

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

## **Biogaasijaamade asukohtade optimeerimine Eestis**

**Hendrik Eelmäe**

Juhendajad: PhD Garri Raagmaa

PhD Ain Kull

Tartu 2024

## **Annotatsioon**

### **Biogaasijaamade asukohtade optimeerimine Eestis**

Eesti tingimustes on täielik taastuvenergiale üleminek tehnoloogiliselt võimalik, majanduslikult põhjendatud ja keskkondlikult mõödapääsmatu. Bakalaureusetöö raames uuriti Eesti ja Euroopa bioenergia sektori tulevikuväljavaateid. Töö teoreetilises osas käsitleti kliimamuutuse mõju ja asukohateooriaid, mille abil leiti töö uurimuslikus osas parimad võimalikud asukohad biogaasijaamadele. Samuti anti töös ülevaade Eestis bioenergiat tootvatest ettevõtetest. Bakalaureusetöö uurimuslikus osas leiti, et sigade ja veiste lägest on võimalik toota ligikaudu 60 000 000 kuupmeetrit biometaani aastas, mis annab potentsiaalselt 597 GWh energiat. Paraku pole kogu läga biometaani tootmisesse suunamine saavutatav, mistõttu on reaalselt toodetav biometaani maht ligikaudu pool teoreetilisest mahust. Bakalaureusetöös leiti sigade ja veiste lägal põhinevatele biogaasijaamadele parimad võimalikud asukohad.

Märksõnad: läga, biogaas, biometaan, taastuvenergia

CERCS kood: S230 - Sotsiaalne geograafia, P330 - Bioenergeetika

## **Abstract**

### **Optimizing biogas plant locations in Estonia**

In Estonian conditions, a complete transition to renewable energy is technologically feasible, economically justified, and environmentally indispensable. Within the scope of this bachelor's thesis, the future prospects of the Estonian and European bioenergy sectors were investigated. The theoretical part of the study addressed climate change and location theories, which, in the empirical section, were utilized to identify optimal locations for biogas plants. Additionally, an overview of companies producing bioenergy in Estonia was provided in the theoretical section. In the empirical part of the bachelor's thesis, it was found that approximately 60,000,000 cubic meters of biomethane can be produced annually from pig and cattle manure, potentially yielding 597 GWh of energy. However, redirecting all manure towards biomethane production is unattainable, resulting in an actual production volume of approximately half of the theoretical capacity. The bachelor's thesis identified the best possible locations for biogas plants based on pig and cattle manure.

Keywords: slurry, biogas, biomethane, renewable energy

CERCS code: S230 - Social geography, P330 Bioenergetics

# Sisukord

<b>1. Sissejuhatus .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Teooria .....</b>	<b>6</b>
2.1 Kliimamuutus ja taastuenergia trendid.....	6
2.1.1 Kliimamuutus .....	6
2.1.2 Rohelepe .....	6
2.1.3 Rohepöörde trendid ja tulevikustsenaariumid Eestis.....	7
2.2 Biogaasist ja selle kasutusest Euroopas .....	8
2.3 Asukohateooriad.....	10
2.3.1 Asukohateooriate ajalugu .....	10
2.3.2 Ülevaade tähtsamatest asukohateooriatest.....	11
2.3.3 Asukohateooriate rakendusi tänapäeval .....	12
2.3.4 Järeldused asukohateooriatest.....	13
<b>3. Bioenergia Eestis .....</b>	<b>14</b>
3.1 Biogaas soojuseks, elektriks ja kütuseks.....	14
3.2 Ülevaade Eesti gaasisektorist .....	15
3.3 Bioenergia sektori arendamise hüved .....	19
3.4 Näited Eesti biogaasisektorist .....	20
3.5 Kokkuvõte ja järeldused teoriast .....	22
<b>4. Materjal ja metoodika .....</b>	<b>24</b>
4.1 Andmed .....	24
4.2 Andmetöötlus .....	24
4.3 Parimate asukohtade leidmine biogaasijaamadele .....	26
<b>5. Tulemused.....</b>	<b>27</b>
5.1 Biogaasi ja biometaanii tootmise toore Eestis.....	27
5.2 Biogaasijaamade võimalikud asukohad ja nende arvukus .....	29

<b>6. Arutelu .....</b>	<b>32</b>
<b>7. Kokkuvõte.....</b>	<b>35</b>
<b>Optimizing biogas plant locations in Estonia using pig and cattle slurry .....</b>	<b>36</b>
<b>Tänuavaldused .....</b>	<b>37</b>
<b>Kirjanduse loetelu .....</b>	<b>38</b>
<b>Lisad 1-3.....</b>	<b>42</b>
Lisa 1. Intervjueeritavate nimekiri .....	42
Lisa 2. Kuvatõmmised praktilise töö etappidest .....	43
Lisa 3. GitHub'i kood.....	47

## 1. Sissejuhatus

Käesoleva uurimistö eesmärk on selgitada, millises mahus saab Eestis kasutada sigade ja veiste läga biogaasi ja biometaanitootmiseks. Teema on aktuaalne, kuna koroonakriis ja Ukraina sõda on tekitanud energiasektoris tarneraskusi ja defitsiidi, mis on omakorda Eestis kaasa toonud energiahindade suurema volatiilsuse (Maarend 2023). Peamised teemat käsitlevad varasemad uuringud on viidud läbi Kesk- ja Lõuna-Euroopas, kuna seal on bioenergia kasutamine laialdasemalt levinud. Eestis on põhjalikumad uuringud bioenergia ressursi kasutuselevõtu kohta läbi viidud enam kui kaheksa aastat tagasi. Arvestades üha kiiremat innovatsiooni energiasektoris ja teema uurimisvajakut Eestis, on asjakohane teemat põhjalikumalt käsitleda.

Euroopa Liidu energiapoliitika on võtnud suuna taastuvenergia tootmise ja tarbimise osakaalu suurendamisele. Eestis peab aastaks 2030 taastuvenergia osakaal summaarsest lõpptarbimistest olema vähemalt 42% ja aastaks 2050 peab kasvuhoonegaaside heide vähenema 80% võrreldes 1990. aasta tasemega (REKK 2030, 2019). Rohepöörde ekspertrühma raporti kohaselt (Riigikantselei 2022) on siiani rakendatavad poliitikameetmed ja lubatud tegevused kaugel 1,5-kraadise temperatuuri tõusu eesmärgist ja liiguvad pigem 2,7-kraadi stsenaariumi kursil. Seega on ainus viis kliimanetraalsuse poole liikumiseks rohepöörde tempo kiirendamine.

Käesolevas töös uuritakse, kuidas on Eestis võimalik tsentraliseeritud energia tootmise mudelilt liikuda üle detsentraliseeritud haja- või kogukonnaenergeetikale, millega paraneks energia varustuskindlus ja julgeolek. Käesolev töö analüüsib, kuidas saab Eestis edendada ringmajandust sigade ja veiste lägast biogaasi või biometaanitootes.

Bakalaureusetöö eesmärgi saavutamiseks on püstitatud järgnevad uurimisküsimused.

1. Mitu kuupmeetrit biogaasi ja biometaanitootmist on Eestis võimalik sigade ja veiste lägast toota?
2. Mitu 50 MWh võimsusega biogaasijaama saaks Eestisse rajada kasutades tooraineks ainult Eesti sigade ja veiste läga?
3. Millistesse asukohtadesse on Eestis mõistlik rajada biogaasi- või biometaanijaama?

Järgmises töö etapis oleks otstarbekas lisada opimiseerimisülesanded veel toidujäätmete, kogutava rohtse biomassi, puhastite muda jm gaasitatava orgaanika kogused, asukohad ja eeldatav veokulu.

## **2. Teooria**

### **2.1 Kliimamuutus ja taastuenergia trendid**

#### **2.1.1 Kliimamuutus**

Kliimamuutust ehk globaalse keskmise temperatuuri tõusu põhjustavad peamiselt inimesed, kes paiskavad läbi oma tegevuse atmosfääri kasvuhoonegaase (Euroopa Komisjon 2024). Olabi ja Abdelkareem (2022) väidavad, et maailma rahvaarvu kiire kasv on kaasa toonud plahvatusliku energianõudluse kasvu, mistõttu on kasvuhoonegaaside emissioonid veelgi suurenenud. Energiasektoris kasutatakse enim taastumatuid fossiilkütuseid, mis tekitavad tõsiseid keskkonnaprobleeme, milleks on äärmuslike ilmastikunähtuste sagenemine, maailmamere veetaseme tõus, bioloogilise mitmekesisuse vähenemine ning jääkatte sulamine (Euroopa Komisjon 2024).

Kliimamuutuse talitsemiseks ja säästva arengu suunamiseks on loodud Euroopa roheline kokkulepe (Euroopa Komisjon 2019) nime all tuntud poliitiline ja majanduslik raamistik, mille eesmärgiks on üleminek süsinikuneutraalsele majandusele. Rohelepe raames (Euroopa Komisjon 2024) edendatakse muuhulgas taastuenergia kasutuselevõttu, jätkusuutlikku transpordisüsteemi ja loodusvarade säästvat kasutamist. Nimetatud tegevused loovad juurde uusi töökohti ja parandavad pikas perspektiivis inimeste elukvaliteeti. Säästva arengu edendamiseks võetakse rohelepe raames vastu erinevaid seadusi ja suuniseid. Samuti pakub Euroopa Komisjon roheleppes välja erinevaid meetmeid ja toetusi nii avalikule kui ka erasektorile, et suurendada roheliste töökohtade teket ja taastuvate ressursside kasutamist. Rohelepe rakendamise viisid ja põhimõtted ei ole kõigis riikides samasugused, kuna piirkonnad ning nendes leiduvad ressursid on erinevad. Seega on rohelepe justkui toetav raamistik, et riigid saaksid oma taastuvaid ressursse parimal võimalikul moel ära kasutada.

#### **2.1.2 Rohelepe**

Kliimamuutused ja keskkonnaseisundi halvenemine kujutavad eksistentsiaalset ohtu Euroopa ja kogu maailma jaoks (Euroopa Komisjoni 2024). Euroopa roheline kokkulepe (Euroopa Komisjon 2019) muudab Euroopa Liidu ressursitõhusamaks ja konkurentsivõimelisemaks majanduseks, mille siht on aastaks 2050 saada esimeseks kliimaneutraalseks maailmajaoks. Euroopa roheline kokkuleppe ambitsioonikad eesmärgid nõuavad põhimõttelisi muutusi nii ettevõtluses, elustiilis kui ka ühiskonnainormides üldiselt.

Euroopa Komisjon (2024) soovib roheleppes vahe-eesmärgina aastaks 2030 vähendada Euroopa Liidu liikmesriikides kasvuhoonegaaside heidet vähemalt 55% võrreldes aastaga 1990. Selleks tuleb CO<sub>2</sub> heidet vähendada kõigis sektorites alates tööstusest ja energeetikast kuni transpordi ja põllumajanduseni. Energia tootmine ja kasutamine põhjustab viimastel aastatel hinnanguliselt 75% Euroopa Liidu kasvuhoonegaaside heitest. Energiasüsteemi süsinikuheite vähendamine on seega ülioluline, et saavutada Euroopa Liidu 2030. aastaks seatud kliimaeesmärgid ja viia ellu ELi pikaajaline strateegia CO<sub>2</sub>-neutraalsuse saavutamiseks 2050. aastaks.

### **2.1.3 Rohepöörde trendid ja tulevikustsenaariumid Eestis**

Eesti elanike keskkonnajälg ühe inimese kohta ületab Maa taluvuspiiri 3,8-kordselt, mistõttu on oluline arendada ja rakendada erinevaid tehnoloogiaid, mis aitavad soodustada säästlikumat tarbimist (Areneguseire Keskus 2023). Pooled kliimanetraalsuse saavutamiseks vajalikud tehnoloogiad on alles varajases prototüübi- või demonstratsiooni faasis (IEA 2022).

Eesti rohepöörde trende ja stsenaariumeid käsitleva Areneguseire Keskuse aruande (2023) kohaselt on hetkel oluline keskenduda nende tehnoloogiate rakendamisele, mis on ennast juba majanduslikult tõestanud. Paraku ei ole riigi toetusmeetmed erasektori poolt tehtavateks investeeringuteks sageli konkurentsivõimelised. Aruande kohaselt (sealsamas, 9) toetavad OECD riigid teadus- ja arendustegevust erasektoris ligikaudu 0,2% SKP-st, mis jaguneb maksusoodustuste ja toetuste vahel. Maksusoodustused võimaldavad ettevõtetel teha pikaajalisemaid äri- ja investeeringuplaane, kuigi 2023. aastal ettevõtted Eestis neid üldse ei kasutanud. Teadus- ja arendustegevus sai Eesti riigilt 2020. aastal toetust vaid 0,06% SKP-st, mis on märkimisväärselt väiksem OECD riikide keskmisest riiklikust toetusest.

Rohepöörde aruande (Areneguseire Keskus 2023) kohaselt on oluline investeerida ennaktempos rohepöörde lahendustesse, et vältida keskkonnaprobleemide süvenemist. Üheks võimaluseks on toota suuremas mahus biogaasi ja biometaani ning anda biometaani kasutatavatele autodele rohemärgis. See populariseeriks veelgi keskkonnasäästlike süsteemide kasutamist. Eestis on koostatud taastuvenergia suurprojektid, mille elluviimine elavdaks majandust ja kasvatada avaliku sektori maksutuluid ligi 3,2 miljardi euroni aastas, ja mille investeerimismaht võib ulatuda kuni 19,4 miljardi euroni, sisaldades elamute energiatõhustamist, tuumaelektrijaama rajamist ja rasketranspordi üleviimist biokütusele, mis eeldab piisava biometaani olemasolu.

## 2.2 Biogaasist ja selle kasutusest Euroopas

Biogaas on anaeroobse kääritamise teel saadud gaasiline kütus, mis koosneb 50-70% ulatuses metaanist ( $\text{CH}_4$ ), 30-40% ulatuses süsinikdioksiidist ( $\text{CO}_2$ ) ja teistest komponentidest nagu lämmastik ( $\text{N}_2$ ), hapnik ( $\text{O}_2$ ), ammoonium ( $\text{NH}_3$ ) ja vesiniksulfiid ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Eesti Biogaasi Assotsiatsioon (2024) käsitleb biogaasi kui taastuvat energiaallikat, mille jaoks vajalikku toorainet on võimalik saada soodest, põllult ja prügilatest. Kasutades kääriteid saab biogaasi toota sõnnikust, reoveest, rohtsest biomassist ja biolagunevatest jäätmetest.

Biometaan on puhastatud biogaas, mida toodetakse anaeroobsel teel bioloogiliste materjalide ringlusesse võtmisel. Biometaani koostises peab olema vähemalt 97% metaani ( $\text{CH}_4$ ), väiksema metaani kontsentratsiooni puhul on tegemist tavalise biogaasiga. Biometaan on 100% taastuvkütus, mis on omadustelt võrdne CNG ehk maagaasiga (Oja 2022).

Stolarski *et al.* (2020) sõnul on viimase 20 aasta jooksul biogaasi ja biometaani tootmine mänginud olulist rolli säästva arengu eesmärkide täitmisel ja taastuvenergia tootmise osakaalu suurendamisel. Klassikaliselt on biogaasi tootmise peamisteks tooraineteks olnud loomsed- ja põllumajandustootmise jäägid, kuid viimastel aastatel on üha enam hakatud kasutama ka toidujäätmeid, rohttaimi ja prügi.

Energeetiliselt saab biogaasi kasutada elektri, soojuse ja transpordikütuste tootmiseks (Eesti Taastuvenergia Koda 2024). Viimastel aastatel on biogaasi kasutatud üha enam just transpordisektoris, kui biogaasi puhastades saavad ühistranspordisõidukid ja autod liikuda kasutades kütusena biometaani (Euroopa Komisjon 2024).

European Biogas Association'i (2017) andmetel on viimased aastakümned toonud biogaasi tootjatele kaasa ka erinevaid stiimuleid, kuna riikide valitsused ja rahvusvahelised organisatsioonid on võtnud süsinikuneutraalse ühiskonna saavutamise selgeks eesmärgiks, mida tahetakse saavutada. See omakorda on biogaasi tootjate jaoks kaasa toonud erinevaid toetusi, maksusoodustusi ja regulatiivseid raamistikke, mis edendavad biogaasisektorit ning tehtavate investeeringute mahtu.

Jaganmohani (2024) sõnul on Euroopa Liidus on biogaasist elektri tootmine viimastel aastatel püsinud 173,4 TWh juures. Viimasel kahel kümnendil on Euroopa Liidus kasvanud hüppeliselt biokütuste tootmine. Kui aastal 2000 toodeti 1908 kuupmeetrit biokütuseid päevas, siis 2021. aastaks oli see kasvanud 37 521 kuupmeetrile päevas. Aastal 2020 tarbiti Euroopa Liidu transpordisektoris biokütuseid 15 800 000 tonni. Majanduslikust ja sotsiaalsest aspektist lähtudes pakkus biomassisektor 2021. aastal Euroopa Liidus tööd 353 800-le inimesele.

Statista (2024) andmetel toodeti Euroopas 2010. aastal bioenegiat kokku 25 343 MWh ja 2019. aastal 41 155 MWh. Kolme järgneva aasta jooksul ei ole võimekus kasvanud, olles 2022. aastal 41 694 MWh juures.

Enefiti (2024) hinnangul on Euroopa Komisjon on pikalt arutanud võimalikku Euroopa elektrituru reformi, et vältida 2022. aasta sügisel turgu tabanud ülikõrgeid elektrihindu. Tänapäevaks on jõutud nii kaugemale, et elektriturul seni kehtinud põhimõte, kus nõudluse katmiseks vajaminev kallim pakkuja määrab turuhinna, jääb kehtima. Lühiajaliste suurte hinnakõikumiste vastu soovitatakse tarbijatel kasutada rohkem pikalt ette fikseeritud hinnaga lepinguid. Viimased aitavad ka taastuenergia pakkujate rahavoogusid planeerida ja kiirendavad taastuenergia sektorisse investeringute tegemist. See on omakorda oluline Euroopa gaasisõltuvuse vähendamiseks ja aitab samas kaasa Euroopa Liidu kliimaeesmärkide täitmisele.

Euroopa Komisjon on seadnud aastaks 2030 eesmärgi toota aastas 35 miljardit kuupmeetrit biometaani, mis tähendab vähemalt 37 miljardi euro ulatuses investeringuid biometaani sektorisse (European Commission 2024).

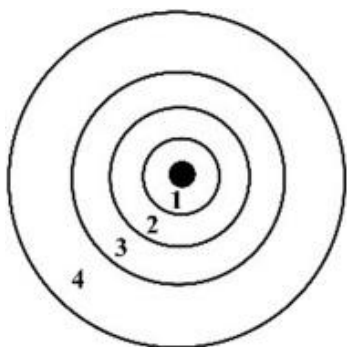
## 2.3 Asukohateooriad

Asukohateooriad ja nende rakendused aitavad käesolevas bakalaureusetöös optimeerida biogaasijaamade asukohti. Maailmas kasutusele võetud rohelahendused on kohalikud ja spetsiifilised ning seetõttu on oluline traditsioonilised ettevõtete paigutust optimeerinud teooriad taas kasutusele võtta.

### 2.3.1 Asukohateooriate ajalugu

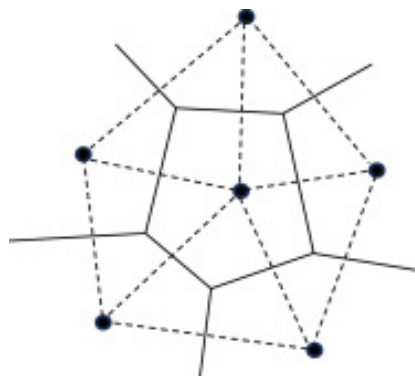
Asukohateooriate alguseks loetakse 17. sajandit, kui Evangelista Torricelli leidis kolmnurga sees asuvale punktile nurkadest minimaalsel kaugusel asukohta (Marianov ja Eiselt 2024). Eelmainitud käsitlust saab seostada toorainete, turu, tööjõu ja muude planeemise aspektidega. Marianov ja Eiselt (2024) kirjeldavad, et pärast kolmnurgateoreemi rakendati Torricelli meetodit sarnaste matemaatilisele probleemidele lahendamiseks. Esimese asukohateooria käsitluse lõi 1826. aastal Johann Heinrich von Thünen (1826). Johann Heinrich von Thüneni asukohateooria (1826) aluseks oli määratlus, mille kohaselt erineb vastava maa maksumus kesklinna maa maksumusest transpordikulu võrra (vt joonis 1). Sellest nähtub, et mida kaugemal on maa keskusest, seda madalam on selle väärtus. Seega sõltub transpordikulu toote massist ja kaugusest (Hloptsov 2009, *cit.* Savruk 2014).

Märkimisväärse panuse asukohateooriate arengusse andis saksa majandusteadlane Wilhelm Launhardt (1885), kes leiutas mudeli, mis aitas leida optimaalset asukohta võttes arvesse transpordikulusid ja turukonkurentsi. Launhardti mudeli põhjal valisid ettevõtted tegutsemiseks sellised asukohad, kus nende toodetud kaupade tarbijateni jõudmise transpordikulud oleksid minimaalsed, võttes samal ajal arvesse teiste ettevõtete paiknemist (Ferreira 1998). Järgmise suure muutuse asukohateooriasse tõi Georgi Voronoi (1908), kes leiutas diagrammi (vt joonis 2), mille abil saab määrata kõikide punktide kaugust seemnepunktist. Asukohateooriat revolutsioneeris Alfred Weber, oma teoses „*Über den Standort der Industrien*” (1909) (Marianov ja Eiselt 2024).



Joonis 1. Von Thüneni ringid.

(Marianov ja Eiselt 2024)

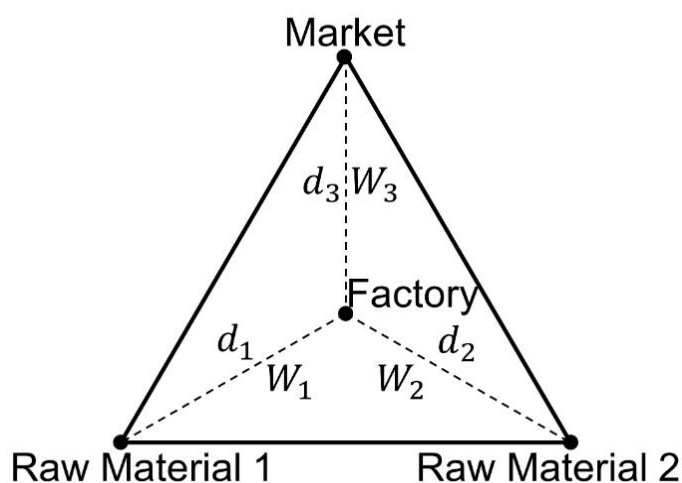


Joonis 2. Voronoi diagramm

(Marianov ja Eiselt 2024)

### 2.3.2 Ülevaade tähtsamatest asukohateooriatest

Weberi (1909) teooria keskendub kolmele peamisele tegurile, milleks on transpordi-, tootmis- ja tööjõukulud (vt joonis 3). Reid (1968) kirjeldas seda lähemalt järgnevalt: transpordikulud peavad ettevõtete jaoks olema minimaalsed, et toodetud kaubad jõuaksid tarbijateni võimalikult kuluefektiivselt. Seega eelistavad ettevõtted paikneda võimalikult turu lähedal. Teine oluline tegur Weberi teoorias on tootmiskulud, mis sõltuvad peamiselt toorainete kättesaadavusest. Tema teooria kohaselt eelistavad ettevõtted paikneda piirkondades, kus tootmiskulud on võimalikult väikesed, kuid samas on pidev tooraine kättesaadavus. Kolmas tegur on tööjõukulud, mis Weberi teooria kohaselt mängib rolli tehase asukoha valikul. Ettevõtete soov on kulutada võimalikult vähe raha töötasudeks, kuid saada vastu kvalifitseeritud tööjõudu.



Joonis 3. Alfred Weberi asukohateooria skeem. (Testbook 2023)

Christalleri (1933) ja Lösch (1940) arendasid välja keskuskohtade hierarhiline süsteemi. Dawkins (2003 *cit.* Sethy 2023) kirjeldab, kuidas selline süsteem võimaldab efektiivselt hallata territooriumeid ja nende vahel liikuvaid teenuseid. Keskuskohtade teooria kirjeldab, et teenuseid saab eksportida ainult hierarhiliselt madalamal asuvatele piirkondadele ja samal tasemel piirkondades teenuseid ei vahetata.

Samuti tasub esile tuua Walter Isardi (1956) teooriat, mis integreeris omavahel eelnevad asukohateooriad ja mudelid ning juhtis tähelepanu turualade tihenemisele aglomeratsioonis (The Web Book of Regional Science 1999, *cit.* Savruk 2014).

### **2.3.3 Asukohateooriate rakendusi tänapäeval**

Weberi asukohateooria traditsiooniline mudel, mis keskendub kulude minimeerimisele ja ressursside kättesaadavusele, on tänapäeval saanud juurde olulisi tegureid, milleks on keskkonnamõju, ressursside ammendumine ja sotsiaalne vastutus (Sethy 2023).

Dawkins (2003, *cit.* Sethy 2023) kirjeldab, et kuna erinevad maailma tööstusharud püüavad saavutada globaalseid seatud jätkusuutlikkuse eesmärgi, on „roheline” või „säästva” tööstusliku asukoha kontseptsioon muutunud olulisemaks. Rahvusvahelised eksperdid on leidnud piiranguid traditsiooniliste asukohateooriate, sealhulgas Alfred Weberi tööstusliku asukohateooria piiranguid jätkusuutlikkuse probleemide lahendamisel. Sellest lähtuvalt on teadlased tulnud välja alternatiivsete mudelitega, mis arvestavad ka keskkonnateguritega ja mis võtavad arvesse süsinikdioksiidi heitkogused, energiatarbimist ja jäätmekäitlust.

Merli *et al.* (2018, *cit.* Sethy 2023) uuringust nähtub, et areng puhtalt majanduslikelt kaalutlustelt terviklikule lähenemisviisile on viinud uute raamistike väljatöötamiseni, mis tasakaalustavad majanduslikke ja keskkonnanõudeid. Ökoloogilise jalajälje kontseptsioon on läbinud arutelusid tööstusliku asukoha üle.

Sethy (2023) kirjeldab, kuidas tootmisrajatiste strateegilise asukoha määramisega saavad ettevõtted vähendada transpordikuluseid ja keskkonnamõju. Samuti saavad nad ära kasutada kohalike taastuvaid energiaallikaid, mis aitab säästlikust kasvatada. See on kooskõlas Weberi (1909) kulude minimeerimise põhimõttega. Kuna energiakulude vähenemine mõjutab positiivselt kulutõhusust. Keskkonnategurite integreerimisega ei saa ettevõtte kasu mitte ainult madalamatest energiakuludest, vaid see aitab kaasa ka puhta energiainfrastruktuuri laiendamisele pakkudes nii ühishüve. Algne rõhuasetus veokulude minimeerimiselt on üha enam hakanud hõlmama selliseid kaalutlusi nagu taastuvenergia kättesaadavus, jäätmekäitlus ja keskkonnasõbralik transport. Selliste teguritega kohandamine nõuab tasakaalu Weberi

mudelist tuletatud majandusliku efektiivsuse ja jätkusuutlikkusega seotud ökoloogilise kasu vahel.

Melander ja Pazirandeh (2019, cit. Sethy 2023) kirjeldavad, kuidas väljakutsete ületamiseks peavad tööstused sageli edendama innovatsiooni ja koostööd. Tehnoloogia, logistika ja energiahalduse uuendused võivad hõlbustada keskkonnategurite integreerimist asukohaotsustesse. Koostööpartnerlused valitsusasutuste, teadusasutuste ja muude tööstusharudega võivad pakkuda teadmisi ja lahendusi keerukuse lahendamiseks.

### **2.3.4 Järeldused asukohateooriatest**

Asukohateooriate peatükist selgus, et tooraine lähedus tootmisele saab tehaste asukohtade valikul määravaks. Veokulude minimeerimine on viimastel aastatel üha enam hakanud asenduma jätkusuutliku energia tootmise aspektidega, mis kujundab traditsioonilisi mudeleid ümber. Biogaasijaamade planeerimisel tuleb arvestada eelkõige loomade paiknemise ja teede võrgustikuga, et tagada pidev tooraine kättesaadavus. Käesolevas töös kasutati GIS-i, et leida biogaasijaamadele parimad asukohad Weberi (1909) mudeli alusel. Läga, silo, toidujäätmeid ja puhastite muda viiakse erinevatest asukohtadest biogaasijaama käitlemisse peamiselt raskeveokitega ning seetõttu on kõvakattega teedega ühendatus planeerimise seisukohalt väga oluline. Samuti tuleb arvestada gaasitrassi lähedusega, läbi mille saab toodetud biometaani otse läbi gaasitorustiku turuosalistele tarbimiseks suunata. Biogaasi ja biometaani efektiivseks tootmiseks on vajalik piisav tooraine olemasolu, alates millest muutub biogaasi ja biometaani tootmine mõistlikuks. Biogaasijaamade rajamisel tuleb arvestada, et kokku veetava tooraine mass võib ulatuda kümnete kuni sadade tonnideni päevas, mille kokku vedamine võib osutuda alates teatud kaugusest majanduslikult ebaefektiivseks. Tooraine kogused, veokulu ja turu lähedus on biogaasijaamade planeerimisel võtmetegurid, millele keskenduda.

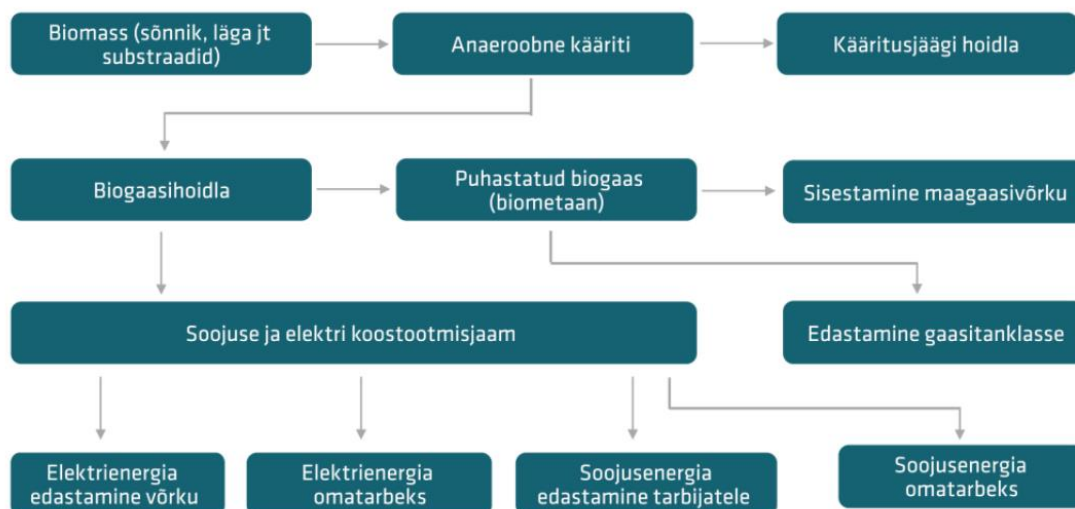
Käesolevas töös rakendati asukohateooriaid GIS-i abil biogaasijaamadele parimate asukohtade leidmiseks. Ruumi analüüsimisel kasutati kuusnurki ja kolmnurki, mida saab seostada Christalleri (1933) ja Weberi (1909) teooriatega. Kuusnurki kasutati tooraine paiknemise leidmisel ja kolmnurki biogaasijaamade lõplike asukohtade määramisel.

### 3. Bioenergia Eestis

Käesolev peatükk annab ülevaate Eesti bioenergia sektorist, et paremini mõista bakalaureusetöö konteksti.

#### 3.1 Biogaas soojuseks, elektriks ja kütuseks

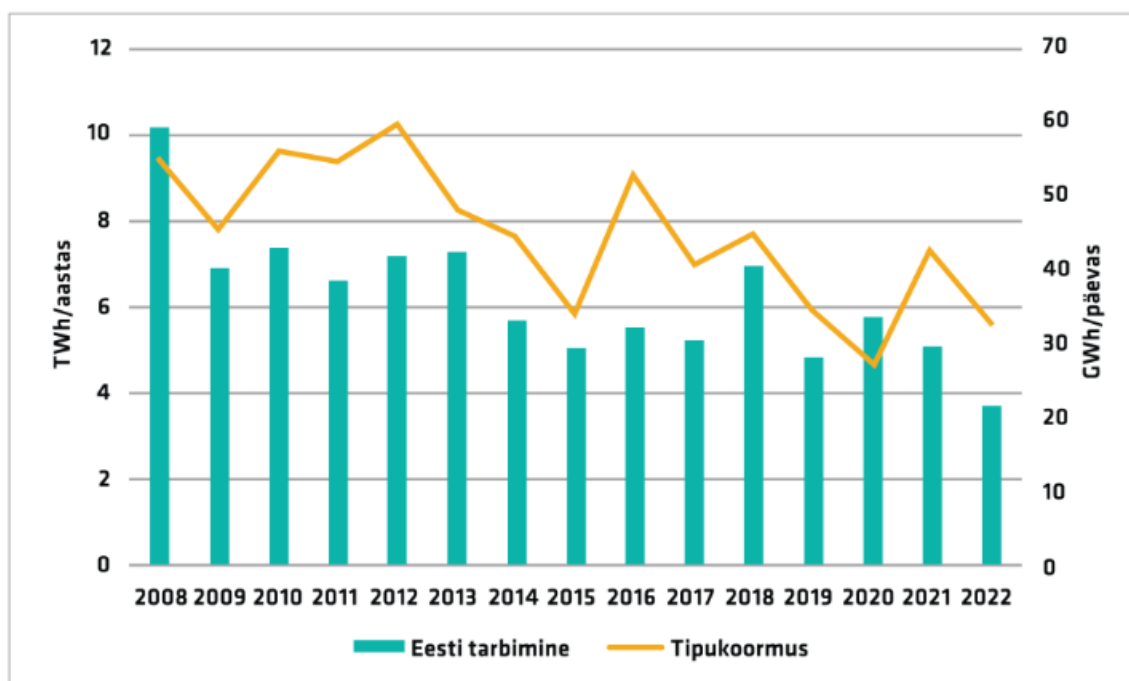
Veiste ja sigade läga kasutatakse põllumajandussektoris väetisena, mis toob endaga kaasa mitmesuguseid keskkonnaprobleeme nagu pinnase- ja vee saastumine ning haisureostus (Dagnall *et al.* 2000). Samuti tekitab sõnniku lagunemisel metaani ja süsinikdioksiidi. Thompson *et al.* (2013) järgi toob sõnniku kasutuselevõtt bioenergia tootmiseks kaasa mitmed majanduslikud, keskkondlikud ja kliimatilised hüved. Väheneb eelkõige fossiilsete kütuste tarbimine ja kasvuhoonegaaside emissioon atmosfääri. Anaeroobsest kääritusjääki ehk digestaati saab kasutada väetisena, kuna selle toitainete sisaldus on sama. Rutz (2015) kirjeldab, kuidas enamik tänapäevaseid anaeroobse kääritamise tehaseid toodab nii elektrit kui ka soojust, mis tähendab, et need toimivad kui koostootmisjaamad (CHP). Kui jääksoojus läheb kohalikku tarbimisse, mis võib jaama efektiivsust veelgi suurendada. Puhastatud biogaasi ehk biometaani saab suunata edasi gaasivõrku või kasutada kütusena transpordisektoris (vt joonis 4). Eestis on kõige sobivamateks biogaasi puhastamise viisideks füüsikaline absorptsioon ja membraanpuhastus (Kask jt. 2014). Oja (2013) sõnul ei ole biogaasi tootmiseks olemas ühtset skeemi ning iga biogaasijaama konfiguratsioon sõltub tooraine eripärast ja jaama asukohast. Biogaasi took ehk tagasisaam sõltub suuresti lähtematerjalist ja sellele lisatud substraatidest.



Joonis 4. Biogaasi ja biometaani tootmisprotsesside ja kasutusvalade skeem. (Elering 2024a)

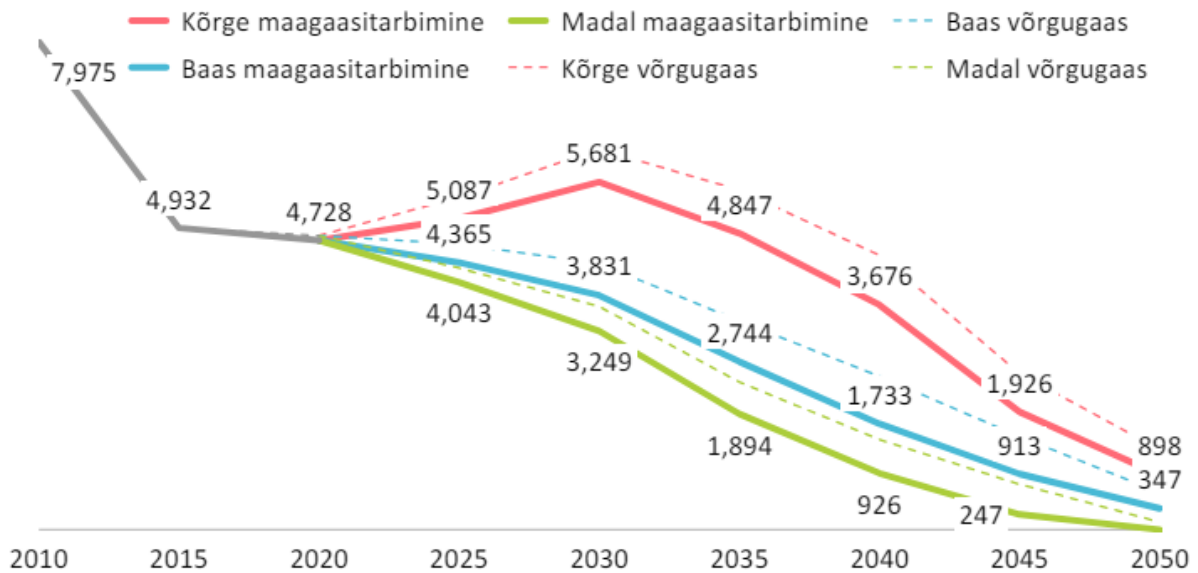
### 3.2 Ülevaade Eesti gaasisektorist

Eleringi (2024a) andmetel tarbiti Eestis 2022. aastal maagaasi 3,8 TWh, mis on 26% vähem kui 2021. aastal (vt joonis 5). Seejuures vähenes maagaasi tarbimine Soomes 53% ja Leedus 35%. Peamiseks maagaasi tarbimise vähenemise põhjuseks oli kallinenud gaasi hind ning Venemaa tarneahelate katkestamine ja vahetamine LNG vastu. Eestis tarbiti 2021. aastal enim maagaasi energiasektoris, seejärel tööstuses, äri- ja avaliku teeninduse sektoris ja kodumajapidamistes. Civitta (2021) aruandest nähtub, et aastaks 2050 on kõikide stsenaariumite puhul vähenenud maagaasi tarbimine alla 1 TWh aastas (vt joonis 6). Järgnevatel aastakümnetel tõuseb elektri, vesiniku, biomassi, biogaasi ja biometaan tarbimine maagaasi arvelt Eestis üle 5 TWh aastas ning aastaks 2050 tarbitakse gaasi alla 4 TWh aastas (vt joonis 7), millest suurima osa moodustab elekter (33%) ning biogaas ja biometaan (28%).



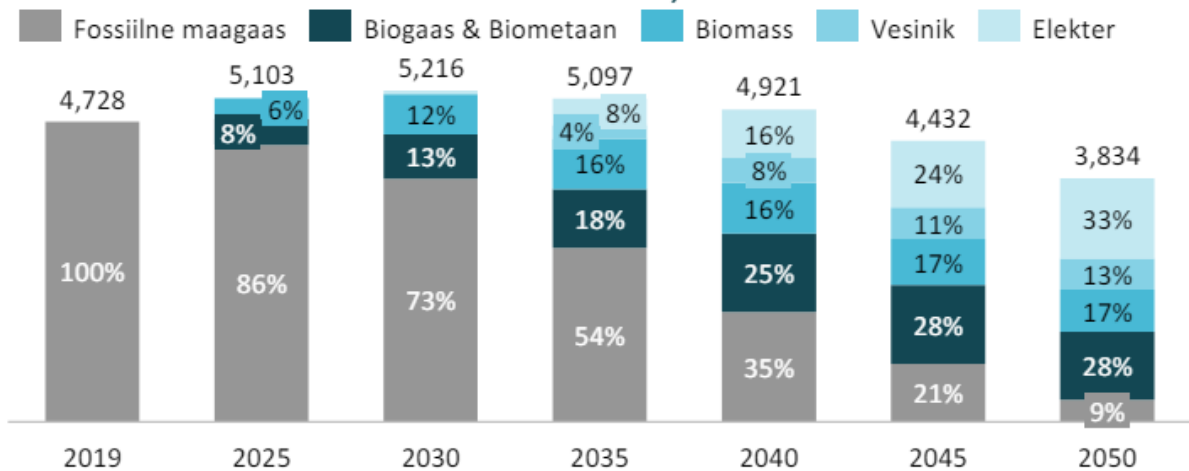
Joonis 5. Eesti maagaasi aastane tarbimine (TWh/aastas) ja tipukoormus (GWh/päevas) aastatel 2008-2022. (Elering 2024a)

### EESTI MAAGAASI AASTANE TARBIMINE\*, GWh



Joonis 6. Eesti maagaasi aastase tarbimise erinevad stsenaariumid aastani 2050, GWh. (Civitta 2021)

### EESTI MAAGAASI TARBIMISE ASENDAMINE\*\*, GWh



Joonis 7. Eesti maagaasi tarbimise asendamine, GWh. (Civitta 2021)

Biometaani hakati Eestis tootma 2018. aastal ning siiani on kogu toodetud biometaan suunatud transpordisektori tarbimisse. Kui 2018. aastal toodeti 39 993 MWh biometaan, siis 2021. aastal 152 352 MWh ja 2023. aastal 211 000 MWh. Enim biometaan toodeti 2021. aastal loomasõnnikust, mis näitab, et Eestis on võimalik sigade ja veiste lägast efektiivselt biometaan toota (Elering 2024a; Kundla 2024). Biometaan on oma omadustelt võrdne maagaasiga, mida

saab samuti suunata läbi gaasivõrgu tarbimisse. Biogaas sobib oma omadustelt rohkem soojust ja elektrit tootvatele koostootmisjaamadele, mis asuvad eelkõige tööstusettevõtete läheduses (Elering 2024a).

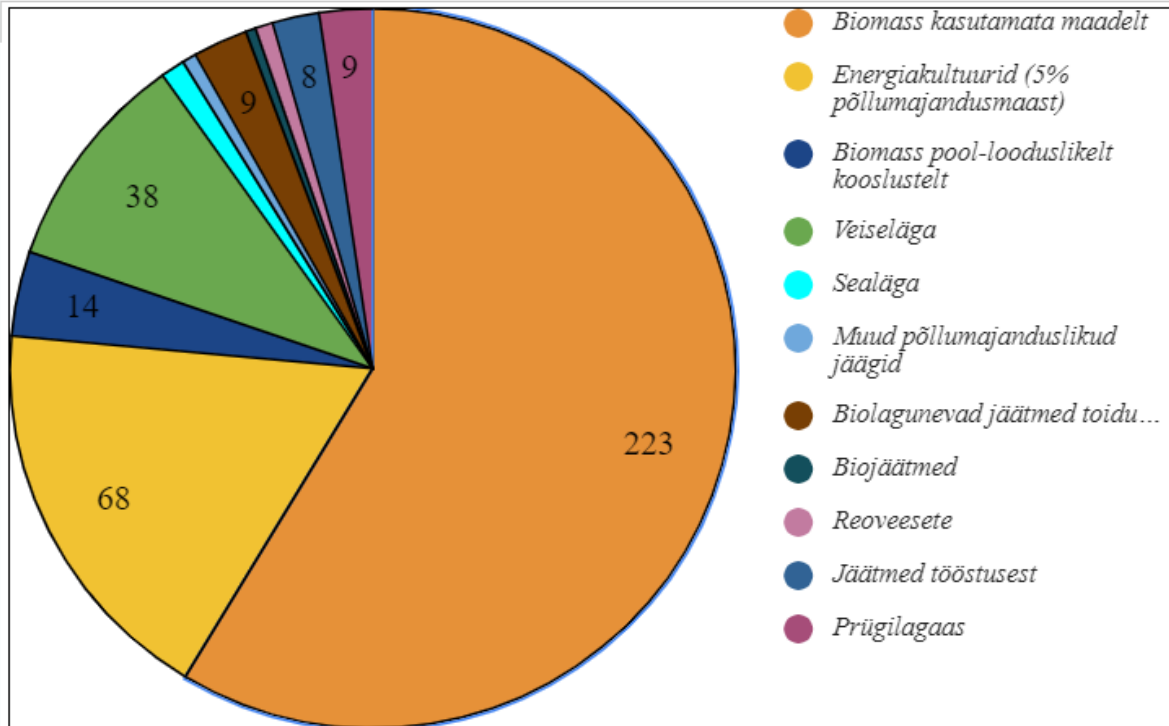
Balti riikides ja Soomes maagaasi ei toodeta ja kogu vajaminev maagaas imporditakse LNG maailmaturult ja GIPL Poola-Leedu ühenduse kaudu. 2022. aastani imporditi maagaasi ka Venemaalt, kuid Ukraina sõjast tulenevalt import katkestati. 19.05.2024 seisuga tuuakse maailmaturult soetatud maagaas veeldatud kujul Paldiski LNG ujuvterminali, Läti Inčukalnsi maagaasihoidlasse, Klaipeda LNG terminali ja Inkoo LNG terminali, mis on kõik ühendatud regiooni maagaasi võrgustikuga (Elering 2024a). Paldiski LNG ujuvterminal ei olnud lekke tõttu vahemikus 08.10.2023 kuni 22.04.2024 Balticconnectori remondi tõttu turuosalistele kättesaadav (Elering 2024b).

Eesti Taastuvenergia Koja hinnangul (2024) võimaldaksid Eesti geograafiline asukoht ja siinsed tingimused toota kogu vajamineva elektri- ja soojusenergia taastuvatest energiaallikatest. Asukohast ja kliimatilistest teguritest tingituna ei saa Eestis päikest ja tuult kogu aeg taastuvenergia tootmiseks kasutada, seega oleks bioenergia tootmine Eesti tingimustes kõige jätkusuutlikum lahendus juhitavate võimsuste tagamiseks.

Eurostati andmetel moodustas Euroopa Liidus taastuvenergia 2020. aastal summaarsest lõpptarbimisest 22,1% ning Eestis ligikaudu 38%. Biomassi võimalikult efektiivseks kasutuselevõtuks peaks riik panustama enim elektri ja soojuse koostootmisele. Aastal 2020 toodeti Eestis 35% soojusenergiat biomassist, kuid Eestis olevast kohalikust rohtsest biomassist oleks võimalik toota vähemalt Eestis tarbitavast 2/3 soojusenergiast (Eesti Taastuvenergia Koda 2024).

Peamised uurimused biomassi ja biometaani potentsiaali kohta Eestis pärinevad aastast 2013 (Oja) ja 2015 (Vohu). Eestis on põllumajanduslikel maadel ja looduskaitsealised niitudel olev rohumass alakasutatud (Vohu 2015). Samas on küsitav, kui suure hulga rohumassi saaks tegelikult kokku korjata ja käärititesse või katlamajadesse töötlemisse viia (Oja 2013; Vohu 2015). Rohumassist soojuse või elektri tootmine eeldab miljonitesse eurodesse ulatuvaid investeeringuid, mida ei olda pika tasuvusaja tõttu sageli valmis tegema (Oja 2022). Ahto Oja (2013) koostas tabeli (vt tabel 1), mis kirjeldas biogaasi energeetilist ressursi aastal 2050. ENMAK 2030 kohaselt moodustab suurema osa Eesti biogaasi energiaressursist 2050. aastal (vt joonis 8) biomass kasutamata maadelt (Eesti Vabariigi Valitsus 2017).

## ENMAK 2030/2050 Energiaressursid : Biogaas



Joonis 8. Eesti biogaasi tootmise ressursi proportsioon miljonites kuumpeetrites. (Energiamajanduse arengukava aastani 2030, 2017)

Tabel 1. Biogaasi energeetiline ressurs aastal 2050. (Oja 2013)

Substraat	ha, t	t/ha	t/a	Biogaasi Nm <sup>3</sup> /t VM	Teoreetiline biogaasi maht mln Nm <sup>3</sup>	90% teoreetilisest mln Nm <sup>3</sup>	Reaalselt kasutatav %	Biogaasi potentsiaal (60% CH <sub>4</sub> ) mln Nm <sup>3</sup>	Biometaani potentsiaal (98% CH) mln Nm <sup>3</sup>
Silo kasutamata maadelt	177 385	15	2 660 775	155	412,4	371,2	100%	371,2	222,7
Silo 5% põllumajandusmaalt	53 917	15	808 755	155	125,3	112,8	100%	112,8	67,7
Silo/hein pool- looduslikelt aladelt	100 000	9	900 000	119	107,1	96,4	25%	24,1	14,5
Veiseläga	163 135		3 870 378	25	96,8	87	72%	62,7	37,6
Sealäga	360 990		395 284	29,4	11,6	10,5	65%	6,8	4,1
Põllumajanduslikud muud jäägid	32 124		32 124	155	5	4,5	90%	4	2,4
Biologunevasd toiduained toiduainetööstusest	42 667		42 667	300	21,3	19,2	80%	15,4	9,2
Eraldi kogitud biologunevad köögi- ja sööklajäätmed	24 000		24 000	166	4,0	3,6	80%	2,9	1,7
Reoveesete	466 975		466 975	15	7,0	6,3	80%	5	3
Tööstusjäägid	25 000		-	-	14,6	13,1	100%	13,1	7,9
Prügilad	-	-	-	-	21	18,9	80%	15,1	9,1
<b>Kokku</b>					<b>826,16</b>	<b>743,54</b>		<b>633,16</b>	<b>379,90</b>

Tabelist 1 nähtub, et suurima potentsiaali biometaani tootmiseks moodustab silo kasutamata maadelt. Märkimisväärse osa biometaani tootmise potentsiaalset moodustab sigade ja veiste läga, millest saaks 2050. aastal toota 41,7 miljonit normaalkuupmeetrit biometaani.

### 3.3 Bioenergia sektori arendamise hüved

Oja (2022) hinnangul kaasnevad bioenergia valdkonna arendamise ja biometaani tootmisega avalikud hüved, mis puudutavad energeetikat, jäätmekäitlust, põllumajandust, keskkonnakaitset ja regionaalarengut. Energeetikasektori peamisteks hüvedeks on taastuvenergia tootmise, haja-energeetika ja kohalikul toorainetel põhineva energeetilise

sõltumatuse edendamine. Jäätmekäitluse valdkonnas on peamisteks hüvedeks biojätmete taaskasutuse suurendamine ja reoveesette käitluse parandamine. Põllumajanduses paraneks suurema koguse biometaanitootmise läbi läga- ja sõnnikukäitlus ning edeneks vähemväärtuslike maade kasutuselevõtt. Keskkonnakaitse seisukohalt väheneks biometaanitootmise kaudu põllumajandussektori metaaniheide ja energeetikasektori CO<sub>2</sub>-heide. Samuti väheneks kunstväetiste kasutamise hulk ning suureneks kohalikul taastuenergiaga põhineva transpordikütuse kasutus. Regionaalarengu vaatenurgast toob biometaanitootmine kaasa haisureostuse vähenemise ning seeläbi inimeste elukeskkonna paranemise. Biometaanitootmise jaamu rajades edeneks maapiirkondades kogukonnaenergeetika ja ettevõtlus ning suureneks tööhõive. Biometaanitootmise jaamade rajamisel lisanduks Eesti SKP-le 589 miljonit eurot.

### **3.4 Näited Eesti biogaasisektorist**

Eesti aastane gaasitarbimine on 3,8 TWh. See on kahanevas trendis, sestüha enam asendatakse maagaas biogaasi ja biometaaniga (Civitta 2021). Eesti võtnud eesmärgiks toota 380 GWh biometaanitootmist aastas (REKK, 2019), kuid Eesti Taastuenergia Koja juhataja Mihkel Annuse sõnul (2023) on see eesmärk liiga madal. Aastal 2022 toodeti võrku juba 200 GWh biometaanitootmist ning ettevõtetel on võimekus ning soov sektorit aktiivselt edasi arendada ja tootmist suurendada. Eesti riik peaks eesmärgiks võtma 1 TWh biometaanitootmist aastas 2030, mis tähendab sihi kolmekordistumist. 1 TWh võimekuse saavutamine Eestis on võimalik (Vohu 2015), kuid seda rohtsele biomassile põhinevalt, mida ei ole praktikas nii lihtne kokku koguda. Teisalt aga on Eesti ettevõtjad muude biometaanitootmiseks vajalike toorainete kokku kogumisega alles alguses ja suurem osa põllumajanduslikest jääkidest ja reoveemudast ei jõua biometaanitootmistesse. Annuse (2023) sõnul pole Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium biometaanitootmise edendamises olnud piisavalt aktiivne, et pakkuda ettevõtetele toetusi, mis kiirendaks biometaanitootmist. Kunagi kehtinud biogaasi ja biometaanitootmist toetust enam ei jagata ning see on vähendanud ettevõtete huvi investeerida. Riiklikult oleks vajalik võtta seisukoht, et Eesti loobub täielikult imporditavast maagaasist. See samm suurendaks kodumaiste biometaanitootjate arvu ja mahtu.

Jaanus Marrandi sõnul (2023) on tema poolt juhitud on OÜ Estonia Farmid biometaanitootmist võimekuseks 30 000 MWh aastas. Ettevõtte hangib biometaanitootmist vajamineva tooraine oma maadelt või veab kokku kuni 20 km raadiusest. Kaugemalt kui 20 km ei ole tooraine kokkuvedamine majanduslikult tasuv. Biometaanitootmist loomiseks on vaja põhjalikke teadmisi energiaturu toimimisest ning tehnilisi teadmisi biometaanitootmistest. Estonia

farmides on 6000 veist, kes annavad valdava osa biometaaniga jaamadest minevast toorainest. Ettevõtte teeb koostööd teiste põllumajandustootjatega, et suurendada kasutatava toorme kogust. Samuti tehakse koostööd Alexela ja Infortariga, kellele müüakse biometaaniga. OÜ Estonia Farmid poolt toodetava biometaaniga sõidavad näiteks Tartu linnaliinibussid (Marrandi 2023).

Raul Peetsoni (2023) sõnul hakkab Halinga OÜ poolt arendatav biometaanijaam Pärnumaal Loomse külas ehituse valmides tootma 70 000 MWh biometaaniga aastas. Kavandatav biometaanijaam on saanud kohalikul omavalitsusel planeeringukinnituse. Ettevõtte viib kääritud oma veiste läga ning kokku kogutud silo. Samuti tehakse koostööd lähedal elavate talunikega, kellele pakuti võimalust oma toorainet ettevõttele biometaaniga tootmiseks müüa, luues seega energiaühenduse mudeli. Lisaks biometaaniga tootmisele on ettevõttel plaan investeerida päikeseparki ja tuulikutesse, mis kujundaks Halinga OÜ-st ainulaadse energiaparki Eestis. Ettevõttele kuuluvad ka turbamaad, mida saaks kasutada päideroo kasvatamiseks. Päideroog annab 15-20 tonni biomassi ühe hektari kohta aastas. Päideroog kõlbab suure suhkrusisalduse tõttu söödaks ka farmis elavatele veistele. Biometaanijaamadesse kogutav päideroog läbib aastas kaks niidet, et rohumassi hulk oleks suurem ning veistele söödaks minev päideroog läbib aastas neli niidet, et proteiini sisaldus oleks suurem (Peetson 2023).

Kundla (2024) kajastas aprillis aastal 2024 Ebaveres uue biometaanijaama avamist, mille võimsuseks on 36 000 MWh aastas. Biometaaniga tootmiseks kogutakse vajalik tooraine ettevõtte ümbrusest, peamiselt suurematest farmidest. Biometaanijaam annab Väike-Maarja vallas tööd kümnele inimesele, kes igapäevaselt tegelevad eelkõige loomasõnniku väärindamisega. Biometaanijaama ehitus läks maksma 10 miljonit eurot ja projekti tasuvusajaks on planeeritud 10 aastat.

### 3.5 Kokkuvõte ja järeldused teooriast

Kliimamuutused on kaasa toonud hulga pöördumatuid ja negatiivsed mõjusid keskkonnale, mille leevendamiseks on Euroopa Liidus vastu võetud Rohelepe, mis aitab edendada süsinikuneutraalsemat majandust. Hinnanguliselt 75% Euroopa Liidu viimaste aastate kasvuhoonegaasi heitest pärineb energia tootmisest ja kasutamisest. Seetõttu on oluline kaaluda alternatiivseid energia tootmise viise, mis oleksid keskkonnasäästlikud, kuid samas efektiivsed ja skaleeritavad. Eesti asukohast ja kliimaatilistest teguritest tingituna ei saa päikest ja tuult kogu aeg taastuenergia tootmiseks kasutada, seega on bioenergia tootmine biogaasi või biometaani näol Eesti tingimustes 2024. aastal kõige jätkusuutlikum lahendus. Rohetehnoloogiad on globaalselt üsna sarnased, kuid nende elluviimine ja haldamine nõuab kohalikul tasandil põhjalikku eeltööd. Tehaste planeerimisel on oluline kaaluda tooraine, tööjõu ja turu paiknemist, et bioenergia tootmine oleks võimalikult efektiivne ja ettevõtjatele majanduslikult tasuv. Eelmainitud tegureid kirjeldavad kõige paremini asukohateooriad, mille abil saab leida tehastele parimad võimalikud asukohad. Asukohateooriate traditsioonilised mudelid, mille eesmärgiks oli minimeerida transpordikulused, on tänapäeval asendunud üha enam keskkonna- ja sotsiaaltegureid arvesse võtvate mudelitega.

Käesoleva bakalaureusetöö teoreetilisest osast nähtub, et:

- Hinnanguliselt 75% Euroopa Liidu viimaste aastate kasvuhoonegaasi heitest pärineb energia tootmisest ja kasutamisest.
- Oluline on investeerida ennaktempos rohepöörde lahendustesse, et vältida keskkonnaprobleemide süvenemist.
- Riikide toetusmeetmed erasektori poolt tehtavateks investeeringuteks pole sageli konkurentsivõimelised.
- Eestis kontekstis on 2024. aastal arvestatavaks lahenduseks biogaasi ja biometaani tootmine.
- Veokulude minimeerimine on viimastel aastatel üha enam hakanud asenduma jätkusuutliku energia tootmise aspektidega, mis kujundab traditsioonilisi mudeleid ümber.
- Biogaasijaamade planeerimisel tuleb arvestada eelkõige loomade paiknemise ja teede võrgustikuga, et tagada pidev tooraine kättesaadavus.

- Energeetiliselt saab biogaasi kasutada elektri, soojuse ja transpordikütuste tootmiseks.
- Aastaks 2050 on kõikide stsenaariumite puhul vähenenud maagaasi tarbimine alla 1 TWh aastas ning asendunud peamiselt elektri ning biogaasi ja biometaaniga.
- Eestis on 2050. aastaks võimalik toota ligi 380 miljonit kuupmeetrit biometaani aastas, millest suurima osa moodustab rohtse biomassi väärindamine.
- Viimastel aastatel on Eestis toodetud enim biometaani loomasõnnikust, mis näitab, et ettevõtjad on enim huvitatud sigade ja veiste läga väärindamisest.
- Ettevõtjad rajavad biogaasi ja biometaani jaamu suuremate loomafarmide lähedusse, et minimeerida tooraine transpordikulusid, mis kattub asukohateooria käsitlustega.
- Biogaasijaamade asukohtade planeerimisel on asjakohane rakendada GIS-i abil traditsioonilisi asukohateooriaid, mis lihtsustavad optimimeerimisülesannet. Jaamade lõplikul paigutusel saab kasutada Weberi (1909) teooriat.
- Eestis pole sigade ja veiste farmide läga potentsiaalset mahtu varem hinnatud. Läga mahu hindamist saab lihtsustada kasutades kuusnurki, mis täidavad kogu ruumi.

Biogaasijaamade parimate asukohtade leidmiseks on mõistlik kasutada traditsioonilisi asukohateooriaid uues võtmes. See tähendab Weberi (1909) ja Christalleri (1933) põhimõtteid järgides uue Eesti konteksti sobituvat meetodika välja mõtlemisest ja GIS-i rakendamist.

## 4. Materjal ja metoodika

Käesoleva bakalaureusetöö praktilise osa eesmärgiks on uurida, kui palju on võimalik Eestis sigade ja veiste lägast biogaasi ning biometaani toota. Töös keskendutakse sigade ja veiste läga potentsiaalile, sest eelnevalt ei ole Eestis seda paigutuslikult uuritud. Rohtset biomassi, mis moodustab bioenergia tootmise potentsiaalset enamiku, käesolevas töös ei käsitleta, kuna sel teemal valmis 2015. aastal suurem uurimus (Vohu 2015). Biogaasijaama rajamise eelduseks on eelkõige sigade ja veiste farmides suur isendite arv ning huvi loomasõnnikut väärindada. Samas tuleb arvestada, et praktiline töö ei anna terviklikku ülevaadet bioenergia potentsiaalset, kuid toob välja asukohad, kuhu on mõistlik rajada biogaasijaamad, et võimalikult efektiivselt väärindada sigade ja veiste läga.

Empiirilisele osale seati järgnevad uurimisküsimused:

1. Mitu kuupmeetrit biogaasi ja biometaani on võimalik Eestis sigade ja veiste lägast toota?
2. Mitu 50 MWh võimsusega biogaasijaama saaks Eestis rajada kasutades tooraineks ainult sigade ja veiste läga?
3. Millistesse asukohtadesse on Eestis mõistlik rajada biogaasijaamad?

### 4.1 Andmed

Andmed sigade ja veiste isendite arvu ja koordinaatide kohta pärinevad Põllumajanduse Registrite ja Informatsiooni Ametist (PRIA). Andmed laeti PRIA-st alla *.csv* formaadis. Uurimistöös kasutatud loomade andmed on alla laetud 12.12.2023 seisuga. Vajalike päringute läbiviimiseks laeti Maa-ameti geoportaalist Eesti topograafiline andmekogu (ETAK) alla kogu Eesti andmestik *.shp* formaadis.

### 4.2 Andmetöötlus

Esimese sammuna puhastati ja grupeeriti sigade ja veiste kohta allalaetud andmed Excelis, et edasisi päringuid lihtsustada. Majandusliku ebaefektiivsuse tõttu eemaldati andmekihtidelt kõik sigade ja veiste farmid, milles oli alla 10 isendi (vt lisa 2, joonis 16). Sigade ja veiste lägast saadava biogaasi ja -metaani hulga arvutamiseks kasutati A. Oja koostatud metoodikat (Oja 2013). Praktilise osa raames tehtud päringud viidi läbi kasutades geoinfosüsteemi QGIS 3.34.3 Prizren versiooni. Samuti kasutati andmetöötluses programmeerimiskeele Python teeki

Pandast, mille abil leiti biogaasitehaste teoreetilised asukohad. Kood kirjutati keskkonnas Visual Studio Code (vt lisa 3).

Praktiline töö algas eelnimetatud andmete allalaadimisega PRIA-st ja ETAK-ist. Seejärel hakati QGIS-is genereerima veiste ja sigade farmide teenindusalasid, mille abil oli hiljem võimalik leida biogasi jaamadele sobivad asukohad. Kuna biomassi transporditakse raskeveokitega, siis jäeti uurimistöösse sisse need teed, mida mööda on võimalik läga transportida. Teenindusaladete genereerimise protsess algas Eesti teede andmete puhastamisega, mille käigus eemaldati kaardilt kõik rajad, kergliiklusteed, muud teed, pinnaskattega teed ja väiksemad tänavad. Samuti eemaldati teede kaardikihi kõik teede jupid, mis kuhugi ei vii. Alles jäid põhimaanteed, kõrvalmaanteed, põhitänavad ja kõrvaltänavad. Teede kaardikihi puhastamise peamiseks eesmärgiks oli vähendada andmete hulka ebaoluliste andmete arvelt. Pärast teede andmete puhastamist lihtsustati andmete geometriat, et saada jooni sirgemaks ja üleliigseid punkte vähemaks. Andmete geometria lihtsustamise eesmärgiks oli hilisemate arvutuste lihtsamaks muutmine.

Järgneva sammuna korrastati sigade ja veiste farmide andmed. CSV failidest kustutati ebavajalikud veerud ning jäeti alles ainult need veerud, mis olid edasiste päringute jaoks vajalikud (farmi põhi nr; isendite arv ühes farmis; loomaliik; koord\_x; koord\_y). Samuti summeeriti sigade ja veiste loomühikud, et edasised päringud oleksid korrektsed. Seejärel tekitati QGIS-is 1 km x 1 km suurustest kuusnurkadest üle-eestiline võrgustik (vt lisa 2, joonis 10). Pärast võrgustiku koostamist eemaldati võrgustikust piirkonnad, kuhu on biogaasijaama rajamine võimatu või majanduslikult ebaefektiivne. Kustutatud aladeks olid kõik Natura 2000 kaitsealad, märgalad, puittaimestikuga alad, turbaväljad, seisuveekogud ja vooluveekogud. Tekkis kaardikiht, kus iga kuusnurk on sobiva asukohaga biogaasijaama rajamiseks (vt lisa 2, joonis 11). Seejärel hakati genereerima sigade ja veiste farmide teenindusalasid 50 km ulatuses. Kuna tegu oli väga andmemahuka tegevusega, mis hõlmas enam kui 11 miljonit andmerida, siis viidi päringud läbi mitmes jaos. Sigade ja veiste teenindusalade valmides tehti teenindusaladest Convex Hull-id (vt lisa 2, joonis 12), mis näitavad piirkondi, mida mööda saab mööda teede võrgustikku ühe farmi läga kuni 50 km kaugusele biogaasi tootmiseks viia. Järgmise sammuna agregeeriti omavahel Eesti võrgustiku kuusnurgad ja teenindusalade genereerimise tulemusena saadud Convex Hull-id. Kuusnurkade agregeerimine 50 km ulatusega sigade ja veiste farmide Convex Hull-idele oli niivõrd andmemahukas, et ka see protsess viidi läbi mitmes jaos Visual Studio Code'is kirjutatud koodi abil. Andmete agregeerimise käigus saadi fail, kus iga kuusnurk on esindatud tabelis nii palju kordi, kui

paljude 50 km ulatusega teenindusalade (Convex Hull) sisse see jääb. Iga kord on sama kuusnurga juures erineva farmi andmed ehk põhimõtteliselt on tegu ühele suhtega kuusnurga ja farmi vahel. Järgmise sammuna leiti biogaasi tootmiseks vajaliku tooraine paiknemine ja selle potentsiaalne maht Eestis. Selle jaoks grupeeriti eelnevas sammus saadud kuusnurgad ja summeeriti isendite arv igas kuusnurgas. Selle tulemusena valmis kaardikiht, mis näitab isendite arvu 1 km x 1 km üle-eestilises kuusnurkade võrgustikus, kuhu on võimalik biogaasitehas rajada (vt lisa 2, joonis 13, 14 ja 15).

### **4.3 Parimate asukohtade leidmine biogaasijaamadele**

Biogaasijaamade asukohad leiti kasutades uurimistöö raames kirjutatud koodi (vt lisa 3). Hiljem parandati jaamade asukohti, et need paikneksid toorainele võimalikult lähedal. Täpsemini paigutati esialgselt leitud jaamad nii, et iga jaam tõsteti sellele kõige lähemal asuva suurima isendite arvuga farmi lähedusse, et minimeerida transpordikulusid.

Scarlat *et al.* (2018) meetodika abil leiti parimad võimalikud biogaasijaamade asukohad 50 MWh võimsustega biogaasijaamadele, mida hinnati Eesti farmide loomade arve analüüsides optimaalseks võimsuseks. Esimese biogaasijaama asukoha määramiseks leiti eelnevas peatükis valminud kaardilt kuusnurk, milles on loomade arv suurim. Esimene biogaasitehas paigutati sellesse kuusnurka. Seejärel kirjutati programm, mis liitis selle kuusnurga ümbruses olevad farmid kokku nii, et kokku tuleks 26 000 looma, keda on tarvis, et päevas toota 50 MW biogaasi (Caetano *et al.* 2022). Programm jättis kasutatud farmid meelde ja kustutas nende andmed, et järgmises päringus juba kasutatud farme uuesti ei kasutataks. Seejärel korrati sama protsessi, mille käigus leiti uute andmete põhjal valminud kaardilt suurima isendite arvuga kuusnurk ja paigutati biogaasijaam sellesse kuusnurka. Kokku leiti Eestis võimalikud asukohad 21 biogaasitehasele (vt joonis 9), millest 14 olid 50 MW võimsusega ning ülejäänud 7 mõnevõrra väiksema võimsusega, kasutades ära kogu vastavas piirkonnas oleva tooraine (vt tabel 3). Protsessi korrati, kuni jäi alles puhver 5000 isendiga, kelle läga saab vajadusel biogaasi tootmiseks lähimas tehases kasutada, kui mõnes farmis peaks tekkima seagrapp või loomapidajad otsustavad loomad mujale kolida. Järgneva sammuna paigutati kaardil biogaasijaamad ümber nende läheduses olevate suurimate farmide kõrvale, et Alfred Weberi teooria (1909) kohaselt minimeerida transpordikulusid ja tagada biogaasijaamadele tooraine pidev kättesaadavus.

## 5. Tulemused

### 5.1 Biogaasi ja biometaani tootmise toore Eestis

Eestis oli 01.12.2023 seisuga 246 999 veist, kes andsid aastas kokku ligikaudu 5,86 miljonit tonni läga. Biogaasi took on veiste puhul 25 Nm<sup>3</sup>/t VM (Oja 2013). Teoreetiliselt oleks sellest kogusest võimalik toota 146,50 mln kuupmeetrit biogaasi, kuid läga puhul tuleb arvestada 10% kadu, mistõttu realistlik toodetava biogaasi hulk on 131,85 mln kuupmeetrit. Eestis on võimalik veiste läga kasutada 72% Eesti farmidest (Oja 2013). Seega on reaalselt võimalik toota 94,93 mln kuupmeetrit biogaasi. Puhastatud biometaani saab sellest kogusest toota omakorda 56,96 mln kuupmeetrit (vt tabel 2).

Eestis oli 01.12.2023 seisuga 284 124 siga, kes andsid aastas kokku ligikaudu 311 116 tonni läga. Biogaasi took on sigade puhul 29,4 Nm<sup>3</sup>/t VM (Oja 2013). Teoreetiliselt oleks sellest kogusest võimalik toota 9,15 mln kuupmeetrit biogaasi, kuid kuna läga puhul tuleb arvestada 10% kadu, mistõttu realistlik toodetava biogaasi hulk on 8,23 mln kuupmeetrit. Eestis on võimalik veiste läga kasutada 65% Eesti farmidest (Oja 2013). Seega on reaalselt võimalik toota 5,35 mln kuupmeetrit biogaasi. Puhastatud biometaani saab sellest kogusest toota omakorda 3,21 mln kuupmeetrit.

Kokku oli Eestis 01.12.2023 seisuga 531 123 veist ja siga, kes andsid aastas 6,17 mln tonni läga. Sigade arv oli veiste omast ligi 40 000 võrra suurem, sellegipoolest andsid veised ligi 19 korda rohkem läga aastas kui sead. Veiste ja sigade lägast sai 01.12.2023 seisuga toota teoreetiliselt 155,65 mln Nm<sup>3</sup> biogaasi. Seejuures saab veiste lägast toota 16 korda rohkem biogaasi kui sigade lägast.

Veiste ja sigade lägast kokku on võimalik toota 100,3 miljonit kuupmeetrit biogaasi (60% CH<sub>4</sub>), mida puhastades saab 60,2 miljonit kuupmeetrit biometaani (98% CH<sub>4</sub>) aastas (vt tabel 2). Ühes kuupmeeteris biometaanis on keskmiselt 36 MJ energiat (IAE 2020). Sellest nähtub, et 60,2 miljonist kuupmeetrast biometaanist (98% CH<sub>4</sub>) on võimalik aastas toota 2,15 PJ ehk 597 GWh energiat (Biogasworld 2024).

Tabel 2. Biogaasi energeetiline ressurss veise ja sigade läga näol aastal 2023.

Loomaliik	Veised	Sead	Kokku
Isendite arv	246 999	284 124	531 123
Tonni läga aastas	5 860 051	311 116	6 171 167
Biogaasi Nm <sup>3</sup> /t VM	25	29,4	-
Teoreetiline biogaasi potentsiaal Nm <sup>3</sup>	146 501 281	9 146 804	155 648 085
90% ehk realistlik biogaasi potentsiaal Nm <sup>3</sup>	131 851 153	8 232 124	140 083 277
Reaalselt kasutatav %	72	65	-
Biogaasi potentsiaal (60% CH <sub>4</sub> ) Nm <sup>3</sup>	94 932 830	5 350 880	100 283 710
Biometaani potentsiaal (98% CH <sub>4</sub> ) Nm <sup>3</sup>	56 959 698	3 210 528	60 170 226

## 5.2 Biogaasijaamade võimalikud asukohad ja nende arvukus

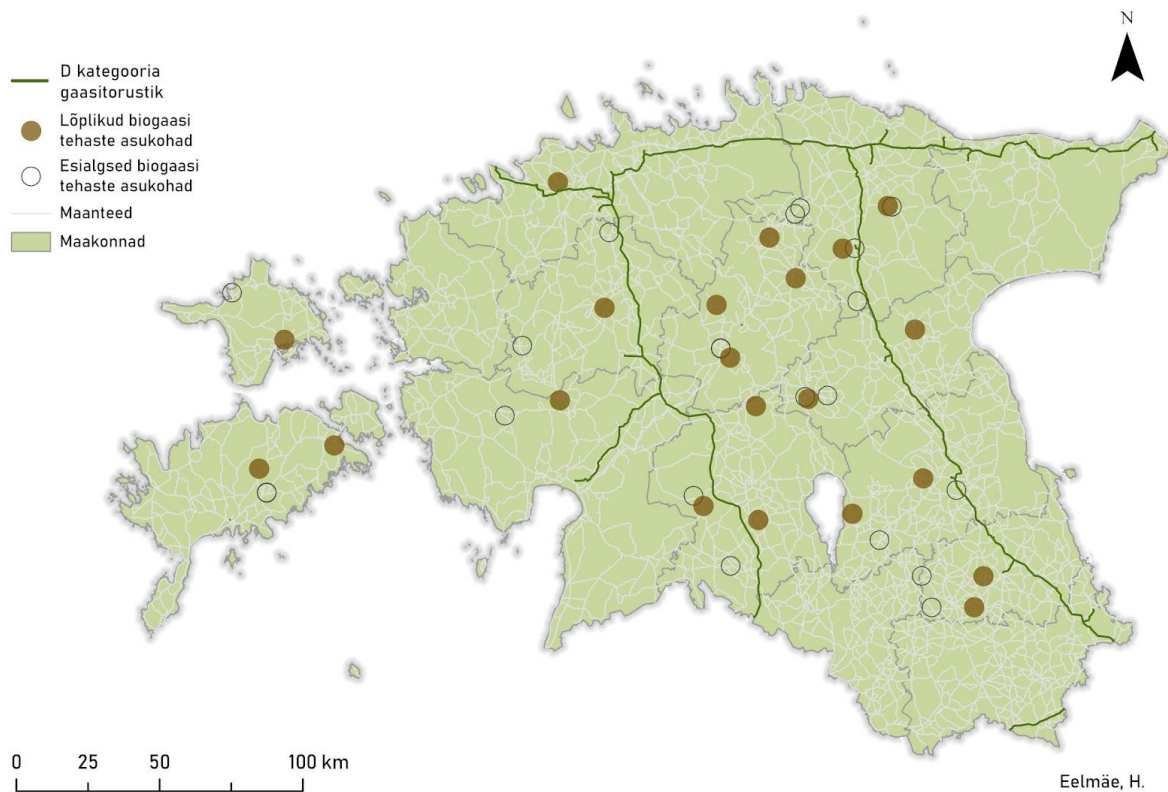
Kokku leiti Eestis võimalikud asukohad 21 biogaasitehasele (vt joonis 9), millest 14 olid 50 MW võimsusega ning ülejäänud 7 mõnevõrra väiksema võimsusega, kasutades ära kogu vastavas piirkonnas oleva tooraine (vt tabel 2). Praktilise osa tulemustest selgus, et kõige rohkem biogaasijaamu on mõistlik rajada Järvamaale (4 tk), peale selle Viljandimaale (3 tk) ning seejärel Lääne-Viru-, Saare-, Põlva-, Tartu- ja Jõgevamaale (2 tk) ning ka Rapla-, Pärnu-, Harju- ja Hiiumaale (1 tk). Uurimistöö käigus selgus, et tooraineks ainult sigade ja veiste läga kasutades ei ole logistiliselt mõistlik biogaasijaamu rajada Ida-Viru-, Lääne-, Võru- ja Valgamaale, kuna nendest maakondades ei ole piisavalt kokku kogutavat ressursi.

Käesoleva töö puhul tuleb arvestada, et analüüsi ainult PRIA-st alla laetud sigade ja veiste andmeid. Kui uurimus viia läbi kasutades teisi allikaid või sigade ja veiste lägale lisada muud biogaasi tootmiseks võimalikud toorained, siis oleksid tulemused ja biogaasijaamade paiknemine Eestis mõnevõrra erinev.

Biogaasijaamade esialgsed asukohad olid lõplikele asukohtadele lähemal Kesk-Eesti piirkonnas, kus paiknevad ka kõige suurema isendite arvuga sigade ja veiste farmid. Esialgsete ja lõplike biogaasijaamade asukohad esinesid rohkem liikudes Kesk-Eestist suunaga äärealade poole. Kõik lõplikud biogaasijaamade asukohad asuvad maanteede läheduses, mis tähendab, et nendesse asukohtadesse on logistiliselt võimalik efektiivselt läga kokku vedada.

Käesolev töö võttis sigade ja veiste läga mahu kaardistamisel ning biogaasijaamade asukohtade optimeerimisel arvesse ainult Eesti teede võrgustikku, mida mööda saab raskeveokite abil vajalikku toorainet kokku vedada. Uurimistöös ei arvestatud Eesti gaasivõrgu paiknemist võimalike biometaanijaamade suhtes, kuna gaas on massilt kergem kui läga ning selle veokulud on väiksemad. Uurimistöö ei arvestanud ka Eestis hetkel toimivaid biogaasijaamasid.

Kokku on sigade ja veiste lägal põhinevate biogaasi tehaste võimsus 894 MWh päevas, mis võimaldab aastas toota 326 GWh energiat. Teoreetilisest biogaasi tootmise potentsiaalset moodustab see umbes poole. Seda erinevust kirjeldatakse põhjalikumalt arutelu peatükis.



Joonis 9. Eesti biogaasitehaste potentsiaalsed asukohad.

Kaardil on kujutatud biogaasijaamade esialgsed ja lõplikud asukohad koos maanteede ja D-kategooria gaasitorustikuga. Kaardilt nähtub, et suurim biogaasijaamade kontsentratsioon on Kesk-Eestis, mida saab seostada veiste farmide paiknemise ja isendite arvuga (vt lisa 2, joonis 16).

Tabel 3. Biogaasi tehaste arvukus ja paiknemine Eestis maakonniti

Maakond	Tehaste arv	Tehaste võimsus kokku (MW)
Järva	4	200
Viljandi	3	118
Saare	2	100
Põlva	2	100
Jõgeva	2	86
Lääne-Viru	2	85
Tartu	2	77
Rapla	1	50
Harju	1	38
Pärnu	1	28
Hiiu	1	12
<b>Kokku</b>	<b>21</b>	<b>894</b>

Käesoleva töö uurimuslikus osas jäeti välja väikesed alla 10 isendiga sigade ja veiste farmid, mis on Eestis üsna levinud. Seda põhjendati majandusliku ebaefektiivsusega. Samuti välistati uurimistöö käigus biogaasijaamade jaoks ebasobivad alad (Natura 2000 kaitsealad, märgalad, puittaimestikuga alad, turbaväljad, seisuveekogud ja vooluveekogud), mille 50 km raadiusesse sattusid mõned suuremad sigade või veiste farmid. Nende põhjuste pärast erines reaalne biogaasi jaamade toodetav võimsus teoreetilisest maksimaalsest.

## 6. Arutelu

Senine tempo ei ole süsinikuneutraalse elukeskkonna saavutamiseks piisav ning investeeringuid taastuvenergia projektidesse tuleb teha ennaktempos. Eestis on olemas taastuvenergia suurprojektid, mille elluviimine läheks maksma ligi 19 miljardit eurot, kuid mis annaks igal aastal riigieelarvesse ligi 3,2 miljardit lisaraha (Arenguseire Keskus 2023). Kliimaatilistest ja jätkusuutlikkuse teguritest tingituna on taastuvenergia tootmist võimalik arendada eelkõige biogaasi või biometaani tootmise läbi edendades seeläbi ringmajandust. Eestis tarbiti 2023. aastal kokku 3,8 TWh maagaasi, millest ainult 5,55% ehk 211 000 MWh moodustas biometaan. Maagaasi tarbimise tulevikustsenaarium näeb ette, et aastaks 2050 on Eestis maagaasi tarbimine asendunud eelkõige biogaasi või biometaani tarbimisega. Biometaani tootmise teoreetiliseks potentsiaaliks Eestis on hinnatud 1 TWh aastas (Vohu 2015). Teoreetilisest ülevaatest nähtus, et kuigi suurema osa biometaani tootmise potentsiaalid moodustab silo kasutamata maadelt (Oja 2013), siis Eesti ettevõtjad on enim keskendunud loomasõnniku väärimisele biogaasi või biometaani tootmise läbi. Biometaanijaamade strateegilise asukohad on majanduslikult ja keskkondlikult olulise väärtusega, kuna optimaalne suhe tootmise ja tooraine vahel aitab vähendada transpordikuluseid ja keskkonnamõju. Seega on otstarbekas rajada biometaanijaamad suuremate farmide lähedusse, et minimeerida loomasõnniku transpordikuluseid. Samas tuleb üha enam arvestada taastuvenergia projekte ellu viies selliseid kaalutlusi nagu taastuvenergia kättesaadavus, jäätmekäitlus ja keskkonnasõbralik transport.

Biogaasist on kõige efektiivsem toota koostootmisjaamade abil elektrit ning soojust ja biogaasi puhastades saab kasutada biometaani transpordikütusena või maagaasi asemel võrgugaasina. Töö raames läbiviidud uurimuse käigus selgus, et Eestis on võimalik sigade ja veiste lägast toota 100,28 mln kuupmeetrit biogaasi (60% CH<sub>4</sub>) ja 60,17 mln kuupmeetrit biometaani (98% CH<sub>4</sub>) aastas. Biogaasi valdkonna ekspert Ahto Oja (2013) väitis, et 2050. aastaks saab Eestis toota ligikaudu 40 miljonit kuupmeetrit biometaani sigade ja veiste lägast, kuid käesolev uurimus kinnitas, et juba praegu on võimalik biometaani toota teoreetiliselt 50% enam kui 2050. aastaks oli prognoositud. Kui suunata kogu Eestis tekkiv sigade ja veiste läga biometaani tootmisesse, oleks võimalik sellest toota aastas 597 GWh energiat. Paraku ei ole kogu läga kokku kogumine Eesti kontekstis realistlikult elluviidav tegevus ning seetõttu on biometaani reaalne tootmisvõimekus väiksem. Kokku on Eestisse mõistlik ja majanduslikult otstarbekas rajada 21 biometaanijaama, mille tooraineks on sigade ja veiste läga. Nendest 21 jaamast 14 on 50 MW võimsusega ja ülejäänud 7 mõnevõrra väiksemad (vt tabel 3). Lõplikud

biogaasijaamade asukohad koonduvad Kesk-Eestisse ning eelkõige Järva- ja Viljandimaale. Biogaasijaamade koondumist sellesse piirkonda saab seostada suurimate isendite arvuga veiste ja sigade farmide asukohtadega samas piirkonnas. Näited Eesti biometaanide ettevõtetest kinnitavad, et loomasõnniku väärindamine on ettevõtjate jaoks majanduslikult tasuv tegevus ning toob kaasa mitmed avalikud hüved, mis puudutavad energeetikat, jäätmekäitlust, põllumajandust, keskkonnakaitset ja regionaalarengut. Eesti ettevõtjad rajavad biogaasi- ja biometaanijaamu toorainele võimalikult lähedale, et kokku hoida transpordikuludelt.

Biogaasijaamade asukohtade optimeerimisel tuleb arvestada mitmete teguritega. Eelkõige on oluline, et oleks olemas pidev kättesaadavus toorainele ja ligipääs turule. Ühe tehase planeerimisel on mõistlik kasutada kolmnurka, pannes paika erinevate tegurite kaugused, kuid mitme tehase puhul on efektiivsem kuusnurkne lähenemine, mis võimaldab tehaste vahel asuvaid tegureid paremini omavahel jaotada. Käesoleva uurimistöö raames koostati spetsiaalne kood, mis aitas QGIS-is leida biogaasitehastele parimad võimalikud asukohad. Biogaasitehased paigutati 1 x 1 km suurustele kuusnurkadele, mis koostati Weberi (1909) ja Christalleri (1933) asukohateooriate aspekte silmas pidades.

Eestis ei ole varasemalt ainult veiste ja sigade läga potentsiaali arvesse võttes biogaasijaamade asukohti optimeeritud. Seega on keeruline hinnata uurimuse võimalikke kitsaskohti ja saadud tulemuste täpsust. Peamised biometaanide ressursse käsitlevad uurimustööd viidi Eestis läbi 2013. ja 2015. aastal. Need tööd keskendusid tervikliku bioenergia ressursi hindamisele, seevastu käesolev töö keskendus ainult sigade ja veiste lögale, mis on ettevõtjate silmis kõige perspektiivikam tooraine, mida väärindada. Empiirilise osa metoodika koostati spetsiaalselt käesoleva töö jaoks ning võib see võib omada teatud kitsaskohti. Järgnevates teemat puudutavates uurimustes tuleks teha põhjalikumad koostööd Eesti Biogaasi Assotsiatsiooni, Eesti Taastuvenergia Koja, Eleringi, Eesti Energia, Kliimaministeeriumi ja mõistagi biometaanide tootvate eraettevõtetega. Töö praktilist osa saab edasi arendada päringutesse teised biogaasi toorained, millest saab toota biogaasi ja biometaanide (vt tabel 1).

Käesolevas uurimistöös kasutati ainult sigade ja veiste andmeid, kuna need olid avalikult kättesaadavad.

Uurimistöö peamised järeldused on:

- Eestis kontekstis on 2024. aastal energeetiliselt kõige jätkusuutlikumaks lahenduseks biogaasi ja biometaanide tootmine.

- Eestis tarbiti 2023. aastal kokku 3,8 TWh maagaasi, millest ainult 5,55% ehk 211 000 MWh moodustas biometaan.
- Eestis on maagaasi tarbimine langevas trendis ning maagaasi tarbimine asendub üha enam biogaasi ja biometaaniga, mida on teoreetiliselt võimalik toota üle 1 TWh biometaaniga aastas.
- Kõige suurema biometaaniga tootmise potentsiaalsest toorainest moodustab silo kasutamata maadelt ja loomasõnnik.
- Viimastel aastatel on Eestis toodetud enim biometaaniga loomasõnnikust, mis näitab, et ettevõtjad on enim huvitatud sigade ja veiste läga väärdamisest.
- Eestis oli 01.12.2023 seisuga kokku 284 124 siga ja 246 999 veist, kelle lägast on võimalik toota teoreetiliselt 597 GWh energiat aastas ning realistlikult 326 GWh energiat.
- Kokku on Eestis võimalik rajada 21 biogaasijaama, mis kasutavad tooraineks ainult sigade ja veiste läga. Nendest jaamadest 14 on 50 MWh võimsusega ja 7 mõnevõrra väiksema võimsusega kasutades ära kogu selle tehase 50 km raadiuses oleva tooraine.
- Ettevõtted rajavad ettevõtted biogaasi- ja biometaanijaamu suuremate loomafarmide lähedusse, et minimeerida tooraine transpordikulusid.
- Sigade või veiste farmi lähedus biogaasi- või biometaanijaama asukoha valiku planeerimisel üheks võtmeteguriks, millest sõltub majanduslik edu.

## 7. Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli selgitada välja sigade ja veiste lägast toodetava biogaasi ja biometaani hulk ja kui mitu biogaasijaama Eestisse mahub ning kus on nende parimad asukohad.

Uurimistöö tulemustest selgus, et Eestis oli 01.12.2023 seisuga kokku 284 124 siga ja 246 999 veist. Kokku oli Eestis 01.12.2023 seisuga 531 123 veist ja siga, kes andsid aastas 6,17 mln tonni läga. Sigade isendite arv oli veiste omast ligi 40 000 isendi võrra suurem, sellegipoolest andsid veised ligi 19 korda rohkem läga aastas kui sead. Veiste ja sigade lägast kokku on realistlikult võimalik toota 100,28 mln kuupmeetrit biogaasi (60% CH<sub>4</sub>), mida puhastades saab toota 60,17 mln kuupmeetrit biometaani (98% CH<sub>4</sub>) aastas (vt tabel 2). Ühes kuupmeeteris biometaanis on keskmiselt 36 MJ energiat (IAE 2020). Sellest nähtub, et 60,17 mln kuupmeetrist biometaanist (98% CH<sub>4</sub>) on võimalik aastas toota 2,15 PJ energiat ehk 597 GWh energiat (Biogasworld 2024).

Uurimistöö empiirilises osas tehtud uurimusest selgus, et 50 MWh võimsusega sigade ja veiste lägal põhinevaid biogaasijaamasid saaks rajada 14, millele lisaks saaks rajada 7 väiksema võimsusega biogaasijaama. Need 21 biogaasijaama toodaksid päevas kokku 894 MW energiat, mis tähendab, et aastas oleks võimalik toota kokku 326 GWh energiat, mis on ligikaudu pool teoreetilisest potentsiaalst ehk arvutuslikult leitud 597-st GWh-st. Teoreetilise ja realistliku energia tootmise hulga vahe põhjustab väike (alla 10) isendite arv paljudes farmides ja ebasobivad asukohad transpordivõrgustiku suhtes, mida mööda toorainet 50 km raadiuses kokku tuleks vedada.

Käesolev töö keskendus biogaasi ja biometaani tootmiseks eelkõige sigade ja veiste läga potentsiaali välja selgitamisele, kuna Eesti ettevõtted on loomasõnniku väärindamisest rohkem huvitatud kui rohtse biomassi väärindamisest.

## **Optimizing biogas plant locations in Estonia using pig and cattle slurry**

Hendrik Eelmäe

### Summary

The first aim of the bachelor's thesis was to find out to what extent pig and cattle slurry could be used for biogas and biomethane production in Estonia. The second aim was to optimize the best possible locations for biogas plants. In order to formulate the objective, research questions were set, which were analyzed in the exploratory part of the work. The theoretical overview helped to understand the background of the exploratory work and gave an overview of the prevailing trends and economic characteristics in the bioenergy sector.

The referential part of the work gave an overview of climate trends in the world and explained the importance of renewable energy projects. Renewable energy projects are local and because of that the industrial location theories were discussed in current work to find the best possible locations for the biogas plants in Estonia. The Weberian approach was used in the exploratory part of the work to minimize the cost of transportations of raw materials to produce biogas. The referential part also analyzed the bioenergy sector in Europe and Estonia.

The exploratory part of the work was conducted using Excel to process data and QGIS to carry out inquiries. The data of pigs and cattle was downloaded from Agricultural Registers and Information Board's website and from the Estonian Land Board.

The exploratory part of the work focused primarily on the possibilities of biogas and biomethane production in Estonia. The conclusion from the analysis of the possibilities of biomethane production is that it would be possible to increase the current production at least five times and produce theoretically at least 597 GWh of biomethane per year, if the Estonian government would apply support measures for the biomethane producers. Biomethane production would also help to promote distributed energy and increase energy independence based on local raw materials. The biomethane production projects carried out so far in Estonia give new entrepreneurs confidence that it is possible to produce biomethane profitably.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada oma bakalaureusetöö juhendajaid Garri Raagmaad ja Ain Kulli. Samuti soovin tänada Edgar Seppa, kes aitas mind uurimistöös praktilise osaga.

## Kirjanduse loetelu

Arenguseire Keskus 2023. Rohepöörde trendid ja stsenaariumid Eestis. [https://arenguseire.ee/wp-content/uploads/2023/06/2023\\_rohepoorde-trendid-ja-stsenaariumid-eestis\\_raport-4.pdf](https://arenguseire.ee/wp-content/uploads/2023/06/2023_rohepoorde-trendid-ja-stsenaariumid-eestis_raport-4.pdf) (viimati vaadatud 10.05.2024)

Biogasworld Media INC 2024. Unit converter. <https://www.biogasworld.com/unit-converter/>

Caetano, B.C., Santos, N.D.S.A., Hanriot, V.M., Sandoval, O.R Huebner, R., 2022. Energy conversion of biogas from livestock manure to electricity energy using a Stirling engine. Energy Conversion and Management: X. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100224>

Civitta Eesti AS 2021. Gaasitarbimise puhtale energiale ülemineku uuring. Eesti gaasitarbimise prognoos kuni 2050. aastani. [https://elering.ee/sites/default/files/2021-10/Eesti%20gaasitarbimise%20uuring\\_0.pdf](https://elering.ee/sites/default/files/2021-10/Eesti%20gaasitarbimise%20uuring_0.pdf) (viimati vaadatud 23.04.2024)

Christaller, W., 1933. Die zentralen Orte in Süddeutschland.

Dagnall S., Hill J., Pegg D., 2000. Resource mapping and analysis of farm livestock manures – assessing the opportunities for biomass-to-energy schemes. Bioresource Technology. 2000;71:225–34. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00076-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00076-0)

Eesti Biogaasi Assotsiatsioon 2024. Biogaasi tootmine ja kasutamine. <http://eestibiogaas.ee/tootmine-ja-kasutamine/> (viimati vaadatud 21.05.2024)

Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030 (REKK 2030) 2019. Eesti Vabariigi Valitsus.

Eesti Taastuvenergia Koda 2024. Taastuvenergia Eestis. <http://www.taastuvenergeetika.ee/taastuvenergia-eestis/#1482065044309-8db0a599-73b4> (viimati vaadatud 25.04.2024)

Elering 2024a. Gaasituru käsiraamat. <https://elering.ee/gaasituru-kasiraamat> (viimati vaadatud 23.04.2024)

Elering 2024b. <https://www.elering.ee/balticconnector-remonditood-edukalt-lopetatud> (viimati vaadatud 15.05.2024)

Enefit 2024. Energiaturu ülevaade: Universaalteenuse hinda hoiab üleval CO<sub>2</sub> hind. <https://www.energia.ee/uudised/avaleht/-/newsv2/2023/03/14/energiaturu-ulevaade-universaalteenuse-hinda-hoiab-uleval-co2-hind> (viimati vaadatud 16.05.2024)

Energiamajanduse arengukava aastani 2030, 2017. ENMAK 2030/2050 energiaressursid. Eesti Vabariigi Valitsus.

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/10zsvX5VKMcKZbm4mKJrdktJYPbJNK3Zihq1g\\_7XHwS8/edit#gid=8](https://docs.google.com/spreadsheets/d/10zsvX5VKMcKZbm4mKJrdktJYPbJNK3Zihq1g_7XHwS8/edit#gid=8) (viimati vaadatud 21.05.2024)

Euroopa Komisjon 2019. Euroopa roheline kokkulepe. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN>

Euroopa Komisjon 2024. Euroopa roheline kokkulepe elluviimine. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal\\_et#eli-majanduse-ja-%C3%BCchiskonna-%C3%BCmberkujundamine](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_et#eli-majanduse-ja-%C3%BCchiskonna-%C3%BCmberkujundamine) (viimati vaadatud 27.04.2024)

European Biogas Association 2017. Biogas: Pathways to Success. <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2017/12/EBA-Pathways-to-Success.pdf> (viimati vaadatud 24.04.2024)

European Commission 2024. Renewable energy. Bioenergy. Biomethane. [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/biomethane\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/biomethane_en) (viimati vaadatud 02.04.2024)

Ferreira, R.D.S., 1998. Launhardt and Hotelling. Recherches Economiques de Louvain 64(1). Institut Universitaire de France. <https://sites.uclouvain.be/econ/DP/REL/1998016.pdf>

IEA 2020. Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth. Paris. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane> (viimati vaadatud 08.05.2024)

Isard, W., 1956. Location and Space-Economy.

Jaganmohan, M., 2024. Bioenergy in Europe - statistics & facts. Statista. <https://www.statista.com/topics/5219/bioenergy-industry-in-europe/#topicOverview> (viimati vaadatud 10.04.2024)

Kask, Ü., Soosaar, S., Kask, L., Pachel, K., 2014. Eesti tingimustesse sobivate biogaasi metaaniks puhastamise tehnoloogiate rakendatavus ning keskkonna ja majanduslikud mõjud. Taltech.

<https://www.researchgate.net/publication/268817573> Eesti tingimustesse sobivate biogaasi metaaniks puhastamise tehnoloogiate rakendatavus ning keskkonna ja majanduslikud mõjud

- Kundla, R., 2024. Ebaveres avati 10 miljonit maksma läinud biometaanijaam. ERR. <https://www.err.ee/1609312572/ebaveres-avati-10-miljonit-maksma-lainud-biometaanijaam> (viimati vaadatud 18.05.2024)
- Launhardt, W., 1885. Mathematische Begründung der Volkswirtschaftslehre.
- Lösch, A., 1940. Die räumliche Ordnung der Wirtschaft.
- Maarend, M., 2023. EU3 ja OMXT aktsiaturu volatiilsuse modelleerimine Covid-19 ja sotsiaalse tegevuse ajal. Bakalaureusetöö. Tallinna Tehnikaülikool, TABB, peeriala ärihaldus.
- Marianov, V., Eiselt, H. A., 2024. Fifty Years of Location Theory - A Selective Review. European Journal of Operational Research. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.01.036> (viimati vaadatud 15.03.2024)
- Oja, A., 2013. Biometaanii kasutamise avalikud hüved. Eesti Arengufond. [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/a/a6/Oja%20A. Biometaanii kasutamise avalikud h%C3%BCved.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/a/a6/Oja%20A.%20Biometaanii%20kasutamise%20avalikud%20h%C3%BCved.pdf) (viimati vaadatud 21.03.2024)
- Oja, A., 2022. Eesti võimalused ringmajanduse elluviimiseks juba täna biometaanii tootmise kaudu. MTÜ Eesti Biogaasi Assotsiatsioon.
- Olabi, A.G., Abdelkareem, M.A., 2022. Renewable energy and climate change. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 158. Elsevier.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112111>
- Reid, D.J., 1968. The Theory of Industrial Location: Alfred Weber's Contribution Reappraised. Simon Fraser University. [https://summit.sfu.ca/\\_flysystem/fedora/sfu\\_migrate/3482/b13985127.pdf](https://summit.sfu.ca/_flysystem/fedora/sfu_migrate/3482/b13985127.pdf) (viimati vaadatud 15.03.2024).
- Rohepöörde ekspertrühma raport. 2022. Riigikantselei.
- Rutz, D., Mergner, R., Janssen, R., 2015. Sustainable heat use of biogas plants. A handbook. Munich, Germany: WIP Renewable Energies.
- Savruk, V., 2014. Maaettevõtjate hinnangud ettevõtluskeskkonna teguritele ja nende seosed maakondlike keskuseid iseloomustavate näitajatega 2012. a. maaettevõtlusuuringu andmetel. Magistritöö. Eesti Maailikool, ökonomika ja ettevõtlus.

Scarlat, N., Fahal, F., Dallemand, J-F., Monforti, F., Motola, V., 2018. A spatial analysis of biogas potential from manure in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 94. Pages 915-930. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.035>

Sethy, T., Sk, M.M., 2023. Environmental Considerations in Industrial Location: A Weberian Approach to Sustainable Development. *International Journal of Research in Social Sciences*. Volume 13.

Statista 2024. Bioenergy capacity in Europe from 2010 to 2023. <https://www.statista.com/statistics/568014/europe-bioenergy-capacity/>

Stolarski, M., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., Akincza, M., 2020. Bioenergy technologies and biomass potential vary in Northern European countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Testbook 2023. Weber's Model of Industrial Location: Decoding the Geography of Industries! <https://testbook.com/ias-preparation/webers-model-of-industrial-location> (viimati vaadatud 21.05.2024)

Thompson, E., Wang, Q., Li, M., 2013. Anaerobic digester systems (ADS) for multiple dairy farms: a GIS analysis for optimal site selection. *Energy Policy*. 61:114–124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.035>.

Vohu, V., 2015. Eesti Biometaaani ressursside kasutuselevõtu analüüs. Taltech.

Von Thünen, J.H., 1826. *Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*.

Voronoi, G., 1908. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire.

Weber, A., 1909. *Über den Standort der Industrien*.

## **Lisad 1-3**

### **Lisa 1. Intervjueeritavate nimekiri**

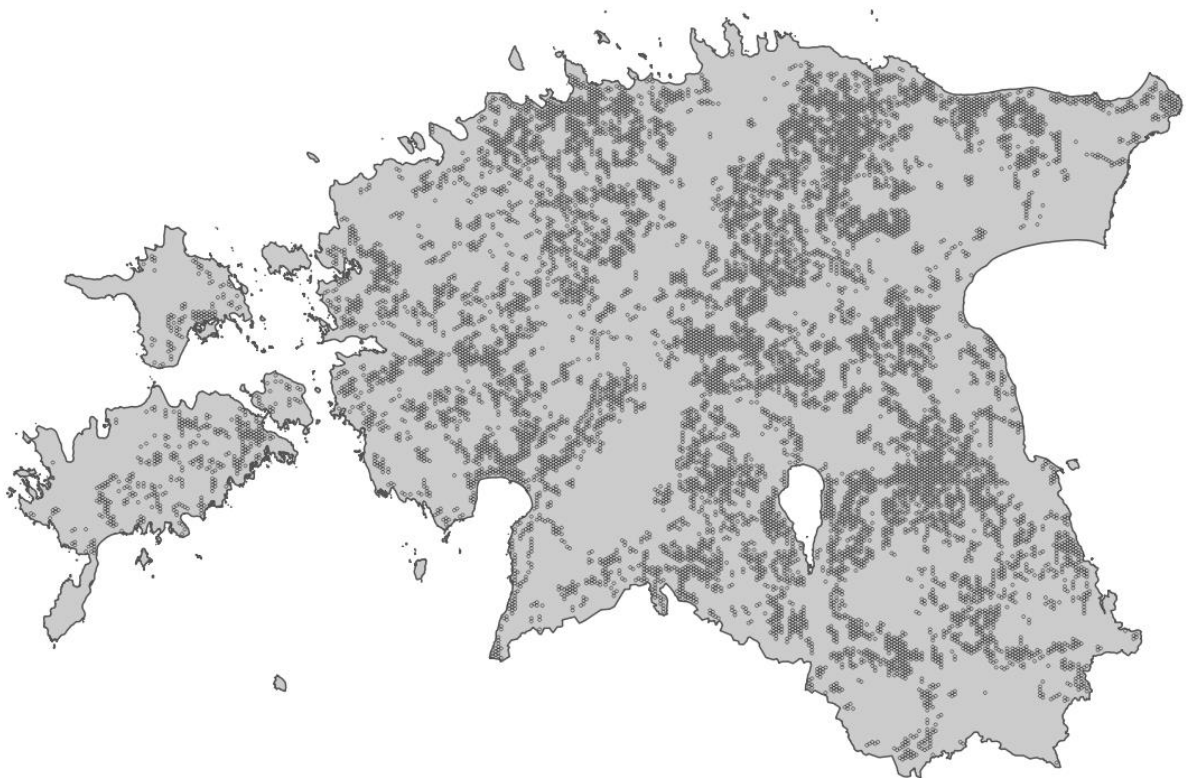
Nimekiri bakalaureusetöö raames läbi viidud intervjueeritustest. Nimekiri on esitatud intervjuude toimumise järjekorras. Intervjuud viis läbi käesoleva bakalaureusetöö juhendaja Garri Raagmaa, kes salvestas intervjuud ning hiljem jagas käesoleva töö autoriga materjale.

1. Jaanus Marrandi - juhatuse liige, Estonia Farmid OÜ
2. Raul Peetson - juhatuse liige, Halinga OÜ
3. Mihkel Annus - juhataja, Eesti Taastuenergia Koda

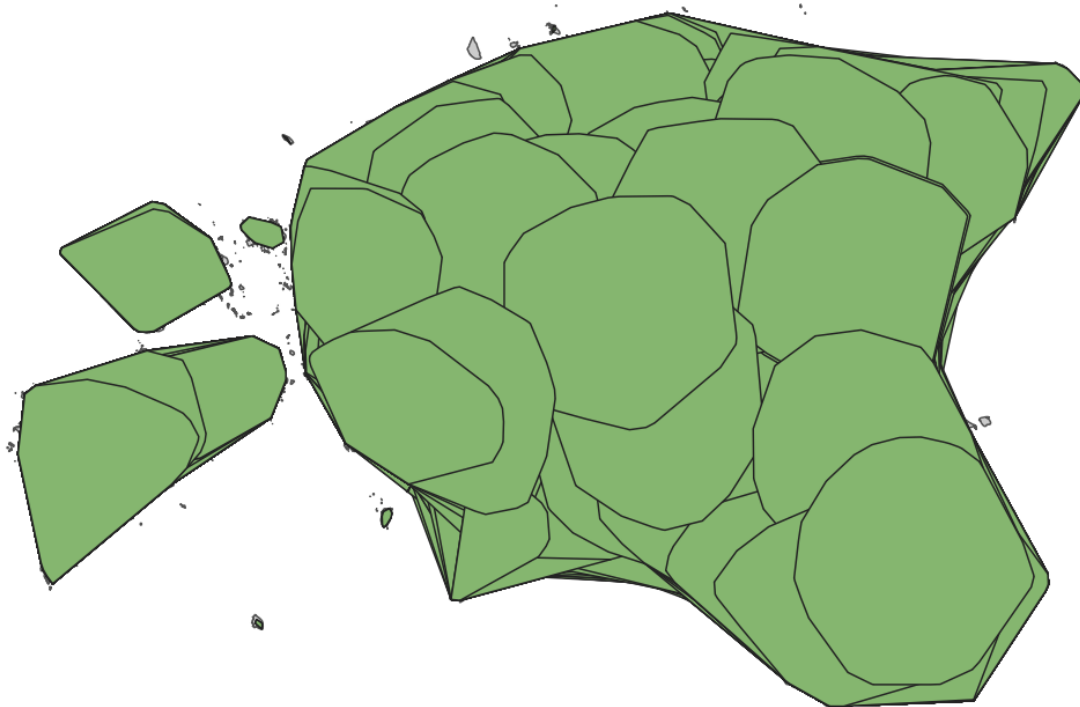
## Lisa 2. Kuvatõmmised praktilise töö etappidest



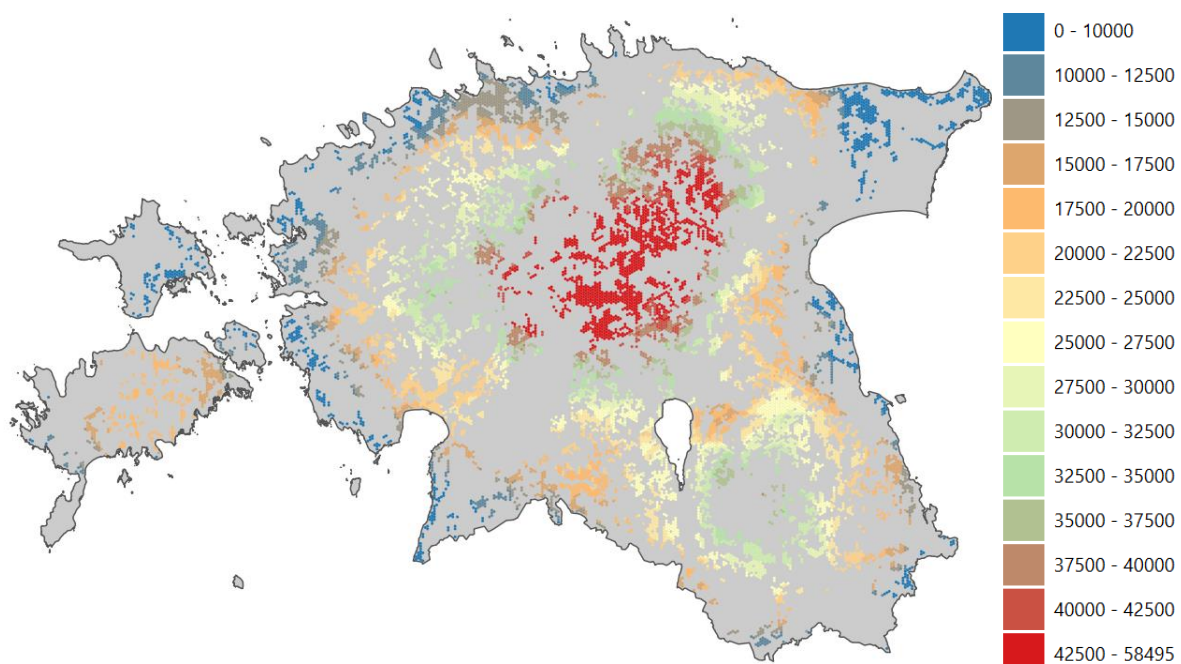
Joonis 10. Lähivaade kuusnurkadest 1 x 1 km võrgustikule.



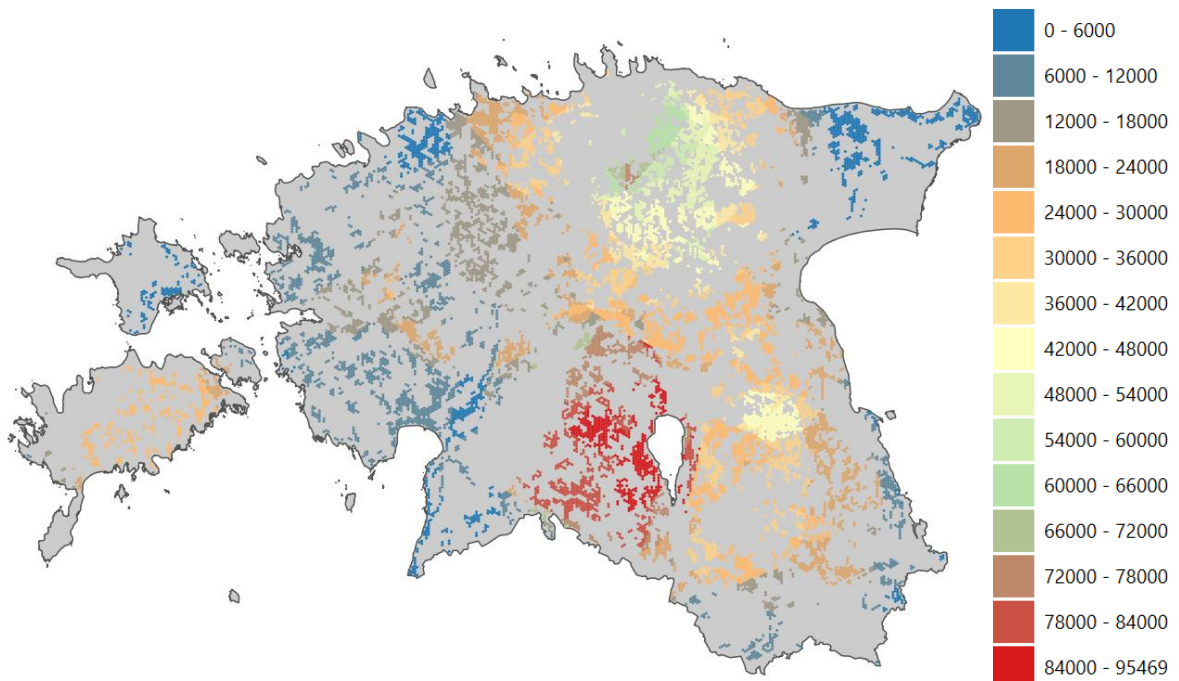
Joonis 11. Kuusnurkadest 1 x 1 km võrgustik, millelt on eemaldatud biogaasijaama asukohaks mitesobivad alad.



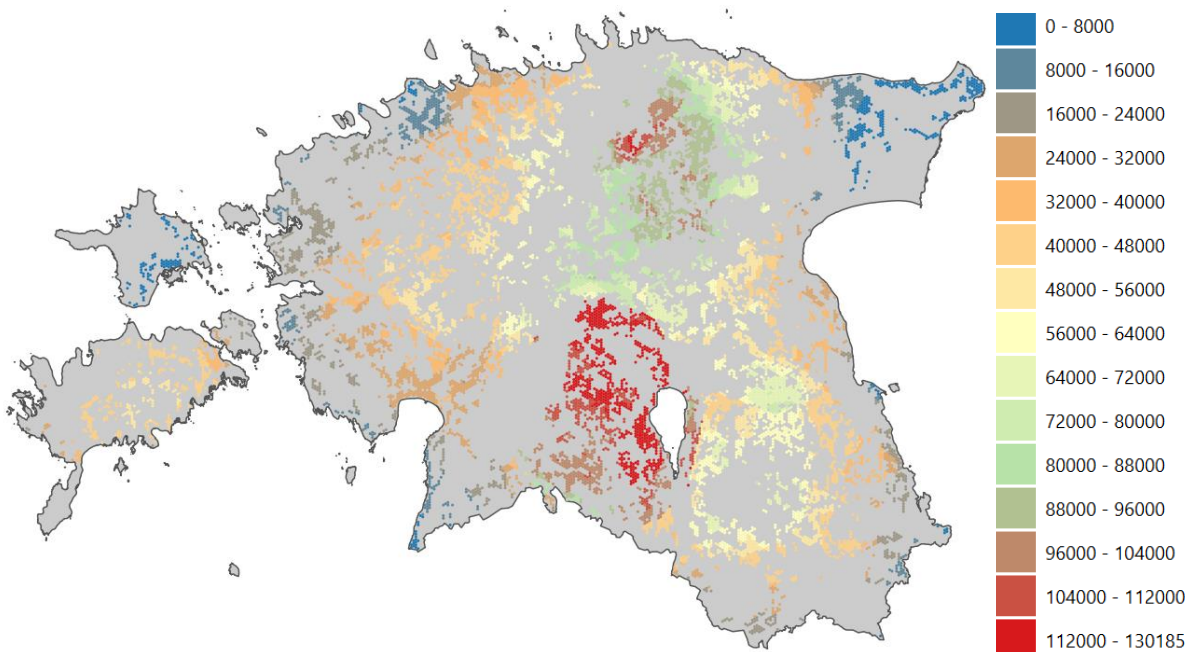
Joonis 12. Sea- ja veisefarme ümbritsevad kuni 50 km raadiusega kumerpinnad (Convex Hull).



Joonis 13. Veiste sõnnik biogaasi toorainena Eestis.



Joonis 14. Sealäga bioogaasi toorainena Eestis.



Joonis 15. Veiste sõnnik ja sigade läga bioogaasi toorainena Eestis. Kaardil on nähtavad alad, mis sobivad biogaasijaama asukohtadeks. Iga kuusnurk näitab, mitme looma läga sellesse 50 km raadiuses on mõistlik vedada.



Joonis 16. Veiste farmide paiknemise Eestis isendite arvu järgi. Kaardilt puuduvad alla 10-ne isendiga farmid.

### **Lisa 3. GitHub'i kood**

Käesoleva uurimistöo andmetöölusel kirjutati keskkonnas Visual Studio Code kood, mis on leitav järgnevalt lingilt: [https://github.com/heelmae/eelmae\\_2024.git](https://github.com/heelmae/eelmae_2024.git)

## **Lihtlitsents**

Mina, Hendrik Eelmäe,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Biogaasijaamade parimate asukohtade leidmine Eestis tuginedes sigade ja veiste lögale,

mille juhendajad on Garri Raagmaa ja Ain Kull,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Hendrik Eelmäe*

**23.05.2024**