite arvutused. Negatiivne marginaal viitab kahjumlikule tootmisele saadaoleva puiduhinnastatistika alusel eeldusel, et järelejäävat puitu ei väärindata teisteks, täiendavateks toodete

Tabel 5.6 Puidukulu marginaali alusel kasumlike tootekategooriate hinnangulised sotsiaalmajanduslikud mõjud

Toode	Põlv- kond	Otsene mõju, mil EUR	Kaudne mõju, mil EUR	Indut- seeritud mõju, mil EUR	Lisand- väärtus kokku	Otsesed inimtöö- aastad	Kaudsed inimtöö- aastad	Indut- seeritud inimtöö- aastad	Käibe- maksu laekumine riigi- eelarvesse (mil EUR)	Tööjõu- maksude laekumine riigi- eelarvesse (mil EUR)	Maksu- laekumine riigile kokku
Pleegitatud okaspuidu kraft-tselluloos	1	2,99	4,03	1,26	8,28	57,63	59,65	16,83	0,82	1,53	2,35
Pleegitamata kraft-tselluloos	1	2,88	3,11	0,97	9,12	44,44	46,00	12,98	0,63	1,18	1,81
Lahustuv tselluloos	1	1,95	3,51	1,10	9,00	50,21	51,97	14,66	0,71	1,33	2,05

Toode	Põlv- kond	Otsene mõju, mil EUR	Kaudne mõju, mil EUR	Indut- seeritud mõju, mil EUR	Lisand- väärtus kokku	Otsesed inimtöö- aastad	Kaudsed inimtöö- aastad	Indut- seeritud inimtöö- aastad	Käibe- maksu laekumine riigi- eelarvesse (mil EUR)	Tööjõu- maksude laekumine riigi- eelarvesse (mil EUR)	Maksu- laekumine riigile kokku
<b>Termomehaaniline puitmass</b>	1	3,74	2,37	0,74	8,49	33,90	35,09	9,90	0,48	0,90	1,38
<b>Pleegitatud keemilis-termomehaaniline puitmass</b>	1	2,15	1,45	0,45	5,05	20,72	21,44	6,05	0,29	0,55	0,84
<b>Lahustuvalt tselluloosilt saadav tselluloos</b>	2	4,91	1,10	0,63	9,64	42,35	16,77	8,45	0,48	0,89	1,37
<b>Monomeersed fenoolid (nt vanilliin)</b>	3	71,94	18,12	10,45	150,02	698,90	276,85	139,39	7,92	14,75	22,67
<b>Oligosahhariidid</b>	3	59,95	4,53	2,61	79,47	174,72	69,21	34,85	1,98	3,69	5,67

Märkused: Autorite arvutused.

## 5.9 KOKKUVÕTE

Kraffttselluloosi tehnoloogia rakendamine Eestis on esimese põlvkonna tehnoloogiatest kõige jätkusuutlikum, kuna pole niivõrd toorme tundlik ja suudab protsessi suures osas ise energiaga varustada. Okaspuidu väärimise seisukohalt on praegu kraft-tehnoloogial samuti selge eelis. Teise generatsiooni birafineerimistehased on aga väiksema mahulised ja ei vaja nii suurt investeringut, kui näiteks krafti-põhised biotoodete tehased, mis on jätkusuutlikud ainult väga suurte mahtude juures. Kuigi olemasolevaid tehaseid saab laiendada, on täieliku energiasõltumatuses suure biorafineerimistehase rajamine ilma puiduimpordita väljakutse. Teised vanemad tehnoloogiad, nagu sulfittselluloosi tootmine, ei ole Eesti tingimustes tõenäoliselt elujõulised.

Teise põlvkonna tehnoloogiad pakuvad paindlikkust ja suuremat väärimist. Teise põlvkonna tehnoloogiad võimaldavad väärimada kogu puidu biomassi ja on Eestile väga perspektiivikad, kuna on väiksemamahulised ja toorme suhtes vähenõudlikud. See soodustab mitme lokaalse tehase rajamist, vähendades logistikakulusid ja keskkonnamõju.

Kolmanda põlvkonna ja termokeemilised tehnoloogiad on tuleviku võti. Kolmanda põlvkonna tehnoloogiad, mis keskenduvad ligniini väärimisele, pakuvad pikas perspektiivis võimalust luua kõrge lisandväärtusega tooteid. Termokeemilised tehnoloogiad on aga juba praegu küpsed ja võimaldavad väärimada ka kõige madalama kvaliteediga puitu energiaks, kütusteks ja kemikaalideks. Need on paindlikult skaleeritavad ja nõuavad väiksemat esialgset investeringut. Samas on oluline märkida, et kolmanda põlvkonna tehnoloogiad on veel suuresti laboris ja väikesel pilootskaalal ning nende tööstuslik rakendamine nõuab hulganisti arendustööd ja on vähemalt 10-15 aasta kaugusel.

Fermentatsioonitehnoloogiad loovad kõrge lisandväärtusega tooteid. Puidust saadud suhkruid ja sünteetigaasi saab kasutada väärtuslike biokemikaalide ja -kütuste tootmiseks, mis on oluline samm madala väärtusega puidu põletamiselt edasi liikumiseks. Eestis on selleks olemas tugev teaduslik kompetents, mis loob head eeldused valdkonna eduks. Teise ja kolmanda põlvkonna tehnoloogiad ja nende areng on eelduseks fermentatsiooni tehnoloogiate rakendamiseks.

Kuigi esimese põlvkonna tooted on stabiilse tasuvusega, peitub suurim majanduslik potentsiaal ja töökohtade loomise võimekus kõrgemate põlvkondade tehnoloogiates. Kõikide tehnoloogiate arenguks on vaja riigipoolseid stiimuleid, näiteks biopõhiste toodete nõudluse tekitamist ja teadusarenduse toetamist. Samuti on määrava tähtsusega konkurentsivõimelise energiahinna tagamine tööstusele.

## 6. ÜLEVAADE EKSPERTIDE VAJADUSEST

Kuuendas peatükis tuuakse välja, kuidas Eesti ülikoolide (TalTech, TÜ ja EMÜ) õppekavad toetavad puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise võtmetehnoloogiaid — alates hüdrotermilisest eeltötlusest ja ensümaatilistest hüdrolüüsist kuni ligniini ja nanotselluloosi kõrgeväärtusliku kasutuseeni. Analüüs tugineb sektori tööjõu- ning oskusvajadust kirjeldavatele OSKA metsandus- ja puidutööstuse uuringule<sup>192</sup>, OSKA keemia-, kummi-, plasti- ja ehitusmaterjalitööstuse uuringule<sup>193</sup> ning Eesti Metsa- ja Puidutööstuse Liidu visioonile aastani 2035<sup>194</sup>. OSKA raportites antud soovitusel rõhutavad, et uudsete puidutehnoloogiate ja sellega seotud tootearenduse laiem juurutamine eeldab senisest tugevama rõhu panekut kõrgharidusega (tipp)spetsialistide ja kutseharidusega oskustööjõu interdistsiplinaarsele ettevalmistusele ning tihedamat koostööd ülikoolide, teadusasutuste ja tööstuspraktikute vahel. Seoses uute puidukeemia arendusprojektide käivitamisega on puudus vajalike tööstuslike bioprotsesside opereerimise ning biotehnoloogia inseneria teadmiste ja oskustega spetsialistidest nii kõrg- kui ka kutsehariduse tasemel<sup>192</sup>. Metsa- ja puidutööstuses töötavatele oskustöölisele on järjest enam oluline oskuste laiapõhjalisus, mis võimaldab tööalast paindlikkust nii tööandja vaates kui ka töötaja jaoks<sup>194</sup>.

Alljärgnevalt vaadeldakse, millised puiduväärindamise alased kompetentsid on ülikoolide õppeprogrammides juba kaetud ning millistes puiduväärindamise tehnoloogilistes suundades tuleks õppekavasid, täiendkoolitusi ja mikrokraade arendada või juurde teha. Eestis arendatavate puidupõhiste biorafineerimistehnoloogiate konkurentsivõime saavutamiseks on vaja tagada insener- tehnilise, keemia ja puidukeemia erialaste teadmiste ja oskustega inimressurs ja pensionile siirduvaid töötajaid asendav vajalik töötajate järeikasv.

### 6.1 OSKA RAPORTI TULEVIKUVADE TÖÖJÕU- JA OSKUSTE VAJADUSELE METSANDUSE, PUIDUTÖÖSTUSE, KEEMIA-, KUMMI-, PLASTI- JA EHITUSMATERJALIDE TÖÖSTUSES

Metsanduse ja puidutööstuse põhikutsealadel töötas 2021. aastal kokku ligi 31 500 inimest, mis moodustab 4,5% kõigist Eesti hõivatutest<sup>195</sup>. MP valdkonnas oli töötajaid aastal 2024 järgmiselt: puidutöötlemine 16 300; paberi ja pabertoodete tootmine ligikaudu 1200; mööblitootmine 6700 töötajat, mis teeb kokku ligikaudu 24 200 töötajat<sup>196</sup>. Prognoosi kohaselt kasvab valdkonna põhikutsealadel hõivatute arv aastaks 2031 ligikaudu 4%, mis tähendab enam kui 1000 täiendavat töötajat<sup>195</sup>. Alavaldkonniti on kasvuvajadus märkimisväärne paberi-, tselluloosi- ja puidukeemiatööstuses (sõltuvalt põhikutsealast kuni 40%), Puidutööstuses suureneb arendustegevuste vajadus ennekõike andmetöötuse, energia säästmise, mõõtmistehnoloogiate ning puidu keemilise väärindamise valdkondades<sup>196</sup>.

Kuni 22% praegustest töötajatest (u 6700 inimest) siirdub pensionile, asendus- ja kasvuvajadusena kokku vajatakse igal aastal põhikutsealadele kokku ligi 800 uut töötajat ning eriti suur on asendusvajadus paberi- ja tselluloositööstuses, kus see ulatub kuni 30%-ni<sup>196</sup>.

Baastasemena käsitleti OSKA uuringus viimaste aastate keskmist raiemahtu (10,6 mln m<sup>3</sup>/a). MAK2030 kavand (seisuga 23.07.22) nägi ette raiemahu soovitusliku vahemikuna 9–11 mln m<sup>3</sup>/a ja sellega seoses pöörduti MP ekspertide/erialaliitude poole hinnangu saamiseks, millised alavaldkonnad ja põhikutsealad on enim, millised vähem ja millised mittemõjutatud raiemahu muutustest<sup>196</sup>. Hinnang anti kolme raiemahu muutuse variandi suhtes: väike tõus (12 mln m<sup>3</sup>), väike langus (9 mln m<sup>3</sup>) ja suur langus (7 mln m<sup>3</sup>)<sup>196</sup>.

<sup>192</sup> OSKA, *Metsandus ja puidutööstus: OSKA uuringud* (Tallinn: Kutsekoda, 2022).

<sup>193</sup> OSKA keemia-, kummi-, plasti- ja ehitusmaterjalitööstuse uuring, 2017

<sup>194</sup> Eesti Metsa- ja Puidutööstuse Liit, *Puidutööstuse arengusuunad 2035* (Tallinn: EMPL, 2022).

<sup>195</sup> "Tulevikuvaade tööjõu- ja oskuste vajadusele: metsandus ja puidutööstus" Avaldatud: 7.02.2023. [Link](#)

<sup>196</sup> *Majandusülevaade raport. Vaadatud 15.05.2025.* [Link](#)

Ekspert hinnangute arvesse võtmisel prognoosimudeli stsenaariumides selgus, et raiemahu väike tõus või langus võib mõjutada MP valdkonna töötajate arvu +/-3%, kuid suurem raiemahu langus võib põhjustada 13% töötajate arvu vähenemise ning raiemahu drastiline vähenemine mõjutab enim puidutööstust, kus vajatakse ligi 1500 töötajat vähem (12% töötajaskonnast)<sup>196</sup>. Osakaaluna hõivatutest võib suur raiemahu langus mõjutada enim siiski metsandust (vajatakse 19% ehk 850 inimese võrra vähem töötajaid), puitmajaehitus saaks rakendada 9% vähem töötajaid<sup>196</sup>.

Tippspetsialistide seas toob tootmise automatiseerimine ja tõhustamine ning kasvavate tootmismahude haldamine ehk kasvuvajadus ja asendusvajadus (23% tootmisjuhtidest on üle 55-aastased) vajaduse erialase ettevalmistusega tootmisjuhtide järele (valmistavad ette TKTK ja TalTech Virumaa Kolledz, kus õppurite hulk pole suur ja rakendusvõimalused on üle kogu tööstussektori), kelle töö on suunatud tootmisprotsesside arendamisele ja tõhustamisele<sup>196</sup>.

Tööstuslik tootmine ja tehnoloogia jätkuv areng, sh automatiseerimine ja efektiivsuse suurendamine ning suurema lisandväärtusega lõpptoodete tootmine tingib kasvava vajaduse erinevate tootmisoperaatorite, sh liini-, pingi- ja puidutöötlemise CNC-töötlemiskeskuste operaatorite järele<sup>196</sup>. Jõudsalt kasvavat nõudmist tootmisoperaatorite järele on oodata biomaterjalide ja biotoodete tootmises, kuid ka vananeva töötajaskonnaga (ligi 30% on vanuses 55+) paberi- ja tselluloositööstuses<sup>196</sup>.

Uute tehnoloogiate rakendamine, eriti kiire innovatsiooniga puidukeemia ja tööstuslike bioprotsesside arenduste raames, kasvatab vajadust nüüdisaegseid arendusprotsesse juhtivate spetsialistide järele, keda Eestis hetkel piisavalt pole<sup>196</sup>. Ekspertide hinnangul kasvab kümne aasta perspektiivis selles valdkonnas vajadus tootmisjuhtide ja -inseneride järele 40% ja paralleelselt tippspetsialistidega vajab tööstus ka märgatavalt rohkem (juhtide/spetsialistide vahekord 1 : 4) tootmisseadmete tehnikuid ja protsessioperaatoreid.<sup>196</sup>

Kutseõppe poole pealt on suurim puudus MP sektoris tootmisseadmete tehnikutest, mis on tingitud asjaolust, et tööstuslik tootmine aina enam automatiseerub ning digitaliseerub<sup>196</sup>. Suur puudus on ka pingi- ja liinioperaatoritest, hetkel täidetakse see puudujääk välistöötajatega<sup>196</sup>. OSKA uuring toob ka välja, et pehme mööbli valmistajate puhul on tegemist nn turutõrkega: olemas on koolituskohad ning koolitustegevus vastab nõudmisele, kuid lõpetajatest jõuab tööle vaid 10%.

OSKA programmi raames 2017. aastal koostatud keemia-, kummi-, plasti- ja ehitusmaterjalitööstuse (KKPE) valdkonna rakendusuuringu tulemustest<sup>197</sup> selgus, et väljaspool tõmbekeskusi (Tallinn, Tartu) on suurem puudus kvalifitseeritud kõrgharidusega juhtidest, tipp- ja keskastme spetsialistidest, **kutseharidust eeldavate laborantide puudusel värvatakse keemiaalase kõrgharidusega spetsialiste laborantideks**. Vastavalt prognoosile vajab KKPE valdkond aastas 115 uut töötajat, kellest 30 on spetsialisti ja 85 oskustöötaja tasemel. KKPE valdkonna erialadel oli viimase kolme aasta jooksul keskmiselt olnud 100 lõpetajat aastas<sup>197</sup>. Oluline on välja tuua, et keemiaprotsesside tehnoloogide soovitud pakkumine ületab statistiliselt nõudlust, kuid selleks, et katta keemiainseneride tööjõuvajadus, peaksid kõik bakalaureuse- ja rakenduskõrgharidusõppe lõpetajad minema edasi magistriõppesse<sup>197</sup>. Kutseharidusega oskustöötajate kvaliteedikontrollijate ja laborantide pakkumine katab vajaduse Ida-Virumaal, kuid teiste regioonide ettevõtted koolitavad oskustöötajaid kohapeal või palkavad **keemia- või materjalitehnoloogia kõrgharidusega lõpetanuid**, kes on üle kvalifitseeritud ja nende rakendamisel keemiainseneride ja tehnoloogidena puidurafineerimisel on kasutamata potentsiaal<sup>197</sup>. Tööstusseadmete ja -masinate seadistajad valdkonna oskustöölise osas töid eksperdid välja, et eriti jääb puudu automaatikutest, mehhatroonikutest ja elektrikutest. Keemiaprotsesside operaatorite osas ületas nõudlus

---

<sup>197</sup> Tööjõuvajaduse seire- ja prognoosisüsteem OSKA. Tulevikuvaade tööjõu- ja oskuste vajadusele: keemia-, kummi-, plasti- ja ehitusmaterjalitööstus euroopa liit euroopa sotsiaalfond eesti tuleviku heaks. Uuringu lühiversioon 2017. [Link](#)

statistiliselt pakkumist ja ettevõtteid väljaspool Ida-Virumaad koolitavad tööjõudu ise, kuid õpe peaks olema tagatud ka mujal Eestis<sup>197</sup>.

Koostamisel on uus OSKA raport “Keemia-, kummi-, plasti- ja ehitusmaterjalitööstuse valdkonna” kohta, mille avalikustamine on plaanitud 2025 sügis-talv. Plasti- ja kummitööstuse hariduspakkumise ja tööstuse nõudluse tasakaalu uuringus prognoositi järgnevas kümneks aastaks puudus kõrgharidusega plasti/kummitoodete valdkonna tootmisjuhtidest, arendusinseneridest/-tehnoloogidest<sup>198</sup>. Väikest kasvu prognoositi ekspertide poolt tippspetsialistidele, eelkõige tootearendus- ja tööstusinseneridele (+10%) ja lisaks suuremat vajadust keskkonnaspetsialistide järele. Oskustöötajate kategoorias jääb tööjõud stabiilseks, tehnoloogia kasutamine peaks veidi vähendama kvaliteedikontrollijate vajadust. Valdkonna tööjõuvajadus väheneb 10 aasta jooksul hinnanguliselt 240 töötaja võrra (keskmiselt 20-30 inimest aastas)<sup>199</sup>.

Keskkonna- ja kvaliteedispetsialistide koolituspakkumine on piisav, kuid samas katsetajaid/laborante ei koolitata piisavalt. Tööstusseadmete ja masinate mehaanikute vajaduse ja pakkumise osas prognoositakse tasakaalu, kuid oskustöölise osas ei koolitata piisavalt tööstusseadmete ja -masinate seadistajaid ning operatoreid, sest plastitööstuse seadistaja töökohapõhine õpe ei toimi ja õppekava vajab kohandamist ettevõtete võimalustele.

## 6.2 TEEKAARDI PÕHJAL KAARDISTATUD KOMPETENTSID

Puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise valdkonnas rakendatavad tehnoloogiad eeldavad erinevatel õppetasel teadmisi ja oskusi, mis ulatuvad klassikalisest keemiast biotehnoloogiliste protsesside ja materjaliteaduseni. Käesolevas analüüsis on valdkondlikud kompetentsid kaardistatud lähtudes teekaardis kirjeldatud tehnoloogilistest suundadest ning nende seosest teadmiste ja oskuste. Kaardistamise aluseks on võetud järgmised sammud:

- ✓ Esmalt analüüsiti T-kaardis kirja pandud tehnoloogiaid ja protsesse, mis on seotud biomassi (sh puidu) väärindamisega.
- ✓ Teiseks, analüüsiti iga tehnoloogia puhul selle rakendamiseks vajalikke põhikompetentse, kasutades tugialkatena OSKA sektoriuuringut, Eesti Metsa- ja Puidutööstuse Liidu arengudokumente ning Tartu Ülikooli ja TalTechi teaduslaborite ja õppekavade sisulisi kirjeldusi.
- ✓ Kolmandaks süstematiseeriti kompetentsid üheteistkümne võtmetehnoloogilise suuna alla (T1–T11).

Tabelis 6.1 on toodud iga tehnoloogilise suuna vastavad teadmiste ja oskuste grupid. Selline jaotus annab võimaluse õppekavasid sisuliselt analüüsida ning võimaldab hinnata, milliseid kompetentse olemasolevad õppekavad katavad ja millistes valdkondades esineb vajakajäämisi. Esitatud üksteist kompetentsivaldkonda kirjeldavad olulisi teadmisi ja oskusi, mis on puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise jaoks kriitilise tähtsusega. Need katavad puiduväärindamise väärtusahela eri etapid alates mehaanilisest (T1) keemilisest eeltööstusest (T2) kuni keerukate ensümaatiliste ja mikrobioloogiliste bioprotsesside (T3, T4) ja kõrgväärtuslike materjalide (T5, T6, T10) tootmiseni. Lisaks hõlmavad need protsesside integreerimist ja piloteerimist (T7), termokeemilist konversiooni (T8), digitaaliseerimist ja automatiseerimist (T9). Oluline roll on integreeritud teadus ja arendustööl ja innovatsioonijuhtimisel (T11). Iga kompetentsisuund hõlmab nii teaduslikke aluseid (nt keemia, mikrobioloogia, materjaliteadus) kui ka rakenduslikke oskusi (nt protsesside juhtimine, laboripraktika, analüüsimeetodid) kui üldpädevusi projekti- ja finantsjuhtimine, sotsiaal-majanduslik analüüs, digitaliseerimine ja regulatsioonide ning kestlikkuse hindamist, intellektuaalomandi ja patente haldamist.

<sup>198</sup> OSKA\_PLAST-KUMM\_IL\_VEK\_02.04.25\_slaidid.pdf (7.04.2025)

<sup>199</sup> OSKA\_PLAST-KUMM-juhtrühm-IL\_2.04.2025\_memo

**Tabel 6.1 Puidukeemia ja biorafineerimise tehnoloogia suundadega seotud põhikompetsentsid.**

Tehnoloogia suund	Põhikompetsentsid
<p><b>T1 – Biomassi eeltöötlus (mehaaniline-keemiline)</b>                      Biomassi mehaaniline-keemiline fraktsioneerimine auru-, hüdrotermilise või happelise eeltöötusega ning massi-/energiabilansside juhtimine.</p>	<p>Puitse biomassi laastustamine ketasraiemasinaga ja defibraatorjahvatus kiumassi saamiseks ja puitpolümeerkomposiitide (köva- ja pehme puitkiudplaat) tootmiseks, kus on oluline teada puidu ehitust- , omadusi ning puidutehnoloogiad.                      Massi- ja energiabilansid ning keemiatehnoloogia alused.                      Aurutöötlus, hüdrotermiline ja happeline eeltöötlus.                      Reaktoriprotsesside juhtimine ja separatsioonitehnoloogiad.                      Materjalide korrosioon, rõhk ja kuumustaluvus.</p>
<p><b>T2 – Keemiline töötus ja analüüs</b>                      Puidu lahutamine komponentideks: tselluloos, hemitselluloosid, ligniin ja ekstraktiivained. Sulfit ja sulfaattselluloosi tootmine. Puitmassi ja keemilise tselluloosi pleegitus, keemiline modifitseerimine ja puidukomponentide kvaliteedianalüüs spektroskoopiliste ja kromatograafiliste meetoditega.</p>	<p>Orgaaniline keemia (reaktsioonimehhanismid, lahustuvus, modifitseerimine).                      Orgaaniline ja analüütiline keemia (NMR, FT-IR, GC-MS, HPLC).                      Lahustid ja keemiline modifitseerimine (nt ionvedelikud, orgaanilised solvendid).                      Polümeeride ja fenoolsete ühendite reaktsioonimehhanismid.                      Katalüsaatorite (homogeensed ja heterogeensed) kasutamine.                      Tselluloosi derivaatide saamine, tehnoloogiliste ja füüsikalise-keemilised omadused. rohelise keemia meetrika ja biorafineerimissüsteemid biotoodete tootmiseks.</p>
<p><b>T3 – Ensümaatiline töötus</b>                      Ensüümide abil tselluloosi ja hemitselluloosi hüdrolyüs ning vastavate bioreaktorite juhtimine.</p>	<p>Biokeemia ja ensüümide kineetika.                      Ensüümide tootmine, puhastamine ja immobiliseerimine.                      Bioreaktorite disain ja juhtimine (pH, temperatuur, segamine).                      Substraadi ligipääsetavus ja inhibeerivate ainete mõju.</p>
<p><b>T4 – Tööstuslik mikrobioloogia ja fermentatsioon</b>                      C<sub>5</sub>/C<sub>6</sub>-suhkrute fermentatsioon ja tööstuslik mikrobioloogiline tootmine.</p>	<p>Mikroorganismide kultiveerimine ja steriilsed töövõtted.                      C<sub>5</sub>/C<sub>6</sub>-suhkrute metabolism ja fermentatsioon.                      Rakusisene transport ja metabolismi juhtimine.                      Protsesside jälgimine ja tootlikkuse optimeerimine.</p>
<p><b>T5 – Ligniini väärindamine</b>                      Ligniini fraktsioneerimine, keemiline derivatiseerimine ja funktsionaalsete toodete väljatootamine.</p>	<p>Ligniini sadestus, modifitseerimine ja kuivatamine.                      Struktuurne ja funktsionaalne karakteriseerimine.                      Ligniini derivaatide kasutamine (liimid, vaikude eelühendid).                      Termilise ja mehaanilise töötlemise mõju materjalide omadustele.</p>
<p><b>T6 – Tselluloosi väärindamine.</b>                      Nanotselluloosi ja komposiitide arendamine                      Tselluloosi lahustamine ja funktsionaliseerimine.                      Nanotselluloosi valmistamine, bioplastide, komposiitide ja materjalide karakteriseerimine.</p>	<p>Tselluloosi derivaatide saamise tehnoloogiad rakendused.                      Mikrokristalliline ja nanotselluloos ja nende karakteriseerimine.                      Nanotehnoloogia ja kolloidkeemia alused.                      Mehhaanilised ja keemilised dispergeerimismeetodid.                      Materjalide iseloomustamine (reomeetria, osakeste suurusjaotus).                      Rakendused: kilematerjalid, filtrid, komposiidid.</p>
<p><b>T7- Rakendusuuringud uute protsesside integreerimiseks</b>                       Protsesside integreerimine, piloot- ja demomastaabis arendus ning ettevõttepõhine R&amp;D-juhtimine.</p>	<p>Süsteemne protsessidisain ja -integreerimine (pinch-analüüs, energiakasutuse optimeerimine).                      Skaleerimine: labor → piloot → tööstus (TRL 3-7).                      Tehnoloogiline ja sotsiaal-majanduslik analüüs (TEA) ja elutsükli hindamine (LCA).                      Regulaarse vastavuse hindamine (REACH, BAT, kestlikkus-taksonoomia).                      Piloot- ja demoskaala seadmete käitamine, ohutus ja digitaalne protsessi monitooring, andurite integreerimine, automatiseerimine, kvaliteedijuhtimine (GMP/ISO). Projektijuhtimine, teadmussiire, IP-juhtimine ja riskianalüüs.</p>
<p><b>T8 – Termokeemiline konversioon</b>                      Puidu gaasitamine, pürolüüs ja torrefitseerimine</p>	<p>Termodünaamika ja reaktiivsus kõrgetel temperatuuridel.                      Reaktorsüsteemide disain ja protsessijoukulu modelleerimine.</p>

Tehnoloogia suund	Põhikompetentsid
	<p>Sooja- ja massiülekanne ning soojuskontroll.            Saaduste analüüs ja separatsioon (GC-MS, FT-IR).            Ohutus ja keskkonnamõjude hindamine (põletussüsteemid, heitgaaside puhastamine, LCA). Piloot- ja tööstusskaala, korrosioonikindlad materjalid.</p>
<p><b>T9 – Digitaaliseerimine ja automatiseerimine</b>            Puidu väärindamise protsesside andmepõhine juhtimine ja optimeerimine.</p>	<p>Protsessiautomaatika ja SCADA/DCS süsteemide tundmine.            Andurite valik, kalibreerimine ja andmete kogumine (temperatuur, pH).            Andmetöötlus ja tehisintellekt (reaalajas analüütika, protsessioptimeerimise mudelid).            IoT ja sideprotokollid (OPC UA, MQTT jne).            Protsessimudelid ja simulatsioon (MATLAB/Simulink, Aspen Plus, digikaksik).            Sertifitseeritud programmeerimine ja infoturve (TLS/SSL, ISA-95, IEC 62443).            Projektijuhtimine interdistsiplinaarses meeskonnas.</p>
<p><b>T10 – Biopolümeeride ja biomaterjalide disain</b>            Puidupõhiste polümeeride süntees ning komposiitide arendus funktsionaalsete materjalide loomiseks.</p>	<p>Biopolümeeride saamine ja omadused. Biopolümeeride tehnoloogiad. Tselluloosi derivaadid. Tselluloosi ja teiste biopolümeeride lahustamine (ILLs) ja esterdamine rasvhapetega reaktiivekstrusioonil uudseteks bioplastideks.            Polümeerikeemia ja süntees (radikaalne ja kondensatsiooniline polümerisatsioon).            Tehnoloogiliste omaduste määramine, sulavoolavusindeks (MFI), reoloogia, amorfse ja kristallilise faasi määramine.            Materjaliteadus ja karakteriseerimine (DSC, TGA, DMA, XRD, SEM/TEM). Nanotehnoloogia ja pinnamodifitseerimine (nanotselluloosi tootmine, pinnamoodustamine). Funktsionaalsete rakenduste loomine (filtrid, biolagunevad pakendid, absorbendid).            Keskkonnasobivuse hindamine (biolagunemine, toksikoloogia). Innovatsioon ja tootejuhtimine (turuanalüüs, patendiuuringud, regulatiivne kooskõlastus).</p>
<p><b>T11 – Integreeritud R&amp;D ja innovatsioonijuhtimine</b>            Strateegiline R&amp;D-plaanimine, partnerlussuhete haldus, intellektuaalomand ja finantsjuhtimine</p>	<p>Teadus- ja arendustegevuse strateegia (TRL-skaalad, piloteerimine).            Teadmussiire ja partnerlusmudelid (akadeemia-tööstuse koostöö, ühisrahatus).            Projektijuhtimine ja finantsjuhtimine. Patentide ja intellektuaalomandi haldus.            Digitaalne prototüüpide valmistamine ja andmepõhine arendus.            Regulatiivne vastavus ja kestlikkuse hindamine.</p>

**Tabel 6.2 Puidukeemia ja biorafineerimise tehnoloogiate ja õppekavade kompetentside katvus**

(✓ - täielikult kaetud, O - osaliselt kaetud (nt valikainetes või lõputöö kaudu), '–' - puudub.)

Õppekava (ülikool, õppeaste)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Füüsika, keemia ja materjaliteadus (TÜ, BSc)	✓	✓	–	–	O	O	O	–	–	O	–
Keemia (TÜ, MSc)	✓	✓	O	–	✓	O	O	–	–	O	O
Biotehnika (TÜ, MSc)	✓	✓	✓	✓	O	–	O	–	–	O	–
Materjalitehnoloogia (TalTech, BSc)	✓	✓	–	–	✓	✓	O	O	–	O	–
Puidu-, plasti- ja tekstiili-tehnoloogia (TalTech, MSc)	✓	✓	O	O	✓	✓	O	O	O	✓	O
Biotehnoloogia (TalTech, BSc/MSc)	✓	✓	✓	✓	O	–	–	–	–	–	–
Ringbiomajandus (EMÜ, BSc)	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Metsandus (EMÜ, BSc)	✓	✓	–	–	–	–	–	–	O	–	–
Metsatööstus (EMÜ, MSc)	✓	✓	–	–	✓	–	–	–	–	–	–
Puidu väärindamine (EMÜ, MSc 2025)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	O	O	O	O	O

**Error! Reference source not found.** näitab, et biomassi mehaaniline-keemilise eeltötluse (T1) ning keemilise töötlemise ja analüüsi (T2) kompetentsid esinevad enamikus õppekavades (nt TÜ FKM BSc, TÜ keemia MSc, TalTechi materjalitehnoloogia BSc, EMÜ metsandus BSc ja Puidu väärindamine MSc). Ensümaatilise töötlemise (T3) ja tööstusliku fermentatsiooni (T4) pädevused katavad peamiselt TÜ biotehnika MSc ja TalTechi biotehnoloogia BSc/MSc, samas kui bakalaureusetasemel need kompetentsid puuduvad.

Ligniini väärindamise (T5) ja tselluloosi väärindamine sh nanotselluloosi arendamise (T6) osas on kompetentside katvus piiratud: teatud aluseid saab omandada TalTechi bakalaureuse ja magistriõppes ning TÜ keemia magistriõppes praktika või magistritöö põhiselt ja EMÜ magistriõppes, kuid eraldiseisvad moodulid ja kursused puuduvad. T7 – protsesside integreerimine ja rakendusuuringud seob eelnevad tehnoloogiamoodulid tervikuks, liikudest laborietapist edasi tööstusliku piloteerimiseni on osaliselt projektõppe ja lõputöödega magistri- ja doktoriõppe tasemel (TÜ keemia MSc, TalTechi puidu-, plasti- ja tekstiilitehnoloogia MSc), kuid bakalaureuse õppes need oskused kujunevad valdavalt praktika ja lõputöö käigus. Termokeemiline konversioon (T8) esineb TÜ keemia MSc ja EMÜ 2025 MSc õppes, aga digitaliseerimine ja automatiseerimine (T9) praktiliselt puudub, välja arvatud TalTech puidu-, plasti- ja tekstiilitehnoloogia magistriõppes tootmise digitaliseerimise valikainena. lõputöödes ja EMÜ Puidu väärindamise projektipõhistes moodulites. Biopolümeeride ja biomaterjalide disain (T10) on täielikult kaetud TalTechi Puidu-Plasti ja tekstiilitehnoloogia õppekaval (Biopolümeeride põhiolemus, tootmine ja kasutamine ja biopolümeeride tehnoloogia ning tselluloosi derivaadid kursustega) ning osaliselt kaetud EMÜ uues puidu väärindamise MSc-s ja TÜ magistriõppes. Integreeritud R&D ja innovatsioonijuhtimine (T11) on TalTechi MSc. Kaetud mooduliga tehnoloogia ettevõtetus ja juhtimine ning esineb TÜ keemia MSc teadmussirde ja EMÜ uue programmi moodulites, innovatsioonijuhtimise, intellektuaalomandi ja patentide haldamise teematikad vajaks süsteemset laiendamist õppekavades.

Oluline on rõhutada, et vaid tugevatel baasteadmistel (T1–T2) rajanev areng võimaldab tulevikus süvendada keerukamaid tehnoloogiaid, mistõttu nende teadmiste jätkuv täiustamine on hädavajalik. Antud analüüs põhineb õppekavade kirjeldustel, seega ei peegelda see õppe sügavust ega praktilise rakendamise taset: kuigi T1–T3 on õppekavades mainitud, ei tea me, kas tudengid neid oskusi ka realselt praktiseerivad. Lisaks keskendub uuring kõrgharidusele, jättes välja kutseõppe.

Rakenduskõrghariduse õppetase ja kutsehariduses on tehnoloogia kompetentsidel põhinevate õppeainete pakkumine OSKA (2022) hinnangul piiratud, eriti kõrgtehnoloogiliste ja bioprotsesside vallas. Seega on haridussüsteemi kõrghariduse tasemeõppes tugevad baasvaldkonnad (tootmine, keemia, inseneria, materjalitehnoloogia ja -teadus), kuid rohetehnoloogiate ja biorafineerimise rakendusoskused

vajavad täiendamist, eriti ensümaatilise töötlemise (T3), tööstusliku fermentatsiooni (T4), digitaliseerimise (T9) ja integreeritud R&D-juhtimise (T7, T11) alal. Kuna tegemist on interdistsiplinaarse valdkonnaga, tuleks õppekavade arendamisel kaasata lisaks keemia- ja biotehnoloogiaekspertidele ka arvutiteadlasi (T9: andmetöötlus) ning majandusteadlasi (T7, T11: ärimudelid ja innovatsioonijuhtimine).

### **6.3 ÕPPEKAVADE KAARDISTAMINE KEEMILISE JA MIKROBIOLOOGILISE PUIDU VÄÄRINDAMISE SUUNAL**

Puidukeemia valdkonna jätkusuutlik areng eeldab mitte ainult puidutehnoloogia spetsialistide koolitamist, vaid ka tugeva baasharidusega keemikute, biotehnoloogide ja materjalitehnoloogide ja materjaliteadlaste olemasolu, kes suudavad arendada ja rakendada kõrgema lisandväärtusega puidupõhiseid materjale ja tooteid. Selline interdistsiplinaarne lähenemine nõuab tihedat koostööd ülikoolide, rakenduskõrgkoolide ja ametikoolide vahel, et tagada tööturu vajadustele vastav spetsialistide ja oskustöölise kvalifikatsioon ning toetada ettevõtete teadus- ja arendustegevust puidukeemia valdkonnas.

#### **6.3.1 KEEMIA JA BIOTEHNOLOOGIA BAASKOMPETENTSID ÜLIKOOLIDE BAKALAUREUSE JA MAGISTRI ÕPPEKAVADEST**

Tartu Ülikooli füüsika, keemia ja materjaliteaduse<sup>200</sup> (FKM) bakalaureuseõppekava pakub tugevat teoreetilist ettevalmistusbaasi keemias ja materjaliteaduses, millele tugineb hilisem erialane spetsialiseerumine. Õppekava keemiasuund toetab puidupõhiste väärindustehnoloogiatega seotud kompetentse eeskätt analüütilise ja orgaanilise keemia osas, mis on olulised näiteks ligniini struktuuri analüüsil või keemilise eeltötluse protsesside mõistmisel. Materjaliteaduse suunal õpitakse erinevate materjale ja tehnoloogiad. Õppekava sisaldab praktilisi laborikursusi, mis arendavad ainete sünteesimise, ainete/materjalide iseloomustamise ja ainete koostise määramise oskusi. Samas ei käsitle õppekava mikrobioloogilisi tötlusprotsesse, mistõttu jäävad näiteks fermentatsiooniprotsessid väljapoole selle programmi fookust. Seega on FKM õppekava tugev eelkõige keemilise ja materjalitehnoloogilise aluspõhja andmisel, kuid seda tuleks täiendada täiendavate spetsialiseerumiskursuste või magistriõppe kaudu, et katta kogu puidu väärindamise tehnoloogiate spekter.

TÜ keemia magistriõppekava<sup>201</sup> eesmärk on ette valmistada erialase teadus- ja arendustööks kvalifitseeritud spetsialiste, kes omandavad süvendatud teadmised ja oskused kitsamal keemia suunal (mõned võimalused spetsialiseerumiseks: orgaaniline ja looduslike ühendite keemia, bioorgaaniline keemia, füüsikaline ja elektrokeemia, kolloid- ja keskkonnakeemia, analüütilises keemias ning teoreetilises ja arvutikeemias). Õppekava toetab teadusliku analüüsi oskuste arendamist, kriitilist andmeanalüüsi ning teadustulemuste tõhusat kirjalikku ja suulist esitust nii erialaspetsialistidele kui ka laiemale avalikkusele. Lisaks annab magistriõpe esmase teadusliku uurimistöö kogemuse. Lõpetajad on valmis töötama spetsialisti või suuna juhina erinevates teadus- ja tööstussektorites, sealhulgas puidukeemia ja biotehnoloogia valdkonnas, kus vajalikud on interdistsiplinaarsed teadmised ja praktilised oskused.

Alates 2024/25 õppeaastast on keemia magistriõppekavasse integreeritud teadmussiirde programm<sup>202</sup>, kus kuni 48 EAP ulatuses toimub õpe ettevõttes, hõlmates nii praktikat kui magistritöö koostamist, võimaldades tudengitel omandada praktilisi kogemusi ja töötada otseselt puidukeemia ning teiste keemia valdkondade ettevõtetes. Programm toetab interdistsiplinaarsust, praktilist koostööd teadus- ja tööstussektoriga ning valmistab lõpetajad ette tööturule spetsialistide ja juhtidena.

<sup>200</sup> Tartu Ülikool, FÜÜSIKA, KEEMIA JA MATERJALITEADUSE BAKALAUREUSEÕPPEKAVA, ÕIS, vaadatud 30. mai 2025, [Link](#).

<sup>201</sup> Tartu Ülikool, KEEMIA MAGISTRIÕPE (2025), vaadatud 30. mai 2025, [Link](#).

<sup>202</sup> Tartu Ülikool, KEEMIA TEADMUSSIIRDE MAGISTRANTUUR ÜLIÕPILASELE (2024), vaadatud 30. mai 2025, [Link](#).

TÜ biotehnika magistriõppekava<sup>203</sup> pakub süsteemset ja süvendatud ettevalmistust tööstusliku biotehnoloogia, sünteetilise bioloogia ning biofermentatsiooni valdkondades. Õppekava kaudu omandavad üliõpilased oskused, mis on otseselt rakendatavad puidu mikrobioloogilise väärimise võtmetehnoloogiates, sealhulgas ensümaatilises hüdrolyüüsis, C<sub>5</sub>- ja C<sub>6</sub>-suhkrute fermentatsioonis ning ligniini kõrvalsaaduste töötlemises. Valikmoodulite kaudu on võimalik spetsialiseeruda mikrobioloogilistele tootmissüsteemidele, ensümaatilistele protsessidele või biomassi väärimisele, mistõttu on see õppekava eriti hästi kooskõlas T-kaardi tehnoloogilise fookusega. Programmi tugevuseks on interdistsiplinaarne lähenemine, mis ühendab molekulaarbioloogia, protsessitehnika ja süsteemibioloogia, luues lõpetajatele tugeva aluse ka puidupõhiste biotoodete tootmise arendamisel. Õppetöö toimub inglise keeles ning on osaliselt tasuline, mis võimaldab kaasata rahvusvahelisi tudengeid ning laiendada biotehnoloogia kompetentsibaasi Eestis.

Lisaks keemiale toetavad puidusektori arengut õppekavad, mis annavad laiapõhjalisi teadmisi loodusteadustest, keskkonnateadustest ja energiatehnoloogiast. Näiteks loodusteaduste ja tehnoloogia õppekava annab teadmisi, mis on vajalikud TÜ tehnoloogilises ettevõttes töötamiseks ning oskusi planeerimiseks ja probleemide analüüsimiseks. Bioloogia ja elustiku kaitse ning geoloogia ja keskkonnatehnoloogia õppekavad toetavad keskkonnahoidu ja jätkusuutlikkust, mis on puidusektori rohepöörde seisukohalt olulised.

TalTechi materjalitehnoloogia bakalaureuseõppekava<sup>204</sup> üliõpilastele antakse tugev loodus- ja täppisteaduste alane baasharidus ning sotsiaal- ja majandusteaduste alusteadmised materjaliteaduse ja tehnoloogia valdkonnas toimetulekuks. Erialaselt omandatakse laiapõhjalised teadmised olulisemate kaasaegsete materjalide omaduste, kasutamise ja töötlemise tehnoloogia valdkonnas. Õppekava lõpetajal on väga head eeldused õpingute jätkamiseks magistriõppes või töötamiseks spetsialistina (insener, tehnoloog, projektijuht) materjale töötlevas või tootvas ettevõttes. Puidu väärimist toetavad mitmed õppekaval õpetatavad õppeained, nii erinevad üldained (säätlik materjalitehnoloogia, sissejuhatus ringmajandusse jm) kui ka spetsiifilisemad erialaained (puiduteadus- ja puitmaterjalid, puidutööstuse tehnoloogia). Lisaväärtust annavad juurde õppekaval õpetatavad keemiaõppeained, näiteks üldine keemia, füüsikaline keemia ja orgaaniline keemia.

TalTechi rahvusvahelise magistriõppekava puidu-, plasti- ja tekstiilitehnoloogia<sup>205</sup> eesmärgiks on arendada erialaseid pädevusi kahel peerialal: puidutehnoloogia ning plasti- ja tekstiilitehnoloogia. Õppekava sisuks on praktiline probleemipõhine õpe koos teoreetilisi süvateadmisi arendavate kursustega, mis tagavad sujuva ülemineku ülikooliõpingutelt ametialasele karjäärile. Õppekaval omandatakse projektõppes erialaseid teadmisi teadus- ja arendustegevuse meetodika kasutamiseks tootmisprobleemide lahendamise ettevõtetes. Õppekaval on võimalik spetsialiseerumisele lisaks omandada kõrvaleriala (48 EAP): Biotooted, jätkusuutlik keemia ja tehnoloogia. Puidu väärimist toetavad erinevad õppekaval õpetatavad õppeained: tselluloosi derivaadid, puidu ehitus ja omadused; biopolümeerid: põhiolemus, tootmine ja kasutamine; roheline keemia meetrika biotoodete tootmiseks; rafineerimissüsteemid biotoodete tootmiseks. Erasmus Mundus viie ülikooli vahelises ühisõppekavas (Bioceb)<sup>206</sup> osalemise kaudu toimub teadmussiire ülikoolide ja rahvusvaheliste ettevõtete vahel, kus viimasel semestril toimub teadus ja arendustöö läbiviimine ettevõttes, hõlmates nii tööstuspraktikat kui magistr töö koostamist, võimaldades tudengitel omandada praktilisi kogemusi ja töötada otseselt puidukeemia ja biotehnoloogia ettevõtetes<sup>206</sup>.

<sup>203</sup> Tartu Ülikool, BIOTEHNIKA MAGISTRIÕPPEKAVA: ÕPPEKAVA JA ÕPIVÄLJUNDID (Tartu: Tartu Ülikool, Loodus- ja tehnoloogiategaduskond, 2025), vaadatud 30. mai 2025.

<sup>204</sup> TalTech. Materjalitehnoloogia eriala. [Link](#)

<sup>205</sup> TalTech. Puidu-, plasti- ja tekstiilitehnoloogia. [Link](#)

<sup>206</sup> European Master in Biological and Chemical Engineering for a Sustainable Bioeconomy. [Link](#)

Õppekava lõpetanud võivad asuda tööle tootmisspetsialisti, konstruktori, inseneri, tehnoloogi, keskastme- või tippjuhi ametikohtadel rahvusvahelises puit-, plast-, tekstiil- ja teisi materjale töötleva tööstuse või mööblit ja rõivaid tootvates ettevõttes või jätkama õpinguid doktoriõppes.

Tallinna Tehnikaülikool koolitab nii biotehnoloogide kui ka keemikuid, mille sisseastujate arv on bakalaureuse õppes olnud viimasel kolmel aastal 26 ja magistris viimasel viiel aastal 18 õpilast. Erialadel antakse üliõpilasele laialdased baasteadmised ning eksperimentaalsed oskused keemias, bio- ja geenitehnoloogias. Õppekava läbimisel omandatavad teadmised ja oskused loovad aluse edukaks karjääriks akadeemilises maailmas või tööstuses, muuhulgas tööks biotehnoloogia ja keemiaettevõtetes ning era- ja riiklikes laboratooriumites.

Eesti Maaülikool avas 2024/2025 õppeaastal “Ringbiomajanduse” bakalaureusetaseme õppekava<sup>207</sup>, mille eesmärk on valmistada ette väärtusahelapõhise ringbiomajanduse spetsialiste. Õppekava läbinud omavad interdistsiplinaarseid teadmisi ja oskusi bioressursi jätkusuutlikust kasvatamisest, väärimisest ja turustamisest, sh väärimistehnoloogiatest ning nende rakendamise korralduslikest ja sotsiaalmajanduslikest aspektidest.

Senist EMÜ “Metsatööstuse” magistriõppekava<sup>208</sup> eesmärk on süvendatud teadmistega spetsialistide ettevalmistamine metsatööstuse alal. Magistrandid arendavad metsaressursi hindamise ja nende dünaamika prognoosimise oskust, õpivad põhjalikult tundma metsavarumise tehnoloogiaid, puidutöötlemise tehnoloogiaid ja -masinaid, puiduenergeetikat, puidu ja puittoodete logistikat ja puidukaubandust. Puidukeemia ja tehnoloogiate alammoodulis saadakse baasteadmisi materjalide keemiast ning puidukeemiast ja keemilisest väärimisest. Viimase viie aasta jooksul on keskmiselt lõpetanud neli magistrit aastas.

2025. aastal avatakse vastuvõtt “Puidu väärimise” magistrikavale<sup>209</sup> eesmärgiga valmistada ette metsatööstuse spetsialiste, kellel on süvateadmised puidu varumise kavandamisest ja meetoditest ning puidu väärimistehnoloogiatest, ning kes oskavad rakendada kestliku arengu põhimõtteid. Õppijal on võimalik valida puidu keemilise väärimise valikmoodul, et omandada teadmised tselluloositootmise peamistest protsessidest ja tootmise suundumustest ning tööstuslike biorafineerimise tehnoloogiatest ja protsessidest.

### 6.3.2 DOKTORIÕPPE ROLL PUIDUPÕHISTE TEHNOLOOGIATE ARENDAMISES

Doktoriõpe annab võimaluse viia läbi interdistsiplinaarseid teadusuuringuid ja tugevdada sidet ülikooli ning tööstuspartnerite vahel. Tartu Ülikooli doktoriprogrammid „Füüsika ja keemia“ ning „Tehnika ja tehnoloogia“ võimaldavad keskenduda ligniini keemilisele modifitseerimisele, nanotselluloosi funktsionaliseerimisele ja biorafineerimise protsessimudelitele, sidudes seeläbi T-kaardi keemia-, biotehnoloogia- ja insenerisuunad ühtseks interdistsiplinaarseks teadustööks. Doktorantuuri raames on TÜ-l on välja töötatud võimalused teadmussiirdedoktorantuuriks. TalTechi doktoriõppekaval “Tehnikateadused” antakse välja filosoofiadoktori kraadid kuues teadusvaldkonnas ja sh keemia-, materjali- ja energiatehnoloogia erialal<sup>210</sup>. TalTechi doktoriõppekaval “Loodusteadused” antakse kokku neli erialapõhist doktorikraadi sh filosoofiadoktor keemia ja biotehnoloogia erialal<sup>210</sup>. TalTechis on käivitunud tööstusesse/ettevõtlusesse suunatud tööstusdoktorantuur, milles teadustööd viivad ühiselt läbi era- või avalikusektori asutus, ülikool ning doktoriõppe üliõpilane (tööstusdoktorant). Eesti Maaülikoolis on kokku viis doktoriõppekava<sup>211</sup>. Lisaks toimib doktoriõpe innovatsiooni kasvulavana, kus arendatakse kõrgemaid kompetentse luues tugeva aluse biorafineerimise sektoris uute kõrgtehnoloogiate juurutamiseks.

<sup>207</sup> EMÜ. Õppekava “Ringbiomajandus (251602)”. [Link](#)

<sup>208</sup> EMÜ. Õppekava “Metsatööstus”. [Link](#)

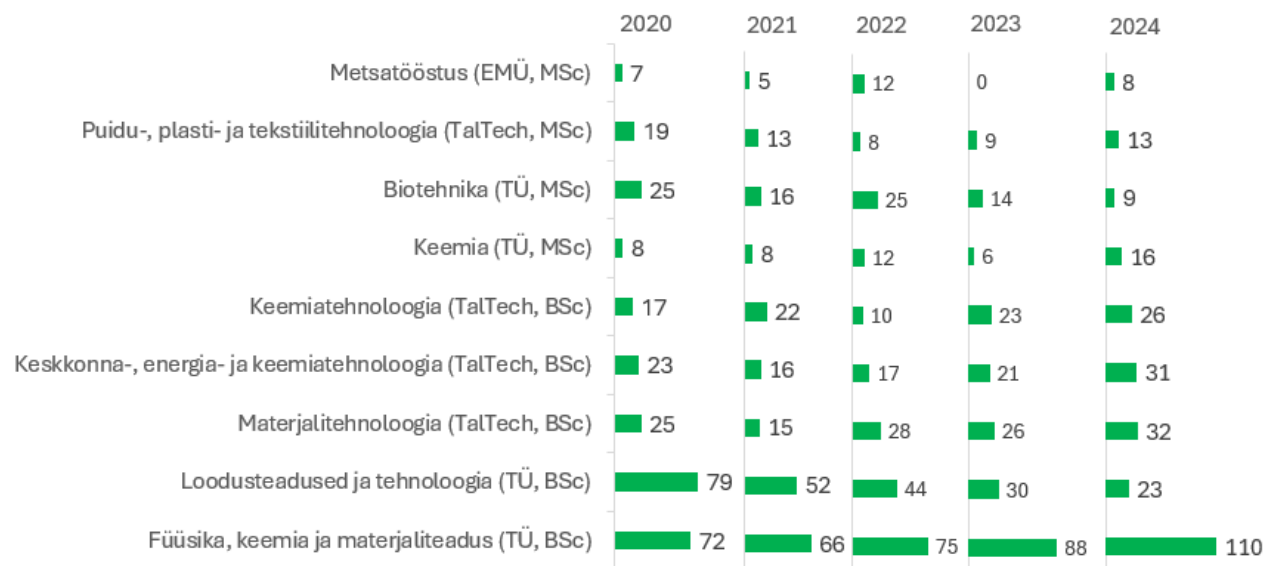
<sup>209</sup> EMÜ. Õppekava “Puidu väärimine”. [Link](#)

<sup>210</sup> TalTech. Doktoriõppe programme. [Link](#)

<sup>211</sup> Doktoriõppes Eesti Maaülikoolis. [Link](#)

## 6.4 VIIIE AASTA KESKMISED SISSEASTUJATE JA LÕPETAJATE ARVUD NING LÕPETAMISE EFEKTIIVSUS

Kuigi ülikoolides alustab palju õppijaid (Joonis 6.1), siis keskmiselt on väljalangevus umbes 50%, mis on õppekavati erinev. Alljärgnevatel joonistel (Joonis 6.1 ja Joonis 6.2) on välja toodud Tallinna Tehnikaülikooli, Tartu Ülikooli ja Eesti Maaülikooli õppekavade lõikes sisseastujate arv ja lõpetamise efektiivsuse statistilised näitajad viimase viie aasta keskmistena (andmetabelid lisad 6.3-6.9). Lõpetamise efektiivsus näitab, kui paljud vastuvõetutest jõudsid õpingute lõpetamiseni nominaalajaga, arvestatakse ka nominaalajast kiiremini lõpetanud. Lõpetamise efektiivsuses ei kajastu eksternina lõpetanud.

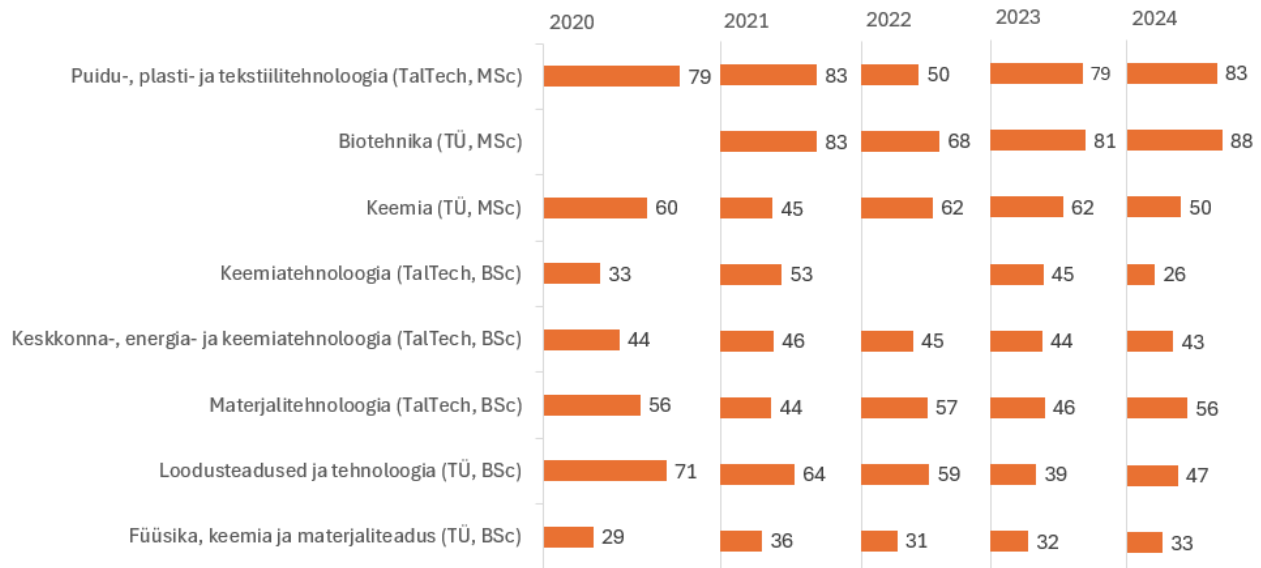


**Joonis 6.1 Sisseastunute (immatrikuleeritud) arv valitud õppekavadel Tallinna Tehnikaülikoolis (TalTech), Tartu Ülikoolis (TÜ) ja Eesti Maaülikoolis (EMÜ) aastatel 2020-2024 (andmed pärinevad ülikoolide poolt kogutud andmestikest).**

Viimase viie aasta andmed näitavad, et Tartu Ülikoolis, TalTechis ja Eesti Maaülikoolis immatrikuleerub puidu väärimisega seotud bakalaureuse- ja magistriõppe kavadesse igal aastal ligikaudu 220 üliõpilast. Lõpetamise efektiivsus jääb bakalaureusetasemel 50 % kanti ja magistritasemel 65–75 % vahele – tulemused, mis on Eesti keskmisega sarnased. Samas on lõpetamise efektiivsus nominaalage + 2 aastat (n+2) oluliselt kõrgem (bakalaureuse õppes keskmiselt 65 % ja magistriõppes 80 %).

### Väljakutsed

- ✓ Sisseastujate seas on märkimisväärne hulk tudengeid, kes katkestavad esimesel õppeaastal eriala sobimatuse tõttu. Tallinna Tehnikakõrgkool on edukalt rakendanud sisseastumiskatsetel grupiintervjuusid, mis on vähendanud üliõpilaste väljalangevust esimesel õppeaastal. Tartu Ülikooli loodusteaduste valdkond on käivitanud pilootuuringu, et kaardistada esimese õppeaasta väljalangemise põhijõud, et kavandada sihitud tugimeetmeid.
- ✓ Tugevad baasteadmised teevad lõpetajatest atraktiivse töajõu ka teistes sektorites (biotehnoloogia, keemiatööstus), mistõttu puidusektor konkureerib kvalifitseeritud spetsialistide pärast.



**Joonis 6.2** Nominaalajaga lõpetanute efektiivsus (%) valitud õppekavadel Tallinna Tehnikaülikoolis (TalTech), Tartu Ülikoolis (TÜ) ja Eesti Maaülikoolis (EMÜ) aastatel 2020-2024 (andmed pärinevad ülikoolide poolt kogutud andmestikest).

## VÄLJALANGEVUSE PÕHJUSTE UURIMINE KÕRGHARIDUSES JA KUTSEÕPPES

Ülikoolidesse vastuvõetutest katkestab õpingud esimesel õppeaastal 21–22%, ent langeb välja (ei õpi järgmisel aastal kõrghariduses) 15–16%, kus bakalaureuseõppesse vastuvõetutest katkestab esimesel õppeaastal neljandik, kuid neist kolmandik õpib järgmisel aastal edasi mõnel teisel kõrghariduse õppekohal<sup>212</sup>. Magistriõppesse vastuvõetutest katkestab esimesel õppeaastal ligi 15%, doktoriõppesse astmele vastuvõetutest aga 6%<sup>212</sup>. Viies esimesel aastal õpingud katkestanud Eesti üliõpilastest on 2018. aastal toonud põhjuseks eriala sobimatuse<sup>212</sup>.

Kutseõppes teostatud väljalangevuse uuringud on välja toonud 5 gruppi katkestamise põhjusi: õpilase endaga, perekonnaga, kooliga seonduvad põhjused, majanduslikud ja muud põhjused<sup>213</sup>. Tartu KHK uuringu järgi on eriala sobimatus ja ebarealistlikud ootused erialale õpingute katkestamise põhjuseks tervelt 25%-l juhtudest. 15%-l on eriala valik olnud juhuslik, 12%-l n-ö teine valik<sup>213</sup>. Õpetajad seostavad valesid valikuid eelkõige sotsiaalse küpsusega. Nii käesoleva kui ka varasemate uuringute põhjal võib väita, et see põhjus on tugevalt seotud õpilase kognitiivsete, isiksuslike, sotsiaalsete ning vanuseliste eeldustega<sup>213</sup>.

### 6.5 ETTEVÕTETE POOLNE TAGASISIDE ÜLIKOOLIDE LÕPETAJATE TÖÖLEASUMISE KOHTA

Kuna biotehnoloogia valdkond on Eestis alles oma kasvu alustamas, on senini olnud väikesearvuline ka spetsialistide koolitamine. Intervjueerides Eesti biotehnoloogia ettevõtetega ÄIO ning Gelatex toodi esile, et spetsiifiliste oskustega tööjõudu Eestis napib ja seda värvatakse valdavalt välismaalt. Samas ei ole Eesti üldiselt majandusliku keskkonna tõttu välistööjõule atraktiivne. Väidet toetas ka intervjuu ettevõttega Gearbox Bioscience, kes tõi välja, et ühe ettevõtte kiire kasvu näitel võib tekkida väga järsk nõudlus spetsialistide järele ning üldine defitsiit. Nii Gearbox Biosciences kui ka Fibenol tõid esile, et põhimõtteliselt puuduvad biotehnoloogia taustaga rahvusvahelise kogemuse ja võrgustikuga müügiinimesed. Prognoosides biotehnoloogia valdkonna kasvu kiirenemist on vaja kindlasti lähitulevikus

<sup>212</sup> Jaggo, I. (2020). Katkestamine ja väljalangemine kõrghariduses 2011/12-2018/19. Tartu: Haridus- ja Teadusministeerium. [Link](#)

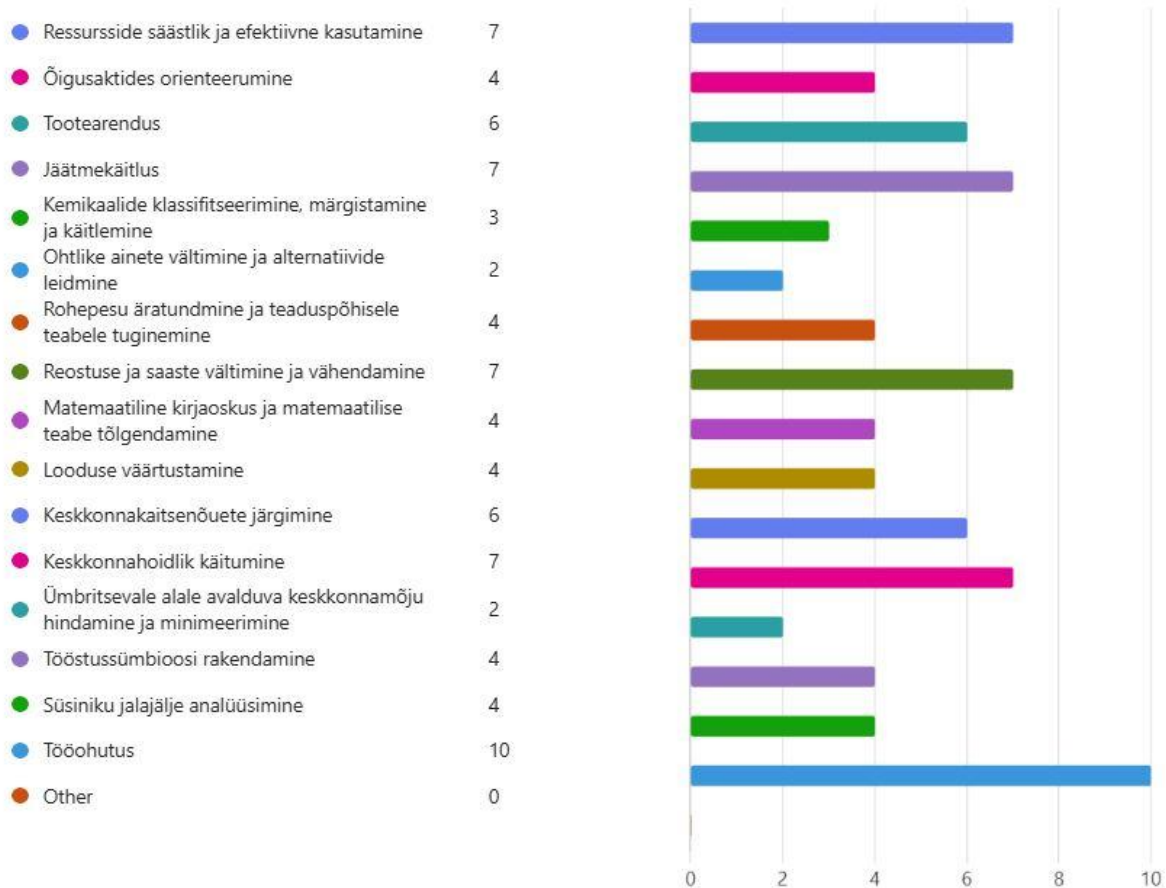
<sup>213</sup> Eesti Haridusfoorum. E.-M. Vernik-Tuubel „Mida teha kutseõppes väljalangevusega.“ [Link](#)

koolitada rohkem biotehnoloogia spetsialiste<sup>214</sup>. EMÜ metsatööstuse magistriõppekaval on viimastel aastatel immatrikuleeritud keskmiselt kuus kuni seitse üliõpilast, õpingud on lõpetanud keskmiselt neli magistrit aastas.

## 6.6 ANTUD VALDKONDA TOETAVAD RIIGIPOOLSED MEETMED

2023.–2026. aastani viiakse Haridus- ja Noorteameti ning Haridus- ja Teadusministeeriumi eestvedamisel ellu meetme „Roheoskused ettevõtete rohepöörde toetamiseks“ raames roheoskuste arendamise programmi. Programmi abil toetatakse ettevõtete rohepöördeks vajalike oskuste arendamist. (Rahastuse täpne nimetus: Taaste- ja vastupidavusrahastu reformi „Ettevõtete rohepöörde“ investering 1 „Roheoskused ettevõtete rohepöörde toetamiseks“. Projekt nr 20.2.01.21-0002 Rohepööret toetavate oskuste arendamine.

Roheoskuste meetmes<sup>215</sup> viiakse tegevusi ellu konsortsiumite põhiselt. Käesoleva uuringu raames on aktuaalsem järgmised õppekavarühmad: materjalide töötlemine<sup>216</sup>, keemiatehnoloogia ja –protsessid<sup>217</sup>.



**Joonis 6.3 Puidutöötlemise, puittoodete ja mööblitootmise valdkonna ettevõtete jaoks olulised koolitusteemad<sup>216</sup>**

Konsortsiumite töö esimeses etapis tegeleti põhiliselt tasemeõppe õppekavade uuendamisega kõrg- ja kutsehariduses (uute õppeainete või moodulite väljatöötamine ja olemasolevate täiendamine),

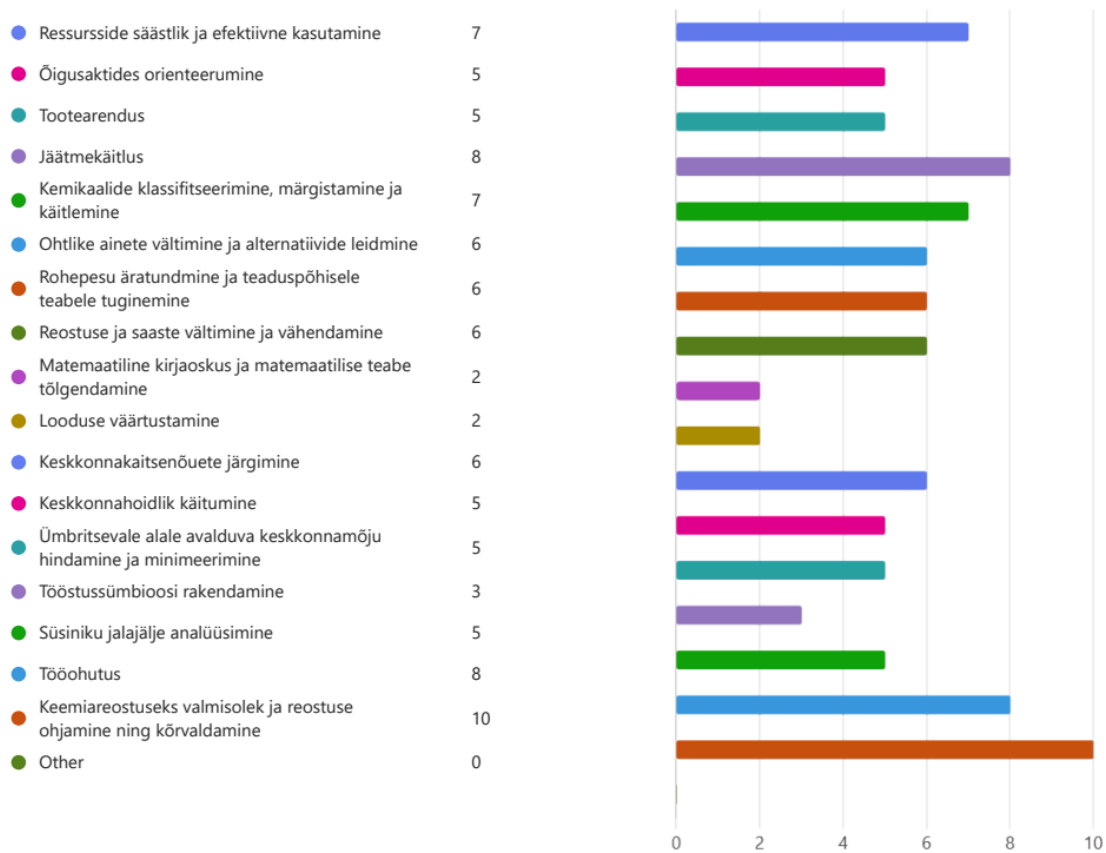
<sup>214</sup> Baltic Biotech Action Plan ver. 1.0. 2025-01-30. [Link](#)

<sup>215</sup> Haridus- ja Noorteamet. Roheoskuste program. Vaadatud 26.05.2025. [Link](#)

<sup>216</sup> Meetme „Roheoskused ettevõtete rohepöörde toetamiseks“ raames valminud mitmevalik dokument: "Tööpakettide 1-5 raames valminud dokumendid. Lõpparuanne. Konsortsium K8. Õppekavarühm „Materjalide töötlemine (klaas, paber, plast ja puit)“

roheoskuste õpiväljundite sõnastamise ja oskuste vajaduse täpsustamisega ning kutsestandarditesse roheoskuste integreerimisega. Meetme oluliseks osaks on ka uute moodulite ja õppeainete baasil mikroraadide ja täiendusõppe pakkumine.

Esimeses etapis viidi muu hulgas läbi ka ettevõtete küsitlused. Puidutöötlemise, puittoodete ja mööblitootmise valdkonna ettevõtete küsitlusele vastas 13 ettevõtet. Tulemused on näha Joonis 6.3. Paberi ja pabertoodete tootmise valdkonnas vastas 1 ettevõtte, kes pidas oluliseks koolitusi järgmistes valdkondades: tootearendus, jäätmekäitlus, matemaatiline kirjaoskus ja matemaatilise teabe tõlgendamine, looduse väärtustamine, tööohutus. Keemiatehnoloogia ja –protsesside valdkonnas vastas 10 ettevõtet ja küsitluse tulemused on näha Joonis 6.4.



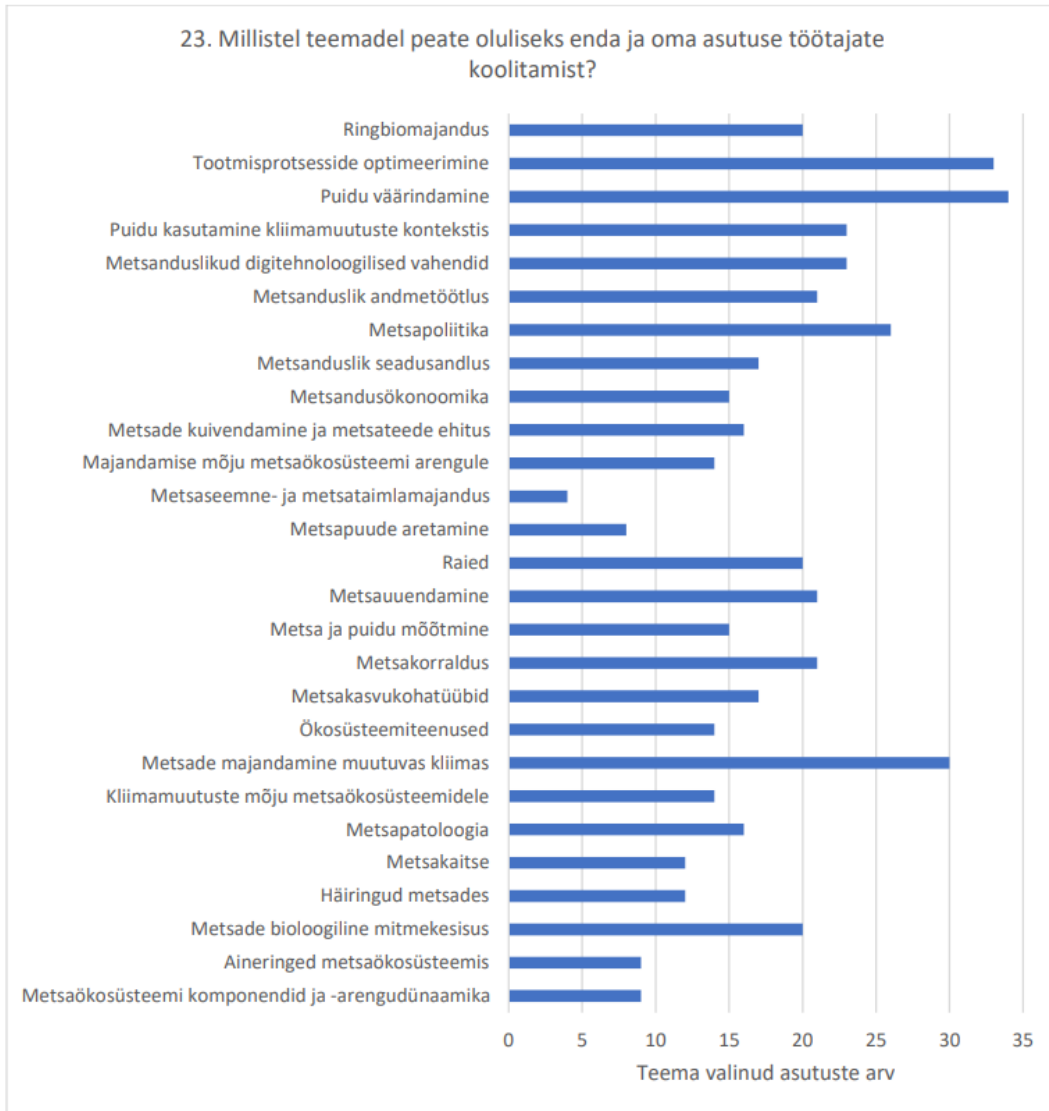
**Joonis 6.4 Keemiatehnoloogia ja –protsesside valdkonna ettevõtete jaoks olulised koolitusteemad<sup>217</sup>**

Esimese etapi üheks oluliseks tulemiks oli ka vajalike erialaspetsiifiliste roheoskuste sõnastamine keemiatehnoloogia ja –protsesside ning materjalide töötlemise valdkonnas. Sõnastatud erialaspetsiifilised roheoskused on välja toodud lisades 6.1, 6.2 ja 6.3.

Rohemeetme teises etapis toimub õppe- ja digiõppematerjalide väljatöötamine. 8. konsortsiumi poolt valmib muu hulgas “Kestlike puitmaterjalide ja -toodete keemilise väärimise tehnoloogiate õppevara”. Antud õppevara panustab oluliselt puidu väärimise valdkonna õppetöö arendusse.

<sup>217</sup> Meetme „Roheoskused ettevõtete rohepöörde toetamiseks” raames valminud mitteavalik dokument: “Tööpakettide 1-5 raames valminud dokumendid. Lõpparuanne. Konsortium K8. Õppekavarühm „Õppekavarühm „Keemiatehnoloogia ja -protsessid”

EMÜ poolt juhitud Metsanduse konsortsiumi poolt viidi läbi küsitlus koolitusvaldkonna asutuste keskkonnavalaste hoiakute ning kestlikkusele ja säästlikule ressursikasutusele suunatud tegevuste väljaselgitamiseks. Küsitlus oli veebipõhine, sellele sai vastata LimeSurvey keskkonnas ning see toimus 2023 aasta novembris. Küsitlus koosnes 23 küsimusest. Teksti kompaktsuse eesmärgil kasutati kõikide küsitletavate ettevõtete ja asutuste ühise nimetajana sõna “asutus”. Kokku vastas küsitlusele 57 asutust, mida peame kindlasti väga heaks tulemuseks ning mis peegeldab roheoskuste metsanduse konsortsiumi head ja toetavat koostööd. Küsimustele vastamiseks sai kasutada valikuvariante või vastuseid skaalal 1-5, kus 1 tähendas “puudulik/ei nõustu üldse/ei pea üldse oluliseks” jne, ning 5 “väga hea/”. Küsitluse tulemuse on näha joonisel 6.4.



Joonis 6.5 Metsa- ja puidutööstuse ettevõtete jaoks olulised koolitusteemad<sup>218</sup>

## INSENERIAKADEEMIA

Hariduse ja tööturu tihedamaks sidumiseks ning noorte õpivalikute suunamiseks on Eesti riik käivitanud Euroopa Liidu tõukefondide toel inseneriakadeemia. Inseneriakadeemia eesmärk on suurendada õppe

<sup>218</sup> M. Metslaid presentatsioon „Metsanduse roheoskused“. Vaadatud: 10.06.2025. [Link](#)

vastavust tööturu vajadusele tehnika, tootmise ja ehituse valdkonnas<sup>219</sup>. Inseneriakadeemia fookusõppekavade hulgas on ka mitmed antud uuringu raames aktuaalsed õppekavad. Tallinna Tehnikaülikoolist kuuluvad fookusõppekavade hulka järgmised õppekavad: bakalaureuseõppekavad materjalitehnoloogia, keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia, tootearendus ja robotika, elektroenergeetika ja mehhatroonika, integreeritud õppe õppekavad teedehitus ja geodeesia, ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine (Tallinnas ja Tartus), hoonete sisekliima ja veetehnika, magistriõppekavad elektrotehnika ja mehhatroonika, tootearendus ja tootmistehnika, riistvara arendus ja programmeerimine. Maaülikoolist kuuluvad fookusõppekavade hulka järgmised õppekavad: rakenduskõrghariduse õppekavad puidutöötlemise tehnoloogia ja tehnootroonika; bakalaureuseõppekavad tehnika ja tehnoloogia; integreeritud õppekavad Maaehitus; vesiehitus ja veekaitse; MSc õppekavad: energiakasutus, ergonoomika, tootmistehnika ja PhD õppekava Tehnikateadus. Tartu Ülikoolist kuuluvad fookusõppekavade hulka järgmised õppekavad: bakalaureuseõppekavad arvutitehnika; füüsika, keemia ja materjaliteadus; magistriõppekavad arvutitehnika ja robotika, materjaliteadus ja tehnoloogia ning rakenduslik mõõteteadus.

## SEKTORITEVAHELINE KOOSTÖÖ ARENDAMISE VÕIMALUSED PUIDUSEKTORIS

Sektoritevahelist mobiilsust (SekMo) toetav meede on loodud teadus- ja arendustegevuse edendamiseks ja innovatsiooni kiirendamiseks läbi teadusasutuste ning ettevõtete vahelise koostöö tugevdamise. Puidusektoris on selline koostöö eriti oluline, et toetada kõrgema lisandväärtusega toodete arendamist ning tõhustada ressursikasutust ringmajanduse põhimõtete alusel. SekMo meede toetab puidutööstuse arengut, soodustades koostööd teadusasutuste ja tööstusettevõtete vahel<sup>220</sup>. OSKA metsanduse ja puidutööstuse uuring prognoosib, et aastaks 2031 kasvab valdkonna tööjõuvajadus kuni 40%, eriti tootmisjuhtide, inseneride ja tootmisseadmete tehnikute osas<sup>220</sup>. Uuringud rõhutavad vajadust spetsiifiliste tööstuslike bioprotsesside tehnoloogia ja inseneria teadmistega spetsialistide järele, samuti täiendus- ja ümberõppe vajadust, eriti väljaspool Ida-Virumaad<sup>221</sup>. SekMo kaudu saavad ettevõtted kaasata teadlasi ja teadmussiirdedoktorante, mis aitab tõsta teadus- ja arendustegevust ning kohandada ülikoolide õppekavasid tööstuse vajadustega<sup>220</sup>.

## ÕPPEKAVADE JA SEKTORIVAHELINE KOOSTÖÖ

Kuigi sektoritevahelist koostööd toetavad meetmed – näiteks SekMo mobiilsustoetus, tööstusdoktorantuurid ja roheoskuste programm – on olemas, on need valdavalt projektipõhised ja lühiajalised, mistõttu puudub seni terviklik, pikaajaline raamistik, mis seoks doktoriõppe, teadmussiirde ja õppekavade arenduse järjepidevalt tööturu vajadustega.<sup>222</sup> Ilma sihipäraste koostöömeetmeteta võib valdkonna areng aeglustuda, mistõttu on vajalikud meetmed teadmiste, inimeste ja ressursside suunamiseks kõige olulisematesse valdkondadesse. SekMo rakendamine aitab luua sidemeid, mis toetavad nii uute tehnoloogiate arendamist kui ka tööjõu kvalifikatsiooni tõstmist<sup>220</sup>. Tabel 6.3 on välja toodud Eesti metsa- ja puidutööstuse ja teaduse sektorite vahelist koostööd toetavad meetmed. Lisaks SekMole toetavad sektorite vahelist koostööd rahvusvahelised programmid, nagu Horisont Euroopa ja EIT RawMaterials, sektorite vahelist ja rahvusvahelist teadus- ning ettevõtluskoostööd rohepöörde ja biomajanduse valdkonnas<sup>223</sup>.

<sup>219</sup> Haridus- ja teadusministeerium. Inseneriakadeemia. [Link](#)

<sup>220</sup> Kutsekoda. (2022). OSKA: Metsanduse ja puidutööstuse tööjõu- ja oskuste vajadus. OSKA – Oskuste ja tööjõuvajaduse seire ja prognoosisüsteem.

<sup>221</sup> Kutsekoda. (2017). OSKA: Keemia-, kummi-, plasti- ja ehitusmaterjalitööstuse tööjõu- ja oskuste vajadus. OSKA – Oskuste ja tööjõuvajaduse seire ja prognoosisüsteem. [Link](#)

<sup>222</sup> Teatmik. (2022). Sektoritevahelise mobiilsuse toetamine (Teadusministri määrus). [Link](#)

<sup>223</sup> EIP-AGRI. (2022). Turning forest innovation into practice: Final report. European Commission. [Link](#)

**Tabel 6.3 Eesti metsa- ja puidutööstuse ja teaduse sektorite vahelist koostööd toetavad meetmed.**

Meede	Fookus ja sihtrühm	Seos puidutööstuse arendusega	Rahastaja / raamistik	Viide
<b>SekMo</b> Sektorite vahelise mobiilsuse toetus	Teadlaste, tippspetsialistide ja teadmussiirdedoktorantide liikumine ülikoolide ja ettevõtete vahel	Võimaldab tuua teadlased tööstusse ja vastupidi; loob aluse uute T&A projektide tekkeks ja kompetentsi kandeks (nt puidukeemia valdkond)	Eesti riiklik toetus, EL struktuurivahendid (REACT-EU, 2021–2029)	<b>Eesti Töötukassa</b> <a href="https://etag.ee/rahastamine/mobiilsustoetused/sekmo/">https://etag.ee/rahastamine/mobiilsustoetused/sekmo/</a>
<b>EIT</b> RawMaterials / EIT Climate-KIC	Haridus, teadus ja ettevõtlus rohepöörde kontekstis	Võimalik arendada rahvusvahelist koostööd ja viia Eesti kompetentsid Euroopa biomajanduse innovatsioonivõrgustikku	Euroopa Innovatsiooni- ja Tehnoloogiainstituut (EIT)	<b>EIT RawMaterials</b> <a href="https://eitrawmaterials.eu">https://eitrawmaterials.eu</a>
<b>Horisont Euroopa – COST / Twinning / Teaming</b>	Valdkondade- ja riikideülene teadlaste ja asutuste koostöö	Võimalus arendada rahvusvahelisi koostöösuhteid puidukeemia või metsanduse innovatsioonivõrgustikes	Euroopa Komisjon	<b>Horisont Euroopa</b> <a href="https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/home">https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/home</a>
<b>INTERREG</b> (sh Läänemere piirkonna programmid)	Piiriülene koostöö sektorite vahel, eelkõige piirkondlike arengute kaudu	Võimalus arendada puidu- ja biomajanduse piiriülest koostööd (nt Soome, Rootsi teaduspartnerid)	Euroopa Regionaalarengu Fond	<b>INTERREG Baltic Sea Region Programme</b> <a href="https://www.interreg-baltic.eu">https://www.interreg-baltic.eu</a>

## 6.7 KOKKUVÕTE

OSKA raportite kokkuvõtteks võib välja tuua, et uudsete puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärimise võtmetehnoloogiate kasutuselevõtt ja tootearenduse laiem juurutamine Eestis eeldab senisest tugevama rõhu panekut kõrgharidusega (tipp)spetsialistide ja kutseharidusega oskustööjõu interdistsiplinaarsele ettevalmistusele ning tihedamat koostööd ülikoolide, teadusasutuste ja tööstuspraktikute vahel.

### STRATEEGILISED TUGEVDUSED

Eesti ülikoolides on kõrgel tasemel teadus- ja arendustegevus, mis toetab puidukeemia innovatsiooni. Bakalaureuse- ja magistriõppekavad on interdistsiplinaarsed ja ühendavad erinevaid teadusvaldkondi, mis on kriitilise tähtsusega puidukeemia arenguks.

Eesti ülikoolide osalemine Erasmus Mundus rahvusvahelistes magistriõppe programmides (nt BIOCEB) ja koostöövõrgustikes tugevdab valdkonna konkurentsivõimet.

Eesti kolme ülikooli (TÜ, TalTech, EMÜ) puidukeemia ja biotehnoloogia suunalised bakalaureuseõppekavad katavad puidu väärtusahela peamised baastehnoloogiad – mehaanilise-keemilise eeltöötlemise (T1) ning keemilise töötlemise ja analüüsi (T2) – koondades rahvusvaheliselt konkurentsivõimelise teadmiste kapitali klassikalises keemias ja materjaliteaduses. Ligniini väärimise (T5) ja nanotselluloosi-komposiitide (T6) arenduse alane teadus-taristu on TalTechis ja TÜ-s kõrgel tasemel, pakkudes laboripraktikat ning magistri- ja doktoriõppe võimalusi uurimistööks. EMÜ kavandatud puidu väärimise MSc lisab sektori tööjõuturule spetsialiste, kes valdavad kogu biorafineerimise kontseptsiooni alates tooraine hankest kuni kõrgväärtusliku toote väljastamiseni.

Lisaks on ülikoolidevahelised mikroraadiprogrammid kiiresti arenev formaat, mis võimaldab töötaval spetsialistidel omandada puidutehnoloogia, digitaalse protsessijuhtimise ja ringmajanduse kompetentse paindlikult ning lühikese aja jooksul.

## STRATEEGILISED NÕRKUSED JA SOOVITUSLIKUD TEGEVUSED:

**Bioprotsesside ja digitaliseerimise lõhe.** Ensümaatilise hüdroolüüsi ja fermentatsiooni (T3–T4) on süvendatud kujul vaid kahes magistriõppes; digitaalse protsessimonitooringu ja automatiseerimise (T9) süsteemne õpetus praktiliselt puudub, kuigi OSKA raport toob IT-põhised oskused välja kriitilise vajadusena.

**Innovatsioonijuhtimise nõrk institutsionaliseeritus.** Integreeritud R&D-juhtimise (T11) pädevused – tehnomajanduslik analüüs, patendihaldus, ärimudeli kujundus – on killustunud valikaineteks ega toeta turuküpse biomajandusliku toote kiirendatud arendustsükli.

**Lõpetamisdünaamika ja sektorisisene konkurents tööjõu pärast.** Kuigi n + 2 lõpetamise efektiivsus ulatub kuni 65 %-ni, katkevad õpingud varases faasis sageli eriala sobimatuse tõttu. Lisaks liigub ~30 % lõpetanutest keemia- või farmaatsiatööstusse, mis süvendab kvalifitseeritud tööjõu nappust puidusektoris.

Suureks väljakutseks on **kvalifitseeritud tööjõud**. Sektori konkurentsivõime tagamiseks soovituslikud tegevused:

- ✓ **Kõrgharidusõppes kui kutseõppes väljalangevus esimesel õppeaastal.** Ühe olulise probleemina on välja toodud eriala sobimatus ja/või ebarealistlikud ootused erialale. Vähendada väljalangevust arendades õppekavasid koostöös tööstusega ja parandades õppekavade sobivust erineva taustaga täiskasvanud õppijatele rakendades sisseastumiskatsetel grupiintervjuusid.
- ✓ **Tööjõukonkurents teiste sektoritega.** Lõpetajate tugevad keemia-, materjaliteaduse- ja bioprotsessipädevused teevad neist atraktiivse tööjõu ka keemia-, farmaatsia- ja IT-tööstusele, mistõttu puidusektor peab spetsialistide pärast konkureerima kõrgemapalgaliste ja suurema nähtavusega valdkondadega. Seda riski saab vähendada, kui laiendada puidukeemia-põhiste praktikakohtade mahtu, pakkuda valdkonnaspetsiifilisi stipendiume ning siduda magistri- ja doktoritööd otseselt puidukeemia ettevõtete uurimis- ja arendusprojektidega.
- ✓ **Madalam teadlikkus ja huvi noorte seas.** Uuringud ja ettevõtjate tagasiside viitavad, et noorte vähene teadlikkus puidukeemia karjäärivõimalustest on järelkasv jaoks kriitilise tähtsusega mistõttu potentsiaalsed õppijad eelistavad IT-, robotika- või biomeditsiini erialasid. Teadlikkuse tõstmiseks on vaja laiendada õpilastele suunatud teavitustprogramme, pakkuda gümnaasiumis puidu- ja biomajanduse valikaineid ning ülikoolidevahelisi mikrokraade.

**Arendada kursusi, mis keskenduvad protsesside automatiseerimisele, digitaliseerimisele ja digitaalsele protsessimonitooringule ning ressursikasutuse tõhustamisel ringmajanduse põhimõtete alusel,** et valmistada spetsialiste ja oskustöölisi ette tööstuse tulevikuks.

**Digitaalse ja bioprotsessilise süvaõppe tugevdamine** (T3–T4, T9) bakalaureuse lõppfaasis ja magistri alg-moodulites ning integreeritud innovatsioonijuhtimise koostöövõrgustiku loomist (T11), mis seaks ülikoolid, tööstuse ja avaliku sektori ühises TRL-3→7 ökosüsteemis. Vastasel korral riskib Eestis arendatav puidukeemia ja biorafineerimise uus ettevõtlussektor tööjõu lünkliku ettevalmistuse ja hajusa innovatsioonivõimega, mis aeglustab sektori arengut.

**Praktiline kogemuse andmine magistriõppes, sh teadmussiiirde- ja tööstusdoktorantuuri laiapõhjaline rakendamine,** et tudengid saaksid reaalse töökogemuse puidukeemia või biotehnoloogia ettevõtetes.

Pakkuda **täiendõpet ja mikrokraade, mis võimaldavad (tipp)spetsialistidele ja ka oskustöölisele pidevat professionaalset arengut** uutel tehnoloogilistel seadmetel/tootmisliinidel töötamiseks.

Nende meetmete elluviimine aitaks katta kriitilised põhikompetentsid, kiirendada innovatsiooni turuleviimist ja tagada, et puidupõhine biorafineerimissektor kasvab koos kvalifitseeritud tööjõu ning tõhusa teadmussiirde rakendamisega.

## 7. LABORI- JA TA VÕIMEKUSE KASVATAMISE VAJADUS

Antud peatükis selgitatakse labori- ja teadusvõimekuse olukorda, arvestades, et loodud on puidu väärindamise fookustippkeskus ja Metroser AS arendab biorafineerimise arenduskeskust.

### 7.1 ÜKSUSTE ÜLEVAADE

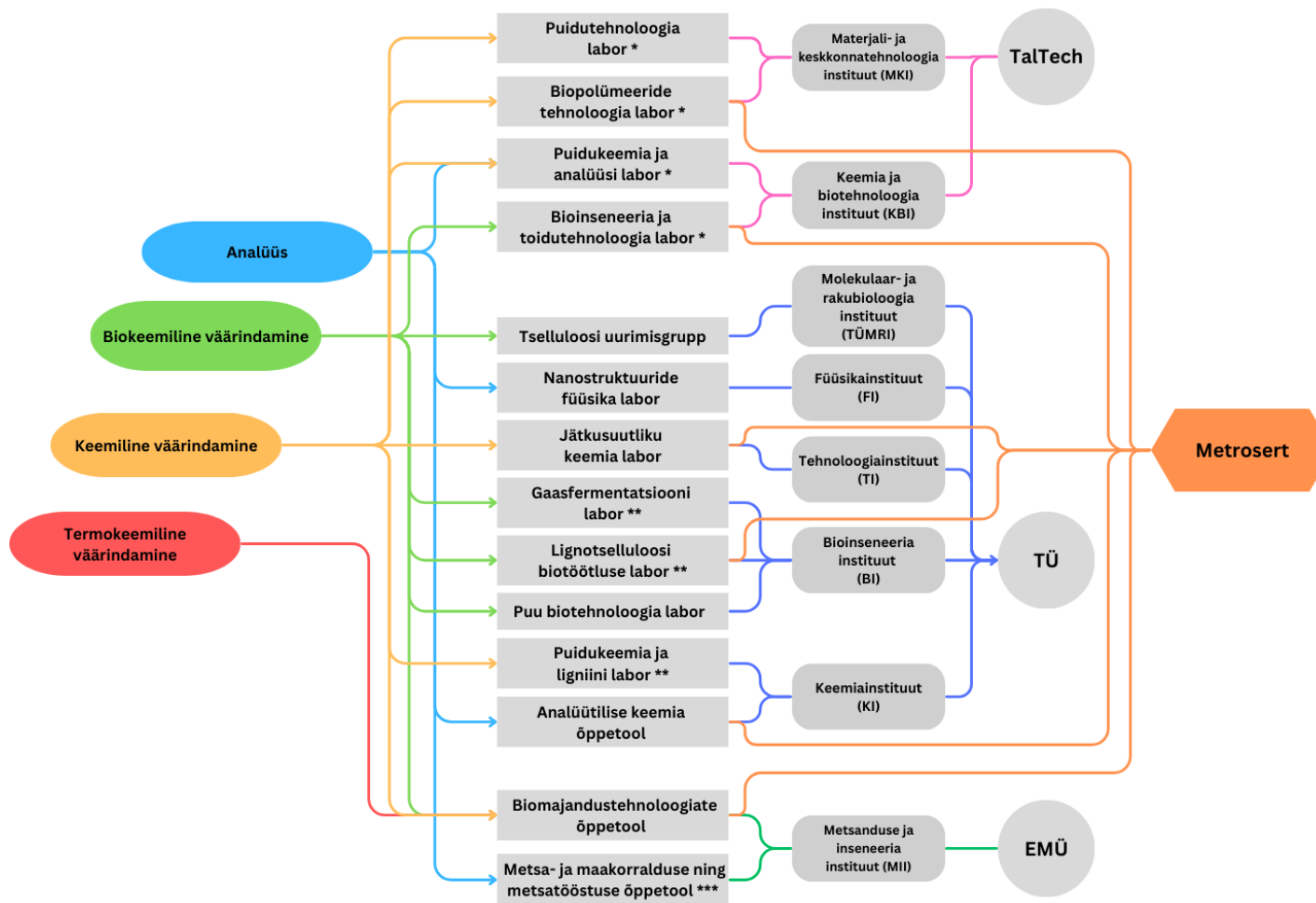
Eestis ülikoolides tegutseb vähemalt 14 üksust, mis on seotud puidu keemilise või bioloogilise väärindamisega. Neli neist on Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech) koosseisus ja kuuluvad kahe erineva instituudi koosseisu; Tartu Ülikoolis (TÜ) tegutseb 8 üksust viie instituudi koosseisus ja Eesti Maaülikoolis (EMÜ) kaks üksust ühe instituudi koosseisus. TalTech üksusi ühendab Tallinna Tehnikaülikooli puidu väärindamise fookustippkeskus<sup>224</sup>. Osad TÜ üksused kuuluvad Tartu Ülikooli puidukeemia ja biotöötuse tuumiklaborisse. Üksuste struktuur on esitatud Joonis 7.1 ja nende lühikirjeldus koos kontaktidega on esitatud Tabel 7.1.

Üksuste poolt teostatavad uuringud pakuvad lahendusi erinevate puiduliikide ja puidu komponentide, ka vähemväärtusliku puidu, saepuru ja sekundaarse puidu väärindamiseks läbi erinevate termiliste, keemiliste ja biokeemiliste protsesside kõrge lisandväärtusega kemikaalideks ja uuteks biomaterjalideks, plastideks, ravimiteks, kaitsetööstuses vajatavateks toodeteks jne. Uuringud toimuvad TAIE fookusvaldkondades „Puit“ ja „Teisene toore ja jäätmed“. Teadlaste rolliks on toetada ka Kliimaministeeriumi eesmärke ja poliitikakujundust, pakkudes ekspertuuringuid, andmeanalüüsi ja jätkusuutlikke pilootlahenduste praktikaid. See annab poliitilistele otsustele teaduspõhiste aluse, soodustab suunisotsuste kaudu tööstuse innovatsiooni ja konkurentsivõimet ning edendab säästlikku ressursikasutust.

TalTech, TÜ ja EMÜ teevad koostööd omavahel ja ka teiste akadeemiliste ja T&A asutustega Eestis nagu Tallinna Ülikool, Eesti Kunstiakadeemia, Sisekaitseakadeemia, KBFI ja AS Metroser.

Rahvusvaheline akadeemiline koostöö võimaldab üksustel olla teadustöö tipptasemel, edukalt jagada teadustaristut, osaleda suurtes, üleeuroopalistes T&A projektides ning viia läbi ühist, kõrgetasemelist kraadiõpet, üliõpilaste ja teadlaste vahetust. Koostööd tehakse mitmekümne välisülikooliga, nende hulgas Gruusia Põllumajandusülikool, Mulhouse ülikool, Riia Tehnikaülikool, Jyväskylä Ülikool, Lundi Ülikool, Vilniuse Ülikool, Läti Bioteaduste ja Tehnoloogia Ülikool, Universitat Rovira i Virgili (Hispaania), Chalmersi Ülikool, Queenslandi ülikool, Torino Ülikool, Freiburg University, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Åbo Akademi University, Saarland University, Technical University of Eindhoven (TU/e), Luleå University of Technology, Helsinki Ülikool, Aalto Ülikool, ETH, TU München, Swedish University of Agricultural Sciences, Linneaus University, Danish Technical University (DTU), University of Washington jne.

<sup>224</sup> TalTech puidu väärindamise fookustippkeskus. [Link](#)



**Joonis 7.1 Laborid või üksused Eesti ülikoolides, mis on seotud puidu keemilise või bioloogilise väärdamisega: struktuur, seotus AS Metrosertiga.**

\* Üksus kuulub Tallinna Tehnikaülikooli puidu väärdamise fookustippkeskusesse; \*\* Üksus kuulub Tartu Ülikooli puidukeemia ja biotöötuse tuumiklaborisse; \*\*\* Õppetooli raames osalevad puidu anatoomia labor, puidu ja puittoodete analüütika labor ja puidu modifitseerimise labor.

**Tabel 7.1 Laborid või üksused Eesti ülikoolides, mis on seotud puidu keemilise või bioloogilise väärdamisega: kontaktid ja lühikirjeldus.**

Üksus	Üksuse juht või kontaktisik	Valdkonnas tegutsevate teadlaste arv/ doktorantide arv/keskmine vanus	Lühikirjeldus ja koduleht
<b>Biopolümeeride tehnoloogia labor (TalTech)</b>	Prof. Andres Krumme	9/3/42	Tselluloosipõhiste materjalide arendamine fossiilse plasti asendamiseks. Uued keskkonnad ja reagentid tselluloosi mehaano-keemiliseks esterdamiseks. Labor teeb teadus- ja arendustööd ja pakub rakendusuuringute teenuseid peamiselt TRL vahemikus 1 – 4, üksikutel juhtudel ka enam. <a href="https://biopolymer.taltech.ee/">https://biopolymer.taltech.ee/</a>
<b>Puidutehnoloogia labor (TalTech)</b>	Prof. Jaan Kers	3/4/34	Vähekasutatud madala-kvaliteediliste puiduliikide väärdamine uutes kõrgeväärtusega puittoodetes. Puidu-bioliimi süsteemide arendus ehituses kasutatavates jätsuutlikes ja ohututes inseneripuittoodetes. Teisesest toormest arendatud biopõhised jätkusuutlikud ja tulekindlad komposiitmaterjalid. Puidupõhiste materjalide mehaaniline ja keemiline väärdamine alus- ja rakendusuuringutes toimub TRL tasemetel 1-4. Materjali ja puittoodete rakendusuuringud ja tootearendus koostöös ettevõtetega toimub TRL tasemetel 5 – 9. <a href="https://taltech.ee/materjali-ja-keskkonnatehnoloogia-instituut/laborid-ja-teenused/puidutehnoloogia-labor">https://taltech.ee/materjali-ja-keskkonnatehnoloogia-instituut/laborid-ja-teenused/puidutehnoloogia-labor</a>
<b>Puidukeemia ja analüüsi labor (TalTech)</b>	Dr. Maria Kulp	10/3/35	Biomassi eeltöötus, uued lahustid (nt. DES) biomassi fraktsioneerimiseks. Ligniini puhastamine ja keemiline väärdamine (plastikud, adsorbendid, liimid, ligniini põhised süsinikkiud), materjalide koostise analüüsid, rohelised analüüsimeetodid kasutades mittedestruktiivseid tehnoloogiaid kombineerituna kemomeetriliste tööriistadega. Usaldusväärsed, ohtlike kemikaalide ja jäätmete vabad keemilised analüüsid. Labor teostab rakendusuuringuid TRL vahemikus 1 - 4. <a href="https://chemlab.taltech.ee">https://chemlab.taltech.ee</a>
<b>Bioinseneria ja toidutehnoloogia labor (TalTech)</b>	Prof. Petri-Jaan Lahtvee	7/4/29	Kohalike ressursside väärdamine läbi biotehnoloogiliste protsesside. Rakkude ja ensüümide disain ja konstrueerimine. Sünteetilise bioloogi rakendamine ressursside väärdamiseks kombineerides bioinformaatikat, süsteemide bioloogiat ning biotehnoloogilisi rakendusprotsesse. Labori T&A tegevuse TRL on tüüpiliselt vahemikus 1-4, mõningates ettevõtlusprojektides ka kõrgem. <a href="https://bioeng.taltech.ee/">https://bioeng.taltech.ee/</a>
<b>Nanostruktuuride füüsika labor (TÜ)</b>	Prof. Siim Pikker	N/A	Komposiitmaterjalide ja nutikate pinnakatete loomine ning karakteriseerimine. Materjalide füüsikaliste omaduste karakteriseerimine. Puidupõhiste komposiitide loomine ja füüsikaliste omaduste modelleerimine. Labor teeb teadus- ja arendustööd ja pakub rakendusuuringute teenuseid TRL vahemikus 1 – 4. <a href="https://fi.ut.ee/et/sisu/nanostruktuuride-fuusika-labor">https://fi.ut.ee/et/sisu/nanostruktuuride-fuusika-labor</a>
<b>Jätkusuutliku keemia labor (TÜ)</b>	Prof. Lauri Vares	6/3/40	Puidutoorme keemiline muundamine kemikaalideks ja polümeerideks. Puidupõhiste plastide keemiline taaskasutamine. Labori teadustöö TRL on tüüpiliselt vahemikus 1-3. <a href="https://tuit.ut.ee/et/sisu/lauri-vares-orgaanilise-keemia-kaasprofessor">https://tuit.ut.ee/et/sisu/lauri-vares-orgaanilise-keemia-kaasprofessor</a>

Üksus	Üksuse juht või kontaktisik	Valdkonnas tegutsevate teadlaste arv/ doktorantide arv/keskmise vanus	Lühikirjeldus ja koduleht
<b>Gaas-fermentatsiooni labor (TÜ)</b>	Prof. Kaspar Valgepea	3/1/32	Biopõhiste kemikaalide ja materjalide tootmine puidujääkidest ja väheväärtuslikust puidust. Kohaliku puidutööstuse jääkide testimine väärindamiseks gasifitseerimise ja gaasfermentatsiooniga. Labori T&A tegevuse TRL on tüüpiliselt vahemikus 1-4, mõningates ettevõtlusprojektides ka kõrgem. <a href="https://woodbiotech.com/">https://woodbiotech.com/</a> ; <a href="https://valgepealab.com/">https://valgepealab.com/</a>
<b>Lignotselluloosi biotöötuse labor (TÜ)</b>	Prof. Ilona Faustova	2/0/35	Lignotselluloosi biotöötus, uudsete materjalide (nt bioliimid, kunstnahk jne) valmistamine biotehnoloogiliselt. Uute puidupõhiste materjalide arendamine, uute lähenemiste ja paradigmade testimine kuni tehnoloogiaarenduseni toimub TRL tasemetel vahemikus 1-5. <a href="https://woodbiotech.com/">https://woodbiotech.com/</a> ;
<b>Puidukeemia ja ligniini labor (TÜ)</b>	Prof. Siim Salmar	10/5/31	Ligniini ja ligniini-tselluloosi segude väärindamine materjalideks (liimid, nanokomposiidid, kunstnahk jne) uudsete füüsikalise-keemiliste tehnoloogiatega. Labori TRL tasemed on sarnased eelmisel real kirjeldatuga. <a href="https://woodbiotech.com/">https://woodbiotech.com/</a>
<b>Puu biotehnoloogia labor (TÜ)</b>	Prof. Hannes Kollist	3/0/55	Taimede k.a. puude füsioloogiliste tunnuste ja omaduste bioinseneeriline disainimine. Taimsete ja biopõhiste valkude rakendamine puidu komposiitide tootmiseks. Arenduste TRL vahemikus 1-4. <a href="https://www.plantsignalresearch.com/">https://www.plantsignalresearch.com/</a> <a href="https://woodbiotech.com/">https://woodbiotech.com/</a>
<b>Analüütilise keemia õppetool (TÜ)</b>	Prof. Ivo Leito	3/1/45	Puidupõhiste materjalide analüüsid ja keemiliste ning tehnoloogiliste protsesside monitoorimine reaajas, laborite vahelised võrdlusmõõtmised, protsesside (dissotsiatsiooni, jaotus tasakaalud) modelleerimine. Labori teadustöö TRL on tüüpiliselt vahemikus 1-4. <a href="https://analytical.chem.ut.ee/">https://analytical.chem.ut.ee/</a>
<b>Loodus- ja täppisteaduste valdkond, molekulaar- ja rakubioloogia instituut (TÜ)</b>	Prof. Priit Väljamäe Maia Kivisaar	3/1/45	Tõrksate polüsahhariidide (tselluloos ja kitiin) ensümaatiline lagundamine. Meie uurimistöö hõlmab eelkõige alusuuringuid (TRL 1-4), kuid koostöös ettevõtetega oleme viimasel ajal järjest enam keskendunud ka rakendusuuringutele. <a href="https://tymri.ut.ee/et/sisu/tselluloosi-uurimisgrupp">https://tymri.ut.ee/et/sisu/tselluloosi-uurimisgrupp</a>
<b>Biomajandus-tehnoloogiaste õppetool (EMÜ)</b>	Prof. Timo Kikas	13/7/31	Biomassi eeltöötus ja erinevate struktuursete komponentide eraldamine edasiseks väärindamiseks. Lisaks uuritakse ligniini ja puidusuhkrute keemilist/katalüütilist, elektrokeemilist ja mikrobioloogilist väärindamist materjalide ja platvormkemikaalideni. Uute hübriidsete konversiooni tehnoloogiate kasutamine, kus bio- ja termokeemilised protsessid ühendatakse puidujäätmete mitmekülgeks väärindamiseks.

Üksus	Üksuse juht või kontaktisik	Valdkonnas tegutsevate teadlaste arv/ doktorantide arv/keskmine vanus	Lühikirjeldus ja koduleht
			Õppetool teeb teadus- ja arendustööd ning pakub rakendusuringute teenuseid TRL tasemel 1-6. <a href="https://mi.emu.ee/biomajandustehnoloogiate-oppetool-0">https://mi.emu.ee/biomajandustehnoloogiate-oppetool-0</a>
<b>Metsa- ja maakorralduse ning metsatööstuse õppetool (EMÜ)</b>	Prof. Ahto Kangur	N/A	Puidu anatoomia, puidu omaduste analüütika, kohaliku puidu väärindamine läbi uudsete puittoodete arendamise, puidupõhiste toodete tootmisprotsesside arendamine koostöös ettevõtetega. Labori teadustöö, arendustöö ja tootearenduse TRL on tüüpiliselt vahemikus 1-7. <a href="https://mi.emu.ee/et/struktuur/metsa-ja-maakorralduse-ning-metsatööstuse-oppetool/">https://mi.emu.ee/et/struktuur/metsa-ja-maakorralduse-ning-metsatööstuse-oppetool/</a>
<b>Bio-rafineerimise arendus-keskus (Metrosert)</b>	PhD. Angela Vaasa	7/N/A/49	Biomassi väärindamine. Sünteetilise bioloogia skaleerimisplatform. Väikesemahuline (proprietary) juuretiste tootmine (batch ja fed batch) aeroobsel ja anaeroobsel kultiveerimisel- Ensüümide ja valkude arendus ning katsetootmine. Funktsionaalsete raku biomassi fraktsioonide arendamine ja katsetootmine (lipiidid, pärmiekstraktid jms). Biopolümeeride väljatootamine ja sellele järgnev tootearendus. Arendustegevused vahemikus TRL 3 – TRL 7. Põhirõhuga TRL 5 – TRL 7, ehk siis eksperimentaalarendus. <a href="https://metrosert.ee/teenused/rakendusuringud/rakendusuringute-keskuse-valdkonnad/biorafineerimine">https://metrosert.ee/teenused/rakendusuringud/rakendusuringute-keskuse-valdkonnad/biorafineerimine</a>

## 7.2 ÜKSUSTE VÕIMEKUSED

Üksuste teadustegevuse puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise valdkonnas võib üldjoontes jagada keemiliseks, biokeemiliseks ja termokeemiliseks väärindamiseks, millega eraldi suunana lisandub toorme ja väärindatud materjali analüüs (vt. Joonis 7.1). Antud uuring ei käsitle puid mehaanilise väärindamise alaseid uuringuid, mis samuti nimetatud kolmes ülilkoolis toimuvad.

### 7.2.1 TERMOKEEMILINE VÄÄRINDAMINE

Termokeemilise väärindamisega (torrefitseerimine, pürolüüs, gaasistamine) tegeleb Eestis Biomajandus-tehnoloogiate õppetool (EMÜ). Nende meetoditega valmistatakse puidu biomassist aineid, mis on toormeks järgnevale biokeemilisele või keemilisele väärindamisele. Termokeemilise väärindamisraja arendamine on oluline kuna Eesti turule on potentsiaalselt lisandumas selles valdkonnas tegutsevaid ettevõtteid. Hetkel on kõikide termokeemiliste väärindamiste puhul enamasti tegemist energiakandjate tootmisega ja protsesside potentsiaal sisuliselt kasutamata, kuna ettevõtted piirduvad energia tootmisega. Kõik termokeemilised meetodid võimaldavad ka teisese toorme ja vähekvaliteetse puidu kasutamist. Üksuses arendatakse termokeemiliste protsesside laboripiloote alates torrefitseerimisest, pürolüüsi ja gasifitseerimiseni kuni TRL tasemel 6. **Arengupotentsiaalina nähakse üksuse enda laborpilootide arendamist, kuna need on Eestis ainulaadsed ja põhinevad osaliselt ka üksuse enda patentidel.**

### 7.2.2 BIOKEEMILINE VÄÄRINDAMINE

Biokeemilise väärindamisega tegeleb Eesti ülikoolide juures 6 üksust.

**BIOMAJANDUS-TEHNOLOOGIATE ÕPPETOOL (EMÜ)** tegeleb termokeemilistest protsessidest pärineva toorme jätkuva väärindamisega fermentatsiooni teel ning mikrovetikate abil liikudes edasi kiled, juhtivate polümeeride, hüdrogeelide, platvormkemikaalide, ravimühendite jms tootmise suunas.

**GAASFERMENTATSIOONI LABOR (TÜ)** keskendub gaasfermentatsiooni tehnoloogia arendusele ja optimeerimisele ning protsessis kasutatavate mikroobide bioinseneerimisele, mis võimaldab gasifitseeritud puidust toota mikroobide abil erinevaid bioühendeid. Gaasfermentatsiooniks vajaliku sisendgaasi saadakse Biomajandus-tehnoloogiate õppetooli (EMÜ) biomassi gasifitseerimise pilootlaborist, kus on võimalik eri puidumassi gasifitseerida süngaasiks. TRL tase hetkel 3-4 ning arenduse eesmärk viia TRL 5ni. **Arendusvajadusena nähakse CO mõõtmisensorite täiendamist.** Eestis on piisavalt puidujäätmeid (räakimata puidust) gasifitseerimise-gaasfermentatsiooni kombineeritud tehnoloogial põhineva tööstusliku tehase loomiseks. Siiski tuleb protsessi testida ja optimeerida täpselt igale jäätmevoole. TA antud suunal Eesti kohaliku puidu biomassiga on vajalik tehnoloogia rakendatavuse valideerimiseks.

**LIGNOTSELLULOOSI BIOTÖÖTLUSE LABORIS (TÜ)** valmistatakse puidusuhkrutest mikroorganismide abil valgupõhiseid materjale ning uuritakse nende potentsiaalseid kasutusvõimalusi. Töö teostamiseks kasutatakse erinevaid meetodeid valguliste materjalide tootmiseks (DNA manipuleerimine, valkude ekspresseerimine mikroorganismides, erinevate post-translatoorsete modifikatsioonide tegemine ning nende puhastamine). Valkude omaduste mehhaanilisi ja füüsikalisi omadusi uuritakse koostöös Puidukeemia ja ligniini laboriga. Pikemas plaanis nähakse võimalust konstrueerida mikroorganismid, mis suudavad väheväärtusliku puitmassi lagundada suhkruteks, millest võib valku toota. Valkude tootmiseks on võimalik kasutada kuni 2 liitriseid kasvatuskolbe ning liitriseid bioreaktoreid. Olemasolevast aparatuurist piisab tootearenduses algaasi käivitamiseks kuni TRL 5-ni. **Suuremahulise tootearenduse jaoks on vajalik suuremate bioreaktorite kasutamise võimalus, mida võiks pakkuda Metrosert.**

**MOLEKULAAR- JA RAKUBIOLOOGIA INSTITUUDI TSELLULOOSI UURIMISGRUPP (TÜ)** tegeleb tõrksate polüsahhariidide (tselluloos ja kitiin) ensümaatilise lagundamisega. Tselluloosi ensümaatilise

hüdrolüüs fermenteeritavateks suhkruteks eeldab erinevate ensüümide sünergistlikku koostoimet. Optimaalsete ensüümsegu väljatöötamine eeldab aga üksikute ensüümide toimemehhanismide põhjalikku tundmist. Ensüümide toimemehhanismi ja kineetika detailne kirjeldamine ongi labori uurimistöö põhisuunaks. Rohkem kui veerand sajandi pikkuse kogemusega on saavutatud arvestatava positsiooni antud teadusvaldkonnas. Tegeletakse aktiivselt ka uute, nii tselluloosil kui ka ligniiniil aktiivsete ensüümide otsimisega. Lisaks erinevatele mudelsubstraatidele uuritakse ka tööstuslikult relevantsete lignotselluloossete substraatide lagundamist ja optimeerime reaktsioonitingimusi.

**PUU BIOTEHNOLOOGIA LABORIS (TÜ)** arendatakse tehnoloogiad, mille abil parandada kasepuude kasvukiirust, eri tingimustes kohastumist (k.a. saastatud piirkonnad) ja puidu omadusi, sh. lignotsellulooset koostist. **Arendusvajadusena nähakse aparatuurse kompleksi soetamist kasepuude genoomide editeerimiseks.**

**BIOINSENERIA JA TOIDUTEH-NOLOOGIA LABORIS (TALTECH)** arendatakse välja uudeid biopõhiseid protsesse, kus kasutatakse mikroobseid rakuvabrikuid erinevate süsinikurikaste jääkide (toidu- ja puidutööstuse jäätmed) muutmiseks lisandväärtusega toodeteks (biopõhised õlid, toidu- ja söödalisandid, biopõhised värvide ja sideainete komponendid kui ka uue põlvkonna jätkusuutlikud lennukikütused). Omatakse võimekust kõrge läbilaskevõimekusega mikroobitüvede kasvatamiseks, sõelumiseks ning kasvutingimuste optimeerimiseks mikroliitri skaalal. Üksus toimib TRL tasemetel 1 – 4, partnerite abiga ka tasemetel 5-6. Labori seadmed võimaldavad skaleerida kuni 1-liitri skaalani. **Arendamisvõimalusena nähakse automaatse spektroskoopilise meetodi käivitamist rakukultuuride analüüsimiseks.** Üksuse teadustöö on sisendiks partneritele, kes toetavad omakorda suuremahulise tööstuse arendamist. Üldiselt napib Euroopas valdkonnaspetsiifilise skaleerimise võimalusi ja Metroserdi tulek on üksuse hinnangul teretulnud.

### 7.2.3 KEEMILINE VÄÄRINDAMINE

Keemilise väärindamisega tegeleb 6 üksust.

**BIOMAJANDUS-TEHNOLOOGIATE ÕPPETOOL (EMÜ)** tegeleb puidust tselluloosi ja ligniini eraldamise ning nendest kõrgväärtuslike toodete valmistamisega. Vastavad töötlusmeetodid on keemilised (nõ. rohelised solvendid) ja füüsikalise-keemilised (lämmastiklõhkamine, aurlõhkamine). **Arendatakse lämmastiklõhkamise laboripilooti.** Füüsikalise-keemilised eeltöötlusmeetodid on puidu väärindamisel alternatiiviks täna kasutusel olevatele mehhanokeemilistele ja Kraft tüüpi keemilistele meetoditele. Keemiline ligniini ja tselluloosi eraldamine „Roheliste“ lahuste abil võimaldab seda teha sellise puhtusastmega, et need on sobivad keemiatööstuse toormeks, mida hetkel tööstuslikult kasutatavad meetodid ei võimalda.

**PUIDUKEEMIA JA LIGNIINI LABORI (TÜ)** peamisteks suundadeks on ligniini ja ligniin-tselluloosi segu (LCM) väärindamise füüsikalise-keemiliste tehnoloogiate uurimine ja arendamine (kuni TRL 5) ja männipuidujäägi ja muu biomassi väärindamine ülekritiliste fluidumite (SCF) ekstraktsiooni rakendamisel. Protsesse plaanitakse laboris arendada kuni TRL tasemeni 5. **Selleks on vaja skaleerida SCF pidevekstraktsiooniliini ja täiendada materjalide reoloogiliste ja mehaaniliste omaduste määramise võimekusi.** Üksuse tegevused on otseselt seotud kaasaegsete puidu biorafineerimisega ja fraktsioneerimisega tegeleva ettevõtlusega, laiendades tehnoloogilisi võimalusi ligniini ja LCM edasiseks väärindamiseks, mis ainsana tagavad biorafineerimise kontseptsiooni jätkusuutlikuse. Samuti annab üksuse T&A tegevus sisendeid traditsioonilistele tselluloosi- ja paberi tehnoloogiatele ligniini väärindamise võimaluste suundades. SCF tööstuspiloodini on plaanis jõuda koostöös ettevõtetega väljaspool laborit. LCM-ist võimaldavad arendatavad ultrahelitöötlust kasutavad tehnoloogiad valmistada ligniini-nanotselluloosmaterjale, mis on rakendatavad filtritena, toidupakendites, kosmeetikas. Arendatav SCF ekstraktsiooni tehnoloogia võimaldab erinevat tüüpi puidu biomassidest eraldada ekstraktiivkomponente, mida saab edasi rakendada nt meditsiinis ja parfümeerias ning jääkkiudmassist erinevaid materjale. Kõik

üksuses arendatavad tehnoloogiad toetavad väheväärtusliku, seni ainult kütteks sobiva biomassi väärindamist kõrgema lisandväärtusega toodeteks.

**JÄTKUSUUTLIKU KEEMIA LABORIS (TÜ)** töötatakse välja puidutoormel baseeruvaid polümeere eelkõige kõrgtehnoloogilistesse rakendustesse. Lähteainetena on kasutusel nii ligniinist saadavad kemikaalid (nt vaniliin) kui ka suhkrute fraktsioonist saadavad kemikaalid (sorbitool, isosorbiid, sidrunhape jt). Tegevus baseerub orgaanilisel sünteesil, mis on kombineeritud erinevate polümerisatsiooni meetoditega. Käiku lähevad orgaanilise sünteesi seadmed reaktsioonide läbiviimiseks, ainete puhastamiseks ja analüüsiks. Lisanduvad polümerisatsioonide läbiviimiseks ja polümeeride analüüsiks vajalikud seadmed. **Arendamist vajab ainete termiliste omaduste määramise võimekus (kalorimeetria) ja fotokeemia võimekus.** Üksuses panustatakse enam baasteadusele ning arendatakse kontseptuaalselt uusi puidukeemia põhiseid polümeere (TRL tase 1-3). Ettevõtteid toetatakse nii teadmiste kui ka arendustegevusega, aga mitte konkreetse tootearendusega, piloottootmise võimekusi ei kavandata. Üksuse tegevuse eriline rõhuasetus on materjalide ümbertöötlemise parandamisel läbi keemilise taaskasutamise.

**PUIDUKEEMIA JA ANALÜÜSI LABORIS (TALTECH)** tegeletakse puidu ja biomassi väärindamise tehnoloogiate arendusega (ligniini depolümeriseerimine ja puhastamine bio-põhiste materjalide, nagu liimid, arogeelid, adsorbendid, süsinikkiud, plastid, katalüsaatorid jne. valmistamiseks). Tegeletakse protsesside arendamisega labori skaalas (TRL 1-4), pidades silmas ka võimalusi edasiseks skaleerimiseks. Tehnoloogiate arendamisel peetakse silmas ka väheväärtusliku toorme väärindamist. Laboris tegeletakse puidukeemia materjalide ja produktide analüüsi ja iseloomustamisega. Laboris on arendatud ja valideeritud mitmesugused analüütilised protseduurid puidu ja biopõhiste toodete iseloomustamiseks, sealhulgas ligniini, tselluloosi, hemitselluloosi, metallide ja ekstraktiivainete sisalduse määramiseks, ainete struktuuri iseloomustamiseks FTIR, NMR, MS/MS ja eksklusioonkromatograafia abil, OH-rühmade kvantitatiivseks analüüsiks ja monolignoolisisalduse määramiseks. Laboris on kasutusel mittedestruktiivsed (proovi ettevalmistamine minimiseeritud) tipptasemel analüütilised tehnoloogiad kombineerituna kemomeetriliste tööriistadega (mitmemõõtmeline andmeanalüüs ja modelleerimine), mis on peaaegu vaba ohtlikest kemikaalidest ja jäätmetest, kiire ning tagab täpseid, usaldusväärseid ja vastavaid tulemusi.

**PUIDUTEHNOLOOGIA LABORIS (TALTECH)** toimub madalakvaliteediliste puiduliikide väärindamine uuteks inseneripuittoodeteks ja komposiitideks TRL tasemetel 1-4. Üksuses on olemas siinses regioonis ainulaadne pilootskaalas spooni ja vineeri valmistamise liin, millega on võimalik kõiki protsessi parameetreid kontrollida nagu tootmises. Puidu keemilise väärindamise valdkonnas uuritakse erinevate biopõhiste liimainete toimivust vineeri valmistamisel. **Selleks on vaja täiendavalt soetada mitmeid puitkomposiitide uuringu seadmeid, nagu automatiseeritud liimühenduste katsete seade, puidu tiheduse profilaator, puidu struktuuri kompuutertomograafi, nanoindentatsiooni seade.**

**BIOPOLÜMEERIDE TEHNOLOOGIA LABORIS (TALTECH)** T&A tegevuse eesmärgiks on välja töötada jätkusuutlik, väikese keskkonnakoormusega ja energiatõhus meetod tselluloosipõhise bioplasti valmistamiseks ja demonstreerida selle meetodiga valmistatud materjale erinevates laiatarbe ja kõrgtehnoloogilistes rakendustes (pakkematerjalid, lamineeritud paber ja kartong, elektrokedratud kiudmaterjalid, bioplastid autotööstusele jne. Üksuses on reaktiivse ekstrusiooni pilootliin (TRL 4), mis võimaldab tselluloosipõhist bioplasti toota kuni 5 kg/h. Reaktiivse ekstrusiooni protsessi on plaanis AS Metroserti baasil laiendada tootlikkuseni ~150 kg/h (TRL 6). Üksuses on ka piloot- ja tööstuslikud seadmed bioplasti töötlemiseks, kilede valmistamiseks ja survevaluks. **Täiendamist vajab materjalide dünaamilis-mehaanilise katsetamise võimekus, gaaside läbilaskvuse võimekus ning bioplastide sulandi töötlemise võimekuse laiendamine enamlevinud tööstusprotsesside osas nagu kiuketrus ja lamineerimine.** Laboris ei tegeleta otseselt tselluloosi eraldamisega puidu biomassist, kuid arendatavad

protsessid võimaldavad sisendina kasutada tselluloosi ka väheväärtuslikust toormest, aga ka taaskasutatud paberit ja pappi ning rõivajäätmetest pärinevat tselluloosi. Uuritakse teraviljakestade kasutusvõimalusi. Tselluloosipõhise plasti valmistamise üheks komponendiks on primaarne või sekundaarne taimne õli.

#### 7.2.4 TOORME JA VÄÄRINDATUD MATERJALI ANALÜÜS

Valdkonnas tegeleb 4 üksust.

**METSA- JA MAAKORRALDUSE NING METSATÖÖSTUSE ÕPPETOOLIS (EMÜ)** tegeletakse puidu anatoomia ja puidu omaduste analüütikaga, sh. puidu vananemise uuringud.

**BIOMAJANDUSTEHNOLOGIATE ÕPPETOOLIS (EMÜ)** tegeletakse biomassi biokeemilise koostise analüüsiga: kiuanalüüs, NREL taandatavate suhkrute analüüs, pürolüüs-GC-MS.

**ANALÜÜTLILISE KEEMIA ÕPPETOOLI (TÜ)** tegevuse üks peamisi suundi on puidu keemilise väärindamise ahelale rakendatav keemiline ja instrumentaalanalüüs. Peamised meetodid on kromatograafia ja massispektromeetria, elektrokeemilised meetod, niiskusesisalduse määramine. Samuti on kasutusel erinevate tuumade tuumamagnetresonants (NMR) ja optilised spektroskoopiad. Arendatakse võimekust optilise spektroskoopia rakendamiseks protsesside jälgimiseks on-line ja at-line režiimis. Üksuses on võimekus viia läbi proovide eeltötlust ja eraldamist fraktsioonideks. Eksperimentaalseid mõõtmisi saab täiendada ainete omaduste teoreetiliste arvutustega. Kõigile mõõtmismeetoditele on võimalus läbi viia valideerimine ja mõõtemääramatuse hindamine. Nimetatud analüüsi meetodeid saab kasutada puidu keemilise väärindamise ahelas tegutsevate ettevõtete lisandväärtuse kasvu panustamiseks läbi analüüsi-alase toe pakkumise ja analüüsides läbiviimise oskustega spetsialistide koolitamise. **Arendatakse on-line meetodikaid, mida saab kasutada näiteks puidu termokeemilise fraktsioneerimise protsessi jälgimiseks, juhtimiseks või optimeerimiseks.** Samuti saab neid meetodikaid kasutada fraktsioonide stabiilsuse uuringutel ja edasisel keemilisel väärindamisel (nt polümeerimaterjalide valmistamise reaktsioonide jälgimine) ja ka fermenteerimisel protsessi jälgimisel.

**NANOSTRUKTUURIDE FÜÜSIKA LABOR (TÜ)** tegeleb puidupõhiste komposiitmaterjalide ja nutikate pinnakatete füüsikaliste omaduste karakteriseerimisega ja füüsikaliste omaduste modelleerimisega. Labor teeb teadus- ja arendustööd ja pakub rakendusuringute teenuseid TRL vahemikus 1 – 4.

### 7.3 TEADLASTE VANUS JA ARV, DOKTORANDID JA NOOREMTEADURID, JÄRELKASV

Valdkonnas tegutsevad üksused ei ole suured, 2 – 13 teadlast (vt. Tabel 7.1). Töörühmade väiksus võib tähendada suuremate, interdistsiplinaarsete T&A projektide läbiviimiseks teadlaste koondamise vajadust. Tallinna Tehnikaülikoolis on selleks loodud puidu väärindamise fookustippkeskus ja Tartu Ülikoolis puidukeemia ja biotöötuse tuumiklabor. Teadlased teevad ka bilateraalselt koostööd. Siiski puudub üle-eestiline puidu keemilise ja bioloogilise väärindamise koostöövõrgustik, mis võiks lihtsustada ja kiirendada ettevõtlusele suunatud T&A projektide ja teenuste läbiviimist.

Kokku tegutseb valdkonnas ligikaudu 80 teadlast, kellest ligikaudu pool on doktorandid või doktorant-nooremteadurid. Seetõttu on ka teadlaskonna keskmine vanus valdkonnas pigem nooremapoolne, ligikaudu 40 a.

Teadlaste järelkasv, doktorandid lähtuvad rahvusvahelisest vastuvõtust või siseriiklikest eestikeelsetest või rahvusvahelistest bakalaureuse- ja magistriõppekavadest. Vastavad kavad on olemas nii TalTechis, TÜ-s kui ka EMÜ-s

Kavade valik on piisav ja õppe kvaliteet on hea tagamaks nii loodus- ja tehnikateaduste alusharidus kui ka spetsiifilisemad teadmised puidu keemilise ja biokeemilise väärindamise valdkonnas. Õppekavade arenduses tuleks teha ülikoolide vahel koostööd, et piiratud ressursi tingimustes võimendada

olemasolevat teadlaste/õppejõudude potentsiaali ning minimeerida dubleerimist, seda eriti olukorras, kus õppida soovijate arv on piiratud ja praeguste rahvastiku trendide juures kahanemas.

**Tabel 7.2 Puidu keemilise ja bioloogilise väärimise alast järelkasvu pakkuvad õppekavad TalTechis, TÜ-s kui ka EMÜ-s.**

Ülikool	Bakalaureuseõpe	Magistriõpe	Doktoriõpe
<b>TalTech</b>	Materjalitehnoloogia Rakenduskeemia ja geenitehnoloogia Toidu- ja biotehnoloogia	Puidu- plast- ja tekstiilitehnoloogia (R/V) Rakenduskeemia ja biotehnoloogia Toidutehnoloogia ja -arendus	Tehnikateaduste doktoriõppekava peaariala Keemia- materjali- ja energiatehnoloogia (R/V)
<b>TÜ</b>	Füüsika, Keemia, Materjaliteadus Geenitehnoloogia Geoloogia ja keskkonnatehnoloogia Bioloogia ja elustiku kaitse Loodusteadused ja tehnoloogia (R/V)	Bioinseneria (R/V) Excellence in analytical chemistry (R/V) Analüütiline keemia Keemia Materjaliteadus ja tehnoloogia Loodusteadused ja tehnoloogia Molekulaarsed bioteadused	Tehnika ja tehnoloogia Füüsika ja keemia
<b>EMÜ</b>	Ringbiomajandus Tehnika ja tehnoloogia Metsandus Puidutöötlemise tehnoloogia	Tootmistehnika Puidu väärimine	Tehnikateadused Metsandus

Kõigel kolmel kõrghariduse astmel **õppijate ja lõpetajate arv võiks olla suurem. Seda piiravad järgnevad asjaolud:**

- ✓ Motiveeritud eesti noorte vähesus kõigil õppeastmetel. Loodusteaduste väheldane populaarsus noorte seas. Aktiivne rohepesu on noorte seas välja kujundanud metsaressursi kasutamist vastustava hoiaku.
- ✓ Valdkondlikud karjäärimudelid ei ole piisavalt motiveerivad, töö on paljuski projektipõhine. Noored ei näe sektorit väga atraktiivse töökohana.
- ✓ Vastuvõtt rahvusvahelistele magistrikavale on vähenenud eriti arengumaadest pärinevate õppurite võrra, kuna õpe on muutunud neile tasuliseks.
- ✓ Doktoriõppes domineerib pigem R/V vastuvõtt aga välistudengid ei pruugi peale lõpetamist Eesti ülikoolides jätkata.
- ✓ Puidusektori vähene ambitsioonikus, innovatsiooni teadlikkus ja innovatiivsus. Puidu- ja metsasektori innovatsiooni tase on madal. Kohaliku puidu väärimise motivatsioon kõrgema lisandväärtusega ja suurema innovatsioonipotentsiaaliga valdkondades on madal, jätkuvalt eelistatakse eksporti palgi või pelletina.

Antud probleemidele ei ole lihtsaid lahendusi. Spetsialiste napib ka teistel tehnilistel erialadel. Olukorda aitab leevendada puidu väärimise valdkonna populariseerimine alates põhikoolist kuni bakalaureuseõppe astmeni välja. Bakalaureuse ja magistriõppe tasemel oleks võimalik vastu võtta motiveeritud välistudengeid arengumaadest aga sellisel juhul tuleks neile kaotada õppemaks ja tagada erialastipendiumid. Viimane käib ka kohalike tudengite kohta. Mõju avaldaks ka puidutööstuse ja just enam kõrgema lisandväärtusega puidukeemia ja biokeemia valdkonna maine tugevdamine noorte hulgas. Tuleb selgitada, et antud valdkond on Eesti kontekstis ainus tõsiselt võetav alternatiiv fossiilsetele maavaradele ja nende kasutamisest lähtuvatele keskkonnaprobleemidele. Eestis tuleb luua uusi innovatiivseid puidukeemia ja biokeemia ettevõtteid, mis pakuks atraktiivseid, teaduspõhiseid töökohti.

## 7.4 KOOSTÖÖ TEADUSARENDEUSASUTUSTE NING ETTEVÖTETEGA

Eesti puidukeemia ja biokeemia teadustöö katab kogu puidu väärtusahela alates tööstusharule sobiva metsa kasvatamisest, puidu biomassi fraktsioneerimisest ligniini, tselluloosi, puidusuhkrute, torrefitseerimise, pürolüüsi ja gaasistamsie komponentide saamiseks kuni kõigi antud komponentide keemilise ja biokeemilise väärimdamiseni ning selle teel saadud materjalide põhise tootearenduseni. Kõigis nendes valdkondades on käimas tugevad alusuuringud. Laboratoorse piloottootmiseni on jõutud pigem biomassi fraktsioneerimise ja termokeemilise töötuse ning biokeemilise väärimdamise valdkonnas. Puidukeemia ja biokeemia põhiste platvormkemikaalide ja materjalide tootmise pilootvõimekus on väiksem.

Teadlaste ettevõtluskoostöö toimub kümnete ettevõtetega nagu Peetri Puit, Estonian Plywood, Rait, Fibenol, VKG, Dagöplast, Thermory, Hemptec, Click Grow, Gelatex, Gscan, MultiPro System, Verston, Haakoh, Wolf Grupp, RMK, Sadala Agro, Ardor, Est-Agar, TBD Pharmatech, Pharmasynth, Barrus, Leatherwoods, A Le Coq, Trigon Capital, WeeRec, ÄiöTech ja Valga Puu ja teised. Koostöö vormiks on siiski pigem lühiajalised rakendusuurinud, tootearendused ja katsetused, pikaajalisteks investeringuteks teadusesse puudub eesti ettevõtetel innovatsioonivalmidus ja riskikapital.

Teadlastel on ka koostöö välisettevõtetega, Põhjamaades ja mujal, mis võimaldab teadmussiiret, aga ka väliskapitali toomist Eestisse kohaliku toorme väärimdamiseks. Olulisemad partnerid on Bang & Bonsomer Group Oy, Raute Oyj, Metsä Group, Domsjö, UPM, Stora Enso, Saint-Gobain, Steko, CH-Polymers (Soome), Roquette (Prantsusmaa), Mirka (Soome), LanzaTech, Again, SCF Processing, MetGen. Välispartneritega koos osaletakse ka mitmetes rahvusvahelistes T&A suurprojektides, mille tulem ei pruugi siiski alati avalduda Eesti ettevõtluses.

Eraldi kategooria moodustab koostöö T&A asutustega. Nende abiga on samuti võimalik mahukamate T&A projektide elluviimine aga ka T&A tulemuste piloteerimine kõrgemal TRL tasemel, milleks Eestis veel võimekus puudub. See kiirendab oluliselt kohalike teadussaavutuste kommertsialiseerimist. Olulisemad T&A välispartnerid on RISE, Latvian State Institute of Wood Chemistry, MeKa, InnoRenew CoE, Metrosert, VTT, USDA Forest Products Laboratory, Latvian Institute of Organic Synthesis, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Sintef ja teised.

Eestis nähakse AS Metroserti biomassi väärimdamise valdkonnas vahelülina madalama TRL taseme teadusuuringute ja kõrge TRL tööstuslike rakenduste vahel. Metrosert lähtub skaleerimiseks väljaarendatavate tehnoloogiate valikul ennekõike ettevõtete initsiatiivist. Seega on praegu esmaselt arendamisel biorafineerimise suund, mis kattub ainult puidu biokeemilise väärimdamise valdkonnaga, mille alla kuuluvad valgud, ensüümid, pärmid, rasvad ja õlid, sünteetiline bioloogia ja teatavate bioplastide arendus. Metrosert ei kavanda praegu fraktsioneerimistehnoloogiate skaleerimist, kuna seda on tehtud naaberriikide sarnastes asutustes (Soomes, Lätis) ja dubleerimist soovitakse vältida. Pikemas perspektiivis on kavas arendada seadmeid, mis võimaldavad tselluloosipõhiste bioplastide tootmist reaktiivse ekstrusiooni tehnoloogiaga ja bioplastide segude ning komposiitide valmistamist. Antud olukorras tuleb ülikoolidel endil leida võimekusi biokeemilistest uuringutest väljaspoole jäävate, keemiliste ja termokeemiliste katsetuste arendamiseks piloottootmiseni. Selle kohta on üksuste kirjelduste juures (Pt. 7.2) ka perspektiivseid näiteid. Riigil tuleks antud olukorras suunata pilootimise arendamist võimaldavaid vahendeid mitte ainult Metroserti vaid ka ülikoolidesse. AS Metrosert on seisukohal, et madalama TRL uuringuid ja analüütikat ülikoolidega dubleerima ei hakata. Seega on kavas koostöö asjakohaste üksustega. Ülikoolidelt oodatakse abi ka kõrgharidusega personali ettevalmistusel ning pakutakse praktikabaasi. Üksused, millel on AS Metrosertiga ühistegevusi või kavandamisel koostöö on esitatud Joonis 7.1.

## 7.5 KOKKUVÕTE

- ✓ **Eesti ülikoolides (TalTech, TÜ, EMÜ) tegutseb vähemalt 14 üksust**, mis on seotud puidu keemilise või bioloogilise väärimisega. Ülikoolide sees on moodustatud üksusi ühendavaid struktuure (TalTech: puidu väärimise fookustippkeskus; TÜ: puidukeemia ja biotöötuse tuumiklabor).
- ✓ **Valdkonnas tegutseb ligikaudu 80 teadlast**, kellest ligikaudu pool on doktorandid või doktorant-nooremteadurid. Teadlaskonna keskmine **vanus on nooremapoolne**, ligikaudu 40 aastat. **Üksused ei ole suured**, 2 – 13 teadlast.
- ✓ Seni **puudub üle-eestiline puidu keemilise ja bioloogilise väärimise koostöövõrgustik**, mis võiks lihtsustada ja kiirendada ettevõtlusele suunatud T&A projektide ja teenuste läbiviimist, kuigi erinevate projektide raames tehakse koostööd.
- ✓ Üksuste poolt teostatavad uuringud pakuvad lahendusi erinevate puiduliikide ja puidu komponentide, ka vähemväärtusliku puidu, saepuru ja sekundaarse puidu väärimiseks **kõrge lisandväärtusega kemikaalideks ja uuteks biomaterjalideks, plastideks, ravimiteks, kaitsetööstuses vajatavateks toodeteks jne.**
- ✓ Puidu keemilise või bioloogilise väärimisega seotud tegevused ülikoolides võib jagada **termokeemiliseks väärimiseks** (1 üksus), **keemiliseks väärimiseks** (6 üksust), **biokeemiliseks väärimiseks** (6 üksust) ja **analüütikaks** (4 üksust). Mitmed laborid kuuluvad mitmesse nimetatud valdkonda.
- ✓ Üksuste **varustatus teadus- ja arendustöö läbiviimiseks on üldjuhul hea**, võimaldades siseriiklike teenuste osutamist ja rahvusvahelist koostööd. **Probleemiks on kallima aparatuuri vananemine ja aparatuuri uuendamise projekti- ja konkurentsipõhisus.**
- ✓ **Arengupotentsiaalina** nähakse kokkuvõtlikult
  - erinevate **laboratoorsete pilootseadmete arendamist** suuremamahulise tootearenduse jaoks, sh. termo- ja biokeemiliseks töötamiseks ning lignotselluloosel toormel põhinevate biopolümeeride sünteesiks,
  - **spetsiaalsete tehnoloogiliste protsesside arendamist** ja skaleerimist, nagu puidukeemia põhiste materjalide formeerimine kiududeks ja laminaatideks ning ülekritiliste fluidumite ekstraktsioon puidu komponentide eraldamiseks ja modifitseerimiseks.
  - **analüütiliste seadmete arendamist**, sh. automatiseeritud analüüsi võimekuse loomist mõõteprotsessi kiirendamiseks, reaajas jälgimiseks ja analüüside mahtude suurendamiseks.
- ✓ **Ettevõtluskoostöö vormiks on peamiselt lühiajalised rakendusuuringud, tootearendused ja katsetused, pikaajalisteks investeeringuteks teadusesse puudub eesti ettevõtetel innovatsioonivalmidus ja riskikapital.**
- ✓ **AS Metroserti** on ainus vahelüli madalama TRL taseme (ülikoolides üldiselt 1-4) teadusuuringute ja kõrge TRL tööstuslike rakenduste vahel. AS Metrosert lähtub skaleerimiseks väljaarendatavate tehnoloogiate valikul Eesti ettevõtete initsiatiivist, seega on **praegu arendamisel ainult biokeemilise väärimise suund**. Riigil tuleks antud olukorras **suunata pilootimise arendamist võimaldavaid vahendeid mitte ainult AS Metroserti vaid ka ülikoolidesse, et toetada ülikoolipõhiste iduettevõtete teket valdkondades, mida AS Metrosert ei kata.**
- ✓ Teadlaste järelkasv, doktorandid lähtuvad rahvusvahelisest vastuvõtust või siseriiklikest eestikeelsetest või rahvusvahelistest bakalaureuse- ja magistriõppekavadest. Asjakohased õppekavad on ülikoolides olemas kuid **vastuvõtt peaks järelkasvu (nii akadeemilise kui ka ettevõtlusele suunatud) tagamiseks olema suurem**. Lahendusteks oleks **valdkonna maine parandamine, rahvusvahelise vastuvõtu soodustamine, erialastipendiumid ja innovatiivsete teaduspõhiste töökohtade loomine.**

## 8. PUIDU KEEMILISE JA MIKROBIOLOOGILISE VÄÄRINDAMISE TEHNOLOOGIATE KASUTUSELEVÕTU KITSASKOHAD JA LEEVENdamISE VÕIMALUSED

Puidu keemiline ja mikrobioloogiline väärindamine esindab märkimisväärset potentsiaali Eesti majanduse arendamisel, võimaldades suurendada kohaliku biomassi lisandväärtust ning edendada keskkonnahoidlikku tootmist, millega kahaneb riigi süsiniku jalajälg. Käesolev riskimaatriks on koostatud eesmärgiga kaardistada selle valdkonna tehnoloogiate kasutuselevõtuga seotud peamised kitsaskohad ja riskid Eesti kontekstis, hinnates nende mõju ja esinemise tõenäosust (Tabel 8.1).

Analüüs hõlmab nii poliitilisi, regulatiivseid, keskkonnavalaseid kui ka majanduslikke ja sotsiaalseid tegureid, mis võivad mõjutada puidukeemia arengut. Määratletud riskidele on lisatud ka võimalikud leevendusmeetmed, mille abil saab riik vähendada takistusi ja luua soodsamat keskkonda innovaatiliste tehnoloogiate rakendamiseks. Töö tugineb olemasolevale teadmisele ja valdkondlikele arengusuundadele ning selle eesmärgiks on toetada informeeritud otsuste tegemist riigi ja erasektori tasandil.

### 8.1 METOODIKA

Riskimaatriks koosneb kahest teljest (Joonis 8.1): mõju (tagajärjed, kui risk realiseerub) ja tõenäosus (kui suure tõenäosusega risk realiseerub). Käesoleva uuringu autorid hindasid puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise arendamisega kaasnevaid kitsaskohti ja pakutud võimalikke leevendusmeetmeid.

#### MÕJU TASEMED:

Väike: Vähene finantsiline või mainekahju, tegevusele väike mõju, kergesti hallatav.

Keskmine: Märkimisväärne finantsiline või mainekahju, mõõdukas mõju tegevuste ajakavale või eelarvele, vajab tähelepanu.

Suur: Kriitiline finantsiline või mainekahju, suur mõju tegevuste õnnestumisele, võib põhjustada tegevuste peatumise või olulisi viivitusi.

#### TÕENÄOSUSE TASEMED:

Väike: Risk realiseerub ebatõenäoliselt.

Keskmine: Risk võib realiseeruda.

Suur: Risk realiseerub tõenäoliselt või on juba realiseerunud.

Riski tase arvutatakse selle mõju ja tõenäosuse korrutisena. Riskiskoori 9 saanud riski määratlus on „suur risk“, tulemus vahemikus 4-8 määratletakse riski tasemega „keskmine risk“ ja madalama tulemusega riskid on „madal risk“ hinnanguga.

		MÕJU		
		VÄIKE	KESKMINE	SUUR
TÕENÄOSUS	SUUR	MADAL	KESKMINE	SUUR
	KESKMINE	MADAL	KESKMINE	KESKMINE
	VÄIKE	MADAL	MADAL	MADAL



### MADAL RISK

Vähene finantsiline või mainekahju, tegevustele väike mõju, kergesti hallatav.



### KESKMINE RISK

Märkimisväärne finantsiline või mainekahju, mõõdukas mõju tegevuste ajakavale või eelarvele, vajab tähelepanu.



### SUUR RISK

Kriitiline finantsiline või mainekahju, suur mõju tegevuste õnnestumisele, võib põhjustada nende peatumise või olulisi viivitusi.

**Joonis 8.1** Riskimaatriksi aluseks on kahe teguri – tõenäosuse ja mõju – hindamine kolmes astmes. Maatriks aitab määratleda, millised riskid vajavad enim tähelepanu ja millised on vähem kriitilised.

**Tabel 8.1 Puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise tehnoloogiate kasutuselevõtu riskimaatriks**

Risk	Mõju	Tõenäosus	Riski tase
<b>Üldised riskid</b>			
<b>1. Soosiva poliitikakeskkonna puudumine</b>	<b>Suur</b>	<b>Suur</b>	<b>Suur risk</b>
<i>Selgitus</i>	Eestis teadvustatakse üha enam vajadust arendada puidu keemilisel ja mikrobioloogilisel väärindamisel põhinevat tööstust. Eesti ekspordib igal aastal töötlemata okas- ja lehtpuu paberipuitu umbes 2 miljonit m <sup>3</sup> , kuna selle töötlemiseks ja väärindamiseks kohapeal vajalik tööstus puudub. <sup>1</sup> Sellele ideele on nii teaduslikul, sotsiaal-poliitilisel tasandil kui ka turul ka suur toetus olemas, kuid puudub selge riiklik otsus ning probleemid esinevad siis, kui hakata tehasele asukohta valida. Asukoha valimisel esineb raskusi, kuna rahvas ei usalda riiki, arendajaid ega keskkonnauuringute protsessi. <sup>225, 226</sup> Eesti asukohana ei ole investoritele piisavalt atraktiivne. See mõjutab kapitali kättesaadavust ja hinda ja toob kaasa kõrgemad intressid ning ebakindluse investeeringutele.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Metsanduse valdkonna pikaajaliste sihtide seadmine ja puidu kohapealse väärindamise prioritseerimine. Kehtestada stimuleid ja muuta regulatsioone, et soodustada investeeringuid puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise võimekuse kasvatamiseks. Pikaajalised kestvuslepingud riigi poolt müüdava toormega varustamisel, mis tagavad ausa konkurentsi ning on piisavalt paindlikud, et motiveeriks investorit tootmisotsust rahastama. Investeeringute teostamiseks vajalike menetlustoimingute tõhustamine, sh planeeringute koostamise ja menetluse protsesside lihtsustamine. Riigi poolne selge tugi arendustele, sh suurte investeeringute puhul riigiosaluse, kaasinvesteeringute või toetusmeetmete pakkumine. Suurinvesteeringute riiki meelitamiseks kliendihalduri ametikohtade loomine, kes on toeks ametkondadega suhtlemisel. Toetusmeetmed peaksid soosima investeeringuid ning võimaldama lahendada ka energeetika ja keskkonnaküsimused nõ rätseplahendusena.		
<b>2. Metsandusvaldkonna pikaajalise riikliku strateegilise vaate puudumine</b>	<b>Suur</b>	<b>Suur</b>	<b>Suur risk</b>
<i>Selgitus</i>	Puidu pikaajalise kasutamise stabiilsuse garantiiks on riiklikult seatud sihid metsamaa pindala säilitamiseks, metsa kasvatamiseks ja õigeaegselt kasutamiseks. Puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise pikaajaliste investeeringute tegemist raskendab olukord, kus tootmiseks vajaliku toorme osas valitseb ebakindlus, kuna riigil puudub pikaajaline vaade metsandusvaldkonna arendamiseks. <sup>227, 228</sup>		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Riigikogu tasandil kinnitada metsanduse arengukava aastani 2035 ja koostada Metsapoliitika põhialused aastani 2050, mis toetavad metsade kestlikku majandamist, sh puidu kasvatamist ja kasutamist ning kohapealset väärindamist töötlemata puidu ekspordi asemel.		
<b>3. Kapitali / rahastuse kättesaadavus</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Keskmine risk</b>
<i>Selgitus</i>	Puidukeemia nõuab suuri/mahukaid CAPEX-investeeringuid (võrreldav keemiatööstusega), kuid investeeringutasuvus (ROI) saabub aeglaselt. Riskikapital ja pangad on sageli ettevaatlikud uute tehnoloogiate rahastamisel. Piisava finantseerimise tagamine projekti erinevates etappides on hädavajalik tööstuse rajamisel.		

<sup>225</sup> Puidu biorafineerimine: hetkeseis ja väljavaated, Arenguseire Keskus, 2023. [Link](#)

<sup>226</sup> Künnapuu, K. (2019). Biorafineerimistehaste sotsiaalne aktsepteerimine [Eesti Maaülikool].

<sup>227</sup> Uued nutikad töökohad puidukeemias võivad jääda riikliku ebaselguse taha, Maaleht 2023. [Link](#)

<sup>228</sup> Isamaa ei toeta metsanduse arengukava vastuvõtmist praeguses riigikogus. [Link](#)

Risk	Mõju	Tõenäosus	Riski tase
<i>Leevendusmeetmed</i>	Luu riskide jagamise mehhanisme, nt avaliku ja erasektori partnerlus (PPP), uurida rohetehnoloogia garantiifondide, rahvusvaheliste arengupankade (EBRD, EIB, Maailmapank) ja Rohelise Kliimafondi (GCF) kaasamise võimalusi jms. Mõningal määral pakuvad leevendust ka investeringutoetused. Kasutada EL-i innovatsioonitoetusi (nt Innovation Fund, Horizon Europe, EIC Accelerator jt).		
<b>Puiduressursi riskid</b>			
<b>1. Toorainebaasi vähenemine looduskaitsealade laienemise ja keskkonnakaitse piirangute suurenemise tõttu</b>	<b>Suur</b>	<b>Suur</b>	<b>Suur risk</b>
<i>Selgitus</i>	Eesti on maailma <sup>229</sup> ja Euroopa Liidu üks edukam elurikkuse eesmärkide täitja <sup>3</sup> ning EL elurikkuse strateegia üleskutse kaitsta maismaast ja merest 30% <sup>230</sup> on Eestis metsades juba sisuliselt täidetud, st metsamaa pindalast on kaitse all 31,6% . <sup>231</sup> Jätkub kaitsealade laiendamine <sup>232</sup> ning metsamaa pindala vähenemine. Lisaks väheneb majandatava metsamaa pinda raadamise tõttu (taristu, riigi- ja looduskaitse). Istandikes kasvatatav puit võiks olla osa vajalikust toormest puidutööstuses, kuid metsaseaduse rakendamisel on istandikke hakatud arvestama metsa koosseisu alates hetkest kui seal kasvavad puud on jõudnud 8 meetri kõrgusteks. Sellega rakenduvad istandikele ka kõik metsaseaduse kitsendused, sh raievanus, raielangi suurus jt.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Kriitiliselt tuleks riigil üle vaadata kvantitatiivsed looduskaitsealade laiendamise eesmärgid, luua toimiv looduskaitse tulemuslikkuse hindamise süsteem ning rakendada aktiivseid meetmeid liikide ja elupaikade soodsa seisundi tagamiseks. Seada strateegiline (soovitavalt ka juriidiliselt rakenduslik) eesmärk majandatavate metsade osakaalule. Taastada istandike regulatsioon selliselt, mis võimaldaks intensiivmeetodil puude kasvatamist mittemetsamaal. Luua võimalused väheväärtusliku maa kasutamiseks kiirekasvuliste istandike rajamiseks ja täiendavalt uurida uute Eestisse sobivate ja tööstuse tooraineks sobivate puuliikide kasvatamise võimalusi. Sealjuures ei tohiks istandikele seada koguselisi piiranguid mineraalväetiste kasutamisele ja takistada istandike rajamist turvasmuldadele.		
<b>2. Riigimetsa raiemahtude kõikumise tõttu väheneb toorainekindlus</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Suur</b>	<b>Keskmine risk</b>
<i>Selgitus</i>	Riigimetsa majandajatele kehtestab kliimaminister vastavalt metsaseadusele igal aastal arvestuslangi alusel optimaalse uuendusraie pindala. Viimastel aastatel on korduvalt juhtunud, et ministrite poliitilistest eelistustest tulenevalt on tehtud olulisi muudatusi raiete pindalade määramisel <sup>233, 234, 235, 236</sup> . Samas on riigimetsad järjepidevalt majandatud ning metsade vanuseline koosseis võimaldab teha olulisemalt stabiilsemaid majandamisotsuseid.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Riigimetsade kasvatamisel ja kasutamisel hoiduda poliitilistest suunistest ja lähtuda parimatest teadmistest, sh lähtuda Metsa korraldamise juhendis kehtestatud arvestuslangi määramise meetodikast. Muuta metsaseadust ning anda vastutus metsade võimalikult ühtlase kasutamise eest üle riigimetsa majandajale. Pakkuda võimalikele toorme väärindajatele võimalust konkureerida pikaajaliste kestvuslepingutega tagatud puidu kogustele.		

<sup>229</sup> Nature Conservation Index (NCI). [Link](#)

<sup>230</sup> Euroopa Komisjon (2020). Elurikkuse strateegia aastani 2030. [Link](#)

<sup>231</sup> SMI2023, Keskkonnaagentuur, 2025. [Link](#)

<sup>232</sup> Looduskaitse arvudes, Keskkonnaagentuur, 2023. [Link](#)

<sup>233</sup> ERR (13.09.2022). Minister Kallas soovib viia aastase raiemahu alla 10 miljoni tihumeetri. [Link](#)

<sup>234</sup> ERR (24.11.2022). Mõlder vähendas raiemahte RMK ettepanekut ootamata. [Link](#)

<sup>235</sup> ERR (13.09.2022). Kallase raiemahu plaanidega pole rahul ei metsatöösturid ega looduskaitsejad. [Link](#)

<sup>236</sup> Äripäev (24.05.2022). Savisaar tõstis riigimetsa raiemahte. [Link](#)

Risk	Mõju	Tõenäosus	Riski tase
<b>3. Lisanduvad keskkonna- ja kliimanõuded</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Suur</b>	<b>Keskmine risk</b>
<i>Selgitus</i>	Ettevõtete hinnangul on Eesti võetud kohustused (nt kevadsuvine lindude pesitsusrahu, LULUCF) ja keskkonnanõuded (nt heitvee keskkonnanormid) karmimad kui lähiriikides. Selleks, et olla turul konkurentsivõimelised ning võimaldada Eestisse puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise võimekuse tekkimist peavad eesmärgid ja regulatsioonid sarnased lähinaabritega. Euroopa Rohelise leppe raamistikus on mitmeid algatusi ja õiguslikult siduvaid regulatsioone, mis mõjutavad otseselt või kaudselt puidu kui taastuva ressursi kasvatamist ja kasutamist.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Riigi poolt võimalikult varajases faasis teavitada ettevõtjaid ja luua võimalused kiireks ja asjakohaseks EL regulatsioonide ülevõtmiseks. Valida Eesti tingimustele sobivad ja turu nõudlust arvestavalt parimad puidu kestlikku majandamist ja selle päritolu tõendavad sertifikaadid. Osaleda aktiivselt EL otsustusprotsessides ning kaitsta selgelt Eestile sobivate regulatsioonide loomist ja ebasobivate kaotamist. Seatud kohustuste täitmisel arvestada kõiki võimalikke mõjusid ja valida Eestile vähimat võimalikku pikaajalist kahju või suurimat kasu toovad lahendused, mis vähendavad sõltuvust fossiilkütustest, edendavad ressursside tõhusamat kasutamist ja oleks sotsiaalselt õiglane.		
<b>4. Tooraine kättesaadavus ja hooajalisus</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Suur</b>	<b>Keskmine risk</b>
<i>Selgitus</i>	Puidu varumine on hooajaline tegevus, mida tehakse peamiselt talvel külmunud pinnasega või kuivadel aastaegadel. See võimaldab raskete masinate liikumist metsas, samas kui kevadised ja sügisesed sademed muudavad teed raskesti läbitavaks, mõjutades tooraine kättesaadavust puidukeemia tööstusele. Kliimamuutused ja karmistuvad keskkonnanõuded (nt pesitsusrahu) on vähendanud sobivat aega metsa ülestöötamiseks. Hooajaliste piirangute tõttu on oluline varumist ja ladustamist ette planeerida ning investeerida ladustamisinfrastruktuuri ja logistikasse, et tagada pidev toorainearu. Lisaks konkureerib sinne tootmine toorme osas Põhjamaadega, kus suuremad tehased pakuvad toorme eest konkurentsivõimelisemat hinda.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Toorme varumise piirangute ülevaatamine ja leevendamine, kus asjakohane. Riiklikud investeeringud ja investeeringutoetused metsateede ja ajutiste ladustusalade parandamiseks, et vältida toorme transpordiga kaasnevat võimalikku teede lagunemist ja massipiirangute kehtestamist kohalike omavalitsuste poolt. Probleemide leevendamiseks suunata investeeringutoetused metsavarumissettevõtetele kergema tehnika, laiemate roomikute ja rehvide ning muu taolise soetamiseks.		
<b>5. Keskkonnalubadest keeldumine või nende vaidlustamine</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Suur</b>	<b>Keskmine risk</b>
<i>Selgitus</i>	Eestis pidurdavad uue puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärindamise tööstuse rajamist ehituslubade, keskkonnalubade ja muude kooskõlastuste viivitused. Suure mõjuga tootmise puhul on vaja mitmeid riiklikke ja kohalikke planeeringuid ning lube koos mõjude hindamisega, mille koostamine on aja- ja ressursikulukas. Puudulik dokumentatsioon ja pealiskaudsed kaasamisprotsessid tekitavad vastuseisu ühiskonnas. Haldusmenetlused kestavad Eestis liiga kaua, võrreldes näiteks Soome ja Rootsiga, mistõttu olulised investeeringud venivad või jäävad sootuks tegemata. Praegune süsteem, kus menetlused toimuvad ükshaaval, pikendab protsesse oluliselt. Keskkonnaorganisatsioonid ja kogukonnad kaitsevad järjest aktiivsemalt loodusväärtusi, vaidlustades arendusi, mis võivad küll aidata paremini mõista tootmise tegelikku mõju, kuid samas ka seiskada hästi planeeritud ehitusprotsesse.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Hea koostöö riigi, kohaliku omavalitsuse, riigi, kogukonna ja mõjude hindaja. Varajane KMH ja sidusrühmade kaasamine.		

Risk	Mõju	Tõenäosus	Riski tase
	<p>Parimate praktikate väljatöötamine. Märkimisväärset menetlusprotsesside tõhustamist on võimalik saavutada üksnes läbi tõhusa koostöö, projektijuhtimise ning paralleelsete menetluste. Kui võetakse eesmärgiks ühe aasta menetlus kõigi ametkondade poolt, siis toimub ka fookuse nihkumine ebaoluliselt olulisele ning soov usaldada protsessi.<sup>237</sup></p> <p>Läbipaistev kommunikatsioon, kaasamine ja piisavad hüvitusmeetmed.</p> <p>Riiklik selgitus tootmistevõime vajalikkusest võrreldes töötlemata puidu ekspordiga, toetus kommunikatsioonis ja kaasamistegevustes.</p> <p>Lisaks keskkonnamõjudele hinnata ka sotsiaalset mõju kohalikele elanikele (müra, vaade, elukeskkonna muutus, kinnisvara väärtus). Siduda uuringute tulemused otsuste ja leevendusmeetmetega (nt müratõkked, kompensatsioonid).</p>		
<b>6. Konkurentsist tulenev toorainepuudus</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Keskmine risk</b>
<i>Selgitus</i>	<p>Uute puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärdamise tootmisüksuste rajamisel Eestisse tuleb konkureerida olemasolevate paberitööstuste ja kütusetootjatega Läänemere turul. See on oluline, kuna praegu eksporditakse Eestist märkimisväärses koguses paberipuitu, küttepuitu, puiduhaket ja pelletteid Riiklikus KHG inventuuris jätab pelletite eksport reiemahu kaudu meile heite LULUCF arvestuses, samas näitab sihtturgudel energeetikat keskkonnasõbralikumana. Kodumaise puidu väärdamine on kasulik nii Eesti majandusele, selle konkurentsivõimele kui ka kliimaeesmärkide saavutamisele. Puidu keemiline töötlemine loob suuremat lisandväärtust kui investeeringu kulu ning seob samal ajal toodangusse täiendava koguse süsinikku, aidates kaasa keskkonnasäästlikkusele. Eesti energeetikas on puidul kriitiline tähtsus koostootmisjaamades ja võimaliku täiendusena põlevkivile. Energia varustuskindluse seisukohalt on puit strateegilise tähtsusega, ent selle roll võib uute tehnoloogiate ja energiakandjate lisandudes mõnevõrra väheneda.</p>		
<i>Leevendusmeetmed</i>	<p>Võimaldada pikaajaliste tarnelepingute sõlmimine riigimetsast pärinevale toormele.</p> <p>Riigi omanduses olevad ettevõtted, kes konkureerivad samale toormele kui biomassi keemiliselt või mikrobioloogiliselt väärdavad tööstused, kuid pakuvad madalama lisandväärtusega toodet, ei tohiks saada riigi poolt toetusmeetmeid nt biomassist soojusenergia tootmisel.</p>		
<b>7. Kestlikku metsade majandamist ja puidu päritolu tõendavate turupõhiste sertifikaatide paljusust ja EL poolsete nõuete lisandumine</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Keskmine risk</b>
<i>Selgitus</i>	<p>Puidutööstuste arendamisel on oluline arvestada kestliku metsade majandamise ja puidu päritolu sertifikaatidega. EL-i regulatsioonid ja turupõhised süsteemid nagu FSC ja PEFC mõjutavad oluliselt tööstuse toimimist. Need süsteemid tõendavad keskkonnasäästlikku ja sotsiaalselt vastutustundlikku metsamajandamist, avades uusi turge ja parandades toodete konkurentsivõimet, eriti ekspordil. EL-i regulatsioonid, näiteks EUDR (Deforestation-free Products), mis jõustub 2025. aasta detsembris, mõjutavad oluliselt puidutööstust Euroopas. EUDR nõuab tootjatelt läbipaistvat ja jälgitavat toormeahelat, vastasel juhul kaob ligipääs EL-i turule. See võib vähendada tooraine kättesaadavust, kui väikemetsaomanikud nõudeid ei täida. Samas loob määrus võimaluse usaldusväärsema turu loomiseks, kui EUDR-i nõuetele vastavus on hästi korraldatud.</p>		
<i>Leevendusmeetmed</i>	<p>Riigi poolt võimalikult varajases faasis teavitada ettevõtjaid ja luua võimalused kiireks ja asjakohaseks EL regulatsioonide ülevõtmiseks (sh EUDR).</p>		

<sup>237</sup> Investeeringute (uute ettevõtete ja üksuste rajamine) teostamiseks vajalike menetlustoimingute tõhustamise juriidiline analüüs (Sorainen. 2023)

Risk	Mõju	Tõenäosus	Riski tase
	Soosida Eesti tingimustele sobivate ja turu nõudlust arvestavate puidu kestlikku majandamist ja selle päritolu tõendavate sertifikaatide rakendamist. Vältida tuleks täiendavate üleeuroopaliste või riiklike sertifikaatide väljatöötamist, mis suurendaks puidu päritolu tõendamise killustatust veelgi. Osaleda aktiivselt EL otsustusprotsessides ning kaitsta selgelt Eestile sobivate regulatsioonide loomist ja ebasobivate kaotamist.		
<b>8. Väikemetsaomanike majandamishuvi puuduse tõttu väheneb toorainebaas</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Keskmine risk</b>
<i>Selgitus</i>	Eestis on ligikaudu 100 000 metsaomanikku. Metsaomanike passiivsuse põhjusi on mitmeid. Tuleb arvestada, et viimase veerandsaja aasta jooksul on maa uuesti erakätesse läinud ning suur hulk maaomanikke ei ole metsandusküsimustega piisavalt kursis või puudub neil konkreetse metsaga isiklik seos. Samuti on metsaomanike eesmärgid ja väärtushinnangud väga mitmekesised ning ajas muutuvad. <sup>238</sup> Erametsaomanike passiivsus metsakasvatustöödeks ning puidu realiseerimiseks vähendav potentsiaalset toorainevaru.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Metsandusvaldkonda suunavate poliitikate koostamine ja kinnitamine. Erametsaomanike suurt varieeruvust arvestav paindlik poliitika ja ühistulise tegevuse arendamine, nõustamine ja toetamine <sup>239</sup> . Metsaomaniku toetuste saamise sidumine aktiivsete metsakasvatustööde rakendamisega, et suurendada toorainebaasi. Tooraine impordivõimaluste kaardistamine ja koostöövõimaluste vahendamine.		
<b>Tehnoloogiate risk</b>			
<b>Tehnoloogiline keerukus ja skaleeritavus</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Suur</b>	<b>Keskmine risk</b>
<i>Selgitus</i>	Puitmaterjal on looduslikult heterogeenne – erinevad liigid, kasvutingimused, niiskus- ja vaikude sisaldus jpm mõjutavad keemilist koostist. Võimalikult standardse toorme olemasolu on eeliseks puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärdamise tehnoloogiate õnnestumisel. Laboratooriumis toimiv protsess ei pruugi lineaarselt skaleeruda – probleemid ilmnevad just tööstuslikus skaalas (nt soojusülekanne, reaktorite, puhastusprotsesside puhul). Bio- ja keemiatehnika skaleerimine vajab kapitalimahukaid katsetusi. Uute biotoodete turg on alles arenemisjärgus ning sõltub konkurentsist fossiilkütuste derivaatidega. Skaleerimiseks puudub sageli kindel nõudlus, mis pärsib investeeeringuid.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Pidevad investeeringud teadus- ja arendustegevusse on läbimurdetehnoloogiate arendamiseks kriitilise tähtsusega. Kuna AS Metrosert üksi ei suuda katta kõiki piloteerimisvajadusi siis tuleb jätkuvalt toetada ka piloteerimisvõimekuse arendamist ülikoolide ja T&A asutuste juures, kus toimub vastava keemilise ja mikrobioloogilise protsessi väljatöötamine. Riigi poolt toetatud eksperimentaalarendus valmisoleku ja teadlikult valitud teenuste arendamine. Tehnoloogiate testimise ja sertifitseerimise keskkondade loomine, sh vajalik piloteerimistaristu arendamine. <sup>240</sup> Tehnoloogia valik mõjutab oluliselt tootmisprotsesside keerukust ja sõltuvust toormest, nt termokeemilistele ja gaasfermentatsiooni tehnoloogiatele sobib toormeks nii madalakvaliteediline puit, puidujätmed kui ka raidmed, koor jne. Pidevalt arendada õppekavasid ja täiendkoolitusi, sihipäraselt investeerida valdkonna teadus- ja ettevõtluskoostöö arendamisse.		

<sup>238</sup> Põllumäe, P., Lilleleht, A., & Korjus, H. (2016). Institutional barriers in forest owners' cooperation: The case of Estonia. *Forest Policy and Economics*, 65, 9–16.

<https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2016.01.005>

<sup>239</sup> Põllumäe, P., Korjus, H., & Paluots, T. (2014). Management motives of Estonian private forest owners. *Forest Policy and Economics*, 42, 8–14. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2014.02.007>

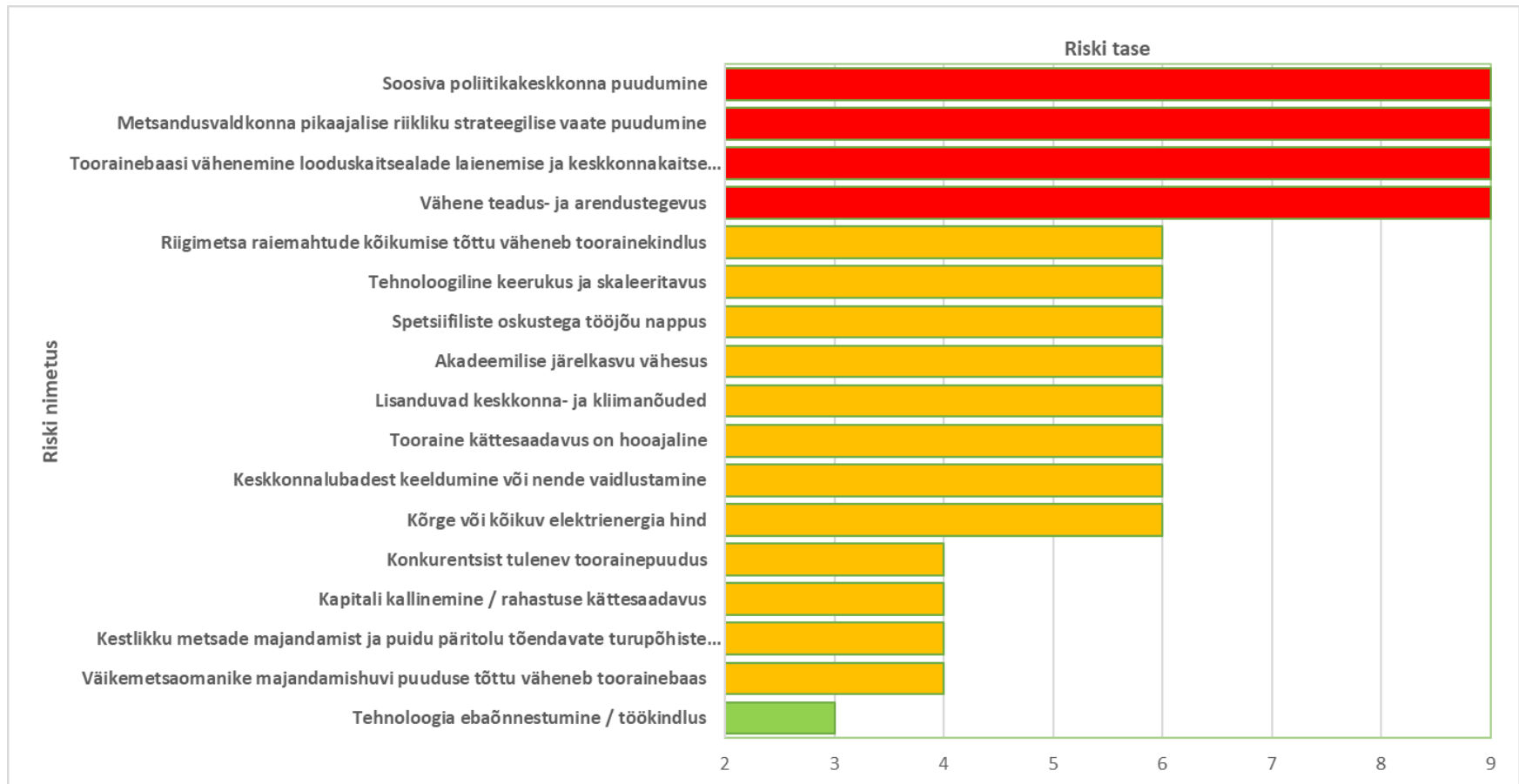
<sup>240</sup> Kohalike ressursside väärdamine, Puit, 2022. [Link](#)

Täiendavate ressursside risk			
Kõrge või kõikuv elektrienergia hind	Keskmine	Suur	Keskmine risk
<i>Selgitus</i>	Kõrged elektri- või soojahinnad mõjutavad oluliselt tehase opereerimiskulusid, nende pidev kõikumine seab ohtu äriplaani realiseerimise. Konkurentsivõime säilitamiseks on energiataristu arendamine kriitilise tähtsusega.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Energiatõhusama tootmise soosimine või toetamine. Suurtööstustele sobilike energialahenduste väljatöötamine, sh <ul style="list-style-type: none"> <li>- kohaliku taastuenergia tootmise rajamiseks, et oma energiatarbe vajadusi katta,</li> <li>- energiaintensiivsete tööstuste toetuskeemide loomine,</li> <li>- võrgutasude erikohtlemine suuremahulistele tööstustele.</li> </ul> CO <sub>2</sub> hinna mõju vähendamine, nt läbi kaudsete kulude hüvitamise.		
Ekspertide olemasolu riskid			
1. Spetsiifiliste oskustega tööjõu nappus	Keskmine	Suur	Keskmine risk
<i>Selgitus</i>	Piisava arvu kvalifitseeritud töötajate (insenerid, operaatorid jne) leidmine ja hoidmine on hädavajalik tööstuse käivitamiseks ja töös hoidmiseks. Uute tehnoloogiate rakendamine, eriti kiire innovatsiooniga puidukeemia ja tööstuslike bioprotsesside arenduste raames, kasvatab vajadust nüüdisaegseid arendusprotsesse juhtivate spetsialistide järele. Arvestades üleilmseid trende ja arengusuundi Euroopas, vajab valdkond lähitulevikus tänapäevaste oskustega puidukeemia spetsialiste, keda Eestis hetkel piisavalt pole. Ekspertide hinnangul kasvab kümne aasta perspektiivis selles valdkonnas vajadus tootmisjuhtide ja -inseneride järele 40%. Paralleelselt tippspetsialistidega vajab tööstus ka märgatavalt rohkem (juhtide/spetsialistide vahekord 1 : 4) tootmiseseadmete tehnikuid ja protsessioperaatoreid. <sup>241</sup>		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Noorte innustamine valdkonnaga tegelema, propageerides erialasid ja luues sihtstipendiume, et koolitada rohkem tööstuslike bioprotsesside opereerimise ning biotehnoloogia inseneeria teadmiste ja oskustega spetsialiste nii kõrg- kui ka kutsehariduse tasemel. Vajaliku oskusteabe tagamine, sh selleks vajalike koostöövormide, -platvormide ja võrgustike arendamine. Puidutööstuse ja teaduse sektoritevahelist koostööd toetavate meetmete rakendamine.		
2. Akadeemilise järelkasvu vähesus	Keskmine	Suur	Keskmine risk
<i>Selgitus</i>	Motiveeritud eesti noorte vähesus kõigil õppeastmetel. Loodusteaduste väheldane populaarsus noorte seas. Aktiivne rohepesu on paljude noorte seas välja kujundanud metsaressursi kasutamist vastustava hoiaku. Valdcondlikud karjäärimudelid ei ole piisavalt motiveerivad, töö on paljuski projektipõhine. Noored ei näe sektorit väga atraktiivse töökohana. Vastuvõtt rahvusvahelistele magistrivõttele on vähenenud eriti arengumaadest pärinevate õppurite võrra, kuna õpe on muutunud neile tasuliseks. Doktorõppes on rahvusvahelise vastuvõtu osakaal suur, aga välistudengid ei pruugi peale lõpetamist Eesti ülikoolides jätkata. Puidusektori vähene ambitsioonikus, innovatsiooni teadlikkus ja innovatiivsus mõjutab ka valdkonna atraktiivsust noorte seas.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Puidu väärimise valdkonna populariseerimine alates põhikoolist kuni bakalaureuseõppe astmeni. Kaotada õppemaks ja tagada erialastipendiumid nii rahvusvahelistele kui ka kodumaistele tudengitele. Puidukeemia valdkonna maine tugevdamine noorte hulgas. Tuleb luua uusi innovatiivseid puidukeemia ja biokeemia ettevõtteid (ka väikeettevõtteid), mis pakuks atraktiivseid, teaduspõhiseid töökohti ning näidata noortele selle kaudu eriala perspektiivi.		

<sup>241</sup> Tilk, R., Kruusmaa, E.-K. (2022). Tulevikuvaade tööjõu- ja oskuste vajadusele: metsandus ja puidutööstus. Tallinn: SA Kutsekoda.

TA võimekuse riskid			
1. Vähene teadus- ja arendustegevus	Suur	Suur	Suur risk
<i>Selgitus</i>	Puidukeemia on Eesti puidutööstuses seni üsna vähearendatud, kuid väga perspektiivikas valdkond <sup>242</sup> . Puidu biomassi komponentide (ligniin, tselluloos, puidusuhkrud) toomise huvi on ettevõtluse poolt olemas, kuid puudub valmisolek investeerida T&A arendustesse, mis käsitleksid nende komponentide jätkuvat väärindamist materjalide ja toodetena. Puidukeemia valdkonna jätkusuutlik areng eeldab mitte ainult puidutehnoloogia spetsialistide koolitamist, vaid ka tugeva baasharidusega keemikute, biotehnoloogide ja materjalitehnoloogide ja materjaliteadlaste olemasolu, kes suudavad arendada ja rakendada kõrgema lisandväärtusega puidupõhiseid materjale ja tooteid. Selline interdistsiplinaarne lähenemine nõuab tihedat koostööd ülikoolide, rakenduskõrgkoolide ja ametikoolide vahel, et tagada tööturu vajadustele vastav spetsialistide ja oskustöölise kvalifikatsioon ning toetada ettevõtete teadus- ja arendustegevust puidukeemia valdkonnas.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	<b>Investeerida teadus- ja arendustegevusse:</b> Toetada jätkuvalt teadusprojekte, mis keskenduvad puidu väärindamise tehnoloogiate arendamisele ja kulude vähendamisele, eriti madalama kvaliteediga lehtpuu ja puidutöötlemisjääkide väärindamisele. Jätkuvalt toetada T&A valdkondi, mis pakuvad võimalusi kohaliku lignotselluloosse ja muu biotoorme väärindamiseks kõrge lisandväärtusega materjalide ja toodetena, nagu kiudmaterjalid, bioplastid, kõrgtehnoloogilised tooted, meditsiinitooted, militaartooted jne. Toetada kõrgema riskiga iduettevõtteid, mis võimaldaksid nimetatud uute lahenduste jõudmist reaalse tootmiseni.		
2. Tehnoloogia ebaõnnestumine /töökindlus	Suur	Madal	Madal risk
<i>Selgitus</i>	Tootmise käivitamisel võib ilmuda tõrkeid ja tagasilööke, mis võivad mõjutada kogukondade, ühiskonna ja riigi hoiakuid tehtava või tehtud investeeringu osas. Uue või keeruka tehnoloogia juurutamisega on seotud riskid, sealhulgas võimalikud tõrked või oodatust madalam tootlikkus. Mida põhjalikumalt on valitud tehnoloogiat katsetatud ja rakendatud, seda väiksem on oht ebaõnnestumiseks.		
<i>Leevendusmeetmed</i>	Kaalutud tehnoloogiad, pilootprojekt, tehniline audit, keskkonnalaod ja mõjude hindamine, rahvusvaheline partnerlus		

<sup>242</sup> ETAG "Teadusuuringud aitavad kaasa kõrge lisandväärtusega puidukeemia arengule Eesti puidusektoris" 07.09.2020 [Link](#)



Joonis 8.2 Riskide tasemete järjestus 3x3 riskimaatriksi põhjal.

## 8.2 KOKKUVÕTE

Riskimaatriks (Joonis 8.2) puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärimise kohta toob esile, et selle valdkonna areng Eestis on tugevalt seotud riiklike strateegiate, poliitilise stabiilsuse ja osapooltevahelise koostööga. Kõige kriitilisemaks riskiks osutus soosiva poliitikeskkonna puudumine, sest see mõjutab otseselt investorite kindlustunnet ja prognoositavust toormeturul. Seda iseloomustab näiteks looduskaitsealade laienemine, riigimetsa raiemahtude kõikumine ja valdkonna selge prioriteedina määratlemine ja sellest tulenev vähene teadus- ja arendustegevus antud valdkonnas.

Olulised on ka tehnoloogilised väljakutsed, sest uute lahenduste skaleeritavus, investeringute kapitalimahukus ja piiratud rahastusvõimalused võivad takistada edasiminekut. Lisaks võivad keskkonnavalased tegurid, nagu naaberriikidest rangemad looduskaitsepiirangud, lubade väljastamise keerukus ja kohalike kogukondade vastuseis, oluliselt mõjutada investeringute realiseerumist.

Riskide maandamiseks on välja pakutud mitmeid leevendusmeetmeid. Nende hulka kuuluvad soosiva poliitilise raamistiku loomine, metsanduse pikaajalise strateegia kinnitamine, investeringutoetused, kohaliku tööjõu koolitamine ning teadus- ja arendustegevuse edendamine. Oluline on kõigi osapoolte – riigi, teadusasutuste, ettevõtjate ja kogukondade – koostöö. Ainult süsteemse ja pikaajalise lähenemisega on võimalik tagada puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärimise valdkonna jätkusuutlik areng Eestis. Mitmed riskid ei esine isoleeritult, vaid võimendavad üksteist:

- ✓ **Poliitiline ebastabiilsus + metsanduslike strateegiliste otsuste puudumine** → vähendab investorite usaldust ning raskendab pikaajaliste toormelepingute sõlmimist.
- ✓ **Teadus- ja arendustegevuse vähesus + tehnoloogia skaleeritavuse kitsaskohad** → vähendab uute lahenduste rakendamise tõenäosust tööstuslikul tasemel.
- ✓ **Tööjõu puudus + vähene akadeemiline järelkasv** → aeglustab tootmise käivitamist ja suurendab välistööjõu sõltuvust.
- ✓ **Tootmise rajamiseks vajalike menetluste kohmakus + lubade vaidlustused + kohaliku kogukonna vastuseis** → võib tekitada mitmeaastaseid viivitusi või isegi katkestada juba loa saanud projekte.

Kriitilise tähtsusega on **ministeeriumite vaheline koordineeritud juhtimine**, eelkõige Kliimaministeeriumi, Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi ning Regionaal- ja Põllumajandusministeeriumi vahel. Otsus, kas ja kuidas puidu väärimise võimekust Eestis arendada, vajab **selget poliitilist kokkulepet**. Valdkonna peamised kitsaskohad – alates strateegilisest selgusest ja toormekindlusest kuni keskkonnapiiirangute ning lubade menetlemiseni – on suuresti koondunud **Kliimaministeeriumi ja selle haldusala pädevusse**. Siinjuures on oluline vältida ministeeriumide tegevuste killustumist ning tagada, et valdkondlike sihtide vahel ei tekiks vasturääkivusi.

Et puidu keemilise ja mikrobioloogilise väärimise areng toetaks samaaegselt Eesti **majanduse konkurentsivõimet, kliimaeesmärkide saavutamist** ning **sotsiaalset heaolu**, on vaja Vabariigi Valitsuse tasandil:

- ✓ teadvustada strateegilised kitsaskohad,
- ✓ määratleda konkreetsete tegevuste elluviimise eest vastutavad institutsioonid ja tähtajad,
- ✓ tagada koordineeritus kogu valitsemistasandil.

Ainult **süsteemne, koordineeritud ja pikaajaline lähenemine** loob eeldused, et Eestis saab areneda kõrge lisandväärtusega ja keskkonnahoidlik puidu väärimise tööstus.

## 8.3 STRATEEGILISED VÕIMALUSED EDASILIIKUMISEKS

**Analüüsis toodud väljakutsete lahendamiseks ja potentsiaali realiseerimiseks on võimalik edasi liikuda kolme paralleelse ja üksteist samaaegselt täiendava suunaga. Antud suunad on toodud näitena, mida ei ole analüüsitud stsenaariumidena.**

### **Suund 1: Olemasoleva tööstuse moderniseerimine ja nišitootmise arendamine**

- ✓ **Loogika:** See suund kasutab ära olemasolevat tööstuslikku baasi ja kompetentse, pakkudes madalama riski ja kiiremate tulemustega arenguteed. Kasutamata jääb oluline kogus metsast varutavast toormest, mis eksporditakse endiselt väärindamata kujul teistesse riikidesse. Lisandväärtus 1t puidu kohta ca 300-500 €.
- ✓ **Tegevused:** Keskenduda olemasolevate tehaste (nt Horizon, Estonian Cell) energiatõhususe parandamisele ja kõrvalsaaduste paremale väärindamisele ning toetada väiksemaid, spetsiifilisele toormele (nt tööstusjäätgid) keskenduvald pilootprojekte. Senise toorme kasutuse mahtu ca 450 000 m<sup>3</sup>/a saaks suurendada, kuid täpsed mahud sõltuvad konkreetsete ettevõtete valmisolekust ja võimalustest. Estonian Cell saab kaasata teise generatsiooni tehnoloogiad, kaasneks suhkrute tootmine. Okaspuitu kasutatav Horizon saaks paberi tootmismahutu suurendada, kasutades ära suurema osa eksporditavast okaspuidust. Paberi kohalik tootmine loob kordades rohkem töökohti, millel on tähtis sotsiaalmajanduslik mõju. Teise ja kolmanda põlvkonna tehnoloogiad kasutatavate arenduste tulek ei ole kuidagi takistatud.

### **Suund 2: Detsentraliseeritud biorafineerimistehaste (võrgustiku) rajamine**

- ✓ **Loogika:** See suund kasutab optimaalselt ära Eesti kõige levinumat väheväärtustatud ressursi – lehtpuud ning sae- ja vineeritööstusest pärinevaid jäätmeid. Hajutatud lähenemine vähendab logistikakulusid, leevendab sotsiaalset vastuseisu ja elvdab regionaalset majandust. Lisandväärtus 1t puidu kohta ca 500-3000 €. Kõik hetkel töötavad haava puidul või okaspuidul põhinevad tööstused saaksid tootmismahutu kasvatada, kuna ressursis konkurentsi pole. Selle suuna puhul on võimalik perspektiivis väärindada samuti praegu kütteks kasutatavaid puuliike nagu hall ja must lepp.
- ✓ **Tegevused:** Rajada mitu keskmise suurusega (sisendvõimsus 50 000–500 000 m<sup>3</sup>/a) tehast, mis võivad olla piirkonniti integreeritud saeveskitega ja mille väljundiks oleks kas puidust eraldatud komponendid (suhkrud, mikrokristalliline tselluloos ja ligniin) ja/või puidust toodetavad platvormkemikaalid. See omakorda loob aluse Eestis oma tehnoloogiate arendamiseks, eraldiseisvate või integreeritud jätkutootmise ettevõtete loomiseks, mis tegelevad lõpptoodete nt biokemikaalide või materjalide tootmisega. Võimalus luua tsentraalne suhkrute fermentatsioonil põhinev keemia-, ja kütusetööstus (jätkusuutlikusse tagab kriitiline maht), mis kaasaks ressursse nii metsa kui ka põllumajanduse sektorist.

### **Suund 3: Kontsentreeritud suuremahulise integreeritud kraft?- biorafineerimiskompleksi rajamine**

- ✓ **Loogika:** See suund loob suurima võimaliku eksporditava pooltoodete potentsiaali, lahendades korraga suure osa Eesti väheväärtusliku puidu ekspordi probleemist ja kujunedes Eesti majanduse strateegiliseks lipulaevaprojektiks. Lisandväärtus 1t puidu kohta ca 300-500 €. Sellega või kaasnedes konkureerivate tselluloosi ja paberi tootmise lõpetamine, mis kogu summas vähendab töökohtade arvu. Samuti võib see pärssida kõrgema väärtusega produktide ja suurema tööliste hõivatusega järgmiste generatsiooni tööstuste loomist.

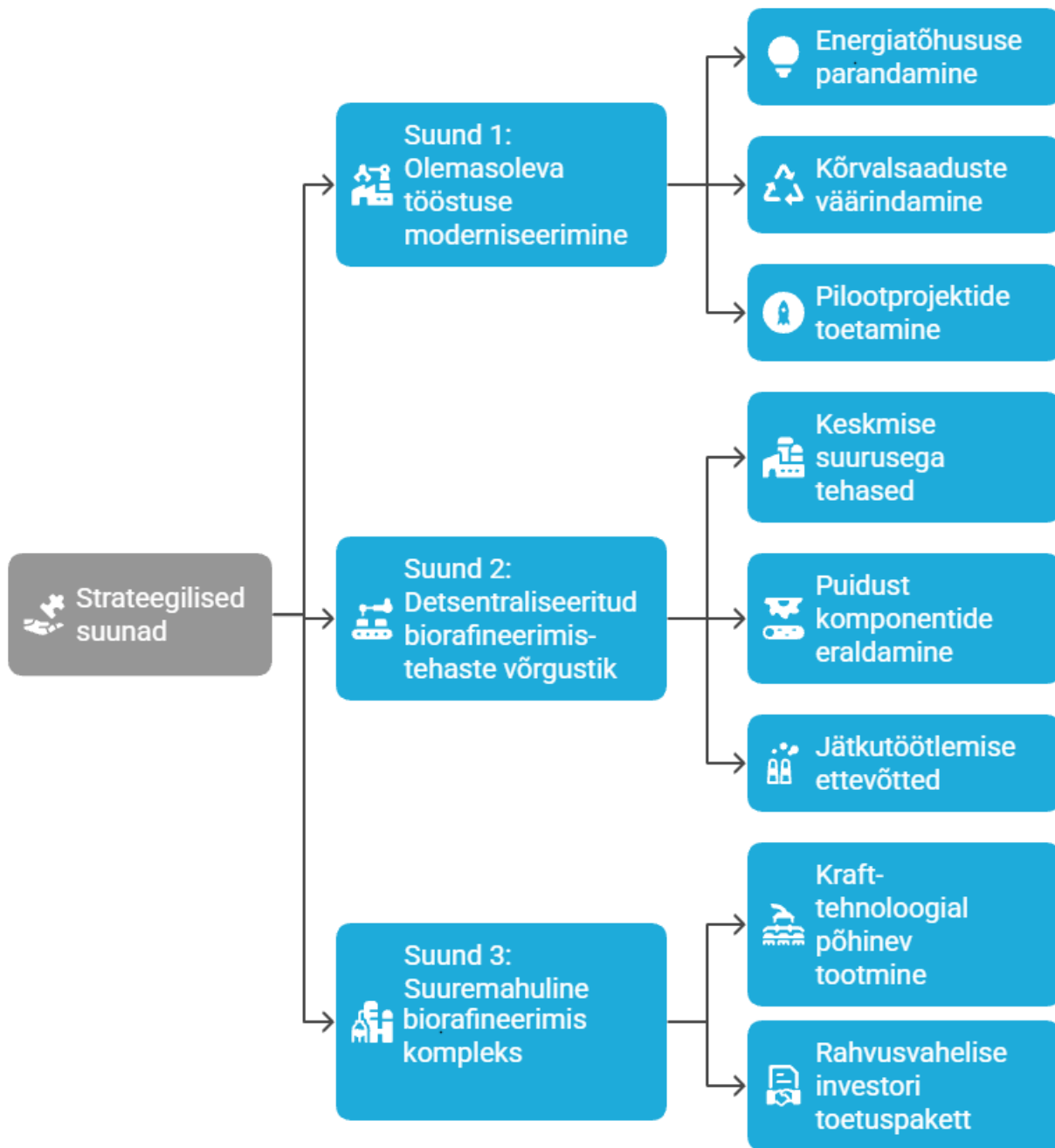
- ✓ **Tegevused:** Rajada 1 Kraft-tehnoloogial põhinev tootmine, mis kasutab toormeks 2-3 mln m<sup>3</sup>/a kohapealset okaspuu biomassi, pluss imporditud tooret. Selleks luua rahvusvahelisele investorile suunatud "rätsepalahendusega" investeerimispakett, mis hõlmab pikaajalisi toormelepinguid ja lahendatud energiavarustuse küsimust.

**Kõikide stsenaariumide korral on Eestis ruumi mitme gasifitseerimisel põhineva tootmise jaoks**

(Joonis 8.3), kuna selle toormeks on metsa ja puidutööstuse jäätmed ning põllumajandusjäätmed.

Gasifitseerimise üheks võimekuseks on ka selle lihtne ümber orienteeritavus kemikaalide tootmiselt juhitava elektrienergia tootmisele, mis oleks kasulik energiapuuduse seisukohast.

Kolmanda põlvkonna tehnoloogiate arendamine Eestis ei sõltu niivõrd stsenaariumitest kui ligniinile või hemitselluloosile orienteeritud hübriidpuupõldude tekkest (sisendvõimsus 100–100 000 m<sup>3</sup>/a, lisandväärtus 3 000-100 000 €/t). Esimese ja teise suundade rakendamise eelduseks on teadus- ja arendustegevuse täiendav rahastamine ja võimekuse kasvatamine, seda eriti teise ja kolmanda generatsiooni tootmise arendamiseks. Kolmanda suunda realiseerimisel peab riik arvestama sektori teadusarenduspotentsiaali languse ja spetsialiseerimise nõrgenemisega. Samuti on kõikide arengusuundade realiseerumiseks oluline riiklik tugi nii investeerimisotsuste kui selle elluviimise riigiga seotud etappides.



Joonis 8.3. Eesti bioressursside väärimise strateegilised suunad

## LISA 4.1. FERMENTATSIOON

### SISSEJUHATUS FERMENTATSIOONI

Tööstusliku fermentatsiooni all mõistetakse suhkru konverteerimist meile huvipakkuvateks ühenditeks mikroorganismide abil. Tänapäevased bioinseneeria tehnoloogiad võimaldavad välja arendada uudseid mikroorganisme, mis suudavad toota põhimõtteliselt kõike, alustades ravimitest (insuliin, artemisiniin jt), mahukemikaalidest (laktaat, etanool, suksinaat), ensüümidest (toidu tootmine, detergendid), biopõhistest materjalidest, toidu komponentidest (rasvad, valgud) ja kütustest (terpeenid). Kui traditsiooniline biomajandus konkureerib suhkrute saamisel toidutööstusega siis ringmajanduse põhimõttel on võimalik puidu-, põllumajanduse- ja toidujäätmetest toota suhkruid (ja ligniini), mis ei ole inimesele toiduks sobilikud, kuid on suurepäraseks substraadiks mikroorganismidele. Puit koosneb tselluloosist, hemitselluloosidest ja ligniinist, mille hüdrolyüsisel saadakse kahte sorti suhkruid: hemitselluloosist peamiselt viie süsinikuga (C5) suhkrud nagu ksüloos ja arabiinool ning tselluloosist kuue süsinikuga (C6) suhkrud nagu glükoos ja fruktoos. Fermenteeriva organismi valikul on oluline teada, milliseid suhkruid organism tarbib ning samuti tuleb valida sobivad tüved, mis taluvad olemasolevaid toksilisi ühendeid (atsetaat, furfuraal, fenoolsed ühendid).

Puidusuhkrute eelised ja nõrkused traditsiooniliste põllumajanduses toodetud suhkrute ees

### EELISED

- ✓ Tooraine kasvatamine ei konkureeri toidutööstusega, mis tähendab väiksemat konkurentsi põllumaale ning madalamat kemikaali- ja väetisekulu. Kemikaalide tootmine toidusuhkrust on eetilise seisukohast küsitav. Toore võib olla traditsioonilise puidutööstuse kõrvalsaadus.
- ✓ Väiksem keskkonna jalajälg tootmises tänu vähemale põllumaa ja veevajadusele.
- ✓ Olukorras, kus Eestis toidusuhkrute tootmine praktiliselt puudub, varustavad puidusuhkrud protsessi kohaliku toorainega, võimaldades lühemaid tarneahelaid ja väiksemat sõltuvust kolmandatest osapooltest. Lignitselluloossete suhkrute hind on võrreldav toidu sahharoosi omaga.<sup>243</sup>
- ✓ Ringmajanduse põhimõtte rakendamine ja väheväärtuslikule biomassile lisandväärtuse loomine.

### NÕRKUSED

- ✓ Puidusuhkrute tootmine on tehnoloogiliselt keerukam võrreldes põllumajanduslikult toodetutega. Seega ka tootmiseks vajalik töötlus ja seadmeпарк on tarneahelad keerulisemad.
- ✓ Puidusuhkrud sisaldavad enamasti ka muid komponente, mis võivad olla mikroorganismidele mürgised, mõjutades läbi selle fermentatsiooni läbiviimist. Näiteks ligniini lagunemisel tekivad erinevad fenoolsed ühendid, suhkrutest võivad eeltöötuse käigus tekkida furfuraal, 6-hüdroksümetüürfurfural ja äädikhape<sup>244</sup>. Puitmassi lagundamise käigus lisatud happed ja alused tõstavad suhkrutes oleva soola sisaldust. Eelnevalt väljatoodud komponendid on mikroorganismidele tihtipeale toksilised ning seavad piirid fermentatsiooni tõhususele (kui suure hulga suhkrutest suudavad mikroorganismid kasulikuks tooteks muuta) ning tiitritele (kui palju suhkrut saame protsessi panna, et saada võimalikult suur lõppkontsentratsioon). Sellest võib tuleneda vajadus suhkrute kvaliteedi tõstmiseks läbi nende puhastamise või mikroorganismide omaduste parandamise sellisele tasemele, et need suudaksid toksiliste ainete toime tulla.

<sup>243</sup> Kuo, P.-C., Yu, J. (2020). Process simulation and techno-economic analysis for production of industrial sugars from lignocellulosic biomass. - *Industrial Crops and Products*, Vol 155. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112783>

- ✓ Konkurentsivõimelise hinna pakkumine sõltub rakendatavast protsessist ja mahust. Protsessi tõhustamiseks on vaja mikroorganisme “treenida” protsessi tingimustega paremini toime tulema, mida võib teha nii läbi suunatud evolutsiooni kui ka geneetilise muundamise tehnoloogiate abil. Selleks, et panna mikroorganisme tootma ühendeid, mida nad naturaalses olekus ei tooda (ensüümid, pigmendid jpm), on nende geneetiline muundamine vältimatu. Euroopa Liidus on geneetiliselt muundatud mikroorganismide kasutamine ja turule viimine rangelt reguleeritud, nõudes eelnevalt põhjalikke riskihindamisi ja lubade taotlemisi.
- ✓ Toote välja puhastamine on sageli keeruline ja nõuab tehnoloogiate ning kemikaalide kasutamist, panustades keskkonnamõju suurendamisesse.

## FERMENTATSIOONIL PÕHINEV TEHNOLOOGIA

Allpool toome näite ühe paljudest tehnoloogiatest laktaadi ja polülaktaadi näol, mis on jõudnud tööstuslikule skaalale ehk TRL tasemele 9.

Laktaadi ehk piimhappe näol on tegemist ühe maailmas enim kasutatud toormaterjaliga, millest sünteesitakse mitmesuguseid materjale. Kõige enam kasutust leiab see polümeriseerimise tulemusel polülaktaadi ehk PLA kujul. PLA on piimhappe termoplastiline polüester, mida kasutatakse laialdaselt pakkematerjalides, isolatsioonivahtudes ja tekstiili valmistamiseks. Tegemist on bioplastikuga, mida hetkel toodetakse tärklistest või suhkrutest, kuid sama protsessi on võimalik rakendada ka teise generatsiooni suhkrutele.<sup>244</sup> Globaalne plasti tootmine kasvas 2023. aastaks 413.8 miljoni tonnini<sup>245</sup>, sealhulgas bioplastikute tootmist hinnatakse 2025. aastal 2.8 miljoni tonni.<sup>246</sup>

Piimhappe tootmiseks kasutatakse mitmeid baktereid, filamentseid seeni ja isegi pärme, mis annavad piimhappe saagiseks 30-221 g/l ning omavad tootlikkust 0.38-7.5 g/L\*h. Lignutselluloosel biomassil kasvatades on saadud *Bacillus* tüvede ja *Lactobacillus paracasei* abil saagiseid vastavalt 180 ja 215 g/l. Seejuures redutseerivate suhkrute konversioon piimhappeks on isegi kuni 0.96 g/g redutseerivate suhkrute kohta. On näidatud, et olemaks majanduslikult efektiivne, peaks piimhappe saagis olema vähemalt 180 g/l ja konversiooni määr üle 95%.<sup>244</sup>

Piimhappe tootmise üheks suurimaks väljakutseks on piimhappe välja puhastamine, mis panustab kuni 50% toote lõpphinda, samuti protsessi käigus märkimisväärses koguses kattsiumsulfaadi teke.<sup>244</sup>

## TULEVIKU PERSPEKTIIV JA SOOVITUSED

Eestis on arvestatav hulk kohalikku toorainet, millest on fermentatsiooni abil võimalik luua suurt lisandväärtust. Tänu meie headele teadmistele loodusteaduste vallas, on Eestil suur potentsiaal korrata IT sektori edulugu.<sup>247</sup> Selleks, et Eesti sellest kiiresti liikuvast rongist maja ei jääks, on oluline, et nii Eesti metsapoliitika, teadus-arendustegevuse, innovatsiooni ja ettevõtluse poliitika toetaksid terviklikult tooraine, teadmiste ja finantside vahelist koostööd. Valdkonna toetuste määramisel ei tohiks eelistada kindlat tehnoloogiat, vaid tuleks tugineda konkreetsete lahenduste energia- ja süsinikusäästlikkusele, protsessi keskkonnamõtjudele ning leidma tehnoloogiad võimalikult suure hulga kohaliku toorme väärdamiseks või taaskasutamiseks. Seejuures tuleks arvesse võtta, et enamus biorafineerimise protsesse on võimalik jagada biomassi töötlemiseks (madalama väärtusega eelproduktiks, näiteks puidumass suhkruteks ja ligniiniks) ning eelproduktide edasiseks väärdamiseks (näiteks puidusuhkrute

<sup>244</sup> Huang, S., Xue, Y., Wang, L., Zhou, C., Ma, Y. (2021). A Review of the Recent Developments in the Bioproduction of Polylactic Acid and Its Precursors Optically Pure Lactic Acids. - *Molecules* 26(21):6446. <https://doi.org/10.3390/molecules26216446>

<sup>245</sup> Statista. Annual Production of Plastics Worldwide from 1950 - 2023. [Link](#)

<sup>246</sup> European Bioplastics. Market update 2020: Bioplastics continue to become mainstream as the global bioplastics market is set to grow by 36 percent over the next 5 years. [Link](#)

<sup>247</sup> Schiermeier. (2019). How Estonia blazed a trail in science. - *Nature* 565, 416-418. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00209-7>

fermenteerimisel valkudeks). Toetusskeemid peaksid arvestama sellise dünaamikaga, sest tihti ei ole üksik ettevõtte võimeline kogu väärtusahelat toormest lõpp-tooteni üles ehitama. Biovaldkonna arengut toetav rahastus peaks jagunema nii innovatsiooni kui rakenduste toetamisele, et tagada kohalike innovaatiliste ideede teke ja elluviimine. Et suurendada nõudlust bio-põhiste kemikaalide vastu, tuleks toetuste määramisel arvestada ka ettevõtete toetamisega biopõhiste materjalide lõimimiseks oma toodetesse, sest uue koostisega toote stabiilsuse ning funktsionaalsuste testimised võivad olla kulukad.

## LISA 4.2. PRODUKTID C5 JA C6 SUHKRUTEST

Tabelis allpool on toodud näited C5 ja C6 suhkrutest fermentatsiooni teel toodetavatest produktidest.

Lisa 4.2. Tabel 1 Produktid C5 ja C6 suhkrutest

Substraat	Produkt	TRL	Tootja
C6 suhkrud	1,3-propaandiool (plastik, tekstiil jt)	9	DuPont
C6 suhkrud	1,4-butaandiool (BDO)	9	Genomatica
C6 suhkrud	3-hüdroksüpropioonhape (biopolümeerid)	7	Cargill + Novozymes (QIRA projekt), BASF ja Genomatica
C5-C6 suhkrud	Adipiinhape	5	
C6 suhkrud	Akrüülhape	5	
C6 suhkrud	Artemisiniin (ravim)	9	Amyris, Sanofi
C5-C6 suhkrud	Atsetoiin (lõhna- ja maitsetugevdaja)	9	BASF, Evonik
C6 suhkrud	Beeta-laktaam (antibiootik)	9	GSK, Sandoz, Pfizer
C6 suhkrud	Butüleenglükool (kosmeetika, määrdeaine)	9	Genomatica, Godavari Biorefineries
C6 suhkrud	Cephalexin (antibiootik)	9	DSM
C6 suhkrud	Ensüümid (katalüsaatorid, ...)	9	Novozyme, MetGen
C6 suhkrud	Ensüümid (ravimid)	9	Icosagen
C6 suhkrud	Etaanool (biokütus)	9	
C5-C6 suhkrud	Etaanool (biokütus)	9	DSM
C5-C6 suhkrud	Farneseen (määrdeained jt)	9	Amyris
C6 suhkrud	Feromoonid (pestitsiidid)	9	BioPhero, Provivi
C6 suhkrud	Gamma-aminobutüürhape (GABA) (toit, ravimid)	8	CJ CheiUedang, Amino GmbH
C6 suhkrud	Hüaluroonhape (kosmeetika)	9	Contipro, Bloomage Biotech, HTL Biotechnology
C6 suhkrud	Insuliin (ravim)	9	Novo Nordisk
C6 suhkrud	Isobutanool (biokütus)	9	Gevo
C5-C6 suhkrud	Itakoonhape (plastid, herbitsiidid jt)	9	DSM, Itaconix
C5-C6 suhkrud	Ksülitool (magusaine)	9	Danisco Sweeteners GmbH
C5 suhkrud	Ksülitool (magusaine)	6	Danisco, Roquette Freres, Cargill
C5-C6 suhkrud	Laktaat (plastik, ravimid, kosmeetika, toit jt)	9	NatureWorks
C6 suhkrud	L-fenüülalaniin (aminohape)	9	Ajinomoto, CJ Bio
C6 suhkrud	L-trüptofaan (aminohape)	9	Ajinomoto, Evonik, CJ Bio
C6 suhkrud	Nailon (tekstiil)	9	Aquafil
C6 suhkrud	opioiidid (ravimid)	8	Antheia
C6 suhkrud	Polü-3-hüdroksübutüraat (bioplastik)	8	Danimer Scientific, Bluepha, CJ Biomaterials
C6 + nikotiinhape	Püripüropeen A (insektitsiid)	9	BASF

<b>C6 suhkrud</b>	Resveratrol (toidulisand)	9	Evolva
<b>C6 suhkrud</b>	Sitagliptiin (Diabeedi ravim)	9	Codexis, Merck
<b>C6 suhkrud</b>	Sorbitool (plastik)	9	
<b>C6 suhkrud</b>	Stevioolglükosiidid (magusaine)	9	Evolva, Cargill
<b>C6 suhkrud</b>	Suktsinaat (plastik)	9	DSM, Myriant
<b>C6 suhkrud</b>	Tsitraat (plastik)	9	
<b>C6 suhkrud</b>	Valentseen, nootkatoon (toidulisand)	9	Allylix, Isobionics
<b>C6 suhkrud</b>	Vaniliin (lõhna- ja maitseaine)	9	Evolva, IFF

## LISA 5.1 KOLME GENERATSIOONI TEHNOLOOGIATE DETAILNE KAARDISTAMINE

Lisa 5.1. Tabel 1 Esimene generatsioon (TRL 9) (tselluloosi ja puitmassi tootmine).

Tehnoloogia nimetus TRL	Lühikirjeldus	Toore*	Peamised produktid	Saagis (%) <sup>2</sup>	Kõrvalsaadused, (%)	Eelised	Puudused	Tehnoloogia pakkujate ja kasutajate näited erinevates riikides
<b>Sulfaatkeet (kraft)</b> <sup>248, 249</sup> <b>TRL 9</b>	Keedukemikaalid NaOH ja Na <sub>2</sub> S, ligniin lagundatakse ja lahustatakse; eraldatakse tselluloosikiud.	Kuusk Mänd Kask Haab	Pleegitatud ja pleegitamata krafttselluloos  Lahustuv tselluloos, kask (vajalik happeline eeltöötlus)	Okaspuit, 45-55; Lehtpuit, 40-50  30-35 <sup>250</sup>	Tallõli/tärpentiin, 1-2% kraft ligniin (kui energiaks vajaminev on tagatud, siis 5-20% lingist saab mustast leelisest sadestada) <sup>248</sup>	Toodab tugevat ja vastupidavat tselluloosi Võimaldab kemikaalide taaskasutamist, Suurte mahtude puhul jääenergia tootmine	Kõrge kemikaalikasutus Suur toorme vajadus Keskkonna-probleemid	<b>Soome</b> Metsä Group <a href="#">Link</a> Valmet Forward <a href="#">Link</a> <b>Eesti</b> Horizon Pulp&Paper <a href="#">Link</a> <b>Rootsi</b> Södra Cell Mörrum <a href="#">Link</a> <b>Austria</b> Andritz Group <a href="#">Link</a>
<b>Sulfitkeet (happeline, neutraalne, aluseline)</b> <b>TRL 7-9</b>	Keeduhape: SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , ja (Ca, Na, NH <sub>4</sub> või Mg)-bisulfiti vesilahus, ligniin sulfoneeritakse, lagundatakse ja lahustatakse; eraldatakse tselluloosikiud	Kuusk Kask Haab  Mänd ei sobi	Pleegitatud ja pleegitamata sulfittselluloos  Lahustuv tselluloos,	40-50  35 <sup>250</sup>	Lignosulfonaat bioetanool	Toodab kvaliteetset, pleegitavat paberimassi Ligniin on protsessist lihtsamalt	Madalam tselluloosi tugevus kui kraftil Kõrged kulud ja keskkonna-probleemid	<b>Norra</b> Borregaard <a href="#">Link</a> <b>Rootsi</b> Domsjö Fabriker <a href="#">Link</a> <b>USA</b>

<sup>248</sup> L. Dessbesell, M. Paleologou, M. Leitch, R. Pulkki, and C. (Charles) Xu, "Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 123, p. 109768, May 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109768>

<sup>249</sup> D. D. S. Argyropoulos et al., "Kraft Lignin: A Valuable, Sustainable Resource, Opportunities and Challenges", <https://doi.org/10.1002/cssc.202300492>

<sup>250</sup> H. Kumar and L. P. Christopher, "Recent trends and developments in dissolving pulp production and application," Cellulose, vol. 24, no. 6, pp. 2347-2365, Jun. 2017, <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1285-y>

Tehnoloogia nimetus TRL	Lühikirjeldus	Toore*	Peamised produktid	Saagis (%) <sup>2</sup>	Kõrvalsaadused, (%)	Eelised	Puudused	Tehnoloogia pakkujate ja kasutajate näited erinevates riikides
			Mikrokristalliline-, nanotselluloos			eraldatav ja kasutatav erinevates rakendustes	seoses väävliühenditega	RYAM <a href="#">Link</a> LAV Sappi <a href="#">Link</a> Austria Lenzing AG <a href="#">Link</a>
<b>Sooda- protsess TRL 9</b>	Keedukemikaal: NaOH + lisandid, ligniin lahustatakse, eraldatakse tselluloosikiud 5-10% paberist turul on kiudtaimede soodatselluloosist	Peamiselt kiudkul-tuurid, mõned okaspuud	Paberi tselluloos	45-50		Mõnel juhul väiksem keskkonnamõju Vähem väävli kõrvalsaadusi	Madalam tselluloosi tugevus võrreldes krahti ja sulfiti protsessiga. Vähem tõhusad lehtpuude puhul	
<b>Pool- tselluloos protsessid TRL 9</b>	Enimkasutatav neutraalsulfitmeetod (NSSC), põhiline keedukemikaal on Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Lehtpuud	Lainepapi puitmass	60-80				<b>Soome</b> Mondi <a href="#">Link</a> Valmet Forward <a href="#">Link</a>
<b>Keemilis- termo- mehaaniline puitmass CTMP, BCTMP TRL 9</b>	Kombineeritakse keemiline töötlemine (aur, kemikaalid) mehaanilise rafineerimisega, et parandada kiudude kvaliteeti	Lehtpuud	Erinevad rafineeritudmehaanilised puitmassid. Lainepappi ja trükipaberi puitmass	70-80		Kvaliteetne trükipaberi puitmass	Suur energia vajadus	<b>Eesti</b> AS Estonian Cell <a href="#">Link</a> <b>Soome</b> Metsä <a href="#">Link</a> Valmet Forward <a href="#">Link</a> <b>Austria</b> ANDRITZ <a href="#">Link</a>

\* Eestis tööstuslikus mahus kasvavad liigid

Lisa 5.1. Tabel 2 Teine generatsioon (TRL 6-8) (kombineerides erinevaid tehnoloogiaid on eesmärgiks kogu biomassi väärimine)

Tehnoloogia nimetus TRL	Lühikirjeldus	Toore*	Peamised produktid	Saagis (%) <sup>249</sup>	Kõrvalsaadused, (%)	Eelised	Puudused	Tehnoloogia pakkujate ja kasutajate näited erinevates riikides
<b>Organosolv-protsess</b> <sup>251, 252, 253</sup> <b>TRL 7-8</b>	Orgaanilised lahustid, (etanol, metanol, atsetoon, sipelghape, äädikhape jm.), koos happe või leelisega eraldatakse ligniin ja osa hemitselluloosist, järgneb happeline, ensümaatilise töötlus tselluloosi eraldamiseks	Leht- ja okaspuud	Kvaliteetne pleegitatud tselluloos Lahustuv tselluloos  Kõrge puhtusega organosolvligniin, Hemitselluloos	45-50  10-15 10-20 Kokku: 60-90	Puidu ekstraktiivained ~2 % Ksüloos biokemikaalid	Keskkonnasõbralik, vähem keemilisi jäätmeid Toodab kvaliteetset paberimassi, efektiivne biomassi fraktsioneerimine, vähendab ensüümide hulka, Saab kasutada erinevaaid puiduliike	Kõrge energiakulu Kõrged lahusti taaskasutuskulu Mõnede rakenduste puhul piiratud skaleeritavus Seadmete korrosiooni oht	<b>Holland</b> Vertoro <a href="#">Link</a> TNO innovation for life <a href="#">Link</a> <b>Prantsusmaa</b> CIMV <a href="#">Link</a> <b>Soome</b> Chempolis <a href="#">Link</a>
<b>Auru-plahvatus (defibrilleerimine)</b> <b>TRL 5-8</b>	Mehaaniline meetod, mille puhul puit pannakse enne rõhu väljalaskmist kõrge temperatuuriga auru alla, mis põhjustab kiudude eraldumise. Koos happe või ensümaatilise töötlusega	Leht- ja okaspuu, Põllumajandusajandusjäätised, kiudkultuurid	Mehhaniline puidumass, sisaldades tselluloosi, ligniini ja hemitselluloosi C5 suhkruid	80-90		Energiatõhusus Keskkonnasõbralik, vähem kemikaale, Ensümaatilise töötlus tõhusam, Suur tselluloosi saagikus, efektiivne biomassi fraktsioneerimine	Tselluloosi kvaliteet võib olla ebaühtlane - madalam tselloosi tugevus võrreldes keemiliste protsessidega, inhibiitorite teke, petsiaalsete	<b>Itaalia</b> Versalis S.p.A. <a href="#">Link</a> ENEA <a href="#">Link</a> <b>Hispaania</b> CLaMber <a href="#">Link</a> <b>Eesti</b>

<sup>251</sup> G. Tofani, E. Jasiukaitytė-Grojzdek, M. Grilc, B. Likozar. "Organosolv biorefinery: resource-based process optimisation, pilot technology scale-up and economics," Green Chemistry, vol. 26, no. 1, pp. 186–201, Jan. 2024, <https://doi.org/10.1039/D3GC03274D>

<sup>252</sup> S. C. Rabelo, P. Y. S. Nakasu, E. Scopel, M. F. Araújo, L. H. Cardoso a e, A. C. Costa. "Organosolv pretreatment for biorefineries: Current status, perspectives, and challenges

". Bioresource Technology. Volume 369, February 2023, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128331>

<sup>253</sup> A. T. Smit, M. Hoek, P. A. Bonouvrie, A. Zomer, Luke, A. Riddell, P. C. A. Bruijninx. "Semicontinuous Aqueous Acetone Organosolv Fractionation of Lignocellulosic Biomass: Improved Biorefinery Processing and Output", ACS Sustainable Chemistry & Engineering Vol 12/Issue 11, march 2024, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c00303>

Tehnoloogia nimetus TRL	Lühikirjeldus	Toore*	Peamised produktid	Saagis (%) <sup>249</sup>	Kõrvalsaadused, (%)	Eelised	Puudused	Tehnoloogia pakkujate ja kasutajate näited erinevates riikides
	saab eraldada põhikomponendid						seadmete vajadus	Fibenol <a href="#">Link</a>
<b>Hüdrotermiline puidumassistamine (LHW) TRL 7-9</b>	Kõrgtemperatuurse vee (150–230 °C) ja rõhuga hüdrolyüsitakse hemitselluloosi, ligniini osaline eemaldamine tahkest biomassist, tselluloosi kiudude eraldamine. Tselluloosi keemiline või ensümaatilise töötus	Leht-puit, põllu-majandus-jäägid, kiudkul-tuurid	Tselluloosimass Hemitselluloosi oligomeerid ja monosahhariidid (C5 suhkrud) Ligniin	40-55  10-20  10-15  Kokku: 60-80	Tööstuslikud suhkrud	Keskonna-sõbralik, efektiivne hemi-ja tselluloosi töötuseks ka ensümaatilisel,	Kõrge energia vajadus ja keerukad seadmed, ei sobi kõrge ligniini sisaldusega tooremele, tingimused pole universaalsed igale toormele	<b>Saksamaa</b> UPM Biochemicals <a href="#">Link</a>
<b>Lahja happe eeltöötus</b> <sup>254</sup> <b>TRL 6-8</b>	Peenestatud biomassi töötus lahja tugeva happega (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HCl, HNO <sub>3</sub> ). Hemitselluloosi hüdrolyüs suhkruteks. Osaline ligniini eraldus, tselluloos on ensümaatilisel paremini töödeldav	Okas- ja leht-puit, põllu-majandus-jäägid, kiudkul-tuurid	Tselluloosi-ligniini mass, Hemitselluloosi sahhariidid (C5 suhkrud)	80%		Kõrge suhkrute saagis, ei vaja ekstreemseid tingimusi (temperatuur, rõhk), suhteliselt lihtsad seadmed, toorme suhtes paindlik	Inhibiitorite tekke oht, limiteeritud mõju ligniinile, energiakulu biomassi eeltöötusel	<b>Eesti</b> Fibenol <a href="#">Link</a>
<b>loonsete vedelike töötus</b> <b>TRL 4-6</b>	Ligniini ja hemitselluloosi lahustamine ionsete vedelikega, mis hõlbustab tselluloosi ekstraheerimist ja edasi töötlust	Okas- ja leht-puit, põllu-majandus-jäägid,	Keemiline puidumass, ligniin, hemitselluloos	40-55%				<b>Rootsi</b> Lixea <a href="#">Link</a> <b>EU Projekt</b> GRETE <a href="#">Link</a> <b>Soome</b> Ioncell

<sup>254</sup> United States Patent. Appl. No.: 16/965,756. PCT No.: PCT/EP2019/052425. "Process for the conversion of a solid lignocellulosic material"

Tehnoloogia nimetus TRL	Lühikirjeldus	Toore*	Peamised produktid	Saagis (%) <sup>249</sup>	Kõrvalsaadused, (%)	Eelised	Puudused	Tehnoloogia pakkujate ja kasutajate näited erinevates riikides
		kiudkul-tuurid						<a href="#">Link</a>
<b>Ensümaatiline puidumassi töötlus</b> <sup>255, 256</sup> <b>TRL 5-7</b>	Ensüümide kasutamine puidu Ligniini ja hemselluloosi lagundamine ensüümidega, muutes tselluloosi eraldamise tõhusamaks ja keskkonnasõbralikumaks. Ensüümid on kasutuses erinevate tehnoloogiate protsessides, nt krafttselluloosi valgendamisel, lahustuva tselluloosi tegemisel	Okas- ja leht-puit, põllumajandus-jäägid, kiudkul-tuurid	Ensüümhüdrolüüsitud puidumass, Lahustuv tselluloos			Keskonna efekt: puudub mürgiste kemikaalide vajadus, madal energia vajadus, madalad temperatuurid ja rõhud. Selektiivne delignifitseerimine, vähemkahjustatud kõrgekvaliteetsed fiibrid, võimaldab suhkruid ja ligniini väärintada	Ensüümid on kemikaalidega võrreldes kallid. Pikem töötlemisaeg. Erineva lähtematerjalile kohandatud ensüümsegude vajadus. On vaja märkimisväärset eeltöötlust.	<b>Taani</b> Novonesis (Ensüümide tootjad) <a href="#">Link</a> <b>Soome</b> MetGen <a href="#">Link</a>

\* Eestis tööstuslikus mahus kasvavad liigid

<sup>255</sup> P. E. G. Loureiro, S. M. S. Cadete, R. Tokin, D. V. Evtuguin, H. Lund, and K. S. Johansen, "Enzymatic Fibre Modification During Production of Dissolving Wood Pulp for Regenerated Cellulosic Materials," *Front. Plant Sci.*, vol. 12, Sep. 2021, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.717776>

<sup>256</sup> H. Østby, L. D. Hansen, S. J. Horn, V. G. H. Eijssink, and A. Várnai, "Enzymatic processing of lignocellulosic biomass: principles, recent advances and perspectives," *J Ind Microbiol Biotechnol*, vol. 47, no. 9, pp. 623–657, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10295-020-02301-8>

**Lisa 5.1. Tabel 3 Kolmas generatsioon (Sihitud ligniini töötlus lignotselluloosse biomassi väärindamiseks)**

Tehnoloogia nimetus TRL	Lühi kirjeldus	Toore*	Peamised produktid	Saagis (%) <sup>249</sup>	Kõrvalsaadused, (%)	Eelised	Puudused	Tehnoloogia pakujate ja kasutajate näited erinevates riikides
<b>Reduktiivne katalüütiline fraktsioneerimine** (RCF)</b> <sup>257, 258,</sup> <b>TRL 3-5</b>	Ligniini-fokuseeritud biorafineerimise meetod. Ligniini selektiivne stabiliseeritud depolümeerisatsioon metallkatalüsaatoritega (Ni, Pd, Pt, Ru jm.) lahustis (MeOH, EtOH jm), repolümeerisatsiooni vältimiseks H <sub>2</sub> gaasi või vesiniku doonori keskkonnas. Saadud tselluloosi ja hemitselluloosi saab töödelda keemiliselt või biotehnoloogiliselt (ensümaatiline hüdroolüüs + fermentatsioon).	Okas- ja lehtpuit, põllumajandusjäägid	Ligniiniõli (ligniini depolümeerisatsiooni saagis on 20-50 % biomassi ligniinisaldusest, õlis monomeerid nagu fenoolid, guaiaakoolid ja siiringoolid)  Tselluloosirikas mass	20-50%  50-80%	Fraktsioneerimise käigus tekkivad gaasilised ühendid, mille osakaal jääb tavalpärast oluliselt alla 10% esialgselt kuiva puidu massist	Võimaldab lignotselluloosse biomassi peaaegu täielikku kasutamist, minimeerides jäätmeid.  Tulem on väga funktsionaliseeritud molekulid, mida on võimalik kasutada peenkemikaalide sünteesis.	Katalüsaatorid võivad olla kallid  Katalüsaatorite regenerimine pikemas tsüklis pole ennast veel tõestanud  Protsessi edukus sõltub tugevalt produktide puhastamise tehnoloogiast	<b>Belgia</b> Pilotprojekt Leuveni ülikoolis. Bioconi <a href="#">Link</a>
<b>Aldehüüd-assisteeritud fraktsioneerimine (AAF)</b> <sup>259</sup> <b>TRL 5</b>	Ligniini-fokuseeritud biorafineerimise meetod. Ligniini kaitsmine enne fraktsioneerimist aldehüüdiga. Seejärel fraktsioneerimine. Seeläbi on võimalik saada natiivse struktuuriga ligniini, mida	Okas- ja lehtpuit	Sõltuvalt konkreetse protsessi iseloomust:  Väga kõrge natiivsusega ligniini või depolümeri-	20-30%		Võimaldab toota kõrge natiivsuse ja seega funktsionaalsusega polümeerseid ligniini	Kasutatavad lahustid vajavad spetsialiseeritud tootmistingimusi.  Monomeerideks lagundamisel suuresti samad	Peamiselt ülikoolide laborid, antud tehnoloogiat kommertsialiseerib hetkel Bloom

<sup>257</sup> E. Cooreman et al., "The Future Biorefinery: The Impact of Upscaling the Reductive Catalytic Fractionation of Lignocellulose Biomass on the Quality of the Lignin Oil, Carbohydrate Products, and Pulp," ACS Sustainable Chem. Eng., vol. 11, no. 14, pp. 5440–5450, Apr. 2023, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c06913>

<sup>258</sup> J. K. Kenny et al., "Design and Validation of a High-Throughput Reductive Catalytic Fractionation Method," JACS Au, vol. 4, no. 6, pp. 2173–2187, Jun. 2024, <https://doi.org/10.1021/jacsau.4c00126>

<sup>259</sup> Li Shuai et al., "Formaldehyde stabilization facilitates lignin monomer production during biomass depolymerization". Science, Vol 354, Issue 6310 pp. 329-333, <https://doi.org/10.1126/science.aaf7810>

Tehnoloogia nimetus TRL	Lühi kirjeldus	Toore*	Peamised produktid	Saagis (%) <sup>249</sup>	Kõrvalsaadused, (%)	Eelised	Puudused	Tehnoloogia pakkujate ja kasutajate näited erinevates riikides
	on võimalik kasutada otse või depolümeeriseerida. Aldehüüdidega saab kontrollida ka ligniini funktsionaalsust. Fraktsioneerimise tulemina saadakse lisaks ligniinile ka tselluloosi- ja hemitselluloosirikas mass.		satsiooni käigus saadud ligniini monomeerid  Tselluloosi- ja hemitselluloosirikas mass	60-80%		Nii monomeeride kui polümeerse ligniini produkti puhul on võimalik funktsionaalsust juhtida läbi valitava aldehüüdi  Väga kõrged ligniini monomeeride saagised	puudused mis RCF puhul	
<b>Diool-assisteeritud fraktsioneerimine (DAF)</b> <sup>260</sup> TRL 3-4	Ligniini-fokuseeritud biorafineerimise meetod. Ligniini aktiivne stabiliseerimine dioolidega selle ekstraheerimisel happelises keskkonnas. Lisaks dioolidega stabiliseeritud ligniini monomeeridele ja oligomeeridele on protsessi tulem ka funktsionaliseeritud monomeersed suhkrud hemitselluloosist. Tselluloos jääb tahkele kujule ning on edasi väärindatav.	Okas- ja lehtpuu	Pärast fraktsioneerimise järgse vedela faasi ekstraheerimist orgaanilise solvendiga:  Atsetaal funktsionaalsusega ligniini monomeerid ja oligomeerid  Hemitselluloosist tuletatud funktsionaliseeritud suhkru derivaadid	20-30%  20-30%		Võimaldab toota kõrge funktsionaalsusega aromaatsid monomeere, mida kasutatakse peenemikalaide sünteesiks  Puitmassi täielik väärindamine	Protsessis kasutatavad lahustid on tihtipeale kallid.  Produktide eraldamine on mahukas ja suhteliselt keerukas protsess	Peamiselt ülikooli laborid

<sup>260</sup> Peter J. Deuss et al., "Aromatic Monomers by in Situ Conversion of Reactive Intermediates in the Acid-Catalyzed Depolymerization of Lignin." Journal of the American Chemical Society Vol 137/Issue 23, May 2015, <https://doi.org/10.1021/jacs.5b03693>

Tehnoloogia nimetus TRL	Lühi kirjeldus	Toore*	Peamised produktid	Saagis (%) <sup>249</sup>	Kõrvalsaadused, (%)	Eelised	Puudused	Tehnoloogia pakujate ja kasutajate näited erinevates riikides
			Tselluloosirikas mass	40-60%				
<b>Torrefitseerimine</b>	Madalatemperatuuriline termiline töötlemine puitmassi omaduste parendamiseks.	Kõik puidu liigid. Eelista-takse leht-puitu	Torrefitseeritud puit, must pellet		Torrefitseerimis-kondensaad	Madala energiakuluga.	Tõrva teke. Kõrgemal TRL lõppeb energia-kandjatega	Baltaania
<b>Pürolüüs</b>	450-700 C juures töötlemine.		Biosüsi, pürolüüsiõli			Biosütt saab kasutada kivisöe asendajana ka näiteks terasetööstuses.		
<b>Gasifitseerimine</b>	Termiline töötlemine 800-1200C juures.	Sobib nii sega-puit kui ka raid-med jms.	Sünteesgaas - elekter Koos FT – metanool, vahad  Fermentatsioon – etanool, atsetoon, isopropanool		Soojus	Võib kasutada igasugust biomassi. Ei vaja lisa energiat. Võimaldab toota platvorm-kemikaale.	Taandab puidu C1 tasemele, millest väljakutsuv toota kõrgema C-sisaldusega ühendeid, FT katalüsaatorid kallid	<b>USA</b> SunGas Renewables <a href="#">Link</a>

\* Eestis tööstuslikus mahus kasvavad liigid.

\*\* Puudub tööstuslik näide. 200 kt tehase simulatsiooni puhul 74 GJ/t ligniini kohta (u 35 GJ/t tselluloosimassi kohta).

## LISA 6.1. TÜ ÜLIÕPILASTE ARVU ANALÜÜS (PUIDU VÄÄRINDAMISEGA SEOTUD ERIALADEL)

Lisas 6.1 tabelites 1 ja 2 on esitatud sisse astunute (immatrikuleeritud) ja nominaalajaga lõpetanute üliõpilaste arv. Nominaalajaga lõpetamise efektiivsus Tartu Ülikooli valitud õppekavadel 2020-2024 õppeaastal on arvatud tabelis 3. Andmed pärinevad TÜ poolt kogutud andmestikest.

Lisa 6.1. Tabel 1 Sisse astunute (immatrikuleeritud) arv TÜ valitud õppekavadel 2020-2024 õppeaastal

Õppetase	Õppekava nimetus	Aasta, sisseastujate arv				
		2020	2021	2022	2023	2024
<b>Baka-laureus</b>	Füüsika, keemia ja materjaliteadus	72	66	75	88	110
	Loodusteadused ja tehnoloogia (LTBI, LTMR)	79	52	44	30	23
	Geenitehnoloogia	57	63	63	72	58
	Bioloogia ja elustiku kaitse (144302, LTOM)	68	50	50	56	50
	Geoloogia ja keskkonnatehnoloogia (136617)	20	25	19	22	20
<b>Magister</b>	Keemia	8	8	12	6	16
	Biotehnika (205726)	25	16	25	14	9
	Bioloogia ja ökoinnovatsioon	11	21	14	17	24
	Keskkonnajuhtimine kliimamuutuse tingimustes (218263)	11	21	14	17	24
	Molekulaarsed bioteadused	10	9	5	11	19
	Materjaliteadus ja tehnoloogia	8	19	7	8	6

Lisa 6.1. Tabel 2 Nominaalajaga lõpetanute efektiivsus (%) TÜ valitud õppekavadel 2020-2024 õppeaastal

Õppetase	Õppekava nimetus	Aasta, lõpetanute arv				
		2020	2021	2022	2023	2024
<b>Baka-laureus</b>	Füüsika, keemia ja materjaliteadus	24	32	32	31	38
	Loodusteadused ja tehnoloogia (LTBI)	27	37	32	33	28
	Geenitehnoloogia	21	25	19	30	32
	Bioloogia ja elustiku kaitse (144302)	25	23	27	37	30
	Geoloogia ja keskkonnatehnoloogia (136617)	13	9	7	14	15
<b>Magister</b>	Keemia	10	6	7	6	7
	Biotehnika (205726)		10	15	14	22
	Bioloogia ja ökoinnovatsioon	-	4	8	12	15
	Keskkonnajuhtimine kliimamuutuse tingimustes (218263)				13	15
	Molekulaarsed bioteadused		3	6	7	6
	Materjaliteadus ja tehnoloogia		8	6	12	11

Lisa 6.1. Tabel 3 Lõpetamise efektiivsus TÜ õppekavadel

Õppetase	Õppekava nimetus	Aasta, lõpetamise efektiivsus (%)				
		2020	2021	2022	2023	2024
<b>Baka-laureus</b>	Füüsika, keemia ja materjaliteadus	29	36	31	32	33
	Loodusteadused ja tehnoloogia (LTBI)	71	64	59	39	47
	Geenitehnoloogia	31	36	31	36	39
	Bioloogia ja elustiku kaitse (144302)	29	36	42	38	37
	Geoloogia ja keskkonnatehnoloogia (136617)	53	45	29	50	52
<b>Magister</b>		60	45	62	62	50
	Biotehnika (205726)		83	68	81	88
	Bilooogia ja ökoinnovatsioon		27	36	43	42
	Keskkonnajuhtimine kliimamuutuse tingimustes (218263)				87	87
	Molekulaarsed bioteadused		38	50	67	80
	Materjaliteadus ja tehnoloogia		73	57	63	86

## LISA 6.2. TALTECH ÜLIÕPILASTE ARVU ANALÜÜS (PUIDU VÄÄRINDAMISEGA SEOTUD ERIALADEL)

Lisas 6.2 tabelis 1 on esitatud sisse astunute (immatrikuleeritud) üliõpilaste arv. Nominaalajaga lõpetamise efektiivsus Tallinna Tehnikaülikoolis valitud õppekavadel 2020-2024 õppeaastal on arvatud tabelis 2. Andmed pärinevad TalTech poolt kogutud andmestikest.

**Lisa 6.2. Tabel 1 Sisse astunute (immatrikuleeritud) üliõpilaste arv TalTech valitud õppekavadel 2020-2024 õppeaastal**

Õppetase	Õppekava nimetus	Aasta, sisseastujate arv				
		2020	2021	2022	2023	2024
<b>Bakalaureus</b>	Toidu- ja biotehnoloogia	-	-	23	26	30
	Materjalitehnoloogia	25	15	28	26	32
	Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia	23	16	17	21	31
<b>Rakendus- kõrgharidus- õpe</b>	Keemiatehnoloogia	17	22	10	23	26
<b>Magister</b>	Puidu-, plasti- ja tekstiilitehnoloogia	19	13	8	9	13
	Keskkonnatehnoloogiad ja – strateegiad (Uus õppekava, vastuvõtt 2025)	-	-	-	-	-
	Rakenduskeemia ja biotehnoloogia	14	15	13	21	31
	Jätksuutlikud keemiatehnoloogiad	17	-	-	7	5

**Lisa 6.2. Tabel 2 Lõpetamise efektiivsus TalTech õppekavadel**

Õppetase	Õppekava nimetus	Aasta, lõpetamise efektiivsus (%)				
		2020	2021	2022	2023	2024
<b>Bakalaureus</b>	Toidu- ja biotehnoloogia	-	-	23	26	30
	Materjalitehnoloogia	-	44	57	46	56
	Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia	-	46	45	44	43
<b>Rakendus- kõrgharidus- õpe</b>	Keemiatehnoloogia	-	-	-	45	26
<b>Magister</b>	Puidu-, plasti- ja tekstiilitehnoloogia	-	63	-	79	83
	Keskkonnatehnoloogiad ja – strateegiad (Uus õppekava, vastuvõtt 2025)	-	-	-	-	-
	Rakenduskeemia ja biotehnoloogia	-	84	63	64	80
	Jätksuutlikud keemiatehnoloogiad	-	82	-	-	-

## LISA 6.3. EMÜ ÜLIÕPILASTE ARVU ANALÜÜS (PUIDU VÄÄRINDAMISEGA SEOTUD ERIALADEL)

Lisas 6.3 tabelis 1 ja 2 on esitatud sisse astunute (immatrikuleeritud) ja nominaalajaga lõpetanute üliõpilaste arv Eesti Maaülikoolis valitud õppekavadel 2020-2024. Andmed pärinevad EMÜ poolt kogutud andmestikest.

**Lisa 6.3. Tabel 1 Sisse astunute (immatrikuleeritud) üliõpilaste arv EMP valitud õppekavadel 2020-2024 õppeaastal**

Õppetase	Õppekava nimetus	Aasta, sisseastujate arv				
		2020	2021	2022	2023	2024
<b>Doktoriõpe</b>	Metsandus	3	4	4	4	4
	Tehnikateadus	2	0	5	4	2
<b>Magistriõpe</b>	Metsamajandus ja metsaökoloogia	5	15	24	17	19
	Metsanduslik kavandamine ja analüüs	0	0	5	3	0
	Metsatööstus	7	5	12	0	8
	Energjakasutus	0	0	23	20	21
	Ergonoomika	0	0	10	17	10
	Tootmistehnika	0	0	10	15	9
<b>Bakalaureuseõpe</b>	Metsandus	66	64	51	53	48
	Ringbiomajandus	-	-	-	-	24
	Tehnika ja tehnoloogia	0	0	74	59	58
<b>Rakendus-kõrgharidusõpe</b>	Puidutöötlemise tehnoloogia	25	22	20	14	11
	Tehnotroonika	0	0	26	23	22

**Lisa 6.3. Tabel 2 Lõpetajate arv Eesti Maaülikooli õppekavadel 2020-2024**

Õppetase	Õppekava nimetus	Aasta, lõpetanute arv				
		2020	2021	2022	2023	2024
<b>Doktoriõpe</b>	Metsandus	1	2	2	2	1
	Tehnikateadus	2	2	5	2	4
<b>Magistriõpe</b>	Metsatööstus	1	1	1	8	11
<b>Bakalaureuseõpe</b>	Metsandus	10	18	12	17	22
	Ringbiomajandus (uus õppekava)	-	-	-	-	-
<b>Rakendus-kõrgharidusõpe</b>	Puidutöötlemise tehnoloogia	8	8	6	9	7