



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Energiatehnoloogia instituut

**BIOMETAANI TOOTMISE JA KASUTAMISE  
SOTSIAAL-MAJANDUSLIK MÕJU EESTIS**

**SOCIOECONOMIC IMPACTS FROM THE BIOMETHANE  
PRODUCTION AND USAGE IN ESTONIA**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Liise Marie Reinik

Üliõpilaskood 211680MASM

Juhendaja: Prof. Alar Konist,  
Energiatehnoloogia instituudi  
direktor

Tallinn 2023

(Tiitellehe pöördel)

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Liise Marie Reinik

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Biometaanu kasutamise sotsiaal-majanduslik mõju Eestis, mille juhendaja on Alar Konist

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

TalTech Instituudi nimetus

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Liise Marie Reinik, 211680MASM

Õppekava, peeriala: MASM02/18 - Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja: Energiatehnoloogia instituudi direktor Prof. Alar Konist, tel  
6203901

### Lõputöö teema:

Eesti keeles: Biometaani tootmise ja kasutamise sotsiaal-majanduslik mõju Eestis

Inglise keeles: Socioeconomic Impacts from the Biomethane Production and Usage in Estonia

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Selgitada välja Eestis tooraineressurss biogaasijaamade ehitamiseks
2. Leida 1 MWh biometaani tootmise ja tarbimise sotsiaalmajanduslik mõju läbi terve teekonna
3. Võrrelda biometaani majanduslikku mõju teiste kütustega

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Eesmärkide püstitamine ja lõputöö struktuuri kirjeldus	03.02.2023
2.	Kirjanduse ülevaate koostamine	09.03.2023
3.	Metoodika kirjeldus ja sotsiaalmajandusliku analüüsi koostamine	05.05.2023

**Töö keel:** eesti      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 30. mai 2023 a

**Üliõpilane:** Liise Marie Reinik ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Alar Konist ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Konsultant:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

EESSÕNA .....	8
SISSEJUHATUS .....	10
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	13
1.1 Tooraine ressursid.....	13
1.1.1 Varasemad uuringud.....	15
1.1.2 Läga ja sõnnik .....	16
1.1.3 Biojätmed ja toiduainetööstuse jäägid .....	18
1.1.4 Põhk.....	19
1.1.5 Energikultuurid ja rohtne biomass .....	21
1.1.6 Reoveesetted ja tööstuslik heitvesi .....	21
1.1.7 Tooraine võrdlus .....	22
1.2 Biogaasi ja biometaani tootmine .....	24
1.2.1 Biogaasi tootmine .....	24
1.2.2 Biogaasi puhastamine biometaaniks .....	26
1.3 Alternatiiv: biomassi termokeemiline gaasistamine.....	31
1.4 Biogaasi kasutusvaldkonnad .....	32
1.4.1 Transpordisektor .....	34
1.4.2 Põllumajandus .....	35
1.4.3 Eluhooned .....	36
1.4.4 Tööstus.....	36
1.4.5 Vesinik.....	36
1.4.6 Elekter ja soojusenergia.....	37
1.4.7 Kasutusvaldkondade võrdlus.....	37
2. SOTSIAALMAJANDUSLIK ANALÜÜS.....	40
2.1 Metoodika .....	40
2.2 Referents stsenaarium .....	42
2.3 Kulud .....	43
2.3.1 Investeeringukulud.....	43
2.3.2 Tegevuskulud .....	45
2.3.3 Kokkuvõtte kuludest .....	47
2.4 Toetused ja seadusandlus .....	47

2.5	Tulud biogaasi tootmisest ja tarbimisest .....	49
2.6	Majandus .....	49
2.6.1	Tulu biometaani müügist .....	50
2.6.2	Riigile laekuvad maksud .....	50
2.7	Sotsiaalsed hüved .....	51
2.7.1	Töökohtade loomine .....	51
2.7.2	Vähenenud müra .....	52
2.7.3	Vähenenud ebameeldiv lõhn .....	52
2.8	Keskkond .....	52
2.8.1	Keskkonnakasu KHG emissioonide vähenemisest .....	52
2.8.2	Keskkonnakasu muude heitmete vähenemisest .....	59
2.8.3	Digestaadi keskkonnakasu pinnasele ja veekvaliteedile .....	59
2.8.4	Vähenenud nõudlus haruldaste materjalide järele .....	62
2.9	Põllumajandus .....	62
2.9.1	Süntetiliste väetiste asendamine digestaadiga .....	62
2.9.2	Jäätmekäitlus .....	65
2.9.3	Energeetika .....	66
2.9.4	Süsiniku eraldamine ja selle müük .....	68
2.10	Kokkuvõtte sotsiaalmajanduslikest mõjudest .....	69
	KOKKUVÕTE .....	71
	SUMMARY .....	73
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	75
	LISAD .....	85
	Lisa 1 Taani biogaasijaamade investeeringukulud .....	85

## JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1. Biometaani tootmise toorained 2022. a .....	14
Joonis 1.2 Biogaasi saagis toe/t (IEA, 2022) [22] .....	15
Joonis 1.3 Veiste arv maakondade lõikes 2022. aastal.....	18
Joonis 1.4 Teravilja põllumajandusmaa maakondade lõikes.....	20
Joonis 1.5 Reoveesetete teke Eestis .....	22
Joonis 1.6 Biogaasi tekkeprotsess [47] .....	25
Joonis 1.7 Biometaani tootmine [51] .....	26
Joonis 1.8 Biogaasi puhastustehnoloogiad [55] .....	28
Joonis 1.9 Anaeroobne kääritamine VS gaasistamine [60] .....	32
Joonis 1.10 Energiatarbimise prognoos kuni aastani 2040 (TWh) [24] .	33
Joonis 1.11 Energiatõhusus biogaasi kasutamisel koostootmiseks [77]	39
Joonis 1.12 Energiatõhusus biometaani kasutamisel transpordisektoris [77] .....	39
Joonis 2.1 Itaalia biometaanijaama tulude ja kulude jaotus.....	42
Joonis 2.2 Biogaasijaama tootmiskulud vastavalt jaama suurusele .....	44
Joonis 2.3 Biogaasi puhastustehnoloogiate hinnavõrdlus .....	46
Joonis 2.4 CO <sub>2</sub> kvoodihinnad €/t [116].....	56
Joonis 2.5 Vilja kuivaine saak erinevate väetiste korral [117].....	60
Joonis 2.6 Statistikaameti andmed PM065: Mineraalväeiste tarbimine Eestis 2018 kuni 2021.a [125].....	63
Joonis 2.7 Väetiste hinnad maailmaturul [131] .....	64
Joonis 2.8 Maagaasi hinnagraafik Dutch TTF andmetel [139].....	67

## TABELITE LOETELU

Tabel 0.1 Alexela hinnavõrdlus (veebuar 2023) [15].....	11
Tabel 1.1 Eesti summaarne teoreetiline biometaani potentsiaal [23].....	16
Tabel 1.2 Eesti biojätmete teke ühe aasta kohta [30].....	19
Tabel 1.3 Biometaani potentsiaal erinevate põhuliikide korral [34] .....	20
Tabel 1.4 Eestis tekkivate jäätmete biometaani potentsiaal.....	23
Tabel 1.5 Biometaani separatsioonisüsteemi parameetrid [23] .....	31
Tabel 1.6 Komprimeeritud ja veeldatud biometaani omadused .....	34
Tabel 1.7 Kütuste tarbimine Eestis 2021. a.....	37
Tabel 2.1 Keskmise biogaasijaama tehnilised andmed .....	42
Tabel 2.2 Biometaani tootmisega seotud kulud .....	43
Tabel 2.3 Biometaani separatsioonisüsteemi kapitalikulud .....	44
Tabel 2.4 CNG ja LNG tanklate kapitalikulud, UK (2011).....	45
Tabel 2.5 Biometaani separatsioonisüsteemi opereerimiskulud .....	45
Tabel 2.6 Näidisbiogaasijaama investeringukulud.....	47
Tabel 2.7 Näidisbiogaasijaama muutuvkulud.....	47
Tabel 2.8 Biogaasi tootmise positiivsed mõjud.....	49
Tabel 2.9 Biometaanijaamade keskmised tulud 2021. a .....	50
Tabel 2.10 Kütuseaktsiisi laekumine 2018 – 2022. a [104].....	51
Tabel 2.11 Majanduslik tulu riigile uue biogaasijaama ehitamisest .....	51
Tabel 2.12 Kütuste energiasisaldus [110] .....	53
Tabel 2.13 CO <sub>2</sub> heitmed arvutatud ümber rahalisteks väärtusteks.....	57
Tabel 2.14 Digestaadi toitainesisaldused [123] .....	61
Tabel 2.15 Rahaline kasu süsiniku sidumisest pinnasesse .....	62
Tabel 2.16 Toitainesisaldus erinevate toorainete kohta [117].....	63
Tabel 2.17 Digestaadi toitainesisaldus [64].....	63
Tabel 2.18 Sünteetiliste väetiste asendmaisest digestaadiga .....	65
Tabel 2.19 Eeldus 1: Biometaani kasutatakse maagaasi asendamiseks	67
Tabel 2.20 Eeldus 2: Biometaan kasutatakse transpordikütuste asendamiseks.....	68



## **EESSÕNA**

Käesoleva magistritöö teema pakkus välja Eesti Gaasiliit, lähtudes praktilisest vajadusest ja huvist selle teema vastu. Antud magistritöö koosneb kahest peamisest osast. Esimeses osas keskendutakse Eesti biometaani tootmise potentsiaalile ning teises osas hinnatakse biometaani tootmise sotsiaalmajanduslikku mõju. Andmete kogumisel on kasutatud nii kodu- kui välismaised teadusartikleid, andmebaase ning statistikat. Käesoleva töö valmimisele aitas kaasa juhendaja Prof. Alar Konist.

Võtmesõnad: magistritöö, biogaas, potentsiaal, sotsiaalmajandus

## Lühendite ja tähiste loetelu

CBA – tasuvusanalüüs (inglise k *Cost-Benefit Analysis*)

CBM – surubiometaan (inglise k. *Compressed Biomethane*) - biometaan tuleb komprimeerida 200-300 barini, et vähendada gaasi mahtu, seda kasutatakse tihti mootorikütusena

CHP – soojuse ja elektri koostootmine (inglise k. *Combined Heat and Power*)

CNG – surugaas (inglise k. *Compressed Natural Gas*)

KHG – kasvuhoonegaasid

LNG – veeldatud maagaas (inglise k. *Liquified Natural Gas*) 162°C juures

RED II – Euroopa Taastuvenergia Direktiiv (inglise k *Renewable Energy Directive*)

SKT – sisemajanduse kogutoodang

## Ühikute loetelu

Nm<sup>3</sup> – normaalkuupmeeter – gaas mahu mõõtühik temperatuuril 0°C ja 1 atm

# SISSEJUHATUS

Vastavalt Euroopa Liidu rohekokkuleppele on eesmärgiks kliimaneutraalsuse saavutamine Euroopas aastaks 2050 ning muuhulgas ka ringmajanduse edendamine [1]. 2018. aastal vaadati uuesti üle Euroopa Liidu Taastuenergia Direktiiv (2018/2001/EU) (RED II – inglise k. *Renewable Energy Directive*), mille põhieesmärkideks olid: 2030. aastaks saavutada 32% taastuvkütuste osakaalu energia lõpptarbimisest; 14% transpordikütustest peavad igas liikmesriigis olema taastuvkütused; liikmesriigid peavad looma riiklikud taastuenergia- ja kliimakavad; liikmesriigid peavad iga 2 aasta tagant esitama oma taastuenergia kasutuselevõtu edendamise raportid [2].

24. veebruaril 2022 tungis Venemaa sõjaliselt kallale Ukrainale, mis on avaldanud ka suurt mõju kogu Euroopa energiasektorile. See põhjustas Euroopas ja kogu maailmas energiahindade järsku tõusu ning on tekitanud muret energia varustuskindluse osas. Euroopa Liidu liikmesriigid leppisid Versailles' deklaratsiooniga 2022. aasta märtsis kokku lõpetada järk-järgult võimalikult kiiresti oma sõltuvuse Venemaa fossiilkütustest [3]. Eesti Valitsus võttis detsembris 2022 vastu määruse, mis keelab maagaasi ostmist ja importi Venemaalt [4]. Seetõttu on suurenenud huvi kodumaise rohegaasi toodangu suurendamise vastu, mis aitaks tagada Eesti varustuskindlust ja energiajulgeolekut.

Euroopa Liidu üheks kliimaeesmärgiks on tõsta taastuenergiat põhinevate kütuste osakaalu transpordisektoris 14%-ni aastaks 2030 ning vähemalt osa sellest nõudlusest on plaanis katta biometaaniga [5]. Eestis tarbiti 2020. aasta seisuga transpordikütuseid üle 9.0 TWh ning taastuenergia moodustas transpordisektoris 12.2%. Samas oli Euroopa Liidu liikmesriikide keskmine taastuenergia osakaal 10.2% [6].

Kuna maanteetransport moodustab viiendiku Euroopa CO<sub>2</sub> heitmetest, siis võttis Euroopa komisjon vastu otsuse, et alates 2035. aastast peavad turule tulevad autod olema null-emissiooniga. Kuna hetkel puudub just transpordisektoris fossiilsetele kütustele hea alternatiiv, siis biometaan on üks perspektiivsematest lahendustest [7]. 2019. aastal võeti EL-s vastu ka väetisetoodete määrus, mis on suunatud orgaanilistest materjalidest (kompost ja kääritusjäätmed) toodetud väetiste kättesaadavamaks tegemisele. Need Euroopa Liidu määrused soodustavad kõik säästva põllumajanduse rakendamist ning seonduvalt ka biogaasi laiemat kasutuselevõttu [1].

Biogaasi saab toota sõnnikust, reoveest, biomassist ja teistest biojätmetest anaeroobse kääritamise teel. Biogaas koosneb 50 – 70% metaanist (CH<sub>4</sub>), 30 – 40% süsinikdioksiidist (CO<sub>2</sub>) ja väiksemal määral teistest kõrvalkomponentidest, sh

lämmastikust (N<sub>2</sub>), hapnikust (O<sub>2</sub>) ja vesiniksulfiidist (H<sub>2</sub>S). Biogaasi puhastamisel on võimalik saada biometaan, mis on omadustelt võrdne maagasiga, sisaldades 96-99% ulatuses metaani [8]. Hetkel on Eestis 18 tegutsevat biogaasijaama, millest 7 on reoveepuhastus- ja tööstusreoveejaamad, 5 on põllumajandusjaamad ja 5 prügilagaasijaamad ja 1 on segaolemajäätmejaam. Eesti biogaasijaamad toodavad nii soojus- ja elektrienergiat, aga ka puhastatud biogaasi ehk biometaan, mida toodetakse hetkel 7 tootmisüksuses (Aravete Biogaas OÜ, Oisu Biogaas OÜ, Biometaan OÜ, Vinni Biogaas OÜ, Tartu Biogaas OÜ, Estonian Cell AS ja EKT Ecobio OÜ) [8]. 2022. aasta lõpus valmis Maardu külje all EKT Ecobio biometaanitehas, mille tootmisvõimsus on ca 2 miljonit m<sup>3</sup> biometaanit aastas ning sellest jätkub 50 Tallinna linnaliinibussi aastase kütusekulu rahuldamiseks [9].

2022. aasta seisuga toodeti Eestis 168 271 MWh biometaan, millest 54 048 MWh toodeti loomsest sõnnikust, 37 635 MWh biojätmetest, 36 594 MWh reoveesetetest, 35 988 MWh toiduainetööstuse jääkidest, ja 4 006 MWh muust biomassist. See on ligi neli korda rohkem võrreldes 2018. aastaga, mil toodeti vaid 39 993 MWh biometaanit [5].

Suures plaanis sõltub Eesti transpordikütuste osas täielikult impordist. Kütuseid tarnitakse põhiliselt kas raudteed pidi Leedust Orlen Eesti OÜ poolt või meretranspordi abil Soomest Neste Eesti OÜ poolt. Kolmandik Eesti energia lõpptarbimisest moodustavad vedelkütused. 2018. aastal tarbiti Eestis 1,08 miljonit tonni vedelkütuseid, sellest 63% moodustas diisel, 24% bensiin, 6% lennukipetrol, 4% põlevkiviõli, 2% vedelgaasi ja 1% kütteõli. Eestis on kokku 19 suuremat transpordikütuste terminali, mille kogumaht on ca 2,9 miljonit m<sup>3</sup> [10].

2022. aasta märtsikuu seisuga on Eestis 26 töötavat CNG või CBM tanklat ning üks LNG tankla Jüris, mida opereerib Alexela Group [11]. CNG sõiduautosid müüvad Eestis näiteks Škoda, Volkswagen, Seat ja Audi, Opel, Fiat ja Mercedes-Benz [12]. Kaubikuid, veoautosid ja busse müüvad Scania, MAN, Iveco ja Volvo [13]. Alates jaanuarist 2023 jõustus Majandus- ja Taristuministri määrus, millega käivitatakse CNG ja LNG sõidukite tehnilise kontrolli süsteem, et tagada kõrgeim võimalik ohutus nende sõidukite jaoks [14]. Tabel 0.1 on toodud ära CNG, bensiini ja diisli hinnavõrdlus veebruar 2023 hinnakirja seisuga. Siit järeldub, et CNG kütus on odavam lahendus.

Tabel 0.1 Alexela hinnavõrdlus (veebruar 2023) [15]

<b>Kütusekulu võrdlus</b>	<b>CNG</b>	<b>Bensiin</b>	<b>Diisel</b>
Postihind	1,996 €/kg	1,759 €/L	1,759 €/L
Rahaline kulu €/100 km kohta	9,0	14,1	10,6

Euroopa Liidus on kokku hinnanguliselt 465 biometaanit jaama, millest 200 on Saksamaal. Kõige levinumad biogaasi puhastustehnoloogiad on keemiline puhastus

(inglise k. *chemical scrubbing*), vesipuhastus (inglise k. *water scrubbing*) ja rõhumuutusega absorptsioon, mis hõlmavad 2/3 kasutusel olevatest tehnoloogiatest. aasta seisuga oli Euroopas ca 1,3 miljonit CNG sõiduauto, 17 000 bussi ja 9000 veoauto. Samuti kogub populaarsust LNG kasutamine raskeveokite tarbeks eelkõige tänu suuremale energiatihedusele [16].

Käesoleva töö eesmärgiks on anda ülevaade biogaasi ja biometaani tootmise ja kasutamise tehnoloogiatest, tootmise potentsiaalidest Eestis ning selle sotsiaalmajanduslikust mõjust.

Töö käigus vastatakse järgmistele küsimustele:

- Mis on Eestis realselt kasutatav (biojätmete ning läga/sõnniku) tooraineressurss biogaasijaamade ehitamiseks?
- Milline majanduslik mõju on 1 MWh biogaasi/biometaani tootmisel ja tarbimisel kasutamisel läbi terve teekonna?
- Milline on biogaasi/biometaani sotsiaalmajanduslik mõju võrreldes teiste kütustega?

Magistritöö on jaotatud kaheks põhiosaks. Esimeses osas antakse kirjanduse ülevaade Eesti potentsiaalsetest tooraineressurssidest biometaani tootmiseks ning tehniline ülevaade biometaani tootmistehnoloogiatest ja kasutusvaldkondadest. Teises osas tutvustatakse kõigepealt sotsiaalmajandusliku uuringu läbiviimise meetodikat ning seejärel antakse ülevaade biometaani sotsiaalmajanduslikust mõjust Eesti näitel.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

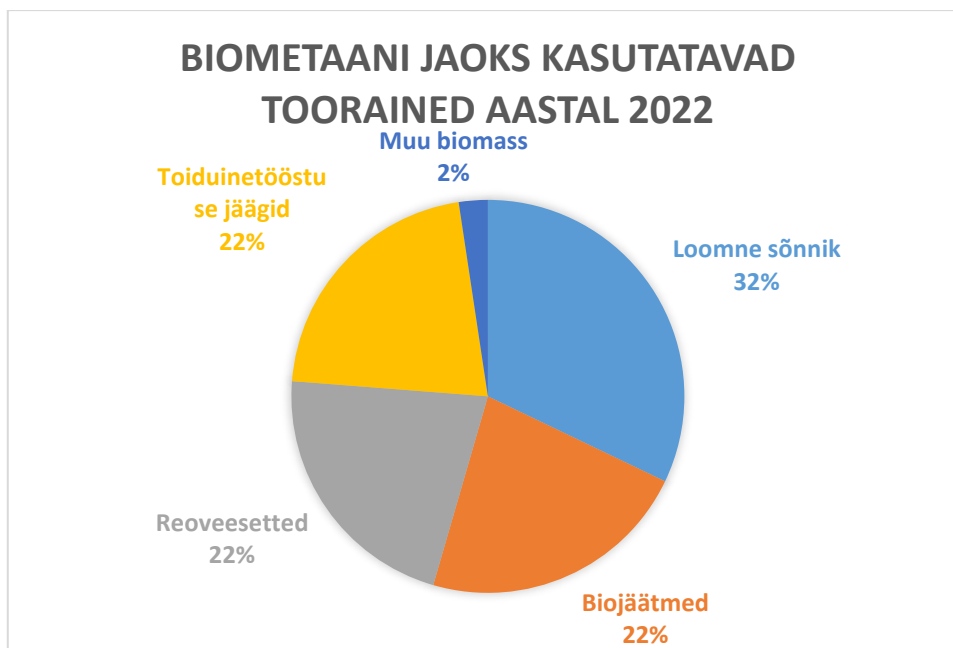
Järgnevalt antakse ülevaade biogaasi ja biometaani tootmiseks kasutatavatest tooraineliikidest ja nende kättesaadavusest Eestis, tuginedes eelnevate uuringute tulemustele. Lisaks antakse ülevaade biogaasi tootmisest ja erinevatest kasutusel olevatest puhastustehnoloogiatest. Kirjanduse ülevaate koostamisel on kasutatud erinevaid infoallikaid, sh nii kodu- kui ka välismaiseid teadusartikleid, õigusakte ja määruseid ning andmebaase.

## 1.1 Tooraine ressursid

Selleks, et hinnata biometaani tootmispotentsiaali ning sellega seonduvat sotsiaalmajanduslikku mõju, tuleb kõigepealt kaardistada tooraine potentsiaal ehk kui palju sobilikku ressursi on Eestis biometaani tootmiseks. Esmalt tuleb vastavalt kirjanduse allikatele ja statistilistele andmetele teha kindlaks, milline on teoreetiline maksimaalne saada olev tooraine hulk. Seejärel tuleb hinnata, milline on reaalne kasutatav toorme hulk vastavalt toorme liikidele ning võtta arvesse ka alternatiivsed lahendused - kas toormaterjali ja jääke oleks võimalik kasutada efektiivsemalt hoopis teistes valdkondades? Lõppeesmärgiks on hinnata, mis liiki toorainet ja kui palju oleks Eestis veel võimalik kasutada ja ligikaudselt hinnata mitu biogaasijaama saaks veel ehitada.

Biogaasi saab toota erinevatest biolagunevatest jäätmetest, sh loomsest lägast ja sõnnikust, põllumajanduslikest kõrvalsaadustest (näiteks põhk), biojäätmest, tööstusjäätmetest, olmejäätmetest, veepuhastusjaama reoveesetetest ning põllusaadustest (silo ja teravili). Puitu biogaasi tootmiseks anaeroobse kääritamise meetodil ei kasutata, kuna sellel on kõrge ligniinisaldus. Ligniin on vastupidav mikroobide suhtes ning lahustub vees alles 180 °C juures. Lähtematerjal võib olla nii tahkel kui vedelal kujul. Toormaterjal koosneb põhiliselt rasvadest, valkudest, süsivesinikest, tselluloosist ja hemitselluloosist. Biogaasi saagis varieerub sõltuvalt lähteainest ning tootmisprotsessi läbiviimise tingimustest. Mida suurem on rasvade sisaldus, seda rohkem biogaasi tekib [17].

2022. aasta seisuga toodeti Eestis enim biometaani loomsest sõnnikust (54 048 MWh), biojäätmest (37 635 MWh), reoveesetetest (36 594 MWh), toiduainetööstuse jääkidest (35 988 MWh) ning muust biomassist (4 006 MWh) [5]. Järgnevalt (Joonis 1.1) on toodud graafiliselt biometaani tootmiseks kasutatud tooraineliigid.

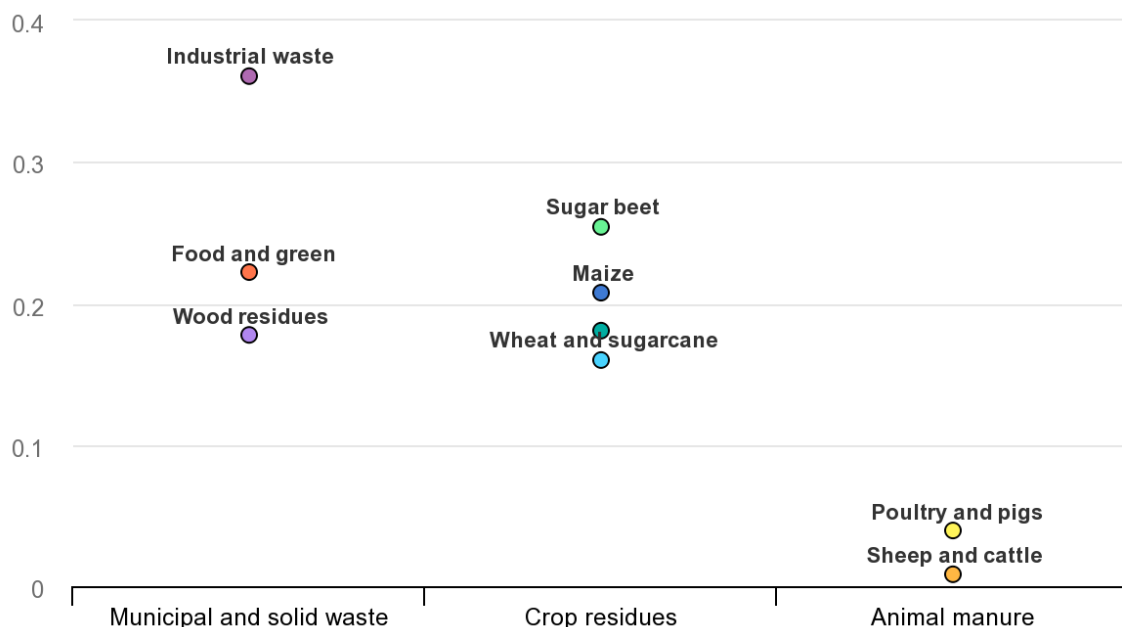


Joonis 1.1. Biometaani tootmise toorained 2022. a

Eestis kasutab Rohegaas OÜ toorainena puidu töötlemise protsessi tekkivat reovett ning biometaani tekib seal 6 miljonit m<sup>3</sup> aastas. Biometaan OÜ kasutab Siimani farmis Koksiveres 81 000 tonni läga ja 5000 tonni sõnnikut ning lisaks kasutatakse 5000 tonni rohusilo aastas ning aastane toodang on 1,5 miljonit m<sup>3</sup> biometaani. Vinni Biogaas OÜ kasutab 90 000 tonni sea- ja veiseläga, sea- ja veisesõnnikut kuni 20 000 tonni ning lisana silo kuni 3000 tonni aastas. Selle toorainega on võimalik toota 3 miljonit m<sup>3</sup> biogaasi aastas. Tartu biogaas OÜ kasutab 80 000 tonni läga ja sõnnikut ning toiduainetööstuse jääke aastas ning sellest toodetakse 5,6 miljonit m<sup>3</sup> biogaasi aastas [18]. EKT Ecobio biometaanitehases planeeritakse kasutada aastas kuni 20 000 tonni biojäätmel (sh köögi- ja sööklajajäätmel) [9].

Euroopa riikides pärineb kuni 70% biogaasi toorainest põllumajandusjäätmetest [19]. Saksamaa on üks suurimatest biogaasi tootjatest Euroopas. 2018. aasta seisuga oli Saksamaa peamine biogaasi tooraine energiakultuurid (peamiselt mais), peaaegu sama mahu hõlmasid põllumajandusjäätgid (sh sõnnik) ning väiksema osa katsid biojäätmel ja olmejäätmel [1]. Saksamaa näitel töötab 77% biometaanijaamadest võimsusega 350-700 m<sup>3</sup> toorbiogaasi/h. 13% jaamadest on väiksema tootmisemahuga ning 10% on suurema tootmisemahuga kui 700 m<sup>3</sup>/h [20]. Põhjanaanabrite juures Soomes aga tuleb 90% biogaasist biojäätmeltest, ülejäänud mahu moodustavad reoveesetted (5%) ja põllumajandusjäätgid (5%) [1]. Tüüpilised biometaanijaama võimsused Taanis on 1000 – 2000 Nm<sup>3</sup>/ biometaani tunnis, Saksamaal 700 – 1400 Nm<sup>3</sup>/h ja Rootsis 600 – 1800 Nm<sup>3</sup>/h [21]. Vastavalt IEA andmetele on biogaasi saagis on kõige suurem olme – ja

tahkete jäätmete puhul ja kõige väiksem läga ja sõnniku puhul. Joonis 1.2 on toodud 2022. aasta andmed biogaasi saagise kohta toe/tonni (1 toe = 11,63 MWh = 51,9 GJ) [22].



Joonis 1.2 Biogaasi saagis toe/t (IEA, 2022) [22]

### 1.1.1 Varasemad uuringud

Aluseks käesolevale tööle on toodud tabel, mis pärineb uuringust ADDVAL-BIOEC uuringu 2021. aasta töopaketi 3 raport „Uudsed võimalused Eesti biomajanduse väärtusahelate mitmekesistamiseks ja lisandväärtuse tõstmiseks“. Siit on järeldatud, et Eesti biometaani potentsiaal lägast ja sõnnikust on 83,9 miljonit m<sup>3</sup>/a ehk 885 145 MWh ning biojäätmetest 5 700 000 m<sup>3</sup>/aastas ehk 60 135 MWh ning kogupotentsiaal on 0,818 TWh, kuhu lisandub veel rohtne biomass, mida lisatakse juurde ca 10% (Tabel 1.1) [23].



Tabel 1.1 Eesti summaarne teoreetiline biometaani potentsiaal [23]

Tooraine	Hinnatud üldkogus	Hinnatud kasutatav tooraine kogus	Metaani saagis (m <sup>3</sup> /tooraine)	Summaarne teoreetiline biometaani saagis (metaani alumise kütteväärtuse järgi (mln m <sup>3</sup> /a))	Summaarne teoreetiline biometaani saagis (alumise kütteväärtuse järgi (GWh))
Põhk	673 000 t	67 000 t	200-210	13,7	125
Läga/sõnnik	4 642 175 t	3 611 600 t	15-17,5 (vedelsõnnik) 27-36 (tahkesõnnik)	83,9	766
Toidu-jäätmed	92 000 t	46 000 t	123	5,7	52
Energia- taimed (rohi)	2 100 000 t	1 100 000 t	350	38,5	3 516
Rohtne biomass pool-looduslike lt kooslus- telt	180 000 t	110 000 t (kuivaine)	350	38,5	352
Pilliroog	171 000 t	85 000 t	40	3,4	31

Samal ajal on Rohetiigri 2021. aasta „Energia teekaart 2021-2031-2040“ uuringus välja toodud, et biometaani tootmiseks on eelistatud kasutada sõnnikut ja läga, riknenud loomasööta ja toidutööstuse jäätmeid. Arvutuslikuks kogupotentsiaaliks on 1-1,3 TWh biometaani aastas ehk kokku 20-30 biometaanijaama üle Eesti. Hetkel on juba olemas 5 biometaanijaama, kus toodetakse kokku 0,17-0,18 TWh biometaani aastas [24].

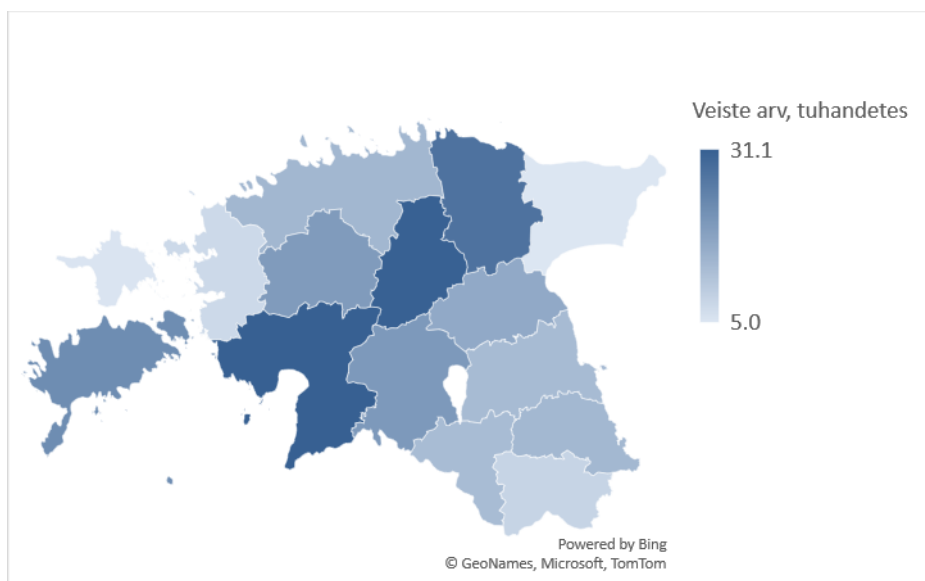
### 1.1.2 Läga ja sõnnik

Hinnanguliselt põhjustab loomakasvatus 14,5-16,5% globaalsetest kasvuhoonegaasidest (KHG) ning piimatoodang põhjustab omakorda viiendiku sellest. Peamised loomakasvatusest tulenevad KHG-d on metaan (CH<sub>4</sub>), dilämmastikoksiidi (N<sub>2</sub>O) ja ammoniaak (NH<sub>3</sub>). Loomse sõnniku ladustamisel eraldub metaani, mis on 25-28 korda suurema mõjuga kasvuhoonegaas võrreldes CO<sub>2</sub>-ga. Samuti eraldub sõnniku ebakorrekse käitlemise korral dilämmastikoksiide (N<sub>2</sub>O), mis on kuni 300 korda suurema keskkonnamõjuga võrreldes CO<sub>2</sub>-ga. Annaeroobse kääritamise teel on võimalik toota loomsest lägast ja sõnnikust metaani, mida saab kasutada energiaallikana. Järgi jäänud digestaati saab kasutada põllukultuuride väetisena, kuna see sisaldab toitaineid (lämmastiku, kaaliumit ja fosforit). Mitmed uuringud on näidanud, et digestaadi kasutamine avaldab positiivset mõju põllusaaduste kvaliteedile ning pärsib patogeenide, mh seente ja bakterite ning kahjulike putukate levimist, mis suurendab nende

vastupidavust haigustele [25]. Lägast ja sõnnikust toodetav biogaasi kogus sõltub loomaliigist. 1 kg veisesõnnikust võib saada maksimaalselt 40 L biogaasi, seasõnnikust 60 L ja 1 kg kana väljaheidetest 70 L biogaasi. Eesti loomakasvatus sektoris on aastatel 1994-2022 enamus loomade arv märgatavalt vähenenud (veised 420 000 → 249 400, sead 460 000 → 269 400, linnud 3 130 000 → 2 046 200). Samuti on oluliselt vähenenud väiketootmiste arv, kus peetakse alla 10 isendi. 2017. aasta seisuga oli Eestis 549 piimatootjat. 2017. aastal kuulus valdav osa piimalehmadest karjadesse suurusgrupis 301–600. Kokku oli antud suurusgrupis ligikaudu 24 700 piimalehma (30% üldkogumist). Võrreldes 1996. aastaga on suurenenud tootjate ja seega karjade arv, kus on 900 ja rohkem piimalehma [26], [27].

Kui arvestada, et veiste arv 2017. aastal oli 250 900 isendit ning sõnnikut tekkis kokku 3 501 900 tonni, siis hinnanguliselt tekib aastas ühe veise kohta ca 14 tonni sõnnikut [26], [27]. Seasõnnikut tekkis 2017. aastal vastavalt 178 000 tonni ning sigade koguarv sel aastal oli 289 100 isendit, mis tähendab, et ühe sea kohta tekkis 0,6 tonni sõnnikut aastas [26], [27]. Seasõnnikut tekkis oluliselt vähem võrreldes veisesõnnikuga ehk ainult 5,21% sõnniku kogumahust. Samas kasutatakse enamasti intensiivset tootmistüüpi, kus peetakse enam kui 2000 siga [26]. Kanada statistikaandmete kohaselt toodavad pullid sõnnikut 42 kg/päevas, lihavedelad 37 kg/päevas, härjad 26 kg/päevas, mullikad 24 kg päevas ja vasikad 12 kg/päevas. Piimalehmad toodavad kõige rohkem ehk 62 kg/päevas. See tähendab, et aastas toodavad vasikad 4,38 tonni sõnnikut ja piimalehmad toodavad aastas kuni 22,63 tonni sõnnikut. Sead toodavad aga 1-4 kg sõnnikut päevas ehk 0,365-1,46 tonni sõnnikut aastas [28]. Need kattuvad ka Taani uuringuga, kus on toodud kogutav sõnniku ja läga kogus ühe piimalehma kohta olenevalt lauda tüübist ja sõnniku ja läga käitlemise viisist (nt sõnnikukanal, põrandarest). Vastavalt sellele kogutakse ühe lehma kohta vastavalt sõnnikut, vedelsõnnikut ja läga 8,27 - 23,17 tonni aastas [29]. Lambaid ja kitsesid põhiliselt karjatatakse rohumaadel ning seda ei koguta eraldi. Lisaks on kogused väga väikesed ca 3,5% kogu loomakasvatuse sõnnikust seega selle ressursiga siin uuringus ei arvestata. Linnukasvatuses tekkiv sõnnikukogus on vaid 1,2% kogu sõnnikumahust. Tekkiv sõnnik on aga vääruslik ning seda kasutatakse graanulvæetiste tootmiseks. Seega biometaani tootmise potentsiaaliga siinkohal ei arvestata [26]. Eesti loomakasvatuses on peamiseks tegevusvaldkonnas piimakarjakasvatus ning sellest tulenevalt on ka seal tekkiv sõnnikukogus kõige suurem (2017. aastal ca 3 500 000 tonni) ning peamiselt tekib vedelsõnnikut. Piima tootmine on muutunud intensiivtootmiseks suurtes piimafarmides, kus on vähemalt 300 pealised karjad [26]. 2022. aasta seisuga on veiste arv Eestis 249 400, sh piimalehmade arv 83 900. Sigade arv on 269 400 isendit, lambaid ja kitsesid on kokku 65 700 looma ning kodulindusid 2 046 200 lindu [27]. Vastavalt

Statistikaameti 2022. aasta andmetele on koostatud geograafiline plaan veiste arvu kohta maakondade lõikes, millest on näha, et kõige suurem on veiste arv Pärnumaal, Järvamaal ning Lääne-Virumaal (Joonis 1.3).



Joonis 1.3 Veiste arv maakondade lõikes 2022. aastal

### 1.1.3 Biojätmed ja toiduainetööstuse jäägid

Biojätmete all mõeldakse eelkõige kodumajapidamiste, kaubandusettevõtete ning tootlustusasutuste toidujäätmeid ja toiduainetööstuse jääke (sh toiduained ja rasvad) ning ka muid orgaanilisi tööstusjäätmeid [20]. *Stockholm Environment Institute* uuringu „Toidujäätmete ja toidukao teke Eesti toidutarneahelates“ kohaselt tekib Eestis 167 000 tonni toidujäätmeid aastas ehk 127 kg toidujäätmeid ühe elaniku kohta. Enamus jäätmetest tekib kodumajapidamistes (41%), järgneb toiduainetööstus (19%), esmatootmine (14%), kaubandus (12%) ning tootlustusettevõtted (6%). Enamus Tallinna linnas kogutud biojätmetest käideldakse linnale kuuluvas AS TJT jäätmekäitluskäitises. See on Eesti suurim kompostimise tehnoloogia, mille võimsus on 15 000 kuni 20 000 t/a. Kompostihunnikud kaetakse Gore © Cover membraankattega. Jäätmeid töödeldakse kuni 3 nädalat temperatuuril 70°C ning saaduseks on kompost [30]. 2019. aastal koguti liigiti vaid 50% biojätmetest ehk siin on potentsiaal kasvuks, juhul kui inimeste sorteerimisharjumused paranevad. Siiaamaani viskavad paljud inimesed biojätmed segaolmejäätmete hulka. 2020. aasta andmete kohaselt sisaldasid segaolmejäätmed 18,5% biojätmeid. See omakorda tekitab lisatööd Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskuses nende jäätmete eemaldamisel [30]. EKT Ecobio biometanijaam on esimene Eestis, mis kasutab ära köögi ja sööklajajäätmeid ning selle biometaaniga sõidavad Tallinna gaasibussid. Järele jäänud digestaati kasutatakse aga Põhja- Eestis põldude väetamiseks. Selle käigus töödeldakse 20 000 tonni biojätmeid ning saadakse

ca 21 MWh biometaanini ning 17 500 tonni digestaati aastas [31]. Eestis tekib kokku ca 166 500 tonni toidujäätmeid, millest suurem enamus tekib kodumajapidamistes (Tabel 1.2).

Tabel 1.2 Eesti biojätmete teke ühe aasta kohta [30]

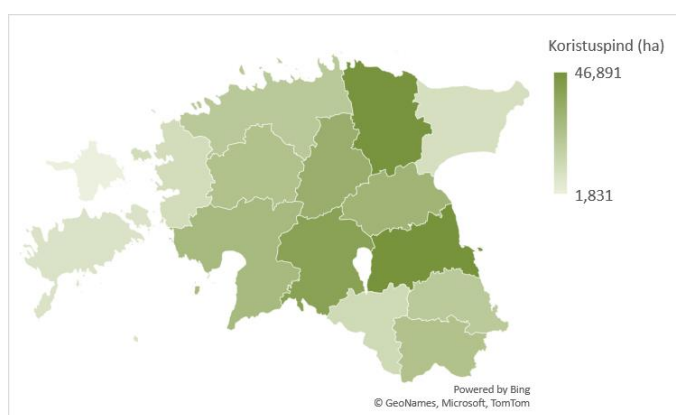
<b>Toidutarneahela etapp</b>	<b>Toidujätmete teke, t/a</b>
Kodumajapidamised	80 564
Toitlustusasutused	10 739
Kaubandus	19 976
Toidutööstus	31 622
Esmatootmine	23 612
KOKKU	166 513

Kodumajapidamistes tekib keskmiselt 81 000 tonni toidujäätmeid ühes aastas millest ligi poole moodustab toidu raiskamine. Võrreldes aastaga 2014 on ära visatavate toidujätmete kogus suurenenud 13% [30]. Vastavalt jäätmeseadusele peab hiljemalt 31.12.2023 kohalik omavalitsus korraldama biojätmete liigiti kogumise tekkekohalt, välja arvatud juhul kui biojätmed kohapeal kompostitakse. Euroopa Liidu eesmärgiks on 2025. aastaks liigiti koguda vähemalt 55% jäätmetest [32]. Toitlustusettevõtetes tekib hinnanguliselt 11 000 tonni jäätmeid aastas. Suurim hulk jäätmeid tekib toitlustusasutustes, sh restoranid ja kohvikutes, sellele järgnevad haridusasutuste sööklad (22%) ning väiksel määral tervishoiuasutused (3%). Hinnanguliselt jääb igal aastal toidupoodides üle 1,7 kuni 46 tonni toiduaineid. Kokku läheb igal aastal mahakandmisele kuni 20 000 tonni toiduaineid [30]. Põhilised toiduainetööstuse sektorid on lihatööstuse, kalatööstuse, puu- ja köögiviljatööstuse, teraviljatööstuse, piimatööstuse, pagaritööstuse ning joogitootmine. Kokku tekib toiduainetööstuses kuni 32 000 tonni toidujäätmeid aastas. Enim biojätmeid tekib puu- ja köögiviljatööstustes (52%), järgneb lihatööstus (13%) ja teraviljatööstus (9%). Esmatootmise all mõeldakse eelkõige piimatootmist, nisukasvatust ja kalakasvatust ning vähesel määral ka kartuli, herne ja maasikakasvatust, kus tekib ligikaudu 24 000 tonni jäätmeid aastas. Piimatootmisel on kadu ca 3,5% ning tegemist on kasutuskõlbmatu piima, mis sisaldab verd või antibiootikume. Nisutootmisel visatakse 1,2% toodangust ära terade halva kvaliteedi tõttu [30].

### **1.1.4 Põhk**

Põhk on teravilja mittesöödav jääkmaterjal, millest terad on viljapeksu teel eraldatud [33]. Ülemaailmselt tekib igal aastal tohututes kogustes kasutamata põhku just tänu suurenenud viljakasvatusele, mida soodustab rahvaarvu kasv. Enamus juhtudel ei kasutata põhku energeetikasektoris täielikult mitte biogaasi tootmiseks, vaid etanooli tootmiseks või brikettidena põletamiseks ja biogaasi puhul on see pigem lisaaine. Põhk on kerge ja selle kütteväärtus on 16,5 MJ/kg kohta ja sisaldab 12-20% ligniini ning seetõttu on saadava biogaasi kogused väiksemad võrreldes muude toorainetega.

Soovitatav transpordiraadius on 50-100 km. Põhu iseloomuliku keemilise struktuuri tõttu on selle kääritamine keeruline ning vajalik võib olla eeltöötlus [34]. Selleks, et põhku kasutada otse biogaasi tootmiseks tuleb lisada vett ja ensüüme. Samuti tuleks põhk eelnevalt teha põhubrikettideks. Kui tavakujul on põhu tihedus 0,05 ehk kaalub 50 kg/m<sup>3</sup> kohta, siis briketid kaaluvad 1000 kg/m<sup>3</sup> kohta [34]. Statistikaameti andmetel (PM0281) oli 2022. aasta seisuga oli Eestis kasutatav põllumajandusmaa 986 206 hektarit. 2022. aasta teraviljasaak oli 1 528 554 tonni ning enim kasvatati nisu (180 971 ha), talinisu (152 737 ha) ja otra (116 390 ha). Enim põldusid on Lääne-Virumaal ja Tartumaal (Joonis 1.4) [35].



Joonis 1.4 Teravilja põllumajandusmaa maakondade lõikes

Taliviljade puhul saadakse 35-53 kg põhku 100 kg teravilja kohta. Suviviljadest saadav põhukogus on põudade tõttu tavaliselt väiksem. 500 tonni põhu saamiseks tuleb teravilja kasvatada 125 ha (saagikus 4000 kg/ha) või 275 ha (saagikus 1800 kg/ha) [36]. Teoreetiline metaani potentsiaal erineva vilja põhu kohta tuginedes kirjanduse allikatele on leitav järgevast tabelist (Tabel 1.3).

Tabel 1.3 Biometaani potentsiaal erinevate põhuliikide korral [34]

Tooraine liik	Teoreetiline biometaani potentsiaal, m <sup>3</sup> /t
Nisupõhk	325
Odrapõhk	340
Maisipõhk	349

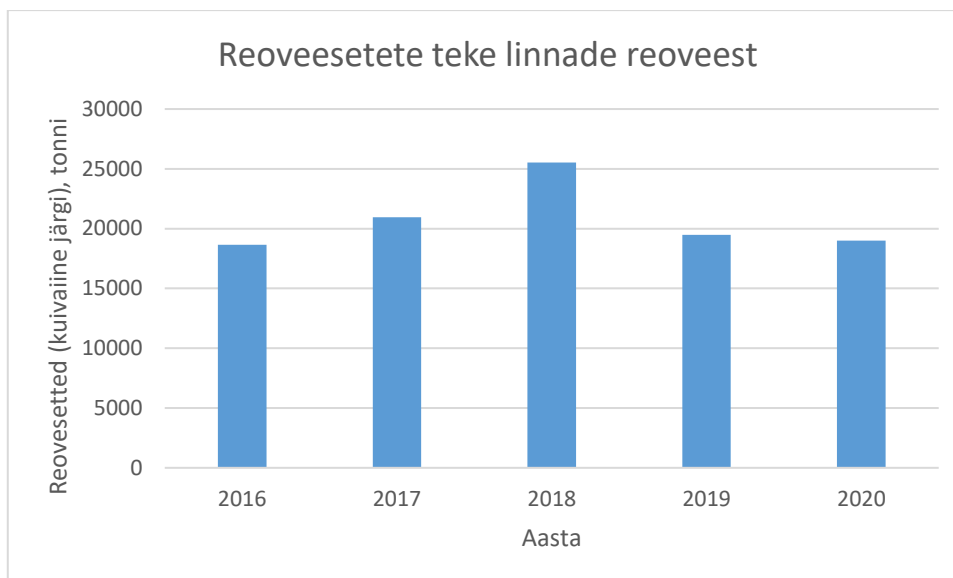
Seega on Eestis tekkiv põhukogus ca 534 993 t/a ning biometaani saagis on 136-202 m<sup>3</sup>/t kohta [37]. Kui kasutada ära 50% põhust biometaani tootmiseks, siis oleks võimalik teoreetiliselt toota ca 42 GWh biometaani. Praktikas saab põhku lisada vaid lisandina alla 10%.

### **1.1.5 Energikultuurid ja rohtne biomass**

Energiakultuuride all mõeldakse rohttaimi (mais, raps jm), mille eeliseks on tõhus päikseenergia muundamine, kõrge saagikus, madal vee- ja toitainevajadus ning madalad külvikulud, kiire kasvukiirus ning suur saagikus. Sobiva energiakultuuri valik sõltub eelkõige riigi looduslikest eripäradest. Võrreldes teiste energiakultuuridega on maisil kõige suurem metaani tootmise potentsiaal (79 – 108 MWh/hektari kohta) [19]. Samas sobib mais ja osad teised energiakultuurid kasutamiseks ka inimeste toidulaual, seega ei ole optimaalne kasvatada seda kütuse tootmiseks. Seetõttu on Eesti tingimustes potentsiaali kasutada kasutuses mitteolevaid rohumaid rohtse biomassi kasutamisel biogaasi tootmisel [19]. Jääkmuru kuulub samuti lignotselluloosse biomassi rühma. Keskmise biometaani saagis on 2,8 - 3,4 MWh/tonni VS kohta ning mis sarnaneb maisilo väärtustega [38]. Rohumaad üleüldiselt ei loeta kõige optimaalsemaks toormeks biogaasi ja biometaani tootmiseks, kuna see konkureerib põllumaa mõttes loomasööda kasvatamise või ka inimese toidulauaga. Lisaks on näiteks silo kasutamisel hind kõrgem võrreldes teiste toorainetega. Biogaasi tootmiseks tuleks eelistatult kasutada erinevaid jääkaineid (näiteks põllumajandus- ja biojätmed) [24].

### **1.1.6 Reoveesetted ja tööstuslik heitvesi**

Reoveesetted tekivad reoveepuhastusprotsessi käigus ning need sisaldavad toitaineterikkaid orgaanilisi ühendeid. Primaarne muda tekib gravitatsioonilise setitamise käigus, sellel on kõrge orgaaniliste ainete sisaldus ja see on kergesti lagunev. Metaani saagis on 3,3 – 5,3 MWh/ tonni orgaanilise kuivaine kohta. Sekundaarne muda tekib reoveesettete bioloogilise töötlemise käigus, selle fraktsioon on väiksem ning seetõttu on ka saadav biogaasi kogus väiksem orgaanilise kuiva aine kohta. Reoveesettetest toodetud biogaasil on kõrge metaanisisaldus (63-67%) [39]. Eurostati andmetel tekkis 2020. aastal linnade reoveest 18 990 tonni reoveesetteid (kuivaine järgi) [40]. Joonis 1.5 kajastab 2016 – 2020. aastate andmeid. Viimane 2016. aasta Keskkonnaministeeriumi uuring "Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta" toob välja, et aastas tekib ca 167 000 m<sup>3</sup> töödeldud reoveesetet (märgkaalus). Tööst järelendus ka, et Eesis on kõige potentsiaalsem kasutada reoveesetteid põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel ning teistes valdkondades, näiteks ehitussektoris kasutamiseks on toodetavad kogused liiga väikesed [41].



Joonis 1.5 Reoveesetete teke Eestis

Hetkel on Eestis neli reoveepuhastusjaama, mis toodavad biogaasi. Nendeks on Tallinna Vesi AS, Kuressaare Veevärk AS (Kullimäe), Narva Vesi AS ja Tartu Vesi AS. Reoveepuhastusjaamades kasutatakse saadavat soojust ja elektrit omatarbeks ning võrku müümist ei toimu. Tallinna Vesi AS Paljassaare reoveepuhastusjaamas toodetakse 3 miljonit m<sup>3</sup> biogaasi aastas ning seda kasutatakse reoveepuhastusjaama ruumide kütmiseks ja tööprotsesside läbiviimiseks [8]. Kuna Eesti suuremate linnade reoveesetetest toodetud biogaas kulub täielikult ära omatarbeks, siis võib järeldada, et ka väiksemate linnade puhul ei saa arvestada selle tootmispotentsiaaliga kas biometaanitootmiseks või elektri tootmiseks võrku, kuna mahud ei ole piisavalt suured. Tööstusreovee käitlusjaamasid on kolm. Nendeks on Eastman Specialties OÜ, Salutaguse Pärmitehas ja Estonian Cell AS. Alates 2018. aastast toodetakse Estonian Cellis ka biometaanit, mis müüakse gaasivõrku. Eastman Specialties ja Salutaguse pärmitehas kasutavad biogaasist saadavat soojusenergiat omatarbeks ja elektrit võrku ei müüda [8]. Täpsemaid andmeid selle kohta, millistes Eesti toomissettevõtetes võiks potentsiaalselt tulevikus veel biogaasi toota hetkel puuduvad ning see jääb selle töö uurimiselast välja. Reoveesetteid tekib Eestis 18 990 t/a ning biometaanit saagis on harilikult 11-30 m<sup>3</sup>/t kohta [37].

### 1.1.7 Tooraine võrdlus

Tabel 1.4 kajastab ligikaudselt aastas tekkivat jäätmete hulka. Biojäätmete hulk on võetud *Stockholm Environment Institute* 2021. aasta uuringust „Toidujäätmete ja toidukao teke Eesti toidutarneahelates“. Läga ja sõnnikukogused on arvutatud vastavalt Statistikaameti 2022. aasta põllumajandusloomade arvu statistikale. Selle arvutuse

juures on arvestatud kõikide loomade üldarvuga ning pole arvestatud karja suuruste ja geograafilise paiknemisega, mis mõjutab oluliselt rajatavate biometaanijaamade toorainepotentsiaali, kuna vajalikud on suured karjad biometaanijaama vahetusläheduses. Tabeli koostamisel on kasutatava koguse hindamiseks tehtud järgnevad eeldused:

- Toidujääkide puhul on eeldatud, et tulevikus kasutatakse kuni 85% toiduainetööstuse jääkidest biogaasi tootmiseks (hetkel sorteeritakse 50% biojäätmest). See eeldus on võetud Rootsi näitel, kus 85% sorteeritud toidujäätmetest kasutatakse biogaasi toomiseks. Teistes Euroopa riikides läheb suur osa aga ka kompostiks [42].
- Läga ja sõnniku puhul on eeldatud, et praktikas kasutatav tooraine hulk on 66,7% kogu tooraine hulgast. See eeldus on võetud Rootsis 2019. aastal läbi viidud uuringu tulemustest lähtuvalt. Seal on läga ja sõnniku teoreetiliseks kogupotentsiaaliks hinnatud 4,2 TWh/aastas, kuid praktiliseks potentsiaaliks 2,8 TWh/aastas. Seal on ka välja toodud et 50% on tagasihoidlik optimistlik stsenaarium ja 80% läga ja sõnniku kasutamisest oleks väga optimistlik stsenaarium [43].

Eestis on kõige suurem potentsiaal toota biogaasi lögast ja sõnnikust ning biojäätmest. Reoveesetet potentsiaaliga ei arvestata, kuna olemasolevad jaamad kasutavad energia ära omatarbeks ja teised reoveepuhastusjaamad pole piisavalt suure mahuga. Tööstusheitvee kasutamine oleneb ettevõteteestest ja see jääb samuti selle uuringu alast välja. Põhku ja rohtset biomassi lisatakse biogaasijaamades enamasti väikestes kogustes.

Tabel 1.4 Eestis tekkivate jäätmete biometaanipotentsiaal

Tooraine liik	Tooraine üldmaht, t/a	Kasutamise potentsiaal, %	Kasutatav tooraine maht, t/a	Bio-metaani saagis m <sup>3</sup> /t	Viide	Teoreetiline biometaanisaagis, m <sup>3</sup> /a	Teoreetiline biometaanisaagis MWh/a	Viide
Läga ja sõnnik	3 653 240	66,7	2 329	6-22	[37]	36 550 666	385 610	[26][37] [43]
Bio-jäätmed	166 513	85	141 536	31-216	[37]	17 479 702	184 410	[30][37]

Vastavalt tabelile, on lögast ja sõnnikus ning biojäätmest võimalik biometaanitoota kokku üle 54 000 000 Nm<sup>3</sup>/a ehk ca 0,570 TWh/a. Kui aga arvestada, et 2022. aastal oli juba kasutusel 0,17 TWh/a [5] biometaanitootmist, siis järeldub, et kasutamata potentsiaal on 0,4 TWh/a.



Biometaanijaamade suurused sõltuvad tooraine liigist ja tooraine kättesaadavusest. Kui arvestada Eestis ühe biometaanijaama aastaseks keskmiseks toodanguks 35 GWh/a [44], siis vastavalt sellele oleks võimalik rajada ca 11 uut biometaanijaama. See on mõnevõrra väiksem arv varasemate uuringute tulemustest, kus näiteks Rohetiigri 2021. aasta „Energia teekaart 2021-2031-2040“ uuringus on välja toodud, et biometaani tootmiseks on eelistatud kasutada sõnnikut ja läga, riknenud loomasööta ja toidutööstuse jäätmeid ning arvutuslikuks kogupotentsiaaliks on 1-1,3 TWh biometaani aastas ehk kokku 20-30 biometaanijaama. Ka ADDVAL-BIOEC uuringu 2021. aasta tööpaketi 3 raportis „Uudsed võimalused Eesti biomajanduse väärtusahelate mitmekesistamiseks ja lisandväärtuse tõstmiseks“ on järeldatud, et Eesti biometaani potentsiaal lägast ja sõnnikust ning biojäätmetest on kokku 0,818 TWh, kuhu lisandub veel rohtne biomass, mida lisatakse juurde ca 10% [23]. Erinevused võivad olla tingitud erinevatest lähteandmetest tooraine koguse hindamisel. Eesti energiatarve on 2021. aasta seisuga: 8,3 TWh elekter, 2,4 TWh soojus elektrist, 12 TWh muu soojus, 0,1 TWh elekter transpordis ja 9,2 TWh transpordisektor [45]. 2022. aasta gaasi tarbimismaht oli 3,8 TWh, mis on läbi aastate madalaim tarbimine [6]. Seega saaks antud uuringu andmete põhjal biometaani abil (iometaani kogupotentsiaal 0,57 TWh/a) asendada kokku 15% maagaasi või 6,2% transpordikütuste tarbimisest.

## **1.2 Biogaasi ja biometaani tootmine**

### **1.2.1 Biogaasi tootmine**

Biogaasi toodetakse anaeroobse kääritamise teel. Biogaas koosneb 50 – 70% ulatuses metaanist (CH<sub>4</sub>), 30 – 40% süsinikdioksiidist (CO<sub>2</sub>) ja väiksemal määral teistest kõrvalkomponentidest, sisaldades 0-15% lämmastikku (N<sub>2</sub>), 0-3% hapnikku (O<sub>2</sub>), 0-200 mg/m<sup>3</sup> süsivesinikke, 0-10 000 ppm vesiniksulfiidi(H<sub>2</sub>S), 0-100 ppm ammoniaaki ja 0-41 mg/m<sup>3</sup> siloksaane. Koostisainete sisaldus sõltub sisendainest. Toodetud biogaasi ülemine kütteväärtus on 15 kuni 30 MJ/Nm<sup>3</sup> [46]. Mesofiilse kääritusprotsessi tagamiseks, tuleb hoida temperatuuri kääritis 35-40 °C juures. Termofiilse käärituse korral peab temperatuur olema kõrgem 50-55 °C. Praktikas kasutatakse enim temperatuurivahemikku 35-40 °C. Toorme viibeaeg reaktoris on harilikult vähem kui 25 päeva [21]. Protsess viiakse läbi neljas etapis: hüdroolüüs, atsidogenees, atsetogenees ja metanogenees [46].

Hüdroolüüsi käigus kasutatakse happelist katalüsaatorit, mille käigus lagundavad bakterid (bakteritsiidid, Clostridia ja bifidobakterid) biomassis sisalduvad suured orgaanilised polümeerid (valgud, rasvad ja süsivesikud) lihtsamateks ühenditeks

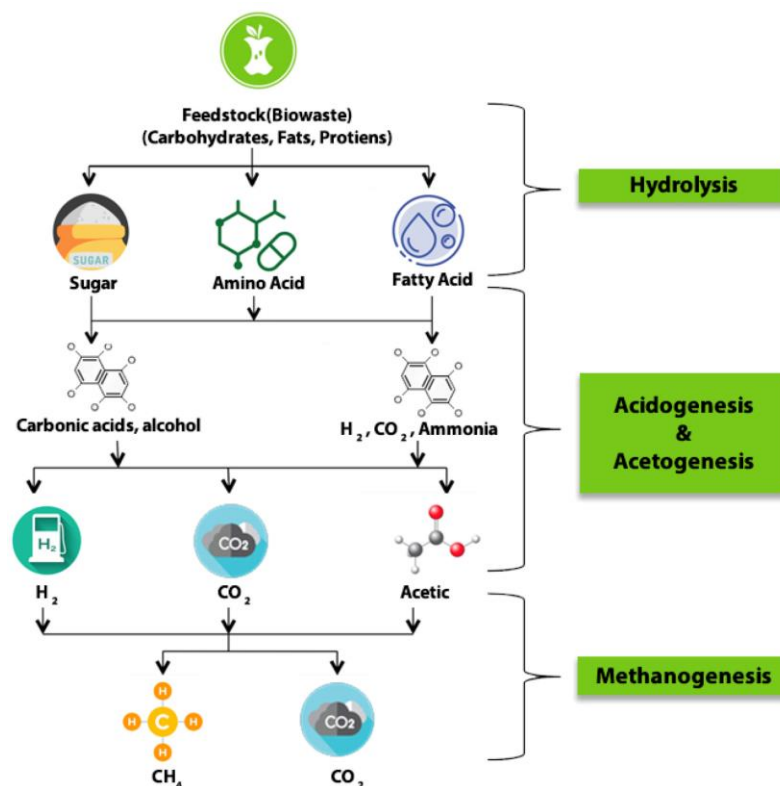
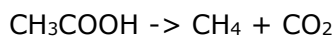
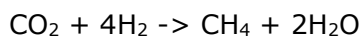
(suhkruteks, rasvhapeteks ja aminohapeteks). Hüdrolüüsi peamisteks saadusteks on atsetaat ja vesinik [17].

Atsidogeneesi käigus lagundatakse hüdrolüüsi tooteid edasi happelises keskkonnas bakterite toimel ning saadakse ammoniaak, süsinikdioksiid, vesiniksulfiid, alkohol ja muid jääksprodukte [17].

Atsidogeneesi saadused lagundatakse atsedogeneesi käigus anaeroobselt, saades äädikhappe, vesiniku ja süsinikdioksiidi [17].

Metanogenees on biogaasi tootmise viimane etapp, kus *Methanosarcina barkeri*, *Methanosaeta concilii* ja *Methanococcus mazei* bakterite toimel tekib atsedogeneesi produkti saadustest metaan ja CO<sub>2</sub>. Põhiliseks lähteaineks metaani toomisel on äädikhape ja vähesel määral ka süsinikdioksiid. Sobiva temperatuuri tagamiseks tuleb kasutada lisaenergiaallikat [17].

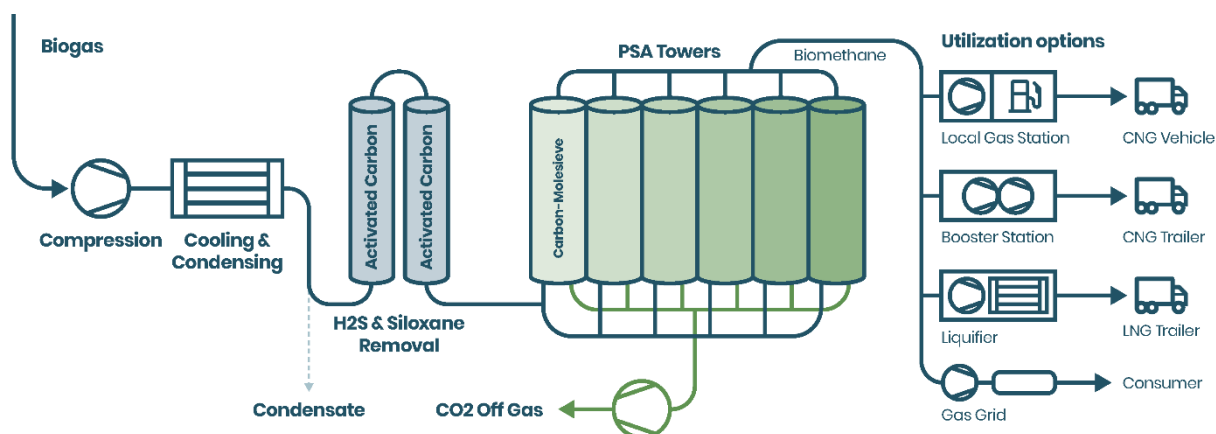
Protsessi tekkemehhanism on järgmine (Joonis 1.6) [17]:



Joonis 1.6 Biogaasi tekkeprotsess [47]

## 1.2.2 Biogaasi puhastamine biometaaniks

Selleks, et tõsta biogaasi energiatõhusust, on võimalik seda puhastada CO<sub>2</sub>-st ja toota biometaani. Biometaani eraldamine biogaasist on juba ennast tõestanud ja laialdaselt kasutust leidnud tehnoloogia, mida saab lisada nii uute kui juba töötavate biogaasijaamade juurde [48]. Puhastusprotsessi läbinud biometaan on oma omadustelt identne maagaasiga, sisaldades üle 97 mahu% metaani (CH<sub>4</sub>) [49]. Biogaasi saab harilikult otse põletada koostootmisjaamades, et toota võrku elektrit ja soojust. Selleks, et biogaasi kasutusvõimalusi laiendada, on võimalik biogaasist toota biometaani, et lisada maagaasivõrku kohalikkude ja keskkonnasõbraliku biometaani või komprimeeritud kujul kasutada transpordikütusena [48]. Tavaline puhastamata biogaas sisaldab ligikaudu 50-70% metaani (CH<sub>4</sub>), 30-50% süsinikdioksiidi (CO<sub>2</sub>) ja teisi komponente nagu vesiniksulfiid (H<sub>2</sub>S), lämmastikuühendeid (N<sub>2</sub>), hapnikku (O<sub>2</sub>), siloksaane, lenduvaid orgaanilisi ühendeid, süsinikmonoksiidi (CO), ja ammoniaaki (NH<sub>3</sub>), mis kõik tuleb eemaldada [50]. Joonis 1.7 on toodud biometaani tootmise põhimõtteline skeem.



Joonis 1.7 Biometaani tootmine [51]

**Veeauru eemaldamine** - biogaas sisaldab harilikult 1 kuni 5% veeauru, kuid see vähendab gaasi kütteväärtust ja veeauru kokkupuutel toksiliste ühenditega nagu vesiniksulfiid tekivad happed, mis põhjustavad korrosiooni ning võivad kahjustada torustikke ja mootoreid. Lisaks võib vesi madalate temperatuuride ja kõrge rõhu juures jääda ja ummistada või lõhkuda torustikud. Seetõttu tuleb üleliigne vesi süsteemist eemaldada [48]. Vee eemaldamiseks veeaur harilikult kondenseeritakse kasutades madalaid temperatuure või kõrget rõhku, aga kasutatakse ka muid füüsikalisi separatsioonimeetodeid nagu adsorptsioon või absorptsioon [52]. Adsorptsiooni puhul vesi adsorbeeritakse SiO<sub>2</sub>, sõelade või aktiivsöe abil. Absorptsiooni puhul kasutatakse vee absorbeerimiseks glükoolilahuseid, näiteks etüleenglükooli, dietüleenglükooli või

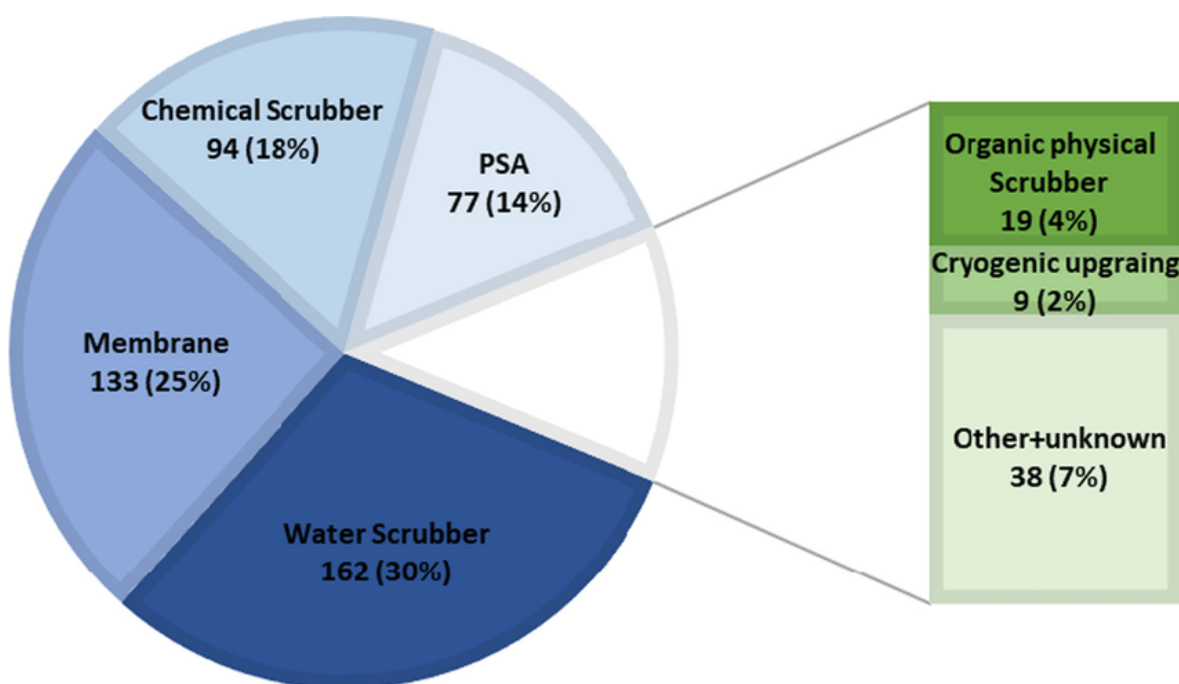
trietüleenglükooli [53]. Füüsikalise separatsiooni meetodid on veel näiteks tsüklonid, mis kasutavad tsentrifugaaljõudu veepiiskade eraldamiseks [52].

**Vesiniksulfiidi eemaldamine** - biogaasis sisalduv vesiniksulfiid ( $H_2S$ ) on toksiline, korrosiivne ning ebameeldiva lõhnaga.  $H_2S$  kahjustab torustikke, gaasimahuteid, kompressoreid ja teisi seadmeid [54]. Biogaasi põletamisel reageerib vesiniksulfiid veega ja moodustub vääveldioksiid ( $SO_2$ ), mis muudab suitsugaasid söövitavaks ja põhjustab happevihmasid. Mittetäieliku põlemise korral võib mürgine  $H_2S$  eralduda atmosfääri. Vesiniksulfiidil on tõsine mõju inimeste tervisele ja kui selle kontsentratsioon õhus on üle 450 ppm või ( $>5 \text{ ml/m}^3$ ), võib see põhjustada surma või kahjustada hingamisteid ja silmi.  $H_2S$  kontsentratsioon biogaasis sõltub tooraine valgusisaldusest - taimsete jäätmete puhul on see madalam ja valgurikaste toorainete puhul kõrgem [52]. Lihtsaim ja kulutõhusaim meetod  $H_2S$  sisalduse vähendamiseks gaasis on hapniku või õhu lisamine otse kääritsesse. *Thiobacillus* bakterid tarbivad oksüdeerunud  $H_2S$  ning muudavad selle väiksemateks molekulideks. Lisatud hapniku või õhu kogus peab olema võimalikult optimaalne, kuna liigne hapnikukogus pärsib anaeroobset kääritusprotsessi [52]. Vesiniksulfiidi eemaldamiseks on veel teisi meetodeid, näiteks sadestamine, adsorptsioon, keemiline adsorptsioon, membraaneraldus ja bioloogiline töötlemine. Sadestamine on meetod, kus rauasool lisatakse otse kääritsesse. Raudhüdrosiidide või kloriidide lisamine otse kääritsesse põhjustab raudsulfiidide moodustumist, mis vähendab  $H_2S$  kontsentratsiooni [48].  $H_2S$  eemaldamiseks adsorptsiooni meetodil saab kasutada aktiivsütt, kuid sel juhul on vaja lisada kääritsesse eelnevalt 4-6% hapnikku. Membraanipõhiseks eraldamiseks kasutatakse tavaliselt polüimiidi, polüsulfooni ja tselluloosatsetaadi polümeerseid membraanmaterjale [53]. Vesiniksulfiidi keemiliseks eemaldamiseks kasutatakse naatriumhüdrosiidi ( $NaOH$ ) või kaltsiumhüdrosiidi ( $Ca(OH)_2$ ), mille tulemusel moodustuvad väävelsoolad [52].

**Lenduvate orgaaniliste ühendite eemaldamine** - harilikult on lenduvate orgaaniliste ühendite sisaldus (VOC) puhastamata biogaasis kuni 1 mahu%. Lenduvad orgaanilised ühendid jagunevad erinevatesse keemilistesse kategooriatesse, nagu aromaatsed ühendid, alkaanid, alkoholid, halogeenid, väävliühendid, karbonüülid ja siloksaanid [52]. Siloksaanid sisaldavad räni-hapniku sidet (Si-O) ja igapäevaelus kasutatakse neid näiteks deodorantides [53]. Põlemisprotsessi tekkiv  $SiO_2$  ja mikrokristalliline kvarts sadestuvad mootori pindadele ja süüteküünaltele ning põhjustavad probleeme mootorite töös [52]. Halogeenitud ühendid on näiteks süsinikklorobenseen, tetrakloriid, trifluormetaan ja kloroform. Need ühendid võivad kokkupuutel veega moodustada happeid (nt vesinikfluoriidhape või vesinikkloriidhape) ja põhjustada korrosiooni [53]. Lenduvad orgaanilised ühendid kahjustavad seadmeid,

põhjustavad negatiivset keskkonnamõju, kasvuhoonegaaside teket, põhjavee saastumist. Lisaks on VOC-id ebameldiva lõhnaga ning kahjustavad inimese tervist [52]. Lenduvate orgaaniliste ühendite eemaldamiseks on üks sobiv meetod adsorptsioon kasutades aktiivsütt [53]. Siloksaane saab eemaldada keemilise adsorptsiooni teel, kasutades väävelhappe ja lämmastikhappe segu või kasutades aktiivsöe adsorptsiooni meetodit [52].

**Süsihappegaasi eemaldamine** - hetkel on kommertsiaalses kasutuses olevad süsihappegaasi eemaldamise tehnoloogiad (Joonis 1.8): veega pesemine (inglise k *Water Scrubbing*), rõhu adsorptsioon (inglise k. *Pressure Swing Adsorption*), orgaaniline puhastus (inglise k. *Organic Scrubbing*), keemiline puhastus (inglise k. *Chemical Scrubbing*) ning membraanpuhastus (inglise k. *Membrane Separation*). Vähem on kasutatud leidnud krüogeenne eraldamine (inglise k. *Cryogenic Sepration*), bioloogiline separeerimine ning hübriidlahendused [48].



Joonis 1.8 Biogaasi puhastustehnoloogiad [55]

**Vesipuhastustehnologia** põhiprintsiip on see, et vastavalt Henry seadusele on süsinikdioksiidi (CO<sub>2</sub>) ja metaani (CH<sub>4</sub>) lahustuvus vees erinev. CO<sub>2</sub> lahustuvus on tavatingimustes kuni 26 korda kõrgem kui CH<sub>4</sub> [49]. Adsorptsiooni massiülekanne intensiivistamiseks ja faasidevahelise kontakti suurendamiseks kasutatakse täitematerjale. Teine oluline parameeter on temperatuur, kuna protsess on efektiivsem madalamatel temperatuuridel, seega võib suveperioodidel vajalik olla süsteemi jahutamine [48]. Veepuhastus on üks lihtsamatest tehnoloogiatest. Selle peamiseks

eeliseks on kõrge metaani puhtuseaste, väiksed kaod ja madalad hoolduskulud. Puuduseks on aga tohutu veekulu ning komprimeerimiseks ja jahutamiseks vajalik lisaenergia [50].

**Orgaanilise puhastuse** põhimõtte on sama, mis vesipuhastusel, selle erinevusega, et vee asemel kasutatakse orgaanilist lahustit, nagu näiteks dimetüületrit, polüetüleenglükooli või metanooli. Turul on mitmeid levinud segusid, näiteks Selexol, mis on polüetüleenglükooli dimetüüleetrite segu [54]. Negatiivne külg on see, et CO<sub>2</sub> lahustuvus on nii kõrge, et lahustit on raske regenereerida ning selle jaoks on vaja kõrgeid temperatuure [48].

**Keemiline absorptsioon** sarnaneb vesipuhastusmeetodiga, kuid reaktsioon toimub keemilise lahusti ja neeldunud gaaside vahel. Lahustitena kasutatakse orgaanilisi amiine, nt monoetanoolamiin, dietanoolamiin, metüüldietanoolamiin ja diglükolamiin [49]. Keemilise absorptsiooni puhul CO<sub>2</sub> neeldumine intensiivistub temperatuuri tõusuga, seega on vajalik lisasoojuse andmine [54]. Keemilise absorptsiooni eeliseks võrreldes vesipuhastusega on kiirem protsess ja suurem CO<sub>2</sub> absorbeerimisvõime. Lisaks töötavad lahustid atmosfäärirõhul, seega komprimeerimiseks kulub lisaenergia on väiksem. Probleeme põhjustab aga lahusti sadestumine, selle käsitlemine ning samuti amiini vahutamine või mürgistumine [50].

**Rõdu adsorptsiooni** põhimõtte seisneb selles, et poorsest materjalist adsorbent adsorbeerib van der Waalsi jõudude abil gaasisegust CO<sub>2</sub> adsorbendi pinnale ning rõhu muutumisel CO<sub>2</sub> eraldub. See on võimalik tänu CO<sub>2</sub> ja CH<sub>4</sub> molekulide suuruse erinevustele [49]. Adsorbeerivad materjalid peavad olema suure pindalaga väga poorsed tahked ained [54]. Kõige levinumad adsorbendid on süsinik ja tseoliidid. Selle meetodi eeliseks on kõrge gaasikvaliteet, kuiv protsess, madal energiavajadus ja kemikaalide puudumine. Puuduseks on protsessi keerukus ja suure CH<sub>4</sub> kontsentratsiooniga heitgaasivoo tekkimine, mis nõuab lisatöötlust [50].

**Membraaneparatsiooni** tehnoloogia puhul kasutatakse CO<sub>2</sub> eraldamiseks metaanivoost spetsiaalsetest õõneskiududest valmistatud membraanmoodulitest. Membraan on tavaliselt valmistatud polümeersest materjalist nagu polüsulfiid, polüimiid või polüdimetüülsiloksaan, mis paiknevad roostevabast terasest torudes. Membraanmaterjalid on väga hea CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> selektiivsusega ning sobivad ideaalselt gaaside eraldamiseks. Mikropoorid lasevad läbi ainult CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ja NH<sub>3</sub>, kuid CH<sub>4</sub> läbi ei lase [49]. Suurepärane CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> selektiivsus muudab need ideaalseks materjali eraldamiseks. Need membraanid lasevad mikropooridest läbi ainult CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ja NH<sub>3</sub>,

samas kui CH<sub>4</sub> läbib membraani ilma eemaldamata. Membraantehnoloogia eelised on protsessi lihtsus, madal energiakulu ja madalam hind. Puuduseks on vajadus eelpuhastuse järele ning madal CH<sub>4</sub> puhtus [50]. Membraantehnoloogiat kasutatakse ka mitmetes Eesti biometaanijaamades. Näiteks Bioforce OÜ kasutab membraantehnoloogiat [56]. Samuti on see kasutusel OÜ Oisu Biogaasijaam, OÜ Vinni Biogaasijaam ning OÜ Tartu Biogaas tootmisjaamades [57].

**Krüogeense separeerimise** tehnoloogia on praegu veel arendusfaasis. Põhiprintsiip on see, et iga biogaasi komponent kondenseerub erinevatel temperatuuridel. Kui gaasisegu jahutatakse temperatuurini -100 °C ja komprimeeritakse, siis CO<sub>2</sub> veeldub, samas kui CH<sub>4</sub> jääb gaasiliseks [54]. See krüogeenne protsess nõuab aga suuri investeeringuid, kuna jahutamiseks kulub palju energiat ning tehnoloogia ei ole ikka veel täielikult kommertsiaalses kasutuses [50].

**Bioloogilise separeerimise** üheks meetodiks on kemoautotroofne protsess, kuhu lisatakse H<sub>2</sub>, et muundada süsinikdioksiid metaaniks vastavalt keemilisele reaktsioonile:  $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\Delta G = -131 \text{ kJ}$ ) hüdrogenotroofsete metanogeensete bakterite abil. Teiseks bioloogiliseks meetodiks on näiteks fotoautotroofne meetod, mis viiakse läbi fotobioreaktorites, kus CO<sub>2</sub> eemaldatakse mikrovetikate ja prokarüootsete tsüanobakterite abil [58].

**Hübriidlahendused** - igal biogaasi puhastusmeetodil on oma plussid ja miinused ning seetõttu on uuritud hübriidlahendusi, kus erinevad biogaasipuhastamistehnoloogiad on omavahel kombineeritud, näiteks membraan-krüogeenne tehnoloogia, et muuta puhastusprotsess kiiremaks [58].

Kokkuvõttes, on membraanseparatsioon, vesipuhastus ja keemiline puhastus kõige levinumad biometaani puhastustehnoloogiad ning nende osakaal 2019. aastal oli 74% kõikidest Euroopas kasutusel olevatest tehnoloogiatest [59]. Bioloogiline, krüogeenne ja hübriidpuhastus on aga hetkel arendusjärgus olevad tehnoloogiad [58]. Praegune arendustöö on eelkõige suunatud süsiniku salvestamise tehnoloogiate väljatöötamiseks [46]. Tehnilised parameetrid ja kapitalikulud on võetud uuringust ADDVAL-BIOEC 2021. aasta töopaketi 3 raport „Uudsed võimalused Eesti biomajanduse väärtusahelate mitmekesistamiseks ja lisandväärtuse tõstmiseks“. ning selle tulemused on kirjeldatud Tabel 1.5.

Tabel 1.5 Biometaaniseparatsioonisüsteemi parameetrid [23]

Parameeter	Absorptsioon veega	Absorptsioon orgaaniliste lahustitega	Absorptsioon amiiniga	Kõikuvrõhk-adsorptsioon	Membraanlahutus
Tüüpiline puhasti suurus, m <sup>3</sup> /h	200–1200	300–1500	400–2000	300–800	50–500
Tüüpiline metaani sisaldus biometaanis, mahuprotsent	95,0–99,0	95,0–99,0	> 99,0	95,0–99,0	95,0–99,0
Metaani saagis, %	98	96	99,96	98	80–99,5
Tüüpiline väljundrõhk, bar	4–8	4–8	0	4–7	4–7
Elektrienergia vajadus [kWh <sub>el</sub> m <sup>-3</sup> biometaan]	0,46	0,49–0,67	0,27	0,46	0,25–0,43
Kütmise vajadus ja temperatuur	–	Keskmine, 70–80 °C	Suur, 120–160 °C	–	–
Väävliärastuse vajalikkus	Protsessist sõltuv	Jah	Jah	Jah	Jah
Kulumaterjalid	Vahutamisvastane aine, kuivatusagens	Orgaaniline lahusti (mitteohtlik)	Amiini lahus (ohtlik, korrosiivne)	Aktiivsüsi (mitteohtlik)	

### 1.3 Alternatiiv: biomassi termokeemiline gaasistamine

Erinevalt biometaanis tootmisest anaeroobse kääritamise meetodiga, kus toorainena kasutatakse „märgasid biojätmeid“, sh põllumajandusjääke, läga ja sõnnikut, biojätmeid, reovett jm, siis biometaanis tootmisel biomassi termokeemilise gaasistamise teel on tooraineks enamasti „kuivad biojätmed“ ehk lignotselluloossed põllumajandus- ja metsandusjäägid, tselluloosne materjal ja saepuru ning mõningatel juhtudel ka olmejätmeid [60]. Anaeroobse kääritamise puhul on tavaliselt tahkete osakeste sisaldus alla 30%, kuid termokeemilise töötlemise puhul on tahkete osakeste hulk üle 70% [60]. Hüdrotermiline (ülikriitiline) gaasistamise abil on võimalik töödelda ka märga biomassi sealhulgas orgaanilisi jätmeid ja jääke [61].

Biomassi gaasistamist saab jagada kaheks etapiks: gaasistamine ja metaneerimisprotsess [62].

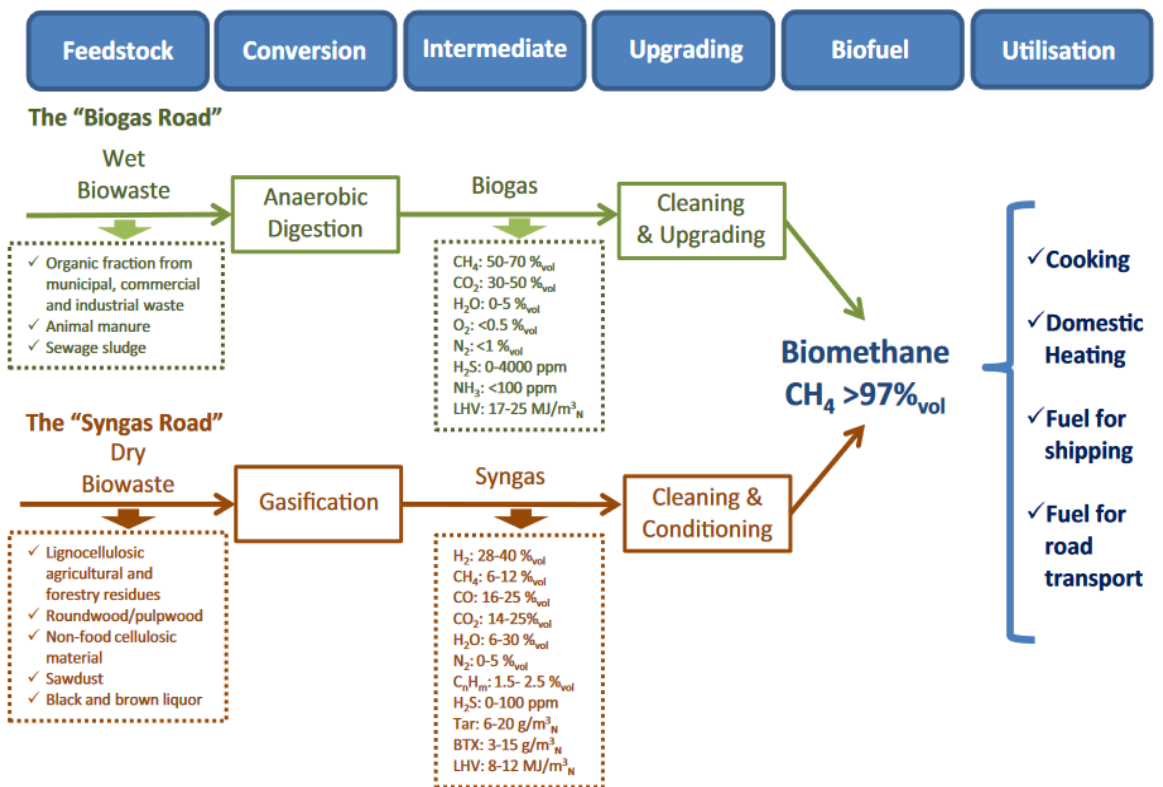
1. Gaasistamise käigus puidumassi lagundatakse esmalt kõrgel temperatuuril (700–800 °C) juures kõrgel õhul ja madala hapnikusisaldusega keskkonnas ning saadakse gaaside segu, mis sisaldab peamiselt CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ja veeauru [63]. Peale seda



tekkinud süngaas jahutatakse ning see läbib filtrid ja gaasipesurid, et eemaldada tõrv, vesi, kloriidid, H<sub>2</sub>S ja ülejäänud tahked osakesed [62].

- Teine etapp on metanatsiooniprotsess, mis viiakse läbi katalüütilises reaktoris. Kuna CH<sub>4</sub> sisaldus süngaasis on suhteliselt madal, tuleb läbi viia metaneerimisprotsess, mille käigus saab CO ja H<sub>2</sub> muuta metaaniks. Täiendav vajadus töötlemise järele vähendab aga protsessi efektiivsust ning suurendab ka investeringukulusid. Selle protsessi eeliseks on aga võimalus toota biometaanu suuremas mahus [62]. Biomassi gaasistamine biometaanu tootmiseks ei ole veel tehnoloogilist küpsust saavutanud tehnoloogia [64].

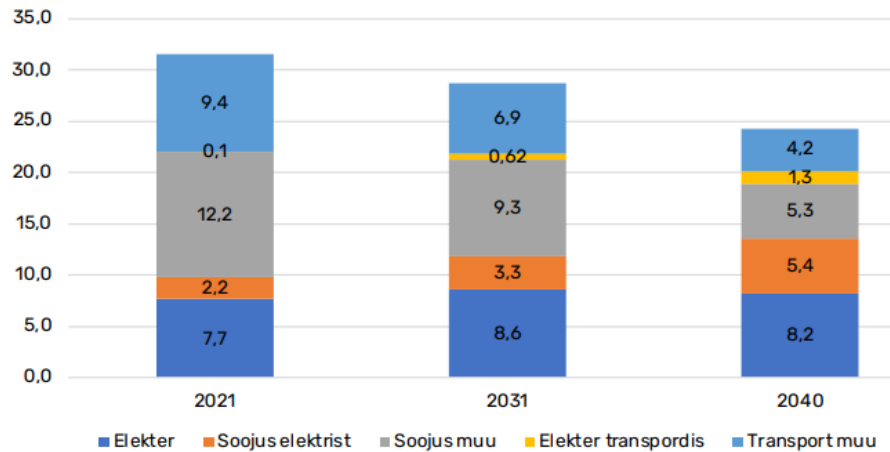
Anaeroobse ja termilise gaasistamise tehnoloogiate ülevaade on toodud Joonis 1.9.



Joonis 1.9 Anaeroobne käärivamine VS gaasistamine [60]

## 1.4 Biogaasi kasutusvaldkonnad

Rohetiigri Energia teekaardi on modelleeritud tulevikuprognosid ning need prognoosivad energiatarbimise vähenemist just tänu hoonete energiatõhusamaks muutmisele, inimeste teadlikkuse tõstmisele, suurema kasuteguriga tehnoloogiate kasutuselevõtule ja primaarenergia võimalikult otsesele kasutamisele, et vältida energiamuundamistest tulenevaid suuri kadusid (Joonis 1.10) [24].



Joonis 1.10 Energiatarbimise prognoos kuni aastani 2040 (TWh) [24]

Biometaani saab kasutada nii kodumajapidamistes toidu valmistamiseks, koostootmisjaamas elektri ja soojuse tootmiseks kui ka komprimeeritult surubiometaanina transpordikütusena (CBM) või veeldatud kujul transpordikütusena (Bio-LNG). Tuleviku vaates arendatakse ka biokütuste kasutamist lennunduses. Lisaks võib biomass asendada ka fossiilkütuseid innovaatiliste toodete tootmisel, nt väärtuslikud kemikaalid või teised biotooted [17].

Kuna biomass on siiski limiteeritud ressurss, siis tuleb seda kasutada seal, kus selle kasutamine on kõige efektiivsem ja kus on suurim võimalus dekarboniseerimiseks või ka sektorites, kus dekarboniseerimiseks muid alternatiive ei leidu. Tuleb jälgida, et bioressursi kasutamisel ei tekiks keskkonnale varjatud negatiivseid tagajärgesid. Esmalt tuleb selgeks teha, mis raamistiku alusel on kõige parem hinnata, milline on kõige „parem“ või optimaalsem biomassi kasutamise viis. Selle hindamiseks tuleb välja selgitada, millised tehnoloogiad üldse on olemas teatud sektori dekarboniseerimiseks, näiteks transpordisektoris on alternatiiviks elektrifitseerimine. Muudel juhtudel sõltub see tehnilisest piirangutest ja ka saadava tooraine omadustest (koostisosad, niiskusesisaldus, saasteained), tehnoloogilisest valmidusest ja hinnast. Seetõttu tuleb poliitika kujundamiseks valida kõige optimaalsem tee sõltuvalt sellest mis on kõige kuluefektiivsem, energiatõhusam ja tehniliselt teostatav viis biomassi kasutamiseks. Energeetikasektoris on ka tähtsal kohal innovatsioon, et leida uusi viise biomassi efektiivseks kasutamiseks. Arenenud tehnoloogitakse peetakse gaasistamist, pürolüüsitehnoloogiat, hüdrotermilist veeldamist või alkoholide kasutamist, mis on võtmetähtsusega tulevikutehnoloogiad ning mis võimaldavad muundada madalakvaliteetse lähtaine kvaliteetseks produktiks ning samal ajal täita kliimaeesmärke [65].

### 1.4.1 Transpordisektor

Euroopa Liidu Taastuvenergia Direktiivi (2018/2001/EU) RED II üheks põhieesmärgiks on, et 14% transpordikütustest peavad igas liikmesriigis olema taastuvkütused [2]. Biometaani roll tuleviku energiasüsteemis võiks olla eelkõige raskeveokite, laevanduse ja tulevikus ehk ka lennukikütusena tänu CBM-i ja bio-LNG suurele energiatihedusele. Neid sektoreid on kõige raskem elektrifitseerida ning seetõttu on see potentsiaalne tulevikustsenaarium [61]. Eestis tarbiti 2020. aasta seisuga transpordikütuseid üle 9.0 TWh ning taastuvenergia moodustas transpordisektoris 12.2%. Samas oli Euroopa Liidu liikmesriikide keskmine taastuvenergia osakaal transpordisektoris 10.2%. Riik on otsustanud 14% taastuvenergia kasutamise transpordisektoris katta eelkõige biometaaniga ehk plaanis on toota 350 GWh (0,35 TWh) biometaani [6]. Tuleb tähelepanu juhtida, et maagaasi (mida on võimalik biometaaniga asendada) kasutatakse peamiselt soojus- ja elektrienergia tootmiseks ning vaid alla 2% kasutatakse maismaatranspordis [66]. Peamisteks transpordikütusteks just maismaatranspordi puhul on endiselt bensiin ja diisel. Lisaks maismaatranspordile kasutatakse bensiini ja diiselkütust veel põllumajanduses, ehituses, laondus- ja kulleriteenuste pakkumisel ning kodumajapidamistes [66].

Metaani kütteväärtus on 50 MJ/kg standardtingimustel. Tabel 1.6 on toodud biometaani omadused nii standardtingimustel, komprimeeritud kui veeldatud kujul. Komprimeerimise ja veeldamise tulemusena biometaani energiasisaldus mahuühiku kohta suureneb, kuid tuleb arvestada, et veeldamise puhul kulub kuni 20% primaarenergiat veeldamise peale [23]. Võrdluseks, diisli energiasisaldus on 36 GJ/m<sup>3</sup>, mis on võrdne 4 m<sup>3</sup> komprimeeritud biometaaniga ja 1,7 m<sup>3</sup> veeldatud biometaaniga [23]. Bensiini energiasisaldus on 32 GJ/m<sup>3</sup>, mis on võrdne 3,53 m<sup>3</sup> komprimeeritud biometaaniga ning 1.51 m<sup>3</sup> veeldatud biometaaniga [23]. Puhta metaani energiasisaldus on 35,7 MJ/m<sup>3</sup> kohta, kuid biogaasi energiasisaldus on 16-23 MJ/m<sup>3</sup> olenevalt koosisest [67].

Tabel 1.6 Komprimeeritud ja veeldatud biometaani omadused

	<b>Gaasiline biometaan standardtingimustel (15°C; 1,01325 bar)</b>	<b>Komprimeeritud biometaan (15°C; 250 bar)</b>	<b>Veeldatud biometaan (-162°C; 1,01325 bar)</b>
Biometaani ruumala m <sup>3</sup>	1	1	1
Metaani kontsentratsioon, maht%	97	97	99,995%
Metaani ruumala, m <sup>3</sup>	0,97	0,97	0,99995
Metaani tihedus kg/m <sup>3</sup>	0,97	0,97	0,99995
Metaani mass, kg	0,66	181,27	424,12
Biometaani energiasisaldus, MJ	32,96	9 063	21 206

Komprimeeritud biometaani hoiustamiseks ja transpordiks kasutatakse mobiilseid mahuteid. Gaasiballoonid on valmistatud terasest või komposiitmaterjalidest ning biometaan on seal 200 - 250 baarise rõhu all. Sealt transporditakse need surugaasitanklatesse [23]. Surugaasitanklaid on kahte tüüpi. Esiteks kiirtanklaid, mis on sarnased ka teiste vedelkütuste tanklatega ning seal tangitakse surugaasi hoiupaakidest. Teine variant on nn „aeglane tankla“, kus biometaani tangitakse otse kompressorist, kasutades vahe puhvermahutit, kuid selliseid süsteeme kasutatakse vähem ning tankimine võtab rohkem aega [23]. Turul on saada erinevaid (bio)metaanil sõitvaid sõidukeid, sh sõiduautod, veokid ning bussid. Gaasibusse kasutatakse mitmel pool maailmas linnades ühistranspordis, sh ka Tallinnas ja Tartus [23].

Biometaani kasutavaid sõidukeid on erinevaid [23].

- 1) Puhtalt metaani peal sõitvad sõidukid, kus kasutatakse Otto mootoreid [67].
- 2) Kahte kütust kasutavad sõidukid, kus kasutatakse paralleelselt kahte kütusesüsteemi: ühte metaani ja teiste bensiini jaoks. Tihtipeale on põhikütuseks metaan ja väiksem paak bensiini jaoks on varukütuseks [67].
- 3) Kahte kütust kasutavad sõidukid, kus kasutatakse diiselmootoreid. Seejuures diislit kasutatakse süütamise jaoks ning seejärel kasutatakse gaasi. Peamiselt kasutatakse selliseid mootoreid raskeveo sõidukite puhul [67].

IEA bioenergia 2021. aasta aruande kohaselt on biometaani sõidukite elutsükli hind 15%-20% kallim võrreldes bensiini ja diiselsõidukitega. LNG-d kasutavate sõidukite elutsüklihind on aga samas suurusjärgus diiselsõidukitega. Tallinna linnaliinibussi aastane läbisõit on ca 90 000 km [68] CNG kütusekuluks arvestatakse ca 25 kg /100 km [69]. Aastas teeb see 22500 kg CNG-d ehk ca 300 MWh ühe busi kohta. [70]. Arvestades, et Eesti aastane transpordikütuste tarbimine on üle 9 TWh/a ning aastaks 2030 on plaanis 14% ulatuses kasutada transpordisektoris taastuvkütuseid ning riik plaanib 350 GWh sellest katta biometaaniga, siis see tähendab, et Eestis peaks kokku olema üle 1166 gaasibussi või muu sõiduki, et 350 GWh energiat ära tarbida. Hetkel on Tallinnas ca 469 ja Tartus 64 linnaliinibussi, mis sõidavad gaasiga.

### **1.4.2 Põllumajandus**

2021. a võttis Euroopa komisjon vastu kliima- ja energiaalase seadusandluse paketi (inglise k. „Fit for 55“), mille eesmärk on viia Euroopa Liidu kliima- ja energia valdkonna õigusaktid vastavusse -55% eesmärgiga aastaks 2030, eesmärgiga saavutada sujuv üleminek kliimaneutraalsusele aastaks 2050 [71]. Samuti võeti vastu Jõupingutuste jagamise määrus 2021-2030 (inglise k. *Effort Sharing Regulation*), mis hõlmab ka neid sektoreid, mis ei kuulu Euroopa Liidu heitmetega kauplemise süsteemi (inglise k. *EU Emissions Trading System*). Nendeks sektoriteks on transport, põllumajandus, hooned,

tööstus ja jäätmed, mis moodustavad 60% koguemissioonidest [72]. 2019. aastal võeti EL-s vastu ka väetisetoote määrus, mis on suunatud orgaanilistest materjalidest (kompost ja kääritusjäätmed) toodetud väetiste kättesaadavamaks tegemisele. Need Euroopa Liidu määrused soodustavad kõik säästva põllumajanduse rakendamist ning seonduvalt ka biogaasi laiemat kasutuselevõttu [1]. Heitkoguseid on planeeritud vähendada väetiste kasutamisel ja loomakasvatuses, samas panustatakse ka süsiniku sidumisele muldadesse ja metsadesse. Ka liha vähenemine toidulaualt ning asendumine taimse toiduga aitab põllumajanduse heitkoguseid vähendada. Samuti tarbitakse põllumajandussektoris palju kütuseid, mida oleks võimalik samuti asendada kohapeal saadaoleva biometaaniga [71].

### **1.4.3 Eluhooned**

Euroopa direktiivi kohaselt peavad alates 2030. aastast peavad ehitatavad hooned olema nullenergiahooned. Üheks võimaluseks on vahetada hoonete kütmisel kasutatav maagaas biogaasi vastu. Teine variant hoonete dekarboniseerimiseks on kasutada hübriidsoojuspumpasid ühendades elektri ja biogaasi [61]. 2023. aasta veebruaris võeti vastu direktiiv, mis käsitleb hoonete dekarboniseerimist. Seejuures on potentsiaal ka kasutada biogaasi ja biometaani hoonete kütteks. Hooned on Euroopa Liidu suurimad energiatarbijad, hõlmates 36% CO<sub>2</sub> emissioonidest ja 40% koguerenergia tarbimisest, millest omakorda 60% kulub küttele. Seetõttu on heaks lahenduseks hübriidsoojuspumbad või biogaasi katlamajad, mis on juba väljatöötatud taskukohased tehnoloogiad [73]. Statistikaameti 2021. aasta andmete järgi moodustasid tahked biokütused (küttepuit ja ostetud soojusenergia ehk kaugküte kõige suurema osa eluhoonete energiaallikatest [66].

### **1.4.4 Tööstus**

Tööstusheitmete vähendamiseks on mitmeid võimalusi. Madalatemperatuuriliste protsesside puhul on võimalik kasutada elektrifitseerimist, kuid kõrgetemperatuuriliste protsesside puhul tuleb kas kasutusele võtta süsinikupüüdmise tehnoloogiad või kasutada biokütuseid [61]. 2021. aastal tarbiti tööstussektoris enim maagaasi 1,27 TWh ning vähese määral 0,01 TWh tarbiti ka biogaasi [66].

### **1.4.5 Vesinik**

Hetkel on aga vesinikuga seonduvad uuringud ja arendused intensiivsemad kui kunagi varem ning 2023. aastal valmis ka Eesti vesiniku teekaart, milles määratleti vesiniku roll kliimaeesmärkide saavutamisel [74]. Vesiniku tootmiseks on mitmeid võimalusi ja hetkel on kommertsiaalses kasutuses metaani aurureformimise tehnoloogia, kuna seal

on lähteaineks maagaas (fossiilne kütus), siis nimetatakse seda halliks vesinikuks. Kui tootmise käigus kasutada süsinikupüüdmise tehnoloogiaid, siis saab seda nimetada siniseks vesinikuks. Rohelist vesinikku saab toota taastuvenergia abil toodetud elektrist vee elektrolüüsi teel. Selleks, et biogaasijaamas toota vesinikku, peab toodang olema üle 400 m<sup>3</sup>/h. Biometaanist on võimalik toota vesinikku näiteks biometaani reformimise, osalise oksüdatsiooni või krakkimise (lagundamise) teel. Reformimise ja osalise oksüdeerimise käigus tekib süngaas, kuid krakkimise järel tekib tahke süsinik [75]. Bioloogilistes materjalides on umbes 6–6,5% vesinikku, mida on võrreldes maagaasiga (25%) palju vähem. Biomassist vesiniku tootmine ei ole ka kõige kuluefektiivsem ning rohelisem variant, sest biomassis on nii süsiniku-, lämmastiku- kui ka väevliühendeid, millest puhastamiseks tuleb kulutada lisaenergiat ning kapitali [76]. Tänapäevase tehnoloogiaga kaasnevad vesiniku muundamisel ja salvestamisel märkimisväärsed kaod ning lahendamata on jaotuse ja hoiustamisega seotud küsimused [74].

#### 1.4.6 Elekter ja soojusenergia

Biometaani jaamad võivad tulevikus olulist rolli mängida tipukoormuste katmisel, pakkudes stabiilset elektrienergiat teiste juhitamatute taastuvenergiaalade kõrval [61]. Biogaasist ja biometaanist on võimalik toota soojust ja elektrit CHP jaamas või toota biometaani gaasivõrku [77]. Biogaasist elektri tootmine aitaks kohalikul tasandil vähendada ka kuni 10% võrgukadudest, kuna biogaas on lokaalne ning see aitab edendada ka hajaenergeetikat [78].

#### 1.4.7 Kasutusvaldkondade võrdlus

Tabel 1.7 on kirjeldatud 2021. aasta andmed kütuste tarbimise kohta transpordisektoris, põllumajanduses, eluhoonetes ja tööstuses. Kütuste tarbimise andmed pärinevad Statistikaameti kodulehelt KE062 ning põllumajanduse ja metsanduse, elamute ja tööstuse andmed pärinevad Statistikaameti veebilehelt KE0230 [66].

Tabel 1.7 Kütuste tarbimine Eestis 2021. a

Kütuseliik	Põllumajandus ja metsandus	Kodumajapidamised	Maismaatransport	Tööstus
Maagaas, GWh	138,0	791,7	7,6	1274,7
Vedelgaas (propaan, butaan), t	1000,0	3 400,0	1,4	3 700,0
Gaasiõli ja diisliõli, v.a biokütuse osa, t	60 000,0	1000,0	-	1 700,0
Biogaas, GWh	-	-	135	10,8
Raske kütteõli, t	3 000,0	-	-	1 600,0
Soojusenergia, GWh	19,4	3 722,2	-	476,9

Kütuseliik	Põllumajandus ja metsandus	Kodumajapidamised	Maismaa-transport	Tööstus
Elektrienergia, GWh	156,0	2229,0	50	2210,0
Diisli-kütus, t	-	-	273 900	-
Auto-bensiin, t	-	-	15 900	1000,0
Primaarsed tahked biokütused (sh küttepuit), GWh	38,3	4511,1	-	186,7
Mittetaastuvast toorainest tööstusjäätmed, GWh	-	-	-	0,6

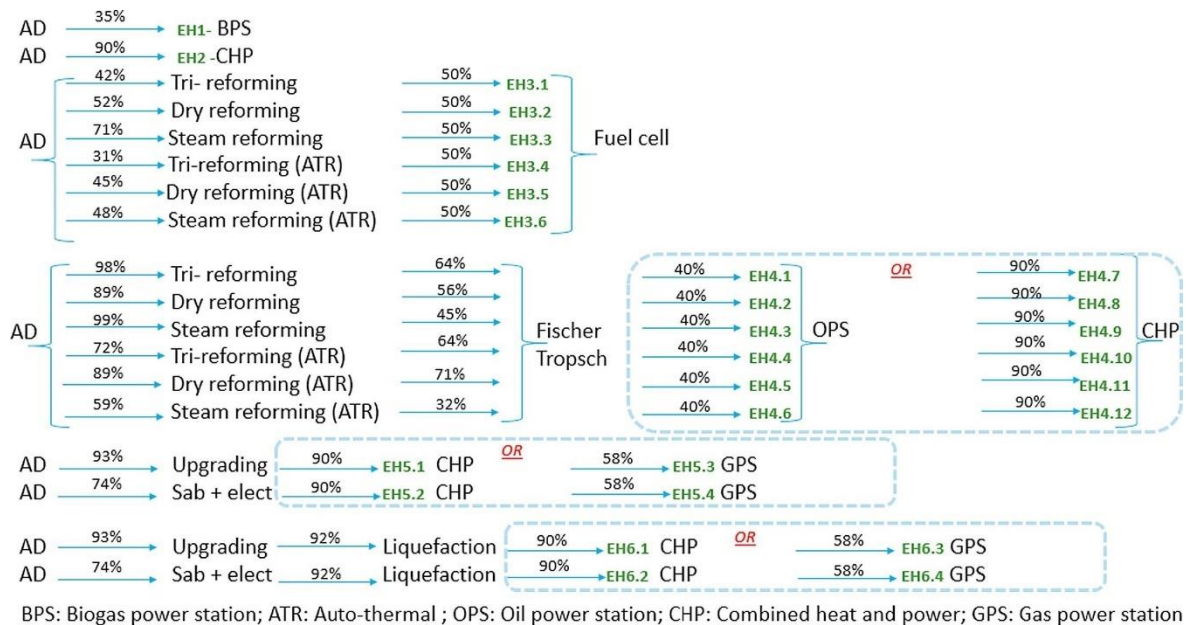
Mitmetest uuringutest on järeldatud, et energiatõhusus on olulisim tegur, mille abil valida kõige efektiivsem kasutusviis biogaasile ja biometaanile. Hakawati et al. (2017) uuringule „*What is the most energy efficient route for biogas utilization: heat, electricity or transport?*“ tuginedes on kirjeldatud erinevate biogaasi kasutusvaldkondade energiatõhususi [77]:

- Sisepõlemismootri efektiivsuseks on hinnatud 20% ja see on arvestatud „*tank to wheel*“ põhimõttel ehk energia salvestamise efektiivsus (kütusepaakides) ja sinna juurde on arvatud sisepõlemismootori efektiivsus ja kaod.
- Koostootmine – elektri puhul on efektiivsus 40% ja soojuste puhul 50%.
- Biogaasi puhastamise efektiivsus - harilikult saadakse 90-96% biometaanit ja 0,5-2% metaanit läheb kaduma.
- Katlamaja efektiivsuseks on arvestatud 82,5%.
- Veeldamisprotsessi efektiivsuseks on arvestatud 92%.
- Komprimeerimise puhul loetakse efektiivsuseks 96%.

**Elektri tootmine** - kui biogaasi kasutada kohapeal CHP-s elektri tootmiseks, siis selle protsessi efektiivsus on 40%. Kui puhastada biogaas biometaaniks ja sisestada see gaasivõrku ning kasutada eemalasavas CHP seadmes, siis protsessi efektiivsus on 37% (eeldusel, et biogaasi puhastamisprotsessi efektiivsus biometaaniks on 92%). Kui biogaasi puhastada biometaaniks ning seda veeldada ja transportida (kui gaasivõrku ja tarbimist pole lähedal), siis on protsessil suured lisaenergiakulud, kuna veeldatud biometaanit tuleb hoida (-162 °C) juures. Sellisel juhul on efektiivsus 34% [77].

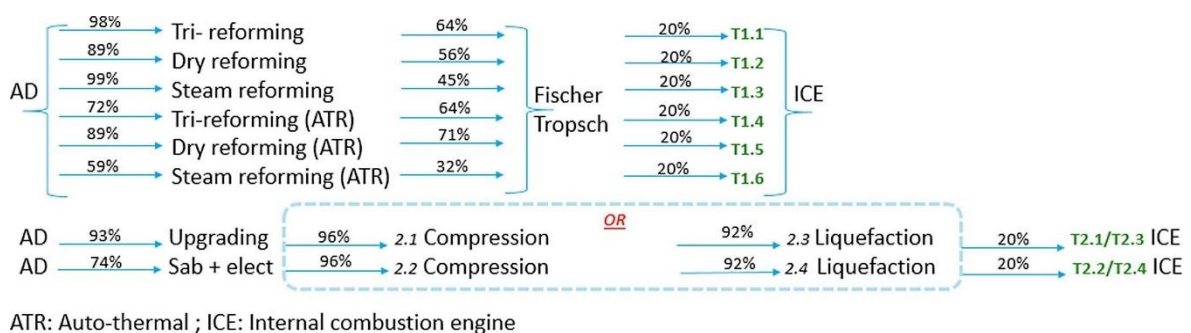
**Soojuste tootmine katlamajas** - biogaasi otsesel kasutamisel soojuste tootmiseks on efektiivsus 82%. Biometaanit kasutamisel soojuste tootmiseks on efektiivsus 77% [77].

**Koostootmine** - puhul saab toota soojusenergiat (kuni 180 °C) ja elektrit võimalikult väikeste kadudega. Koostootmise kasutegur on 90% [77].



Joonis 1.11 Energiatõhusus biogaasi kasutamisel koostootmiseks [77]

**Transport** - biometaani kasutamiseks sise põlemismootoriga autodes on vaja biometaani komprimeerida või veeldada. Komprimeerimisel 250 barini on biometaani puhastamise ja komprimeerimise efektiivsus kokku 89%. Antud juhul pole aga arvestatud, et rõhu hoidmine nõuab samuti energiat. Veeldamise puhul on efektiivsus 20% ja koos biometaani puhastamisega on efektiivsus kokku vaid 18%. Sise põlemismootorite maksimaalne efektiivsus on ca 30%, kuid enamasti ei tööta mootor maksimumvõimsusel, ehk efektiivsus on ca 20%. Elektri autode puhul on aga elektrienergia muundamisel mehaaniliseks energiaks kasutegur 59-62% ning nende efektiivsus on 1,8 korda kõrgem sise põlemismootoritest [77].



Joonis 1.12 Energiatõhusus biometaani kasutamisel transpordisektoris [77]

Seega võib järeldada, et protsessi efektiivsus on kõige suurem kohapeal koostootmise puhul (kuni 90%), eeldusel, et tarbijad on lähedal. Kõige madalam efektiivsus (kuni 18%) on biometaani kasutamisel transpordisektoris.



## 2. SOTSIAALMAJANDUSLIK ANALÜÜS

Biometani tootmine ja kasutamine loob lisaväärtust põllumeestele ja kohalikule kogukonnale. Biometaan on alternatiiviks fossiilsetele kütustele ning lisaks on saab ära kasutada kohalikul tasandil tekkivaid orgaanilisi jäätmeid, tänu millele väheneb jäätmete hulk ning selle utiliseerimisega seonduvad kulud. See vähendab ka pinnase ja vee saastumise riski. Biometaanijaama rajamine annab tööd eri valdkonna inimestele – selle jaoks on vaja insenere, ehitajaid jm personali. Biometaanijaama käitamisel peab seal olema operaator, hooldusmeeskond ning toormaterjali transportijad. Biometaanijaama rajamine on eriti kasumlik põllumeestele, kes saavad kasutada ära põllumajandusjäätmeid ning loomset sõnnikut ning toodetud biometani kasutada näiteks tarbegaasina ümbruskonna kodumajapidamises või CNG sõidukite tankimiseks. Lisaks saab kääritusjäätmeid kasutada põldudel väetisena ning see vähendab nitraatide hulka pinnases ning ohtu kohalike veekogude saastumiseks. See loob maapiirkondadesse lisatöökohtasid ning soodustab piirkonna majanduslikku arengut [79]. Eestis on varem biogaasi sotsiaalmajanduslikku poolt käsitlenud Ahto Oja poolt koostatud Eesti Arengufondi uuringus „Biometani kasutamise avalikud hüved“ (2013). Selle kohaselt on biometani kasutamise avalikud hüved 271 000 000 eurot aastas [80]. Käesoleva uuringuga plaanitakse neid tulemusi ajakohastada ja hiljem võrrelda A. Oja tööga ning selgitada võimalikke erinevusi. Antud sotsiaalmajandusliku uuringu koostamisel on lähtutud Euroopa Biogaasi Assotsiatsiooni (EBA) 2023. aasta raporti „*Beyond energy – monetising biomethane’s whole-system benefits*“ metoodikast.

### 2.1 Metoodika

Sotsiaalmajanduslikke uuringuid võib klassifitseerida järgnevalt [81]:

- Kvantitatiivsed uuringud: on eelkõige arvutuslikud matemaatilised mudelid või simulatsioonid, mida kasutatakse potentsiaali hindamiseks. Selle käigus kogutakse süstemaatiliselt tõendatud fakte ja arväärtuseid ning tehakse nende põhjal järeldused. Uuringu täpsus sõltub algallikate usaldusväärsusest [81].
- Kvalitatiivsed uuringud: need põhinevad tavaliselt küsitlustel ning selle käigus hinnatakse projektide mõju tagantjärele. Selle käigus käsitletakse subjektiivseid küsimusi, näiteks kogukondade valmisoleku kohta biokütuseid omaks võtta [81].

Biogaasi ja biometani sotsiaalmajanduslike uuringute läbiviimiseks kasutatakse laialdaselt tasuvusanalüüsi (inglise keeles *Cost-Benefit Analysis* ehk CBA) meetodit. Tasuvusanalüüs on meetod projekti või programmi tulude ja kulude analüütiliseks hindamiseks. See on riikide ja organisatsioonide poolt laialt kasutusel olev meetod, et

langetada otsuseid ressursside optimaalseks kasutamiseks [82]. See arvestab turuvälise, sotsiaalsete ja keskkonnaalaste mõjudega, mis konverteeritakse ümber rahalisteks väärtusteks. Senimaani on biometaanijaamadega seotud uuringud keskendunud üksnes projektide otsese majandusliku poole hindamisele, kuid muude külgnevate kasudega on jäetud arvestamata [83]. Näiteks biometaanijaama ehitamise kasumlikkust on mitmetes uuringutes arvatud diskonteeritud rahavoogude meetodi abil (discounted cash flow DCF) või *Net Present Value* (NPV) meetodi abil [79]. Selles töös on valitud metoodikaks tasuvusanalüüsi meetodi CBA. CBA meetod arvestab projekti tulude ja kuludega ning nende rahalise väärtusega, et arvutada lõplik puhaskasum. Kulusid ja tulusid võib määratleda ka kui ühiskonnale kasulikke ja kahjulikke mõjusid ning võtab arvesse välismõjusid. Välismõjudele antakse rahaline väärtus ning seda arvestatakse koos teiste sisenditega nagu tööjõud, kapital ja tooraine, et arvutada kogumõju riigile ja seega ühiskonnale laiemalt [84]. Majanduses nimetatakse välismõjuks (inglise k. *externality*) seda välist kasulikku või kahjulikku mõju, millel pole rahalist väärtust. See tähendab, et toote sotsiaalse väärtusega pole arvestatud mis omakorda tähendab, et turg toodab liiga vähe kasuliku välismõjuga toodet ning ressursid ei ole optimaalselt jaotatud. Kuna biometaanii kasutamine asendab fossiilseid kütuseid, siis seda mõju saab nimetada positiivseks välismõjuks. Selleks, et positiivsete sotsiaalsete välismõjudega tooteid oleks võimalik turule rohkem viia on lahenduseks riigipoolsete toetuste maksmine. Kui jäetakse arvestamata biometaanii tootmise positiivsete mitterahaliste kõrvalmõjudega, siis on tagajärjeks biometaanii tootmine väiksemas mahus kui see reaalsuses mõistlik oleks [84]. Selleks, et rahaliselt hinnata mitterahalist kasulikku välismõju, tuleb hinnata selle mõju füüsikalisi omadusi ning nende füüsikaliste omaduste ühikväärtust [84]. Selle uuringu eesmärgiks on leida riigi majanduslik kasu ühe ühiku biometaanii tootmisest ja tarbimisest (€/MWh) kogu elutsükli lõikes. Kõigepealt tuleb leida rahaline ühikväärtus MWh kohta ja seejärel korrutada see maksimaalse potentsiaalse toodetava biometaanii kogusega (€/MWh).

Välismõjude kvantifitseerimine ja rahalise väärtuse leidmine [64]:

1. välismõjude kaardistamine;
2. alternatiivsete olukordade kaardistamine – identifitseerida igale juhtumile vastupidine olukord, näiteks orgaaniliste jäätmete anaeroobse kääritamise alternatiiviks on see kui biojäätmel kas kompostitakse või põletatakse prügilates;
3. välismõjude kvantitatiivne hindamine;
4. välismõjude rahalise väärtuse andmine (€/MWh).

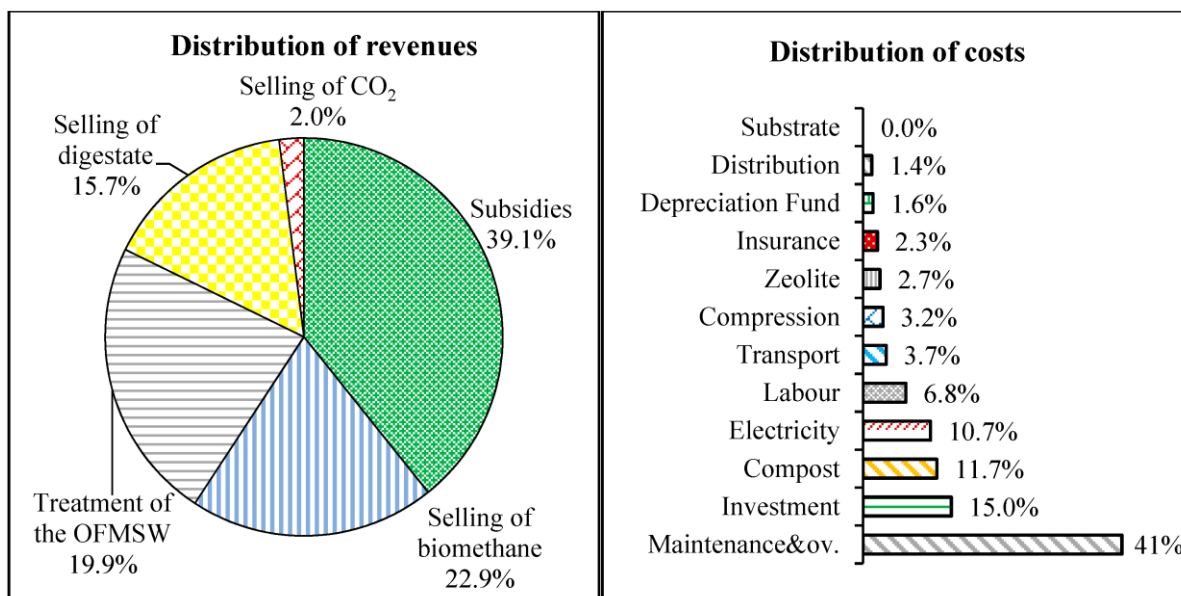
## 2.2 Referents stsenaarium

Eesti keskmise biogaasi/biometaanijaama näitel, mille parameetrid on järgmised.

Tabel 2.1 Keskmise biogaasijaama tehnilised andmed

Biogaasijaama keskmised tehnilised näitajad	Ühik
Biometaanijaama võimsus, GWh	35
Toodetud biometaani kogus, Nm <sup>3</sup>	2-4 mln Nm <sup>3</sup>
Planeeritav eluiga	20 a
Kasutatav tooraineliik	Läga ja sõnnik ning toiduainetööstuse jäägid, vähesel määral ka rohtne biomass/silo
Kasutatav tooraine kogus, t/a	20 000 biojätmed / 80 000 -120 000 läga ja sõnnik
Tekkinud digestaadi hulk, t/a	17 500 biojätmed / 50 000 - 100 000 läga ja sõnnik

Itaalia biometaani jaama näitel on tulude jaotus järgmine: 39,1% toetused, 22,9% biometaani müük, 19,9% jäätmete töötlus, 15,7% digestaadi müük, 2% CO<sub>2</sub> müük [85]. Peamised kulud on aga 41,1% hoolduskulud, 15% investeeringukulud, 11,7% komposteerimine, 10,7% elekter, 6,8% tööjõukulud, 3,7% transpordikulud, 3,2% komprimeerimine, 2,3% kindlustus, 1,6% amortisatsioon, 1,4% jaotus. Selle uuringu näitel oli NPV positiivne alates jaama suuruselt 200 m<sup>3</sup>/h või suurem [85].



Joonis 2.1 Itaalia biometaanijaama tulude ja kulude jaotus

## 2.3 Kulud

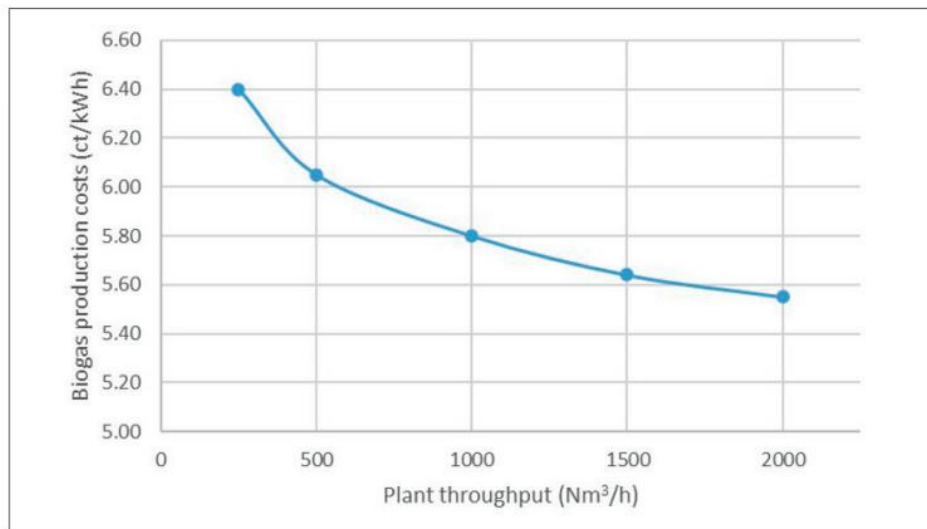
Tabel 2.2 Biometaanitootmisega seotud kulud

Investeeringukulud	Tegevuskulud
Projekteerimine	Tootmine:
Kommunikatsioonide ehitamine (teede ehitus, betoonitööd, elektritööd, torutööd jne)	Tooraine sisseost
Üldised ehituskulud ja seadmed	Tooraine transport
Tööjõukulud	Küte ja elekter
	Hooldus:
	Puhastustehnoloogia hooldus
	Masinate hooldus
	Seadmete hooldus
	Haldus:
	Tööjõukulud
	Raamatupidamiskulud
	Bürookulud
	Kommunaalid
	Side/mobiil
	Maksud
	Kindlustus jne

### 2.3.1 Investeeringukulud

Kapitalinvesteeringud jagunevad püsikuluks ja muutuvkuluks. Muutuvkulud saab omakorda jagada otsesteks ja kaudseteks kuludeks [79]. Otsesteks kuludeks on maaostu kulud, hoonete rajamine, seadmete maksumus ja paigaldus, juhtimissüsteemi paigaldamine, torustike, elektri jm infrastruktuuri ehitus [79]. Kaudseteks kuludeks ajutiste teede ja hoonete rajamine, inseneritehnilise personali kulud jm tööjõukulud [79]. Biometaanijaama kulud võib jagada kolmeks põhikategooriaks: 1) biogaasi tootmine 2) biometaanitootmise eraldamine ning 3) Biometaanitootmise komprimeerimine ning transport. Kui läheduses on olemasolev maagaasivõrk, siis eelistatult sisestatakse biometaan otse maagaasivõrku, kuna siis jäävad ära lisa komprimeerimis- ja transpordikulud [79].

**Biogaasijaama ehitamise investeeringukulud** hõlmavad eelkõige käärিতে ehitamist, elektri- ja gaasipaigaldiste rajamist, toorme hoidlaid ning teisi ehituskulusid. Käärিতে ehitamine hõlmab harilikult 45-57% investeeringukuludest. Biogaasitootmiskulud lägast ja rohtsetest jääkidest on kirjanduse allikate põhjal hinnatud ca 75 €/MWh [86]. Biogaasijaama kasumlikkus on suurem suuremate tootmiskahtude juures (Joonis 2.2). Harilikult on majanduslikult kõige mõistlikum rajada suuri biogaasijaamasid, kus kasutatakse vähemalt 20 000 toorainet aastas [86].



Joonis 2.2 Biogaasijaama tootmiskulud vastavalt jaama suurusele

**Puhastustehnoloogiate kulud** - Biogaasi väärimiseks biometaaniks kasutatakse peamiselt erinevaid füüsikalisi puhastustehnoloogiaid nagu: (kõikuvrõhkadsorptsioon (PSA), füüsikaline adsorptsioon, kemisorptsiooni, adsorptsioon, krüogeenne separatsioon, membraanlahustus). Uuringutest selgub, et jaama suurus peaks olema vähemalt 500 Nm<sup>3</sup> biogaasi tunnis, et biometaanitootmine oleks majanduslikult mõistlik [86]. Biogaasi puhastamine ja biometaanitootmine on üks kõige kulukamaid osasid ning hõlmab 20 - 40% kogu investeeringukuludest. Tabel 2.3 on toodud biometaanitootmise separatsioonikapitalikulud. Biogaasi puhastussüsteemi rajamine on üldjuhul optimaalne alates biogaasi väljundvõimsusest 200 m<sup>3</sup>/h. 500 Nm<sup>3</sup>/h jaama puhul on puhastustehnoloogia investeerimiskulu 1 800 000 € [23].

Tabel 2.3 Biometaanitootmise separatsioonikapitalikulud

<b>Tüüpilised kapitalikulud 2012. a vääringus (€/m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>)</b>					
<b>Bio- metaani tootlikkus (€/m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Absorpt- sioon veega</b>	<b>Absorpt- sioon orgaanilise lahustiga</b>	<b>Absorptsioon amiiniga</b>	<b>Kõikuvrõhu- adsorptsioon</b>	<b>Membraan- lahutus</b>
100	10 100	9500	9500	10 400	7300-7600
250	5500	5000	5000	5400	4700-4900
500	3500	3500	3500	3700	3500-3700

**Tanklate rajamine ja sõidukite soetamine** - lisaks biometaanitootmisele tuleb arvestada ka vajalikke investeeringukulusid biometaanitanklate rajamiseks ja sõidukite soetamiseks. Lisaks on CBM-i hoiustuskulud 4 500 €/MWh (250 bar juures) ja veeldatud maagaasi hoiustamise hinnaks on 7 700 €/MWh [86]. Sõiduaudod, mis kasutavad nii gaasi kui bensiini, on hetkel ca 10% kallimad võrreldes tavaliste bensiini või diisliautodega. Raskeveokid, mis kasutavad kütusena gaasi on aga 10-30% kallimad. Linnaliini busside puhul on kõige odavamaks variantiks diiselbussid hinnaga 220 000 -

260 000€. Gaasibussid on pisut kallimad ehk 240 000€ – 290 000€ [86]. Tallinna linnaliinibusside hinnanguline soetusmaksumus oli ca 250 000€ ühe gaasibussi kohta. Tallinna Linnatranspordil on kokku 469 bussi, millest ligi viiendik on gaasibussid [87].

Tabel 2.4 CNG ja LNG tanklate kapitalikulud, UK (2011)

Tankla suurus (kg/päevas)	CNG kapitalikulud, €	LNG kapitalikulud, €
500	160 000	73 000
1000	200 000	93 000
2000	250 000	190 000
5000	350 000	260 000
10 000	700 000	350 000

### 2.3.2 Tegevuskulud

Käibekapital (inglise k. *Working Capital*) moodustab osa projekti maksumusest ning selle alla kuuluvad kõik kulud, mis kuluvad toote valmistamiseks, sealhulgas tooraine, kemikaalid ja muude komponentide tarnimine ning nende maksumus [79].

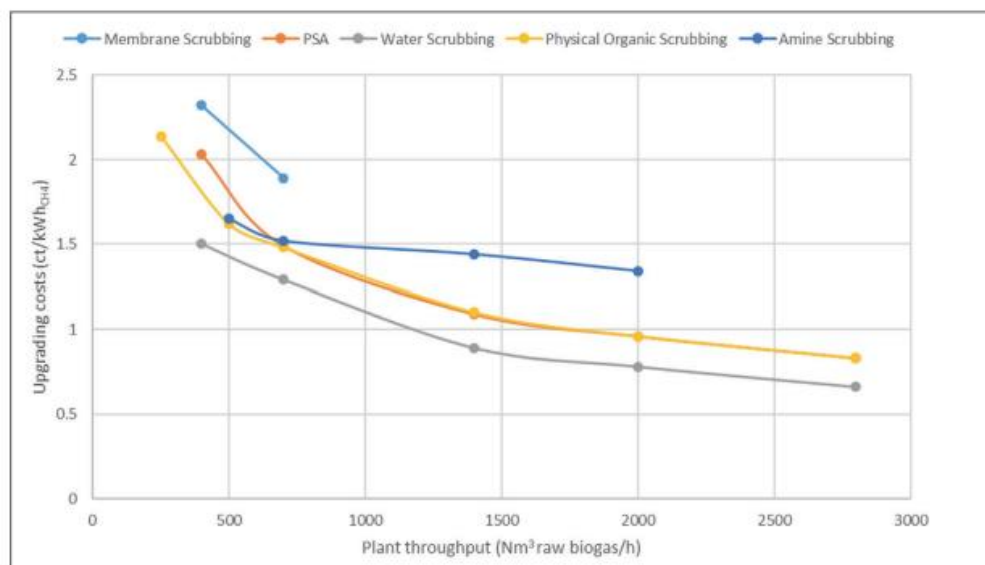
**Toorainekulud** sõltuvad eelkõige kasutatava tooraine liigist. Tooraine kulu on läga ja sõnniku puhul 2,75 €/t, silo ja rohtse biomassi puhul 3,05 €/t [23]. Lisaks tooraine omahinnale tuleb arvestada ka tooraine transpordiga seotud kuludega. Tuleb tähele panna, et erinevad toorained on erineva energiasaldusega. Näiteks loomseid jääke võib efektiivselt transportida kuni 200 km kauguselt, kuid läga on efektiivne transportida kuni 20 km raadiusest. Seetõttu tuleb hinnata keskmist tooraine transportimise vahemaad biogaasijaama. Kuna transpordiveokitel on vaja sõita edasi tagasi, siis kogu vahemaa võib kahekordistada. Seetõttu tuleb hinnata, mis on kogudistsants, kui suured on veosed, kui tihti peavad masinad sõitma [84].

**Biogaasi puhastamistehnoloogia** käitamiskulud 8,5 €/MWh kui biogaas puhastatakse biometaaniks. Kui biogaasi puhastatakse elektri tootmiseks, siis on vajalik väevliärastus ja selle käitamiskulud on 3,4 - 8,5 €/MWh [23]. Puhastustehnoloogiad (membraanpuhastus jt) tarbivad enamasti elektrit 19 – 28,4 kWh/MWh biogaasi puhastamiseks, kuid see varieerub vastavalt kasutatavale tehnoloogiale ning ka toorbiogaasi omadustest (Tabel 2.5) [23].

Tabel 2.5 Biometaaniseparatsioonisisüsteemi opereerimiskulud

Tüüpilised opereerimiskulud 2012. a vääringus (€/m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )					
Biometaani tootlikkus (€/m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Absorptsioon veega	Absorptsioon orgaanilise lahustiga	Absorptsioon amiiniga	Kõikuvrõhu-adsorptsioon	Membraanlahutus
100	14	13,8	14,4	12,8	10,8-15,8
250	10,3	10,2	12	10,1	7,7-11,6
500	9,1	9	11,2	9,2	6,5-10,1

Joonis 2.3 on näha, et biogaasi puhastusjaamade, mis on võimelised töötleva 500 m<sup>3</sup> biogaasi tunnis, on hinnaks 1,4 - 2,2 €/kWh biometaani kohta. Suuremate biogaasijaamade puhul, mille toodang on 2000 Nm<sup>3</sup>/h langevad kulud 0,8 - 1,4 €/kWh biometaani kohta kohta [86].



Joonis 2.3 Biogaasi puhastustehnoloogiate hinnavõrdlus

**Biometaani transport tanklasse** - selleks, et gaasi transportida läbi gaasivõrgu, peab olemasolev gaasivõrk olema maksimaalselt 5 km kaugusel jaamast. Nendes kohtades, kus tootmisüksuse lähedal ei paikne olemasolevat gaasivõrku või tanklat, tuleb biometaani transportida veokitega kas veeldatud või komprimeeritud kujul. Üldiselt on biometaani komprimeerimine kuluefektiivsem, kuid kui biometaani on vaja transportida üle 100 kilomeetri kaugusele, siis on veeldatud gaas paremaks alternatiiviks [86].

**Soojus- ja elektrikulu** - fossiilsetel kütustel põhineva primaarenergia sisend biometaani tootmiseks on 0,027 - 0,061 kWh/kWh kütust komprimeeritud biometaani kohta [86]. Biogaasijaama soojusvajadust mõjutavad ka asukohale omased kliimatilised tingimused, et hoida kääritamiseks vajalikku temperatuuri (harilikult 40°C) Seetõttu on optimaalne rajada biometaanijaamad kohtadesse, kus saab kasutada mõne lähedalasuva tööstuse heitsoojust. Lisaks soojusele on vaja ka elektrit, et hoida töös pumpasid jm seadmeid. Harilikult on elektritarve 20 - 30 kWh/MWh biogaasi kohta. Teise uuringu kohaselt on tootmiskulud ca 0,06 €/kWh biogaasi kohta [86].

**Seadmete hoolduskulud** sõltuvad eelkõige biometaanijaama suurusest, biometaani kvaliteedist, kuid harilikult on see kulu 5 - 7% kogu aastasest kapitalikulust. Selle alla kuuluvad näiteks seadmete ja masinate hooldus (nt süsinikufiltri vahetus) [86].

**Tööjõukulud** - Taani näitel on biometaanijaamaga seotud töötajate arv 0,25 - 15 inimest [88]. Kui arvestada 5 Eesti jaamaga, mis töötavad põllumajandussisenditel, siis on näha, et töötajate arv on keskmiselt 2 - 6 inimest. Brutotöötasu on infopanga andmetel 2850€ - 4663€ [89]. Statistikaameti andmetel on Eesti keskmine brutokuupalk 2022. aasta seisuga 1685€ [90].

### 2.3.3 Kokkuvõtte kuludest

Järgnevat tabelites (Tabel 2.6 ja Tabel 2.7) on toodud Eesti biogaasijaamade keskmistatud majanduslikud näitajad 2013. aastal rajatud biogaasijaamade kompleksmaksumus (ilma gaasipuhastussüsteemita) oli valdavalt ca 4 000 000€. 2020. - 2021. aastatel rajati mitmetele jaamadele juurde biogaasi puhastustehnoloogia, mille koguhinnaks oli ca 3 000 000€ kuni 5 000 000€ eurot [89]. Kõige viimati valmis Maardu biogaasi teha, mille kogumaksumus oli ca 14 000 000€ (tootmisvõimsus ca 21 GWh). Kuna tegemist on kõige uuema biogaasijaamaga, siis investeeringukuludid arvestame selle jaama põhjal.

Tabel 2.6 Näidisbiogaasijaama investeringukulud

<b>Investeeringukulud</b>	<b>Maksumus, €</b>	<b>Kommentaar</b>
Tootmiskompleksi „võtmed kätte hind“	4 000 000	2013 a hindade juures
Gaasipuhastussüsteemi maksumus	3 000 000 - 5 000 000	2020. a hindade juures
Investeeringukulud kokku:	Ca 14 000 000	EKT Ecobio, 2022.a andmed

Tabel 2.7 Näidisbiogaasijaama muutuvkulud

<b>Kuluartikkel</b>	<b>Maksumus</b>
Investeeringukulu:	14 000 000
Hooldus- ja tegevuskulud (2021. a), €/a	2 230 000
Laenuintressid, €/a	170 000
Riiklikud maksud, €/a	125 000
Tööjõukulud, €/a	183 000
Kaubad, toore, materjal ja teenused, €/a	1 000 000
Tegevuskulud, €/a	122 000
Põhivara kulum ja väärtuse langus, €/a	630 000
Saadavad toetused, €/a	1 700 000

## 2.4 Toetused ja seadusandlus

Biometaanii turuga seonduvate seaduste, regulatsioonide ja toetuste kohta saab informatsiooni järgmistest allikatest [6]:

- Energiamaajanduse korralduse seadus



- Majandus- ja taristuministri 13.09.2022. a määrus nr 69 „Päritolutunnistuse väljastamise, võõrandamise ja kustutamise kord ning päritolutunnistuse taotlemisel esitatava teabe koosseis“
- Maagaasiseadus
- Alkoholi-, tubaka, kütuse- ja elektriaktsiisi seadus
- Majandus- ja taristuministri 14.11.2022. a määrusest nr 90 „Biokütuse, biometaani ja elektrienergia statistikaga ning kasvuhoonegaaside heitkoguste statistikaga kauplemise kord“,
- Vedelkütuse seadus
- Atmosfääriõhu kaitse seaduse
- Määrus „Biometaanituru arendamise toetamise toetuse kasutamise tingimused ja kord“ (13. september 2017)
- Elektriturseaduse § 59 ja elektriturseaduse § 108 lõige 3

**Biometaani tootmise toetus** - Riik jätkab biometaani tootmise toetuste väljaandmist veel kuni 30. juunini 2024 või kuni tegevuse toetamiseks ettenähtud eelarvevahendite lõppemiseni. Biometaanituru arendamiseks on toetusraha 11 800 000€ mis pärineb CO<sub>2</sub> kvoodi müügituludest. Kasutada olevate vahendite maht võrdub otseselt heitkoguse ühikute müügi enampakkumisel saadava tegeliku tuluga [91]. Toetusalust biometaani toodavad Rohegaas OÜ, Biometaan OÜ, Vinni Biogaas OÜ, Tartu Biogaas OÜ ja Oisu Biogaas OÜ. Välja makstud toetuste kogusumma on hetkel 26 058 711€ [92]. Keskmiselt maksti 2021. aasta seisuga igale jaamale toetusi 1 700 000€ aastas. [89]. Juhul kui biometaani lõpptarbijaks on transpordisektor, siis makstakse toetust 100€/MWh kohta, millest lahutatakse maagaasi jooksva kuu keskmine turuhind. Teiste biometaani tarbijate puhul makstakse tootjale 93 €/MWh kohta, millest lahutatakse maagaasi jooksva kuu keskmine turuhind [93]. Euroopa Komisjoni määrus number 651/2014 artikkel 43 lõike 5 alusel ei tohi biometaani tootjatele makstav tegevusabi energiaühiku kohta ületada kõnealuselt taastuvallikast toodetud energia tasandatud kulude ja sama energialiigi turuhinna vahet. Seetõttu on vajalik enne toetuste väljastamist Eleringi poolt kindlaks teha, kas tegevustoetuse maksmine vastab Euroopa Komisjoni riigiabi tingimustele. Tootjate kasumlikkuse hindamisel kasutatakse KPMG Baltics OÜ välja töötatud meetodikat [6].

**Toetus taastuenergiast toodetud elektri eest** - Elektriturseaduse § 59 ja elektriturseaduse § 108 lõikele 3 makstakse ka toetust taastuenergiast toodetud elektri eest [94].

**Investeeringutoetused** - Kuni 2022. aasta lõpuni sai taotleda ka „Bioressursside väärindamise investeeringutoetust“, millega toetati bioressursside töötlemiseks vajalike ehitise ehitamist, masinate ja seadmete soetamist ja väljavahetamist ning teadus- ja arendustöötaja kaasamist. Investeeringutoetust anti taaste- ja vastupidavuskava alusel. Kokku esitati 18 taotlust 50 810 000€ eest ja taotluse rahuldamise otsustas PRIA [95]. Lisaks on Määrus 135 „Biometaani transpordisektoris tarbimise toetamise tingimused“ abil toetatud tanklavõrgustiku laienemist üle eesti 3 000 000€ eest ning linnatranspordis on Pärnus, Tartus Ja Tallinnas võetus kasutusele gaasibussid, selleks eraldati 5 200 000€ [96].

**Aktiisivabastus** – Biogaasile ja biometaanile kehtib alates 2015. aastast aktiisivabastus. Aktiisivabastus kehtib juhul kui biometaani tootmise on esitatud päritolutunnistus. Päritolutunnistus on elektrooniline dokument, mis tõendab, et tootja on tootnud biometaani. Eestis haldab seda süsteemi Elering AS [97].

## 2.5 Tulud biogaasi tootmisest ja tarbimisest

Tabel 2.8 Biogaasi tootmise positiivsed mõjud

Majandus	Keskkond	Põllumajandus	Sotsiaalne kasu	Energeetika	Jäätmekäitlus
Riigile laekuvad maksud	KHG vähenemine	Kääritusjäägi kasutamine väetisena	Tööhõive maal	Taastuenergia edendamine	Biojätmete taaskasutus
Tulu biogaasi müügist	Metaanheitme vähenemine	Mullaviljakuse kasv	Kohaliku ettevõtluse edendamine	Energiajulgeolek	Reoveesetete käitlus
	Nitraadi-leostumise vähenemine	Umbrohu ja haigustekitajate vähendamine	Müra vähenemine	Haja-energeetika arendamine	
	Biokütuste kasutamine põllumajanduses		Ebameeldiva lõhna vähenemine	Reguleeritav tootmisvõimsus	
	Õhusaaste peenosakeste vähenemine				

## 2.6 Majandus

Tehtud kulutused biokütuste tootmiseks, uuringute tegemiseks ja ehitamiseks ringleb läbi terve majanduse. Suurenenud majandusaktiivsus loob uusi töökohtasid ning toob maksutulu riigieelarvesse [98]. Selleks, et mõista riigi majanduslikku tulu, tuleb saada aru erinevate majandussektorite omavahelisest seosest. Biogaasijaam saab oma

tooraine enamasti põllumajandussektorilt. Biogaasi tootmine toetab SKT-d ja pakub leibkondadele sissetulekut, tänu millele aitab see tuua maksutulu ka riigikassasse. Vähesemal määral jõuab ka tulu kohalike omavalitsusteni [98].

### 2.6.1 Tulu biometaani müügist

Eestis on jätkuvalt sõltuvuses maagaasi impordist ja maailmaturu hindadest ning seetõttu sõltub ka biometaani hind maagaasi maailmaturu hinnaindeksist. CNG müüjate peamine hinnareferents on Madalmaade gaasibörsi hinnaindeks TTF [99]. Biogaasi tootjad saavad aga ise otsustada hinna ja seetõttu oli 2022. aastal maagasi hinnatipu ajal Biometaan OÜ tanklates biometaan kordades soodsam võrreldes Alexela ja Eesti Gaasi tanklate hindadega [100]. Biometaani müügitulu on hetkel maagaasi referentshinna järgi 0,21€/m<sup>3</sup> ehk ca 19,9 €/MWh [23]. Maagaasi hinda kujundavad tegurid on peamiselt maagaasi omahind, võrguteenuse tasu, maagaasiaktsiis ja käibemaks [101]. 2021. aasta põllumajandusliku sisendiga biometaaniijaamade majandusaastaruannete põhjal on keskmine müügitulu 1 300 000€ ja keskmine ärikasum 450 000€ jaama kohta.

Tabel 2.9 Biometaaniijaamade keskmised tulud 2021. a

Tuluartikkel	Saadav tulu
Müügitulu, €/a jaama kohta	1 300 000
Ärikasum, €/a jaama kohta	450 000
Põhitegevusala	Biometaani tootmine
Muu tegevusala	Elektrienergia tootmine
Põhitegevusala müügitulu, €/a jaama kohta	730 000

### 2.6.2 Riigile laekuvad maksud

Riigi maksutulust üldiselt moodustavad kõige suurema osa sotsiaalmaksu, käibemaksu ning aktsiiside laekumised [102]. 2021. aastal laekus riigieelarvesse maksutulu kokku ligi 10 800 000€. Sellest 36% moodustas sotsiaalmaks, 29% käibemaks, 22% tulumaks, 8% aktsiisid ja 5% muud maksud [103]. 2022. aastal kütuseaktsiisi maksudest riigi eelarvesse 498 500 000€, mis moodustab 4,8% riigi maksutulust (

Tabel 2.10) [104]. Aktsiis on riigi poolt kehtestatud maks, mis kehtib aktsiisikaupadele – alkoholile, tabakatoodetele, kütusele ja elektrienergiale [105]. Eestis on alates 2015. a biogaas, sealhulgas biometaan aktsiisist vabastatud. Biogaas on ainuke biokütus, mille puhul rakendatakse valikulist aktsiisivabastust. Rahandusministeerium hindab kütuseaktsiisi vabastuste ja soodustuste puhul üldjuhul saamata jäänud aktsiisitulu. Seda nimetatakse riigieelarve strateegias maksukuluks [106]. Biogaasi puhul on maksukulu suurus ca 600 000€, moodustades kogu maksukuludest 0,1%. Andmed maksukulu arvutamiseks saadakse Maksu- ja Tolliametilt [107].

Tabel 2.10 Kütuseaktsiisi laekumine 2018 – 2022. a [104]

	2018	2019	2020	2021	2022
Kütuseaktsiis kokku, €	562 773 48	577 931 630	507 645 720	502 205 320	498 532 850
Autobensiini aktsiis, € (aktsiisimäär 563 €/1000L)	167 468 230	166211 210	156 929 810	157 578 370	155697 130
Diislikütuse-aktsiis, €	354 116 43	366 490 360	310 558 020	310 300 410	314 110 450
Vedelgaasiaktsiis, € (aktsiisimäär 55 €/1000L)	2 676 560	3 554480	3 577 220	3 640 970	4 432 610
Biokütuseaktsiis, €	100 310	-80 490	300	0	0
Biokütuse ja fossiilkütuse segude aktsiis, €	45 600	14 100	5 640	10 020	2 510
Maagaasiaktsiis, € (aktsiisimäär 40 €/1000L)	22 021 710	25 386 420	22 575 380	16 170 580	13 238 730

Riigile laekuvad maksud ka käibemaksu, juriidilise isiku tulumaksu, maamaksu ja tööjõumaksude pealt (sh füüsilise isiku tulumaks (20%), sotsiaalmaks (33%), töötuskindlustusmaks (töötajale 1,6% ja tööandjale 0,8%), kohustusliku kogumispensioni makse (2%).

Tabel 2.11 Majanduslik tulu riigile uue biogaasiajama ehitamisest

gaasi-jaamade arv	Ärikasum	Tööjõumaksud	Riigile laekuvad maksud	Otseste töökohtade arv	Kodumajapidamiste sissetulek
1	450,000.00 €	72,000.00 €	125,000.00 €	3.4	9,248.00 €

## 2.7 Sotsiaalsed hüved

### 2.7.1 Töökohtade loomine

Biometaanitootmisjaam annab maapiirkondades tööd nii otseselt kui ka kaudselt. Otsene efekt avaldub nende töötajate näol, kes otseselt biogaasiajamas töötavad, näiteks biogaasiajama operaator. Kaudselt on hõivatud aga ka väline tööjõud, näiteks

ehitustööde teostamiseks [84]. Biogaasitootmine nõuab üldiselt aga rohkem kapitali kui inimtööjõudu [98]. Taani biogaasijaamade näitel on keskmiselt ühe biogaasijaamaga seotud töötajate arv 0,25-15 töökohta ehk keskmiselt 7 töökohta [88]. Rootsi näitel on biogaasijaamaga seotud 200 kuni 850 otsest töökohta/TWh kohta ja kaudselt 300 kuni 1400 töökohta/TWh kohta. Panus regionaalsesse SKT-sse on 43 000 000 €/TWh [108]. Keskmise biogaasijaamaga seotud töötajate arv on 1009 töökohta/TWh. Sellest 320 on otsesed töökohad ja 770 kaudsed töökohad [64]. Eestis töötab igas biogaasijaamas 2-6 inimest ehk keskmiselt 3,4 täistöökohta ekvivalenti. Keskmiselt makstakse iga jaama kohta riigile tööjõumakse ca 70 000€ väärtuses. Kui arvestada, et maksimaalselt saaks veel rajada ca 12 biogaasijaama, siis see tähendaks kuni 24 kuni 72 töökohta. Tööjõumaksude pealt tähendaks see lisatulu kuni 5 040 000€/a. Lisaks tuleb juurde arvestada ka biogaasijaamaga kaudselt seotud töökohad. Töötuse määr on Eestis 2022. aasta seisuga keskmiselt 5,6%. Kõige suurem on töötuse määr Kirde-Eestis (10,7%) [109]. Eesti keskmine brutokuupalk 2022. aasta seisuga on 1685€ [90]. Biogaasijaamade töötajate keskmine brutotulu on aga keskmiselt 3400€ [89].

### **2.7.2 Vähenenud müra**

Müra häirib nii inimesi kui ka loomi ja transpordivahendid on ühed suurimad müra põhjustajad. Mitmed uuringud on näidanud, et gaasisõidukite müratase on 2-10 dB väiksem võrreldes diisli- ja bensiinisõidukitega. Rahalist väärtust müra vähenemise hindamiseks pole aga võimalik anda [86].

### **2.7.3 Vähenenud ebameeldiv lõhn**

Biogaasi tootmine lägast ja sõnnikust vähendab ka lautade juures levivat ebameeldivat lõhna, kuna digestaat sisaldab vähem lõhnavate komponentidega ühendeid võrreldes sõnniku ja lägaga. Rahalist väärtust ebameeldiva lõhna vähenemise kohta ei ole võimalik anda [86].

## **2.8 Keskkond**

Õhu saastatusel on keskkonnale mitmeid negatiivseid mõjusid, näiteks happvihmad, südame-veresoonkonna ja hingamisteede haigused, mis põhjustavad enneaegset suremust [86]. Kui transpordisektoris asendada fossiilsed kütused biometaaniga, siis vähenevad süsihappegaasi, metaani ja lämmastikoksiidide väheneb tahkete osakeste emissioon [84].

### **2.8.1 Keskkonnakasu KHG emissioonide vähenemisest**

Peamised kolm kategooriat, kus emissioonid vähenevad on:

- Fossiilsete kütuste asendamine
- Sünteetiliste väetiste asendamine
- Paranenud jäätmekäitlus (eriti läga ja sõnniku puhul).

Jaama ehitamise käigus tekkivate heitmetega üldjuhul ei arvestata, kuna selle mõju on alla 1% kogu heitmetest.

**Alternatiiv:** Alternatiivse stsenaariumi kohaselt biogaasijaamasid ei ehitata ning täies ulatuses kasutatakse fossiilseid kütuseid, sünteetilisi väetiseid ja tekkinud jäämeid põllumajandus- ja biojäätmekäitluses ei taaskasutata.

**Kvalitatiivne hindamine ja rahalise väärtuse arvutamine:** Selleks, et hinnata keskkonnamõju, tuleb võrrelda erinevate kütuste poolt tekitatavaid emissioone CO<sub>2</sub> ekv/MWh kohta. Nende emissioonide hindamisel tuleb arvestada nii kütuse kasutamisel kui ka tootmisprotsessi eraldunud heitgaase. Seejuures tuleb tähele panna, et fossiilsete kütuste heitmed eralduvad peamiselt nende kasutamisel ehk näiteks põlemisel auto mootorites, samas kui biometaani puhul eraldub suures koguses CO<sub>2</sub> juba tootmisprotsessis ehk biometaani eraldamisel biogaasist [84]. CO<sub>2</sub> emissioonide vähenemise potentsiaal (t CO<sub>2</sub>e/MWh) sõltub eelkõige biogaasi kasutusvaldkonnast (transport, küte või elekter) ning kasutatud toormaterjalist. Tuleb ka eristada emissioonide teket transpordi, tootmise, puhastamise ja komprimeerimise käigus. Rahalise väärtuse saamiseks tuleb emissioonide kogus korrutada Euroopa Liidu poolt kehtestatud CO<sub>2</sub> tasudega [€/t CO<sub>2</sub>e] [64]. CO<sub>2</sub> kogused on võetud EU RED II direktiivi Lisa VI-st [110].

Tabel 2.12 Kütuste energiasisaldus [110]

Kütus	Energiasisaldus massi kohta (alumine kütteväärtus, MJ/kg)	Energiasisaldus mahu kohta (alumine kütteväärtus, MJ/L)
Biogaas	50	-
Bensiin	43	32
Diiseli	43	36

Vastavalt RED II-s välja toodud metoodikale leitakse transpordikütuste tootmisest ja kasutamisest tulenevate KHG valemite abil, kus esmalt liidetakse kokku tooraine kasvatamiseks kulunud heitkogus, maakasutuse muutumisest tingitud süsinikuvaru muutumisest tulenev aastapõhine heitkogus; töötlemisel tekkinud heitkogus; jaotamise ja transpordi käigus tekkinud heitkogus; kasutatavast kütusest tulenev heitkogus; ning lahutatakse maha põllumajanduse parema juhtimise abil süsiniku mulda kogunemisest tulenev heitkoguste vähenemine; CO<sub>2</sub> kogumisest ja geoloogilisest säilitamisest tulenev heitkoguste vähenemine ning CO<sub>2</sub> kogumisest ja süsinikuasendamisest tulenev

heitkoguste vähenemine. Masinate ja seadmete tootmisel tekkinud heitkoguseid arvesse ei võeta [110].

**Biogaas elektri tootmiseks** - Toorsõnniku käitlemisel tekkimata jäävate heidete väärtust loetakse võrdseks  $-45 \text{ g CO}_2\text{eq/MJ}$ -ga ehk  $162 \text{ kg CO}_2\text{eq/MWh}$  sõnniku/läga kohta anaeroobse kääritamise puhul. Digestaadi lahtisel säilitamisel tekib täiendavaid  $\text{CH}_4$  ja  $\text{N}_2\text{O}$  heiteid. Käärimisprotsessis tekkinud digestaadi suletult säilitamine tähendab selle hoiustamist õhukindlas mahutis ja säilitamisel vabaneva täiendava biogaasikoguse kogumist täiendava elektri või biometaani tootmiseks. Nimetatud protsessis kasvuhoonegaaside heidet ei arvestata [110].

Tabel 2.13 on kirjeldatud 3 erinevat juhtumit biogaasi kasutamisel elektri tootmiseks [110]:

- Juhtum 1 on protsess, kus protsessi jaoks vajaliku elektri- ja soojusenergia annab elektri- ja soojuseenergia koostootmise seade ise.
- Juhtum 2 on protsess, kus protsessi jaoks vajalik elektrienergia saadakse võrgust ja protsessi soojusenergia annab elektri- ja soojusenergia koostootmise seade ise.
- Juhtum 3 on protsess, kus protsessi jaoks vajalik elektrienergia saadakse võrgust ja protsessi soojusenergia saadakse biogaasi põletuskatlast. See juhtum esineb mõnes käitisel, kus elektri- ja soojusenergia koostootmise seadet kohapeal ei ole.

**Biometaan transpordisektori jaoks** - Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemine biometaani puhul on arvestatud üksnes rõhu all oleva biometaaniga tekkimata jäävate heidete väärtus vastab transpordis kasutatavate fossiilkütuste võrdlusväärtusele  $94 \text{ g CO}_2\text{eq/MJ}$  ehk  $338,4 \text{ kg CO}_2\text{eq/MWh}$  [110].

**Vähenenud lämmastiku ja metaaniheidet paranenud läga- ja sõnnikujäätmete käitlusest** - kui läga ja sõnnikut hoiustada lahtiselt, siis eraldub sealt suures koguses metaani, aga ka lämmastikoksiide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ja ammoniaaki ( $\text{NH}_3$ ). Sõnniku ja läga hoiustamine lahtiselt põhjustab 2% globaalsetest metaaniheitmetest. Keskmiselt esineb igal jaamal 3% heitmeid [64]. Metaan on 28 korda hullem kasvuhoonegaas võrreldes  $\text{CO}_2$ -ga. Hästi toimiva biogaasijaama puhul on võimalik metaanilekked vältida [64]. Eesti suuremates lautades kasutatakse harilikult isoleerimata lahtiseid pindasid ja kummimatte, kust läga kogutakse paaki ja pumbatakse kord päevas välihoidlatesse. Sõnnikut eemaldatakse aga manuaalselt [111]. Biogaasi tootmise käigus eraldub metaani mitmed etapis: tooraine hoiustamisel, kääritus tekkivad lekked puhastustehnoloogiate kaudu, ülerõhklapi kaudu ning

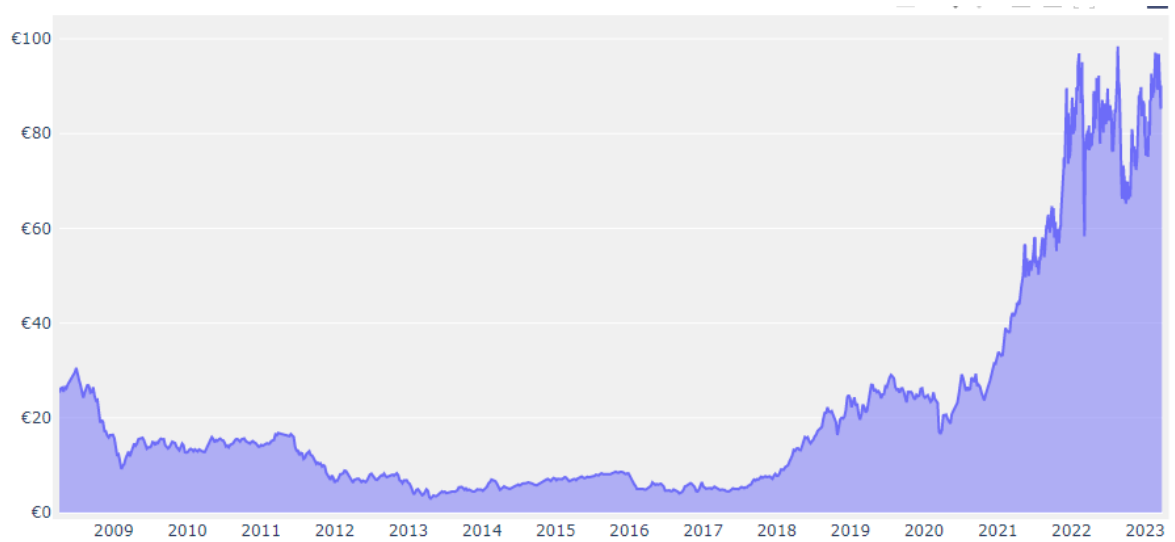
digestaadi säilitamisel [112]. Selleks, et vähendada biogaasi tootmisprotsessi metaanilekke potentsiaali tuleb kääritid teha võimalikult lekkekindlad. Saksamaal on piirnormid, et maksimaalne metaanileke võib olla 1 - 1,5% toodetud gaasi kohta. Ka digestaadist võib veel eralduda metaani, seega on kõige parem hoiustada seda kaetult. Puhastustehnoloogiate puhul on võib jääkgaasi töötlemiseks vajalik olla lisatöötlus või põletamine [112]. Kääritamissaaduse lahtisel säilitamisel tekib täiendavaid metaani heiteid, mille kogus oleneb ilmast, substraadist ja kääritamise tõhususest. Sellistes arvutustes võetakse kogused võrdseks järgmiste väärtustega: 0,05 MJ CH<sub>4</sub>/ MJ biogaasi läga puhul, 0,035 MJ CH<sub>4</sub>/ MJ biogaasi maisi puhul ja 0,01 MJ CH<sub>4</sub> / MJ biogaasi biojäätmete puhul [110].

Lämmastik on aga taimede kasvus vajalik toitaine, kuid farmidest eraldub läga ja sõnniku kaudu mitmeid lämmastikuheitmeid (NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Need heitmed põhjustavad kliimamuutuseid, osoonikihi hõrenemist, õhusaastet ja eutrofeerumist [113]. RED II-s on arvesse võetud kasvuhoonegaasid CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub>. Selleks, et teisendada kõik KHG-d CO<sub>2</sub> ekvivalentväärtusteks, on arvutamisel arvestatud järgnevate väärtustega [110]:

CO <sub>2</sub>	:	1
N <sub>2</sub> O	:	298
CH <sub>4</sub>	:	25

**Süsinikukvootide hinnad** - Euroopa Liidu emissioonidega kauplemise süsteem (ETS) on välja töötada selleks, et soodustada emissioonide vähendamist ja investeringute tegemist tõhusatesse ja keskkonnasäästlikesse tehnoloogiatesse. Ettevõtted saavad või ostavad endale saastekvoote, mida nad saavad vastavalt vajadusele omavahel kaubelda [114]. Näiteks 2022. aastal teenis Eesti süsinikukvootide müügist üle 333 000 000€ kasu. Vähemalt pool tulust tuleb kasutada kasvuhoonegaaside heidete vähendamiseks. Süsinikukvootide müügist saadud tulu kasutatakse ka osaliselt biometaani tootmise toetamiseks [115]. 2022. aastal tõusid CO<sub>2</sub> kvoodihinnad ligi 100 €/t (Joonis 2.4) ning 2023. aastal ületasid ka selle hinnapiiri [116].





Joonis 2.4 CO<sub>2</sub> kvoodihinnad €/t [116]

Kui arvestada, et Eesti põllumajandusjääke kasutavate biogaasijaamade võimsus on ca 35 GWh ja kui võtta eelduseks, et keskmine CO<sub>2</sub> hind 2022. aastal oli 87,5 €/t, siis saab koostada järgmise tabeli võttes arvesse RED II-s toodud biogaasi ja biometaan KHG keskmiseid väärtuseid.

Tabel 2.13 CO<sub>2</sub> heitmed arvatatud ümber rahalisteks väärtusteks

Biogaasi/biometaani tootmise süsteem	Tehnoloogiline variant		KHG kogused (g CO <sub>2</sub> ekv/MJ)	KHG kogused (t CO <sub>2</sub> ekv/MWh)	CO <sub>2</sub> kogused t CO <sub>2</sub> ekv/aastas	Hind aasta peale (1 jaama kohta)	Hind, €/MWh
Biogaas elektrienergia tootmiseks sõnnikust/lägast	Juhtum 1	Lahtine kääritamissaadus	-28	-0.000028	-3528	308 700	8,82
		Suletud kääritamissaadus	-88	-0.000088	-11088	970200	27,72
	Juhtum 2	Lahtine kääritamissaadus	-23	-0.000023	-2898	253 575	7,245
		Suletud kääritamissaadus	-84	-0.000084	-10584	926 100	26,46
	Juhtum 3	Lahtine kääritamissaadus	-28	-0.000028	-3528	308 700	8,82
		Suletud kääritamissaadus	-94	-0.000094	-11844	1 036 350	29,61
Biogaas elektrienergia tootmiseks biojäätmest	Juhtum 1	Lahtine kääritamissaadus	31	0.000031	3906	-341 775	-9,765
		Suletud kääritamissaadus	9	0.000009	1134	-99 225	-2,835
	Juhtum 2	Lahtine kääritamissaadus	37	0.000037	4662	-407 925	-11,655
		Suletud kääritamissaadus	15	0.000015	1890	-165 375	-4,725
	Juhtum 3	Lahtine kääritamissaadus	41	0.000041	5166	-452 025	-12,915
		Suletud kääritamissaadus	16	0.000016	2016	-176 400	-5,04
Biometaani tootmine lägast		Lahtine kääritamissaadus, heitgaase ei põletata	-20	-0.00002	-2520	220 500	6,3
		Lahtine kääritamissaadus, heitgaase põletatakse	-35	-0.000035	-4410	385 875	11,025
		Suletud kääritamissaadus, heitgaase ei põletata	-88	-0.000088	-11088	970 200	27,72

<b>Biogaasi/biometaani tootmise süsteem</b>	<b>Tehnoloogiline variant</b>		<b>KHG kogused (g CO<sub>2</sub>ekv/MJ)</b>	<b>KHG kogused (t CO<sub>2</sub>ekv/MWh)</b>	<b>CO<sub>2</sub> kogused t CO<sub>2</sub> ekv/aastas</b>	<b>Hind aasta peale (1 jaama kohta)</b>	<b>Hind, €/MWh</b>
		Suletud kääritamissaadus, heitgaase põletatakse	-103	-0.000103	-12978	1135 575	32,445
Biometaan biojätmetest		Lahtine kääritamissaadus, heitgaase ei põletata	51	0.000051	6426	-562 275	-16,065
		Lahtine kääritamissaadus, heitgaase põletatakse	36	0.000036	4536	-396 900	-11,34
		Suletud kääritamissaadus, heitgaase ei põletata	25	0.000025	3150	-275 625	-7,875
		Suletud kääritamissaadus, heitgaase põletatakse	10	0.00001	1260	-110 250	-3,15

## 2.8.2 Keskkonnakasu muude heitmete vähenemisest

Lisaks ülalmainitud kasvuhoonegaasidele CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub>, millega arvestatakse ka RED II-s, tekib keskkonnakasu ka muude heitmete vähendamisest, mida RED II-s välja toodud ei ole.

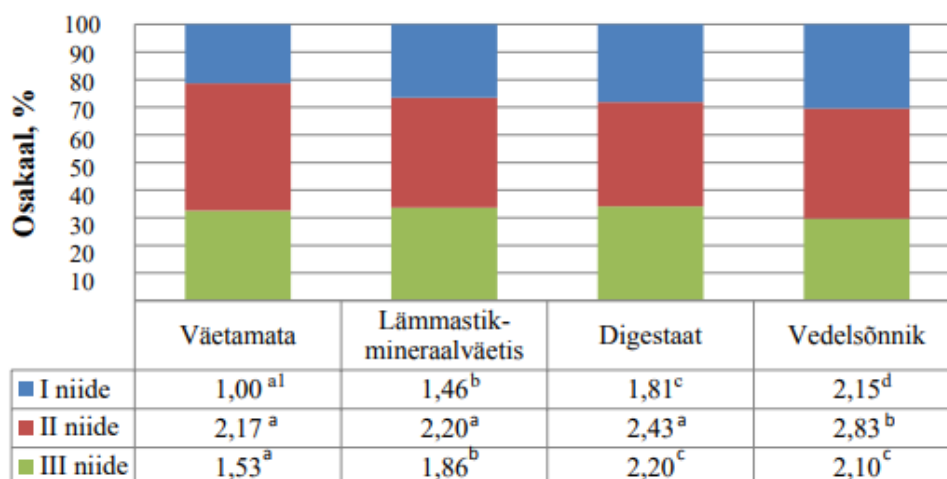
**Vähenenud osakeste emissioon** - tahked osakesed, mis eralduvad fossiilsete kütuste põlemisel (täpsemalt PM<sub>2,5</sub>) on sissehingamisel kahjulikud inimese kopsudele. Biometaani põletamisel on tahkete osakeste sisaldus aga palju madalam võrreldes fossiilsete kütustega. Tahked osakesed eralduvad eelkõige biogaasi tootmisprotsessi käigus, mitte autode heitgaasides [84]. Mitmed uuringud on näidanud, et kui raskeveokites vahetada diisel biometaani vastu, siis väheneb tahkete osakeste heitmed 50-80%. ning kui bensiiniautodes asemel kasutada biometaani autosid, siis vähenevad emissioonid 15-60% [86].

**Ammoniaagi emissioon**- Üheks olulisemaks probleemiks sõnniku käitlemise puhul on ammoniaagi lendumine. Möödunud sajandi viimasel kümnendil moodustas loomakasvatusest lenduv ammoniaak ligikaudu 55% kogu atmosfääri paisatavast ammoniaagi kogusest. Ammoniaagi lendumine jääb katmata lägahoidlates vahemikku 0,73-2,33 kg NH<sub>3</sub>/Nm<sup>3</sup> kohta aastas. Katuse või katematerjali kasutamine hoidla katmisel vähendab lendumist kuni 90% võrreldes katteta hoidlatega [117].

## 2.8.3 Digestaadi keskkonnakasu pinnasele ja veekvaliteedile

Pinnase ja veekvaliteet on üliolulised põllumajandusele. Hetkel on juba 33% maailma põllumaadest ülekurnatud ja kasutuskõlbmatud [118]. Biogaasil on oluline roll ringmajanduse printsiipide rakendamisel. Sellega paraneb ka toiteainete ringlus, kuna biojätmeid saab efektiivselt uuesti kasutusele võtta [86]. Peale kääritusprotsessi jääb järgi digestaat, mis sisaldab biolagunevaid orgaanilisi aineid, suures koguses toitaineid, mikroobe ja vett ning see sobib ideaalselt kasutamiseks põllumajanduses väetisena [84]. See vähendab nõudlust sünteetiliste väetiste järele, mis omakorda vähendab nõudlust haruldaste fosfori järele, mida kasutatakse sünteetiliste väetiste tootmiseks [86]. On küll välja toodud, et biogaasi tootmisest järele jäänud digestaat, mida kasutatakse väetisena, sisaldab kokkuvõttes vähem süsinikku kui ilma töötlemata läga või sõnnik, kuid teisest küljest sisaldab digestaat rohkem stabiliseeritud orgaanilisi ühendeid seega digestaadi kasutamisel on kokkuvõttes pinnasele positiivne mõju [86]. Eestis reguleerib väetisemajandust „Väetiseseadus“, kus on kehtestatud nõuded väetistele, väetiste käitlemisele ja väetise registri pidamise kohta [119].

**Mulla viljakus** - digestaadi kasutamine parandab mulla orgaanilist sisaldust, mulla orgaanilise süsiniku sisaldust, mulla struktuuri, veepidamisvõimet, katioonivahetust, bioloogilist mitmekesisust, mikroobide aktiivsust ja erosiooni vähenemist. Samuti toetab see jätkusuutliku põllumajanduse põhimõtteid [118]. Erinevalt näiteks kompostist on digestaadis toitained (N, P ja K) mineraalsel kujul, seega taimedele kergesti omastatavad [120]. Joonis 2.5 on näha, et vedelsõnniku ja digestaadiga väetamisel on saak oluliselt erinev mineraalväetistega kogutud saagist [117].



<sup>1</sup>Erinevad ülaindeksid samas reas näitavad usutatavat erinevust ( $p < 0,05$ ) variantide vahel

Joonis 2.5 Vilja kuivaine saak erinevate väetiste korral [117]

Mulla viljakuse kasv aitab kaasa vilja saagikusele ja see loob ühiskonnale positiivset lisandväärtust, aga selle kasu rahalist väärtust on keeruline täpselt hinnata [64].

**Mulla süsinikusisaldus** sõltub mitmetest teguritest, näiteks pinnase tüübist, kliimast ja kohaliku põllumajanduse iseärasustest. Süsinikusisalduse muutust on kõige lihtsam kvantifitseerida, kuna seda saab arvutada süsiniku hinna järgi [64]. Uuringute kohaselt aitab digestaadi kasutamine hoida aastas kokku 0,5 - 1 tonni C/ha/aastas [121]. Tänu sellele hoitakse süsinikku pinnase ülemistes kihtides ning see vähendab iga-aastaseid CO<sub>2</sub> heitmeid. Süsiniku sidumisega pinnasesse on võimalik säästa kuni 25 g CO<sub>2</sub>ekv/MJ biogaasi kohta (90 kg CO<sub>2</sub>ekv/MWh) [64].

**Paranenud veekvaliteet ja vähenenud erosioon** - orgaanikarikkad pinnased suudavad hoida rohkem vett ning see vähendab ka kastmisvajadust, kuid kuna tegemist on keerulise süsteemiga, siis rahalise väärtuse arvutamine on keeruline [64]. Üheks vedelsõnnikuga kaasnevaks riskiks lämmastiku ja fosfori leostumine nii põhja- kui ka pinnavette ning ka ärakanne põllult, digestaadi puhul on see risk aga väiksem [117].

Lämmastiku ja väevliheitmed põhjustavad eutrofeerumist ja pinnase happestumist. Eutrofeerumine on veekogude üleküllastumine toiteainetega inimtegevuse tagajärjel, mis tuleneb näiteks vales toiteainete tasakaalust põllumajanduses [86]. Et hinnata kui palju väheneb lämmastikuheitmete hulk digestaadi kasutamisel, tuleb hinnata nii digestaadis kui mineraalväetistes sisalduvat lämmastiku hulka. [84]. Digestaadi eeliseks võrreldes sõnnikuga on paranenud voolavus, happelisuse vähenemine (0,5 pH-d) orgaaniliste hapete lagunemise tõttu käätusprotsessi käigus, käätusprotsessis tekkiva metaani tulemusena väheneb ka C/N suhe [117].

**Bioloogiline mitmekesisus** aitab paremini pinnasel kohanduda keskkonnamuutustega ning vähendab sünteetiliste väetiste kasutamist. Selle mõju kvalitatiivseks hindamiseks tuleks võrrelda digestaadi ja sünteetiliste väetiste kasutamise mõju [64]. Mitmed uuringud on tõestanud, et digestaadi kasutamisel on suurenenud mikroobide aktiivsus pinnases võrreldes anorgaaniliste väetistega. See tuleneb pinnase suurenenud toitainesisaldusest [120].

**Haigustekitajate vähenemine** - ühes milliliitris lägas on üle ühe miljardi mikroorganismi, mis võivad sisaldada haigustekitajaid, mis on ohtlik nii inimestele kui loomadele. Läga ja sõnniku kasutamisel taimede väetisena võivad haigustekitajad kanduda taimedele [122].

**Alternatiivne olukord:** Juhul kui biogaasi ei toodeta, siis biojätmed komposteeritakse/ladestatakse prügilasse ning läga ja sõnnik hoiustatakse või viiakse otse põllule või kasutatakse sünteetilisi väetiseid [64].

**Kvantitatiivne hindamine ja rahalise väärtuse arvutamine:** Mulla süsinikusisaldust on kõige lihtsam rahaliselt hinnata, kuna seda saab seostada süsiniku hinnaga ehk kui palju süsinikku seotakse pinnasesse ja jääb seega õhku paiskamata. Tabel 2.14 on toodud pinnase süsinikusisalduse tõus digestaadi kasutamisel väetisena.

Tabel 2.14 Digestaadi toitainesisaldused [123]

Tooraine	Pinnase süsinikusisalduse tõus (g C/ t digestaat)
Põllumajandusjätmed	26
Loomne läga ja sõnnik	10
Biojätmed	12
Reoveesetted	25

Eeldusel, et süsiniku hind on 87,5 €/t ja ühe jaama suurus 35 GWh, siis on võimalik arvutada süsiniku sidumise rahaline väärtus (Tabel 2.15).

Tabel 2.15 Rahaline kasu süsiniku sidumisest pinnasesse

Tooraine	Pinnase süsinikusisalduse tõus (g C/ t digestaat)	Digestaadi kogus t/a ühe jaama kohta	Seotud süsinik kg C/a ühe jaama digestaadi	Õhku paiskamata jäänud kg CO <sub>2</sub> /a ühe jaama digetsaadi kohta	Hind ühe 35 GWh jaama kohta, €/a	Hind, €/GWh
Loomne läga ja sõnnik	10	50 000	500	1835	160 562	4587
Biojätmed	12	17500	210	770,7	67 436	1927

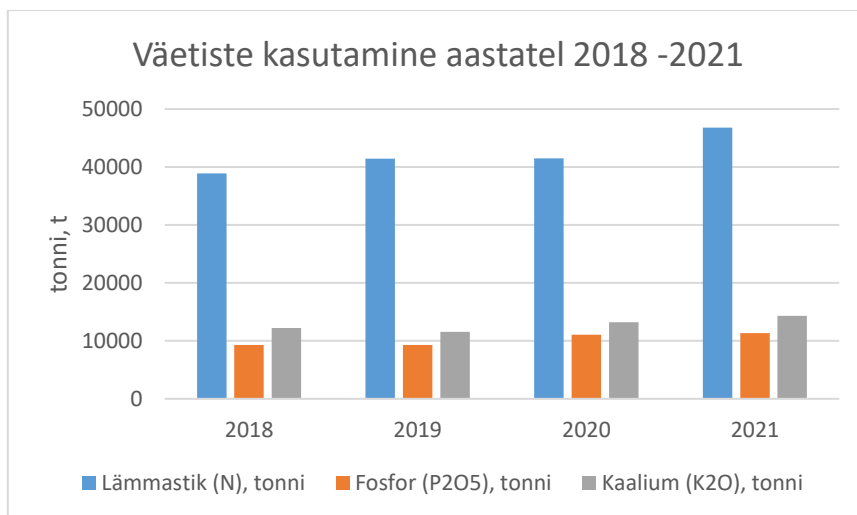
## 2.8.4 Vähenenud nõudlus haruldaste materjalide järele

Teiste taastuenergiaallikate puhul kasutatakse hulgaliselt väärismaterjale, näiteks liitiumit, niklit, koobaltit jm, mida kasutatakse akude, päiksepaneelide ja tuuleturbiinide valmistamiseks. Biogaasijaama ehitamisel kulub küll hulgaliselt ehitusmaterjale (betooni ja rauda), kuid tegemist ei ole niivõrd haruldaste materjalidega ning tootmisprotsessi käigus kasutatakse ainult orgaanilisi jätmeid [64].

## 2.9 Põllumajandus

### 2.9.1 Sünteetiliste väetiste asendamine digestaadiga

Sünteetiliste väetiste tootmine põhjustab 1% kogu maailma kasvuhoonegaasidest, kuna lämmastikväetiste tootmiseks kasutatakse suurtes kogustes maagaasi nii toorainena kui ka protsessi energiavajaduste katmiseks. Digestaat on aga biometaanitootmise jääkprodukt, mis sisaldab lämmastikku, fosforit ja kaaliumit ja vähesel määral ka magneesiumit, kaltsiumit, väävlit ja tsinki. Kõik need ühendid on vajalikud taimede kasvuks. Digestaati saab põldudele viia samamoodi nagu sõnnikutki [64]. Kuna Põllumajandus- ja toiduameti Väetiseregistri andmetele tuginedes Eestis suuremahulist sünteetiliste väetiste tootmist ei toimu ning väetised imporditakse, siis sünteetiliste väetiste tootmisega seonduvat CO<sub>2</sub> heitme säästu selle asendamisel digestaadiga Eesti kontekstis arvutada ei saa, kuid globaalses võtmes on sellel mõju olemas. Küll aga saab arvestada rahalise kokkuhoiuga sünteetiliste väetiste asendamisel kohaliku digestaadiga. Statistikaameti andmete kohaselt (PM065 Mineraalväetiste kasutamine) kasutati Eestis 2021. aastal kokku üle 72 000 tonni sünteetilisi väetiseid. Enim kasutati lämmastikväetiseid 64,6%, vähesemal määral fosforväetist (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 15,7% ning kaaliumväetist (K<sub>2</sub>O) 18,8% (Joonis 2.6). 2021. aastal oli väetatud pinda kokku 458 792 hektarit ehk 0,155 tonni väetist hektari kohta [124].



Joonis 2.6 Statistikaameti andmed PM065: Mineraalväetiste tarbimine Eestis 2018 kuni 2021.a [125]

**Toitainete sisaldus** - Loomset päritolu väetis sisaldab suurel hulgal vett (70-98%) ning vähesemal määral toitaineid ja muid orgaanilisi ühendeid (2-30%). Toitainete sisaldus sõltub sellest, kas tegemist on tahke sõnnikuga (segatud põhuga) või on tegemist vedela lágaga, kus veesisaldus on suurem ja toitainesisaldus väiksem. Enamus toitainetest moodustavad makrotoitained (lämmastik, fosfor ja kaalium) ning ülejäänud makrotoitaineid on väiksemates kogustes (naatrium, vask, tsink, boor jm) [122]. Sõnnik sisaldab vajalikke toitaineid, sh P, N, K, Ca, S, Mg jne. Mitmete regulatsioonide tõttu sõnnikukäitlemises on liigutatud suurtootmiste peale, kus allapanu kasutatakse väga vähe. Olenevalt riigist on piimaveiste vedelsõnniku lämmastiksisaldus 2-7 kg/t, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus 0,2-6 kg/t ja K<sub>2</sub>O sisaldus 2,6-9,5 kg/t [117].

Tabel 2.16 Toitainesisaldus erinevate toorainete kohta [117]

Tooraine liik	Kuivaine, %	N, kg/t	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , kg/t	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , kg/t	K <sub>2</sub> O, kg/t
Piimalehma sõnnik	6,1	3,7	2,2	1,3	5,1
Lihaveise sõnnik	7,6	4,6	2,6	1,5	5,3
Seasõnnik	5,2	4,8	3,4	2,1	3,2
Biojätmed	-	4,8-5,2	-	1,1-1,48	2,4-1,62
Põllumajandusjätmed	-	3,6-6,7	-	1,7-3,4	4,4
Reoveesetted	-	3,0-5,0	-	3,0-6,0	1,62-0,3

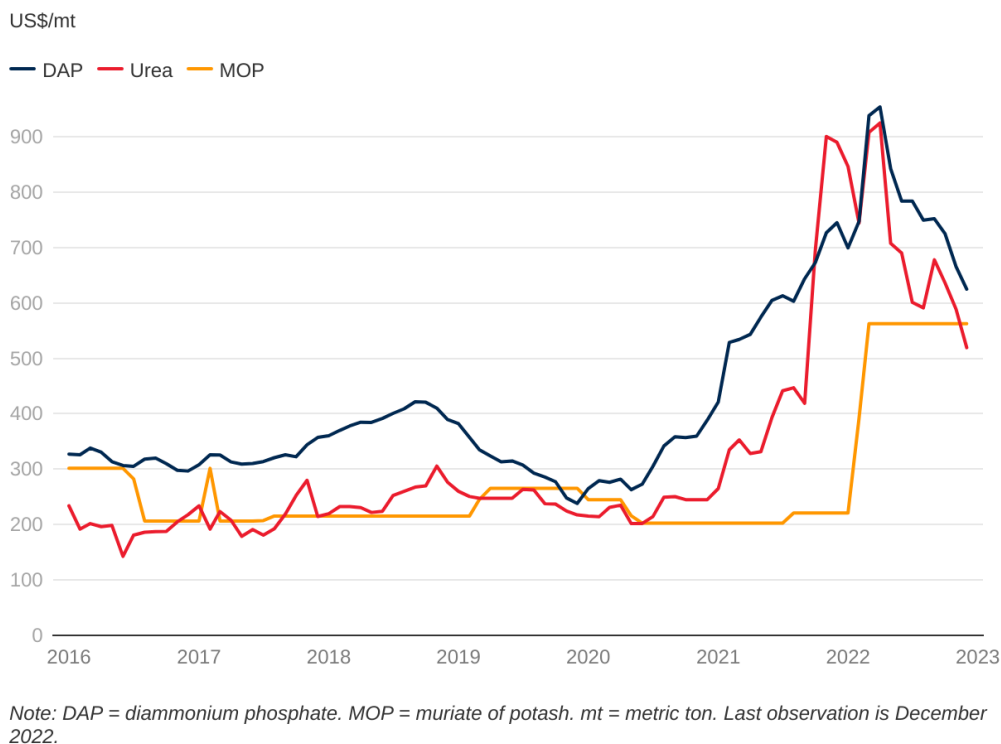
Tabel 2.17 Digestaadi toitainesisaldus [64]

Tooraine liik	Kuivaine, %	N, kg/t	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , kg/t	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , kg/t	K <sub>2</sub> O, kg/t	Kokku keskmiselt kg/t
Biojätmed	-	4,8-5,2	-	1,1-1,48	2,4-1,62	8,3
Põllumajandusjätmed	-	3,6-6,7	-	1,7-3,4	4,4	12,1
Reoveesetted	-	3,0-5,0	-	3,0-6,0	1,62-0,3	9,46



NPK väetis on mitut toiteelementi sisaldav anorgaaniline kompleksväetis, mis on keemiliselt valmistatud ja millele pole lisatud orgaanilisi ühendeid [126]. Baltic Agro kodulehelt leiab info mikro- ja makroelementide hindamiseks [127]. 2021. aastal kasutati Eestis keskmiselt 155 kg makroelementidega (NPK) väetist hektari kohta [124]. Selleks, et saada Eesti keskmine ehk 155 kg/ha makroelemente, on vaja lisada sünteetilisi väetiseid 442,9 kg/ha. Kui eeldada, et digestaadis on keskmiselt toitained 10 kg/t, siis selleks, et anda pinnasesse 155 kg toitained (NPK) on vaja digestaati 15,5 tonni. Seega ümardatult öeldes on 500 kg/ha sünteetilise väetise asendamiseks vaja 15,5 tonni digestaati/ha. Sünteetilise väetise toitaainesisaldus on 350 kg/t ning digestaadi puhul 10 kg/t.

**Hind** - Kuna mineraalväetiste hinnad on seoses energiahindade kallinemisega samuti kallinenud, siis ei peeta sõnnikut enam mitte loomakasvatuse kõrvalproduktiks vaid põhiliseks produktiks kasutamaks seda väetisena [117]. Maagaas on üks peamistest väetiste tootmise energiaallikatest ning seetõttu sõltub väetiste hind otseselt maagaasi hinnast [128]. Ukraina sõda ja Venemaa gaasist loobumine tõstis märgatavalt ka väetiste hindasid, kui varem maksid lämmastikväetised 200 €/t, siis hinnad kerkisid kuni 1000 €/t (Joonis 2.7) [129]. NPK väetiste hind Eestis Silva Agro näitel aprill 2023 seisuga oli 660€. Hinnale lisandub käibemaks [130].



Joonis 2.7 Väetiste hinnad maailmaturul [131]

**Alternatiivid:** Kui biometaanit ei toodeta, siis ei teki ka digestaati, mida saaks sünteetiliste väetistega asendada. Digestaadi ja sünteetilisi kütuseid tuleb võrrelda vastavalt toorainele. Tuleb ka arvestada, et iga digestaadis leiduv toitaine (lämmastik, fosfor ja kaalium)) asendab erinevat sünteetilist väetist. Näiteks digestaadis sisalduv lämmastik N saab asendada sünteetilisi lämmastikväetiste tarbimist nt ammonoimnitraat (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) ja urea (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O) [64].

**Kvantitatiivne hinnang ja rahalise väärtuse arvutamine:** Selleks, et hinnata rahalist kasu sünteetilise väetise asendamisel digestaadiga, tuleb hinnata potentsiaali, kui palju toitaineid saab asendada. See sõltub digestaadi kogusest ja toitainesisaldusest [64]:

$$\text{Digestaadi kogus} \left( \frac{t_{\text{digestaati}}}{\text{MWh}_{\text{biometaanit kohta}}} \right) \times \frac{\text{Digestaadi toitaine sisaldus } t_{\text{NPK}}/t_{\text{digestaat}}}{\text{Sünteetilise väetise toitaine sisaldus } \frac{t_{\text{NPK}}}{t_{\text{väetis}}}} \times \text{Sünteetilise väetise hind} \left( \frac{\text{eur}}{t_{\text{väetis}}} \right)$$

Tabel 2.18 Sünteetiliste väetiste asendamisest digestaadiga

Muutuja	Väärtus
Sünteetilise väetise hind Eestis (€/ t väetis) [130]	660
Digestaadi toitainesisaldus (kg/t digestaati) [64]	10
Sünteetilise väetise toitainesisaldus kg/t [127]	350
Digestaadi saagis (t digestaati /MWh biometaanit kohta)	0,829 – 1,429
Digestaati ühe jaama kohta t/a	17 500 – 50 000
Sünteetilise väetise hind eur/MWh biometaanit kohta	21,29
Hind 35 GWh biogaasijaama kohta €/35 GWh	745 140
Hind, €/GWh	21 289 714

## 2.9.2 Jäätmekäitlus

Kääritusjäätme sertifitseerimisel lähtutakse Keskkonnaministri 10.05.2016.a. määrusest nr 12 „Nõuded biolagunevatest jäätmetest biogaasi tootmisel tekkiva kääritusjäätme kohta“. Sertifikaatide väljastamisega tegeleb SA Taaskasutatavate Materjalide Sertifitseerimiskeskus [132].

**Biojäätmete** kasutamine biogaasi tootmiseks soodustab biojäätmete eraldamist teistest jäätme fraktsioonidest, mis soodustab selle edasist töötlemist või taaskasutamist. See soodustab ringmajandust ja seeläbi saab jäätmed kasutusse võtta ning muuta hoopis väärtuslikuks tooteks. Kui biometaanit ei toodeta, siis biojäätmed harilikult komposteeritakse või halvemal juhul ladestatakse prügimäele koos muu olmeprügiga [86]. Kompostimise puhul küll toodetakse orgaanilist väetist, kuid ei kasutata ära eralduvat metaani, mida kääritamise puhul saab eraldi turustada. Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus toodetakse biojäätmetest komposti. Vastavalt hinnakirjale, on biolagunevate köögi- ja sööklajajäätmete sisseostu hind 50 €/t [133]

Sertifitseeritud kompost on aga müügil hinnaga 7,2 €/m<sup>3</sup>. Seega siinkohal saab majanduslikku kasu hinnata vaid saamata jäänud metaanikoguse pealt [134].

**Põllumajandusjäätgid (nt põhk)** - Juhul kui biometaan ei toodeta, siis jäetakse tihti põllujäätgid kasutult seisma või kasutatakse muul otstarbel, näiteks loomade allapanuna. Kuna põllumajandusjäätmete töötlemiskulu pole suur, siis ei arvestata sellega jäätmekäitluse kohapealt [64].

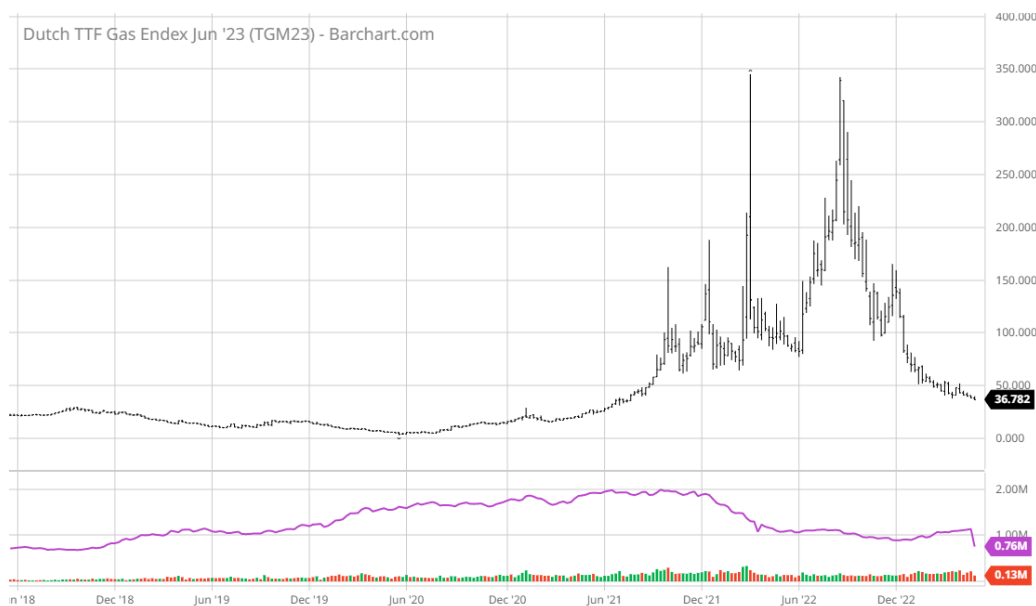
**Läga ja sõnnik**- Läga ja sõnnikut saab samuti kasutada otse väetisena ja sellel on samad omadused, mis digestaadil, seega seda ei saa arvestada antud juhul lisaväärtuste hulka jäätmekäitluse kontekstis [64].

**Reoveesetted ja tööstusheitvesi** – Biogaasijaamad aitava töödelda tööstus- ja reoveesetted ning selle abil neid jääke puhastada, eemaldada patogeene, vähendada jääkmuda koguseid ning taaskasutada toitaineid ja toota energiat. Kaudselt aitab see vähendada ka toitainete lekkeid, mis tagab pinnase ja vee parema kvaliteedi [86]. Anaeroobse kääritamise puhul on põhiliseks tuluks saadav biogaas ja reoveekäitlus on pigem lisaboonus [135]. Enamus reoveepuhastusjaamade juurde pole aga biogaasi tootmissüsteemi rajamine otstarbekas, kuna mahud on liiga väikesed, seeteõttu selle kasuga siinkohal ei arvestata. Tallinna Vesi hinnakirja alusel on juriidilistele isikutele tasu reovee ärajuhtimise ja puhastamise eest juriidilisele isikule 1,75 €/m<sup>3</sup>, hinnale lisandub käibemaks [136].

### 2.9.3 Energeetika

**Energiajulgeolek** - Seoses Venemaa sõjalise kallaletungiga Ukrainasse on energiajulgeolek tõusnud eriti teravalt päevakorda. Peale selle on liikumine taastuvenergia kasutamise suunas tõstatanud vajaduse stabiilse energiasüsteemi järele. Biogaas on detsentraliseeritud ja kohalik energiaallikas, kus kasutatakse kohalikku toorainet, mida ei pea kaugelt importima. See annab kohalikul tasandil suurema kontrolli energiatootmise üle [86]. 2021. aasta seisuga importis Euroopa 83% ulatuses maagaasi ning ligi 50% sellest pärines Venemaalt. Peale Venemaa sõjalise kallaletungi Ukrainale avaldas Euroopa Liit kava järk-järguliseks loobumiseks Vene gaasist. 2022. aasta lõpu seisuga imporditi 25,7% ulatuses LNG-d peamiselt USA-st, aga ka Katarist ja Nigeeriast. 24,9% gaasist (813 TWh) pärines Norrast, 24,6% gaasist imporditi aga endiselt Venemaalt (803,7 TWh), 11,6% Alžeerias ja 13% mujalt riikidest. Euroopa gaasivajadus on väga suur, kuna majapidamised on 30% ulatuses gaasiküttel ja samuti kasutab tööstus suurel hulgal maagaasi [137]. Viimasel ajal on maagaasihinnad olnud väga volatiilsed. Nii sõja kui ka COVID-19 järgse majandusseisaku tõttu tõusis gaasi tarbimine 2021. aastal väga järsult ja see suurendas

nõudlust maagaasi järele. See suurendas elanikkonna energiavaesuse riski ja vähendas Euroopa tööstuse konkurentsivõimet. Kui viimase kümne aasta jooksul on maagaasi hinnad olnud keskmiselt 5€/MWh - 35€/MWh, siis 2022. aasta augustis purustati senised gaasi hinnarekordid ja maagaasi hind kerkis üle 300€/MWh (Joonis 2.8). Seetõttu on Euroopa Liit töötamas välja turukorrektiooni mehhanismi, mis piirab erakordselt kõrgete gaasihindade teket ja vähendab seega negatiivset majanduslikku mõju kodumajapidamistele ja tööstusele [138].



Joonis 2.8 Maagaasi hinnagraafik Dutch TTF andmetel [139]

Vastavalt Joonis 2.8 on näha, et 2023. aastal on gaasihinnad langenud ca 36 €/MWh, kuid 2022. aastal olid need märgatavalt kõrgemad. 2022. aastal tarbiti Eestis 3,77 TWh maagaasi, mis on viimase aastakümne madalaim maht [140]. Seega saaks antud uuringu andmete põhjal biometaani abil asendada kokku 15% maagaasi või 6,2% transpordikütuste tarbimisest. Teise eeldusena arvestatakse keskmiseks maagaasi hinnaks 35€/MWh [139]. Kasum Eesti ühiskonnale tuleneb sellest, et importimise asemel kasutatakse kohalikku tootmist, tänu millele jääb kasum Eesti riigi SKT-sse.

Tabel 2.19 Eeldus 1: Biometaani kasutatakse maagaasi asendamiseks

	<b>Maht</b>
Toodetav biometaani kogupotentsiaal (100%), TWh/a	0,57
Maagaas, mida on võimalik biometaaniga asendada, TWh/a	0,57
Keskmine maagaasi turuhind 2023. aastal, €/MWh	35
Kogumaksumus, €/a	19 950 000

Transpordisektoris võetakse eelduseks, et bensiini postihind tanklas on 191 €/MWh ning diisli 175 €/MWh ning sisseostuhind moodustab 35% müügihinnast [141], [142].

Tabel 2.20 Eeldus 2: Biometaan kasutatakse transpordikütuste asendamiseks

	<b>Maht</b>
Toodetav biometaani potentsiaal (100%), TWh/a	0,57
Transpordikütused, mida on võimalik biometaaniga asendada, TWh/a	0,57
Keskmine bensiini sisseostu hind (jaanuar 2023. a), €/MWh	66,85
Keskmine diisli sisseostu hind (jaanuar 2023. a), €/MWh	61,25
Kogumaksumus bensiini asendamisel 100%, €/a	38 104 500
Kogumaksumus diisli asendamisel 100%, €/a	34 912 500

### 2.9.4 Süsiniku eraldamine ja selle müük

Biogaas koosneb põhiosas metaanist ja 35%-45% ulatusest CO<sub>2</sub>-st. Biogaasi puhastamise käigus eraldatakse biogaasist CO<sub>2</sub>, et saada puhast biometaani. Selle protsessi käigus on võimalik CO<sub>2</sub> kokku koguda üsna madalate kuludega. Teine võimalus on biogaasi koostootmisjaamade (CHP) puhul koguda CO<sub>2</sub> otse heitgaasidest. Kolmas võimalus on toota biovesinikku ning selle käigus koguda üleliigne CO<sub>2</sub>. Kogutud CO<sub>2</sub> saab komprimeerida või veeldada ja kasutada seda erinevates tootmisprotsessides lähteainena või näiteks geoloogiliselt ladustada [143]. Süsinikdioksiidi saab ladustada maa-alustes geoloogilistes struktuurides või kasutades mineraalset sidustumist tööstusjäätmetega. Ladustamise kulud sõltuvad reservuaari eripäradest. Eesti tingimustes ei ole geoloogiline ladustamine ilmselt otstarbekas, kuna ladustamiseks puuduvad sobivad kohad ning selle transport nt Norra oleks liialt energiakulukas ja kallis. Põlevkivijaamade puhul on CO<sub>2</sub> püüdmise, transpordi ja ladustamise kulu praeguste teadmiste põhjal kokku vähemalt ca 76 €/t kuni 90 €/t Biogaasi puhul on püüdmiskulu odavam, kuid tootmismahud on see-eest väiksemad [144]. Hetkel on tööstuses kasutatav CO<sub>2</sub> peamiselt fossiilkütuste põhine. Ilma töötlemata on võimalik CO<sub>2</sub> kasutada näiteks toiduainetööstuses toiduainete pakendamisel, jookide karboniseerimiseks, metallitööstuses, taimekasvatuses, solvendina, soojusülekanne vedelikuna, tuletõrjevahendite tootmiseks jpm. Kui seda edasi töödelda, siis on aga võimalik toota sünteetilisi kütuseid, kemikaale ja ehitusmaterjale [143]. Süsinikupüüdmise tehnoloogiate puhul on keskkonna aspektist oluline ka toote eluiga ehk kas toode seob süsinikku pikaks ajaks (nt ehitusmaterjalid) või läheb see kohe uuesti ringlusesse (nt sünteetilised kütused, kemikaalid jm). Samuti on vaja vaadata, et süsiniku püüdmiseks ei kuluks rohkem energiat kui sellest saadav kasu. Hetkel on kõige konkurentsivõimelisemad CO<sub>2</sub> kasutusvaldkonnad polümeeride ja ehitusmaterjalide tootmine, aga ka näiteks väetiste (uurea) tootmine. Praegu aga ei suudaks Eesti konkureerida suurte keemiatööstustega riikidega, kus vastavad tööstused on juba olemas [144]. Seetõttu selles uuringus süsinikupüüdmisest saadavate kasudega ei arvestata, kuid sellel võib olla tulevikus positiivne mõju.

## 2.10 Kokkuvõte sotsiaalmajanduslikest mõjudest

Tabelis 2.21 kajastatud arvutuste tegemisel on võetud eelduseks, et keskmine biometaanijaama võimsus on 35 000 MWh ning Eesti potentsiaal on 570 000 MWh. Keskkonnakasu arvestamisel tehakse eeldus, et 67,6% kasutatakse läga ja sõnnikut ning 32,4% biojätmeid ning tegemist on suletud kääritamissaadusega ning heitgaasid põletatakse. Lisaks eeldatakse, et biometaan asendab 20% maagaasi ning 80% transpordikütuseid.

Tabel 2.21 Kokkuvõte sotsiaal-majanduslikest kasudest

<b>SOTSIAAL-MAJANDUSLIKE MÕJUDE HINDAMINE</b>		<b>Kasu €/MWh</b>	<b>Kasu, €/a</b>	<b>Kommentaar</b>
<b>MAJANDUS</b>				
Maksukulu saamata jäänud aktsiisist		-3,57 €/MWh	- 2 034 900	-0,6 mln €/a (kokku)
Käibemaks		0,57 €/MWh	324 900	Käibemaksu tasumine 20 000 €/a jaama kohta; Keskmine jaama võimsus 35 GWh
Muud maksud (nt maamaks)		0,03 €/MWh	17 100	1000 €/a jaama kohta
<b>SOTSIAALSED MÕJUD</b>				
Töökohtade loomine ja sellega seonduv maksutulu:		Keskmiselt 3,4 töökohta jaama kohta	-	
Üksikisiku tulumaks		0,12 €/MWh	68 400	4400 €/a jaama kohta (35 GWh)
Sotsiaalmaks		1,17 €/MWh	666 900	30 000 €/a jaama kohta (35 GWh)
Kohustuslik kogumispension		0,01 €/MWh	5 700	350 €/a jaama kohta (35 GWh)
Töötuskindlustusmaksed		0,009 €/MWh	5 130	300 €/a jaama kohta (35 GWh)
Ettevõtluse elavdamine		pole rahaliselt mõõdetav	-	
Müra vähenemine		pole rahaliselt mõõdetav	-	
Ebameeldiva lõhna vähenemine		pole rahaliselt mõõdetav	-	
<b>KESKKOND</b>				
Keskkonnakasu KGH emissioonide vähenemisest:				
Biometaan lägast ja sõnnikust (67,6%)	Suletud kääritamissaadus, heitgaasid põletatakse	32,4	12 499 781	
Biometaan biojätmetest (32,4%)	Suletud kääritamissaadus, heitgaasid põletatakse	-3,15	-581 742	
Keskkonnakasu vähenenud osakeste heitmetest		Pole rahaliselt mõõdetav	-	

<b>SOTSIAAL-MAJANDUSLIKE MÕJUDE HINDAMINE</b>	<b>Kasu €/MWh</b>	<b>Kasu, €/a</b>	<b>Kommentaar</b>
Keskkonnakasu vähenenud ammoniaagiheitmetest	Pole rahaliselt mõõdetav	-	
Digestaadi keskkonnakasu pinnasele ja veekvaliteedile:		-	
Mulla viljakus	Pole rahaliselt mõõdetav	-	
Paranenud veekvaliteet	Pole rahaliselt mõõdetav	-	
Suurenenud bioloogiline mitmekesisus	Pole rahaliselt mõõdetav	-	
Haigusetekitajate ja mikroobide vähenemine	Pole rahaliselt mõõdetav	-	
Süsiniku sidumine pinnasesse	1,98-4,71 (keskmiselt 3,35) €/MWh	1 909 500	CO <sub>2</sub> hind 87,5 €/t; Tekkinud digestaat 17500t-50000 t/a ühe jaama kohta; Keskmine jaam 35 GWh
Vähenev nõudlus haruldaste materjalide järele	Pole rahaliselt mõõdetav	-	Teised taastuvenergiaallikad (PV, akud jne) kasutavad hulgaliselt väärismetalle
<b>PÕLLUMAJANDUS</b>			
Süntetiliste väetiste asendamine digestaadiga	21,29	12 135 300	NPK väetise hind 660 €/t
<b>JÄÄTMEKÄITLUS</b>			
Biojäätmete taaskasutus	Pole rahaliselt mõõdetav	-	
Reoveesetete käitlus	Pole rahaliselt mõõdetav	-	
<b>ENERGEETIKA JA ENERGIAJULGEOLEK</b>			
Maagaasi asendamine biometaaniga (20%)	35	3 990 000	
Tranpordikütuste (bensiooni) asendamine bio-CNGga (40%)	191 €/MWh	15 241 800	35% kütuse hinnast on sisseostuhind
Tranpordikütuste (diisli) asendamine bio-CNGga (40%)	175 €/MWh	13 965 000	35% kütuse hinnast on sisseostuhind
Reguleeritav tootmisvõimsus	Pole rahaliselt mõõdetav	-	
<b>KOKKU:</b>		58 212 869 €	

## KOKKUVÕTE

Antud magistritöö eesmärgiks oli selgitada välja tooraineressurss biogaasi tootmiseks ja selle edasiseks väärimiseks biometaaniks. Lisaks sellele oli eesmärgiks leida 1 MWh biometaani tootmise ja tarbimise sotsiaalmajanduslik mõju läbi terve teekonna ning võrrelda seda teiste kütustega.

Teema valikul on lähtunud sellest, et biometaan on üks olulisematest taastuvenergiaallikatest. Biometaani tootmisega kasutatakse ära orgaanilised jäätmed muutes need väärtuslikuks energiaallikaks, vähendades oluliselt kasvuhooonegaaside emissiooni. Biometaani kasutamine on mitmekülgne ning see võib leida rakendust mitmel tasandil, näiteks asendades fossiilseid kütuseid transpordisektoris või kasutada seda soojus- ja elektrienergia tootmiseks. Bioetaani kasutusala ulatub kodumajapidamistest kuni suuremahuliste tööstusettevõteteni. Antud uuringul on ka oluline sotsiaalne mõõde, kuna see mõjutab energiajulgeolekut, keskkonnapoliitikat ning kogukondade ja ettevõtete jätkusuutlikkust.

Töö tulemustest järeldub, et kõige suurem potentsiaal on toota biometaani lägast ja sõnnikust ning biojäätmest (sh kodumajapidamiste ja toitlustusasutuste biojäätmest ning toiduainetööstuse jäägid). Uuringu tulemuste kohaselt on Eestis kasutamata biometaani tootmise kogupotentsiaal 0,570 TWh/a, millest on praegu juba kasutusel 0,17 TWh/a. Seega kasutamata potentsiaal on 0,4 TWh/a. Sellise mahu juures oleks võimalik rajada ca 11 uut biometaanijaama. Seega saaks antud uuringu andmete põhjal biometaani abil asendada kokku 15% maagaasi või 6,2% fossiilsete transpordikütuste tarbimisest. Antud uuringu tulemus erineb varasemate uuringute tulemustest, kus on välja toodud, et biometaani tootmise potentsiaal on 1 - 1,3 TWh/a ehk võimalik rajada 20 - 30 uut biometaanijaama. Erinevused võivad olla tingitud erinevatest lähteandmetest tooraine koguse hindamisel.

Selleks, et biogaasist toota biometaani on vajalik biogaasi puhastamine. Enim levinud puhastustehnoloogiad on membraanseparatsioon, vesipuhastus ja keemiline puhastus. Tuleb ka tähelepanu juhtida, et biogaasi puhastamiseks ja komprimeerimiseks kulub märgataval hulgal lisaenergiat. Seetõttu on biometaani kasutamisel transpordisektoris kasutegur vaid 18%, samas kui biogaasi otsesel põletamisel CHP seadmes soojus- ja elektrienergia koostootmiseks on kasutegur kuni 90%.

Töö käigus on arvestatud järgnevate sotsiaalmajanduslike kasudega:

- majandus - riigieelarvesse laekuvad maksud, sh käibemaks, tööjõumaksud, maamaksud jm;



- sotsiaalsed hüved - Suurenenud tööhõive, maaelu edendamine, vähenenud müra ja ebameeldiv lõhn;
- keskkond - süsinikdioksiidi, metaani, lämmastiku jm kasvuhoonegaaside heitmete vähenemine; pinnase- ja veekvaliteedi paranemine, sh mulla bioloogilise mitmekesisuse, süsiniku- ja toitaineteisalduse ja viljakuse kasv, vähenenud nitraadileotumise oht ning veekvaliteedi paranemine;
- põllumajandus: sünteetiliste väetiste asendamine digestaadiga;
- jäätmekäitlus: paranenud biojätmete ja reoveesetete käitlus;
- energeetika: energiajulgeolek, taastuvenergia- ja hajaenergeetika edendamine.

Rahalise väärtuse arvutamisel on võetud teatavad eeldused. Arvestatud on riigile laekuva suurenenud maksutuluga tänu suurenenud tööhõivele ja ettevõtlusele. Samuti on arvestatud rahalise väärtusega energiaimpordi vähenemisest ja sünteetiliste kütuste impordi vähenemisest tulenevate kasudega. Lisaks on arvestatud riigile laekuvat tulu, mis tekib süsinikdioksiidi (CO<sub>2</sub>) kvootide müügist, kuna biometaani kasutamisega väheneb kasvuhoonegaaside heide ning seega on võimalik CO<sub>2</sub> kvootide müügist saada lisatulu.

Uuringu tulemustest võib järeldada, et sotsiaalmajanduslik kogukasu biometaani täispotentsiaali rakendamisel oleks 58 212 869 € ehk 102,1 €/MWh.

Võrreldes varasema uuringuga „Biometaani kasutamise avalikud hüved“ (Oja, 2013), on antud uuringu tulemuste kohaselt sotsiaalmajanduslik mõju 78,5% väiksem. Erinevus tuleneb sellest, et antud uuringus on kõige suurema potentsiaaliga tooraineks hinnatud läga ja sõnnikut ning biojätmeid, kuid varasemas uuringus oli rõhk rohtse biomassi kasutamisel. Antud uuringu tulemuste kohaselt saab aga rohtset biomassi kasutada vaid väikestes kogustes alla 10%, seega selle osaga ei arvestatud. Samuti on rohtse biomassi kogumine muutunud kulukamaks. Järgmistes samalaadsetes uuringutes oleks kasulik koguda andmeid tootjatelt ning selle põhjal teha järeldused, mis kajastaksid töö tulemusi veelgi täpsemalt.

## SUMMARY

The aim of this Master's thesis was to determine the availability of feedstock resources for biogas production and their further valorization into biomethane. Additionally, the goal was to assess the socio-economic impact of producing and utilizing 1 MWh of biomethane throughout the entire value chain and compare it with other fuels.

This topic is chosen based on the recognition that biomethane is one of the most important renewable energy sources. By utilizing organic waste and converting it into a valuable renewable energy source, biomethane production significantly reduces greenhouse gas emissions. Its applications are diverse and can be found in various sectors, such as replacing fossil fuels in the transportation sector or using it for heat and electricity generation. Biomethane can be utilized from households to large-scale industrial enterprises. This research also has significant social implications as it affects energy security, environmental policies, and the sustainability of communities and businesses.

The findings of this study indicate that the greatest potential for biomethane production lies in the utilization of slurry, manure, and various bio-wastes (including household and food industry waste). According to the research results, the untapped biomethane production potential in Estonia is 0.570 TWh/year, with currently 0.17 TWh/year already being utilized. Therefore, an untapped potential of 0.4 TWh/year could support the establishment of approximately 11 new biomethane plants. Based on the data from this study, biomethane has the potential to replace 15% of natural gas consumption or 6.2% of fossil fuel consumption in the transportation sector. It is worth noting that these figures differ from previous studies, which estimated the biomethane production potential to be 1-1.3 TWh/year, allowing for the establishment of 20-30 new biomethane plants. The discrepancies may arise from different assumptions regarding the estimation of feedstock quantities.

To produce biomethane from biogas, purification is required. The most common purification technologies include membrane separation, water scrubbing, and chemical absorption scrubbing. It should be emphasized that significant additional energy is required for biogas purification and compression. As a result, the efficiency of biomethane utilization in the transportation sector is only 18%, while in combined heat and power (CHP) systems, the efficiency can reach up to 90% for heat and electricity generation through direct biogas combustion.

Throughout the study, various socio-economic benefits were taken into account, including:

- Economic benefits: increased tax revenue for the state, including value-added tax, labour taxes, property taxes, etc.
- Social benefits: increased employment, rural development, reduced noise and unpleasant odours.
- Environmental benefits: reduction of greenhouse gas emissions such as carbon dioxide, methane, and nitrogen, improved soil and water quality, increased soil biodiversity, carbon and nutrient content, decreased risk of nitrate leaching, and improved water quality.
- Agricultural benefits: replacement of synthetic fertilizers with digestate.
- Waste management benefits: improved handling of bio-waste and sewage sludge.
- Energy benefits: enhanced energy security, promotion of renewable and decentralized energy.

When calculating the monetary value, certain assumptions were made. Consideration was given to increased tax revenue for the state due to higher employment and entrepreneurship. The benefits of reduced energy imports and decreased synthetic fuel imports were also taken into account. Furthermore, revenue from the sale of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) quotas was considered, as biomethane utilization reduces greenhouse gas emissions, thus providing additional revenue from CO<sub>2</sub> quota sales. Based on the results of the study, it can be concluded that the socio-economic benefits of fully utilizing the potential of biomethane would amount to €54,642,480 or €95.9/MWh.

Compared to the previous study "Public Benefits of Biomethane Utilization" (Oja, 2013), the socio-economic impact according to the results of this study is 80% smaller. The difference arises from the fact that in this study, the feedstock with the highest potential was assessed as slurry, manure, and bio-waste, whereas the previous study focused on the use of herbaceous biomass. According to the results of this study, herbaceous biomass can only be used in small quantities, less than 10%, so it was not taken into account. Additionally, the collection of herbaceous biomass has become more expensive. In future similar studies, it would be beneficial to gather data from producers and draw conclusions based on that, which would reflect the results of the work in even greater detail.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] E. Winquist *et al.*, „Expert Views on the Future Development of Biogas Business Branch in Germany, The Netherlands, and Finland until 2030“, *Sustainability*, kd 13, nr 3, Art. nr 3, jaan 2021, doi: 10.3390/su13031148.
- [2] „Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II)“. [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/reference-regulatory-framework/renewable-energy-recast-2030-red-ii\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/reference-regulatory-framework/renewable-energy-recast-2030-red-ii_en) (vaadatud 5. märts 2023).
- [3] „Venemaa sissetung Ukrainasse ja selle mõju turgudele: ELi reageerimine“, 22. detsember 2022. <https://www.consilium.europa.eu/et/policies/eu-response-ukraine-invasion/impact-of-russia-s-invasion-of-ukraine-on-the-markets-eu-response/> (vaadatud 31. jaanuar 2023).
- [4] „Eesti kehtestab sanktsioonina keelu maagaasi impordile ja ostule Venemaalt | Välisministeerium“. <https://www.vm.ee/uudised/eesti-kehtestab-sanktsioonina-keelu-maagaasi-impordile-ja-ostule-venemaalt> (vaadatud 31. jaanuar 2023).
- [5] „Biometaan | Elering“. <https://elering.ee/biometaan> (vaadatud 8. veebruar 2023).
- [6] „Eesti gaasiülekandevõrgu arengukava 2023-2032.pdf“. Vaadatud: 19. aprill 2023. [Online]. Available at: <https://elering.ee/sites/default/files/2023-03/Eesti%20gaasi%20%C3%BClekandev%C3%B5rgu%20arengukava%202023-2032.pdf>
- [7] „EU ban on sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained | News | European Parliament“, 3. november 2022. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained> (vaadatud 5. veebruar 2023).
- [8] „Tootmine ja kasutamine – Eesti Biogaasi Assotsiatsioon“. <http://eestibiogaas.ee/tootmine-ja-kasutamine/> (vaadatud 31. jaanuar 2023).
- [9] „Maardus hakatakse tootma toidujäätmetest gaasi Tallinna linnaliinibussidele“, *Eesti majandus*, 29. november 2022. <https://majandus.postimees.ee/7659106/maardus-hakatakse-tootma-toidujaatmetest-gaasi-tallinna-linnaliinibussidele> (vaadatud 5. veebruar 2023).
- [10] „Kütuseturu kirjeldus | ESPA“. <https://www.espa.ee/et/kutuseturu-kirjeldus> (vaadatud 5. veebruar 2023).
- [11] „Balti Biometaan OÜ“, *Balti Biometaan OÜ*. <http://baltibiometaan.ee/metaankutused/> (vaadatud 5. veebruar 2023).
- [12] „CNG | Alexela - Anname jõudu!“ <https://www.alexela.ee/et/cng-0#kuva=kaart;tankla-teenused=koik;kutused=cng;teeninduspunkti-liik=tanklad,partnertanklad;regioon=eesti,lati,leedu,poola,rootsi> (vaadatud 27. veebruar 2023).
- [13] „CNG sõidukid“, *Eesti Gaas*. <https://www.gaas.ee/cng/cng-soidukid/> (vaadatud 5. veebruar 2023).
- [14] „Eestis käivitub maagaasil sõitvate sõidukite tehnilise kontrolli süsteem | Transpordiamet“. <https://www.transpordiamet.ee/uudised/eestis-kaivitub-maagaasil-soitvate-soidukite-tehnilise-kontrolli-susteem> (vaadatud 5. veebruar 2023).

- [15] „Alexela langetab surugaasi CNG ja veeldatud maagaasi LNG hinda | Alexela - Anname jõudu!“ <https://www.alexela.ee/et/kutused-gaasilised-kutused-ja-gaasiautod/alexela-langetab-surugaasi-cng-ja-veeldatud-maagaasi-lng> (vaadatud 27. veebruar 2023).
- [16] M. Prussi, M. Padella, M. Conton, E. D. Postma, ja L. Lonza, „Review of technologies for biomethane production and assessment of Eu transport share in 2030“, *J. Clean. Prod.*, kd 222, lk 565–572, juuni 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.271.
- [17] M. J. B. Kabeyi ja O. A. Olanrewaju, „Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition“, *J. Energy*, kd 2022, lk e8750221, juuli 2022, doi: 10.1155/2022/8750221.
- [18] „Uudsed võimalused Eesti biomajanduse väärtusahelate mitmekesistamiseks ja lisandväärtuse tõstmiseks“. Vaadatud: 12. veebruar 2023. [Online]. Available at: [https://haldus.taltech.ee/sites/default/files/2021-11/ADDVAL-BIOEC-TP3\\_.pdf?\\_ga=2.23612217.224486979.1672961880-1608568073.1639054346](https://haldus.taltech.ee/sites/default/files/2021-11/ADDVAL-BIOEC-TP3_.pdf?_ga=2.23612217.224486979.1672961880-1608568073.1639054346)
- [19] G. Kulichkova *et al.*, „Plant Feedstocks and their Biogas Production Potentials“, *Open Agric. J.*, kd 14, lk 219–234, nov 2020, doi: 10.2174/1874331502014010219.
- [20] J. Daniel-Gromke *et al.*, „Current Developments in Production and Utilization of Biogas and Biomethane in Germany“, *Chem. Ing. Tech.*, kd 90, nr 1–2, lk 17–35, 2018, doi: 10.1002/cite.201700077.
- [21] I. Ridjan ja M. Skovgaard, „Screening of biogas methanation in denmark“, 2019, lk 53.
- [22] „Average biogas production yield by tonne of feedstock type – Charts – Data & Statistics“, *IEA*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-biogas-production-yield-by-tonne-of-feedstock-type> (vaadatud 8. märts 2023).
- [23] „Uudsed võimalused Eesti biomajanduse väärtusahelate mitmekesistamiseks ja lisandväärtuse tõstmiseks“. Vaadatud: 19. veebruar 2023. [Online]. Available at: [https://haldus.taltech.ee/sites/default/files/2021-11/ADDVAL-BIOEC-TP3\\_.pdf?\\_ga=2.23612217.224486979.1672961880-1608568073.1639054346](https://haldus.taltech.ee/sites/default/files/2021-11/ADDVAL-BIOEC-TP3_.pdf?_ga=2.23612217.224486979.1672961880-1608568073.1639054346)
- [24] „Energia teekaart 2021-2031-2040“. Vaadatud: 9. märts 2023. [Online]. Available at: <https://rohetiiger.ee/wp-content/uploads/2021/12/Energia-teekaart-17122021.pdf>
- [25] J. Mazurkiewicz, „Energy and Economic Balance between Manure Stored and Used as a Substrate for Biogas Production“, *Energies*, kd 15, nr 2, Art. nr 2, jaan 2022, doi: 10.3390/en15020413.
- [26] „Eesti biomajanduse ressursside hetkeseisu analüüs“. Vaadatud: 11. veebruar 2023. [Online]. Available at: [https://haldus.taltech.ee/sites/default/files/2021-08/ADDVAL-BIOEC\\_TP1.1\\_Eesti\\_biomajanduse\\_ressursside\\_hetkeseisu\\_anal%C3%BC%C3%BCs\\_0.pdf?\\_ga=2.135492849.1995436379.1675413346-1081710196.1602764407](https://haldus.taltech.ee/sites/default/files/2021-08/ADDVAL-BIOEC_TP1.1_Eesti_biomajanduse_ressursside_hetkeseisu_anal%C3%BC%C3%BCs_0.pdf?_ga=2.135492849.1995436379.1675413346-1081710196.1602764407)
- [27] „PM09: LOOMAD JA LINNUD | Maakond, Looma- ja linnuliik, Aasta ning Kuupäev. Statistika andmebaas“. [https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus\\_\\_pellumajandus\\_\\_pellumajandussaaduste-tootmine\\_\\_loomakasvatussaaduste-tootmine/PM09/table/tableViewLayout2](https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__pellumajandus__pellumajandussaaduste-tootmine__loomakasvatussaaduste-tootmine/PM09/table/tableViewLayout2) (vaadatud 11. veebruar 2023).

- [28] „A geographical profile of livestock manure production in Canada, 2006“. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/16-002-x/2008004/article/10751-eng.htm> (vaadatud 19. aprill 2023).
- [29] H. D. Poulsen ja P. Lund, „QUANTIFICATION OF NUTRIENT CONTENT IN LIVESTOCK MANURE – THE DANISH NORMATIVE SYSTEM“, 2019, lk 18.
- [30] „Toidujäätmete ja toidukao teke Eesti toidutarneahelas“. Vaadatud: 12. veebruar 2023. [Online]. Available at: <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2021/05/toidujaatmete-ja-toidukao-teke-estti-toidutarneahelas-2021.pdf>
- [31] „Avaleht“, *ecobio*. <https://ecobio.ee/> (vaadatud 13. veebruar 2023).
- [32] „Jäätmete liigiti kogumine | Keskkonnaministeerium“. <https://envir.ee/bio#biolagunevad-jaatmed> (vaadatud 12. veebruar 2023).
- [33] „Biomajanduse tehnoloogiate trendid ja teekaardid“. Vaadatud: 28. veebruar 2023. [Online]. Available at: <https://haldus.taltech.ee/sites/default/files/2021-11/ADDVAL-BIOEC-2.2-teekaardid-FINAL.pdf>
- [34] L. Andersen, S. Parsin, Dr.-I. Lüdtke, ja Dr.-I. Kaltschmitt, „Biogas production from straw – The challenge feedstock pretreatment“, *Biomass Convers. Biorefinery*, kd 12, veebr 2022, doi: 10.1007/s13399-020-00740-y.
- [35] „Põllumajandus | Statistikaamet“. <https://www.stat.ee/et/avasta-statistikat/valdkonnad/pollumajandus-kalandus-ja-jahindus/pollumajandus> (vaadatud 8. märts 2023).
- [36] K. Kaldvee, „ROHTSE BIOMASSI ENERGEETILISE KASUTAMISE VÕIMALUSED“, lk 46, 2014.
- [37] N. Scarlat, J. Dallemand, ja F. Fahl, „Biogas: Developments and perspectives in Europe“, *Renew. Energy*, kd 129, märts 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.03.006.
- [38] R. Bedoić *et al.*, „Green biomass to biogas – A study on anaerobic digestion of residue grass“, *J. Clean. Prod.*, kd 213, lk 700–709, märts 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.224.
- [39] N. Bachmann, „Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants“, *Wastewater Treat.*
- [40] „Statistics | Eurostat“. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEN00030/default/table?lang=en&category=env.env\\_wat.env\\_nwat](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEN00030/default/table?lang=en&category=env.env_wat.env_nwat) (vaadatud 9. märts 2023).
- [41] „Reoveesette taaskasutus | Keskkonnaministeerium“. <https://envir.ee/keskkonnakasutus/vesi/reoveesette-taaskasutus> (vaadatud 9. märts 2023).
- [42] N. Johansson, „Why is biogas production and not food donation the Swedish political priority for food waste management?“, *Environ. Sci. Policy*, kd 126, lk 60–64, dets 2021, doi: 10.1016/j.envsci.2021.09.020.
- [43] „Analysis and assessment of biogas production potential in Sweden for 2050“. Vaadatud: 9. aprill 2023. [Online]. Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1355437/FULLTEXT01.pdf>

- [44] „4\_Biogaasi-tootmise-kogemus-Eestis\_Kristjan-Stroom.pdf“. Vaadatud: 9. aprill 2023. [Online]. Available at: [https://epkk.ee/wp-content/uploads/2021/03/4\\_Biogaasi-tootmise-kogemus-Eestis\\_Kristjan-Stroom.pdf](https://epkk.ee/wp-content/uploads/2021/03/4_Biogaasi-tootmise-kogemus-Eestis_Kristjan-Stroom.pdf)
- [45] „Teekaardilugu2023-1.pdf“. Vaadatud: 19. aprill 2023. [Online]. Available at: <https://rohetiiger.ee/wp-content/uploads/2022/10/Teekaardilugu2023-1.pdf>
- [46] O. W. Awe, Y. Zhao, A. Nzihou, D. P. Minh, ja N. Lyczko, „A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies“, *Waste Biomass Valorization*, kd 8, nr 2, lk 267–283, märts 2017, doi: 10.1007/s12649-016-9826-4.
- [47] N. Kalaiselvan *et al.*, „A waste to energy technology for Enrichment of biomethane generation: A review on operating parameters, types of biodigesters, solar assisted heating systems, socio economic benefits and challenges“, *Chemosphere*, kd 293, lk 133486, apr 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133486.
- [48] R. Kapoor, P. Ghosh, M. Kumar, ja V. K. Vijay, „Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review“, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, kd 26, nr 12, lk 11631–11661, apr 2019, doi: 10.1007/s11356-019-04767-1.
- [49] F. Ardolino, G. F. Cardamone, F. Parrillo, ja U. Arena, „Biogas-to-biomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 139, lk 110588, apr 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110588.
- [50] A. I. Adnan, M. Y. Ong, S. Nomanbhay, K. W. Chew, ja P. L. Show, „Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review“, *Bioengineering*, kd 6, nr 4, Art. nr 4, dets 2019, doi: 10.3390/bioengineering6040092.
- [51] „Biogas upgrading unit – clean biomethane from biogas“, *Biovoima*. <https://biovoima.com/en/solutions/biogas-upgrading-unit> (vaadatud 10. veebruar 2023).
- [52] M. R. Atelge *et al.*, „A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes“, *Sustainability*, kd 13, nr 20, lk 11515, okt 2021, doi: 10.3390/su132011515.
- [53] A. Rafiee, K. R. Khalilpour, J. Prest, ja I. Skryabin, „Biogas as an energy vector“, *Biomass Bioenergy*, kd 144, lk 105935, jaan 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105935.
- [54] H. G. Katariya ja H. P. Patolia, „Advances in biogas cleaning, enrichment, and utilization technologies: a way forward“, *Biomass Convers. Biorefinery*, juuli 2021, doi: 10.1007/s13399-021-01750-0.
- [55] P. Tonrangklang, A. Therdyothin, ja I. Preechawuttipong, „The financial feasibility of compressed biomethane gas application in Thailand“, *Energy Sustain. Soc.*, kd 12, veebr 2022, doi: 10.1186/s13705-022-00339-3.
- [56] „BioForce | Efficient and reliable GREEN energy solutions“. <https://bioforce.ee/> (vaadatud 6. veebruar 2023).
- [57] „Oisu biogaasijaam“, *Eesti Gaas*. <https://www.gaas.ee/oisu-biogaasijaam/> (vaadatud 6. veebruar 2023).
- [58] M. U. Khan *et al.*, „Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 149, lk 111343, okt 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111343.

- [59] P. Argalis ja K. Veģere, „Perspective Biomethane Potential and Its Utilization in the Transport Sector in the Current Situation of Latvia“, *Sustainability*, kd 13, lk 7827, juuli 2021, doi: 10.3390/su13147827.
- [60] F. Ardolino ja U. Arena, „Biowaste-to-Biomethane: An LCA study on biogas and syngas roads“, *Waste Manag.*, kd 87, lk 441–453, märts 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.02.030.
- [61] „The\_future\_role\_of\_biomethane-December\_2021.pdf“. Vaadatud: 1. märts 2023. [Online]. Available at: [https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2021/12/The\\_future\\_role\\_of\\_biomethane-December\\_2021.pdf](https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2021/12/The_future_role_of_biomethane-December_2021.pdf)
- [62] „Biomethane Production Via Anaerobic Digestion and Biomass Gasification | Elsevier Enhanced Reader“. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610217305313?token=514A051357F806694B8527555B1078C8615D61BF4BE8E88B80ACE34C0EAD314A920BC0762E3F05DD0CA01ED6C05AA454&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230226202844> (vaadatud 26. veebruar 2023).
- [63] „An introduction to biogas and biomethane – Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth – Analysis“, *IEA*. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane> (vaadatud 23. aprill 2023).
- [64] „20230213\_Guidehouse\_EBA\_Report.pdf“. Vaadatud: 26. veebruar 2023. [Online]. Available at: [https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2023/02/20230213\\_Guidehouse\\_EBA\\_Report.pdf](https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2023/02/20230213_Guidehouse_EBA_Report.pdf)
- [65] „The role of biomass in achieving net zero: call for evidence“.
- [66] „KE062: KÜTUSE TARBIMINE | Aasta, Tegevusala ning Kütuse liik. Statistika andmebaas“. [https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus\\_\\_energeetika\\_\\_energia-tarbimine-ja-tootmine\\_\\_aastastatistika/KE062/table/tableViewLayout2](https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__energeetika__energia-tarbimine-ja-tootmine__aastastatistika/KE062/table/tableViewLayout2) (vaadatud 1. märts 2023).
- [67] G. Piechota ja B. Igliński, „Biomethane in Poland—Current Status, Potential, Perspective and Development“, *Energies*, kd 14, nr 6, lk 1517, märts 2021, doi: 10.3390/en14061517.
- [68] „TLT soetab riigihankega 15 elektribussi ning vajaliku laadimistaristu“, *Aksiaselts Tallinna Linnatransport (TLT)*, 2. veebruar 2022. <https://www.tlt.ee/tlt-soetab-riigihankega-15-elektribussi-ning-vajaliku-laadimistaristu%ef%bf%bc/> (vaadatud 5. mai 2023).
- [69] I. Ivkovic, S. Kaplanović, ja B. Milovanović, „Influence of road and traffic conditions on fuel consumption and fuel cost for different bus technologies“, *Therm. Sci.*, kd 2017, lk 693–706, jaan 2017, doi: 10.2298/TSCI160301135I.
- [70] J. Ammenberg *et al.*, „Perspectives on biomethane as a transport fuel within a circular economy, energy, and environmental system“, lk 90.
- [71] „Euroopa Liidu kliimaeesmärgid | Keskkonnaministeerium“. <https://envir.ee/euroopa-liidu-kliimaeesmargid> (vaadatud 11. aprill 2023).
- [72] „Effort sharing 2021-2030: targets and flexibilities“. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/effort-sharing-member-states-emission-targets/effort-sharing-2021-2030-targets-and-flexibilities\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/effort-sharing-member-states-emission-targets/effort-sharing-2021-2030-targets-and-flexibilities_en) (vaadatud 11. aprill 2023).



- [73] „EBA-reactions-to-EP-vote-on-EPBD-2.pdf“. Vaadatud: 19. aprill 2023. [Online]. Available at: <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2023/03/EBA-reactions-to-EP-vote-on-EPBD-2.pdf>
- [74] „Vesinik | Keskkonnaministeerium“. <https://envir.ee/vesinik> (vaadatud 23. aprill 2023).
- [75] A. Swartbooi, K. K. Kapanji-Kakoma, ja N. M. Musyoka, „From Biogas to Hydrogen: A Techno-Economic Study on the Production of Turquoise Hydrogen and Solid Carbons“, *Sustainability*, kd 14, nr 17, Art. nr 17, jaan 2022, doi: 10.3390/su141711050.
- [76] „Lõpparuanne\_Vesinukuressursside kasutamise analüüs.pdf“.
- [77] R. Hakawati, B. M. Smyth, G. McCullough, F. De Rosa, ja D. Rooney, „What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport?“, *Appl. Energy*, kd 206, lk 1076–1087, nov 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.068.
- [78] „Oja, A. Biometaani kasutamise avalikud hüved.pdf“. Vaadatud: 5. mai 2023. [Online]. Available at: [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/a/a6/Oja%2C\\_A.\\_Biometaani\\_kasutamise\\_avalikud\\_h%C3%BCved.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/a/a6/Oja%2C_A._Biometaani_kasutamise_avalikud_h%C3%BCved.pdf)
- [79] R. Swain, R. Mohapatro, ja B. Patra, „Socio-Economic and Techno-Economic Aspects of Biomethane and Biohydrogen“, 2022, lk 151–172. doi: 10.1201/9781003277163-8.
- [80] „Oja, A. Biometaani kasutamise avalikud hüved.pdf“. Vaadatud: 16. aprill 2023. [Online]. Available at: [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/a/a6/Oja%2C\\_A.\\_Biometaani\\_kasutamise\\_avalikud\\_h%C3%BCved.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/a/a6/Oja%2C_A._Biometaani_kasutamise_avalikud_h%C3%BCved.pdf)
- [81] G. Charis, G. Danha, ja E. Muzenda, „A CRITICAL TAXONOMY OF SOCIO-ECONOMIC STUDIES AROUND BIOMASS AND BIO-WASTE TO ENERGY PROJECTS“, *Waste Manag.*, kd In Press, lk 1–11, aug 2018, doi: 10.31025/2611-4135/2018.13687.
- [82] E. J. Mishan ja E. Quah, *Cost-Benefit Analysis*, 6. tr. London: Routledge, 2020. doi: 10.4324/9781351029780.
- [83] S. Drigo ja M. Modica, „Chapter 3: M. Mazzanti (IRCrES-CNR)“.
- [84] „Bergqvist\_J\_170628.pdf“. Vaadatud: 18. veebruar 2023. [Online]. Available at: [https://stud.epsilon.slu.se/14049/7/Bergqvist\\_J\\_170628.pdf](https://stud.epsilon.slu.se/14049/7/Bergqvist_J_170628.pdf)
- [85] F. Cucchiella, I. D’Adamo, ja M. Gastaldi, „Sustainable Italian Cities: The Added Value of Biomethane from Organic Waste“, *Appl. Sci.*, kd 9, nr 11, Art. nr 11, jaan 2019, doi: 10.3390/app9112221.
- [86] „IEA\_transport\_T37\_END\_HIGH.pdf“. Vaadatud: 19. veebruar 2023. [Online]. Available at: [https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/IEA\\_transport\\_T37\\_END\\_HIGH.pdf](https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/IEA_transport_T37_END_HIGH.pdf)
- [87] „Uued gaasibussid hoiavad kokku üle 1,4 miljoni euro“. <https://pealinn.ee/2018/10/21/uued-gaasibussid-hoiavad-kokku-uile-14-miljoni-euro/> (vaadatud 20. aprill 2023).
- [88] „biogas\_plants\_in\_denmark\_and\_mexico\_eng.pdf“. Vaadatud: 9. märts 2023. [Online]. Available at:

- [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/Publications\\_reports\\_papers/biogas\\_plants\\_in\\_denmark\\_and\\_mexico\\_eng.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/Publications_reports_papers/biogas_plants_in_denmark_and_mexico_eng.pdf)
- [89] „Infopank“. <https://infopank.ee/> (vaadatud 20. aprill 2023).
- [90] „Keskmine brutokuupalk | Statistikaamet“. <https://www.stat.ee/et/avastatistikat/valdkonnad/tooelu/palk-ja-toojoukulu/keskmine-brutokuupalk> (vaadatud 3. aprill 2023).
- [91] ERR, „Riik jätkab biometaanitootmise doteerimist“, *ERR*, 4. jaanuar 2023. <https://www.err.ee/1608839197/riik-jatkab-biometaanitootmise-doteerimist> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [92] „Biometaanitootus | Elering“. <https://elering.ee/biometaanitootus> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [93] „Biometaanis peitub Eesti võimalus Venemaa gaasile „ei“ öelda“, *Põllumeheteataja*, 19. aprill 2022. <https://pollumeheteataja.ee/uudis/2022/04/19/biometaanis-peitub-eesti-voimalus-venemaa-gaasile-ei-oelda/> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [94] „Elektrituruseadus–Riigi Teataja“. <https://www.riigiteataja.ee/akt/107032023067?leiaKehtiv> (vaadatud 5. mai 2023).
- [95] „Bioressursside väärimise investeeringutoetus 2022 | PRIA“, 14. november 2022. <https://www.pria.ee/toetused/bioressursside-vaarindamise-investeeringutoetus-2022> (vaadatud 23. aprill 2023).
- [96] L. Mällo, „Biometaan täna ja tulevikus“.
- [97] „Biometaanitootmistunnetused | Elering“. <https://elering.ee/biometaanitootmistunnetused> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [98] „Ethanol Industry Contribution to the US Economy in 2022.pdf“. Vaadatud: 16. aprill 2023. [Online]. Available at: <https://d35t1syewk4d42.cloudfront.net/file/2428/Ethanol%20Industry%20Contribution%20to%20the%20US%20Economy%20in%202022.pdf>
- [99] „Automüüja maksumuudatustest: debattidel polnud need põhiteemade seas. Oleme sellest infost šokis“, *Ärileht*. <https://arileht.delfi.ee/a/120169826> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [100] ERR, „Biogaasi hind erineb tanklates mitu korda“, *ERR*, 16. september 2022. <https://www.err.ee/1608718240/biogaasi-hind-erineb-tanklates-mitu-korda> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [101] E. Voit, „Maagaasi hinna mõju biogaasitehase tasuvuse hindamisel AS Estonian Cell näitel“.
- [102] „Riigi eelarvestrateegia | Rahandusministeerium“. [https://www.fin.ee/riigi-rahandus-ja-maksud/riigieelarve-ja-eelarvestrateegia/riigieelarvestrateegia?view\\_instance=0&current\\_page=1&document\\_search=](https://www.fin.ee/riigi-rahandus-ja-maksud/riigieelarve-ja-eelarvestrateegia/riigieelarvestrateegia?view_instance=0&current_page=1&document_search=) (vaadatud 17. aprill 2023).
- [103] „2023. aasta riigieelarve seadus eelnou seletuskiri - DocumentCloud“. <https://www.documentcloud.org/documents/23092034-2023-aasta-riigieelarve-seadus-eelnou-seletuskiri> (vaadatud 22. aprill 2023).
- [104] „RR027: RIIGIEELARVESSE LAEKUNUD MAKSUD (KUUD)“, *PxWeb*. [https://andmed.stat.ee:443/pxweb/et/stat/stat\\_\\_majandus\\_\\_rahandus\\_\\_valitsemissektori-rahandus\\_\\_maksud/RR027.px/](https://andmed.stat.ee:443/pxweb/et/stat/stat__majandus__rahandus__valitsemissektori-rahandus__maksud/RR027.px/) (vaadatud 3. aprill 2023).

- [105] „Aktsiisid | Maksu- ja Tolliamet“. <https://www.emta.ee/ariklient/maksud-ja-tasumine/aktsiisid> (vaadatud 3. aprill 2023).
- [106] Lauri Lelumees, „Biometaani aktsiisivabastus ja maksukulu“, 17. aprill 2023.
- [107] M. Laos, „Biometaani maksutulu leidmine“, 17. aprill 2023.
- [108] „ENGIE\_20210618\_Biogas\_potential\_and\_costs\_in\_2050\_report\_1.pdf“. Vaadatud: 14. aprill 2023. [Online]. Available at: [https://www.engie.com/sites/default/files/assets/documents/2021-07/ENGIE\\_20210618\\_Biogas\\_potential\\_and\\_costs\\_in\\_2050\\_report\\_1.pdf](https://www.engie.com/sites/default/files/assets/documents/2021-07/ENGIE_20210618_Biogas_potential_and_costs_in_2050_report_1.pdf)
- [109] „Töötuse määr | Statistikaamet“. <https://www.stat.ee/et/avastatistikat/valdkonnad/toolu/tooturg/tootuse-maar> (vaadatud 5. aprill 2023).
- [110] „EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV (EL) 2018/ 2001, - 11. detsember 2018, - taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise edendamise kohta“.
- [111] M. Möls, „Assessment of environmental impacts of biogas production using a Life Cycle Approach Master’s Thesis“.
- [112] „Liebetau et al. - Methane emissions from biogas plants.pdf“. Vaadatud: 1. mai 2023. [Online]. Available at: [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/01/Methane-Emission\\_web\\_end\\_small.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/01/Methane-Emission_web_end_small.pdf)
- [113] D. L. Hoang, C. Davis, H. C. Moll, ja S. Nonhebel, „Impacts of biogas production on nitrogen flows on Dutch dairy system: Multiple level assessment of nitrogen indicators within the biogas production chain“, *J. Ind. Ecol.*, kd 24, nr 3, lk 665–680, 2020, doi: 10.1111/jiec.12956.
- [114] „EU Emissions Trading System (EU ETS)“. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en) (vaadatud 9. aprill 2023).
- [115] ERR, „Riik plaanib CO2 kvooditasudest koguda tänavu üle 400 miljoni euro“, *ERR*, 22. veebruar 2023. <https://www.err.ee/1608892982/riik-plaanib-co2-kvooditasudest-koguda-tanavu-ule-400-miljoni-euro> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [116] „Carbon Price Viewer“, *Sandbag Climate Campaign*. <https://sandbag.be/index.php/carbon-price-viewer/> (vaadatud 26. aprill 2023).
- [117] M. Möttus, „Põllumajandus- ja keskkonnainstituut Taimekasvatuse ja rohumaa viljeluse osakond“.
- [118] „20230213\_Guidehouse\_EBA\_Report.pdf“. Vaadatud: 6. aprill 2023. [Online]. Available at: [https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2023/02/20230213\\_Guidehouse\\_EBA\\_Report.pdf](https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2023/02/20230213_Guidehouse_EBA_Report.pdf)
- [119] „Väetiseseadus–Riigi Teataja“. <https://www.riigiteataja.ee/akt/115072022007?leiaKehtiv> (vaadatud 16. aprill 2023).
- [120] „Report-2-Benefits-of-Compost-and-Anaerobic-Digestate.pdf“. Vaadatud: 27. aprill 2023. [Online]. Available at: <https://www.altereko.it/wp-content/uploads/2020/03/Report-2-Benefits-of-Compost-and-Anaerobic-Digestate.pdf>
- [121] S. Corsi, T. Friedrich, A. Kassam, M. Pisante, ja J. C. Sá, *Soil Organic Carbon Accumulation and Greenhouse Gas Emission Reductions from Conservation Agriculture: A literature review*. 2012.
- [122] „biogas-in-denmark-june-2020.pdf“. Vaadatud: 3. mai 2023. [Online]. Available at: <https://biogasclean.com/wp-content/uploads/2021/02/biogas-in-denmark-june-2020.pdf>

- [123] G. Reuland, I. Sigurnjak, H. Dekker, S. Sleutel, ja E. Meers, „Assessment of the Carbon and Nitrogen Mineralisation of Digestates Elaborated from Distinct Feedstock Profiles“, *Agronomy*, kd 12, nr 2, Art. nr 2, veebr 2022, doi: 10.3390/agronomy12020456.
- [124] „PM065: MINERAALVÄETISTE KASUTAMINE ARUANDEAASTA SAAGILE | Aasta, Põllukultuur ning Näitaja. Statistika andmebaas“. [https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus\\_\\_pellumajandus\\_\\_pellumajandussaaduste-tootmine\\_\\_taimekasvatussaaduste-tootmine/PM065/table/tableViewLayout2](https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__pellumajandus__pellumajandussaaduste-tootmine__taimekasvatussaaduste-tootmine/PM065/table/tableViewLayout2) (vaadatud 27. aprill 2023).
- [125] „PM065: MINERAALVÄETISTE KASUTAMINE ARUANDEAASTA SAAGILE“, *PxWeb*. [https://andmed.stat.ee:443/pxweb/et/stat/stat\\_\\_majandus\\_\\_pellumajandus\\_\\_pellumajandussaaduste-tootmine\\_\\_taimekasvatussaaduste-tootmine/PM065.px/](https://andmed.stat.ee:443/pxweb/et/stat/stat__majandus__pellumajandus__pellumajandussaaduste-tootmine__taimekasvatussaaduste-tootmine/PM065.px/) (vaadatud 16. aprill 2023).
- [126] „MM\_m46\_lisa2.pdf“. Vaadatud: 2. mai 2023. [Online]. Available at: [https://www.riigiteataja.ee/aktiilisa/1130/8202/2002/MM\\_m46\\_lisa2.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/aktiilisa/1130/8202/2002/MM_m46_lisa2.pdf#)
- [127] „Väetise valik“. <https://www.balticagro.ee/vaetise-valik> (vaadatud 2. mai 2023).
- [128] „Marek-Linnutaja.pdf“. Vaadatud: 16. aprill 2023. [Online]. Available at: <https://epkk.ee/wp-content/uploads/2022/05/Marek-Linnutaja.pdf>
- [129] „Väetise hinnad kukkusid, ent põllumehel pole kindlust: kõik teavad, et küllap tuleb ka järgmine kriis“, *Maaleht*. <https://maaleht.delfi.ee/a/120171396> (vaadatud 16. aprill 2023).
- [130] „Silva-Agro väetiste hinnakiri“. <http://www.silvaagro.ee/vaetised> (vaadatud 16. aprill 2023).
- [131] „Fertilizer prices ease but affordability and availability issues linger“, 5. jaanuar 2023. <https://blogs.worldbank.org/opendata/fertilizer-prices-ease-affordability-and-availability-issues-linger> (vaadatud 16. aprill 2023).
- [132] „Sertifikaadi taotlemine“. <http://www.recycling.ee/toodete-sertifitseerimine/sertifikaadi-taotlemine/> (vaadatud 3. mai 2023).
- [133] „Hinnakiri-2022-uus1.pdf“. Vaadatud: 3. mai 2023. [Online]. Available at: <https://tjt.ee/wp-content/uploads/2022/12/Hinnakiri-2022-uus1.pdf>
- [134] „Biojätmed“, *Tallinn*. <https://www.tallinn.ee/et/keskkond/biojaatmed> (vaadatud 12. veebruar 2023).
- [135] „Anaerobic Digestion for Sewage Sludge Management - Cambi“. <https://www.cambi.com/resources/blog/anaerobic-digestion-for-sewage-sludge-management/> (vaadatud 3. mai 2023).
- [136] „Vee- ja kanalisatsiooniteenuse hinnakirjad“, *Tallinna Vesi*. <https://tallinnavesi.ee/klient/arveldamine/vee-ja-kanaliteenuse-hinnakirjad-3/> (vaadatud 3. mai 2023).
- [137] „Where does the EU’s gas come from?“, 7. veebruar 2023. <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/eu-gas-supply/> (vaadatud 23. aprill 2023).

- [138] „A market mechanism to limit excessive gas price spikes“, 15. veebruar 2023. <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/a-market-mechanism-to-limit-excessive-gas-price-spikes/> (vaadatud 23. aprill 2023).
- [139] „Dutch TTF Gas Endex Jun '23 Futures Interactive Chart“, *Barchart.com*. <https://www.barchart.com/futures/quotes/TGM23/interactive-chart> (vaadatud 3. mai 2023).
- [140] M. O. | ERR, „Eesti toetab gaasitarbimise piirangu pikendamist Euroopas“, *ERR*, 27. märts 2023. <https://www.err.ee/1608926216/eesti-toetab-gaasitarbimise-piirangu-pikendamist-euroopas> (vaadatud 23. aprill 2023).
- [141] „Kütusemüüja selgitab, kuidas tekiks tanklapostidele 100 km läbimise hind ning miks seda teha tahetakse“, *Autogeenius*, 13. jaanuar 2023. <https://auto.geenius.ee/rubriik/uudis/kutusemuuja-selgitab-kuidas-tekiks-tanklapostidele-100-km-labimise-hind-ning-miks-seda-teha-tahetakse/> (vaadatud 3. mai 2023).
- [142] „Kuidas kujuneb kütuse hind?“, *Neste*, 7. detsember 2020. <https://www.neste.ee/ee/kytuse-hind> (vaadatud 26. mai 2023).
- [143] „Biogenic-CO2-from-the-biogas-industry\_Sept2022-1.pdf“. Vaadatud: 3. mai 2023. [Online]. Available at: [https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2022/10/Biogenic-CO2-from-the-biogas-industry\\_Sept2022-1.pdf](https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2022/10/Biogenic-CO2-from-the-biogas-industry_Sept2022-1.pdf)
- [144] U. Rita, „UURIMISRÜHMADE VASTUTAVAD JA PÕHITÄITJAD“.

## LISAD

### Lisa 1 Taani biogaasijaamade investeeringukulud

L1.1 Ülevaade kuue Taani biogaasijaama tehnilistest näitajatest ja investeerimiskuludest [88]

<b>Biogaasijaama nimetus</b>	<b>Billund Water and Energy</b>	<b>Combiga</b>	<b>Horsens Bioenergy</b>	<b>Kroghsminde</b>	<b>Madsen Bioenergi</b>	<b>Solrød biogas</b>
Ehitusaasta	1997	2012	2014	2015	2014	2015
Kääriti ruumala, m <sup>3</sup>	4200	-	2 kääritit 8000 m <sup>3</sup> ja 2 hoiumahutit 1500 m <sup>3</sup>	1200+1880 m <sup>3</sup>	Mahutid kokku 34 000 m <sup>3</sup> ja reaktorid kokku 27600 m <sup>3</sup>	-
Tooraine liik	Biojätmed ja reoveesetted	Sea- ja veiseläga/sõnnik + 20% energiataimed ja tööstusjätmed	Läga ja sõnnik + 3% toidujätmeid	Läga ja sõnnik + 10% rohi + 6% mais	Läga ja sõnnik + 8% energiataimed + 7% tööstusjätmed	70% biomass, 26% läga, 4% adru
Tooraine tonni/aastas	61,000.00	36,500.00	240,000.00	25,550.00	146,000.00	200,000.00
Tooraine kaugus jaamast	-	< 5 km	15	8	10	25
Kääriti tüüp	CSTR, määrg, I Termofiilne etapp, II Mesofiilne etapp	CSTR, määrg, kaheastmeline termofiilne	CSTR, kaheastmeline mesofiilne protsess	CSTR, kaheastmeline mesofiilne protsess	CSTR, viieastmeline protsess 47o C	Kaheastmeline mesofiilne, määrg
Viibeaeg, päev	32	-	25	44	85	28
Kuivainesisaldus %	8	-	10	17-18	13	10
Biogaasi toodang Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /aastas	2,000,000.00	1,500,000.00	13,000,000.00	1,200,000.00	5,000,000.00	6,000,000.00
Biogaasi toodang tooraine kohta Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t	33	27	-	-	34	30

<b>Biogaasijaama nimetus</b>	<b>Billund Water and Energy</b>	<b>Combiga</b>	<b>Horsens Bioenergy</b>	<b>Krogshminde</b>	<b>Madsen Bioenergi</b>	<b>Solrød biogas</b>
Biometaani toodang Nm3 CH4/aastas	-	-	8,000,000.00	750,000.00	-	-
Gaasi utiliseerimine:	elekter+soojusenergia	biometaan	biometaan	elekter+soojusenergia	biometaan/surubiometaan	elekter+soojusenergia
Utiliseerimise viis	elektrivõrk ja kaugküttetorustik	gaasivõrk (alates 2015)	gaasivõrk	elektrivõrk ja kaugküttetorustik	gaasivõrk ja transport	elektrivõrk ja kaugküttetorustik
Elekter GWh/aastas	6.7	-	-	2.7	-	23
Soojusenergia GWh/aastas	14.7	-	-	3.2	-	28
Biometaan GWh/aastas	-	-	-	-	-	-
Omatarve:		-	-	-	-	-
Elekter GWh/aastas	3.8	-	-	-	-	-
Soojusenergia GWh/aastas	8.8	-	-	-	-	-
Digestaadi kasutus	Põllumajandusmaa väetis	Põllumajandusmaa väetis	Põllumajandusmaa väetis	Põllumajandusmaa väetis	Põllumajandusmaa väetis	Põllumajandusmaa väetis
Digestaadi kasutusala kaugus, km	0-30	15	15	8	15	40
Biogaasijamaaga seotud töökohtade arv	15	3	7	0.25	3+2	14
Investeeringu- ja hoolduskulud						
Biogaasijaama investeerimikulud, USD	\$7,500,000.00	\$1,950,000.00	\$11,500,000.00	\$1,400,000.00	\$7,000,000.00	\$14,000,000
Eeltöötlusseadmete kulud, USD	\$800,000.00	-	-	-	-	-
Mootori generaatorid, USD	\$1,000,000.00	-	-	\$400,000.00	-	-

<b>Biogaasijaama nimetus</b>	<b>Billund Water and Energy</b>	<b>Combiga</b>	<b>Horsens Bioenergy</b>	<b>Kroghsminde</b>	<b>Madsen Bioenergi</b>	<b>Solrød biogas</b>
Kasutus- ja hoolduskulud kokku /aastas	\$1,800,000.00	-	\$2,000,000.00	\$180,000.00	\$1,300,000.00	\$3,700,000.00
Kasutus- ja hoolduskulud (täpsustaud):		USD/aastas		USD/aastas	USD/aastas	
Tööjõukulud	\$500,000.00	\$65,934.00	\$625,685.00	\$17,631.00	\$211,583.00	arvestatud hoolduskulude juurde
Elekter	\$90,000.00	\$71,429.00	\$181,483.00	\$17,728.00	-	\$500,000.00
Soojusenergia (biogaasi jaoks)	omatoodang	\$60,440.00	\$115,773.00	-	\$197,477.00	omatoodang
Administratiiv- ja kindlustuskulud	\$60,000.00	\$21,978.00	\$112,672.00	\$40,200.00	\$54,854.00	\$400,000.00
Hoolduskulud	\$7,00,000.00	\$82,418.00	\$938,857.00	\$82,663.00	\$155,158.00	\$800,000.00
Transport	\$100,000.00	\$384,615.00	-	\$20,375.00	\$376,141.00	\$1,900,000.00