www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Kääritusjäägi (digestaadi) ohutus, sobivus mullaparandaja või väetisena kasutamiseks ja kääritusjäägi kasutamise majanduslik tasuvus

Uuringu lõpparuanne

Rando Värnik, EMÜ

Mait Kriipsalu, EMÜ

Allan Kaasik, EMÜ

Kaja Orupõld, EMÜ

Henn Raave, EMÜ

Kersti Aro, EMÜ

Tartu

Viide aruandele: Värnik, R., Kriipsalu, M., Kaasik, A., Orupõld, K., Raave, H., Aro, K. 2023. Kääritusjäägi (digestaadi) ohutus, sobivus mullaparandaja või väetisena kasutamiseks ja kääritusjäägi kasutamise majanduslik tasuvus. Uuringu lõpparuanne. Eesti Maaülikool. Tartu.

Töö tellija: Regionaal- ja Põllumajandusministeerium.

Detsember 2023

Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituudi maamajanduse ökonoomika õppetool
Reg nr 74001086
Fr. R. Kreutzwaldi 1a, Tartu 51006
Tel: +372 731 3014
E-post: rando.varnik@emu.ee
http://www.emu.ee

Sisukord

Sissejuhatus 5
Metoodika 6
1. Ülevaade Eestis ja Eesti lähiriikides biogaasi tootmise toorme ja digestaadi omadustest ja kasutamisest 8
1.1. Biolagunevate jäätmete väärindamine biogaasiks 8
1.2. Kääritusjäägi omadused, ohutus ja sobivus mullaparandusaine või väetisena kasutamiseks ... 14
1.3. Kääritusjäägi mikrobioloogilised omadused 17
1.4. Kääritamise mõju substraadi väetusomadustele 18
1.5. Kääritusjääk väetisena 20
1.6. Kääritusjäägi mõju mulla C-sisaldusele 26
1.7. Kääritusjäägiga väetamisel esinevad riskid 28
1.7.1. Leostumine 28
2. Ülevaade biogaasi tootmiseks sobiliku toormemahtudest, tingimustest ja nõuetest Eestis 30
2.1. Toorme liigid ja maht 30
2.1.1. Looma- ja linnusõnnik 30
2.1.2. Muud loomsed kõrvalsaadused ja kalandussektoris tekkivad toidujäätmed 34
2.1.3. Rohtne biomass 34
2.1.4. Toiduainete valmistamisel ja töötlemisel tekkinud biolagunevad jäätmed 35
2.1.5. Köökides ja sööklates tekkinud biolagunevad jäätmed 36
2.1.6. Biolagunevad kodumajapidamisjäätmed 37
2.2. Toormele seatud tingimused ja nõuded 39
3. Ülevaade Eesti ja Läti põllumajanduslikes biogaasijaamades kasutatavast toormest, väljunditest ja tulevikuplaanidest 42
3.1. Eesti biogaasijaamades kasutatud toore ja biometaani tootlikkus 2022. aastal 42
3.2. Biogaasi tootmispotentsiaal põllumajanduslikes biogaasijaamades 43
3.3. Biolagunevate jäätmete kuivkääritamine 45
3.4. Biogaasi tootmine põllumajanduslikes biogaasijaamades Lätis 48
4. Kääritusjäägi töötlemine ja selle võimalik kasutamine orgaanilise väetisena 51
4.1. Kääritusjäägi töötlemine 51
4.1. Kääritusjäägi agronoomiline iseloomustus 53
4.1.1. Kääritusjäägi omadused ja kvaliteet väetisetoodete määrusega võrreldes 56
4.2. Majanduslikud aspektid seoses kääritusjäägi kasutamisega 59
4.3. Kääritusjäägi järeltöötlemise võimalused ja tooted 62
4.3. Põllumajandustootjate valmisolek asendada mineraalväetis kääritusjäägiga 66

4.4. Tähelepanekud intervjuudest ja küsitlusest biogaasitootjatega 71
5. Soovitused poliitikakujundajatele 73
5.1. Kääritusjäägi edasise tootestamise võimalused 75
Kokkuvõte 78
Kasutatud allikad ja materjalid 82

Sissejuhatus

Kääritusjääk ehk digestaat on biogaasi tootmisprotsessi käigus orgaanilise aine anaeroobsel lagundamisel järele jääv materjal. Kääritusjääk võib olla nii vedel kui ka tahke. Vedel kääritusjääk saadakse peamiselt märgkääritusel ning selle kuivaine sisaldus on väiksem kui 15%. Tahke kääritusjääk saadakse peamiselt kuivkääritusel ning selle kuivaine sisaldus on vähemalt 15% (Keskkonnaministri määrus nr 12, 2023). Kääritusjääki kasutatakse põhiliselt põllumajandusmaa väetamiseks.

Taasiseseisvunud Eesti esimene suur põllumajanduslikel sisenditel töötav biogaasijaam alustas tööd 2005. aastal. 2023. aastal tegutseb põllumajanduslikul toormel[1] kuus biogaasijaama (Eesti Biogaasi Assotsiatsioon, 2023) ning üks koduseid ja toitlustusasutuste biolagunevaid jäätmeid töötlev biogaasijaam. Kõik nimetatud jaamad toodavad biogaasist biometaani. Lähiajal (aastatel 2024–2027) on kavandamisel mitmete uute biogaasitehaste ehitamine eesmärgiga toota biometaani, mistõttu muutub eriti oluliseks toorme saadavus ja tekkiva kääritusjäägi kasutusvõimalused. Lisaks põllumajanduslikule toormele toodetakse biogaasi reoveesettest ja tööstuslikust reoveest. Kuivõrd biogaasi tootmine Eestis laieneb, siis tõstatub küsimus ka tekkiva kääritusjäägi kogusest ja selle kasutusest orgaanilise väetisena.

Uuringul on viis eesmärki:

1. Saada ülevaade Eestis praegu tekkivast kääritusjäägi kogusest ja selle kasutamisest ning hinnata selle potentsiaali sünteetiliste mineraalväetiste asendajana.
2. Hinnata Eestis kasutada oleva biogaasi tootmispotentsiaaliga biolagunevatest jäätmetest ja kõrvalsaadustest[2] pärineva biomassi sobivust anaeroobseks kääritamiseks.
3. Selgitada välja biogaasi tootmisel tekkiva kääritusjäägi omadused, ohutus ja sobivus mullaparandusaine/väetisena kasutamiseks.
4. Selgitada välja kääritusjäägi tootestamise võimalused ning sellega seotud vajalikud eel- ja järeltöötluse tehnoloogilised lahendused.
5. Anda soovitused poliitikakujundajale, kas ja mil viisil on vajalik riigi sekkumine ohutu ja nõuetelevastava kääritusjäägi kasutamise suunamiseks.

[1] Biogaasijaama peamiseks tooraineks on veise- või seavedelsõnnik. Lisaks kasutatakse täiendavaid tooraineid põllumajanduse ja toiduainetööstuse ettevõtetest.

[2] Biolagunevad jäätmed on anaeroobselt või aeroobselt lagunevad jäätmed, nagu toidujäätmed, paber ja papp. Biojäätmed on järgmised biolagunevad jäätmed: 1) aia- ja haljastujäätmed; 2) kodumajapidamises, büroos, jaemüügikohas, hulgimüügiettevõttes ja toitlustusasutuses tekkinud toidu- ja köögijäätmed; 3) toiduainetööstuses tekkinud jäätmed. (Jäätmeseadus, RT I, 17.03.2023, 36) Kõrvalsaaduseks võib pidada materjali, mis on saadud sellise tootmisprotsessi tulemusena, mille esmane eesmärk ei olnud selle materjali tootmine.

Metoodika

Uuringu aruande koostamisel kasutati aastatel 2018–2022 Norras, Taanis, Rootsis, Soomes, Lätis ja Eestis tehtud olulisemaid valdkondlikke artikleid ja uuringuid ning Keskkonnaagentuuri (KAUR) andmeid (tabel 1). KOTKAS infosüsteemide registrist kasutati 2022. aasta ning jäätmete infopäringu keskkonnast kasutati aastate 2020–2022 biogaasi tootmiseks sobivate kõrvalsaaduste ja biolagunevate jäätmete andmeid.

Tabel 1. Sekundaarsete andmete kogumise allikad

Andmeallikas	**Vajadus**
Artiklid, uuringud	Eestis ja välisriikides biogaasi tootmise toormest, kääritusjäägi tekkimisest, nende omadustest ja kasutamisest ülevaate koostamiseks. Kodumajapidamistes biolagunevate jäätmete mahu kajastamiseks.
KAUR-i keskkonnaotsuste infosüsteem KOTKAS	Suurtes loomakasvatusettevõtetes sõnnikumahu arvutamiseks.
KAUR-i jäätmete infopäringu keskkond public.tableau.com	Toiduaine- ja joogitootmises ning köökides ja sööklates tekkivate biolagunevate jäätmete mahu kajastamiseks.

Lisaks korraldati kolm ankeetküsitlust ja tehti mitu personaalintervjuud (tabel 2). Küsitluses ja intervjuus osalenute soovil ettevõtete nimesid ja detailsemat isikustatud informatsiooni aruandes ei avata.

Tabel 2. Primaarandmete kogumine

Sihtrühm	**Meetod**	**Küsitlemise aeg**	**Vastuste arv**	**Teema**
Eestis tegutsevad biogaasijaamad	Veebi-küsitlus	7.09.–28.11.2023	7	Biogaasijaamades kasutatav toore, biometaani tootlikkus, kääritusjäägi ohutus- ja kvaliteedinäitajad ning tootestamine.
Lätis tegutsevad biogaasijaamad	Personaal-intervjuu ja täiendavad lisaandmed	07.05.–16.11.2023	4	Biogaasijaamades kasutatav toore, biometaani tootlikkus, kääritusjäägi ohutus- ja kvaliteedinäitajad ning tootestamine.
Eesti teravilja- ja rapsikasvatajate ühistu Kevili liikmed	Küsitlus	10.10.2023	58	Valmisolek asendada mineraalväetis kääritusjäägiga.
Eesti Aiandusliidu liikmed	Veebiküsitlus	16.–27.10.2023	3	Valmisolek asendada mineraalväetis kääritusjäägiga.
Eestis kasvumuldasid tootev ettevõte	Personaal-intervjuu	17.06.2023	1	Valmisolek asendada mineraalväetis kääritusjäägiga.
Eesti piimatootjad	Personaal-intervjuu	15.10.–20.11.2023	4	Tähelepanekud seoses kääritusjäägi kasutamisega.

Biogaasijaamadele suunatud küsitluse eesmärk oli saada ülevaade biogaasijaamades 2022. aastal kasutatud toormest, biogaasi tootmise väljundi mahtudest ja kasutusest ning kääritusjäägi kvaliteedist. Viimase puhul kasutati aastate 2020–2022 laborianalüüside protokollides olevaid andmeid. Lätis tegutsevate biogaasijaamade esindajate puhul rakendati personaalintervjuud (tehti kolm intervjuud) ning neljalt ettevõttelt saadi andmeid kääritusjäägi toiteainete iseloomustamiseks.

Teise küsitluse eesmärk oli teada saada, milline on teravilja- ja rapsikasvatajate ning aiandussektoris tegutsevate ettevõtjate valmisolek asendada mineraalväetis kääritusjäägiga. Eestis kasvumuldi tootva ettevõtte esindajaga korraldatud personaalintervjuu eesmärk oli teada saada ettevõtjate suhtumist ja motivatsiooni asendada mineraalväetist erinevate orgaaniliste väetistega ning mil määral see on võimalik. Piimatootjatega täiendavate vestluste ja intervjuude eesmärk oli uurida piimatootjate vaadet sõnniku kasutamise ja kääritusjäägi kvaliteedi ning kasutusvõimaluste osas.

1. Ülevaade Eestis ja Eesti lähiriikides biogaasi tootmise toorme ja digestaadi omadustest ja kasutamisest

1.1. Biolagunevate jäätmete väärindamine biogaasiks

Biogaas on orgaaniliste ainete anaeroobse kääritamise saadus, mis koosneb peamiselt metaanist (50–70%) ja süsinikdioksiidist (30–50%), kuid sisaldab vähesel määral ka teisi gaase. Biogaas on kütusena kasutatav taastuvenergiaallikas, kuna seda toodetakse enamasti põllumajandustootmise kõrvalsaadustest (eri tüüpi looma- ja linnusõnnikust, teravilja esmatöötlemise jääkidest jms), toiduainetööstuse kõrvalsaadustest (vadakust, õllerabast, loomsetest jäätmetest jms) või ka reoveepuhastite aktiivmudast, reoveesetetest ja elanikonnalt kogutud biolagunevatest jäätmetest. Vähemal määral kasutatakse biogaasi tootmiseks rohtset biomassi, eeskätt rohu-, vilise- ja maisisilo.

Biogaasi tootmine on oluline jäätmete käitlemisel, sest see võimaldab stabiliseerida orgaanilist ainet, vähendab kasvuhoonegaaside emissiooni põllumajanduses ja on ringmajanduse üks osa.

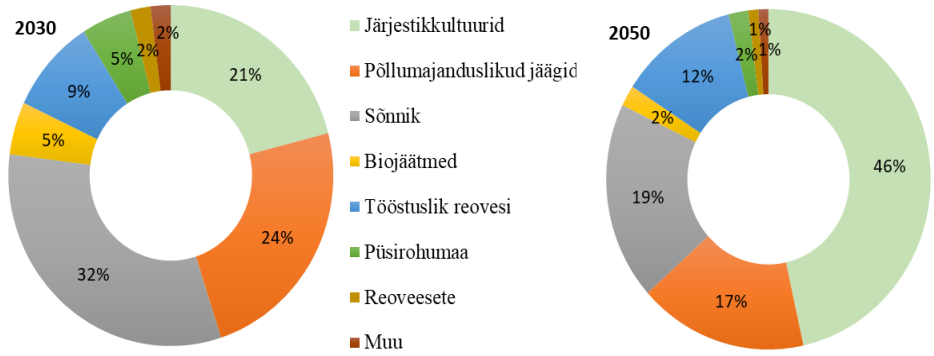
Biolagunevate jäätmete kääritamist tuleb vaadelda sümbioosis kompostimisega, sest käitlusmeetoditena nad teataval määral konkureerivad teineteisega nii materjali saadavuse, väravatasu kui saaduse (toote) kasutamise poolest. Kääritusjääki võidakse ka tahendada ja järelkompostida, mistõttu selle kasutamist hakkab mõjutama komposti maine, laotamise tehnoloogia saadavus ja hind. Eriti iseloomulik on see köögi- ja sööklajäätmete käitlemisel.

Euroopa Liidu (EL) 27 liikmesriigis, Šveitsis, Norras ja Ühendkuningriigis on hinnanguliselt 5800 biolagunevate jäätmete käitlemisrajatist, millest 3800 (66%) on kompostimisrajatised ja 2000 (34%) anaeroobse kääritamise rajatised. Kokku kompostiti ja kääritati 47 miljonit tonni kodumajapidamistes ja toitlustusettevõtetes liigiti kogutud biolagunevaid jäätmeid. Sellest 70% kompostiti ja 30% kääritati. Ainult biojäätmeid käitles 88% kompostimisrajatistest, samas kui biogaasirajatistes oli see vaid 48%. Biogaasi tootmisel kasutatakse seega laialdaselt sega-lähtematerjali (sh põllumajanduslikku laadi toorainet). Ligikaudu 5% kääritusjäägist järelkompostitakse.

Keskmiselt töötles iga kompostimisrajatis 8000 tonni biojäätmeid aastas, samas kui iga biogaasitehas töötles 13 000 tonni biojäätmeid aastas. Iga kompostimisrajatis teenindab ligikaudu 120 000 inimesega teeninduspiirkonda, samas kui iga biogaasitehas teenindab 225 000 inimest (ECN, 2022).

EL-is toodeti biogaasi ja biometaani 196 TWh (2021. aasta andmete alusel), mis moodustas EL-i gaasitarbimisest ligikaudu 4,5%. Sektorit iseloomustab biometaani tootmise kasv. 2020. aastal toodeti Euroopas biometaani 31 TWh ja 2021. aastal 37 TWh, kusjuures viimane moodustab ligikaudu 20% biogaasi ja biometaani summaarsest toodangust. Tekkivat kääritusjääki kasutatakse enamasti orgaanilise väetisena. 67% kääritusjäägist läheb otse põllule ja 16% töötlemise tulemusena saadud bioväetisena. (European Biogas Association, 2023) 2021. aasta andmetel katab biogaas ja biometaan gaasi kogutarbest kõige suurema osa Taanis, kus see

on 24% (biometaan 19%, biogaas 5%). 2021. aasta andmete alusel on Rootsis vastav näitaja 15% (biometaan 10%, biogaas 5%) ning Soomes 4% (biometaan 1%, biogaas 4%) (European Biogas Association, 2023). Prognoositakse, et 2050. aastal võiks EL-is biogaasi ja biometaani kogutoodang katta 35–62% gaasi nõudlusest.

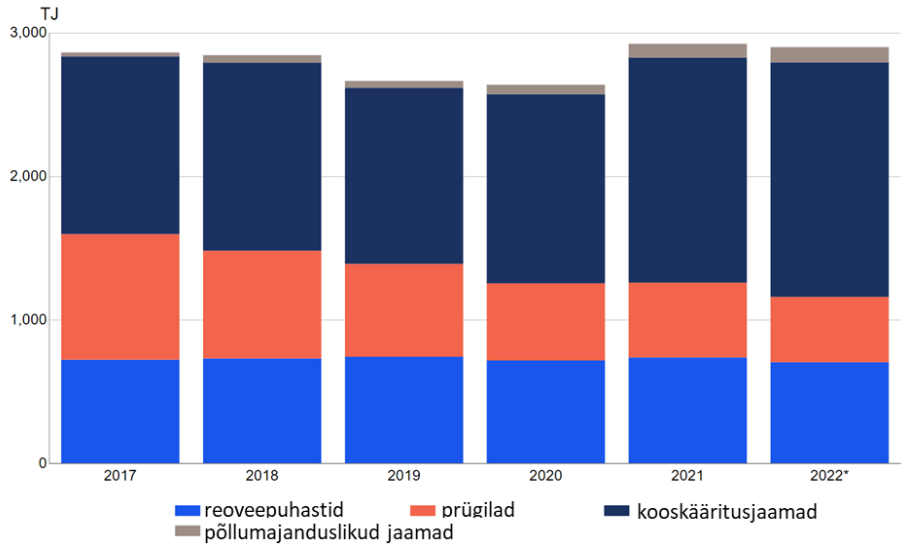


Joonis 1. Biogaasi tootmise toorme potentsiaali hinnang EL-is 2030. ja 2050. aastaks
Allikas: Gas for Climate, 2022.

Potentsiaalsete toorainete hinnanguline osakaal biogaasi tootmiseks on esitatud joonisel 1. Jooniselt on näha järjestikkultuuri (ingl k *sequential cropping*)[3] tähtsuse suurenemist biogaasi tootmise toormena. Järjestikkultuur ei pea saavutama täielikku küpsust biogaasi tootmiseks ning seda peaks saama kasvatada nii, et see ei vähenda peamise kultuuri saagikust. (Gas for Climate, 2022). Sellist lähenemist on tutvustatud Itaalias Biogasdoneright® nime all kui biogaasi tootmise ja põllumajandustootmise sünergia parimat praktikat jätkusuutliku põllumajanduse kontekstis. See hõlmab jätkusuutlikku maakasutust, mullaviljakuse säilitamist ja suuremat süsiniku sidumist (Mangolo jt, 2020). Järjestikkultuuride kasvatamist on uuritud ja selle kasulikkus tõestatud peamiselt vahemerelises ja kontinentaalses kliimas. Järgnevalt on esitatud Eesti lähiriikide ja Eesti viimase viie aasta kogemus biolagunevate jäätmete ja kõrvalsaaduste anaeroobsel kääritamisel, kajastades mh kääritusjäägi omadusi ja ohutust.

Soome. Ülevaate biogaasi tootmismahtudest ja trendidest Soomes annab joonis 2. Ligikaudu 60% biogaasist toodetakse suuremates kooskääritusjaamades. Biogaasi tootmine põllumajanduslikust toormest suurenes 2022. aastal 7% võrreldes 2021. aastaga (Statistics Finland, 2023).

[3] Järjestikkultuur on teise kultuuri kasvatamine pärast peamiste, söögiks või söödaks kasvatatavate, taimede koristust samal põllul samal aastal.



Joonis 2. Biogaasi tootmine* Soomes, 2017–2022
*Ei sisalda kasutusotstarbeta põletatud biogaasi kogust.
Allikas: Statistics Finland, 2023.

Soomes tegutseb üle 100 biogaasi- ja prügilagaasi jaama. 2022. aasta andmete alusel oli Soomes 27 põllumajanduslikku biogaasijaama, mis töötlesid peamisel sõnnikut, kuid mõningal määral ka rohtset biomassi ja toiduainetööstuse jäätmeid (Suomen Biokerto ..., 2023). Lisaks töödeldakse põllumajanduses tekkivaid kõrvalsaadusi ka suuremates kooskääritamise jaamades (26 jaamas), kus lisaks sõnnikule kääritatakse erinevaid biolagunevaid jäätmeid. Soomes tekib hinnanguliselt 17,3 miljonit tonni sõnnikut ja 1,5 miljonit tonni kasutusotstarbeta rohtset biomassi aastas, mis sisaldab 83 000 tonni lämmastikku ja 22 000 tonni fosforit (Suomen Biokerto ..., 2023). Nimetatud arvud ei sisalda biomassi, mida saaks lisaks kasvatada põldudel biogaasi tootmiseks, ilma, et see takistaks sööda- ja toidutootmist. Kõige levinum on mesofiilne märgkääritustehnoloogia, kuid on ka kuivkääritamist rakendavaid biogaasijaamu (Huttunen jt, 2018).

Soomes on seatud eesmärgiks toota 2030. aastal 4 TWh biogaasi, millest 2 TWh biogaasi toodetakse põllumajanduse ja toiduainetööstuse biolagunevatest jäätmetest ja kõrvalsaadustest, olmejäätmetest ja prügilagaasidest 1 TWh ning uue tehnoloogiaga (nt sünteetiline metaan) 1 TWh. Üle 70% toodangust moodustaks biometaan, mida saab kasutada sõiduki- ja laevakütusena, tööstuses ja transportida gaasivõrgus (Suomen Biokerto ..., 2023). Nimetatud eesmärgi saavutamiseks on biogaasi tootmise sisendi hinnang Soomes 2030. aastaks (Suomen Biokerto ..., 2023):

1) Sõnnik umbes 4,7 miljonit tonni.
2) Toiduainetööstuse kõrvalsaadused 300 000 tonni.
3) Taimne biomass umbes 900 000 tonni.
4) Biolagunevad jäätmed 600 000 tonni.
5) Liigmuda ligi 600 000 tonni.

Soomes on veise vedel- ja tahesõnniku biometaani tootlikkus on vastavalt 10–20 m^3 ja 24–55 m^3 tonni märgkaalu kohta ning ühest tonnist silost võib potentsiaalselt saada metaani 40–100 m^3 (Biokaasuteknologia…, 2015). Soomes vastutavad jäätmete kogumise ja töötlemise eest

valdavalt munitsipaalomandis olevad kohalikud jäätmekäitlusettevõtted. Biojäätmete liigiti kogumine on kohustuslik enam kui viie korteriga majade puhul, mõnes piirkonnas alates kahest korterist. Biojäätmed kogutakse tavaliselt 240 liitrit mahutasse plastkonteinerisse, suveperioodil maksimaalselt ühenädalase kogumistsükliga. Oksad, lehed, aia- ja muud haljastusjäätmed tuleb omal käel jäätmejaama viia. (European …, 2023a)

Biojäätmeid käideldakse peamiselt kompostimise teel, kuid tugevnemas on anaeroobse kääritamise roll. Soomes loetakse biojäätmete hulka peamiselt kodumajapidamises liigiti kogutud köögijäätmed ning kaubanduses, koolides, restoranides, haiglates ja muudes sarnastes kohtades tekkinud biojäätmed. Põllumajandusest ja metsandusest saadud jäätmed ei käsitleta jäätmetena. Liigiti kogutud biojäätmete ja reoveesette bioloogilise töötlemise edenemise toetamiseks käitlemist ei maksustata. (European …, 2023a). 2017. aastal koguti eraldi ligikaudu 391 000 tonni olmebiojäätmeid, millest ligikaudu 239 000 tonni käideldi kompostimisjaamades ja ligikaudu 130 000 tonni biogaasijaamades.

Komposti ja kääritusjäägi kasutamist juhib Soome Toiduamet. Soome Biocycle ja Biogaasi Assotsiatsioon koos Soome Vee-ettevõtete Liiduga on välja töötanud orgaaniliste väetiste põhiste toodete vabatahtliku kvaliteedisüsteemi ja kvaliteedimärgise. Kääritusjääki kasutatakse põllumajanduses peamiselt otse või tahendatud väetisena. Pika talveperioodi tõttu on kääritusjäägi jaoks vaja suuri hoidlaid. (European …, 2023a)

Läti. 2020. aasta andmetel tegutses Lätis 52 biogaasijaama kogutoodanguga 0,305 TWh (Millers, Pilvere, 2021). Neist jaamadest saadi erinevatest toormetest kääritusjääki 47 biogaasijaamas, millest 44 kasutasid toormena põllumajanduse ja toiduainetööstuse jäätmeid, kaks kasutasid tööstuslikku reoveesetet ja üks tehas olmereoveesetet. 2020. aastal toodeti Läti 47 biogaasijaamas 1,53 miljonit tonni kääritusjääki, mis moodustas 33% Lätis väetamiseks kasutatud orgaanilistest väetistest. Kääritusjääk sisaldas 1,28 tuhat tonni fosforit. (Latvian State Environmental Services, 2021). Nimetatud biogaasijaamad töötlesid 1,66 miljonit tonni biomassi, sealhulgas sõnnikut 779 tuhat tonni (47%), põllukultuuride kasvatamise jäätmeid 563 tuhat tonni (34%), toiduainetööstuse jäätmeid 232 tuhat tonni (14%) ning 82,5 tuhat tonni (5%) olme- ja tööstusreoveesetet. Erinev rohtne biomass moodustas Lätis 8% ja maisisilo 21% toorme kogumahust.

Leedu. Leedus töötab 41 biogaasijaama. Põllumajanduslikest jäätmetest toodavad biogaasi 14 jaama, millest kümme käitlevad sõnnikut. Biogaasijaamad kasutavad ainult 2% Leedus tekkivast 11 miljonist tonnist sõnnikust aastas (Vitunskienė jt, 2023). Ei ole teada, et Leedus oleks biometaani tootmisjaama, samal ajal on märgitud, et esimene biometaani tehas lülitatakse gaasivõrku aastal 2023. Leedu biometaani potentsiaali veise vedelsõnnikust hinnatakse 0,4–1,04 TWh ning kogu biometaani potentsiaali 2,2–2,6 TWh. (Amber Grid, 2022)

Leedus sätestab biolagunevate jäätmete kompostimise ja anaeroobse kääritamise nõuded keskkonnaministri määrusega (2016-07-01, nr D1-57). Leedu keskkonnaministri määrus 1999.07.14. nr 217 kehtestas kõikidele üle 50 000 elanikuga omavalitsustele biojäätmete liigiti kogumise nõude alates 2019. aastast. Leedus kehtib keskkonnaministri määrus "Tehnilise

komposti, tehnilise kääritusjäägi ning stabilaadi[4] kvaliteedi ja kasutamise nõuded" (2012.10.02., nr 114-5792). Leedu eripära on selles, et kasutusel on mõiste 'tehniline kompost', mille alla mahuvad nii aeroobselt kui anaeroobselt töödeldud biojäätmed, mis ei ole kogutud eraldi, vaid on segaolmejäätmetest välja sõelutud. Selliseid mehaanilis-bioloogilise tehnoloogiaga töötlemisettevõtteid on Leedus 11, millest neli toodavad biogaasi. Sellisel moel saadud stabilaat ehk kääritusjääk ei ole mõeldud põllumajanduslikuks kasutamiseks. Alates 2027. aastast ei tohi EL-is sellist töötlemisjääki ringlusse võtta.

Taani. 2022. aasta andmetel tegutseb Taanis ligikaudu 180 biogaasijaama. Nendest 100 on peamiselt põllumajanduslikul toormel tegutsevad jaamad, millest omakorda 55 toodavad biometaani. Reoveepuhastite juures töötab 40 biogaasijaama, millest kaks toodavad biometaani. Biogaasi tootmine on Taanis pidevalt suurenenud, alates 1,38 TWh 2014. aastal kuni 8,05 TWh 2022. aastal. (Biogas Denmark, 2023)

2020. aastal andsid põllumajanduslikud (põhisubstraat oli loomasõnnik) biogaasijaamad 93% Taanis toodetud biogaasist. Biogaasi toodeti 30-s suures ning 60-s väiksemas (talu/farmi) jaamas. Kääritatava biomassi kogusest moodustas loomasõnnik umbes 54%, lisasubstraatideks olid põhiliselt reoveesete, lihatöötlemise jäägid ja rohtne biomass. Kääritatud sõnnikust moodustas umbes 90% veise- ja seavedelsõnnik ning 10% tahe- ja sügavallapanusõnnik. 2020. aastal kasutati ülalnimetatud biogaasijaamades 8 303 000 tonni vedelsõnnikut, mis moodustas umbes 14% kogu Taani vedelsõnniku mahust (Denmark, 2022).

Viimastel andmetel moodustab massi järgi veisesõnnik umbes kolmveerandi biogaasi tootmise toormest Taanis, kuid annab vaid umbes kolmandiku biogaasi kogutoodangust. Seasõnnik annab umbes 10% biogaasi toodangust. Tulevikustsenaarium näeb ette märkimisväärset biogaasi tootmise suurenemist ja ressurssidena nähakse selleks peamiselt sõnnikut ja põhku. Prognoositakse, et 2030. aastal kasutatakse 20–25% põhuressursist biogaasi tootmiseks. Põhu kasutamise oluline suurendamine toormena nõuab tõhusamate eeltöötlusmeetodite ja kääritustehnoloogiate kasutamist, sest see toob kaasa nii sisendmaterjali kui ka kääritusjäägi kiudainete sisalduse kasvu. Eeldatakse, et suureneb vajadus kääritusjäägi käitlemiseks ja sellest spetsiaalsete omadustega väetise tootmiseks. Toiduainetööstuse jäätmete potentsiaal on eeldatavasti täielikult ära kasutatud pärast 2025. aastat ning energiakultuuride kasvatamine on Taanis kavas lõpetada 2030. aastaks. (Biogas Denmark, 2023)

Rootsi. 2021. aastal tegutses Rootsis 281 biogaasijaama, mis tootsid kokku 2,3 TWh biogaasi.. Ligikaudu 31% biogaasist ja biometaanist toodetakse Rootsis reoveest, 24% kodumajapidamiste jäätmetest ja vaid 11% sõnnikust (Klackenberg, 2023). Kääritusjäägist 97% kasutati põllumeeste poolt väetisena (Sweden …, 2022).

Rootsi keskkonnaeesmärk keskendub toitainete ringlussevõtule ja toidujäätmetest energia taaskasutamisele, mille kohaselt tuli 2018. aastaks 50% kõikidest toidujäätmetest eraldi koguda ja töödelda anaeroobse kääritamise (40%) ja kompostimise (10%) abil.

[4] Stabilaat on biolagunevate jäätmete aeroobse või anaeroobse käitlemise saadus, kui stabiliseerimine oli peamine või ainus käitlemise eesmärk. Orgaanika stabiliseerus, st hapnikutarve langes alla sellekohases määruses toodud nõuet.

Toidujäätmete anaeroobsele kääritamisele keskendumist võib seletada poliitilise eesmärgiga saavutada fossiilkütusevaba transpordisektor aastaks 2030.

Rootsi toidustrateegia keskendub suures osas mahepõllumajandusele ja toiduga kindlustatusele. Toidujäätmete ja sõnniku anaeroobne kääritamine mängib strateegias olulist rolli, kuna vastav kääritusjääk on üks väheseid mahepõllumajanduses heakskiidetud väetisi. Toitainete ja metallide kohta kehtib üldiselt sama regulatsioon, mis sõnniku (laotusnormid) ja reoveesette (raskmetallid) kohta. Põllumajandusmaale orgaaniliste väetistega (peamiselt sõnnikuga) antavate toitainete kogust reguleerib määrus SJVFS 2004:62 ja raskemetalle vastavalt SNFS 1994:2.

Muude orgaaniliste väetiste jaoks peale reoveesette ei ole seaduslikku raamistikku. Avfall Sverige on kvaliteedi tagamise skeemi "Certfierad återvinning (*Certified Re-use*)" omanik, mille alla käib kääritusjääk (SPCR 120) ja kompost (SPCR 152). Sertifitseerimisasutus on Rootsi Uurimisinstituut *(Research Institutes of Sweden*, RISE). Sertifitseerimisskeem käivitati 1999. aastal ja 2015. aastaks sertifitseeriti 18 kooskääritamistehast vastavalt standardile SPCR 120. Sertifitseeritud kääritusjääki nimetatakse bioväetiseks.

Rootsis tekib ligikaudu 935 000 tonni toidujäätmeid aastas (European …, 2023b). Rootsis töötas 2015. aastal 40 kompostimistehast, millest 2015. aasta jooksul spetsialiseerus toidujäätmete käitlemisele 11. Tsentraalsetes kompostimisjaamades käideldud toidujäätmete hulk on vähenenud, sest üha rohkem toidujäätmeid töödeldakse kooskääritamisjaamades. 2015. aastal töötas 35 kooskääritusjaama, millest enamik töötles tahkeid jäätmeid. 2015. aastal töödeldi anaeroobse kääritamise teel ligi 1,6 miljonit tonni sisendmaterjali (peamiselt toidujäätmeid, sõnnikut ja muid loomseid kõrvalsaadusi). Peaaegu kogu biogaas on kasutusel biometaanina transpordisektoris.

Eesti. 2023. aasta novembri seisuga toodavad Eestis biogaasi ja biometaani järgnevad ettevõtted:

- põllumajandustoormest – biogaasijaamad Aravetel, Ilmatsalus, Vinnis, Oisus, Rannus, Ebaveres ja Koksveres
- reoveesettest – AS Tallinna Vesi, AS Kuressaare Veevärk, AS Narva Veevärk ja AS Tartu Veevärk
- tootmisjääkidest ja -veest – A.LeCoq Tartus, Estover Piimatööstus OÜ Kaarlijärvel, Salutaguse pärmitehas, Eastman Specialties OÜ Kohtla-Järvel ja AS Estonian Cell Kundas
- biolagunevatest jäätmetest – EKT Ecobio OÜ Maardus

Biogaasi kogutakse ja kasutatakse ka neljas prügilas.

2022. aastal toodeti Eestis 0,168 TWh biometaani, millest 0,03 TWh toodeti reoveesetetest, 0,05 TWh looma- ja linnusõnnikust, 0,035 TWh toiduainetööstuse jääkidest, 0,037 TWh biojäätmetest ja 0,004 TWh muust biomassist. Biogaasist toodeti elektrienergiat võrku 0,007 TWh. Viimastel aastatel on suurenenud biometaani tootmine ja vähenenud biogaasist elektrienergia tootmine. (Eesti Biogaasi Assotsiatsioon, 2023)

Biometaani tootmisel on oluline arvestada toorme tootlikkust, Suuremad erinevused võivad ilmneda toiduainetööstuse kõrvalsaaduste biometaani tootlikkuses (Eesti Põllumeeste Keskliit,

2009). Piimatootmise jääkide biometaani tootlikkus võib varieeruda 30 m^3 CH_4/t kuni 400 m^3 CH_4/t, sõltudes eelkõige jääkide vee- ja rasvasisaldusest. Toidujäätmete metaani potentsiaal on 30–100 (keskmisena 70–80) m^3 CH_4/t. Olmereoveesette biogaasi tootlikkus on eelpool nimetatud substraatidest väiksem, sõltudes märgkaalu kohta suurel määral reoveesette veesisaldusest.

1.2. Kääritusjäägi omadused, ohutus ja sobivus mullaparandusaine või väetisena kasutamiseks

Eestis käsitleb biolagunevatest jäätmetest toote saamist kolm keskkonnaministri määrust: nr 12 „Nõuded biolagunevatest jäätmetest biogaasi tootmisel tekkiva kääritusjäägi kohta“, nr 7 „Biolagunevatest jäätmetest komposti tootmise nõuded“ ja nr 24 „Reoveesettest toote valmistamise nõuded“. Sertifitseerida on seega võimalik mitut sorti kääritusjääki, kuid sertifitseerimise aluseks olev määrus on erinev:

1. Vedel kääritusjääk (määrus 12, RT I, 19.05.2016,9)
2. Tahendatud kääritusjääk (määrus 12, RT I, 19.05.2016,9)
3. Tahendatud kääritusjääk, mis on üle kompostitud (määrus 7, RT I, 10.04.2013, 1)
4. Reoveesette kääritusjääk, mis on üle kompostitud (määrus 24, RT I, 28.07.2017, 4)

Kõigile määrustele on iseloomulik see, et määruste lisades nr 1 on toodud jäätmete loend, mida toormena kasutada tohib ning lisades 2 vastavalt toote ohutus- ja kvaliteedinäitajad (tabel 3). Kui biogaasi toormeks on materjal, mida ei käsitleta jäätmetena, siis selliste materjalide loetelu on määruse 12 lisas nr 3. Kui kääritatakse koos põllumajandustooret (määruse 12 lisa 3 – ei ole jäätmed) ja jäätmeid (määruse 12 lisa 1), siis loetakse kogu segu jäätmeteks. Diskussiooni koht on selles, kas põllumajandussaaduste ja jäätmete kooskääritamisel oleks vaja kehtestada piirmäär (%), alates millest muutub kogu kääritusjääk jäätmeteks või muutub kääritusjääk jäätmeteks juba tühise koguse jäätmete lisamisel. Näiteks ei loeta jäätmeteks põllumajandustootmisel saadud köögivilju, kuid kaubandusvõrgust tagasi toodud neidsamu köögivilju loetakse jäätmeteks. Sellise määra kehtestamine, näiteks 5% kääritis töödeldava materjali aastamahust, võimaldaks rohkem biomassi töödelda. Erandiks jäävad loomsete kõrvalsaadustena käsitletavate jäätmete lisamine kääritisse, mis peavad olema hügieniseeritud mistahes mahu lisamise korral.

Sertifitseerimise läbinud toodet ei käsitleta enam jäätmena ning seda tohib turustada ilma jäätmeluba või registreerimistõendit omamata. Kui toormeks ei olnud jäätmed, vaid põllumajandussaadused (näiteks silo), siis sertifikaati taotleda ei ole vaja. Samas ei ole sellisel juhul ka kääritusjäägi omaduste kohta muud seadusandlikku akti ega standardit. Mõistlik oleks ka sel juhul kääritusjäägi omadusi võrrelda määruse nr 12 ohutus- ja kvaliteedinäitajatega.

Keskkonnaministri määruses nr 12 (RT I, 19.05.2016,9) sätestatakse nõuded sertifitseerimisasutusele. Ainus kääritusjääki sertifitseeriv asutus Eestis on SA Taaskasutatavate Materjalide Sertifitseerimiskeskus, kellel on Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskuse akrediteering (tunnistus nr PC026 kehtivusega kuni 16.02.2026).

Eestis on sertifitseeritud vaid vedelat kääritusjääki. Eeldatakse, et kui käärimisprotsess ega lähtematerjal ajas ei muutu, siis ka kääritusjäägi omadused on ühesugused. Selles veendumiseks võetakse sertifitseerimisasutuse eestvedamisel lühikese ajavahemiku järel kolm järjestikust proovi ning kui need vastavad määruse nõuetele, siis kuni järgmise proovivõtuni loetakse kogu kääritusjääk ühesuguste omadustega olevaks. Järgmine proov võetakse kas aasta pärast (kordussertifitseerimine) või siis, kui protsessis või lähtematerjalides toimub oluline muudatus.

Tabel 3. Kääritusjäägi, biolagunevatest jäätmetest toodetud komposti ja reoveesettekomposti ohutusnäitajad ja lubatud piirväärtused

Ohutusnäitaja	**Ühik**	**Määrus nr 12**	**Määrus nr 7 klass A**	**Määrus nr 7 klass B**	**Määrus nr 24**	
Kaadmium (Cd)	mg/kg KA	1,3	1,3	2,0	2,0[a]	0,15[b] g/kg P
Kroom (Cr üld)	mg/kg KA	60	60	100	60[a]	15[b] g/kg P
Elavhõbe (Hg)	mg/kg KA	0,45	0,45	1,0	1,0[a]	0,1[b] g/kg P
Nikkel (Ni)	mg/kg KA	40	40	50	40[a]	4[b] g/kg P
Plii (Pb)	mg/kg KA	130	130	150	130[a]	7,5[b] g/kg P
Vask (Cu)	mg/kg KA	300*	200*	300*	200*[a]	45[b] g/kg P
Tsink (Zn)	mg/kg KA	600*	600*	800*	2500*[a]	125[b] g/kg P
Võõrised	% KA	0,5	0,5	0,5	0,5[c]	
Kivid	% KA	-	-	5	5	
Idanemisvõimelised umbrohuseemned	seemet 1 liitri kohta	2	2	5	2	
Salmonella spp	0/25g (ml)	Puudub	Puudub	Puudub	Puudub	
Escherichia coli või *Enterococcacea*	CFU/1g (ml)	1000	-	-	10	
Helmintide munad	10 grammis	-	-	-	Puudub	

* Kui vask ületab 110 mg/kg KA ja Zn 400 mg/kg KA, tuleb näitajad märkida sertifikaadile.

[a] Reoveesettest valmistatud toote raskmetallide piirmäärad haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamiseks.

[b] Reoveesettest valmistatud toote fosforisisaldusse suhtestatud raskmetallide piirmäärad põllumajanduses ja aianduses kasutamiseks.

[c] Võõrised: plastik, metall, klaas.

"-" Ohutusnäitaja piirmäära ei ole vastavas dokumendis toodud.

KA – kuivaine.

Allikad: Keskkonnaministri määrused nr 7, 12 ja 24.

Kui kääritusjääki tahendatakse, siis tuleb eraldi sertifitseerida vedel- ja tahefraktsioon. Tahefraktsiooni sertifitseerimise on algatanud OÜ Ecobio biogaasijaam, kuid tulemus selgub alles 2024. aastal. Vajadus fraktsioone eraldada võib tuleneda soovist optimeerida kääritusjäägi ladustamistingimusi laotamishooajaks. Üheks põhjuseks on samuti soov alandada transpordikulu kääritusjäägi kasutamisel põllul orgaanilise väetisena.

Oluline erinevus määruste 7 ja 12 vahel seisneb mõistes 'partii'. Tavapäraselt sertifitseeritakse ühesuguste omadustega partii, mille suuruse defineerib ettevõte ise. Partiiks loetakse enamasti mingis ajaühikus tekkinud komposti hulk, mis pannakse turustamiseks hoiule valmiskomposti lattu. Kääritusjäägi korral on tootmine katkematu ning partiid ei teki. Sertifitseerimise käigus võetakse sel juhul kahekuise vahega kolm järjestikust proovi ning kui nende omadused on

kooskõlas määrusega, siis loetakse kääritusjääk sertifitseerituks kuni järgmise kordusülevaatuseni ühe aasta pärast. Seda nii vedela kui tahendatud kääritusjäägi korral ning turustamist käsitletakse mõiste abil 'otsekasutus'. Kui aga tahe kääritusjääk üle kompostitakse, siis rakendub määrus 7 ning kompostitud kääritusjääk moodustab partii.

Kui kääritusjääk tahendatakse ja üle kompostitakse (järelkompostitakse), siis peamine vajadus selleks seisneb soovis materjal hügieniseerida, sest kompostimisel tõuseb temperatuur 70 °C-ni. Selleks on vaja lisada värsket substraati, mis ei ole käärimist läbinud. See on eriti oluline kohtades, kus lähtematerjalina kasutatakse 3. kategooria loomseid kõrvalsaadusi.

Kääritusjääki on võimalik hügieeniliseks muuta ka välise soojusallika abil. Hügieniseerimissõlm on olemas AS Tartu Veevärgi reoveepuhastis ja EKT Ecobio biogaasitehases, st kogemus hügieniseerimiseks on olemas juba praegu. Diskussiooni koht on selles, kas rajada uusi hügieniseerimissõlmi iga biogaasijaama juurde või piisab ühest kesksest sõlmest? Loomsetest kõrvalsaadustest tuleneva bioloogilise riski ära hoidmiseks oleks kindlam, kui hügieniseerimine toimuks iga kääriti juures.

Eestis toodetakse biogaasi ka reoveesettest. Käärimise läbinud reoveesetet nimetatakse samuti kääritusjäägiks. Vedelal kujul värsket sette käärimisjääki kasutada ei tohi, vaid tuleb suunata järelvalmimisele, st järelkompostimisele. Nõnda toimivad Eestis kõik reoveepuhastid, kes reoveesetet anaeroobselt töötlevad. Kui komposti soovitakse sertifitseerida, siis tuleb toimida keskkonnaministri määruse nr 24 kohaselt. Selle määruse alusel on SA Taaskasutatavate Materjalide Sertifitseerimiskeskusel akrediteering tahefraktsiooni, st reoveesettekomposti sertifitseerimiseks. Rakendada ei saa keskkonnaministri määrust nr 12, sest määrus „Nõuded biolagunevatest jäätmetest biogaasi tootmisel tekkiva kääritusjäägi kohta" lisa 1 välistab lähtematerjalina reoveesette. Reoveesette sertifitseerimise eripära võrreldes teiste määrustega seisneb toote kasutamise tingimustes, kus ohutusnäitajad on toodud nii aine sisalduse kui suhtena fosforisisalduse kohta. See on tingitud vajadusest fosfor ringlusse suunata. Kui settekompostis on fosforit rohkem, siis on ka raskmetallide lubatav sisaldus suurem.

Läti biogaasijaamade kääritusjääki käsitleva aruande (Latvian Biogas Association, 2021) peamised järeldused on järgmised:

1) Lätis ei ole konkreetset poliitikat reguleerimaks ringlusse võetud toitainete kasutamist. Mitmed seadused ja määrused reguleerivad väetiste, sealhulgas ringlusse võetud toitainetega väetiste kasutamist ja väetiste registreerimisnõudeid, kuid poliitika tasandil ei panda kohustusi toitainete ringlussevõtu edendamiseks selle kasutajale. Selle tulemuseks on kääritusjäägi kui orgaanilise väetise kvaliteedikriteeriumide puudumine.
2) Kääritusjäägi analüüsi tulemused näitavad, et kääritusjäägi kvaliteet on hea ja raskmetallide keskmise sisalduse osas EL-i väetisetoodete määruse orgaanilise väetise nõuetele vastav. Mõned kõrvalekalded proovides on vase ja tsingi puhul.
3) Nõuetest kõrvalekaldumine puudutab salmonellabakteri esinemist, mida avastati viies proovis 12-st.
4) Biogaasijaamade proovides, milles teatud proportsioonides kasutatakse sisendmaterjalina ka reoveesetet, ei avastatud kõrvalekaldeid EL-i sihttasemetest.

5) Kääritusjäägi propageerimiseks orgaanilise väetisena koos selle eelistega on vaja teha koostööd erinevate huvirühmade, huvitatud osapoolte ja biogaasijaamade omanikega, kuid samas on vaja arendada ka kvaliteedi tagamise süsteemi.
6) Vajalik on luua turg ja harida ühiskonda orgaaniliste väetiste eelistest, nende kasutamisest, kuna nõudluseta on raske veenda biogaasi tootjaid arendusse investeerima ja kvaliteeditagamise süsteemis osalema.

Kääritusjäägi ohutu kasutamise edendamiseks ja turustatava kääritusjäägi tootmiseks töötatakse Euroopa riikides välja kvaliteedi tagamise süsteemid. Kvaliteedi tagamise süsteem tagab kääritusjäägi kvaliteedi ja kvaliteedikontrolli pädevusega organisatsioon tagab süsteemi toimimise. Kvaliteedi tagamise süsteemid Austrias, Belgias, Saksamaal ja Soomes näitavad, et kääritusjäägi kvaliteediparameetrid hõlmavad viit peamist aspekti:

1) **Kahjutus.** Kuna kääritusjääki kasutatakse peamiselt väetisena ja mullaparandajana, siis peab olema tagatud ohutus. Selleks on vastavas kvaliteedistandardis määratletud täpsed kvaliteedinõuded ohutusnäitajate osas.

2) **Kasulikkus.** Kääritusjäägi analüüsimisel määratakse toitainete: lämmastiku, fosfori, kaaliumi ja mikroelementide tasemed ning süsiniku sisaldus. Põllumajandustootjad peavad põllumaale antava väetisekoguse arvutamisel arvesse võtma toitainete taset. Toitainete sisalduse järgi saab arvutada väetise väärtuse mineraalväetise suhtes.

3) **Omadused.** Võimalike lisandite sisalduse vähendamiseks tuleks kasutusele võtta täiendavaid meetmeid.

4) **Püsiv kvaliteet.** Sertifitseeritud kääritusjäägi kvaliteet on ühtlane ja saasteainete tase on oluliselt allpool lubatud piirväärtust. Seetõttu saavad kliendid loota toodete pidevale kvaliteedile.

5) **Turustatavus.** Lihtsalt saab turustada ohutut, sobiva toitainete koostisega, heade omadustegaja usaldusväärse kvaliteediga kääritusjääki.

1.3. Kääritusjäägi mikrobioloogilised omadused

Vastavalt keskkonnaministri määruse nr 12 “Nõuded biolagunevatest jäätmetest biogaasi tootmisel tekkiva kääritusjäägi kohta” lisale 2 “Kääritusjäägi ohutus ja kvaliteedinäitajad” on kääritusjäägi lubatav *E.Coli* kontsentratsioon maksimaalselt 1000 CFU/g ning salmonellabakterit (25 g proovis) ei esine.

Tavapäraselt sisaldavad biogaasi tootmise lähtematerjalid ja sellest tulenevalt ka kääritusjääk mitmesuguste mikroobide populatsiooni. Kuna põllumajanduslikes biogaasijaamades kasutatakse enamasti substraatide kooskääritamist, st lisaks vahetult põllumajandustootmisest pärinevale sisendile (loomasõnnik, rohtne biomass jms) kääritatakse ka näiteks toiduainetööstuses tekkivaid kõrvalsaadusi, köögi- ja sööklajäätmeid ning muid biolagunevaid materjale, siis mikroobide populatsioon kääritusjäägis võib algmaterjalidest erineda. Näiteks koliformsed mikroobid (*E.Coli* erinevad tüved) pärinevad peamiselt looma(linnu)sõnnikust või ka reoveesettest.

Anaeroobse kääritamise tulemusena mikroobide koguarv kääritusjäägis väheneb. Mõju erinevatele bakteriliikidele sõltub kääritamise tehnoloogiast, tavapäraselt on termofiilne keskkond[5] võrreldes mesofiilsega[6] efektiivsem (Scaglia jt, 2014). Eesti põllumajanduslikes ja ka teistes tööstuslikes biogaasijaamades rakendatakse tänasel päeval mesofiilse kääritamise metoodikat. Mesofiilsetes tingimustes on peamisteks teguriteks, mis vähendavad mikroobide arvu, metaani tekke kiirus, keskkonna pH ja lenduvate rasvahapete kontsentratsioon (Scaglia jt, 2014; Smith jt, 2005; Lopez jt, 2020). Mitmetes kirjandusallikates viidatakse, et hüdraulilise viibeaja kestus (pikendamine) ei mõjuta oluliselt patogeensete mikroorganismide arvu (Lopez jt, 2020).

1.4. Kääritamise mõju substraadi väetusomadustele

Kääritusjääk on biogaasi tootmise kõrvalsaadus, mis koosneb osaliselt lagundatud orgaanilisest ainest, anorgaanilistest ühenditest ja mikroobsest biomassist (Müller, 2015). Selle täpne koostis ja omadused sõltuvad biogaasi tootmiseks kasutatavast toorainest ja protsessi parameetritest nagu temperatuur ja substraadi viibeaeg kääritis (Alburqerque jt, 2012a; Risberg, 2015). Kääritamisel toimub substraadi lagundamine, mille määr sõltub C : N suhtest. Mida kitsam on substraadi C : N suhe, seda rohkem sellest kääritamisel laguneb ja vastupidi. Kirjanduses toodud andmete järgi võib kääritamisel laguneda 20–95% substraadis sisalduvast orgaanilisest kuivainest (Möller jt, 2012). Substraati jäävad alles bioloogiliselt raskesti lagundatavad ühendid, millel on mulla orgaanilisele ainele ja viljakusele pikaajaline mõju (Müller, 2015). Kääritamisel muutub kõige rohkem substraadi C-sisaldus, sest labiilsed C-ühendid (rasvhapped, suhkrud, rasvad jne) lagundatakse peaaegu täielikult ja muundatakse biogaasiks. Lignotselluloosse biomassi lagundamine toimub vaid osaliselt. Hemitselluloos konverteeritakse üle 80% ulatuses biogaasiks, tselluloosi konversiooni efektiivsus on oluliselt väiksem kui hemitselluloosil ning ligniin on anaeroobse kääritamise protsessi käigus sisuliselt mitte lagundatav (Pitk jt, 2015). Sõnniku C-sisaldus on kääritamise järel 2–3% väiksem (tabel 4). Uuringuid kus on hinnatud kääritamise mõju sõnniku C-sisaldusele on tehtud väga vähe. Arvatavasti on selle põhjuseks asjaolu, et sõnnikut ei kääritata tavaliselt üksinda. Biogaasi koguse maksimeerimiseks lisatakse sellele juurde veel teisi substraate, mis kääritusjäägi C-sisaldust samuti mõjutavad. Näiteks selgus Fuente jt (2013) uuringust, et kui sõnnikule lisati juurde maisi- ja kaerasilo, nii et selle osakaal oli 11,6% märgmassist, oli kääritusjäägis C-d sama palju kui sõnnikus enne kääritamist.

Lisaks süsinikule erineb kääritatud vedelsõnnik kääritamata vedelsõnnikust kõrgema pH, väiksema kuivainesisalduse ja viskoossuse ning suurema NH_4-N : $N_{üld}$ suhtarvu poolest (tabel 4). Lämmastiku kogusisaldus ($N_{üld}$) kogus (so kogu substraadis sisalduv N, nii taimele omastatav kui omastamatu) substraadi kääritamisel kas ei muutu või veidi väheneb, sest pH kasv ja NH_4 sisalduse tõus soodustavad NH_3 teket ja emissiooni (Risberg, 2015). Samas $N_{üld}$ kontsentratsioon võib olla digestaadis suurem, sest substraadi maht (kuivaine kogus) kääritamisel väheneb (De Notaris jt, 2018).

[5] Temperatuur reaktoris 50–60 °C.
[6] Temperatuur reaktoris 35–40 °C.

NH_4-N on kääritusjäägis rohkem kui substraadis. See annab kääritusjäägile väetisena olulise eelise, sest NH_4-N on taimedele koheselt omastatav (Risberg, 2015). Kääritusjäägi NH_4-N sisaldus sõltub substraadi proteiinisisaldusest ja suureneb selle kasvades. Proteiinirikkad substraadid on toidujäätmed, teravilja terad, liblikõieliste ja kõrreliste biomassist toodetud silo, sea- ja kanasõnnik ning tapajäätmed. Veise vedelsõnniku proteiinisisaldus on väike, mistõttu selle kääritusjäägi NH_4-N sisaldus on väiksem ja $NH_4 : N_{üld}$ suhe kitsam, kui eespool nimetatud substraatide kääritusjäägis. (Möller jt, 2012)

Tabel 4. Kääritatud sõnniku omadused

Parameeter	**Sisaldus kääritusjäägis**	**Muutus ***
KA, %	1,5–13,2	−1,5 kuni −5,5
$N_{üld}$ (kg t^{-1} MM)	1,20–9,10	Ei muutu
NH_4-N osakaal $N_{üld}$ (kg t-1 MM)	44–81%	+10 kuni +33
$C_{üld}$, KA^{-1} %	36,0–45,0	–2 kuni –3
C/N	3,0–8,5	–3 kuni –5
$P_{üld}$ kg t^{-1} MM	0,4–2,6	Ei muutu
P_{om}, (% $P_{üld}$)	25–45	–20 kuni –47
$K_{üld}$ kg t^{-1} MM	1,2–11,5	Ei muutu
$Mg_{üld}$ kg t-1 MM	0,3–0,7	Ei muutu
$Ca_{üld}$ kg t-1 MM	1,0–2,3	Ei muutu
$S_{üld}$ kg t-1 MM	0,2–0,4	Ei muutu
pH	7,3–9,0	+0,5 kuni +2 ühikut

*Muutus võrreldes kääritamata sõnnikuga. Muutus on parameetri järel olevates ühikutes.
KA – kuivaine.
MM – märg mass.
Indeks$_{üld}$ - kogu elemendi sisaldus (nii taimele omastatav kui omastamatu).
Indeks$_{om}$ – elemendi sisaldus, mis on taimele omastatav.
Allikas: Möller jt, 2012.

Fosfori ja mineraalelementide kogus kääritusprotsessi käigus ei muutu. Siin kehtib põhimõte, et toitainete kogus, mis biogaasijaama sisestatakse, võrdub kogusega, mis biogaasijaamast kääritusjäägiga eemaldatakse. Küll võib kääritusprotsessi käigus väheneda nende omastatavus taimele, sest substraadi pH tõus soodustab P, S, Mg, Ca, Fe sadenemist karbonaadi, struviidi või siis Ca- või Mg- fosfaadina (Möller jt, 2012; Svehla jt, 2020). Digestaadi väetusväärtuse seisukohast see probleemiks ei ole, sest mullas need ühendid lagunevad ja neis sisalduvad elemendid muutuvad taimedele uuesti omastatavaks. Selle põhjuseks on mulla madalam pH võrreldes kääritusjäägiga. Fosforit saavad taimed kääritusjäägist kätte sama hästi kui vedelsõnnikust ja superfosfaadist (Alburquerque jt, 2012b; Bachmann jt, 2016; Möller jt, 2010; Vanden Nesta jt, 2015; Luostarinen jt, 2020). On ka neid uuringuid, kust on selgunud, et P omastatavus vedelsõnnikust ja selle kääritusjäägist on superfosfaadiga võrreldes suurem (Luostarinen jt, 2020).

Eestis läbi viidud uuring näitas, et vedelsõnniku $N_{üld}$ sisaldus kääritusprotsessis veidi vähenes (tabel 5). Võrreldes substraadiga, oli kääritusjäägis $P_{üld}$, $Ca_{üld}$, $Mg_{üld}$ sisaldus veidi väiksem, mille tõenäoliseks põhjuseks oli kääritusjäägi tahke ja vedela faasi mittetäielik segunemine proovivõtmise ajal. (Pitk jt, 2015)

K kogus ja taimele omastatavus substraadi kääritamisel ei muutu, kuid substraadi mahu vähenemise tõttu on selle kontsentratsioon kääritusjäägis suurem kui substraadis (tabel 4 ja tabel 5).

Tabel 5. Kääritamata ja kääritatud vedelsõnniku omadused

Parameeter	**Vedelsõnnik**	**Kääritusjääk***	**Muutus ,%[a]**
KA, %	8,73	5,84	-33,10
OA % KA	76,67	66,3	-13,52
$N_{üld}$ (kg t^{-1} MM)	3,99	3,86	-3,25
NH_4-N osakaal $N_{üld}$ (% MM)	47,6	66,0	+37,50
NH4-N kg t-1 MM	1,9	2,55	+34,21
$P_{üld}$ kg t^{-1} MM	0,84	0,72	-14,88
$K_{üld}$ kg t^{-1} MM	2,56	2,96	+15,43
$Mg_{üld}$ kg t-1 MM	0,98	0,78	-20,00
$Ca_{üld}$ kg t-1 MM	1,45	1,27	-12,46
pH	7,04	7,73	+9,80

*Veise vedelsõnniku kõrval sisaldas substraat veel sea vedelsõnnikut, tahesõnnikut (põhu allapanu) ja rohtset biomassi (kokku alla 5% kogu massist).

[a.] Vedelsõnniku omaduste muutus kääritamisel, %; (parameetri näit vedelsõnnikus - parameetri näit kääritusjäägis) /parameetri näit vedelsõnnikus*100.

KA – kuivaine.

MM – märg mass.

Indeks$_{üld}$ - kogu elemendi sisaldus (nii taimele omastatav kui omastamatu).

Allikas: Pitk jt, 2015.

1.5. Kääritusjääk väetisena

Kääritusjäägiga väetamine vähendab mineraalväetiste vajadust ja hoiab toitaineringe suletuna. Ligikaudu 55–95% loomasöödas leiduvast N väljub loomast ekskrementidega ja sama juhtub ka suure osa P ja mineraalelementidega. Kääritusjäägiga viiakse need tagasi mulda, kust taimed saavad neid kasutada uue biomassi kasvatamiseks (Lukehurst jt, 2010). Digestaadi oluliseks eeliseks mineraalväetise ees on väiksem keskkonnajalajälg, mille mineraalväetistel muudab suureks nende tootmisel eralduv kasvuhoonegaaside kogus. Ladustamisel, transportimisel ja põllule laotamisel eraldub gaase rohkem kääritusjäägiga väetades, kuid kokku on seda vähem kui mineraalväetiste tootmisel ja laotamisel (Timonen jt, 2019). Kui kääritusjäägiga väetada energiakultuure, mille biomassist toodetakse biogaasi, siis on energiasisend võrreldes mineraalväetistega keskmiselt 34% väiksem ning biogaasist saadava netoenergia kogus selle võrra suurem (Gissén jt, 2014).

Kääritusjääk sobib põllukultuuride väetiseks ilma töötlemata, kuid seda võib ka separeerida ja väetiseks kasutada selle vedelat ja tahket fraktsiooni ehk tahest. Viimasel juhul on neis sisalduvate toiteelemente kasutamine efektiivsem (Lukehurst jt, 2010; Al Seadi jt, 2013). Soomes tehtud uuring näitas, et biogaasijaamades, kuid samuti ka suurtes loomakasvatuskompleksides on probleemiks toiteelementide kuhjumine. Eriti suurt probleemi

nähakse fosforiga, mida koguneb sinna rohkem, kui lähiümbruse põldudel kasvavad kultuurid suudavad omastada. Sellel on negatiivne mõju keskkonnale, sest üleväetamise tõttu on suurenenud nendelt põldudelt P leostumine (Marttinen jt, 2017). Sarnane uuring Saksamaal näitas, et biogaasijaamadesse võib koguneda ka liiga palju lämmastikku (Plana jt, 2016). Probleemi lahendusena nähakse toiteelementide hajutamist suuremale pinnale. Et see oleks majanduslikult tasuv, tuleb kääritusjäägi mahtu ja kaalu vähendada. Üks viis kuidas seda teha, on kääritusjäägi separeerimine ning selle käigus eraldatava tahese kuivatamine ja pelletiseerimine. Selliselt saadud väetusaine on rikas P, mineraalelementide ja C poolest ning seda on lihtne transportida, ladustada ja kasutada. Kääritusjäägi tahest võib ka kompostida ja seejärel kasutada seda mullaparandusainena põllul või aianduses (Marttinen jt, 2017). Kompostimise puhul on leitud, et kui tahese pH>9,3, siis on tõsine oht NH_3 emissiooniks. Selle vältimiseks tuleb kompostile lisada kas savimineraale, mis seovad NH_3 või siis H_2SO_4 või S elemendina, mis alandavad komposti pH-d (Chen jt, 2018; Pantelopoulos jt, 2017).

Tabel 6. Toiteelementide sisaldus erinevast toormest saadud kääritusjäägi vedelas ja tahkes faasis, separeeritud kruvipress meetodil

Tooraine	Parameeter	Tahke faas	Vedel faas
Sea vedelsõnnik 75%, teraviljakliid 3%, peedi mass 14%, tärklise tootmise jäätmed 8%	pH	8,4	7,5
	$N_{üld}$	0,45	0,26
	C_{org}	14,2	0,84
	P, %	0,30	0,07
	K, %	0,15	0,13
	Ca, %	0,42	0,52
	Mg, %	0,14	0,04
Sea vedelsõnnik 48%, teraviljakliid 5%, peedi mass 26%, juurviljad 13%, vadak 8%	pH	8,7	8,0
	$N_{üld}$	0,6	0,32
	C_{org}	15,1	1,17
	P, %	0,39	0,05
	K, %	0,23	0,20
	Ca, %	1,15	0,46
	Mg, %	0,27	0,08
Sea vedelsõnnik 52%, kanasõnnik 23%, tärklise tootmise jäägid 14%, teraviljakliid 3%, peedi mass 6%, juurviljad 2%	pH	8,4	7,9
	$N_{üld}$	0,65	0,45
	C_{org}	14,8	1,7
	P, %	0,21	0,05
	K, %	0,19	0,17
	Ca, %	0,44	0,4
	Mg, %	0,12	0,04

Allikas: Jurgutis jt, 2021.

Separeerimisel eralduv vedel fraktsioon on kiiretoimeline N ja K väetis, mille positiivseteks omadusteks on i) võrreldes separeerimata kääritusjäägiga suurem efektiivsus N-väetisena (Al Seadi jt, 2013; Nkoa, 2014; Tambone jt, 2017), ii) enne kasutamist on vaja seda vähem segada ja iii) laotamisel määrib see vähem taimi ja imbub kiiremini mulda (Luostarinen jt, 2020). Toiteelementide jaotumist tahke ja vedela fraktsiooni vahel mõjutab meetod, mida separeerimiseks kasutatakse. Pressmeetod jätab tahesesse rohkem kuivainet, lenduvat

orgaanilist ainet, C, mineraalelemente ja P. N-ühendid ja K jaotuvad tahke ja vedela fraktsiooni vahel ühtlaselt. Tsentrifugaalmeetodil separeeritud kääritusjäägi vedel fraktsioon sisaldab N ja K rohkem kui tahke, samas tahkes fraktsioonis on rohkem P (Lukehurst jt, 2010; Al Seadi jt, 2013). Toiteelementide jaotumine tahke vedela fraktsiooni vahel sõltub veidi ka substraadist, mida biogaasi tootmiseks kasutatakse (tabel 6).

Sõnnikut võib separeerida ka enne biogaasijaama viimist. Sellisel juhul on transpordikulu väiksem ja biogaasi toodang mahuti ruumala kohta umbes kaks korda suurem. Kääritusele eelnevat separeerimist soovitatakse väikese lenduvate orgaaniliste ühendite sisaldusega sõnnikute puhul, nagu on seda seasõnnik ja kõrge veesisaldusega veisesõnnik. Viimast tekib lautades, kus sõnniku ärastamiseks kasutatakse vett (Lukehurst jt, 2010; Møller jt, 2007).

Viimastel aastatel ei ole Balti riikides ja Põhjamaades kääritusjäägiga väga palju pikaaegseid (kuni kümme aastat) katseid tehtud. Peamiselt on võrreldud kääritusjäägi väetusomadusi mineraalväetisega ja kääritamata sõnnikuga. Samuti on uuritud, milline on kääritusjäägi mineraalväetise asendusväärtus ja mille põhjal seda hinnata.

Norras toimunud uuringus võrreldi mineraalväetise (N_{120} P_{20} K_{180}) mõju värske sõnniku ning kolme erineva kääritusjäägiga. Kääritusjääkide substraadid koosnesid: i) sõnnikust, vadakust ja kalast, ii) orgaanilistest majapidamisjäätmetest, ning iii) orgaanilistest majapidamisjäätmetest ja reoveesettest. Uuring viidi läbi kasvuhoones tolmjal, liivasel ja liivsavi lõimisega mullal. Katsekultuuriks oli suvinisu, mida kasvatati kasvunõudel 14 nädalat. Kõigi katses kasutatud orgaaniliste väetiste norm arvutati NH_4-N sisalduse põhjal. Uuringust selgus, et kääritusjääkide mõju saagile oli sõnnikuga sarnane ja mineraalväetisega võrreldes kas sama suur või suurem. Suurem oli kääritusjäägi mõju variandis, kus nisu kasvas liival. Autorid oletasid, et kuna mineraalväetisest vabaneb N väga kiiresti, siis võis seda katse alguses olla mullas rohkem, kui taimed suutsid omastada. Kuna muld seob N vaid väga vähesel määral, siis võis osa sellest kastmisveega leostuda. Orgaanilistest väetistest vabaneb N aeglaselt, mistõttu nende variantides N leostumist ei esinenud või see oli väiksem kui mineraalväetise variandis. Autorid märgivad uuringu kokkuvõttes, et NH_4-N sisaldus on hea indikaator, mille põhjal hinnata kääritusjäägi väärtust N-väetisena. Meetodi puuduseks on, et see ei võta arvesse kääritusjäägis sisalduvat P ja K kogust, mis võib olla substraadist sõltuvalt väga erinev. Antud katses ei olnud orgaaniliste väetistega antud P kogus väiksem, kui see oli mineraalväetise variandis, küll oli seda mõnes kääritusjäägi variandis K kogus, kuid see saaki ei mõjutanud. (Sogn jt, 2018)

Teises Norras läbiviidud uuringus võrreldi sisetingimustes mineraalväetise, veise vedelsõnniku ja selle kääritusjäägi mõju suvinisu saagile ja N omastamise võimele. Uuring näitas, et kääritamisel suureneb oluliselt sõnnikus sisalduva N omastatavus taimedele. Kääritusjäägi mõju saagile sarnanes mineraalväetise omaga ja oli vedelsõnnikust oluliselt suurem. Autorid märgivad uuringu kokkuvõttes, et kääritamine muudab orgaanilises aines sisalduva N taimedele kättesaadavaks, mille tulemusena selle kasutusefektiivsus suureneb (Foereid jt, 2021)

Eestis võrreldi kaks aastat kestnud katses kääritusjäägi, selle tooraineks olnud vedelsõnniku ja mineraalväetise mõju rohumaal, mille taimik koosnes aasnurmikast, karjamaa raiheinast, punasest aruheinast ja valgest ristikust. Katses olid järgmised variandid: i) kontroll (väetist ei saanud), ii) mineraalväetis NH_4NO_3 (P ja K väetist ei antud), iii) kääritamata veise vedelsõnnik ja iv) veise vedelsõnniku kääritusjääk. Väetist anti katselappidele mõlemal katseaastal ja

orgaanilise väetise norm arvutati NH_4–N sisalduse põhjal. Uuringust selgus, et mõlema orgaanilise väetise mõju oli biomassi saagile mineraalväetise omast suurem. Kääritusjäägi ja vedelsõnniku variandis biomassi saak statistiliselt usutaval määral ei erinenud, kuid oli koguseliselt vedelsõnniku omas veidi suurem. Autorid oletasid, et kuna kääritusjäägis oli NH_4-N rohkem, siis sellest tulenevalt oli selle füüsiline kogus väetisena väiksem kui vedelsõnnikul. Seetõttu anti digestaadiga vähem ka P ja mineraalelemente, mis võis mõjuda saagile negatiivselt. Samuti võis veidi väiksemat saaki põhjustada suurem N kadu kääritusjäägi variandis. Mõlemad orgaanilised väetised anti kastekannuga taimiku pinnale. Suurema NH_4-N sisalduse ja kõrgema pH tõttu võis N lenduda kääritusjäägi variandist rohkem. Mineraalväetise variandis võis saaki mõjutada P ja K vähesus mullas. (Tampere jt, 2014)

Leedus hinnati keraheinarikkal rohumaal kääritusjäägi (tooraineks seasõnnik ja erinevad orgaanilised jäätmed) väetusväärtust võrreldes mineraalväetisega viis aastat kestnud katses. Mineraalset N-väetist anti normiga 180 kg ha^{-1}. Kääritusjäägiga antud N normid olid: 90, 180, 270, 360 ja 450 kg N ha^{-1}. Kääritusjäägi norm arvutati $N_{üld}$ sisalduse põhjal ja anti kahes osas, vegetatsiooniperioodi alguses ja pärast esimest niidet. Väetis jäi taimiku pinnale. Uuringust selgus, et viie aasta kokkuvõttes saadi mineraalväetisega sarnane saak variandis, kus kääritusjäägiga anti 180 kg N ha^{-1}, mis näitab, et kääritusjäägi N-väetise asendusväärtus oli selles katses 1. Samas esimesel ja kolmandal aastal oli mineraalväetise variandis saak suurem kui kääritusjäägi omas. Ka selles katses kasutati mineraalväetisena ainult N-väetist. (Tilvikienė jt, 2018)

Taanis uuriti ühe kasvuperioodi kestel anaeroobselt kääritatud silo mõju talinisu ja suviodra saagile. Töö eesmärgiks oli saada teada siloks koristatava taimiku liigilise koosseisu ja niidete arvu mõju silokääritusjäägi N-väetise asendusväärtusele (osatähtsus mineraalväetisega antavast N normist, mida kääritusjääk asendab). Katses võrreldud silod toodeti i) lutserni (100%) ja ii) lutsern segus kõrreliste ja rohunditega taimikutelt, mida niideti vegetatsiooniperioodil, sõltuvalt variandist, 1–4 korda. Uuringust selgus, et kõige paremini kirjeldas silokääritusjäägi N-väetise asendusväärtust $N_{üld}$ sisaldus. Seos oli usutav nii talinisu kui suviodra variandis. NH_4-N% : $N_{üld}$ kirjeldas N-väetise asendusväärtust usutavalt ainult talinisul. Autorid järeldasid, et N omastamine ei sõltu taimedel ainult kääritusjäägiga mulda viidud mineraalse N kogusest. Kokkuvõttes märgivad nad, et erineva liigilise koosseisu ja lämmastikusisaldusega silod võivad anda sarnase tulemuse biometaani tootmisel, kuid nende kääritusjääkide N-väetise asendusväärtus võib olla väga erinev. Kõige paremini kirjeldab seda $N_{üld}$ sisaldus silo kuivaines, mis võib varieeruda sõltuvalt taimiku liigilisest koosseisust ja niidete arvust. Lisaks eeltoodule selgus sellest uuringust, et kääritatud biomassi N-väetise asendusväärtus on kääritamata biomassi omast 25–63% suurem. Kääritamisest saadav efekt sõltub biomassi $N_{üld}$ sisaldusest ja on suurem väikesema $N_{üld}$ sisaldusega biomassi korral. Selleks, et kääritusjäägi N-väetise asendusväärtus oleks suurem kui 60%, peab $N_{üld}$ olema kuivaines rohkem kui 3,5 g 100 g^{-1}. Selle saavutamiseks tuleb niita taimikut varases arengustaadiumis ja taimik peab olema rikas liblikõieliste poolest. Lisaks märgivad autorid, et silokääritusjääk on sobiv N väetis mahetootmises, kus selle mõju on multšina maapinnale jäetavast haljasväetisest suurem. Samuti võib seda kasutada seal sõnniku asemel. Väiksema lendumiskao tõttu on silokääritusjäägi efektiivsus suurem kui viia see kohe pärast laotamist mulda *versus* jätta mulla pinnale. (De Notaris jt, 2018)

Leedus võrreldi kolmel aastal kääritusjäägi ja mineraalväetise mõju põllukülvikorras esimesel aastal suvinisule, teisel aastal tritikalele ja kolmandal aastal suviodrale. Katses kasutati sea-, kana- ja veisesõnnikul põhinevat kääritusjääki. Kõigi väetistega anti 170 kg N ha^{-1}. Vajalik kääritusjäägi kogus arvutati $N_{üld}$ sisalduse alusel. Väetis anti kõigil kolmel aastal kahes osas, 90 ja 80 kg N ha^{-1} suuruste normidena. Kääritusjääk jäi pärast laotamist mulla pinnale. Uuringust selgus, et kääritusjääkide mõju oli põllukultuuride saagile sarnane. N kasutusefektiivsus oli kana- ja veisesõnniku kääritusjäägiga väetatud variantides parem kui mineraalväetise omas. Kääritusjäägi mõju ajaga suurenes. Paremus võrreldes mineraalväetisega avaldus alles kolmandal aastal. Esimesel aastal oli saak kõige suurem mineraalväetise variandis. Sellega sarnane oli ka terade proteiinisisalduse dünaamika. Kui esimesel aastal oli see selgelt teistest suurem mineraalväetise variandis, siis kolmandal aastal kanasõnniku ja veisesõnniku kääritusjäägi omas. Kuigi autorid seda oma töös välja ei too, on oluline märkida, et ka selles katses anti mineraalväetisega ainult N. Sellisel ühekülgsel väetamisel võis olla saagile negatiivne mõju. (Doyeni jt, 2021)

Hiljuti on Leedus uuritud kääritusjäägi tahke ja vedela fraktsiooni mõju erodeeritud mullaviljakusele ja poolloodusliku rohumaa saagikusele. Mõlemat fraktsiooni anti kõigil katseaastatel koguses, mis vastas N-normile 170 kg ha^{-1} (norm arvutati $N_{üld}$ sisalduse põhjal). Kolm aastat kestnud uuring näitas, et vedela fraktsiooniga väetades suurenes mulla kuni 10 cm kihis lahustunud C-sisaldus 3,7% ja $N_{üld}$ sisaldus 11,6%. Tahke fraktsiooniga väetades olid need muutused vastavalt 15% ja 20%. Väetamata variandiga võrreldes oli biomassi saak kääritusjääkidega variantides kolm korda suurem. (Jurgutis jt, 2021a; Jurgutis jt, 2021b)

Süsiniku ja N kõrval on kääritusjäägi tahesel ja vedelal fraktsioonil oluline mõju ka mulla P_2O_5 ja K_2O sisaldusele. Pärast kääritusjäägi tahesega väetamist (norm 170 kg $N_{üld}$ ha^{-1}) oli nende ühendite sisaldus kuni 40 cm kihis väetamata kontrolliga võrreldes vastavalt 25% ja 20% suurem. Kääritusjäägi vedela fraktsiooniga väetamine suurendas nende sisaldust vastavalt 16% ja 9%. (Slepetiene jt, 2020)

Rootsis on viimastel aastatel tehtud mitu uuringut selgitamaks kääritusjäägi sobivust väetiseks vesiaianduses (hüdropoonika). Ühes neist võrreldi kääritusjäägi mõju mineraalainetepõhiste väetistega. Selgus, et kääritusjäägi lahuses kasvanud Hiina lehtkapsa ehk pak choi biomass oli 50% väiksem kui taimedel, mis kasvasid mineraalainetepõhises vesilahuses. Katses tuli välja selge negatiivne seos kääritusjäägi kontsentratsiooni ja Hiina lehtkapsa saagikuse vahel. Samas vitamiine oli rohkem kääritusjäägi vesilahuses kasvanud taimedes, mida töö autorid seletasid taimede stressiga, sest stressi tingimustes toodavad taimed sekundaarseid metaboliite rohkem. (Bergstrand jt, 2020)

Teises analoogses uurimistöös leidsid autorid, et kääritusjääki saab väetisena kasutada vesiaianduses, kui seda eelnevalt lahjendada optimaalse ammooniumlämmastik (NH_4-N) kontsentratsioonini (kõrge NH_4-N kontsentratsioon on taimedele toksiline) ja NH_4-N nitrifitseerida NO_3-N-ks (Lind jt, 2021).

Rootsis on uuritud kääritusjäägi lahuse sobivust Hiina lehtkapsa pealtväetiseks. Selgus, et ainult kääritusjäägi lahusega väetades jääb taimedel puudu P, S, ja B (boor). Kui anda neid elemente mineraalväetisega juurde, siis on saak sama suur, kui see on mineraalväetist kasutades. Kokkuvõttes ütlevad autorid, et kääritusjäägis sisalduvad toiteelemendid on taimedele hästi

omastatavad ja sellega on võimalik mineraalväetist täielikult asendada kui lisada sinna vähesel määral juurde ülalmainitud toiteelemente. (Weimers jt, 2022)

Lisaks kääritusjäägi väetusomadustele on Rootsis uuritud veel selle tahke fraktsiooni (kuivaine sisaldus 22%) sobivust basiiliku kasvusubstraadiks. See katse näitas, et kui asendada 50% turbast kääritusjäägi tahesega (substraat sisaldas 33,4% põllukultuuride jäätmeid, 20,1% toiduainetööstusest pärit taimseid jäätmeid ja 0,6% raudkloriidi), siis oli selle mõju basiiliku kasvule sama, mis väetatud turbal. Mineraalväetist sellise kasvusubstraadi puhul juurde anda ei ole vaja, sest kääritusjäägis sisalduvad toitained katavad taimede vajaduse täielikult. Negatiivse poole pealt selgus, et tahese lisamisel väheneb substraadi veehoiuvõime. (Asp jt, 2022)

Uuritud on ka kääritusjäägi tahese komposti sobivust mullaparandusaineks nii põllul kui ka aianduses. Need uuringud on näidanud, et selle mõju mullale sarnaneb teiste kõrgekvaliteediliste kompostide omaga. See lisab mulda olulisi makro- ja mikroelemente, mikroorganisme ning suurendab mulla pH-d, puhversusvõimet ja veemahutavust. Kokkuvõttes mulla kvaliteet kääritusjäägi tahese kompostiga väetamisel paraneb (Marttinen jt, 2017). Siiski on mõned uuringud näidanud seda, et see võib väikese N sisalduse tõttu põhjustada mullas N immobilisatsiooni, mistõttu sobib see eelkõige väikese N vajadusega kultuuride väetiseks (Chiyoka jt, 2014).

Eelpool refereeritud uuringute tulemused langevad kokku paljude varasematega, näidates, et kääritusjäägi väetusväärtus ei ole halvem, kui see on vedelsõnnikul või mineraalväetisel. Ka kääritatud haljasväetise biomassi väetusväärtus on 10–28% suurem võrreldes mulda küntud haljasväetisega. (Möller jt, 2012; De Notaris jt, 2018; Stinner jt, 2008; Möller jt, 2008)

Varasemast on teada, et kui väetamisel kasutada vedelsõnnikut ja selle kääritusjääki võrdses koguses, siis on kääritusjäägi väetusväärtus esimesel aastal 14% suurem. Kuid kui võrrelda nende mõju pikema perioodi jooksul, tingimusel, et väetist antakse ainult esimesel aastal, siis nende mõju väetisena ei erine (Lukehurst jt, 2010). Erinevus kääritatud ja kääritamata materjali mõju dünaamikas tuleneb nende erinevast NH_4-N sisaldusest. Kääritatud materjalis moodustab taimedele koheselt omastatav NH_4-N suurema osa $N_{üld}$-st, kui see on kääritamata materjalis. Selle tõttu on kääritatud materjal esimesel aastal mõjusam kui järgmistel (Möller jt, 2012; Bougnom jt, 2012; Sommer jt, 2007; Walsh jt 2012). Kuna kokku on mõlemas materjalis N samapalju, siis pikema perioodi jooksul nende mõju võrdsustub, sest mikroobide tegevuse tulemusena vabaneb mullas ja muutub taimedele omastatavaks ka orgaanilise aine koosseisus olev N, mida on rohkem kääritamata materjalis. Viimastel aastatel tehtud uuringud näitavad, et NH_4-N sisaldus on hea indikaator, mille järgi hinnata kääritusjäägi N-väetise asendusväärtust. NH_4-N sisalduse põhjal arvutatud normi korral on kääritusjäägiga saadud saak sama suur kui mineraalväetisega saadud saagi puhul (Sogn jt, 2018; Tampere jt, 2014). Kuigi osa uuringuid näitavad, et indikaatoriks sobib ka $N_{üld}$, siis tasub nende puhul panna tähele, et kääritusjäägi mõju saagile võrdsustus mineraalväetise omaga neis katsetes alles teisel või kolmandal aastal (Tilvikienė jt, 2018; Doyeni jt, 2021). See on siis, kui N hakkas orgaanilisest ainest vabanema. Esimesel aastal oli saak suurem mineraalväetise variandis.

Sõnnikukääritusjäägi puhul märgitakse positiivse küljena sageli selle väiksemat viskoossust võrreldes kääritamata sõnnikuga, tänu millele see imbub kiiremini mulda (Möller jt 2008). Samas on selle pH kõrgem ja NH_4-N sisaldus suurem, mistõttu on selle kasutamisel oht NH_3

emissiooniks suurem. Seetõttu soovitatakse kääritusjääk kas laotamise käigus või kohe pärast seda sisestada mulda. Emissiooni aitab vähendada ka see, kui lisada hoidlas või laotamisel kääritusjääki pH-d alandavat hapet (Lukehurst jt, 2010; Regueiro jt, 2020).

1.6. Kääritusjäägi mõju mulla C-sisaldusele

Sõnnikul põhineva kääritusjäägi mõju mulla C-sisaldusele on kääritamata sõnnikuga samaväärne, seda vaatamata sellele, et kääritamisel liigub osa sõnnikus olevast süsinikust biogaasi (Müller, 2015). Orgaaniliste jäätmete mõju mulla C_{org} sisaldusele sõltub nende stabiilsusest ehk vastupanuvõimest lagundajate tegevusele. Seda iseloomustab raskesti lagundatavate ja labiilsete C-ühendite suhe lagundatavas materjalis (Kögel-Knabner, 2002). Kääritatud materjalis on see suurem, sest anaeroobsel kääritamisel lagundavad mikroorganismid peamiselt labiilseid C-ühendeid, kuna sealt on C neile lihtsamini omastatav. Kääritamisel lagundatakse rasvhapetest rohkem kui 90%, tselluloosist rohkem kui 50% ja hemitselluloosist rohkem kui 80%. Ligniini ja pika ahelaga alifaatseid ühendid anaeroobsel kääritamisel ei lagundata (Müller, 2015; Molinuevo-Salces jt, 2013). Kuna kääritusjäägis domineerivad raskesti lagundatavad C-ühendid, siis toimub selle lagundamine mullas aeglaselt ning mikroorganismide asemel osalevad selles protsessis esialgu rohkem seened (Barduca jt, 2021).

Kääritamata ja kääritatud materjali sarnane mõju mulla C-sisaldusele tuleb välja üksnes pikaajalistest katsetes. Vahetult pärast mulda viimist on suurema C-sisendi tõttu C-sisaldus mullas suurem kääritamata materjaliga väetades. Sama on ka mikrobioloogilise aktiivsusega. Kui võrrelda CO_2 emissiooni (iseloomustab mikrobioloogilist aktiivsust) vahetult pärast kääritatud ja kääritamata materjali mulda viimist, siis esialgu on see suurem kääritamata materjali variandis, kuid see püsib erinev lühikest aega, sest labiilsed C-ühendid lagundatakse mullas väga kiiresti. Hästi näitas seda uuring, kus võrreldi i) vedelsõnniku, ii) kääritatud vedelsõnniku ja maisi segu, iii) kääritatud vedelsõnniku segu liblikõieliste ja kõrrelistega ning iv) kääritamata liblikõieliste-kõrreliste segu mõju mikroorganismide aktiivsusele. Kääritamata liblikõieliste-kõrreliste biomassiga viidi mulda neli korda rohkem labiilset süsinikku kui teiste materjalidega, mis põhjustas seal mikroobse biomassi kiire kasvu. See kestis kokku kolm päeva ja seejärel hakkas biomass vähenema. Kuigi ka üheksandal päeval oli võrreldes teiste variantidega mikroobse biomassi kogus usutavalt suurem kääritamata materjali variandis, siis võrreldes katse algusega oli erinevus nende vahel nüüd märgatavalt väiksem. Aktiivsele labiilsete C-ühendite lagundamisele selles variandis osutas ka CO_2 ning N_2O emissioon, mis oli sellel perioodil seal teiste variantidega võrreldes ligikaudu kümme korda suurem Ka kääritamata sõnniku variandis oli CO_2 emissioon suurem kui see oli kääritatud sõnniku omas, kuid võrreldes liblikõieliste ja kõrreliste seguga oli nende vahel erinevus väiksem. Selle põhjuseks on väiksem labiilsete C-ühendite hulk sõnnikus (Johansen jt, 2013). Eeltooduga sarnase tulemuse andis ka Argentiinas tehtud uuring, kus võrreldi CO_2 emissiooni vahetult pärast kääritamata ja kääritatud sõnniku mulda viimist (Iocoli jt, 2019).

Pikemaajalistes katsetes on kääritamata ja kääritatud sõnniku mõju olnud mulla C-sisaldusele sarnane. Seda näitas nii Bachmanni jt (2014) kolm aastat, kui ka Mölleri (2009) neli aastat kestnud katse.

Kääritatud ja kääritamata sõnniku sarnast mõju mulla C-sisaldusele näitas ka Fouda jt (2013) poolt tehtud nõukatse. Seal viidi kääritamata sõnnikuga mulda C ligikaudu kaks korda rohkem kui kääritatud sõnnikuga, kuid ühe aasta kestnud katse lõpus oli C-sisaldus mõlema variandi mullas sarnane.

Viimastel aastatel on võrreldud kääritusjäägi vedela ja tahke fraktsiooni mõju mulla orgaanilise C sisaldusele. Leedus kaks aastat kestnud uuring põllul ja rohumaal näitas, et mõlemad kääritusjäägi fraktsioonid suurendasid mullas stabiilse C sisaldust, kuid suurema mõjuga oli tahke fraktsioon. Kõige suurema efekti andis kääritusjäägi tahese laotamine rohumaale (Slepetiene jt, 2022a). Kääritusjäägi mõju oli kõige suurem kuni 10 cm mullakihis, kus lisaks orgaanilisele süsinikule oli rohkem ka humiinhappeid, mis on peamine stabiilse C allikas mullas. Sügavuse suurenedes kääritusjäägi mõju proportsionaalselt vähenes (Slepetiene jt, 2022b). Need tulemused on sarnased varasematega, mis näitasid, et kääritusjäägi tahese potentsiaal suurendada mulla orgaanilise C sisaldust on võrreldes separeerimata kääritusjäägiga suurem (Müller, 2015; Wentzel jt, 2015).

Viimastel aastatel on uuritud küsimust, kas kääritusjäägi mõju mulla C-sisaldusele on võimalik suurendada biosöega. Saksamaal võrreldi liivmullal kaheaastases katses maisisilo kääritusjäägi vedela fraktsiooni ja mineraalväetise ning lisaks ka nende mõlema koosmõju biosöega, mulla orgaanilise aine sisaldusele. Nii kääritusjääki (norm arvutati $N_{üld}$ alusel) kui ka mineraalväetist anti normiga 200 kg N ha^{-1}. Biosütt anti kahel erineval moel. Ühes variandis toimus see kahel järjestikusel aastal normiga 1 t ha^{-1} (kokku kaks tonni) ja teises variandis esimesel aastal korraga 40 t ha^{-1}. Uuring näitas, et kääritusjääk suurendas stabiilse C kogust mulla agregaatides mineraalväetisega võrreldes usutavalt rohkem. Biosöe mõju oli usutav ainult selles variandis, kus normiks oli 40 t ha^{-1}. Kokkuvõttes märgivad autorid, et kääritusjäägi mulda viimist koos biosöega võib tootjatele soovitada, sest nii on võimalik kiiresti suurendada mulla agregaatide ja mineraalidega seotud orgaanilise aine kogust mullas. (Greenberg jt, 2019)

Kokkuvõttes näitavad senised uurimistööd, et anaeroobne kääritamine vähendab sõnnikus minimaalselt nende bioloogiliselt raskesti lagundatavate ühendite sisaldust, millel on mulla orgaanilisele ainele ja viljakusele pikaajaline mõju. Seetõttu on kääritatud ja kääritamata sõnnik mullale samaväärsed C-allikad (Müller, 2015). Seda järeldust toetab ka Saksamaal Saksimaa regioonis läbiviidud uuring, kus selgitati laiemalt biogaasi tootmise mõju mulla orgaanilise C sisaldusele. See näitas, et kuigi tooraine vajadusega seoses muutus biogaasijaamade rajamise järel maakasutus, vähenes enamiku taliviljade ja suurenes maisi, talirapsi, suhkrupeedi ja heintaimede külvipind ning samuti vähenes ka sõnniku kasutamine väetiseks, mis osalt oli tingitud loomade arvu vähenemisest ja teiselt poolt sellest, et sõnnikut hakati kasutama biogaasi toorainena, siis C-sisend mulda kasvas 2,1%. Seejuures C-sisend, millel on otsene mõju mulla orgaanilise C varule, suurenes 2,8%. Selle peamiseks põhjuseks oli kääritusjäägi kasutamine väetiseks, kuid selle kõrval avaldas mõju ka heintaimede külvipinna suurenemine, sest võrreldes teraviljaga on heintaimede poolt mulda jäetav C kogus suurem. (Witing jt, 2018)

1.7. Kääritusjäägiga väetamisel esinevad riskid

Kääritusjäägiga väetamisel on riskidena nimetatud neis sisalduda võivaid raskmetalle, antibiootikume, mikroplasti ja patogeenseid mikroorganisme (Lukehurst jt, 2010; Plana jt, 2016). Raskmetallide sisaldus on kõrge eelkõige tööstusest ja veepuhastusjaamadest pärit toorainet kasutavate biogaasijaamade kääritusjäägis. Põllumajanduslikul toormel töötavates biogaasijaamades see enamasti probleemiks ei ole (Baştabak jt, 2020). Kääritusjäägi antibiootikumide ja steroidide sisalduse kohta õnnestus leida üks uuring Norrast. See näitas, et kui tervikuna oli antibiootikumide ja steroidide sisaldus kääritusjäägis (mittepõllumajanduslik tooraine) üldiselt madal, siis üksikutes proovides oli kõrge amoksitsilliini, penitsilliin G, tsiprofloksatsiini, impronidasooli ja prednisolooni sisaldus. Autorid märgivad, et kui neid ei elimineerita, siis võivad need kahjustada mullas mikroorganisme ja põhjustada antibiootikumiresistentsuse suurenemist (Nesse jt, 2022).

Kääritusjäägis sisalduvad patogeensed bakterid võivad mõjuda negatiivselt silo kvaliteedile. Eestis võrreldi aastatel 2013–2014 mineraalväetise, vedelsõnniku ja vedelsõnniku kääritusjäägiga väetatud taimikult kogutud biomassist toodetud silo kvaliteeti. Kõik orgaanilised väetised anti kevadel, rohukasvu alguses taimiku pinnale. Uuring näitas, et väetise liigil ei olnud olulist mõju rohusilo mikroobikooslusele. Variantides, kus sileerimisel kasutati SIL-ALL kindlustuslisandit jäi kahjulike mikroobide (*coli*-laadsed, võihappebakterid, enterobakterid) arvukus madalaks ning silo klassifitseerus heaks siloks. Kokkuvõttes märgib autor, et rohumaa väetamine kääritusjäägi või vedelsõnnikuga ei suurenda rohusilo saastumise riski silo kvaliteeti kahjustavate mikroobidega (Mõttus, 2016). Antud uuringu puhul peab siiski kommentaarina märkima, et kõik katsetööd tehti käsitsi, mistõttu sattus kääritusjäägi ja sõnniku osakesi biomassi sisse tõenäoliselt vähem kui see on tootmispõldudel, kus biomassi kaarutatakse ja vaalutatakse.

1.7.1. Leostumine

Veeseaduses (2019) on sätestatud, et orgaanilist väetist tohib põllule laotada 20. märtsist kuni 1. novembrini. Laotamine on keelatud kui maapind on külmunud, lumega kaetud, perioodiliselt üle ujutatud või veega küllastunud.

Eestis tehtud uuringud näitavad, et toitained leostuvad peamiselt pärast saagi põllult koristamist. Keskkonnale negatiivse mõjuga elementidest leostub suurel määral ainult lämmastik. Peamiselt toimub see NO_3-N-na, sest negatiivse laengu tõttu seda ühendit muld ei seo. Varakevadel ja hilissügisel, kui nitrifitseerivate bakterite tegevus on madala mullatemperatuuri tõttu pärsitud võib lämmastik leostuda vähesel määral ka NH_4-N-na. Fosfori leostumine on olnud katsetes väike. (Raave jt, 2010; Raave, 2020).

Lämmastiku leostumise oht on kääritusjäägi ja vedelsõnniku kasutamisel sarnane. Kääritusjäägis on NH_4-N osakaal kogulämmastikust vedelsõnnikuga võrreldes ligi 37% suurem (Tabel 6). Mikroorganismid muundavad selle ühendi mullas kiiresti NO_3-N (Johansen jt, 2013), mis leostub, i) kui sellele ei ole taime näol tarbijat (põld on ilma taimkatteta), ii)

NO_3-N kogus on suurem kultuuri N omastamise võimest või iii) väetist antakse vegetatsiooniperioodi lõpus, kui taimede kasv on madala temperatuuri ja valguse intensiivsuse tõttu pärsitud. Viimast näitas Eestis tehtud uuring, millest selgus, et suur osa umbes kaks nädalat enne vegetatsiooniperioodi lõppu kääritusjäägiga mulda viidud lämmastikust oli kevadeks leostunud (Penu jt, 2023). Sama juhtub ka siis, kui anda sügisel ilma taimkatteta põllule vedelsõnnikut. Seejuures ei ole vahet, kas seda tehakse septembris, oktoobris või novembris. Lämmastikku leostub samapalju (Raave, 2020; Raave, 2021). Vedelsõnniku puhul tekib leostumine peamiselt seetõttu, et seal on palju lämmastikku orgaanilise aine kossesisus, kust see mineraliseerub ka siis kui taimed seda ei vaja.

Uuringuid, kus on võrreldud N leostumist vedelsõnniku ja kääritusjäägi kasutamisel on teada vähe. Eestis uuriti viis aastat kestnud katses lämmastiku leostumist seavedelsõnniku ja selle kääritusjäägiga väetamisel. Mõlema väetise norm arvutati NH_4-N sisalduse põhjal ja väetist anti kõigil katseaastatel. Tulemused näitasid, et kääritusjäägi kasutamisel leostus lämmastikku oluliselt vähem, sest suurema NH_4-N sisalduse tõttu kulus samasuure lämmastiku normi andmiseks kääritusjääki vedelsõnnikust vähem (Raave, 2014).

Agrotehnilised võtted, mis aitavad vähendada N leostumist, on kääritusjäägi ja vedelsõnniku puhul samad. Mõlemat tuleks anda sügisel ainult taimestatud põllule (Raave, 2020, Raave, 2021) ja nendega antav NH_4-N kogus ei tohi olla suurem põllul kasvava kultuuri lämmastiku omastamise võimest. Sügisel peab väetamine toimuma varakult, et taim jõuaks enne vegetatsiooniperioodi lõppu siduda väetisest vabaneva lämmastiku enda biomassi. Augustist alates kultuuride lämmastiku omastamise võime väheneb, mistõttu tuleb väetise kogust vähendada, kui väetamine toimub hiljem (Toom jt, 2019; Delin jt, 2020; Raave, 2021).

Ülal loetletud võtted aitavad leostumist küll vähendada, kuid neist ükski ei lõpeta toitainete leostumist täielikult. Eesti kliima soojeneb, mis on soodne orgaanilise aine lagundajate tegevusele. Samas periood, millal maapind on talvel külmunud, on muutunud lühemaks. Taimed on talvel valdavalt puhkeseisundis, mistõttu suur osa toiteelementidest, mis sellel perioodil orgaanilisest ainest vabaneb, leostub. Seda demonstreeris kolm aastat kestnud uuring, kus heintaimedele vedelsõnniku ja mineraalväetisega sama suure N normi andmisel, oli N leostumine talvisel perioodil oluliselt suurem vedelsõnniku variandis (Raave jt, 2010; Tampere jt, 2015). Sellest tulenevalt, tuleks kaaluda orgaaniliste väetiste kasutamise vähendamist sügisel. Selleks on esmalt vaja lahendada vedelsõnniku ja kääritusjäägi ületalve hoiustamise probleem. Võimalikuks lahenduseks võib siin olla nii mahutite arvu suurendamine kui ka vedelsõnniku ja kääritusjäägi mahu vähendamine läbi separeerimise ja toiteelementide välja puhastamise vedelsõnniku või kääritusjäägi vedelast fraktsioonist. Vastavad tehnoloogiad on maailmas olemas (https://www.livestockwaterrecycling.com/the-system, https://usfarmsystems.com/separators/, https://www.smicon.nl/en/industry/manure-digestate jmt), kuid nende efektiivsus, tasuvus ning samuti seadmete töökindlus vajavad Eesti oludes enne praktikasse juurutamist põhjalikku testimist.

2. Ülevaade biogaasi tootmiseks sobiliku toormemahtudest, tingimustest ja nõuetest Eestis

2.1. Toorme liigid ja maht

Põllumajanduslikes biogaasijaamades on traditsiooniliselt peamiseks kääritatavaks substraadiks veiste ja sigade vedelsõnnik, vähemal määral ka tahe- ja sügavallapanusõnnik, sealhulgas linnukasvatusest pärinev tahesõnnik. Lisasubstraatide spekter on lai. Sageli kasutatakse toormena rohtset biomassi, eeskätt rohusilo ja teravilja esmatöötlemise jääke. Samuti tulevad arvesse toiduainetööstuse mitmesugused kõrvalsaadused nagu vadak, praakjuust, õlleraba jpm. Märkimisväärse biogaasi potentsiaaliga on ka muud loomsed kõrvalsaadused. Tulenevalt kehtivast seadusandlusest on lubatud lisasubstraadina kasutada vaid 3. kategooria hügieniseeritud (termiliselt töödeldud) loomseid jäätmeid (Keskkonnaministri määrus nr 12, 2023).

2.1.1. Looma- ja linnusõnnik

Eestis peetakse 249,4 tuhat veist (kellest kolmandik moodustavad piimalehmad), 269,4 tuhat siga, 65,7 tuhat lammast ja kitse ning 2,0 miljonit kodulindu (tabel 7).

Tabel 7. Põllumajandusloomade ja lindude arv seisuga 31.12.2022

Looma liik	**Arv (tuhandetes)**
Veised	249,4
Piimalehmad	83,9
Ammlehmad	30,8
Lehmmullikad, 2-aastased ja vanemad	12,8
Mullikad, 1- kuni 2-aastased	49,0
Vasikad, kuni 1-aastased	69,0
Sead	269,4
Põrsad, < 20 kg	92,9
Kesikud, 20–50 kg	50,9
Nuumsead, vähemalt 50 kg	102,9
Nuumsead, 50–80 kg	52,0
Nuumsead, 80–110 kg	37,3
Nuumsead, > 110 kg	13,6
Sugusead (emised ja kuldid)	22,7
Lambad ja kitsed	65,7
Kodulinnud	2 046,2

Allikas: Statistikaamet.

Tervikuna ei ole kogu Eesti looma- ja linnukasvatuses tekkiv sõnnik biogaasi tootmise kontekstis toormena kasutatav. Piiravateks teguriteks on:

- **Ettevõtte suurus.** Väikese loomade arvu korral on tekkiva sõnniku kogus tagasihoidlik.
- **Pidamisviis.** Loomade karjatamisel vegetatsiooniperioodil satub suur osa väljaheidetest karjamaale, mida ei koguta.
- **Ettevõtte asukoht.** Eraldiasuvatest ja eeskätt väiksematest loomakasvatusettevõtetest ei ole sõnniku transport biogaasijaama ja kääritusjäägi transport tagasi põllumajandustootjale majanduslikult otstarbekas (Värnik jt, 2022). Antud kontekstis on mõeldav väiksemate (spetsialiseerunud) koostööprojektide teke, mis võib anda olulise panuse põllumaade mullaelustiku ja mullaorgaanika piirkondlikuks kasutamiseks (näiteks kompostimisel).

Seega on biogaasi tootmiseks atraktiivsed just suuremad ja intensiivse tootmistüübiga piimtootmise ja sea- või linnukasvatusega tegelevad ettevõtted. Lihaveise-, lamba- ja kitsekasvatus ning hobuste pidamine seetõttu arvesse ei tule. Tabelis 8 on esitatud loomade arv keskkonna kompleks- ja välisõhu saasteluba omavates ettevõtetes 2022. aasta seisuga, samuti arvutuslik väljaheidete produktsioon ja jaotus sõnnikutüüpide lõikes. Vastav arvutusskeem ja koefitsiendid on toodud maaeluministri määrusest nr 73 "Eri tüüpi sõnniku toitainesisalduse arvutuslikud väärtused, põllumajandusloomade loomühikuteks ümberarvutamise koefitsiendid ja sõnnikuhoidla mahu arvutamise metoodika" paragrahvis 4.

Tabel 8. Loomade arv, sõnniku produktsioon ja -jaotus tüüpide lõikes keskkonna kompleks- ja välisõhu saasteluba omavates loomakasvatusettevõtetes, 2022

Sõnniku tüüp ja osakaal									
Looma liik ja vanuserühm		Vedel		Tahe		Sügavallapanu		Karjamaale	
	Loomade arv	Osakaal %	Kogus t	Osakaal %	Kogus t	Osakaal %	Kogus t	Osakaal %	Kogus t
Piimalehmad	64117	93,1	1588520	2,4	40989	3,2	54788	1,3	22782
Ammlehmad (lihaveised üle 24 kuu)	2520	4,8	1014	0,4	86	51,3	10722	43,5	9092
Lehmvasikad (0…6 kuud)	33024	19,9	17059	0,0	0	70,4	60455	9,7	8348
Pullvasikad (0…6 kuud)	1254	6,7	202	0,0	0	70,8	2131	22,4	675
Lehmmullikad (7 kuud…poegimine)	37810	43,3	186544	7,1	30430	39,3	169369	10,4	44694
Pullmullikad (7 kuud…realiseerimine)	1036	10,4	751	0,8	61	65,7	4765	23,1	1677
Nuumsead	173584	91,0	79019	0,0	0	9,0	7774	0	0
Võõrdepõrsad	66065	100,0	4625	0,0	0	0,0	0	0	0
Põhikarja emised	12390	80,8	40027	19,2	9532	0,0	0	0	0
Nooremised	1641	100,0	2133	0,0	0	0,0	0	0	0
Munakanad	457880	0,0	0	0,0	0	100,0	20147	0	0
Noorlinnud	171799	0,0	0	0,0	0	100,0	1031	0	0
Broilerid	1317771	0,0	0	0,0	0	100,0	4876	0	0
Kokku			1919894		81099		336057		87269

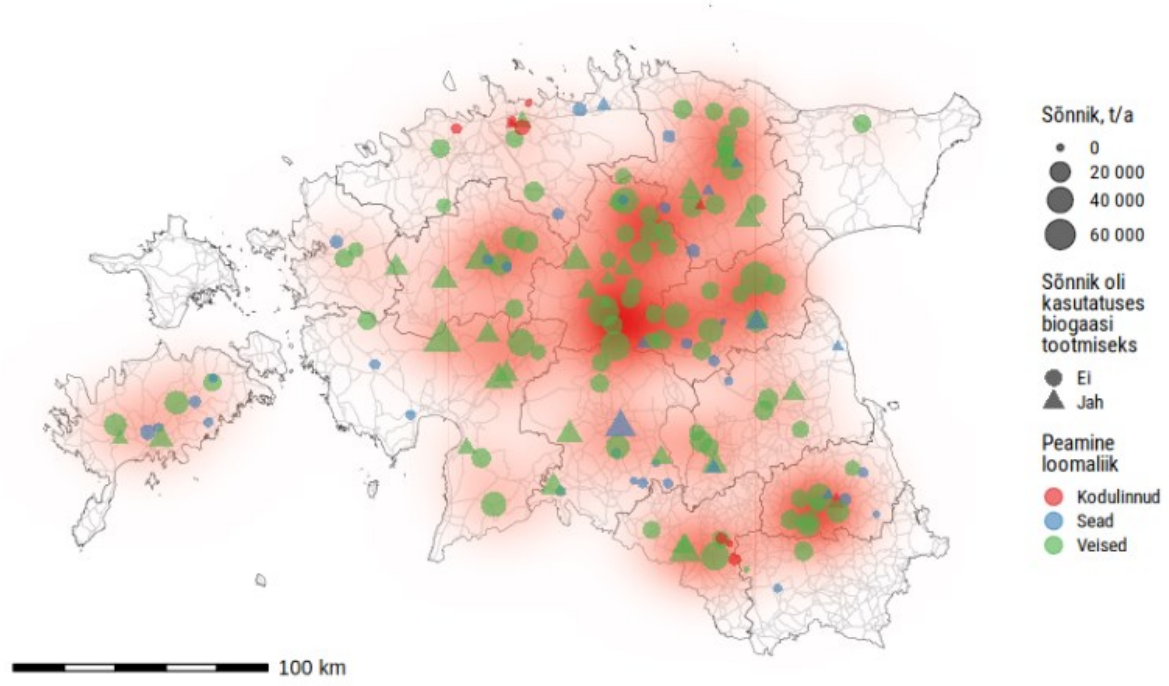
*Karjatamisel rohumaadele jääva sõnniku kogust ei ole kalkulatsioonides arvestatud.

**Piimalehmade sõnniku kogus on korrigeeritud vastavalt piimatoodangule.

Allikas: Autorite arvutused KAUR-i keskkonnaotsuste infosüsteemi KOTKAS asuvate 2022. aasta aastaaruannete alusel.

Tabelist nähtub, et 2022. aastal tekkis keskkonnakompleks- ja välisõhu saasteluba omavates ettevõtetes arvestuslikult umbes 2,42 miljonit tonni eri tüüpi looma- ja linnusõnnikut, millest **teoreetiliselt oleks biogaasijaamades sisendmaterjalina võimalik kasutada umbes 2,34 miljonit tonni.** Sellest omakorda vedelsõnnik põhisubstraadina moodustab 1,92 miljonit ning

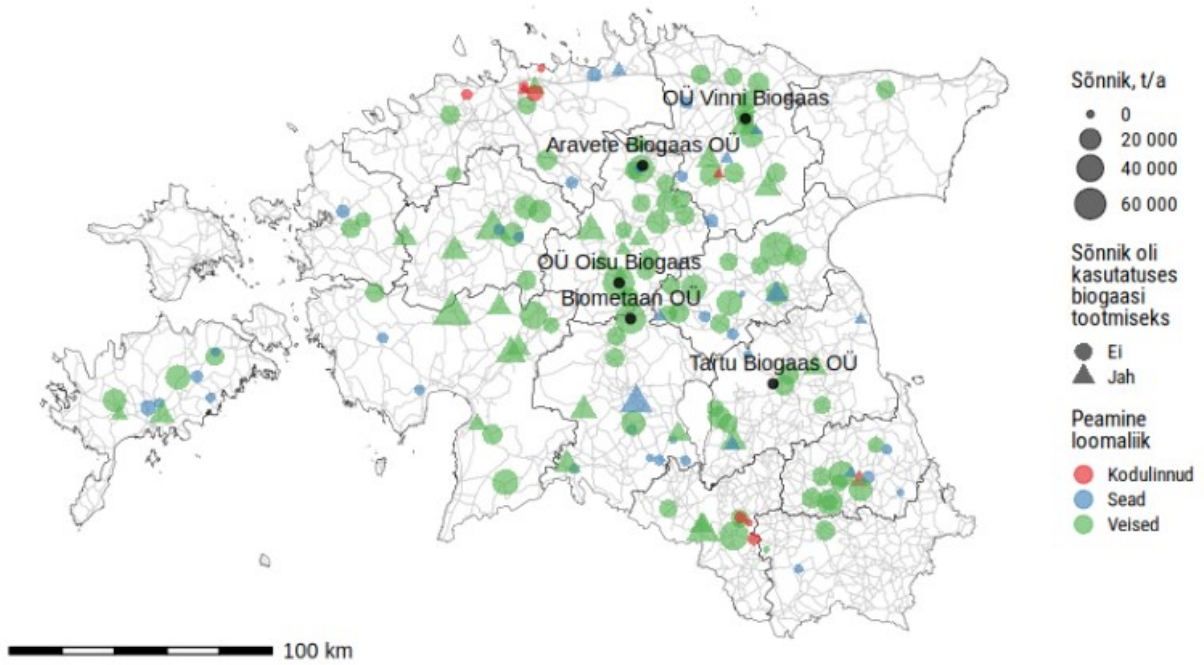
tahe- ja sügavallapanusõnnik 0,42 miljonit tonni. Arvestuslikult kasutati 2022. aastal biogaasi tootmiseks 360 165 tonni sõnnikut ehk 14,9% eri tüüpi looma- ja linnusõnnikust. Joonistel 3–5 on esitatud looma- ja linnusõnniku ressursi jaotus Eesti suuremate põllumajandusettevõtete lõikes (joonis 3), 2022. aastal viie põllumajandusliku biogaasijaama paiknemine (joonis 4) ning sõnniku ressursi jagunemine regiooniti (joonis 5).



Joonis 3. Looma- ja linnusõnniku ressursi jaotus Eestis, 2022

Allikad: Autorite arvutused KAUR-i keskkonnaotsuste infosüsteemi KOTKAS asuvate 2022. aasta aastaaruannete alusel. Eesti topograafia andmekogu, Maa-amet, 2023. Põllumajanduse Registrite ja Informatsiooni Amet (PRIA), 2023.

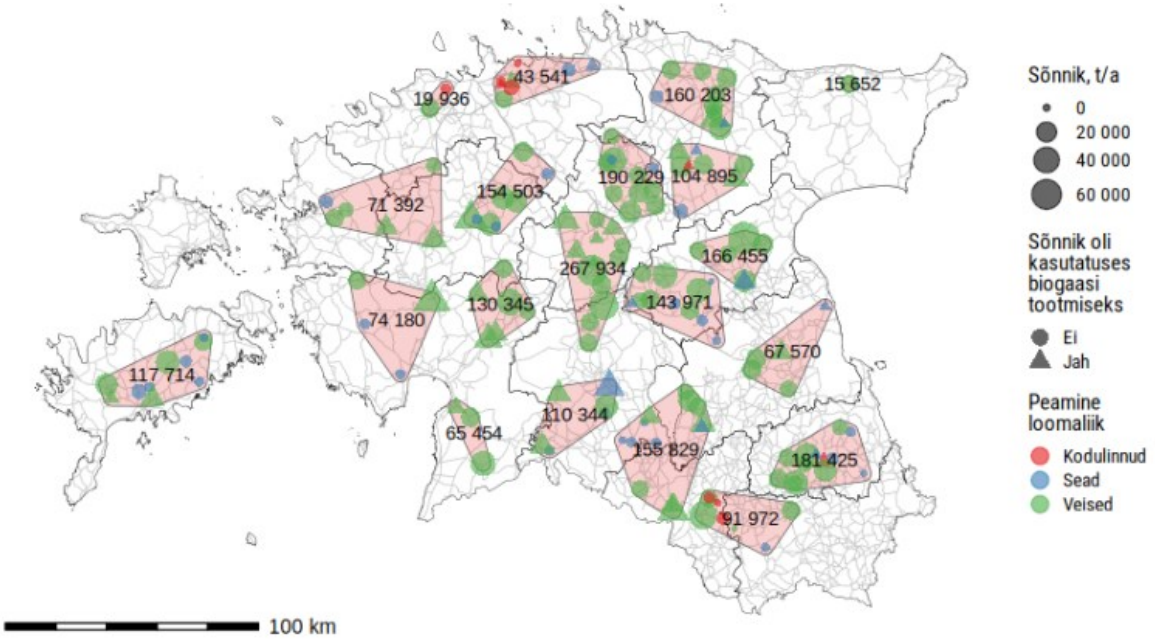
Jooniselt 3 nähtub, et suurtootmises tekkiva looma- ja linnusõnniku ressurss jaguneb Eestis küllatki ebaühtlaselt. Suurima kontsentratsiooniga on Kesk-Eesti ja Virumaa ning Lõuna-Eesti, samuti Saaremaa. Lääne- ja Põhja-Eestis ning Hiiumaal on sõnniku ressurss biogaasi tootmiseks tagasihoidlik.



Joonis 4. Põllumajanduslike biogaasijaamade paiknemine, 2022

Allikad: Autorite arvutused KAUR-i keskkonnaotsuste infosüsteemi KOTKAS asuvate 2022. aasta aastaaruannete alusel. Eesti topograafia andmekogu, Maa-amet, 2023. PRIA, 2023.

2022. aastal opereerinud põllumajanduslikud biogaasijaamad paiknesid (joonis 4) sarnaselt joonisel 3 toodud ressurssi jaotusele just Kesk-Eestis ja Lääne-Virumaal.



Joonis 5. Looma- ja linnusõnniku ressursi jagunemine regiooniti, 2022

Allikad: Autorite arvutused KAUR-i keskkonnaotsuste infosüsteemi KOTKAS asuvate 2022. aasta aastaaruannete alusel. Eesti topograafia andmekogu, Maa-amet, 2023. PRIA, 2023.

Joonisel 5 kajastatud regionaalse looma- ja linnusõnniku ressursi jaotuse ja suurte loomakasvatusettevõtete paiknemise põhjal on võimalik prognoosida uute põllumajanduslike biogaasijaamade eeldatavat arvu ja paiknemist. Samas tuleb arvestada sellega, et osa sõnnikuressursist on juba kasutusel tegutsevates biogaasijaamades. Uute biogaasijaamade lisandumisel võivad muutuda tänased sisendi tarneahelad transpordikulude mõistes efektiivsemaks.

2.1.2. Muud loomsed kõrvalsaadused ja kalandussektoris tekkivad toidujäätmed

Tulenevalt jäätmeseadusest (2023) jagunevad loomsed kõrvalsaadused kolme kategooriasse. Keskkonnaministri määruse nr 12 lisa 1 (2023) kohaselt on anaeroobseks kääritamiseks lubatud kasutada ainult 2. ja 3. kategooria loomseid kõrvalsaadusi, milleks on harjase ja sarve jäätmed, vill, suled, karvad, sarved, kabja lõikamise jäägid, toorpiim, koorikloomade koorikud, munad, hautamise kõrvalsaadused ja seedetrakt. Biogaasi tootmiseks ei ole lubatud kasutada 1. kategooria loomseid kõrvalsaadusi (loomakorjused, teatavad siseorganid jms).

Ohtlike loomsete ja erijäätmete utiliseerimisega tegeleb Eestis Vireen AS. **2022. aastal käideldi AS-is Vireen summaarselt 8000 tonni ülalnimetatud jäätmeid**. Utiliseerimise lõpp-produktideks oli 1066 tonni loomseid rasvu ning 2358 tonni liha-kondijahu.

Uuringu „Toidujäätmete ja toidukao teke Eesti toidutarneahelas“ (Värnik jt, 2021) tulemuste kohaselt tekkis **2020. aastal kalapüügil Läänemeres hinnanguliselt 779 tonni ja kalapüügil Eesti sisevetes hinnanguliselt 35 tonni toidujäätmeid.** Toidujäätmete hulka ei ole arvestatud soovimatut kaaspüüki (hülged vms). Kalurite seas kõige sagedamini mainitud tegur toidukao tekkimisel olid loomad (hülged, saarmad, mingid vms) ja linnud (kormoranid, kajakad vms), kes rikkusid kala püügivahendis. Püügivahendis kala riknemise põhjusena mainiti korduvalt ka vee kehva kvaliteeti, sh reostust, setteid ja vetikaid. Samuti oli kao põhjuseks kohatine liiga kõrge vee temperatuur püügipaigas ja tormine ilm, mis püünisesse jäänud kala lõhub. (Värnik jt, 2021) **Kalakasvatuses tekkis 2020. aastal hinnanguliselt üks tonn toidujäätmeid aastas**. Põhjuseks on kaubakala loomulik suremus, röövloomade põhjustatud vigastused ja kaubakala pikk hoiustamine periood. (Piirsalu jt, 2021)

2.1.3. Rohtne biomass

Rohtse biomassi, mida on otstarbekas ilma eelneva mehaanilise töötlemiseta (v.a peenestamine) biogaasi tootmiseks lisasubstraadina märgkääritites kasutada, moodustavad eeskätt erinevat liiki silod (rohu-, vilise- ja maisilo). Lisasubstraadina kasutatava rohtse biomassi (st silo) kvaliteet peab vastama loomade söötmiseks kasutatava rohusööda miinimumnõuetele. Rohtse biomassi, mis on saadud ülekasvanud (puitunud) taimsest materjalist (näiteks põhk, suve teisel poolel koristatud luhahein jms), biogaasi potentsiaal on tagasihoidlik. Selle põhjuseks on asjaolu, et taimiku vananedes suureneb rohttaimede rakkudes oluliselt kompleksühendite

osatähtsus, mille lagundamiseks puuduvad biogaasi sünteesis tähtsatel mikroorganismidel liigispetsiifilised ensüümid. Seetõttu ei saa ka kvaliteetse rohtse biomassi, eeskätt rohusilo kui lisasubstraadi osatähtsus märgkääritites olla väga suur. **Eestis tegutsevate biogaasijaamade esindajate küsitlusandmetele tuginedes kasutati 2022. aastal põllumajanduslikes biogaasijaamades 20 730 tonni rohusilo ja silojääke, mis moodustas keskmiselt 5,7% (minimaalselt 2,15% ja maksimaalselt 9,3%) summaarsest substraatide kogusest**.

2.1.4. Toiduainete valmistamisel ja töötlemisel tekkinud biolagunevad jäätmed

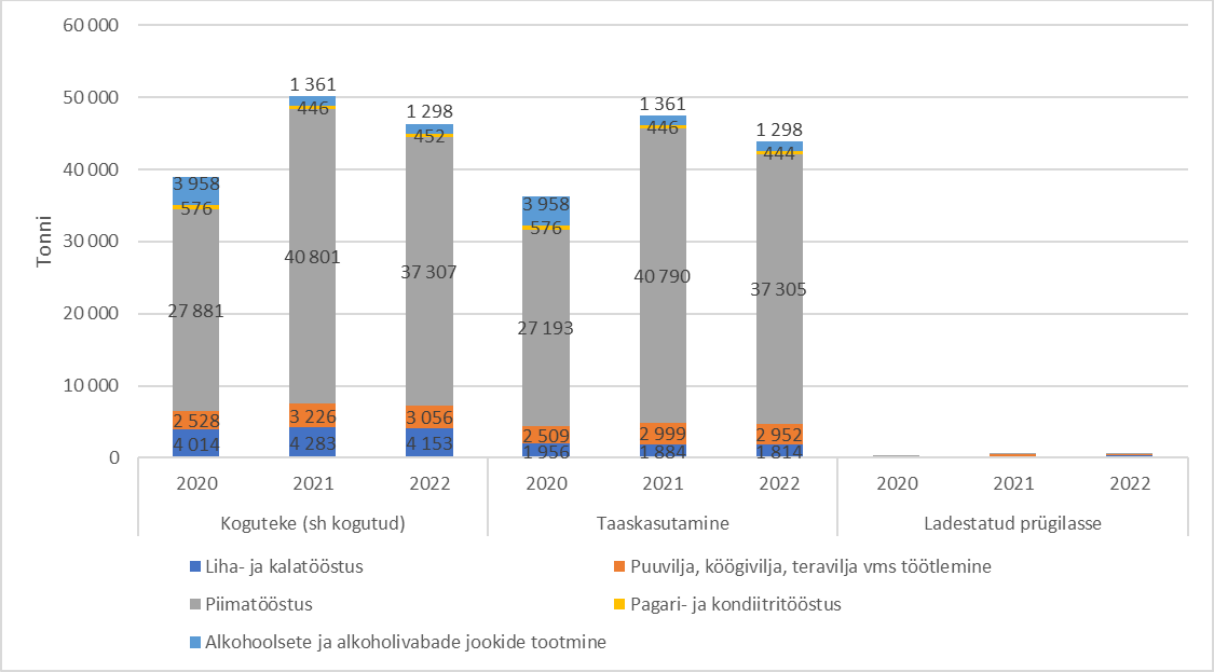
Biogaasi tootmisel kasutatakse lisasubstraadina toiduainetööstuses tekkinud selliseid biolagunevaid jäätmeid nagu tarbimis- ja töötlemiskõlbmatuid materjale (praaktooteid, realiseerimisaja ületanud tooteid, köögi- ja puuviljade koori vms), toorme pesemisel, puhastamisel ja esmasel töötlemisel tekkinud jäätmeid, loomsete kudede jäätmeid, vadakut, melassi ja piirituse destilleerimisjääke (tabel 9). Biogaasi tootmisel võib kasutada ka toiduainetööstuse reovee kohtpuhastussetteid tingimusel, kui pesemisel ei ole kasutatud sünteetilisi lisaaineid. Teada on (Värnik jt, 2022), et Eestis tegutsevad põllumajandustoormel põhinevad biogaasijaamad kasutavad toormena piimatööstuse reoveesetet ning seetõttu on ülevaate tegemisel arvestatud piimatööstustest pärineva reoveesetete kogusega. Ülejäänud toiduainetööstuste reoveesetete kogused on arvestusest välja jäetud, kuna on teadmata, kas eelnevalt nimetatud tingimus on täidetud või mitte.

Tabel 9. Toiduainete valmistamisel ja töötlemisel tekkinud biolagunevate jäätmete liigid, mis on töö autorite hinnangul sobilikud biogaasi tootmiseks

Jäätmekood ja -liigi nimetus	**Täpsustatud jäätmekood ja -liigi nimetus**
02 02 Liha, kala ja muude loomsete toiduainete valmistamisel ja töötlemisel tekkinud jäätmed	02 02 02 Loomsete kudede jäätmed
	02 02 03 Tarbimis- või töötlemiskõlbmatud materjalid
02 03 Puu-, köögi- ja teravilja, toiduõli, kakao, kohvi, tee ja tubaka töötlemisel ning valmistamisel, konservitootmisel, pärmi ja pärmikontsentraadi tootmisel ning melassi valmistamisel ja kääritamisel tekkinud jäätmed	02 03 01 Pesemis-, puhastamis-, koorimis-, tsentrifuugimis- ja separeerimissetted
	02 03 04 Tarbimis- või töötlemiskõlbmatud materjalid
02 05 Piimatööstusjäätmed	02 05 01 Tarbimis- või töötlemiskõlbmatud materjalid
	02 05 02 Reovee kohtpuhastussetted
	02 05 98 Vadak
02 06 Pagari- ja kondiitritööstusjäätmed	02 06 01 Tarbimis- või töötlemiskõlbmatud materjalid
	02 06 99 Nimistus mujal nimetamata jäätmed (melass)
02 07 Alkohoolsete ja alkoholivabade jookide (välja arvatud kohv, tee ja kakao) tootmisjäätmed	02 07 01 Toorme pesemisel, puhastamisel ja mehaanilisel töötlemisel (peenestamisel ja jahvatamisel) tekkinud jäätmed
	02 07 02 Piirituse destilleerimisjäägid
	02 07 04 Tarbimis- või töötlemiskõlbmatud materjalid

Arvestades vaid neid biolagunevaid jäätmeid, mis on kõige sobilikumad biogaasi tootmiseks (tabel 9), võib öelda, et kolme aasta võrdluses on toiduainetööstuses tekkinud ja taaskasutatud jäätmete maht kasvanud (joonis 6). **Kui 2020. aastal tekkis toiduainetööstuses 38 956 tonni**

biolagunevaid jäätmeid, siis 2021. aastal juba 50 117 tonni ja 2022. aastal 46 266 tonni biolagunevaid jäätmeid, mida saaks peamiselt põllumajandustoormel töötavates biogaasijaamades toormena kasutada. Mahu poolest tekkis biolagunevaid jäätmeid kõige enam piimatööstuses (eelkõige reovee kohtpuhastussetteid ja vadakut).



Joonis 6. Toiduainetöötuses tekkinud, taaskasutatud ja prügilasse ladestatud biolagunevate jäätmete maht (t), 2020–2022
Allikas: KAUR, https://tableau.envir.ee/views/Avalikud_pringud_2020-2022/Riigitasand?%3Aembed=y&%3Aiid=4&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y

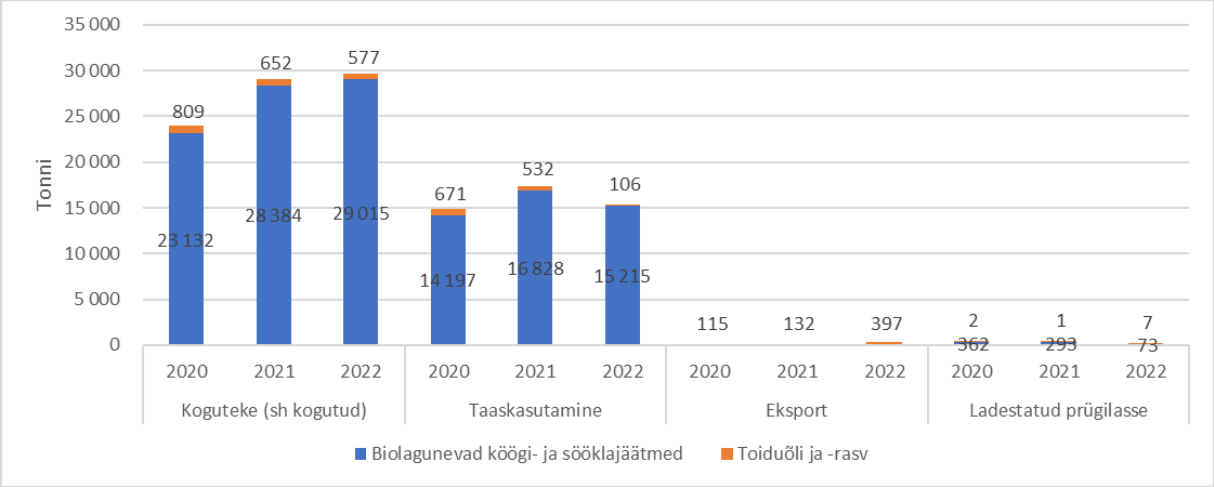
Toiduainetööstuses tekkinud biolagunevatest jäätmetest taaskasutati[7] 2020. aastal 92,9% ning 2021. ja 2022. aastal 94,7%. Vaatlusalusel kolmel aastal taaskasutati joogitootmises tekkinud kogu biolagunevate jäätmete maht ning pagari- ja kondiitritööstuses, piimatööstuses ja puuvilja, köögivilja, teravilja vms töötlemisel tekkinud peaaegu kogu biolagunevate jäätmete maht. Liha- ja kalatööstuses tekkinud biolagunevatest jäätmetest taaskasutati veidi vähem kui pool. Aastatel 2020–2022 ladestati prügilasse 1% toiduainetööstuses tekkinud biolagunevatest jäätmetest. Suurema osa prügilasse ladestatud biolagunevatest jäätmetest pärinesid liha- ja kalatööstusest.

2.1.5. Köökides ja sööklates tekkinud biolagunevad jäätmed

Köökides ja sööklates tekkinud biolagunevate jäätmete hulka on arvatud nii biolagunevad köögi- ja sööklajäätmed (jäätmekood 20 01 08) ning toiduõli ja -rasv (jäätmekood 20 01 25). Toiduõli ja -rasva on lubatud biogaasijaamades kasutada eelkõige juhul, kui tegemist on köögijäätmetega.

[7] KAUR-i jäätmete infopäringu keskkond sisaldab jäätmete koguste kuvamisel andmeid nende taaskasutamise kohta, kuid kus, mil viisil ja milleks on jäätmeid kasutatud, et täpsustata.

Kolme aasta võrdluses on köökides ja sööklates tekkinud biolagunevate jäätmete tekke- ning nende taaskasutatud maht kasvanud (joonis 7). **Kui 2020. aastal tekkis köökides ja sööklates 23 940 tonni, siis 2021. aastal 29 036 tonni ja 2022. aastal 29 592 tonni biolagunevaid jäätmeid.**



Joonis 7. Köökides ja sööklates kogutud, taaskasutatud, eksporditud ja prügilasse ladestatud biolagunevate jäätmete maht (t), 2020–2022
Allikas: KAUR, https://tableau.envir.ee/views/Avalikud_pringud_2020-2022/Riigitasand?%3Aembed=y&%3Aiid=4&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y

Köökides ja sööklates tekkinud biolagunevatest jäätmetest taaskasutati 2020. aastal 62,1%, 2021. aastal 59,8% ja 2022. aastal 51,8% biolagunevate jäätmete mahust. Taaskasutati eelkõige toiduõli ja -rasva (2020. aastal 83,0%, 2021. aastal 81,6% ja 2022. aastal 18,3% biolaguneva jäätmetena registreeritud toiduõli ja -rasva mahust), mille taaskasutus on asendumas eksportimisega. Kui 2020. aastal eksporditi 14,2% biolaguneva jäätmetena registreeritud toiduõli ja -rasva mahust, siis 2021. aastal 20,3% ja 2022. aastal 68,9%. Kasutatud toiduõli ja -rasva eksporditi Leetu ja Hollandisse. Vaatlusalusel kolmel aastal ladestati prügilasse vähem kui 1,5% köökides ja sööklates tekkinud biolagunevate jäätmete mahust.

2.1.6. Biolagunevad kodumajapidamisjäätmed

KAUR-i jäätmete infopäringu keskkond sisaldab andmeid biolagunevate jäätmete kohta, mis on aia- ja haljastusjäätmed ning biolagunevad kodumajapidamisjäätmed (tabel 10), mis omakorda pärinevad nii kodumajapidamisest, aga ka kaubandusest, tööstusest, ametiasutustest ja turgudelt (liigiti kogutud köögiviljad ja muud biolagunevad jäätmed).

Tabel 10. Biolagunevad olmejäätmed kodumajapidamistest, kaubandusest, tööstusest ja ametiasutustest

Jäätmekood ja -liigi nimetus	**Täpsustatud jäätmekood ja -liigi nimetus**
20 02 Aia- ja haljastusjäätmed (sh kalmistujäätmed)	20 02 01 Biolagunevad jäätmed
20 03 Muud olmejäätmed	20 03 01 Prügi (segaolmejäätmed), kodumajapidamisjäätmed
	20 03 02 Turgudel tekkinud jäätmed, kodumajapidamisjäätmed

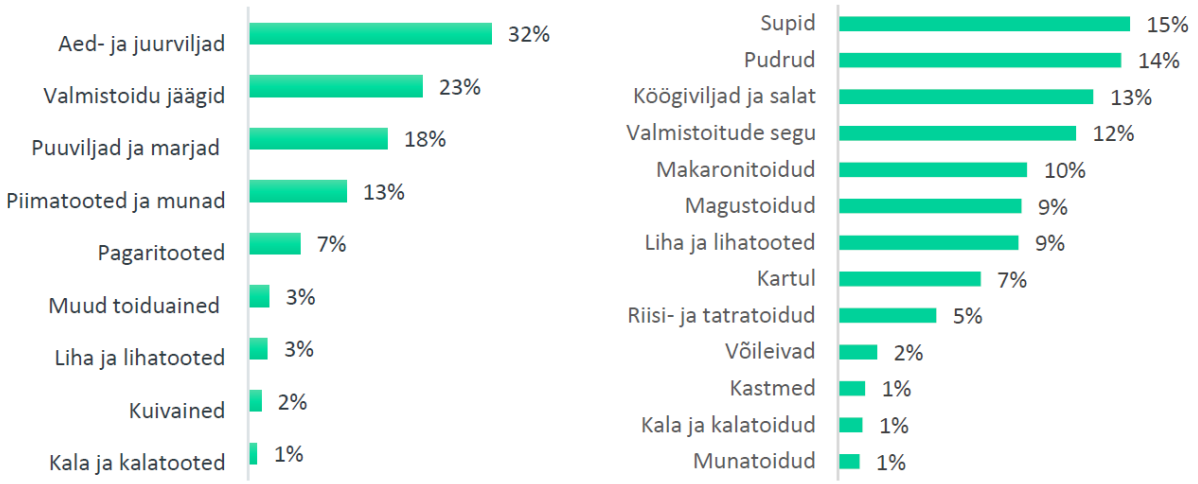
Nimetatud biolagunevad olmejäätmed sisaldavad selliseid jäätmeid, mis töö autorite hinnangul biogaasi tootmiseks sobilikud ei ole. Kaubandusvõrgust ja hulgiladudest saadud pakendatud toiduained kõlbavad biogaasi tootmiseks juhul, kui neilt eemaldada pakend. Selline seade on kasutusel Torma prügilas ja EKT EcoBio biogaasijaamas Maardus. Haljastujäätmete biogaasi tootlikkus on väike ning nad on hooajalised. Lisaks tuleks neid kääritada kuivkääritamisel, mille tehnoloogiat Eestis ei kasutata. Segaolmejäätmetena kogutavates jäätmetes olevat biomassi ei saa biogaasi tootmiseks kasutada, sest sel juhul oleks kääritusjäägis võõriste sisaldus liiga suur ja raskmetalle palju. Lisaks tohib alates 2027. aastast ringlussevõtu sihtarvude hulka arvestada vaid liigiti kogutud biolagunevaid jäätmeid. Segaolmejäätmetena kogutud massist biolaguneva eraldamine selle hulka ei kuulu. Olmejäätmetes oleva biolaguneva fraktsiooni kasutamine biogaasi tootmiseks oleneb seega üheselt sellest, kas neid on võimalik eraldi koguda. Kui jäätmed on liigiti kogutud, siis selline biomass kõlbab biogaasi tootmiseks.

Aastatel 2019–2020 Stockholmi Keskkonnainstituudi Tallinna Keskuse (SEI Tallinn) korraldatud uuringu "Segaolmejäätmete, eraldi kogutud paberi- ja pakendijäätmete ning elektroonikaromu koostise ja koguste uuring" tulemuste kohaselt sisaldasid segaolmejäätmed (jäätmekood 20 03 01) köögi- ja sööklajäätmeid keskmiselt 23,3% (Moora jt, 2020). **Seega oleks arvutuste kohaselt kodumajapidamises tekkivate toidujäätmete kogus 2020. aastal 75 190 tonni, 2021. aastal 74 462 tonni ja 2022. aastal 73 910 tonni**. Samas 2021. aastal SEI Tallinna ja EMÜ koostöös valminud uuringu „Toidujäätmete ja toidukao teke Eesti toidutarneahelas" tulemuste kohaselt tekitavad Eesti kodumajapidamised hinnanguliselt 80 000 tonni toidujäätmeid[8] aastas, millest 42% ehk ligikaudu 34 000 tonni moodustab toidukadu[9] ehk raisatud toit (Piirsalu jt, 2021). Vahet KAUR-i jäätmete infopäringu keskkonna andmetele tugineva arvutuse ja uuringu tulemuste põhjal arvutatud tulemuste vahel võib osaliselt põhjendada sellega, et küllalt suur kogus kodumajapidamistes tekkivatest toidujäätmetest ei jõua tavapärasesse jäätmekäitlusse. Hinnanguliselt 10% tekkinud toidujäätmetest kompostitakse, 5% antakse lemmikloomadele ning 5% valatakse kanalisatsiooni. Need toidujäätmete kogused ei kajastu jäätmearuandluse infosüsteemi andmetes.

Samale uuringule tuginedes saab öelda, et kõige enam visati kodumajapidamistes ära aed- ja juurvilja (32% toidujäätmetest, joonis 8). Suhteliselt suure osa toidujäätmetest moodustasid ka valmistoidu jäägid (23%), puuviljad ja marjad (18%) ning piimatooted, sh piim (13%). Üsna vähe läks raisku kuivaineid (2% kogu toidukaost) ning liha- ja kalatooteid (vastavalt 3% ja 1%).

[8] Toidujäätmed on toit, mis on muutunud jäätmeteks toidutarneahela erinevates etappides, sh lõpptarbimise etapis (jäätmete raamdirektiiv 2008/98/EÜ). Toidu mõiste alla kuuluvad eelkõige söömiseks mõeldud toiduosad (värske massi mõistes), mis on mõeldud inimese poolt söömiseks. Toit võib sisaldada ka mittesöödavaid osi, kui need ei ole toidu tootmise käigus söödavatest osadest eraldatud, näiteks inimtoiduks ettenähtud liha küljes olevad kondid, apelsini- ja banaanikoored jms. Toidujäätmeteks võib pidada toitu, mis on muutunud jäätmeteks järgmistel tingimustel:
• on sisenenud toidutarneahelasse;
• on eraldatud või ära visatud toidutarneahela erinevates etappides;
• on suunatud jäätmekäitlusprotsessi.

[9] Toidukadu ehk raisatud toit on inimtarbimiseks mõeldud toit või toiduaine, mis mingil põhjusel (nt riknenud või kasutustähtaja ületanud toit, söömisel ülejäänud toit jne) jääb tarbimata ja visatakse toidujäätmetena ära.



Joonis 8. Leibkondades tekkinud toidujäätmed toiduainete kaupa ning erinevate valmistoitude osakaalud toidujäätmetes
Allikas: Piirsalu jt, 2021.

Valmistoitudest visati kõige enam ära suppe ja putrusid (vastavalt 15% ja 14%). Nendest vähem aga erineval viisil valmistatud köögivilju ja salatit (kokku 13%), makaroni- ja pastatoite (10%). Liha ja lihatoite visati ära võrdses mahus magustoitudega (mõlemaid 9%). Erineval viisil valmistatud kartulit (nii keedetud, praetud, ahjus küpsetatud, püreestatud või frititud) visati ära kokku 7%. Makaroni- ja pastatoitudega võrreldes visati vähem ära riisist ja tatrast tehtud toite (5%), mida üldiselt valmistatakse peredes harvem. Kõige vähem visati ära toiduks valmistatud kala, kastmeid ning munast valmistatud toite (kõiki võrdselt 1%) ning võileibu (2%), mis võib tuleneda sellest, et võileibu valmistatakse tavaliselt väikeses koguses ja igale inimesele vastavalt nii palju, kui ta soovib.

2.2. Toormele seatud tingimused ja nõuded

Kääritusjäägi kvaliteet oleneb biogaasi tootmisel kasutatava lähtematerjali kvaliteedist (ebasoovitatavate ainete sisaldusest vms), selle eeltöötlemisest (võõriste eemaldamisest enne kääritamist vms) ja järeltöötlemisest (hügieniseerimisest, võõriste eemaldamisest kääritusjäägist vms).

Kui lähtematerjal ei ole määratletud jäätmetena, vaid põllumajandussaadustena, siis regulatsioonidest tulenevad nõuded selle kvaliteedile piirduvad hügieniseerimisnõuetega. Biogaasijaam lähtub materjali aktsepteerimisel eelkõige selle biogaasipotentsiaalist ja füüsikalistest parameetritest, mis peavad kokku sobituma kääritamistehnoloogiaga. Eeltöötlus piirdub enamjaolt materjali purustamisega söödapurustites.

Kui lähtematerjal on määratletud jäätmetena ning kääritusjääki soovitakse sertifitseerida, siis rakenduvad keskkonnaministri määruse nr 12 lisas 1 ja lisas 3 (2023) toodud nõuded. Lubatud on kasutada vaid selliseid biolagunevaid jäätmeid, mis on liigiti sorditud tekkekohas ja nende kogumisel tuleb vältida nende segunemist muude jäätmetega. Tekkekohas sorditud jäätmete hulka loetakse ka pakendatud biolagunevad jäätmed, näiteks poekettidest ja hulgiladudest saadud pakendatud toiduained. Nende kasutamiseks tuleb kasutusele võtta täiendav

jäätmekäitlusmeetod ehk depaketeerimine. Võõrised, näiteks klaas, sõelutakse kompostist välja 10 mm sõeluriga. Kääritusjäägis ei ole klaas senini probleemiks olnud. On näiteid biogaasijaamadest, kus kasutatakse eeltöötluses vedelsepareerimist, mis laseb plasti ujutada üles ja klaas koos mineraalse võõrisega vajub põhja.

Biogaasijaama vastu võetud jäätmed tuleb üle sortida, kui nad sisaldavad võõriseid. Biogaasijaama laoplatsil eemaldatakse tahketest jäätmetest suured võõrised käsitsi. Vedeljäätmed lastakse läbi võre, kus suurem osa võõristest kätte saadakse. Kohustuslik on sortimise kohta arvestust pidada ning dokumenteerida jäätmed üle andnud ettevõtja andmed, väljasorditud jäätmete kogus ja kirjeldus ning jäätmekäitleja, kellele väljasorditud jäätmed üle anti.

Biogaasi tootmiseks lubatavate biolagunevate jäätmete loend on keskkonnaministri määruse nr 12 lisas nr 1 (2023). Loend sisaldab jäätmekoodi, jäätmeliiki ja nimetust ning täpsustust, millistel tingimustel on lubatud neid vastu võtta. Näiteks tohib vastu võtta jäätmeid koos biolaguneva pakendiga, mis on sertifitseeritud EN 13432 või muu samaväärse standardi nõuete kohaselt ning mille täielik lagundamine on käitluskohas tehnoloogiliselt võimalik. Lubatud jäätmeliigid kannavad jäätmekoodi 02, 03, 04, 07, 15, 17, 19 ja 20.

Sama määruse lisas 3 (2023) on toodud loetelu jäätmetest, mille kasutamise korral ei ole sertifitseerimine vajalik. Erand sisaldab 02 koodiga jäätmeid, mis tekivad põllumajanduses, aianduses, vesiviljeluses, metsanduses, jahinduses ja kalapüügil ning toiduainete valmistamisel ja töötlemisel. Teisisõnu, biogaasitootja võib neid jäätmeid toormena kasutada ilma, et kääritusjääk omandaks jäätmekoodi ning seda oleks vaja hakata sertifitseerima. Sellise kääritusjäägi põllumajanduslik kasutamine ei eelda protseduurilisi lisatoiminguid.

Kääritamise ja järeltöötlemise abil on võimalik kääritusjäägi omadusi teatud piirides muuta. Keskkonnaministri määruse nr 12 lisa 2 (2023) mõistes tuleb saavutada olukord, kus kääritusjääk on muudetud hügieeniliseks (ei ole salmonellabaktereid ning *E.Coli* on maksimaalselt 1000 CFU/g), ei sisaldaks umbrohuseemneid (< 2 tk/l) ega võõriseid (≤ 0,5% kuivainet).

Loomsete kõrvalsaaduste vastuvõtmise korral tuleb tagada, et nende osakeste suurus oleks väiksem kui 12 mm ning et nad oleksid hügieniseeritud 70°C juures vähemalt ühe tunni jooksul. Temperatuurinõudeid ei ole võimalik saavutada kääritis. Käitlejal on mitu võimalust:

- Hügieniseerimist nõudvad jäätmed kuumutatakse enne kääritamist kohapeal (Eestis on kasutatud).
- Kogu kääriti sisu hügieniseeritakse peale kääritamist vedelal kujul (Eestis ei ole kasutusel).
- Käärimisjääk tahendatakse ning mõlemad fraktsioonid hügieniseeritakse eraldi, sh tahefraktsioon kompostitakse (Eestis ei ole kasutatud).
- Kääritisse toodavad jäätmed hügieniseeritakse tooja poolt juba enne biogaasijaama viimist.

Kui loomseid kõrvalsaadusi kuumutatakse hügieniseerimiseks, siis selleks vajaliku seadmestiku haldamiseks on kaks teed. Need kas paigaldatakse iga biogaasijaama juurde või rajatakse ühine suurem hügieniseerimisrajatis. Veokulude ja bioloogilise ohu vähendamise seisukohalt oleks mõistlikum rajada mitu hügieniseerimissõlme.

Põllumajandustoore sisaldab võõriseid vähe. Peamiselt on nende hulgas juhuslikku laadi kile ning lautade hooldamise käigus sõnnikusse sattunud metalldetailid ja kivid. Kõik nad on eel- ja järelkäitluse abil eemaldatavad.

Depaketeeritud toiduainetega võib kääritisse sattuda rohkem peenplasti, mis käärimisel ja pumpamisel üha väiksemateks tükkideks muutub. Selliste võõriste sisaldus vajab edasist uurimist depaketeerimise asukohas, sest peamine meetod pakenditükkide vähendamiseks on täiendav sõelumine. Uurimist vajab ka võõriste hulk biolagunevatest köögi- ja sööklajäätmetest biogaasi tootmisel, sest jäätmed kogutakse kodudest, nad on prügikotiga koos (biolagunev või tavakott) ning tarbijate arusaam biolagunevate jäätmete olemusest on erinev.

Umbrohuseemned ei ole kääritamisele iseloomulik probleem. Enamus seemnetest hukkub käärimisel. Probleem võib esineda siis, kui kääritusjääki ladustatakse pikka aeg ning kääritusjääk saastub umbrohuseemnetega hiljem. Seda ei tohi lubada, sest hilisemas faasis umbrohuseemneid enam hävitada ei saa. Teema on üheselt seotud läga laotamise agrotehniliste ahelatega. Kui tegu on sertifitseeritud tootega, siis umbrohuseemneid ei tohi tootes olla isegi siis, kui kääritusjäägi kasutaja seda probleemiks ei pea.

Kääritusjäägis lubatud ainete piirväärtused kajastuvad keskkonnaministri määruse nr 12 lisas 2 (2023). Omadused, mida tootja ei saa kääritamisel ega järeltöötlusel muuta, on anorgaaniliste saasteainete sisaldus. Raskmetalle eemaldada ei saa ning ainus viis nende piirväärtuste saavutamiseks on vältida kahtlusaluste toormepartiide vastu võtmist. Selleks aga tuleb tuvastada iga lepingupartneri jäätmete (sh sõnniku, läga) raskmetallisisaldus enne kääritisse juhtimist. Kääritusjäägi lahjendamine raskmetallide sihtarvu saavutamiseks ei ole lubatud.

Seni omandatud kogemuse põhjal on Eestis kääritusjäägi tootena kasutamise takistuseks olnud vase (ei vasta nõuetele 21% proovidest, n=13) ja tsingi sisaldus (15%) ning ühel juhul kaadmium. Salmonellabakterite tõttu ei vastanud nõuetele 36% ja *E.Coli* tõttu 31% proovidest. Võõrised ja umbrohuseemned ei olnud aastatel 2020–2021 sertifitseeritud digestaadis probleemiks.

3. Ülevaade Eesti ja Läti põllumajanduslikes biogaasijaamades kasutatavast toormest, väljunditest ja tulevikuplaanidest

3.1. Eesti biogaasijaamades kasutatud toore ja biometaani tootlikkus 2022. aastal

Peamiseks sisendmaterjaliks Eesti põllumajanduslikes biogaasijaamades on veisesõnnik, vähemal määral sea- ja linnusõnnik. Projekti käigus tehtud arvutustest nähtus, et kogu sõnniku ressursist on kasutatud 14,9% eri tüüpi looma- ja linnusõnnikust.

Jaamade andmetel kasutati kokku 384 359 tonni substraate, millest looma- ja linnusõnnik moodustas 73,9% (284 158 tonni) ning lisasubstraadid 26,1% (100 201 tonni) biogaasi tootmise sisendist. Suurima osakaaluga lisasubstraadiks olid toiduainetööstuse jäägid, vastavalt 61 279 tonni. Lisasubstraatide jaotus ja proportsioon on toodud tabelis 11. Vastavalt sisendmaterjalide kogusele (põhi- ja lisasubstraadid kokku) saadi samas mahus kääritusjääki.

Tabel 11. Biogaasijaamades kasutatud lisasubstraatide kogus (t) ja proportsioon (%)

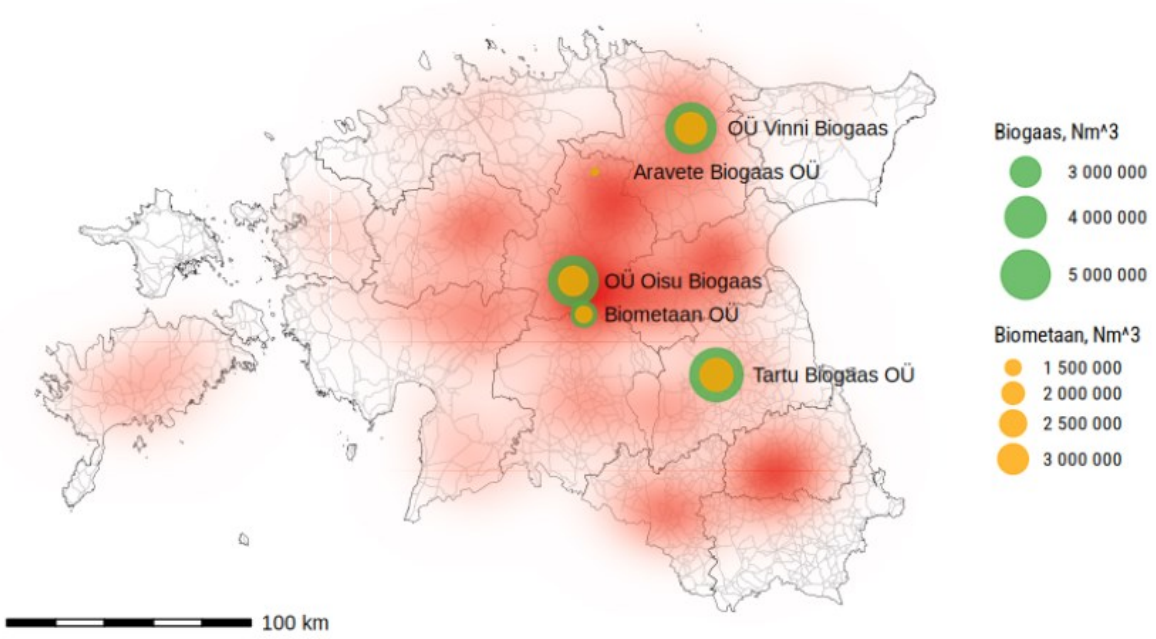
Lisasubstraat	Kogus, t	Proportsioon*	
		Keskmine, %	Vahemik, %
Silojäägid ja rohusilo	20730	5,7	2,15–9,30
Teravilja sorteerimisjäätmed	2165	0,6	0,00–1,03
Toidutööstuse jääk	61 279	16,8	0,07–35,45
Köögiviljajäätmed	8651	2,4	0,00–3,45
Rasv	2073	0,6	0,00–1,51
Pärm	942	0,3	0,00–0,84
Puidu väärindamise jääk	4362	1,2	0,00–3,93
Kokku	100 201	26,1	10,01–46,24

*Summaarsest substraatide sisendist.
Allikas: Biogaasitootjate küsitlus, 2023.

Biolagunevast materjalist (looma- ja linnusõnnikust ning muudest biolagunevatest jäätmetest) tootsid põllumajanduslikud biogaasijaamad 2022. aastal kokku 20 572 083 normaalkuupmeetrit (Nm^3)[10] biogaasi, millest biometaan moodustas 12 060 358 Nm^3 (58,6%). Joonisel on esitatud biogaasi ja –metaani toodangu jaotus Eesti põllumajanduslike biogaasijaamade lõikes.

Ühe tonni substraatide kohta tootsid Eesti põllumajanduslikud biogaasijaamad 2022. aastal keskmiselt 50,6 Nm^3 (vahemik 40,3–65,8 Nm^3) biogaasi.

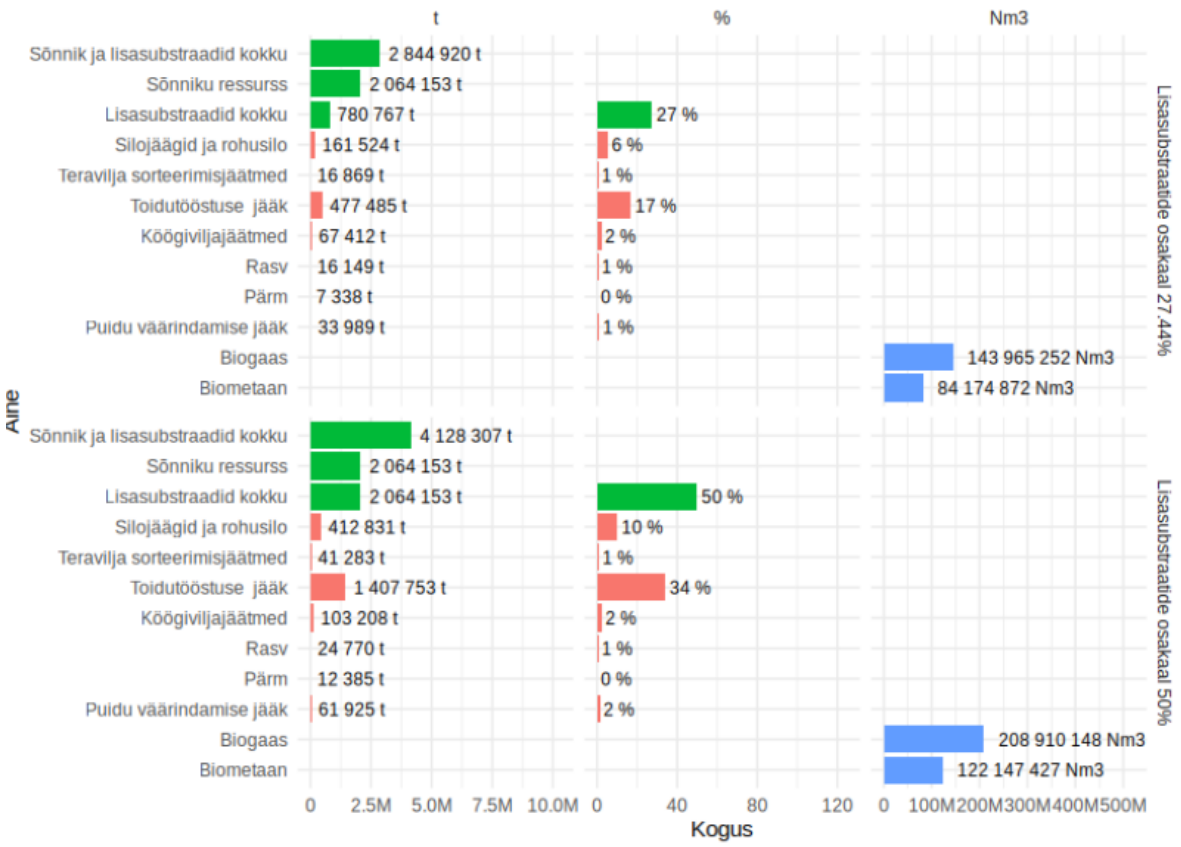
[10] Gaasi mahu mõõtühik normaal- ehk standardtingimuste juures ehk temperatuuril 0 °C ja absoluutsel gaasi rõhul 1,01325 baari.



Joonis 9. Biogaasi ja -metaani toodang Eesti põllumajanduslikes biogaasijaamades, 2022
Allikad: Biogaasitootjate küsitlus, 2023. Eesti topograafia andmekogu, Maa-amet, 2023. PRIA, 2023.

3.2. Biogaasi tootmispotentsiaal põllumajanduslikes biogaasijaamades

Eesti looma- ja linnukasvatuses toodeti 2022. aastal kokku umbes 4,8 miljonit tonni sõnnikut (arvutused KAUR-i keskkonnaotsuste infosüsteemi KOTKAS põhjal). Sellest oleks peatükis 2.1.1 toodud põhjustest lähtuvalt biogaasi tootmiseks võimalik kasutada veel umbes 2,1 miljonit tonni. Tavapäraselt kasutatakse põllumajanduslikes biogaasijaamades lisaks sõnnikule ka teisi biolagunevaid substraate. Sellest tulenevalt lähtuvad järgnevad prognoosarvutused järgmistest eeldustest: a) sõnniku ja lisasubstraatide koguse suhe ja jaotus on sarnane tabelis 13 tooduga, b) sõnniku ja lisasubstraatide koguse suhe on 50%, silojääkide ja rohusilo osakaalu suurendati 10%-ni (vt peatükki 2.1.3) ning toidutööstuse jääkide, kui suurima ressursipotentsiaaliga lisasubstraadi kogust 34,1%-ni, teiste lisamaterjalide osakaalu ei muudetud (joonis 10). **Prognoosarvutustest nähtub, et esimese arvutusskeemi korral oleks maksimaalse sõnnikuressursi kasutamise korral biogaasi toodang Eestis umbes 144 miljonit Nm^3, millest biometaani umbes 84 miljonit Nm^3. Juhul kui sõnniku ja lisasubstraatide kogus kääritites oleks võrdne, siis biogaasi kogutoodang suureneks ca 209 miljoni Nm^3-ni ning biometaani kogus vastavalt 122 miljoni Nm^3-ni**.



Joonis 10. Biogaasi ja -metaani prognoosarvutused maksimaalse sõnnikuressursi kasutamisel lisasubstraatide kahe erineva osakaalu korral
Allikas: Autorite arvutused.

Kui võtta kasutusele kogu sõnnikuressurss koos lisasubstraatidega, siis on võimalik suurendada kääritusjäägiga väetatavat pinda praegusega võrreldes 7,7–11 korda. Täpne hektarite arv sõltub substraadi kogusest, mille määrab ära sõnniku ja lisandite vahekord. Kogus kasvab, kui sõnniku osa toormes väheneb ja lisasubstraatide oma suureneb (tabel 12). Statistikaameti andmetel oli 2023. aastal Eestis põllumajandusmaana kasutuses 985 000 ha.

Praegu on olemasoleva kääritusjäägiga võimalik väetada 1,49% põllumajandusmaa kasutatavast pinnast. Kui võtta kasutusele kogu olemasolev põllumajanduslik ressurss biogaasi tootmiseks, siis suureneks see 16,4% tingimusel, et sõnniku osa toormes on 50% ja kääritusjäägiga antakse veeseaduses maksimaalselt lubatud kogus fosforit (25 kg P ha^{-1}). Kui sõnniku osa toormes moodustaks sarnaselt tänasega 72,6%, saaks kääritusjäägiga väetada 11,5% põllumajandusmaast.

Sõnniku ja lisasubstraatide vahekord mõjutab ka toiteelementide sisaldust kääritusjäägis. Kui sõnniku osakaal on substraadis 72,6% on kääritusjäägis N ja K sisaldus vastavalt 22,7% ja 19,4% suurem kui see on 50% sõnniku osakaalu korral. Kääritusjäägi P sisaldust sõnniku osakaalu muutus nimetatud piirides ei mõjuta.

Tabel 12. Tänane ja prognoositav substraadi kogus ja põllu pindala, mida on sellega võimalik väetada

Substraat	Osakaal substraadis, %		Substraadi kogus, t[1]	Elemendi kogus substraadis, t			Põllumajandusmaa pindala, mida saab kääritusjäägiga väetada, ha	Elemendi kogus, kg ha^{-1}[3]		
	Sõnnik	Lisandid		N	P	K		N	P	K
Tänane olukord										
Sõnnik + lisandid	72,6	27,4	365 109[1]	1 961	367	1 571	14 675	134	25	107
Prognoos										
Sõnnik + lisandid	72,6	27,4	2 844 920	15 363	2 845	12 233	113 797	135	25	108
Sõnnik + lisandid	50	50	4 128 307	18 165	4 046	14 862	161 830	112	25	92

[1]Autorite arvutused on tehtud substraadi tasemel, ilma kääritustskadu arvestamata. See tulemust ei mõjuta, sest elementide kogus substraadis kääritamisel ei muutu.

[2] Sõnniku kogus substraadis on arvutatud looma tasemel kuivainesisaldusega 14,4%.

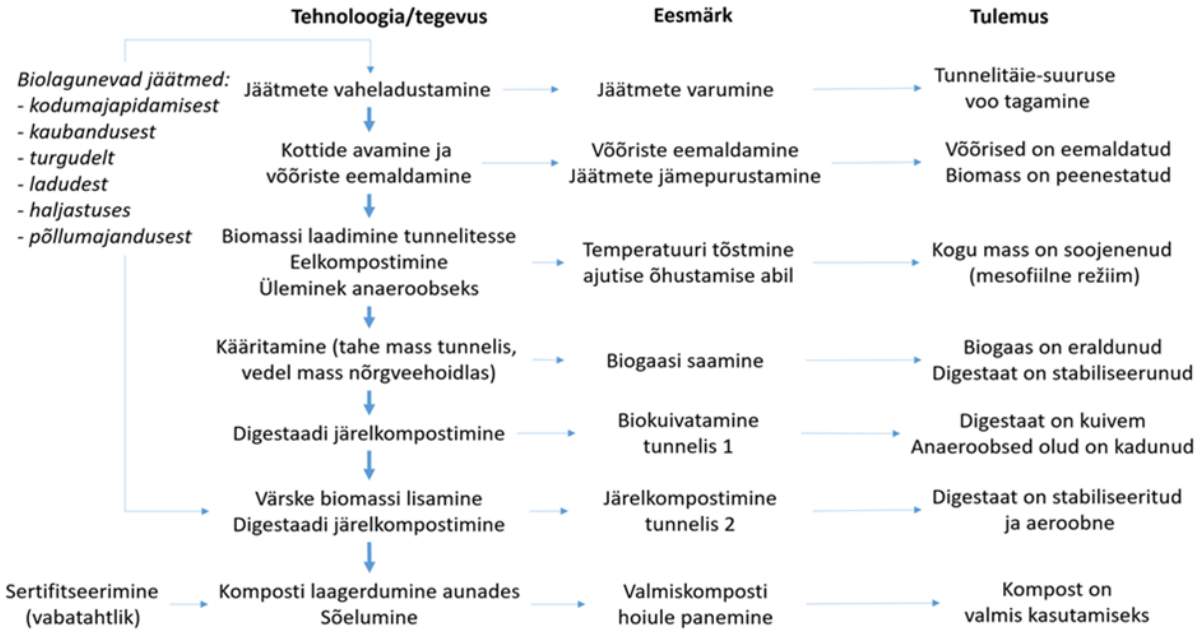
[3]Arvutuse tegemisel on lähtutud veeseaduses paragrahv 161 N ja P kogusele kehtestatud piirmääradest.

3.3. Biolagunevate jäätmete kuivkääritamine

Kui jäätmeis on 20–40% kuivainet, ei ole nad pumbatavad ning kuivkääritamiseks on tarvis erilise segamis- ja laadimisseadmestikuga reaktorit. Praegu Eestis biolagunevate jäätmete tarbeks kuivkääritamisseadmeid ei ole. Kuiva lähtematerjali kääritamiseks sobivad hästi nn graažtüüpi või tunnelreaktorid (joonis 11).

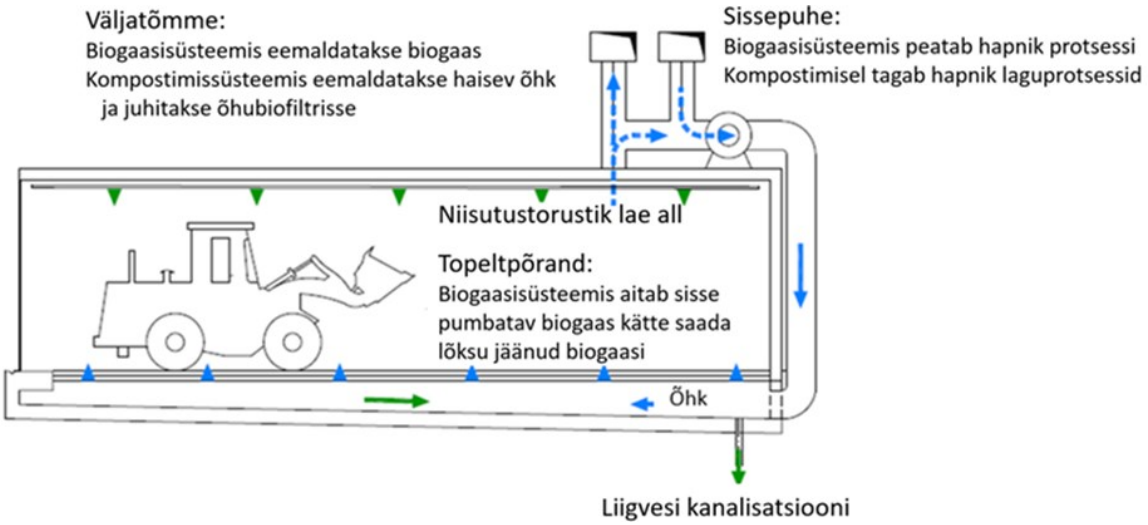
Jäätmed kogutakse vastuvõtuhalli, et kokku saada tunnelitäie jagu jäätmeid. Seejärel jäätmed purustatakse jämepurustil ning laaditakse tunnelisse. Esmalt sellist tunnelit õhustatakse, et esile kutsuda kompostimine. Seda on vaja massi soojendamiseks, ilma et oleks vaja juurde anda lisaenergiat. Kui tunnel on jõudnud mesofiilsesse faasi, siis õhustamine lõpetatakse ning tunnel muutub anaeroobseks. Järgneb käärimine, mis kestab 2–3 nädalat. Biogaasi tekke vähenemisel miinimum piirmäärast madalamale, lülitatakse taas sisse tunneli õhustamine. Selle eesmärk on muuta anaeroobne keskkond aeroobseks ning tagada, et tunneli avamine oleks ohutu ning biogaasi plahvatusoht oleks välditud. Kokku paakunud materjal raputatakse laaduri abil lahti ning tõstetakse ca üheks nädalaks kompostitunnelisse. Selles toimub aktiivne õhustamine, mille eesmärgiks on massi kuivatamine. Nädala möödudes võetakse materjal uuesti välja, segatakse juurde ca 1/3 värsket biomassi ning laaditakse taas üheks nädalaks kompostitunnelisse. Peamine eesmärk on hügieniseerida kompost, sest lisabiomassi abil tõuseb temperatuur 70 °C-ni ning lisaenergiat kulutada ei tule. Peale selle saavutamist kuhjatakse kompost õue aunadesse laagerduma. Kuu-paari pärast on kompost järelsõelumiseks ja turustamiseks valmis.

Tunnelites kuivkääritamise miinimummaht jääb suurusjärku 20 000 t/a.



Joonis 11. Kuiva lähtematerjali kääritamiseks kasutatava protsessi skeem

Tunnel-biogaasireaktor ja tunnel-kompostimisreaktor on sarnase konstruktsiooniga raudbetoonist valmistatud isoleeritud ja soojustatud kamber, mille põhjas on torustik õhu/biogaasi reaktorisse juhtimiseks, drenaažitorustik nõrgvee kogumiseks ning laes niisutustorustik (joonis 12). Kõik tööoperatsioonid tehakse ära ühe eestlaaduri abil.



Joonis 12. Tunnel-biogaasi/tunnel-kompostimisreaktori põhimõtteskeem
Allikas: Pretz, 2021.

Vajadus biojäätmeid käitlevate rajatiste järele on Eestis olemas. Selle kasuks räägib kaks argumenti. Esiteks, kui kõik Eesti omavalitsused täiel määral biojäätmete lahku sortimist rakendavad, siis tekib olukord, kus nende käitlemine seni kasutatava aunkompostimise teel ei ole enam võimalik. Isegi kui haljastujäätmeid saaks ka edaspidi aunades kompostida, siis biolagunevaid köögi- ja sööklajäätmeid ei ole võimalik kompostida lahtiselt. Olukord laheneks, kui Eestis oleks mõned tunnel-kompsotireaktorid või kombineeritud kääritus-kompostitunnelid, kus protsess oleks hästi juhitav ning rakendatud oleks parim võimalik tehnoloogia. Kui jäätmete

kogus hakkab ületama 20 000 t/a, siis oleks mõislik kaaluda anaeroobse-aeroobse töötlemise kombineerimist. Elanike väikest arvu silmas pidades tuleks Eestisse rajada mitte rohkem kui kaks rajatist – üks Tallinna, teine Tartu piirkonda. Tartu piirkond on soovitatud põhjusel, et Lõuna-Eestis ei ole suure jõudlusega biolagunevate jäätmete käitlusrajatist, Tallinna piirkond on soovitatud kaalutlusel, et seal on kõige rohkem jäätmeid. Olemas on küll kaks rajatist - Maardus tööd alustanud EKT Ecobio OÜ biogaasirajatis ja Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskusel (TJT) kompostirajatis Jõelähtmel, kuid biogaasi ei saa toota puitunud jäätmetest ning kompostitehnoloogia peaks olema suletud süsteem. Kaaluda tuleks olemasoleva praeguse membraan-kompostimistehnoloogia asendamist TJT-s kinniste tunnelreaktoritega. See tooks kaasa arenguhüppe biolagunevate jäätmete käitlemises.

Tabel 13. Mitmesuguste biomassi liikide teoreetiline ja tehnilis-majanduslik biogaasipotentsiaal Soomes

	Mass, teoreetiline (t/a)	Maht, tehnomajan-duslik (t/a)	Energia, teoreetiline (GWh)	Energia, tehnomajan-duslik (GWh)	Elekter CHP (GWh)	Soojus CHP (GWh)	Sõiduki-kütus (GWh)	Autode hulk
Sõnnik (veised)	11 394 827	3041258	3205	770	193	304	556	47462
Sõnnik (sead)	2039893	1760785	468	395	99	156	285	24332
Sõnnik (linnud)	173 189	158 945	171	157	39	62	114	9698
Sõnnik (lambad ja kitsed)	141 287	53 099	54	20	5	8	15	1260
Sõnnik (hobused)	530 706	157 591	204	61	15	24	44	3739
Sõnnik (karusloomad)	196 072	147 878	75	57	14	22	41	3509
Kesa	2567582	1 587 727	2161	1336	335	528	965	82343
Kaitsealuste alade niitmine	111 897	111 897	94	94	24	37	68	5803
Rohumaa	9 647 772	3 758 333	9 088	3540	888	1399	2556	218193
Põhk	2703063	973103	6 267	2256	566	892	1629	139041
Köögiviljajäätmed	1 162 053	288 053	400	94	24	37	68	5793
Biojäätmed	306 000	260 101	460	283	71	112	204	17441
Reoveesete	981 486	575 584	390	224	56	89	162	13805
Toiduainetööstuse jäätmed	1 187 060	593 530	560	275	69	109	199	16948
Paberitööstuse jms setted	21 000 000	20160000	690	635	159	251	458	39135
Kokku	**5414288**	**33 627 883**	**24 289**	**10 198**	**2 558**	**4030**	**7 363**	**628503**

Allikas: Marttinen jt, 2015.

Teiseks argumendiks on praegune olukord, kus ainuüksi tahketest jäätmetest, näiteks rohtsest biomassist, ei ole Eestis võimalik biogaasi toota ning sedalaadi tooraine biogaasipotentsiaal jääb kasutamata. Soov ära kasutada kogu biogaasipotentsiaal ühtib ka Euroopa Komisjoni eesmärgiga suurendada EL-i biometaani tootmist ja kasutamist aastaks 2030 vähemalt 35 miljardi kuupmeetrini. Sedalaadi arendustööd tehakse REPowerEU projekti raames, ning Euroopa Komisjon on loonud ka biometaani tööstuspartnerluse (BIP). BIP on partnerlus, milles poliitikakujundajad, tööstus ja teised sidusrühmad ühinevad eesmärgiga toetada nimetatud

eesmärgi saavutamist, ning luua eeldused selle potentsiaali edasiseks suurendamiseks kuni lausa 2050. aastani (https://bip-europe.eu/).

Soomes valitseb seisukoht, et rohtne biomass (näiteks silo või ülejäänud rohi, mida söödaks ei vajata) võiks sobida külvikorras kasvatamise kategooriasse (Virolainen-Hynnä, 2023). Soomes saaks rohtse biomassi ülejääki kasutada biogaasi tootmiseks, mis ei kahjustaks toidutootmist, vaid tooks pigem uusi sotsiaalseid ja agromajanduslikke hüvesid, annaks põllumeestele lisatulu, kasutaks paremini põllumaad, vähendaks veeheidet ning mõjutaks süsiniku jalajälge. Tabelist 13 on näha, et rohumaadelt saadav tehniliselt ja majanduslikult otstarbeka energia hulk ületab kõigi teiste, sh sõnnikust saadava energia hulka. Heintaimede kasutuselevõtt mõjutab ka kääritusjäägi kasutamist, sest see on nüüd tahke ning eeldab teistsuguseid veo- ning laotussvahendeid. Lahendada tuleks ka ladustamine, sest varuda tuleks toorainet, mida ei ole võimalik saada aasta läbi, ning ladustada tuleks tahedat kääritusjääki, mis anaeroobse keskkonna vältimiseks tuleks üle kompostida.

3.4. Biogaasi tootmine põllumajanduslikes biogaasijaamades Lätis

Keskmine biogaasijaam Lätis kasutab toorainena vedel- ja tahesõnnikut ning toodab koostootmisjaamas elektrit ja sooja. Sageli on biogaasijaama omanikuks piimatootmisega tegelev põllumajandusettevõte ja tekkiv kääritusjääk kasutatakse oma põldude väetamiseks.

Kahes intervjueeritud ettevõttes oli peamiseks sisendiks (hinnanguliselt 80% toorme mahust) piimakarja vedelsõnnik ning kogu toore pärines oma ettevõttest. 2022. aastal toodeti ühes jaamas 17 261 tonnist toormest 828 853 Nm^3 biogaasi, millest omakorda 1499 MWh elektrit ja 2406 MWh soojust (lisaks kasutati tehnoloogilisel eesmärgil 359 MWh soojust). Kääritusjääki saadi sealjuures 14 015 m^3. Teises jaamas toodeti 112 400 tonnist sisendist 3,5 miljonit Nm^3 biogaasi ja protsessi käigus tekkis 95 000 tonni kääritusjääki.

Lisaks nimetatutele kasutati ühes jaamas sisendina toiduainetööstuse jääke ning loomseid kõrvalsaadusi. See biogaasijaam on üks kolmest loomsete kõrvalsaaduste käitlemisluba omavast ettevõttest Lätis. Toormeks kasutatavad loomsed kõrvalsaadused läbivad enne kääritisse jõudmist eeltöötluse, milleks on purustamine ja termiline töötlus (120 °C, 2 bar, 20 min). Käideldakse ligikaudu 50 tonni loomseid jäätmeid päevas, millest kääritisse läheb hinnanguliselt 30 tonni. Lisaks on biogaasijaamas kasutusel ka depaketeerimisseade toiduainetööstuse praaktoodangu käitlemiseks enne kääritisse sisestamist.

Mitmed biogaasitootjad Lätis separeerivad tekkiva kääritusjäägi tahke- ja vedelfraktsiooniks. Seda tehakse kääritusjäägi transpordikulude optimeerimise eesmärgil. Näiteks ühes ettevõttes transporditakse kääritusjäägi tahket fraktsiooni (kuivaine sisaldus 25%) oma ettevõtte põldudele ligikaudu 250 km kaugusel. Kääritusjäägi tahket fraktsiooni kasutatakse ka loomadele allapanuks. Lätis maksab vedel kääritusjääk 1–2 eurot m^3 ja tahe kääritusjääk 10 eurot m^3.

Kuna intervjueeritud ettevõtetes kasutatakse kääritusjääki põllumajandusettevõttele (biogaasijaama omanikule) kuuluvatel põldudel, ei ole kääritusjäägi analüüsimine ohutusnäitajate osas aktuaalne. Samas kinnitasid intervjueeritud biogaasi tootjaid, et

kääritusjääki analüüsitakse regulaarselt toitainete sisalduse määramiseks, et selle alusel optimeerida kasutamist väetisena. Läti kääritusjäägi toiteainete sisalduse keskmised näitajad (tabel 14) sarnanevad Eesti keskmistele näitajatele.

Tabel 14. Kääritusjäägi agrokeemilised näitajad Läti biogaasi tootjatelt saadud andmete põhjal

Parameeter	**Keskmine kääritusjääk**	**Keskmine vedel fraktsioon**
pH	8,10	8,18
Kuivaine, %	4,8	1,7
Orgaaniline aine, %	79,3	66,1
$N_{üld,}$%	0,34	0,27
P,%	0,04	0,01
K,%	0,34	0,15
Ca,%	-	0,028
Mg,%	-	0,013

(-) Ei ole analüüsitud.
Allikas: Biogaasitootjate küsitlus, 2023.

Läti Biogaasi Assotsiatsioonil on Interreg programmi projekti „The Sustainable biogas“ raames koostatud plaan kääritusjäägi kvaliteedi tagamiseks ja sertifitseerimiseks, kuid seda pole rakendatud. Läti biogaasijaamade kääritusjäägi kvaliteeti iseloomustavad andmed võrdluses Lätis kehtivas määruses ja Euroopa väetisemääruses toodud ohutusnõuetega on esitatud tabelis 15. Kehtiv seadusandlus seab nõuded kääritusjäägile kui väetisele vastavalt määrusele number 506.

Kuigi Lätis tegutseb üle 40 biogaasijaama, ei ole biometaani tootmine Lätis arenenud. Lätis on üks biometaani tootev jaam ning mõned projektid on arendamisel. Intervjueeritud biogaasitootjad olid kriitilised Läti valitsuse tegevuse suhtes biogaasi tootmise sektoris. Kurdeti biogaasi tootmist reguleerivate seaduste ja määruste pidevat muutmist, selge arusaama ja rahalise toetuse puudumist, näiteks biometaani tootmise arendamisel.

Tabel 15. EL-i väetisetoodete määruses ja Lätis kehtestatud piirväärtused kääritusjäägi kvaliteedinäitajatele võrdluses kääritusjäägi analüüsi tulemustega Lätist

Ohutusnäitaja	**Ühik**	**EL-i väetise-toodetemäärus[1] PFC 1(A) orgaaniline väetis**	**Läti määrus[2] Orgaaniline väetis jm**	**Keskmised tulemused Läti kääritusjäägi 12-s proovis[3]**
Cd	mg/kg KA	1,5	3,0	0,20
Cr (VI)	mg/kg KA	2	-	5,99
Hg	mg/kg KA	1	2	0,23
Ni	mg/kg KA	50	100	8,98
Pb	mg/kg KA	120	150	2,55
As (anorg.)	mg/kg KA	40	50	0,39
Cu	mg/kg KA	300	-	199
Zn	mg/kg KA	800	-	459
Salmonella spp.	25 g-s (ml-s)	Puudub	Puudub	Leidus viies proovis
Escherichia coli või *Enterococcaceae*	CFU/1g (ml)	1000	1000	Vastas nõuetele

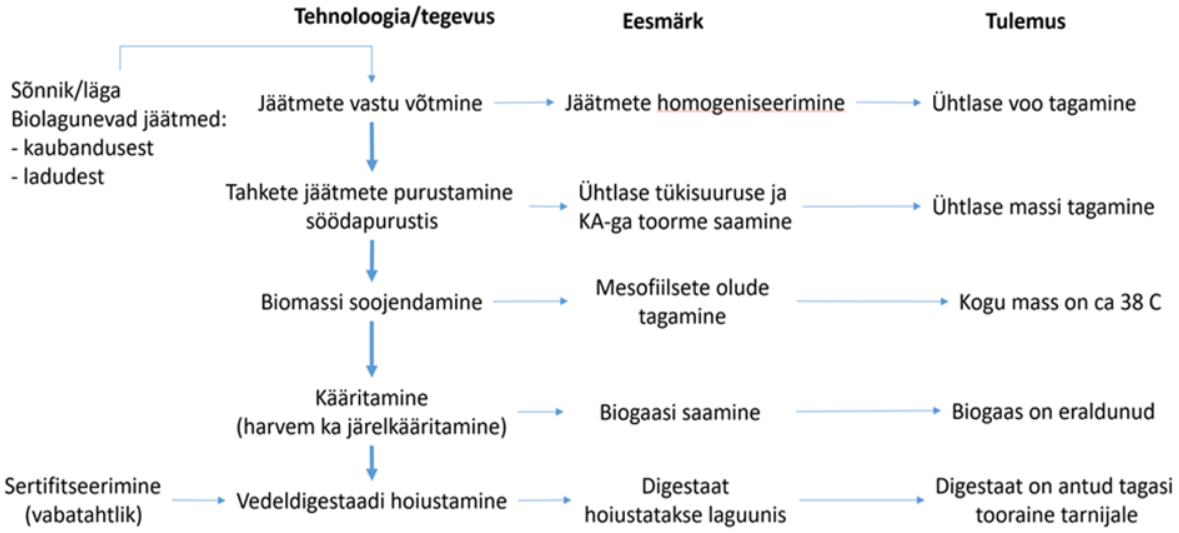
KA – kuivaine.

Allikad: [1] Euroopa Parlamendi ..., 2019. [2] Cabinet regulation No 506. Republic of Latvia. [3] Biogaasijaamades, kus proove võeti, kasutati järgmisi sisendmaterjale: veise vedelsõnnik, seasõnnik, veise tahesõnnik, söödajäägid (mais), pruulikoja praak, juustu- ja kodujuustuvadak, puhastite setted, suhkrupeedi töötlemise jääk, kurkide töötlemise kõrvalsaadused, linnusõnnik, rapsiõli tootmise kõrvalsaadused, lambasõnnik, söödateravili, aganad, muud orgaanilised jäätmed (Latvian Biogas Association, 2021).

4. Kääritusjäägi töötlemine ja selle võimalik kasutamine orgaanilise väetisena

4.1. Kääritusjäägi töötlemine

Põllumajanduslikul toormel töötavad biogaasijaamad kasutavad enam-vähem ühesugust tehnoloogiat, mille materjalivoo lihtsustatud skeem on joonisel 13. Biogaasi ja biometaani töötlemine on jooniselt välja jäetud.



Joonis 13. Vedela ja tahke materjali voog põllumajanduslikus biogaasijaamas

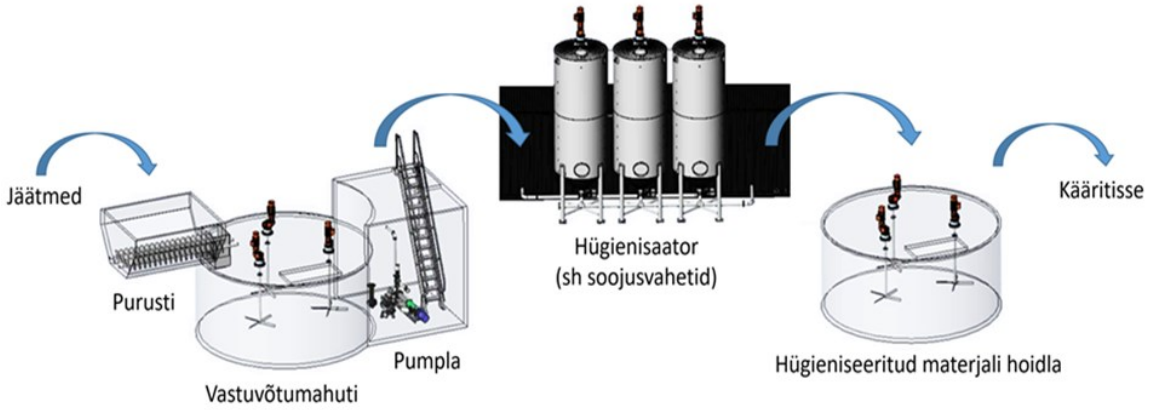
Biogaasi tootmise suurendamiseks on kaks võimalust, kas laiendada olemasolevaid biogaasijaamu või rajada uusi. Arendamisel on mitmeid biogaasijaamu. Ehkki töö koostajatele on nende võimalikud asukohad ja arvud teada, siis antud aruandes neid ei avaldata, vastavalt kokkulepetele ettevõtjatega.

Biogaasijaama laiendamine seisneks selles, et samades kääritites või nende juurde rajatavates lisakääritites saaks hakata vastu võtma ka muid jäätmeid, mida seni selles reaktoris ei ole töödeldud, nt biolagunevaid olmejäätmeid, kaubandusest või turgudelt pärinevaid jäätmeid, 2. ja 3. kategooria loomseid kõrvalsaadusi jms. Nii langeks ära vajadus ehitada päris uus jaam ning lisanduks võimalus lubada kääritisse ka väikeseid jäätmevoogusid.

Kui lähtematerjaliks on läga või muu põllumajandusest pärit toore, mis ei ole jäätmeseaduse subjekt, võib kääritusjäägi hõlpsasti põllule laotada. Kui lähtematerjaliks on jäätmed, nt toidujäätmed, toiduainetööstuse jäägid või loomsete kõrvalsaadustena tuntud jäätmed, tuleb teha lisatoiminguid:

1. Pastöriseerida/hügieniseerida loomsete kõrvalsaaduste alla kuuluv lähtematerjal enne käärimist või kogu kääritusjääk peale kääritamist eraldi seadmes (jäätmed purustatakse 12 mm tükisuuruseni ning kuumutatakse 70 °C juures vähemalt üks tund).
2. Rakendada toiminguid mille tulemusena kääritusjääk lakkab olemast jääde – kääritusjääk tuleb sertifitseerida.

Vinni biogaasijaama näitel võimaldab hügieniseerimissõlm (ka pastörisaator, hügienisaator) vastu võtta nii vedelat kui tahket toorainet – biolagunevaid jäätmeid, tootmisjääke toiduainetööstusest, loomseid kõrvalsaadusi, toidujäätmeid) (joonis 14). Projekti on koostanud AS EG Ehitus ja Byosis Group BV (Holland).



Joonis 14. Vinni biogaasijaama pastöriseerimissõlme skeem Askoterm (2021) järgi

Tooraine liigub läbi vastuvõtumahuti purustisse, kus see peenestatakse. Edasi pumbatakse püdel mass seguri(te)ga varustatud vastuvõtumahutisse. Sealt edasi liigub toore läbi teise astme purusti, et garanteerida osakese suurus 12 mm. Mass pumbatakse läbi soojusvaheti hügienisaatori esimesse mahutisse. Soojusvaheti tõstab temperatuuri üle 70 °C. Toore jääb sellesse mahutisse etteantud temperatuuri juures nõutud üheks tunniks.

Kokku on komplektis kaks või kolm pastöriseerimismahutit. Seega toimub ühes mahutis pastöriseerimine, teist/teisi mahuteid täidetakse ja tühjendatakse. Pastörisaatorist väljuva massi soojuse arvel soojendatakse üles soojusvahetisse sissetulev toore. Lisaenergia tuleb katlamajast, mida köetakse tavaliselt enda toodetud biogaasiga.

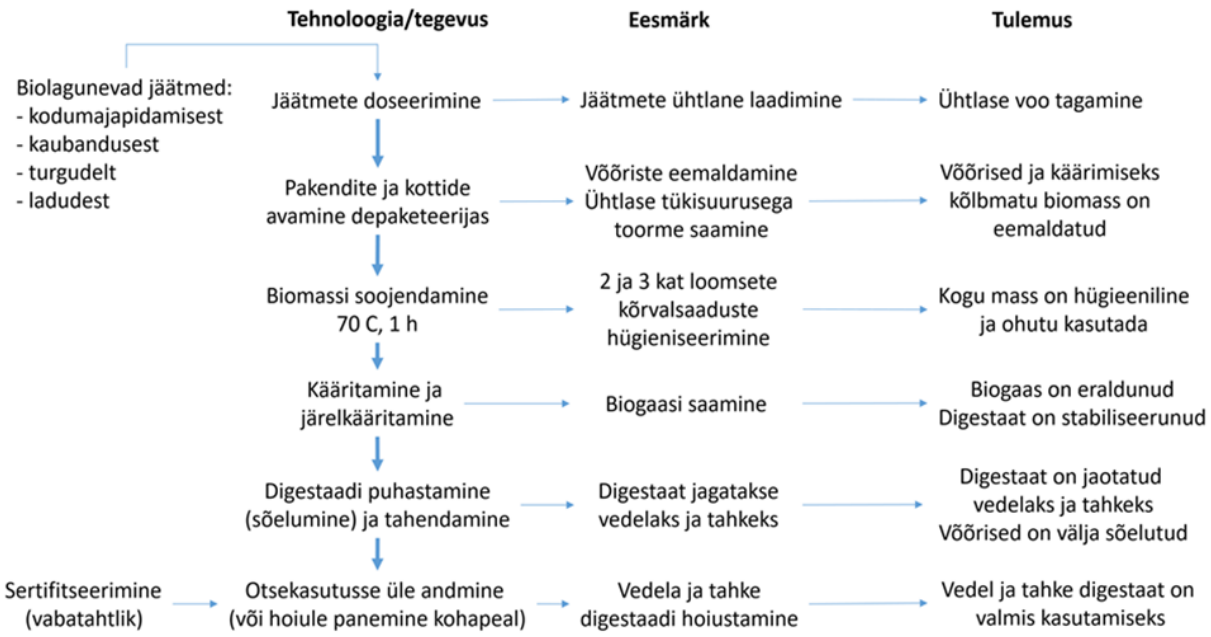
Seadmestiku (120 m^3/päevas) maksumus oli projekteerimise ajal ilma käibemaksuta ligikaudu 500 000 eurot. Üldehitustööd, seadmete transport, automaatika sidumine olemasoleva biogaasijaamaga jms. tegi investeeringu kogumaksumuseks koos käibemaksuga ligikaudu üks miljon eurot. Selline seadmestik sobib eelkõige põllumajanduslikku päritolu toormest biogaasi tootjaile. Antud juhul vastu võetakse vaid pakendamata jäätmeid. Kui vastu kavatsetakse võtta pakendatud jäätmeid, siis pakendamise eraldamise seade (depaketeerija) tuleb juurde ehitada.

Ehkki samalaadse sõlme saaks rajada ka reoveepuhastites olevate kääritite juurde, tuleks enne lahendada reoveesette-kääritusjäägi kasutamise küsimus. Kääritusjääk jääb sel juhul reoveesettena arvele ning seda tuleb käidelda kui reoveesetet. Sertifitseerimiseks tuleb kääritusjääk tahendada ja üle kompostida, sest keskkonnaministri määruse nr 12 kohaselt reoveesette sertifitseerimist vedela kääritusjäägina ei ole võimalik Ka turustada oleks reoveesettekomposti keerulisem kui põllumajandustoormest või biolagunevatest jäätmetest saadud kääritusjääki.

Biomassist biogaasi ja kääritusjäägi tootmine eeldab lisaks ka pakendite avamise/lõhkumise seadmestikku ja mitmeastmelist võõriste eemaldamise seadmestikku.

OÜ EKT Ecobio on 2022.–2023. aastal käivitanud biogaasitehase biojäätmete käitlemiseks. Ettevõte võtab vastu umbes 25 000 tonni lähtematerjali ning sellest toodetakse ca 17 000 tonni vedelat kääritusjääki ning umbes 3000 tonni tahket kääritusjääki. Ligikaudu 5000 tonni

võõriseid põletatakse oma katlamajas tahke jäätmekütusena või viiakse Iru põletusettevõttesse. Tehnoloogiaskeem on joonisel 15.



Joonis 15. Biolagunevate jäätmete, pakendite avamise ja võõriste eemaldamise käigus biogaasi tootmise ning digestaadi puhastamise skeem

4.1. Kääritusjäägi agronoomiline iseloomustus

Toiteelementide sisaldust analüüsiti viie biogaasijaama kääritusjäägis. Neist ühes toimub ka kääritusjäägi separeerimine. Kõik need biogaasijaamad kasutavad substraadina vedelsõnnikut, mis moodustab toorme kogumassist 54–90%. Ülejäänu on mitmesugused lisandid, nagu näiteks rohusilo ja silojäägid, teravilja sorteerimisjäätmed, toiduainetööstuse jäätmed, mille koostis ja osakaal on biogaasijaamades erinev.

Tabel 16. Kääritusjäägi agrokeemilised parameetrid

Parameeter	**Proovide arv, tk**	**Keskmine**	**Min**	**Max**
pH	2	8,6	8,1	9,0
KA[1], %	4	5,7	4,4	7,2
OA[2], %	1	81,9	-	-
$N_{üld}$,%	4	0,4	0,38	0,43
NH_4-N,%	3	0,29	0,26	0,33
P,%	4	0,06	0,056	0,072
K,%	4	0,25	0,22	0,29
Ca,%	3	0,21	0,13	0,33
Mg,%	3	0,08	0,04	0,16
P_2O_5, %	4	0,14	0,13	0,16
K_2O ,%	4	0,30	0,27	0,34
$N_{üld}$:P_2O_5:K_2O	4	2,9:1:2,1	2,6:1:2	3:1:2,7
NH_4-N:P_2O_5: K_2O	3	2,1:1:2,1	1,7:1:2	2,4:1:2,1

[1]KA – kuivaine; [2]OA – orgaaniline aine; [3](-) ei ole analüüsitud.

Allikad: Biogaasitootjate küsitlus, 2023. Biogaasitootjate analüüsiandmed, 2022.

Separeerimata kääritusjääkide $N_{üld}$ oli 0,38–0,43% (tabel 16). Keskmiselt 72,5% sellest oli taimedele koheselt omastatav NH_4-N. Nitraatlämmastikku (NO_3-N) kääritusjääkides ei leidunud. Kääritusjäägi vedel separaat sisaldas $N_{üld}$ 0,24% ja tahke separaat 0,71%. Separaatide kohta tuleb märkusena lisada, et nende toiteelementide sisaldust on analüüsitud vähe ja tulemuste varieeruvus on väga suur.

Eesti Maaülikoolis Interreg projekti raames tehtud uuring näitas, et P ja K sisaldus on vedelsõnnikus vastavalt 0,056% ja 0,25% (Interreg Project No #R057), mis on üsna sarnane nende sisaldusega kääritusjäägis. Suurim erinevus on $N_{üld}$ sisalduses, mis on kääritusjäägis ligikaudu 0,1% võrra suurem. Ilmselt on selle põhjuseks biogaasijaamades lisatud lämmastikurikkad lisandid nagu linnusõnnik.

Vaatamata lisandite erinevale koostisele ja osakaalule toormes oli N, P ja K vahekord erinevate biogaasijaamade kääritusjäägis üsna sarnane. Keskmiselt sisaldasid need lämmastikku kolm ja K_2O kaks korda rohkem kui P_2O_5. NH_4-N sisaldus oli P_2O_5 võrreldes kaks korda suurem.

Kääritusjäägi mikroelementide sisaldust on analüüsitud vähe ja see on toimunud üsna kaootiliselt. Antud uurimuses on erinevatest proovidest määratud erinevaid elemente, mis ei võimalda tulemusi üldistada. Biogaasitootjate poolt esitatud analüüsilehtedelt ei olnud üheselt võimalik saada aru, kas tulemus käib proovi märgmassi või kuivaine kohta. Neil põhjustel kääritusjäägi mikroelementide sisaldust aruandes ei kajastata.

Kääritusjäägi ja vedelsõnniku toiteelementide sisaldus on üsna sarnane, mistõttu see sobib väetiseks samadele kultuuridele, mille puhul tänasel päeval kasutatakse vedelsõnnikut. Eriti sobiv on see heintaimedele ja suviteraviljale, mis vajavad palju N ja K. Kevadel võib kääritusjääki anda pealtväetisena ka taliteraviljadele, mil see lisaks mulda viidavatele toiteelementidele ergutab ka mikroobide elutegevust.

Tabel 17. Kääritusjäägi tahke ja vedela separaadi agrokeemilised parameetrid

Parameeter	**Proo-vide arv, tk**	**Tahke separaat**			**Vedel separaat**		
		Keskmine	**Min**	**Max**	**Keskmine**	**Min**	**Max**
pH	2	9,0	8,7	9,2	9,3	8,9	9,6
KA[1], %	2	30,4	29,7	31,2	1,9	1,7	2,1
OA[2], %	1	89,0	-	-	89,5	-	89,5
$N_{üld,}$%	2	0,71	0,59	0,84	0,245	0,24	0,25
NH_4-N, %	1	0,14	-	-	0,18	-	-
P,%	2	0,25	0,1	0,4	0,014	0	0,028
K,%	2	0,5	0,22	0,77	0,165	0,16	0,17
Ca,%	2	0,84	0,33	1,36	0,062	0,056	0,068
Mg,%	2	0,42	0,16	0,69	0,02	0,012	0,028
P_2O_5, %	2	0,58	0,23	0,92	0,03	0	0,06
K_2O, %	2	0,6	0,26	0,92	0,2	0,19	0,2
$N_{üld}$:P_2O_5:K_2O	2	1,2:1: 1	2,6:1:1,1	1:1,1:1,1	8,2:1:6,7	1,3:0:1	4,2:1:3,3
NH_4-N:P_2O_5: K_2O	2	1:4,1:4,2	-	-	6:1:6,7	-	-

Allikad: Biogaasitootjate küsitlus, 2023. Biogaasitootjate analüüsiandmed, 2022.

Kääritusjäägi tahke separaat, milles valdav osa lämmastikust on orgaanilise aine koosseisus, on hea külvieelne väetis taliteraviljadele, kuid seda võib kasutada ka rühvelkultuuride ja maisi väetamiseks (tabel 17). Kääritusjäägi vedel separaat on kõrge NH_4-N ja K sisalduse tõttu hea täiendväetis rohumaale. Väiksema kuivainesisalduse tõttu imendub see mulda kääritusjäägist kiiremini, mistõttu on lämmastikukadu sellega pealtväetades väiksem.

Orgaaniliste väetiste kasutamist reguleerib Eestis veeseadus, mis lubab viia aastas maksimaalselt mulda 170 kg $N_{üld}$ ha^{-1} ja jooksva viie aasta keskmisena 25 kg P ha^{-1} (veeseaduse paragrahv 161).

Neist piirmääradest lähtudes, arvutati iga kääritusjäägi kohta välja kogus, kui palju seda on võimalik aastas põllule laotada. Arvutuste tegemisel eeldati, et kääritusjäägiga antakse igal aastal maksimaalselt lubatud fosfori kogus (25 kg P ha^{-1}). Tulemus näitab, et kääritusjäägi maksimaalne võimalik laotusnorm on 40–45 tonni ha^{-1}, keskmiselt 41 tonni ha^{-1} (tabel 18). Kolmel analüüsitud kääritusjäägil takistas suurema koguse andmist fosfori ja kahel lämmastiku piirmäära täitumine. Samas selgus, et enamikel juhtudel kaasnes kääritusjäägiga maksimaalselt lubatud fosfori koguse andmisel ka lubatule väga lähedane kogus lämmastikku ja vastupidi. Lisaks selgus analüüsist, et maksimaalselt lubatud määra kasutades, viiakse mulda üle 100 kg NH_4-N ning samuti ka kaaliumit, mida on rohkem, kui meie parima teadmise kohaselt antakse teraviljadele ja rohumaale tavapäraselt mineraalväetisega.

Tabel 18. Kääritusjäägi norm ja väetatava pinna suurus maksimaalselt lubatud koguse lämmastiku ja fosforiga väetamisel

Materjal	Proovide arv, tk	Keskmine põllupindala, mida saab ühes biogaasijaamas tekkiva kääritusjäägiga väetada, ha	Keskmine kääritusjäägi norm, t ha-1	Elemendi kogus kg ha^{-1}		
				N/NH_4-N	P	K
Kääritusjääk	4	2541	41	164/117	25	105
Kääritusjäägi tahke separaat	2	599	10	71/14	25	50
Kääritusjäägi vedel separaat	2	777	70	170/125	9,7	114

[1]Arvutuse tegemisel on lähtutud veeseaduses paragrahv 161 N ja P kogusele kehtestatud piirmääradest.
[2] $N_{üld}/NH_4$-N.
Allikad: Autorite arvutused. Biogaasitootjate küsitlus, 2023. Biogaasitootjate analüüsiandmed, 2022.

Kääritusjäägi (samuti vedel- ja tahesõnniku) adekvaatse keemilise koostise määramisel on olulise tähtsusega proovivõtu metoodika järgimine ja sobiva analüüsimetoodika kasutamine. Juhul kui proov on võetud valesti ja kasutatud mittesobivaid analüüsimeetodeid, siis tulemused ei vasta käsitletava materjali tegelikule keemilisele koostisele. Põhjalik juhend proovide võtmiseks ja käitlemiseks vedel- ja tahesõnnikust koostati Interreg projekti "*Manure Standards*" raames. Juhend on leitav aadressilt: https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/6186

Olenemata sõnnikutüübist on tegevusplaan proovide võtmiseks järgmine:

1. Proovivõtuplaani koostamine (osaproovide arv; kust ja kuidas osaproovid võtta, saamaks kogu hoidlat iseloomustav koondproov jne).

2. Sõnniku vanuse hindamine lähtuvalt viimasest hoidla tühjendamisest, (võrdlusandmed eelnevate aastate või teiste ettevõtete tulemusega).
3. Osaproovide võtmine. Vedelsõnnikuproovid tuleb võtta korralikult läbi segatud (homogeniseeritud) materjalist (põhjalik segamine propellersegistiga kestab enamasti mitu tundi või isegi päeva). Tahesõnnikuproovid tuleb võtta erinevatelt sügavustelt (pealt, keskelt ja alt).
4. Osaproovide segamine üheks koondprooviks.
5. Koondproovi homogeniseerimine ja sellest lõpliku proovi võtmine (võimalusel võetakse varuproov, mida säilitatakse sügavkülmas).
6. Proovi(de) pakendamine ja märgistamine.
7. Saatelehe (konkreetse labori vormil) täitmine proovi taustainfo edastamiseks.
8. Transpordi ajal laborisse tuleks proove säilitada jahedas (võimalusel ja vajadusel sügavkülmutamine).

Kääritusjäägi proove võetakse ka vahetult käärititest. Sageli kasutatakse selleks pumplat, kus värske vedelsõnnik suunatakse eelmahutisse ning tühjendatud tsistern täidetakse kääritusjäägiga kääritist. Kuna kääritis toimub kääritatava materjali pidev segamine, siis läbi segamise (homogeniseerimise) vajadus puudub (vt eelnev loetelu punkti kolm). Kindlasti tuleb vältida kääritamata materjali sattumist kääritusjäägi proovi hulka. Kääritusjäägi proovide võtmisel hoidlast (nii vedel digestaat kui ka tahes) kehtib ülaltoodud metoodika täies ulatuses.

4.1.1. Kääritusjäägi omadused ja kvaliteet väetisetoodete määrusega võrreldes

Enamasti öeldakse, et kääritusjääki kasutatakse põllumajanduses orgaanilise väetise või bioväetisena. Seda mainisid ka uuringus küsitletud ettevõtjad. Ehkki kääritusjäägi algmaterjal on orgaaniline ja see on bioloogilise töötlemise tulemus, siis sellest ei piisa orgaanilise väetise õiguslikuks määratlemiseks. EL-i uus väetisetoodete määrus (EL) 2019/1009 defineerib orgaanilise väetise mõistet väga täpselt.

Kääritusjäägi kvaliteeti on võimalik hinnata ka EL-i uue väetisetoodete määrusega (EL) 2019/1009. Selles käsitletakse muuhulgas orgaanilisi väetisi ja nende valmistamise põhimõtteid. Määrus sätestab raamistiku, mida järgivaid väetisetooteid saab EL-i piires vabalt turustada. Määruse alusel tootena tunnustatud väetised kannavad turul CE-märgist.

Kääritusjäägi omaduste kirjeldamiseks on väetisetoodete määruses kasutusele võetud tähistus 'koostisainete kategooria' (*Component Material Category* – CMC). Selle alusel tähistatakse orgaanilised väetised järgnevalt:

CMC 3: kompost.

CMC 4: värske taimse materjali kääritussaadus.

CMC 5: muu kui värske kultuuri kääritussaadus.

Väetisetoodete 'toimekategooriad' (*Product Function Categories* – PFC) määravad selle, milles seisneb toote kasulik mõju ehk funktsioon. Selle alusel tähistatakse orgaanilised väetised järgnevalt:

PFC 1A: orgaaniline väetis, mis võib olla I: tahke või II: vedel.

PFC 3A: orgaaniline mullaparandusaine.

PFC 4: kasvusubstraat.

PFC 7: väetisetoodete segud, mis on mehaaniliselt kokku segatud.

Selleks, et ettevõtjad saaksid tõendada ja pädevad asutused kontrollida, et turul kättesaadavaks tehtud EL-i väetisetooted vastavad käesoleva määruse nõuetele, on vaja ette näha vastavushindamismenetlused. Menetlused on jagatud mooduliteks, näiteks moodul A käsitleb tootmise sisekontrolli, moodul B tüübihindamismenetlust, moodul C tootmise sisekontrollil põhineva tüübivastavust. Moodul D1 kirjeldab tootmisprotsessi kvaliteedi tagamist, st lisaks kääritusjäägi kvaliteedile hinnatakse ka kääritusjäägi tootmisprotsessi. Määruse nõuetele vastavust peab hindama erapooletu osapool.

Kas digestaat kvalifitseerub väetisetoodete määruses orgaanilise väetisena?

PFC 1A(I) ja (II) orgaaniline väetis

Kääritusjäägi toitainesisalduse määramine põhineb värskel materjalil. Vähemalt üks kolmest toitainesisaldusest peab olema täidetud. Kääritusjäägi toitainesisaldus on tavaliselt pigem madal (tabel 19).

Tabel 19. Väetisetoodete toimekategooriad PFC 1A(I) ja (II) orgaaniline väetis

	PFC 1A(I) tahke	**PFC 1A(II) vedel**
C_{org}	≥ 15%	≥ 5%
Lämmastik (N)	≥ 2,5%	≥ 2%
Fosfor (P_2O_5)	≥ 2%	≥ 1%
Kaalium (K_2O)	≥ 2%	≥ 1%
Kokku (NKP)	(1/1/1) ≥ 4	(1/1/1) ≥ 3

Suure tõenäosusega ei täida kääritusjääk minimaalset toitainesisalduse nõuet, mis lubaks seda klassifitseerida orgaaniliseks väetiseks. Sama kehtib enamiku kompostide kohta. Seega ei ole võimalik kääritusjääk ega komposti panna CE-märgistusega tootena EL-i orgaaniliste väetiste turule.

Kas kääritusjääk kvalifitseerub väetisetoodete määruseses mullaparandusainena?

PFC3(A) orgaaniline mullaparandusaine peab sisaldama vähemalt 95% ulatuses orgaanilist päritolu materjali, selle kuivainesisaldus peab olema vähemalt 20 % ning orgaanilise süsiniku (Corg) sisaldus vähemalt 7,5 massiprotsenti. Tahke kääritusjääk ja kompost seega vastavad neile kriteeriumidele, kuid vedel kääritusjääk mitte. Seega ei ole võimalik vedelkääritusjääki nimetada orgaaniliseks mullaparandusaineks, kuid komposti ja tahket kääritusjääki võib, ning neile saaks taotleda CE-märgistust orgaaniliste mullaparandajatena. Paraku võivad seda takistada probleemid muudele parameetritele vastamises, milleks on raskmetallisisaldus (tabel 4) või *E.coli*. Viimase vastavusse viimine on sõltuvuses iga kääriti/biogaasijaama hooldamisest ning see võidakse lahendada koos loomsete kõrvalsaaduste käitlemisega.

Probleemiks võivad saad võõrised, kuid kompostis ja digestaadis on võõriseid enamasti võimalik tehniliste abinõudega normipiiresse viia.

Probleemiks võivad saada muud orgaanilised reoained, nt polüaromaatsed süsivesinikud (PAH 16). Täna neid Eestis ei mõõdeta, mistõttu ka teadmisi nende esinemisest ei ole.

Kääritusjäägi jaoks võib probleemiks saada ka stabiilsuskriteeriumide lävi 'hapnikutarve', mida on raske täita. Kasvuhoonegaaside emissiooni kontekstis ei ole aktsepteeritav, et kääritist võetakse välja jääkmetaani emiteeriv kääritusjääk. Kuna kääritusjääki ei saa kasutusele võtta aasta läbi, vaid seda tuleb talvel mitmeks kuuks hoiule panna, on vaja tähelepanu pöörata hoiustamise käigus esineda võivale metaani emissioonile. Selle vältimiseks kasutatavad võtted on erinevad vedela ja tahke kääritusjäägi jaoks.

Sisendmaterjal

Kui sisendmaterjaliks on jäätmetena arvel olev materjal, siis sisendina on lubatud kasutada ainult selliseid biojäätmeid, mis on juba tekkekohal lahku sorditud. Segaolmejäätmetest eraldatud bioloogilist osa kasutada ei tohi.

Sisendmaterjal peab olema puhas ja võõristevaba, ega tohi sisaldada jäätmeliike, mida ei tohi CE-märgi saavutamiseks lubada. Sisendina ei tohi kasutada reoveesetet ega toiduainetööstuse setteid. See toob probleemi kääritites, kus kasutatakse nt piimatööstuse setteid.

Loomsete kõrvalsaaduste (biolagunevad köögi- ja sööklajäätmed, jäätmed kaubandusettevõtetest ja ladudest ning toiduainetööstusest) käitlemisel tuleb täita loomsete kõrvalsaaduste käitlemise juhiseid (70 °C/1h 12mm).

Kääritamisprotsessi vältel peavad iga partii kõik osad vastama ühele järgmistest temperatuuri ja aja profiilidest:
a) termofiilne anaeroobne kääritamine 55 °C juures vähemalt 24 tundi, millele järgneb hüdrauliline viibeaeg vähemalt 20 päeva;
b) termofiilne anaeroobne kääritamine 55 °C juures koos käitlusega, mis hõlmab pastöriseerimist (70 °C, 1 h);
c) termofiilne anaeroobne kääritamine 55 °C juures, millele järgneb kompostimine, kus temperatuuri on või ületab: 70 °C vähemalt 3 d, 65 °C vähemalt 5 d, 60 °C vähemalt 7 d või 55°C vähemalt 14 d kestel;
d) mesofiilne anaeroobne kääritamine 37–40°C juures koos käitlusega, mis hõlmab pastöriseerimist (70°C, 1 h), või
e) mesofiilne anaeroobne kääritamine 37–40°C juures, millele järgneb kompostimine, kus temperatuuri on või ületab: 70 °C vähemalt 3 d, 65 °C vähemalt 5 d, 60 °C vähemalt 7 d või 55 °C vähemalt 14 d kestel.

Tavapärasel mesofiilsel käärimisel jääb temperatuur 40 °C ligidusse ning ka termofiilsel käärimisel ei saavutaks temperatuur hügieniseerimiseks vajalikke nõudeid. Seega ei ole võimalik ilma täiendava hügieniseerimise abita komposti ja kääritusjäätmeid EL-i turule viia CE-märgisega toodetena.

4.2. Majanduslikud aspektid seoses kääritusjäägi kasutamisega

Arvestamaks kääritusjäägi kasutamise majanduslikke aspekte, on vajalik saada ülevaade kaasnevatest erinevatest kuludest. Üks olulistest kuludest on veise ja sea vedelsõnniku veokulud biogaasijaama, näiteks 5–7 km raadiuses laudast ning kääritusjäägi vedu hoidlasse/laguuni. On võimalik, et biogaasijaam ja loomakasvatusüksus asuvad lähestikku. Sel juhul on võimalik vedelsõnnik transportida biogaasijaama torustiku kaudu ning siis on ainukeseks transpordikuluks kääritusjäägi vedu põllule, mis võib biogaasijaamast olla 8 km kaugusel aga ka 30 km kaugusel. Võib tekkida küsimus, kes katab vastavad kulud, kas vedelsõnniku omanik või biogaasitootja? Mis oleks põllumajandustootja huvi vedelsõnniku ja sõnniku andmiseks biogaasitootjatele? Tõenäoliselt saab põllumajandustootja vähendada oma piimatootmise keskkonnajalajälge (kasvuhoonegaaside (KHG) emissiooni) ning kavandada lägahoidlate täitumist ning nende tühjendamist. Kui põllumajandustootja ei soovi biogaasijaamaga koostööd teha, peab siiski arvestama, et kasvuhoonegaaside emissioon vedelsõnnikust on mõnevõrra suurem kui kääritusjäägist. Kui hindame loomakasvatuses kasvuhoonegaaside emissiooni toodanguühiku kohta, siis kas kääritusjäägiga saame vähendada loomakasvataja tekitatud emissioone ja see arvestus käib läga tekitaja järgi või emissiooni vähendamine läheb biogaasitootja arvele? Tänane praktika on, et põllumajandustootja saab kääritusjäägi kasutamisega vähendada oma loomakasvatuse emissioone, sest läga, millest biogaasi toodetakse, omanik on põllumajandustootja. Alates 2023. aastast kajastatakse biogaasijaamades käideldud looma- ja linnusõnnikust (kääritusjäägist) lähtuvaid KHG (sealhulgas metaani) emissioone riiklikus saasteainete inventuuris. 2022. aasta inventuuri (praegu veel mitteametlik, esitatakse 2024. aasta alguses) kohaselt vähenes sõnnikukäitlusest pärineva metaani (CO_2 ekvivalentides) emisioon ca 16,2 kilotonni võrra. Selle peamiseks põhjuseks on asjaolu, et vastavalt IPCC 2006 ja 2019 juhendmaterjalidele on kääritama vedelsõnniku metaani konversiooni faktor (MCF) Eesti klimaatilistele tingimustele ümberarvutatuna 17%, kuid kääritusjäägi puhul vaid 3,55%. Tulenevalt Keskkonnatasude seadusest (KeTS) põllumajanduslikest allikatest (soolesisene fermentatsioon ja sõnnikukäitlus) lenduvat metaani saastetasuga ei maksustata. Võttes siiski aluseks KeTS-is toodud praegu kehtivad saastetasu määrad saasteainete õhku viimisel ja laiendades seda ka metaanile (lenduvad orgaanilised ühendid, välja arvatud merkaptaanid ja metaan - 122,32 eurot/t ja süsinikdioksiid 2 eurot/t), siis esimesel juhul oleks rahaline kokkuhoid ca 25 000 eurot ja teisel juhul (arvutatuna CO_2 ekvivalentides) ca 11 500 eurot 100 000 m^3 ladustatud kääritusjäägi kohta. Seega on oluline kääritusjäägist KHG emissiooni kogused välja selgitada, võrrelda neid emissioonidega lägast ning hinnata kokkuhoidu rahalises väärtuses. Vastav emissiooni vähendamine registreeritakse läga omanikule, kellelt tuleb suurem osa sisendist ja kelle põldudele läheb ka kääritusjääk. Samal ajal on küsimuseks transpordiga seotud emissioonid. Ühel juhul, kui läga otse põllule anda, oleks transpordist KHG emissioon seotud ainult sellega, aga teisel juhul tuleb läga transportida esmalt piimatootja laguunist biogaasijaama ning sealt tagasi piimatootja laguuni (põllule laotamiseni).

Kalkulatsioonide läbiviimiseks saame lähtuda hüpoteetilisest piimatootmisettevõttest ja tema kasutatavast põllumajandusmaast, kus veise vedelsõnnikut või biogaasi tootmisel tekkinud kääritusjääki kasutatakse väetise ja mullaparandusainena.

Näiteks kui tegemist on ettevõttega, mille kasutuses on 2200 ha põllumajandusmaad ja kaugem punkt asub vedelsõnniku või kääritusjäägi hoiustamise kohast ca 30 km kaugusel, siis 100 000 m^3 mahu juures tuleb aastas arvestada transpordi ja põllule laotamise kuludega umbes 270 000 eurot. Erinevus transpordikuludes vedelsõnniku ja kääritusjäägi osas seisneb selles, et biogaasi tootmisel kasutatav vedelsõnnik tuleb esmalt transportida biogaasijaama. Antud arvutuses on lähtutud põldude erinevate kaugustega kääritusjäägi laguunist (kuni 5 km kauguses asuvate põldude osa 30%). Arvutuses on aluseks võetud tellitud teenus kääritusjäägi veoks ja laotamiseks põllule 3 eurot/m^3 ning kaugemate põldude puhul (enam kui 10 km) lisandub täiendav hinnalisa 0,07 eurot/m^3. Uuringus on selgunud, et kaugemate vahemaade puhul rakendatakse ka täiendavat hinnalisa kuni 1,5–1,8 eurot/m^3. Ettevõte võib endale soetada ka vastava masinapargi. Sel juhul sama töömahu juures oleks vajalik investeerida erinevatesse masinatesse umbes 0,95–1,20 miljonit eurot. Ettevõtjate hinnangul investeeringusumma veise vedelsõnniku ja kääritusjäägi laotamise tehnoloogiale 3000 ha põllumaa jaoks on tänastes hindades ca 1 miljon eurot.

Kui anda kääritusjääki põllule NH_4-N sisalduse järgi, siis võib ilmneda eelis võrreldes veise vedelsõnnikuga, kuivõrd kääritusjäägis on selle sisaldus mõnevõrra suurem. Seega kui võrrelda sama normi andmist kääritusjäägi või vedelsõnnikuga, kulub kääritusjääki vähem hektari kohta ja füüsilise kogusega saab väetada enam hektareid.

Kääritusjäägi väetisväärtuse (toitainete põhisel) hindamisel on metoodiliselt vajalik esmalt kokku leppida, millise väetise suhtes me võimalikku väetusväärtust hindame. Peame teadma olulisemate toiteelementide sisaldust kääritusjäägis. Lisaks peame teadma, milline on toiteelemendi alternatiivne hind näiteks tuletatud mineraalväetise ostuhinnast ja selles sisalduvatest võrreldavatest toitainetest. Antud näites on kääritusjäägi toitainete sisaldus leitud keskmistest, mis tulenevad biogaasitootjate andmetest. Näiteks on keskmises kääritusjäägis üldlämmastiku sisaldus 0,40% ja elemendi kogus vastavalt 4,0 kg/t. Lisaks on antud kääritusjäägis olulisematest makroelementidest keskmiselt veel fosforit 0,63 kg/t ja kaaliumit 2,67 kg/t. Väetisväärtuse hindamisel on arvutuse aluseks võetud levinumad mineraalväetised ja nende vastavad hinnad. Arvutustes lähtume lämmastiku hinnast, mis on leitud ammooniumnitraadi (AN 34) väetise maksumusest ning vastava väetise toimeaine hinnast. Väetise hind on antud juhul ca 370 eurot tonn ja vastava elemendi hind tonnis on ca 1075 eurot. Lisaks on arvestatud ka mineraalväetise MAP-11 (N)-52 (P2O5) väetise hinnaga 620 eurot tonn ja vastava väetise fosfori elemendi hinda 2221 eurot tonn fosfori sisalduse puhul 22,3%. Kaaliumväetise puhul on arvutustes kasutatud kaaliumkloriidi (GMOP) väetise hinda 831 eurot tonn ning elemendi hinda 1670 eurot tonn kui elemendi sisaldus on vastavalt 60%.

Lähtudes eeltoodust on võimalik antud näite puhul hinnata kääritusjäägi keskmist toitainete hinda tonni kohta. Arvestades kääritusjäägis sisalduvate toitainete kogust, on selle hinnanguline rahaline väärtus ühe tonni kohta umbes 9–12 eurot, sõltudes konkreetse kääritusjäägi toitainete sisaldusest ning võrdluseks oleva väetise maksumusest. **Arvestades Eesti loomakasvatuse potentsiaali ja teades, et veise vedelsõnnik ja tahesõnnik on peamised komponendid biogaasi tootmisel, siis selle alusel saab hinnanguliseks kääritusjäägi (2,4 miljonit tonni) rahaliseks väärtuseks ca 24 miljonit eurot.**

Biogaasi tootmisel on vajalik arvestada, et maksimaalse biometaani tootlikkuse eesmärgil ei kahjustataks kasutatavate sisenditega kääritusjäägi kvaliteeti, mis ringbiomajanduse mõistes peab minema tagasi põllumajandustootja põldudele, eesmärgiga vähendada mineraalväetiste ostmist ning parandada mulla struktuuri. Kääritusjäägi kvaliteet saab alguse biogaasi tootmiseks kasutatavate sisendite kvaliteedist ning nende omadustest. Biogaasi tootmisel on vajalik hinnata põllumajandustootja ja seotud osapoolte eesmärke. Kui biogaasitootja on eraldiseisev põllumajandustootjast, siis tuleks analüüsida, milliste sisendite kooskasutamisel saadakse kõrgem gaasitootlikkus põllumajanduslikust biomassist ning milliseid lisasisendeid on mõistlik täiendavalt kasutada, et mitte kahjustada kääritusjäägi kvaliteeti. Tagamaks nii biogaasitootja kui ka vedelsõnniku- ja põllumaaomaniku pikaajaline koostöö ja huvide minimaalne lahknevus, on soovitav, et viimane oleks kaasatud biogaasi tootmise ettevõtte omanikeringi. Ainult nii on võimalik tagada huvi sisendi kvaliteedi ja tekkiva kääritusjäägi maksimaalsest väärtusest. See omakorda võib eeldada põllumajandustootjatelt ka investeeringuid biogaasi tootmisse. Seni kuni mõlemad osapooled on rahul, mis tähendab, et biogaasitootja saab põllumajandustootjalt sisendina vedelsõnnikut ja see muudetakse biogaasiks ning selle kõrvalsaadusena tekkiv kääritusjääk läheb tagasi probleemideta põllumajandustootja põllule, pole olulist vajadust senise süsteemi muutmiseks.

Taimed väärindavad vedelsõnnikus ja kääritusjäägis olevad toitained, kuid erinevad kultuurid reageerivad mõnevõrra erinevalt. Osad kultuurid võtavad endasse antud toitained ja omastavad need, kuid osad ei pruugi kõike omastada. Seega lisaks vedelsõnnikule ja kääritusjäägile antakse juurde erinevaid mineraalväetisi. Arvamus, et vedelsõnniku ja kääritusjäägi kasutamisega ei pea enam mineraalväetisi kasutama või suudetakse sellega mineraalväetisi täiesti asendada, ei pea paika. Näiteks Saksamaal läbiviidud uurimusest selgub, et kääritusjäägi aastane maht kokku oli kõikidest biogaasijaamadest ca 387 000 tonni ja see võrdub 26% lämmastikuga, mida müüdi mineraalväetisena antud aastal (Herbes jt, 2020). Antud seisukohta, et kääritusjäägiga ei saa täiel määral asendada mineraalväetist kinnitavad erinevad täiendavad vestlused kääritusjääki kasutavate põllumajandusettevõtjatega.

Eesti piimatootjate intervjuudest ilmnes, et probleemiks on kujunemas olukord, kus imporditakse Eestisse järjest rohkem komposti ja muud orgaanilist materjali teistest riikidest. See tähendab, et lahendame teiste riikide keskkonnaprobleeme. Näiteks Hollandis viljeletakse intensiivloomakasvatust, millega kaasneb palju vedelsõnnikut ning KHG emissioon on kõrge. Sellest tulenevalt peaksid piimatootjad vastavalt regulatsioonidele tootmist vähendama. Et piimatootmist mitte vähendada, näidataksegi, et vedelsõnnik antakse või müüakse teistesse riikidesse ja seetõttu ei pea piimatootmist nii suurel määral piirama.

Piimatootjate hinnangul läheb tekkiv läga oma põldudele ja kohati võib seda isegi puudu jääda. Taimekasvatuse ja eelkõige teravilja ja õlikultuuridega tegelevate ettevõtjate puhul võib kujuneda probleemiks, et ei ole piisavalt vajalikku orgaanikat. Kui mõelda orgaanilise väetise kättesaadavusele, oleks otstarbekas lõpetada sügisel selle laotamine rohumaadele ja põllule, sest see on ressursi raiskamine. Probleem on seotud vedelsõnniku ja kääritusjäägi hoiustamisega sügisel ja ületalve ning sellele tuleb leida ratsionaalne keskkonnahoidlik lahendus. Üks võimalus on rajada enam vastavaid hoidlaid, kuid teine lahendus on kääritusjäägi väärindamine separeerimisel tahkeks ja vedelaks osaks. Eriti oluliseks muutub tahke osa

eraldamine kääritusjäägis siis kui põllud asuvad kaugemal ja vedela massi vedu seetõttu oluliselt kulukam.

Loomakasvatuses soovitakse ja eelistatakse kasutada veisevedelsõnnikut, kuid teatud juhtudel koostöös biogaasitootjatega soovitakse läga ära anda ja saada tagasi kääritusjääki. Paljudel juhtudel ei omata ise vastavat läga/digestaadi laotamistehnoloogiat vaid see ostetakse sisse tervikteenusena pakkujalt. Masinaid kasutatakse kindlal perioodil kui on läga/digestaadi muldaviimiseks optimaalne aeg. Alati ei pruugi sel perioodil olla ettevõttes vaba tööjõudu ning teenuse tellimine on riskikindlam. Alternatiivseks võimaluseks oleks ka läga või kääritusjäägi pelletiseerimine, mis aga eeldab täiendavaid investeeringuid vastavasse tehnoloogiasse.

Võrreldуna mineraalväetisega on veise vedelsõnnikus ja kääritusjäägis toitelemendi/toitelementide kontsentratsioon madal ning selle käitlemis- ja laotamiskulud kõrgemad. Lisaks tuleb arvestada ka erinevaid keskkonnanõudeid seoses veise vedelsõnniku või kääritusjäägi laotamisega. Nagu selgus vestlustest ettevõtjatega, siis on Eestis mitmetes kohtades juba olemas vedelsõnniku ja kääritusjäägi laotamise tehnoloogiad, mille kasutamisel on võimalik erinevate andurite rakendamisel saada ülevaade põllule antud vedelsõnniku, kääritusjäägi ning antavate toitainete kogusest. Tavaliselt on sellised tehnoloogiad täiendava kuluga lisaks tavapärasele laotamistehnoloogiale, kuid need investeeringud võivad ennast ära tasuda, kui suudetakse hinnata täpsemalt põllule antavaid toitainete koguseid. Lisaks on võimalik selliste tehnoloogiate juurde integreerida ka mullaanalüüside täiendavad komponendid, mis koostöös lihtsustavad panust keskkonnahoidlikesse praktikatesse ja sisendi kulude hindamisse.

Antud uurimuses ei ole viidud läbi vastavaid põldkatseid ja pole hinnatud enamsaake ja saagikusi võrdluses veise vedelsõnniku ja kääritusjäägi kasutamisel. Vastavad pikaajalised katsed koostöös põllumajandusettevõtjate ja biogaasitootjatega oleksid hädavajalikud selgitamaks erinevaid mõjusid ja erinevate tehnoloogiate rakendamise efekte.

4.3. Kääritusjäägi järeltöötlemise võimalused ja tooted

Kui biogaasi tootmisel tekkiva kääritusjäägi ladustamiseks pole piisavalt võimekust või kääritusjääki peab transportima kaugete vahemaade taha, võib olla otstarbekas kääritusjäägi järeltöötlemine. Kääritusjäägi väärindamine võib olla ka vajalik, kui eesmärk uute turustuskanalite leidmine (nt väetise tootmine, hobiaiandus, maastikuhooldus vm). Biogaasi tootmisel tekkiva kääritusjäägi väärindamiseks ja järeltöötlemiseks on välja töötatud hulk erinevaid tehnoloogiaid. Millist neist valida, sõltub suuresti sellest, mis eesmärgil seda tehakse, kuid ka konkreetsest biogaasijaamast ja turusituatsioonist antud piirkonnas.

Järeltöötlemisel rakendatavad tehnoloogiad lähtuvad eelkõige kääritusjäägis sisalduvate toiteainete kasutamise optimeerimisest. Tavaliselt on kääritusjäägi töötlemisel esimeseks etapiks separeerimine, selle tulemusena saadakse tahke ja vedel fraktsioon. Tahke osa eraldamisel jääb mineraalne lämmastik peamiselt vedelasse osasse, enamus orgaaniliselt seotud lämmastikust tahkesse. Eraldatud madala kuivaine sisaldusega (umbes 3%) vedelat fraktsiooni

saab viia otse põllule või täiendavalt töödelda. Vedela fraktsiooni edasiseks töötlemiseks kasutatakse aurustamist või membraanfiltreerimist. Järjest rohkem on biogaasijaamades katsetatud vedelast kääritusjäägist ammooniumi eraldamist ja sadestamist ammooniumsulfaadina ning fosfaatide sadestamist.

Tahke kääritusjäägi töötlemiseks kasutatakse peamiselt kuivatamist, granuleerimist või pelletiseerimist. Sellise töötluse peamine eesmärk on lihtsustada käitlemist, hoiustamist ja turundamist. Lisaks, pelletite tootmisele on võimalik tahkele kääritusjäägile lisada vedelast fraktsioonist väljasadestatud aineid või muid taimetoiteaineid konkreetset vajadust arvestades. Biojäätmete käitlemisel eraldatud tahket kääritusjääki tihti ka kompositakse. Tahke fraktsiooni eraldamise järgselt selle kompostimist soovitatakse lämmastiku immobiliseerimiseks ja lõhna vähendamiseks, kompostimine stabiliseerib ka orgaanilisi aineid ning aitab kõrvaldada lõplikult patogeenid ja umbrohuseemned.

Alljärgnevas loetelus on toodud tehnoloogiad, mida kääritusjäägi töötlemisel kasutatakse (Lamolinara jt, 2022) :

- Kääritusjäägi tihendamine, sealhulgas setitamine, filtreerimine, flotatsioon ja tsentrifuugimine. Peamiselt kasutatakse tahke ja vedela fraktsiooni eraldamiseks ning saadakse kontsentreeritud digestaat, milles 5–10% tahket fraktsiooni. Vajab täiendavat töötlemist, et vähendada toitainete kadu.
- Veetustamine. Filtreerimine ja tsentrifuugimine vee eraldamiseks ning saadakse 15–30%-line tahke fraktsioon, mida tuleb täiendavalt töödelda, et kasutada antud materjali allapanuks või vältimaks toitainete kadu.
- Membraanfiltreerimine (mikro-, ultra- ja nanofiltreerimine, pöördosmoos). Tahke fraktsiooni, mikroorganismide, makromolekulide, väikeste orgaaniliste molekulide ja ioonide eemaldamiseks vedelast fraktsioonist. Permeaat on kaaliumi ja lämmastiku rikas ning seda on võimalik kasutada väetisena. Puuduseks kõrge hooldus- ja energiavajadus ning membraanide ummistumine.
- Struviidi sadestamine. Füüsikalis-keemiline tehnoloogia, mille rakendamisel saadakse vedelast faasist sademesse taimedele vajalikud toitaineid (80–90% P, 10–40% N). Puuduseks on magneesiumsoolade kõrge hind ja seadmete järelpuhastus.
- Ammoniaagi eemaldamine (*stripping*). Ammooniumlämmastiku eemaldamine vedelast fraktsioonist gaasi faasi ja kogumine. Tehnoloogia puuduseks on vajadus tõsta pH-d, kemikaalide kasutamine puhastamiseks, kõrge energiatarve.
- Keemiline hüdrolüüs. Rakkude ja makromolekulide lõhkumine, et suurendada tahke osa lagundatavust ja veetustamist. Puuduseks kemikaalide kasutamise vajadus.
- Termiline töötlemine ja kuivatamine. Vee eraldamine veetustatud tahkest fraktsioonist kasutades kuumaõhu konvektsiooni, saades kuivaine sisalduse 80%. Puuduseks kõrge energiakulu.

Eelnimetatud tehnoloogiad integreeritakse, et saavutada maksimaalne tulemus. Üheks näiteks on NuTriSep protsess firmalt Geltzi (Saksamaa). Süsteem töötleb kääritusjääki kasutades filtreerimist, lahustamist ja sadestamist nii, et lõpptulemusena eraldatakse olulised komponendid, nagu orgaaniline aine, lämmastik, fosfor ja kaalium. Kõikidest nimetatutest tekivad eraldi tooted. Lisaks tekib ühe saadusena niisutamiseks sobiv vesi.

Ühe täiendava töötlemistehnoloogiate kombineerimise näitena võib tuua ka *Livestock Water Recycling* süsteemi (LWR süsteem). Protsessi saadusteks on tahke fraktsioon (ca 8% töödeldava materjali kogumassist, 24–28% kuivainet), vedel fraktsioon (17% töödeldava materjali kogumassist) ja vesi (75% töödeldava materjali kogumassist). LWR süsteemi tehnoloogilises protsessis esimese etapina eraldatakse vedelsõnnikust või kääritusjäägist tahke fraktsioon, mille kuivaine sisaldus on ligikaudu 15%. Seda täiendavalt tahendatakse kruvipressiga ja edasi saab seda kas ladustada või kasutada fosfori ja orgaanilise lämmastiku väetisena. Saadud filtraat pumbatakse järgmisse etappi kus eemaldatakse peened tahked osakesed. Alles jäänud vedelik filtreeritakse, et eemaldada kõik tahked osakesed ja edasi surutakse vedelik läbi membraani. Sellest protsessist saadav vesi on taaskasutatav, protsessi jäägiks on ammooniumi ja kaaliumi rikas vedelväetis, mida saab kasutada edasise töötlemiseta. Seadme maksumus on ligikaudu 1 miljon eurot ja tasuvusaeg 3,7 aastat. Seadme päevane tootlikkus on 330 m^3, elektrikulu vastavalt 630 kWh/päevas. Seade on täisautomaatne ning ei vaja täiendavat tööjõudu, kuid aitab kokku hoida transpordikuludelt (keskmiselt 248 tuhat eurot aastas, arvestades 100 000 m^3 kääritusjäägiga, mille transpordikulud on 331 000 eurot aastas) ning saadud vett saab kasutada kas kastmiseks või lautades lüpsiplatside ja eelootealade pesemiseks (kokkuhoid aastas keskmiselt 129 000 eurot).

Lisaks on terve hulk tehnoloogiaid, mida on labori tasemel katsetatud, kuid mida ei ole tööstuslikul tasemel integreeritud kääritusjäägi töötlemiseks. Lähtuvalt tehnoloogilise valmiduse tasemest kuni TVT 5 – kuni tasemini, kus tehnoloogia on kontrollitud asjakohases keskkonnas, seda on testitud põhjalikult laboris ja asjakohases simuleeritud keskkonnas ning valmis on suhteliselt täpne prototüüp, võiks olla tehnoloogiate näited järgmised (Lamolinara jt 2022):

- Ammooniumlämmastiku oksüdeerimine (osoneerimisel, fotokatalüütilisel oksüdeerimisel, elektrokeemilisel või bioelektrokeemilisel töötlemisel) ammooniumlämmastiku eemaldamiseks vedelast fraktsioonist.
- Mikrolaine kiirguse kasutamine ammooniumlämmastiku eemaldamiseks.
- Pürolüüs. Kuivpürolüüs, märgpürolüüs või hüdrotermaalne karboniseerimine, mille käigus biomass lagundatakse bioenergeetilisteks toodeteks (bioõli, süsi ja sünteesgaas). Ei ole kääritusjäägi töötlemisel laialdaselt kasutusel. Bioõli saab väärindada kemikaalide ekstraheerimisel sellest, sütt mullaparandusainena ja sünteesgaasi kemikaalide sünteesimiseks (alkoholid, alkaanid jne).
- Gaasistamine. Termokeemiline protsess, mille peamine eesmärk on sünteesgaasi tootmine, mida saab kasutada vesinikuna energeetilisel või keemilisel otstarbel või toota sellest kemikaale.
- Ultraheli. Orgaanilise aine lahustamiseks ja tahke fraktsiooni veetustamise parandamiseks kasutatav tehnoloogia.
- Biomassi kasvatamine. Veetaimede ja mikrovetikate kasvatamiseks kasutamine, mis võiks olla toormeks biokütuste või kemikaalide tootmisel.

Eesti biogaasijaamade arendamine on küll käivitunud aga senini on kääritusjääk valdavalt leidnud kasutamist mullaparandusainena põllumajandustootmises ja seetõttu pole olnud selget arendustegevust selle edasiseks väärindamiseks. Saksamaa kogemus toob esile, et alles pärast

biogaasi tootmise kasvu tekkis tootjatel surve asuda otsima lahendusi kääritusjäägi töötlemiseks, sest 10 km raadiuses asunud põllud ei võimaldanud kääritusjäägi kasutamist suurendada (Herbes jt, 2020; Schumacher jt, 2019). Eestis on üks biogaasi tootja, kes tegeleb kääritusjäägist toote arendamisega ning on turule toonud toote Bioon. Tahke Bioon ja vedel Bioon saadakse kääritusjäägi separeerimisel ja hügieniseerimisel. Küsitluse vastustes ei märkinud ükski teine biogaasitootja Eestis arendustegevust kääritusjäägi väärindamiseks. Üks intervjueeritud Läti biogaasi tootja eraldas kääritusjäägist tahke fraktsiooni eesmärgiga kasutada seda laudas loomadele allapanuks põhu asemel. Eestis on samal eesmärgil eraldatud tahket ainet lägast, kuid uuritakse ka kääritusjäägist eraldatava tahke fraktsiooni kasutamist.

Kääritusjäägi töötlemise peamine eesmärk on alandada käitlemis- ja transpordikulutusi vee sisalduse vähendamisega ning suurendada toitainete kontsentratsiooni saaduses. Eelpool kirjeldatud kääritusjäägi järeltöötlemise tehnoloogiad on erinevates kombinatsioonides piloteeritud või rakendatud. Need tehnoloogiad nõuavad suuri alginvesteeringuid ning nendega kaasnevad märkimisväärsed tegevuskulud. Tahke ja vedela osa eraldamine ei pruugi alati nõuda väga suurt investeeringut, kuid näiteks membraantehnoloogia rakendamine on kulukas, sest lisaks alginvesteeringule on kõrged tegevuskulud. Prantsusmaal pilootseadme näitel võiks membraantehnoloogia ja pöördosmoosi rakendamine maksta ca 12 eurot/m^3. Kääritusjäägi ja selles toitainete kontsentreerimist on võimalik saavutada ka näiteks ka vaakumaurustamisega, kuid see saab olla kasumlik juhul kui biogaasi tootmises jääb üle soojust.

Nii tahke kui ka vedela kääritusjäägi põllule laotamiseks on vastavad tehnoloogiad olemas ja kasutusel. Täiendav küsimus on seotud kääritusjäägist saadavate toodete turustamisega, sest selle tootmiseks tehtud kulud konkureerivad turul saadavate analoogidega (Feiz jt, 2022). Lisaks tekib küsimus kääritusjäägipõhiste toodete kvaliteedi ja nendes sisalduvate komponentide kontsentratsiooni osas. Uurimistöödes on välja toodud kohatist klientide vastuseisu sellele, et neile pakutakse tootena jäätmeid. Seega on tarvis regulatsioonide ja seaduste integreerimist toodete kommertsialiseerimiseks ja väärtusahela läbinähtavuse kirjeldamiseks. Puudub regulatiivne toetus fossiilse päritoluga väetiste kasutamise piiramiseks ja jätkusuutlikumate alternatiivide kasutuselevõtu edendamiseks. Eeltoodu viitab ka vajadusele kääritusjäägi väärindajalt selge informatsiooni saamisele, mis peaks põhinema toitainete sisalduse ja saamise protsessi kirjeldusel, ohutuse tagamise sertifikaatidel ja nende jälgitavusel. Ka Eestis läbiviidud varasemate uuringute käigus on selgunud, et tarbijad soovivad saada kindlustunnet, et kasutatav kompost või kääritusjääk pärineb kontrollitud keskkonnast ning tema saamine on igakülgselt jälgitav. Väga vähe on siiani maailmas uuritud kääritamisjäägi väärindamisel saadud uute toodete keskkonnamõju pikaaegsetes põllukatsetes.

Teaduskirjandusest selgub, et täiendavad kulud kääritusjäägi järeltöötlemisel ei võimalda paljudel juhtudel tagada tehnoloogiate rakendamisel majanduslikku jätkusuutlikkust (Vaneeckhaute jt, 2017; Herbes jt, 2020). Praegused töötlemistehnoloogiad ei ole sageli rahaliselt tasuvad võttes arvesse väärtusahela täielikku majanduslikku analüüsi kääritusjäägi kääritist väljumisest kuni põllule jõudmiseni. Majanduslikku tasuvust mõjutavad biogaasijaama suurus, sisendi päritolu, soojuse kasutamine, transpordi kaugus ja kulud, tulud kääritusjäägi müügist jms. Seetõttu võib leida kirjandusest väga erinevaid andmeid. Näiteks on hinnatud, et struviidi sadestamine vedelast fraktsioonist võib olla kahjumiga 7800 kuni kasumiga 89 000 eurot aastas (Vaneeckhaute jt 2017). Herbes jt (2020) toovad välja, et kääritusjäägi toote hind

16,6 eurot/m^3 kataks tootmiskulud tahke ja vedela osa separeerimiseks ja transpordiks ca 100 km kaugusele.

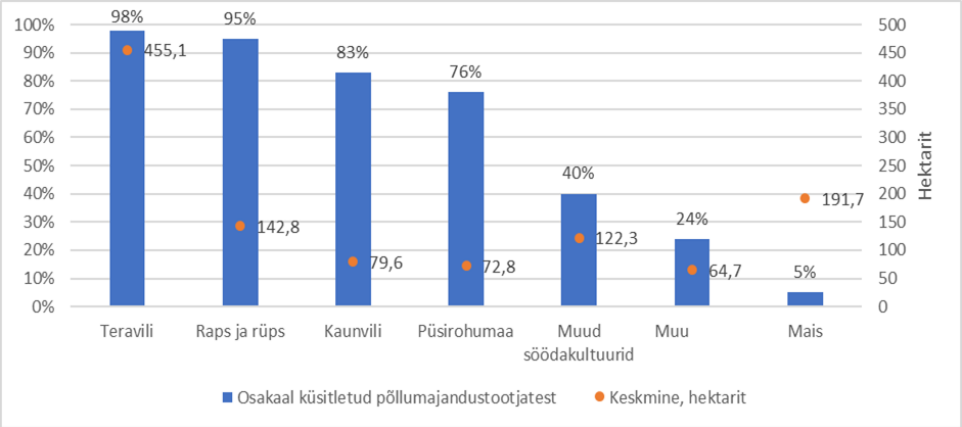
Olemasolevad andmed näitavad, et mitmed tehnoloogiad on majanduslikult kasumlikud vaid juhul, kui biogaasi jaamas jääb üle kasutamata soojusenergiat. Teine väga tähtis komponent majandusliku kasumlikkuse tagamisel on transpordikulude vähenemine kääritusjäägist saadud toodete korral võrreldes töötlemata kääritusjäägiga (Feiz jt, 2022). Lisaks on näidatud, et vedela fraktsiooni töötlemise vajadus reoveepuhastis toob kaasa jooksvad kulud, mis enamikel juhtudel ei õigusta selliste tehnoloogiate kasutuselevõttu.

Kokkuvõttes, vaatamata paljude tehnoloogiate kättesaadavusele, on praktikas nende rakendamine tehnilistel, majanduslikel või regulatiivsetel kaalutlustel siiski piiratud.

4.3. Põllumajandustootjate valmisolek asendada mineraalväetis kääritusjäägiga

Hindamaks, milline on põllumajandustootjate valmisolek asendada taimekasvatuses vajalik mineraalväetis peamiselt põllumajandustoormest toodetud biogaasi kõrvalsaaduse ehk kääritusjäägiga, korraldati 2023. aasta oktoobris põllumeeste ühistu Kevili ja Eesti Aiandusliidu liikmete seas küsitlus.

Küsitlusele vastas 58 Kevili liiget ja kolm aiandussektoris tegutsevat ettevõtjat. Küsitlusele vastanud Kevili liikmete keskmine põllumajanduskultuuride kasvupind oli 777,8 hektarit (mediaan 466 hektarit). Nendest 98% kasvatasid teravilja keskmiselt 455,1 hektaril, 95% rapsi ja rüpsi keskmiselt 142,8 hektaril ning 83% kaunvilju keskmiselt 79,6 hektaril (joonis 17). Püsirohumaad omas 76% vastajatest keskmiselt 72,8 hektaril. 24% Kevili liikmetest kasvatas ka ristikut, tatart, mesikat, heinaseemet ning mee- ja vahekultuure keskmiselt 64,7 hektaril. Küsitlusele vastanud aiandussektori üks ettevõtja oli maasikakasvataja ning kaks olid katmikalal lille- ja köögiviljakasvatajad.



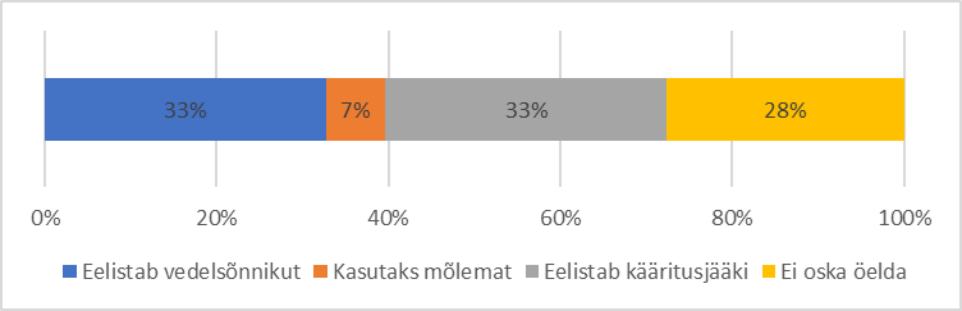
Joonis 16. Küsitletud Kevili liikmete keskmine põllukultuuride pind (ha) 2023. aastal
Allikas: Kevili liikmete küsitlus, 2023.

Küsitlusele vastanud kõik Kevili liikmed kasutasid oma põllumajandusmaa väetamisel mineraalväetist ning mineraalväetisega väetati keskmiselt 86% oma põllumajandusmaast. 28% põllumajandustootjatest väetas põlde ka orgaanilise väetisega, peamiselt vedel- (sõltuvalt

põllukultuurist keskmiselt 15–60 tonni hektarile) ja tahesõnnikuga. Kääritusjäägi ja komposti kasutamise kogemus oli vaid mõnel üksikul põllumajandustootjal. Need üksikud põllumajandustootjad kasutasid põldude väetamisel kääritusjääki sõltuvalt põllukultuurist keskmiselt 15–30 tonni hektarile ning komposti 4–30 tonni hektarile. Küsitlusele vastanud kõik aiandussektori esindajad kasutasid mineraalväetist ning üks tootja kasutas lisaks vetika biopreparaate.

Kui põllumajandustootjal oleks põllumaa väetamisel valida nii vedelsõnniku ja kääritusjäägi vahel, siis 33% Kevili liikmetest eelistaks oma põllumajandusmaa väetamisel kasutada vedelsõnnikut (joonis 17). Seisukohta põhjendati võrdluses kääritusjäägiga järgmiselt:

- Vedelsõnnikus on kõrgem süsiniku ja lämmastiku sisaldus.
- Vedelsõnnikuga tekib mulda rohkem huumust.
- Vedelsõnnik aktiveerib mullaelustikku paremini ning taimed omastavad toitaineid kiiremini.
- Kääritusjääk sisaldab raskmetalle.
- Kääritusjäägis on vajalikud elusorganismid sõnniku käärimise käigus hävinenud.
- Vedelsõnnik on kättesaadavam ja selle laotamine on odavam.
- Haritavad põllumajandusmaad asuvad piimakarja lautade läheduses (madal logistikakulu).
- Puuduvad kääritusjäägi kasutamise kogemus ja teadmised.



Joonis 17. Vedelsõnniku või kääritusjäägi eelistamine põllumaa väetamisel, %
Allikas: Kevili liikmete küsitlus, 2023.

Eeltoodud viit esimest põhjendust tuleks enamuses käsitleda kui eksiarvamusi. Kääritamine on bioloogiline protsess, mis ei toimuks, kui seal puuduksid mikroorganismid. Kääritusjäägi keemiline koostis on suures osas substraadi keemilise koostise peegeldus, sest mineraalelemente kääritamise käigus juurde ei teki. Sama palju raskmetalle kui substraadis, on neid ka kääritusjäägis. Osaliselt saab nõustuda väitega, et vedelsõnnikus on rohkem süsinikku ja selle mõju mullaelustikule on suurem. Katsed on samas näidanud, et mullaelustiku aktiivsus püsib pärast vedelsõnniku mulda viimist kääritusjäägiga võrreldes kõrgem ainult väga lühikest aega. Kohe kui kergesti lagundatavad süsinikühendid on lagundatud see erinevus kaob (Johansen jt, 2013; Iocoli jt, 2019). Kõik süsinikühendid, mis osalevad mulla huumuse tekkeks, jäävad kääritamisel substraati alles (Möller, 2009; Fouda jt, 2013; Bachmann jt, 2014; Müller, 2015). Seetõttu ei pea paika väide, et võrreldes kääritusjäägiga, tekib vedelsõnnikuga väetades huumust rohkem. Biogaasijaamades lisatakse tavaliselt gaasi toodangu suurendamiseks

vedelsõnnikule juurde ka teisi substraate, mistõttu ei tarvitse kääritusjäägi süsinikusisaldus vedelsõnniku omast alati ka erineda. Sellisel juhul on huumuse tekke potentsiaal kääritusjäägiga väetades isegi suurem, sest vedelsõnnikus on palju neid süsinikühendeid, mis huumuse tekkes ei osale. Kääritusjäägi lämmastikusisaldus sõltub sarnaselt süsinikuga lisasubstraatidest. Kääritamisel võib esineda väike lämmastiku lendumiskadu, sest protsessi käigus tõuseb substraadi pH, mis soodustab NH_3 teket ja emissiooni. Samas on kääritusjäägis taimedele omastatavat NH_4-N rohkem, mistõttu on võimalik sellega rahuldada taimede lämmastikutarvet paremini kui vedelsõnnikuga. Eeltoodust tulenevalt on vajalik suurem selgitustöö kääritusjäägi kvaliteedi, k.a raskemetallide osas, ning vastav jälgitav informatsioon.

Oma põllumajandusmaa väetamisel eelistaks 33% küsitletutest kasutada kääritusjääki. Valikut põhjendati võrdluses vedelsõnnikuga järgmiselt:

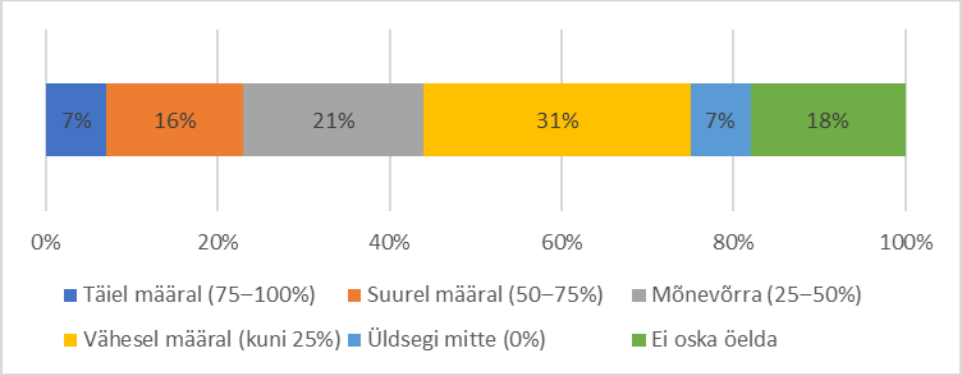
- Kääritusjäägi käitlemine on lihtsam.
- Kääritusjäägi kulunorm hektarile on väiksem.
- Kääritusjäägi käitlemine vajab vähem eritehnikat.
- Kääritusjäägi käitlemisega kaasneb vähem õhureostust ja lõhnasaastet.
- Kääritusjääk sobib mullale paremini, st kääritusjääk on juba bioloogiliselt lagunenud orgaaniline materjal ning toitained on taimedele paremini kättesaadavad.
- Kääritusjäägis on umbrohuseemned ja haigustekitajad hävinenud.
- Omab laotustehnikat, mis võimaldab kääritusjääki laotada õigeaegselt.
- Vedelsõnniku kättesaadavus on halb.

Väiksem osa (7%) küsitletud põllumajandustootjatest kasutaks oma põldude väetamisel nii vedelsõnnikut kui ka kääritusjääki, põhjendades, et igasugune orgaaniline väetis on mullale hea, kuigi eelistus sõltuks pigem orgaanilise väetise toitainete sisaldusest, orgaanilise väetise hinnast ning laotamiskuludest. Ülejäänud põllumajandustootjad ei osanud oma eelistust väljendada, sest neil puudusid nii vedelsõnniku kui ka kääritusjäägi kasutamise kogemused ning ka teadmised (hind, kättesaadavus vms). Aiandussektoris tegutsev maasikakasvataja eelistaks kasutada põldude väetamisel pigem kääritusjääki, sest ettevõtja hinnangul kääritusjääk ei sisalda idanevaid umbrohuseemneid, selle kasutamine ei häiri külaelanikke ega koorma loodust. Katmikaladel tootjad ei kasutaks kumbagi pakutud orgaanilist väetist.

Lähema kolme aasta jooksul on suuremal või vähemal määral valmis asendama mineraalväetist orgaaniliste väetistega 75% küsitlusele vastanud Kevili liikmetest (joonis 18). Ülejäänud ei osanud kindlat seisukohta märkida või siis ei kavanda midagi oma põllumajandusmaa väetamispraktikas muuta. Tervikuna on põllumajandustootjad lähema kolme aasta jooksul nõus asendama mineraalväetist orgaanilise väetisega juhul, kui:

- orgaaniline väetis oleks kättesaadav (koguseliselt ja ajaliselt),
- orgaanilise väetise kasutamine oleks majanduslikult kasulik (sobilik müügihind, madal transpordi- ja laotuskulu vms),
- orgaanilise väetise ladustamistingimused ja laotustehnika oleks ettevõttes olemas,
- orgaanilise väetise laotamise tehnoloogia võimaldaks kiiret ja ühtlast väetamist, sest lubatud väetamise periood on lühike ning põllumaa pindala, mida väetama peab, on suur (mõne küsitletud põllumajandustootja haritava põllumajandusmaa pindala ulatus mitme tuhande hektarini),

- kääritusjäägi ja selle kasutamise kohta oleks rohkem teavet (toitainete sisaldus, käitlemise tehnoloogia vms),
- mineraalväetise kättesaadavus halveneks.



Joonis 18. Valmisolek lähema kolme aasta jooksul asendada mineraalväetist orgaanilise väetisega (sulgudes haritava maa osatähtsus), %
Allikas: Kevili liikmete küsitlus, 2023.

Samas teadvustatakse, et orgaanilisel väetisel on mullale pikaaegsem mõju (toiteelemendid on taimedele kättesaadavad aeglaselt, kuid kergemini), tõstab mullas elurikkust ja mulla (pinnase) vastupanuvõimet ekstreemsetes olukordades (suureneb põuakindlus, vastupanuvõime tuuleerosioonile paraneb vms) ning on mullale tervikuna kasulikum kui mineraalväetis. Kuid pealtväetisena plaanitakse kasutada ka edaspidi pigem mineraalväetist, sest taliviljade lämmastiku vajadust ei ole võimalik ainult orgaanilise väetisega katta. Seega praktikas eelistatakse pigem kombineerida orgaanilist ja mineraalväetist vastavalt põllukultuuri toitainete vajadusele ning mineraalväetise kasutamine võimaldab kompenseerida orgaanilise väetise võimalikku puudujääki näiteks fosfori, kaaliumi ja mikroelementide osas.

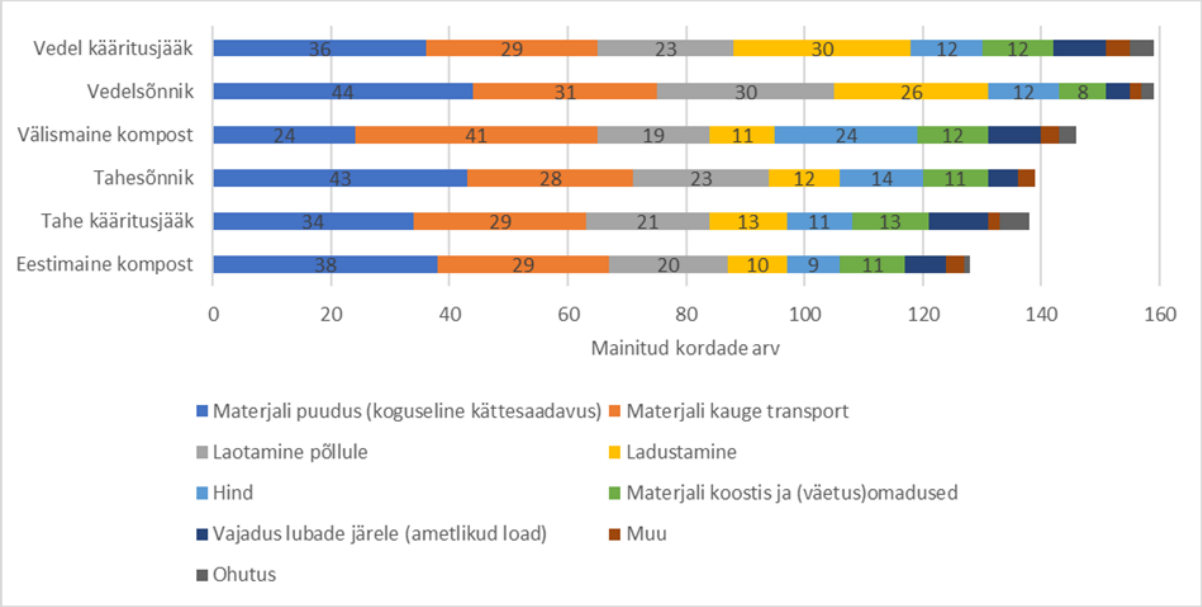
Lähiaastatel asendaks aiandussektoris tegutsevad ettevõtjad mineraalväetise orgaanilise väetisega vähesel määral kui üldse. Maasikakasvataja märkis, et üleminek mineraalväetiselt orgaanilisele väetisele saaks toimuda järk-järgult õppides ja väetusskeeme kohandades, et kõik vajalik oleks mullale ja taimedele tagatud. Samuti sõltuks üleminek hinnast, tehnika olemasolust vms. Samas katmikala on kontrollitud kasvukeskkond. Katmikalal tegutsevad ettevõtjad märkisid, et nad rakendavad täppisväetamise tehnoloogiat, mis tähendab, et kastmisvees kasutatakse täislahustuvaid väetisi ja preparaate ning seega on taimede kasvuks vajalikud makro- ja mikrokomponendid kastmissvees väga täpselt paigas. Küll aga saaks orgaanilisi väetisi kasutada substraatide ettevalmistamisel.

Põllumajandustootjate jaoks on sõltuvalt orgaanilise väetise liigist selle kasutamise takistuste määr erinev. Kõige sagedamini nimetati erinevaid takistusi vedela käärtitusjäägi ja kõige vähem eestimaise komposti kasutamisel (joonis 19). Samas kõikide orgaaniliste väetiste takistused on sarnased. Alustades kõige suuremast takistusest, on küsitletud Kevili liikmete hinnangul orgaaniliste väetiste kasutamise probleemkohad järgmised:

1. Orgaanilised väetised ei ole koguseliselt piisavalt kättesaadavad.
2. Orgaaniliste väetiste pakkumist iseloomustab piirkondlikkus. Orgaaniliste väetiste pakkumiste asukohad jäävad väetamist vajavate põldude suhtes liialt kaugeks. See

omakorda tähendab, et orgaanilise väetise transpordikulu osutub liialt kõrgeks ja selle kasutamine kalliks.

3. Orgaanilise väetise laotamine põllule: vajaliku laotamistehnika puudus, laotamise piiratud periood (saagikoristuse ja sügiskülvi vahele jääb liiga väike ajaaken), vähe laotamise teenusepakkujad (nõudlus ületab pakkumise), laotamise kõrge hind ja komposti lenduvus kevadisel pealtväetamisel.
4. Ettevõtjatel puuduvad orgaaniliste väetiste ladustamise võimalused. Erinevalt mineraalväetiste ladustamise ja hoiustamise tingimustest vajavad orgaanilised väetised komplekssemaid ladustamistingimusi.
5. Orgaaniliste väetiste müügihind. Kõige sagedamini kurdeti välismaise komposti kõrge hinna üle. Seda ilmselt seetõttu, et Kevili liikmetel on välismaise kääritusjäägi kasutamise kogemus. Tervikuna tunnistati, kuna orgaaniliste väetiste kasutamise kogemus suuresti puudub, siis puudub ka teadmine, mis on erinevate orgaaniliste väetiste hinnad.
6. Materjali koostis ja selle väetusomadused.
7. Muud takistused nagu vajadus lubade järele, keskkonna piirangud, ebakorrapärane tarne (st järjepidev orgaanilise väetise pakkumine turul puudub) ning ohutus. Välismaise komposti kasutamise puhul nähakse ohtu võõrliikide levikuks ning vedelsõnniku, tahesõnniku ja eestimaise komposti kasutamise puhul nähakse ohtu umbrohuseemnete levikuks.



Joonis 19. Orgaaniliste väetiste kasutamise takistused, mainitud kordade arv (n=58)
Allikas: Kevili liikmete küsitlus, 2023.

Aiandussektoris tegutsevate ettevõtjate jaoks oli orgaaniliste väetiste kasutamisel kõige suuremaks takistuseks sõltumata väetise liigist selle: 1) koostis ja väetusomadused, täpsemalt toote pidev koostise ja omaduste stabiilsus ja püsivus, 2) laotamine ning 3) hind. Ülejäänud probleemid on marginaalsed.

Küsitletud põllukultuuride kasvatajad ja aiandussektoris tegutsevad ettevõtjad nimetasid mitmeid kääritusjäägi, komposti ja teiste kohalike orgaaniliste väetiste kasutamist soodustavaid tegevusi. Need tegevused on järgmised:

- Koolitus- ja infopäevade korraldamine sellisetel teemadel nagu orgaaniliste väetiste tootmine (kuidas ja millest toodetakse, kuidas saavad põllumajandustootjad ise sõnnikust komposti toota vms), koostis (sh ohutus) ja väetusomadused, käitlemine (laotustehnoloogiad vms) ja mõju. Kindlasti soovitakse tutvuda ka parimate praktikatega.
- Orgaaniliste väetiste kasutamise alase nõuande pakkumine.
- Muuta info orgaanilise väetiste kohta kättesaadavaks, et põllukultuuride kasvatajad saaksid operatiivselt teada, kes, kus, mida, millise kvaliteedi ja hinnaga orgaanilist väetist pakub vms. Info kättesaamise lahendusena kasutada reklaami või luua operatiivse info levikuks kõigile põllumajandustootjatele kättesaadav infotehnoloogiline lahendus.
- Toetada ettevõtetes tehnoloogilise protsessi ümberkorraldamist nii investeeringute tegemisel (laotustehnoloogiasse, ladustamistingimuste loomisse vms) kui edaspidisel majandamisel maksupoliitiliselt.
- Laotusteenuse kättesaadavuse parandamine, st pakkujate arvu suurendamine ja teenuse hinna kättesaadavus. Orgaaniliste väetiste pakkujad võiksid väetist pakkuda võimalusel koos põllule laotamisega.
- Piirkondliku taristu loomine või ükskõik millise orgaanilise väetise kättesaadavuse tagamine põllukarja või suurfarmide vahetus läheduses. See oleks üks lahendus üle Eesti orgaaniliste väetitse kättesaadavuse tagamisel.
- Orgaaniliste väetiste pakkujad võiksid pakkuda pikemaid lepinguid ja stabiilsemat hinda.
- Arendada orgaaniliste väetiste käitlemise tehnoloogilisi lahendusi, et orgaaniliste väetiste kasutamine oleks odavam, kasulikum ja mitte oluliselt keerulisem kui mineraalväetise kasutamise puhul.
- Biolagunevate jäätmete väärindamisel eelistada nende kompostimist biogaasi tootmisele.
- Reoveesette kasutamisel võiks olla lubade saamine lihtsam ja odavam (sh mullaproovid).
- Võtta kasutusele järvedes leiduv muda. Pressida järvemuda graanuliks, mida on lihtne põllumehel põldudele laotada.
- Soodustada loomapidamist, sest orgaanilist väetist ei jätku kõigile.
- Orgaanilised väetised tuleks standardiseerida. Selleks, et näiteks aiandussektoris kasutusele võtta kääritusjääk, on vajalik saavutada selle järjepidev, ühesugune ja kindel koostis, kus on keemilised, füüsilised omadused fikseeritud vms.
- Vähendada riigipoolset administreerimist ja bürokraatiat.

4.4. Tähelepanekud intervjuudest ja küsitlusest biogaasitootjatega

Biogaasi tootmisega tegelevate ettevõttete küsitlusest (2023) ilmnes, et tehakse ettepanek viia jäätmeseadusesse sisse täiendav muudatus mille tulemusena ei peaks biogaasitootjaid käsitlema kui jäätmekäitlejaid, kogujaid ja ladustajaid – prügimägede ehitajaid. Põhjuseks

asjaolu, et kliimaeesmärkide, rohemajandusele ülemineku ja ringmajanduse parema rakendamise üheks elluviijaks on biogaasitootja. Olemuslikult võtavad biogaasi tootjad orgaaniliselt lagunevad jäätmed sisendina kasutusele biogaasi tootmiseks ja seega muudavad selle gaasiliseks biokütuseks. Selle kõrvalsaadusena tekib kääritusjääk, mis on kasutatav nii väetise kui ka mullaparandusainena ja tulemusena jäätmeid, jääke ega saastet ei jää. Biogaasi tootjaid tuleb toetada ja innustada biojäätmeid võimalikult palju kääritama, aga kui jäätmeloa saamine võtab aega 15 kuud, mille käigus nõutakse sadevete kogumist ja puhastamist, siis see ei ole antud ettevõtlust soosiv. Biogaasitootjad toovad esile biojäätmetega tegelemise puhul liigset bürokraatiat. Biogaasitootjate arvates võiks biogaasi tootmiseks kasutatavaid sisendeid nimetada biojäätmete asemel teiseseks toormeks, biogaasi tootja on huvitatud võimalikult palju biojäätmete kääritamisest, aga kui ta peab hakkama selleks jäätmekäitlejaks, hankima lube, koguma sadeveest ujuvprahti, mis on loodusest pärit, siis see pärsib tema tegevust.

Mitmed biogaasitootjad peavad oluliseks teha kääritusjäägiga 5–10 aastaseid põldkatseid tootmispõldudel võrdluses vedelsõnniku ja/või mineraalväetiste kasutamisega väetades vastavalt põllumajanduskultuuride väetamisnormidele ja harides ühtmoodi. Selliselt tekib sisuline võrdlusmoment pikaajalises perspektiivis Ainult pikaajaliste katsetega on võimalik teada saada, millised on tegelikud mullastruktuuri, toitainete varude ja mulla orgaanilise aine sisalduse muutused.

5. Soovitused poliitikakujundajatele

Eestis on olemas biogaasi tootmisel tekkiva kääritusjäägi kasutamiseks seadusandlik raam. Soovides kääritusjääki kasutada ringbiomajanduse mõistes põllumajandustootja põldudel väetis- või mullaparandusainena, ei ole vajalik läbi viia täiendavaid toiminguid. Vajalik on aeg-ajalt proovide võtmine. Kääritusjäägi korral ei ole võimalik võtta proove partiide lõikes, kuivõrd kääritusjäägi tekkimise protsess on pidev. See esitab väljakutse, kas vastavad proovid on esinduslikud ja peegeldavad tõeselt kääritusjäägi kvaliteeti ja ohutust See omakorda seab kõrgendatud nõudmised biogaasijaama sisendi kvaliteedile. Eeltoodust tulenevalt on soovituseks, et toorme tarnija peaks tegema aeg-ajalt mõne analüüsi, et tuvastada kvaliteedinõute täitmine, näiteks raskmetallide sisalduse osas. Takistuseks sertifitseerimisel võivad kujuneda *Salmonella spp* ja *E.coli* sisaldused kääritusjäägis. Seetõttu on soovitatav põhjalikult aru saada nende tekke põhjustest. Probleemiks on see, et ettevõtjad, kes sertifitseerimisele ei kuulu, annavad oma vedelsõnniku põllule otse, ilma mingi kontrollita. Oluline on, et sertifitseerimise läbinud kääritusjääki ei käsitleta enam jäätmetena ning seda tohib turustada ilma jäätmeluba või registreerimistõendit omamata. Kui toormeks ei olnud jäätmed vaid põllumajandussaadused, siis sertifikaati taotleda ei ole vaja. Samas ei ole sellisel juhul kääritusjäägi omaduste kohta muud seadusandlikku akti ega standardit. Mõistlik oleks kääritusjäägi kasutajal ka sel juhul kääritusjäägi omadusi võrrelda ohutus- ja kvaliteedinäitajatega keskkonnaministri määrusest nr 12.

Vähendamaks võimalike võõriste sattumist põldudele on soovitav väga põhjalikult tegelda biogaasi tootmiseks kasutatava sisendi kvaliteedi ning kääritamisele eelnevate tehnoloogiliste protsesside arendamisega. Kuivõrd antud tehnoloogiate osa võib hinnanguliselt maksta jaama kohta 0,7–1,0 miljonit eurot, siis oleks soovituslik riigipoolsete investeeringutoetuste pakkumine kuni 50% osas. Biogaasitootjad konkureerivad turul ka teiste kütuseliikidega, siis nende motivatsiooni suurendamiseks investeerida tehnoloogiasse võõriste eraldamiseks, oleks kohane riigipoolne toetus konkreetsetesse seadmetesse. Lõpptulemusena võõriste kääritusjääki sattumise vältimine aitab kaitsta pikaajaliselt meie põllumuldade tervist ja jätkusuutlikkust.

Paljud loomakasvatajad ei soovi ära anda veisevedelsõnnikut biogaasi tootmiseks, neil on kartusi ja eelarvamusi sõnniku asemel saadava kääritusjäägi väetusomaduste, ohutuse ja kvaliteedi osas. Seetõttu oleks vajalik korraldada põllumajandustootjatele tutvustavaid koolitusi ja õppepäevi, mis praktiliste näidetega aitaks tootjatel aru saada kääritusjäägi toitainete sisaldusest ja sobivuseks kasutamiseks konkreetsete kultuuride kasvatamisel. Vastavad teadmussiirde tegevused peaksid põhinema põhjalikel pikaajalistel metoodiliselt korrektselt korraldatud katsete tulemustel. Eeltoodu peamiseks eeltingimuseks on põllul kääritusjäägiga pikaajaliste katsete läbiviimine kindla metoodika ja katseskeemi järgi.

Kääritusjäägi kuivaine sisaldus on suhteliselt madal ning selle kasutamise efektiivsemaks muutmiseks võib olla vajalik järeltöötlemine, milles eraldatakse vedel ja tahke fraktsioon et vähendada transpordikulu ning CO_2 emissiooni. Kääritusjäägi transpordikulude vähendamine on üks võimalus vähendada loomakasvatuse KHG emissiooni. Arvestades märkimisväärset investeeringumahtu, näiteks 100 000 m^3 kääritusjäägist vedela ja tahkeosa eraldamiseks summas 0,7– 0,9 miljonit eurot, on vajalik välja töötada vastavate süsteemide hankimise

investeeringu toetamise meetmed. Nimetatud summa on saadud vastavalt uuringu käigus läbiviidud erinevate ettevõtete intervjuudele ja saadud hinnapäringutele.

Biogaasi tootjad soovivad biojäätmetega tegelemisega seotud bürokraatia vähendamist. Nende soovitusel võiks biogaasi tootmiseks kasutatavaid sisendeid nimetada jäätmete asemel teiseseks toormeks, biogaasi tootja on huvitatud erinevate biojäätmete kääritamisest, aga kui ta peab hakkama selleks jäätmekäitlejaks, hankima lube, koguma sadeveest ujuvprahti jms, siis see pärsib tema tegevust. Lisaks on antud tegevus seotud täiendavate finantskohustustega biogaasitootja juures ajutiselt ladustatud teisese toorme kasutusest tulenevalt. Ka uurimuse koostajad soovitavad kaaluda võimalusi eeltoodu küsimuste lahendamiseks seonduvalt biojäätmete ümber nimetamisega teiseseks toormeks juhul kui need asuvad selle käitleja territooriumil ajutiselt varem kokkulepitud ajapiirangu raames konkreetsel eesmärgil - biogaasitootmiseks või kompostimiseks, mille tulemusena saadakse mullaparandusaine või väetis või mõni muu biotoode.

Vastavalt läbiviidud analüüsile selgus, et võiks kaaluda lisaks uute biogaasijaamade ehitamisele ka olemasolevate biogaasijaamade laiendamise võimalusi, mis avaks täiendavad teed biojäätmete töötlemiseks, et samades kääritites või nende juurde rajatavates lisakääritites saaks hakata vastu võtma ka muid biojäätmeid, mida seni selles biogaasijaamsei ole töödeldud, nt kaubandusest või turgudelt pärinevaid jäätmeid, 2. ja 3. kategooria loomseid kõrvalsaadusi jms. See on oluline, kuivõrd sellega täidame biolagunevate jäätmete kogumise ja kasutamise eesmärke Eestis.

Kuivõrd kääritusjääk võib jääda mõneks ajaks seisma enne selle põllule laotamist, siis on vajalik mõelda, kuidas vähendada jääkmetaani eraldumist, sest tegemist on kasvuhoonegaasiga. Kindlasti oleks soovituslik antud temaatika valguses viia läbi täiendavad spetsiifilisi uuringuid, mis selgitaksid täpsemalt vedelsõnniku ja kääritusjäägi ladustamise keskkonnamõjusid.

Lisaks regionaal- ja põllumajandusministeeriumi poolt pakutavatele finantseerimisvõimalustele on vaja leida täiendavaid vahendeid ka teistest ministeeriumitest biojäätmete käitlemisvõimaluste avardamiseks nii biogaasi tootmisel kui ka biojäätmete ringlussevõtuks üldisemalt.

Selleks, et saada selgemat ülevaadet kääritusjäägi kasutamisest ja kogustest konkreetsete kultuuride puhul põllumajandustootmises, oleks vajalik ettevõtetes e-põlluraamatu rakendamine ning selle sidumine põldude andmebaasidega.

Kui meil tavapäraselt liiguvad toitained maapiirkonnast linna, siis mõistlik oleks, et suudaksime ka enam toitaineid tuua tagasi maapiirkonda, mis aga tähendab teatud biolagunevate jäätmete liigiti kogumist ja nendes sisalduvate taimetoitainete suunamist biogaasijaamade kaudu kääritusjäägina põllule. Tulemuse saavutamiseks on asjakohane vastavate regulatsioonide sisseviimine biojäätmete kogumisel ja käitlemisel.

Biogaasitootmise asukohad moodustuvad selgelt piirkondades kus asuvad suuremad loomakasvatusettevõtted. Kuivõrd teaduskirjanduses on esile toodud, et biogaasitootmisest tekkiva kääritusjäägi kasutus põldudel on kõrgete transpordikulude tõttu majanduslikult põhjendatud valdavalt 10 km raadiuses, siis tuleks ka jälgida, et uued rajatavad biogaasijaamad Eestis oleksid piisavalt hajutatud, et vältida piirkonniti toitainete kuhjumist muldades.

Suurendamaks põllumajandustootmises kääritusjäägi kasutamist on soovitus võimaldada vastavaid toetusmeetmeid selle transportimise/laialiveo, põllule andmise/laotamise, vaheladustamise keskkonnasõbralikesse tehnoloogiatesse. Soodustada tuleks vastavate biometaanil töötavate masintehnoloogiate soetamist ja kasutamist.

Kääritusjäägi järeltöötlemise tehnoloogilised lahendused on kõrge investeeringukuluga. Selleks, et suurendada kääritusjäägist ainete eraldamist ja uute toodete teket, on vajalik tugevdada vastavat teadusarendustegevust ning tagada investeeringutoetused vastavate tehnoloogiate soetamiseks. Vedela kääritusjäägi laotamistehnoloogiad ei erine veisevedelsõnniku laotamiseks kasutatavatest. Vastavad lahendused on turul olemas, kuid nende kasutusvõimalus tuleks tagada investeeringutoetuse meetmetega.

5.1. Kääritusjäägi edasise tootestamise võimalused

Sertifitseerimine on mitmeti kasulik, sest võimaldab hoida kontrolli lähtematerjali ja käärimisjäägi omaduste üle ning annab käärimisjäägi kasutajale kindlustunde, et selle omadusi on tõendanud erapooletu osapool ning kvaliteedi kohta tehakse süstemaatilist järelevalvet. Kääritusjäägi tootestamine sertifitseerimise läbi on vabatahtlik ja otseselt seda kohustada ei saa. **Soovitus.** Ehkki sertifitseerimist kohustada ei saa, siis iga biogaasi tootja võiks järgida tootestamise määruse reegleid isegi siis, kui ta ei taha seda ametlikult tooteks vormistada. See teguviis võtaks ära ebakindluse toote kvaliteedi kohta, võimaldaks kontrolli lähtematerjali üle, sätestaks hoiule panemise ja hoiustamise tingimused, aitaks õigeaegselt välja selgitada vead ja puudused. Need tegurid on ju samavõrra olulised nii sertifitseeritud kui sertifitseerimata biogaasijaamas.

Sertifitseerimine ei käsitle ega mõjuta kääritusjäägi transporti või transpordikulusid. Laotamist puudutab sertifitseerimine sedavõrd, kui see on seotud veeseadusest tulenevate N ja P laotusnormidega. Ladustamist/säilitamist puudutab sertifitseerimine sedavõrd, kui see on seotud vajadusega vältida jääkmetaani heidet. Kääritusjäägi kui toote hoiule panemine ja metaaniheite vältimine on tootja ülesanne hetkeni, kui see oma toote teisele osapoolele üle annab.

Soovitus. Jääkmetaani heite määramiseks ladustamise käigus on vaja metoodikat ja see peab puudutama kõiki osapooli, mitte ainult toote sertifitseerijat. Jääkbiogaasi ja suurenenud ammoniaagi emissiooni vähendamise eesmärgil tuleks kääritusjäägi hoidlad katta, nagu seda näeb ette ka veeseadus. Kuna kaetud vedelsõnniku ja kääritusjäägi hoidlate rajamine on umbes 1/3 võrra kallim võrreldes katmata hoidlatega, siis on siin mõõdapääsmatult vajalik vastavate toetusmeetmete olemasolu.

Kääritusjäägi laotamine ei ole seotud toote sertifitseerimise temaatikaga.

Biogaasijaamades on sertifitseerimisteemaliste vestluste läbiv toon, et biogaasijaamad ei ole kääritusjäägi tootjad, vaid biogaasi tootjad, kääritusjäägi kvaliteedi määrab pigem laut kui biogaasijaam, ning kääritusjäägi temaatikaga soovitakse tegeleda pigem võimalikult vähe. Alternatiivkütuse tootmise nimel ei tohi siiski teha mööndusi käärimisjäägi kvaliteedile, eriti kui tegu on võõristega. Võõriste sisaldusega tuleks tegeleda juba enne kääritamist. **Soovitus.** Biolagunevate jäätmete ja depaketeeritud toidu kääritamisel põllumajanduslikus

biogaasijaamas tuleb võõriste sisaldus välja selgitada ja normeerida enne kääritamist. Võõriste eemaldamata jätmine ei tohi olla odavam/mugavam, kui võõriste eemaldamine.

Tootestamise määrus muutmist ei vaja, sest protseduurid on selged ja hästi rakendatavad. **Soovitus**. Vaja on reguleerida tootestamata kääritusjäägi käitlemine, ladustamine ja laotamine. Probleem on olnud selles, et biogaasi tootja näeb sertifitseerimiseks vaeva ja teeb kulutusi protsessi nõuetele vastavusse viimiseks, kuid teine biogaasitootja võib tootestamata digestaadi otse põllule viia. See ei ole motiveeriv, eriti siis, kui mõlemal on probleeme mikrobioloogiliste parameetritega.

Peamine regulatiivne ülesanne on ühtlustada tegevuskava, kuidas sertifitseerimisasutus ja Põllumajandus- ja Toiduamet (PTA) reageerivad *E.coli* ja *Salmonella* ilmnemise korral. Neid ei tohi olla ei sertifitseeritud tootes ega ka sertifitseerimata käärimisjäägis või toorsõnnikus, mis laotatakse põllule. **Soovitus.** Sertifitseerimisasutus ja PTA peaksid kontrollimeetmed ühtlustama.

Käärimisjäägi keemilised parameetrid on paremini teada sertifitseeritud toote korral ja kahjuks ei ole kuigi hästi dokumenteeritud kääritusjäägi otsekasutuse korral. **Soovitus.** Iga biogaasijaam peab määrama käärimisjäägist samu parameetreid, mis tootestamisel.

Eelnevalt nimetatud erinevate tegevuste raames teostatavate mikrobioloogiliste ja keemiliste analüüside ühtlustamine peaks hõlmama ka analüüsiks kasutatavate metoodikate ülevaatamise. Kui vähegi võimalik, peaks erinevates laborites tehtud analüüsid olema teostatud samade rahvusvaheliste standardmetoodikate alusel.

Kui on tegu loomsete kõrvalsaadustega, siis on vaja hügieniseerimist. **Soovitus**: hügieniseerimissõlmede rajamine võiks olla riiklikult rahastatav. Seisukoha selliste sõlmede kohta peab võtma ka PTA.

Ainuüksi tahketest jäätmetest, näiteks rohtsest biomassist, ei ole Eestis võimalik biogaasi toota ning sedalaadi tooraine biogaasipotentsiaal jääb kasutamata. **Soovitus**: Eestisse tuleks rajada tahekääritust võimaldav biogaasirajatis, näiteks tunnel-biogaasirajatis.

<u>Loomsed kõrvalsaadused</u>

Vastavalt jäätmeseaduse paragrahvi 1 lõike 11 punktile 5 ei kuulu seaduse reguleerimisalasse loomade väljaheited, kui need ei ole hõlmatud lõike 2 punktiga 2, põhk ega muud loodusomased mitteohtlikud põllumajandustootmisest või metsandusest pärinevad materjalid, mida kasutatakse põllumajanduses, metsanduses või biomassist energia tootmiseks menetluste või meetoditega, mis ei kahjusta keskkonda ega ohusta inimese tervist. Selle definitsiooni alusel töötavad põllumajanduslikud biogaasijaamad, sest kui sõnnikut on lubatud viia põllule, kääritada ja kompostida ilma jäätmeluba või registreeringut omamata, siis ka käärimisjääki saab viia põllule.

Jäätmeseaduse sama paragrahvi lõike 2 punkt 2 ei tunnista loomsete kõrvalsaaduste käitlemist jäätmeseaduse subjektina sõnastuses „välja arvatud juhul, kui neid põletatakse, ladestatakse või kasutatakse biogaasi või komposti tootmisel“. See jätab tõlgendamisvõimaluse, et kuna sõnnik on 2. kategooria loomne kõrvalsaadus ja kui sõnnikust biogaasi/käärimiskääki või komposti tehakse, siis see tegevus tingib biogaasijaama/kompostijaama muutumise

jäätmekäitlusettevõtteks, sh mistahes suurusega loomapidaja käitleb jäätmeid ja peab toimima jäätmeseaduse alusel. Kliimaministeerium on olnud seisukohal, et sõnniku käitlemisel siiski ei ole vaja jäätmeluba ega ka registreeringut, kuid kui koos sõnnikuga kääritatakse biojäätmeid, siis on jäätmeluba ja registreeringut vaja, kuna biojäätmed kuuluvad jäätmeseaduse reguleerimisalasse. **Soovitus.** Jäätmeseaduse sõnastust tuleks muuta viisil, mis ei võimalda kaksipidi tõlgendust, näiteks „loomsed kõrvalsaadused loetakse jäätmeseaduse subjektiks siis, kui nendega koos käideldakse biolagunevaid jäätmeid“.

Sätestamata on see, kas põllumajandussaaduste ja jäätmete kooskääritamisel loetakse kogu kääriti sisu jäätmeteks mistahes koguse jäätmete lisamisel, või oleks mõistlik kehtestada piirmäär (%), alates millest muutub kogu kääritusjääk jäätmeteks. Näiteks ei loeta jäätmeteks põllumajandustootmisel saadud köögivilju, kuid kaubandusvõrgust tagasi toodud neidsamu köögivilju loetakse jäätmeteks. **Soovitus.** Sellise määra kehtestamine, näiteks 5% kääritis töödeldava materjali aastamahust, võimaldaks rohkem biomassi töödelda. Erandiks jäävad loomsete kõrvalsaadustena käsitletavate jäätmete lisamine kääritisse, mis peavad olema hügieniseeritud mistahes mahu lisamise korral. Eelduseks oleks korrektne dokumenteerimine.

Toiduainetööstuse reovett ei saa omaduste poolest samastada olmereoveesetete või rasvapüüniste ja septikute setetega. Toiduainerikkad setted on enamasti hea biogaasiallikas, kuid kui nad tulevad tööstuse reoveepuhastist, siis tuleks seda käsitleda määrus nr 24 kohaselt. Toiduainetööstuse reovee käitlemisel saadud setete kasutamine biogaasi tootmiseks vajaks jäätmeseaduse kontekstis arutelu (sette liik, sette osakaal materjalivoos, võõriste osakaal, desoainete sisaldus jms).

Võrdne suhtumine

Soovitus. Põllumajanduslik biogaasitootja ja biojäämetest biogaasi tootja peavad olema võrdses staatuses ka projektide rahastamisel/subsideerimisel. Mõlemad toodavad biogaasi ning mõlemad annavad kääritusjäägi põllule.

Orgaanilisi jäätmeid on võimalik käidelda mitmeti ning käitlusmeetodid konkureerivad üksteisega. **Soovitus.** Olenemata, kas tegutsetakse määruse 7 või määruse 12 alusel, siis kääritusjäägi või komposti laotamisel põllule peavad ohutusnäitajad olema võrreldavad (raskmetallid, umbrohuseemned, *Salmonella, E.coli*, võõrised).

Kokkuvõte

Biogaasi ja biometaani tootmise kõrvalsaadusena saadakse kääristusjääk ehk digestaat, mida Euroopas 67% ulatuses kasutatakse orgaanilise väetisena põllumajanduses. Kääritusjääk on potentsiaalne toitaineterikas orgaaniline väetis, mis on ka väga oluline mineraalväetiste asendaja põllumajanduses toidu ja sööda tootmisel. Siiski mineraalväetise täielik asendamine digestaadiga ei ole mõeldav. Biogaasi ja biometaani tootmisel Euroopas kasutatakse erinevaid sisendeid, mille kvaliteedist saab alguse kääritusjäägi kvaliteedi kujunemine.

Uuringus oleme tuvastanud, et peamiseks põllumajanduslikuks sisendiks biometaani tootmisel on praegu peamiselt veise vedelsõnnik, sest sellega on tagatud stabiilne toorme voog. Perspektiivikas on kääritada oluliselt suuremas mahus ka sea- ja linnusõnnikut. Eesti kontekstis võib pikemas tulevikuperspektiivis osutuda probleemiks looma- ja linnusõnniku kättesaadavus, sest põllumajandusloomade ja lindude arv on aastate lõikes olnud suhteliselt stabiilne ning ka vastavad regionaal- ja põllumajandusministeeriumi prognoosid näitavad pigem arvukuse püsimist või vähenemist, kuid põllumajanduslike biogaasijaamade arv eeldatavasti suureneb. Tulevikus nähakse Euroopa Liidus biogaasi tootmismahtude suurendamiseks järestikkultuuride osatähtsuse suurendamist biogaasi tootmise toorainena. Eestis ei ole antud võimalusi senini piisavalt analüüsitud.

Biogaasi tootmine on Skandinaaviamaades viimastel aastatel järjest suurenenud. Taanis on väga palju just põllumajanduslikul toormel töötavaid biogaasijaamu. 2022. aasta andmetel on Soomes 27 põllumajanduslikku biogaasijaama, mis töötlevad peamiselt sõnnikut, kuid mõningal määral ka rohtset biomassi ja toiduainetööstuse jäätmeid. Lätis on 44 põllumajanduslikke ja toidutööstuse jäätmeid käitlevat biogaasijaama, mille sisendist 47% moodustab sõnnik ja 34% põllukultuuride kasvatamise jäätmed. Lätist on ka näide biogaasijaamast, mis kasutab biometaani tootmiseks sisendina loomseid jäätmeid, rakendades loomsete kõrvalsaaduste käitlemisele seatud nõudeid.

Eestis tegutseb põllumajanduslikul toormel kuus biometaanijaama ning üks majapidamiste ja toitlustusasutuste biojäätmeid töötlev biometaanijaam. Lisaks sellele toodetakse biogaasi ja biometaani reoveesettest ja tööstuslikust reoveest ning kogutakse prügilagaasi. Teada on, et biogaasi tootmine Eestis laieneb.

Looma- ja linnusõnniku kogus, mida oleks teoreetiliselt võimalik biogaasijaamades sisendmaterjalina kasutada, on umbes 2,34 miljonit tonni aastas (2022. aasta andmete alusel), millest vedelsõnnik põhisubstraadina moodustab 1,92 miljonit ning tahe- ja sügavallapanusõnnik 0,42 miljonit tonni. Lisasubstraatide spekter on lai. Näiteks kalapüügil tekkis 2020. aastal hinnanguliselt 814 tonni ja kalakasvatuses 1 tonn toidujäätmeid. Toiduainetööstuses tekkis 2021. aastal 50 117 tonni ning köökides ja sööklates 29 036 tonni biolagunevaid jäätmeid, mida saaks peamiselt põllumajandustoormel töötavates biogaasijaamades toormena kasutada. Kodumajapidamistes tekkis 2021. aasta andmetel hinnanguliselt 74 462 tonni toidujäätmeid. Lisaks tekib Eestis aastas 8000 tonni ohtlikke loomseid ja erijäätmeid (2022. aasta andmete alusel), mida utiliseeritakse Vireen AS-is.

Biogaasi ja biometaani tootmise suurenedes suureneb ka tekkiva kääritusjäägi kogus. Sellele kasutuse leidmine on üks eeldustest, et biogaasijaamade võrk saaks üldse laieneda. Täna on kääritusjäägi kasutus põllumajanduses ainus reaalne väljund. Arvestades maksimaalset tekkida võivat kääritusjäägi kogust lähtuvalt loomade arvust ja sõnnikukogusest, võib vastavalt erinevatele stsenaariumitele kääritusjääki jaguda 113 000–161 000 hektarile põllumaale Eestis. Eeltoodu tähendab, et Eestis tekkiv kääritusjääk kasutatakse ära ringbiomajanduse mõistes meie põldudel.

Kääritusjäägi sobivus orgaanilise väetisena või regulatiivses mõistes tootena oleneb paljudest asjaoludest, näiteks:

- Kas kääritati põllumajandussaadusi või jäätmeid? Jäätmetena arvel olevat kääritusjääki on raskem kasutada ning rakendama peaks jäätmete lakkamise käiku. Määrused ja vastav sertifitseerimisega tegelev asutus on Eestis olemas.
- Kas kääritati 3. kategooria loomseid kõrvalsaadusi või mitte? Kui kääritati, siis peab digestaat läbima hügieniseerimise (70 °C, t=1 h, d=12 mm).
- Kas kääritusjääk sisaldab võõriseid (vajab eel- ja/või järeltöötlust)?
- Kas kääritusjääk sisaldab raskmetalle (tuleb välja selgitada ja välistada raskmetalli rikkad lähtevood)?
- Kas kääritusjääk on vedel või vedel- ja tahe fraktsioon lahutatakse? Seni on põllumajandustoormel töötavates biogaasijaamades ainult vedel kääritusjääk, kuid reoveepuhastites kääritusjääk tahendatakse.

Euroopa Liidus on tervikuna kokkulepitud sarnased põhimõtted kääritusjäägi kasutamiseks ja käitlemiseks, kuid riikide vahel on mõningaid erinevusi lubatud piirväärtustes.

Eeltoodud analüüsist selgus, et biogaasi kääritusjääk erineb substraadist väiksema viskoossuse, süsiniku- ja kuivainesisalduse, suurema NH4-N : $N_{üld}$ suhtarvu ja kõrgema pH poolest. Taimele olulistest makroelementidest võib N kogus olla kääritusjäägis hoiustamisel lendunud N tõttu substraadiga võrreldes veidi väiksem, kuid $P_{üld}$, $K_{üld}$, $Ca_{üld}$, $Mg_{üld}$ kogused neis ei erine.

Fosfori ja mineraalelementide kogus kääritusprotsessi käigus ei muutu, kuid väheneda võib P, S, Mg, Ca omastatavus taimele, mis on põhjustatud substraadi pH tõusust kääritamisel. Kääritusjäägi väetusväärtuse seisukohast see probleemiks ei ole, sest mullas muutuvad need elemendid taimele uuesti omastatavaks. Kääritusjäägi eeliseks kõigi substraatide ees on suurem NH_4-N sisaldus, sest NH_4-N on taimedele koheselt omastatav. Taimedele omastatava P, Ca ja Mg kogus võib olla kääritusjäägis substraadiga võrreldes väiksem, kuid uuringute tulemused näitavad, et sõnnikukääritusjäägiga väetades omastavad taimed neid elemente sama palju kui vedelsõnnikuga väetades. On uuringuid, kust on selgunud, et P omastatavus on kääritusjäägist parem kui superfosfaadist.

Viimastel aastatel on palju uuritud, mille põhjal hinnata kääritusjäägi väärtust N-väetisena. Kirjanduses soovitatakse kasutada indikaatorina nii kääritusjäägi $N_{üld}$ kui NH_4-N sisaldust. Uuringute tulemusest tuleb siiski välja, et mineraalväetisega sarnase saagi saamiseks, tuleks arvutada kääritusjäägi norm NH4-N sisalduse põhjal. Kui lähtuda normi arvutamisel $N_{üld}$ sisaldusest, siis esimesel paaril aastal on saadav saak mineraalväetisega väetades suurem, sest ainult osa kääritusjäägiga mulda viidavast N on taimedele koheselt omastatav. Saagid

võrdsustuvad siis, kui kääritusjäägiga mulda viidud orgaanilisest ainest mineraliseeruv N katab erinevuse, mis on kääritusjäägiga mulda viidud NH_4-N ja mineraalväetisega antud N koguse vahel.

Kääritamine muudab substraadis sisalduva N taimedele paremini omastatavaks, mistõttu on kääritusjääk vedelsõnnikust efektiivsem lämmastikväetis. Mineraalelementide kogus kääritusprotsessi käigus ei muutu, kuid vedelsõnnikuga võrreldes võib kääritusjäägis olla mineraalelemente rohkem, sest biogaasijaamas lisatakse enne kääritamist vedelsõnnikule juurde mitmeid lisandeid. Kääritusjäägi negatiivseks küljeks on suurem N lendumise oht, sest kääritamisel tõuseb substraadi pH 0,3–0,5 pH ühiku võrra, mis soodustab ammooniumi konversiooni ammoniaagiks.

Kääritusjäägi puhul seatakse sageli kahtluse alla, selle väärtus mulla C allikana. Pikaajalised katsed näitavad, et sõnnikul põhineva kääritusjäägi mõju mulla C-sisaldusele on kääritamata sõnnikuga samaväärne. Kuigi C-sisaldus on sõnnikukääritusjäägis sõnnikuga võrreldes 2–3% väiksem, sest kääritamisel eemaldatakse labiilsed süsinikuühendid, on seal alles kõik bioloogiliselt raskesti lagundatavad C-ühendid, millel on mulla orgaanilisele ainele ja viljakusele pikaajaline mõju.

Põllumeeste ühitu Kevili liikmete seas läbiviidud uuringust selgus, et põllumeeste hulgas on kääritusjäägi suhtes jätkuvalt palju umbusku. Kõige rohkem kardetakse, et vedelsõnniku asemel kääritusjääki väetisena kasutades väheneb mulda viidava süsiniku ja lämmastiku kogus, mille tõttu tekib mullas vähem huumust. Selle probleemi lahendusena näeme erinevate tootjate juures pikaajaliste, vähemalt kümme aastat kestvate põldkatsete läbiviimist, kus samal põllul kasutatakse väetisena paralleelselt vedelsõnnikut ja selle kääritusjääki. Eesti Maaülikool võib võtta juhtrolli katsete planeerimisel, proovide võtmisel ja analüüsimisel ning tootjatele tulemuste tutvustamisel.

Kääritusjäägi kuluefektiivseks väärindamiseks on soovituslik investeerida vedela ja tahke osa eraldamistehnoloogiatesse. Erinevate tehnoloogiate kuluefektiivsus seisneb võimaluses kasutada tahket osa väiksema transpordikuluga ning lisaks otsesele põllule andmisele ka näiteks loomade allapanuna, mille osas kogemused on olemas Lätis. Vedela osa eraldamine võimaldab seda paremini anda otse mulda, tekitamata suurt kasvuhoonegaaside emissiooni ja lõhnahäiringuid. Lisaks on turul olemas tehnoloogiaid, mis võimaldavad vedelast osast toitainete ja vee eraldamist, et kontsentreerida toitaineid ja vähendada transpordikulu ning võimaldada vee taaskasutamist.

Seega:

- Kääritusjäägi väetusväärtus ei ole halvem, kui see on vedelsõnnikul Kääritatud materjalis moodustab taimedele koheselt omastatav NH_4-N suurema osa $N_{üld}$-st, võrreldes seda kääritamata materjaliga. Sõnnikul põhineva kääritusjäägi mõju mulla C-sisaldusele on kääritamata sõnnikuga samaväärne
- Kääritusjäägi kvaliteet oleneb biogaasi tootmisel kasutatava lähtematerjali kvaliteedist (ebasoovitatavate ainete sisaldusest vms), selle eeltöötlemisest (võõriste eemaldamisest enne kääritamist vms) ja järeltöötlemisest (hügieniseerimisest, võõriste eemaldamisest kääritusjäägist vms).

- Kui lähtematerjal ei ole määratletud jäätmetena, vaid põllumajandussaadustena, siis regulatsioonidest tulenevad nõuded selle kvaliteedile piirduvad hügieniseerimisnõuetega.

Kasutatud allikad ja materjalid

Alburquerque J. A., de la Fuente C., Bernal, M., P. 2012a. Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. Agric Ecosyst Environ 160, 15–22.

Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., Campoy, M., Carrasco, L., Nájera, I., Baixauli, C., Caravaca, F., Roldán, A., Cegarra, J., Bernal, M. P. 2012b. Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. European Journal of Agronomy 43, 119–128.

Al Seadi, T., Drosg, B., Fuchs, W., Rutz, D., Janssen, R. 2013. The Biogas Handbook Science, production and applications by IEA Bioenergy 1st ed. Woodhead Publishing.

Amber Grid. 2022. Biomethane in Lithuania. https://biometaan.info/sites/default/files/documents/2022-02/biomethane_lithuania_amber_grid.pdf (16. 12.2023)

Asp, H., Bergstrand, K.-J., Caspersen, S., Hultberg, M. 2022. Anaerobic digestate as peat substitute and fertiliser in pot production of basil, Biological Agriculture & Horticulture, 38:4, 247–257.

Bachmann, S., Gropp, M., Eichler-Löberman, B. 2014. Phosphorus availability and soil microbial activity in a 3 year field experiment amended with digested dairy slurry. Biomass Bioenergy, 70, 429–439.

Bachmann, S., Uptmoor, R., Eichler-Löbermann, B., Bachmann, S., Uptmoor, R., EichlerLöbermann, B. 2016. Phosphorus distribution and availability in untreated and mechanically separated biogas digestates. Scientia Agricola 73, 9–17.

Barduca, L., Wentzel, S., Schmidt, R. et al. 2021. Mineralisation of distinct biogas digestate qualities directly after application to soil. Biol Fertil Soils 57, 235–243.

Baştabak, B., Koçar, G. 2020. Review of the biogas digestate in agricultural framework. Journal of Material Cycles and Waste Management 22, 1318–1327.

Bergstrand, K.-J., Asp, H., Hultberg, M. 2020. Utilizing Anaerobic Digestates as Nutrient Solutions in Hydroponic Production Systems. Sustainability, 12, 10076.

Biogas Denmark. 2023. Biogas Outlook 2023. Production and use of biogas in Denmark 2022–2035. https://www.biogas.dk/biogas-outlook-2023/ (29.06.2023)

Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyöduntäminen. 2015. Toim. Kymäläinen, M. ja Pakarinen, O. Suomen Biokaasuyhdistys ry.

Bougnom, B. P., Niederkofler, C., Knapp, B. A., Stimpfl, E. & Insam, H. 2012. Residues from renewable energy production: Their value for fertilizing pastures. Biomass and Bioenergy, 39, 290–295.

Cabinet regulation No 506. Republic of Latvia, adopted 1 September 2015. Regulations regarding the identification, quality conformity assessment and sale of fertilisers and substrates. https://www.vvc.gov.lv/en/laws-and-regulations-republic-latvia-english/cab-reg-no-506-regulations-regarding-identification-quality-conformity-assessment-and-sale-fertilisers-and-substrates-amendments-28012020?utm_source=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

Chen, H., Awasthi, M., K., Liu, T., Zhao, J., Ren, X., Wang, M., Duan, Y., Awasthi, S., K., Zhang, Z., 2018. Influence of clay as additive on greenhouse gases emission and maturity evaluation during chicken manure composting. Bioresour Technol 266, 82–88.

Chiyoka W., L, Zvomuya, F., Hao, X. 2014. A bioassay of nitrogen availability in soils amended with solid digestate from anaerobically digested beef cattle feedlot manure. Soil Sci Soc Am J 8, 1291–1300.

Denmark. 2022. National Inventory Report (NIR). https://unfccc.int/documents/461943

de la Fuente, C., Alburquerque, J. A., Clemente, R. 2013. Soil C and N mineralisation and agricultural value of the products of an anaerobic digestion system. Biol Fertil Soils 49, 313–322. https://doi.org/10.1007/s00374-012-0719-9

Delin, S., Stenberg, M. 2020. Effects on nitrate leaching of the timing of cattle slurry application to leys. – Soil Use and Management, pp. 1–13.

De Notaris, C., Sørensen, P., Møller, H. B. et al. 2018. Nitrogen fertilizer replacement value of digestates from three green manures. Nutr Cycl Agroecosyst 112, 355–368.

Doyeni, M., O., Stulpinaite, U., Baksinskaite, A., Suproniene, S., Tilvikiene, V. 2021. The Effectiveness of Digestate Use for Fertilization in an Agricultural Cropping System. Plants, 10, 1734.

ECN. 2022. Summary of ECN's 2022 data report: 20 Years of the European Compost Network and Biowaste Management in Europe. https://www.compostnetwork.info/downloads/factsheets/

Eesti Biogaasi Assotsiatsioon. 2023. Biogaasist elektrienergia ja biometaani tootmismahtude ülevaade. Uudiskiri jaanuar-märts 2023. http://eestibiogaas.ee/wp-content/uploads/2023/03/EBA-1_uudiskiri-jaanuar-marts_2023.pdf

Eesti Põllumeeste Keskliit. 2009. Biogaasi tootmine ja kasutamine. Käsiraamat. Tartu.

Euroopa Parlamendi ja Nõukogu määrus (EL) 2019/1009, 5. juuni 2019, millega kehtestatakse ELi väetisetoodete turul kättesaadavaks tegemise nõuded ning muudetakse määrusi (EÜ) nr 1069/2009 ja (EÜ) nr 1107/2009 ning tunnistatakse kehtetuks määrus (EÜ) nr 2003/2003. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R1009

European Biogas Association. EBA Statistical Report 2022. https://www.europeanbiogas.eu/SR-2022/EBA/#our (22.06.2023)

European Compost Network. 2023a. County report of Finland. https://www.compostnetwork.info/downloads/country-reports/

European Compost Network. 2023b. County report of Swden. Avfall Sverige – the Swedish Waste Management Association. https://www.compostnetwork.info/downloads/country-reports/

Feiz, R., Carraro, G., Brienza, C., Meers, E., Verbeke, M., Tonderski, K. 2022. System analysis of digestate primary processing techniques. Waste management, 150 352-363.

Foereid, B., Szocs, J., Patinvoh, R. J., Horvịth, I. S. 2021. Effect of anaerobic digestion of manure before application to soil –Benefits for nitrogen utilization? International Journal of Recycling Organic Waste in Agriculture, 10, 89–99.

Fouda, S., von Tucher, S., Lichti, F., Schmidhalter, U. 2013. Nitrogen availability from different biogas residues applied to ryegrass. J Plant Nutr Soil Sci 176, 572–584.

Gas for Climate. 2022. Biomethane production potentials in the EU. Feasibility of REPower EU 2030 targets, production potentials in the Member States and outlook to 2050. Guidehouse Netherlands B.V.

Gissén C., Prade, T., Kreuger, E., Nges I., A, Rosenqvist, H., Svensson, S., E., Lantz, M., Mattson, J., E., Björnsson, P., Björnsson, L. 2014. Comparing energy crops for biogas production–yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation. Biomass Bioenergy 64, 199–210.

Greenberg, I., Kaiser, M., Gunina, A., Ledesma, P., Polifka, S., Wiedner, K., Mueller, C. W., Glaser, B., Ludwig, B. 2019. Substitution of mineral fertilizers with biogas digestate plus biochar increases physically stabilized soil carbon but not crop biomass in a field trial Sci. Total Environ., 680, 181–189.

Herbes, C., Roth, U., Wulf, S., Dahin J. C. 2020. Economic assessment of different biogas digestate processeing technologies: A senario-based analysis. Journal of Cleaner Production 255, 1-14. Towards marketing biomethane in FrancedFrench consumers' perception of biomethane. Energy Sustain. Soc. 8, 37.

Huttunen, M., J., Kuittinen, V., Lampinen, A. 2018. Suomen Biokaasulaitosrekisteri N:O 21. Tiedot vuodelta 2017. Publications of the University of Eastern Finland. Reports and studies in forestry and natural sciences, 33.

Interreg Project No #R057 Advanced manure Standards for sustainable nutrient management and reduced emissions, https://interreg-baltic.eu/project/manure-standards/

Iocoli, G., A., Zabaloy, M., C., Pasdevicelli, G., Gómez M. A. 2019. Use of biogas digestates obtained by anaerobic digestion and co-digestion as fertilizers: Characterization, soil biological activity and growth dynamic of *Lactuca sativa* L. Sci. Total Environ., 647, 11–19.

IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html

Johansen, A., Carter, M. S., Jensen, E. S., Hauggard-Nielsen, H., Ambus, P. 2013. Effects of digestate from anaerobically digested cattle slurry and plant materials on soil microbial community and emission of CO2 and N2O Appl. Soil Ecol. 63, 36–44.

Jurgutis, L., Šlepetienė, A., Amalevičiūtė-Volungė, K., Volungevičius, J. Šlepetys, J. 2021a. The effect of digestate fertilisation on grass biogas yield and soil properties in field-biomass-biogas-field renewable energy production approach in Lithuania. Biomass Bioenerg, 153, 106211.

Jurgutis, L., Šlepetienė, A., Šlepetys, J., Cesevičienė, J. 2021b. Towards a Full Circular Economy in Biogas Plants: Sustainable Management of Digestate for Growing Biomass Feedstocks and Use as Biofertilizer. Energies. 14, 4272.

Jäätmeseadus. RT I, 17.03.2023, 36. https://www.riigiteataja.ee/akt/117032023036#para2b11g2

Keskkonnaagentuur. Keskkonnaotsuste infosüsteem KOTKAS ja jäätmete infopäring alates aastast 2020. https://kotkas.envir.ee/annual_reports_registry , https://tableau.envir.ee/views/Avalikud_pringud_2020-2022/Riigitasand?%3Aembed=y&%3Aiid=4&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y (20.11.2023)

Keskkonnaministri määrus nr 7 "Biolagunevatest jäätmetest komposti tootmise nõuded". RT I, 14.04.2023, 8. https://www.riigiteataja.ee/akt/110042013001?leiaKehtiv

Keskkonnaministri määrus nr 12 "Nõuded biolagunevatest jäätmetest biogaasi tootmisel tekkiva kääritusjäägi kohta". RT I, 14.04.2023, 9. https://www.riigiteataja.ee/akt/118122020018?leiaKehtiv

Keskkonnaministri määrus nr 24 "Reoveesettest toote valmistamise nõuded". RT I, 14.04.2023, 10. https://www.riigiteataja.ee/akt/128072017004?leiaKehtiv

Keskkonnatasude seadus. RT I, 30.06.2023, 25. https://www.riigiteataja.ee/akt/KeTS

Klackenberg, L. 2023. Biomethane in Sweden – market overview and policies. The Swedish Gas Association. https://www.energigas.se/media/amrji21q/biomethane-in-sweden-230313.pdf (28.06.2023)

Kögel-Knabner, I. 2002. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter Soil Biol. Biochem., 34, 139–162.

Latvian Biogas Association. 2021. Report on digestate quality. Latvia. Sustainable Biogas Project. https://sustainablebiogas.eu/wp-content/uploads/2022/08/D.T3.14.1_LV_QAS_description.pdf

Latvian State Environmental Services. 2021. Nutrient management at biogas plants in Latvia. WP2_D2.1.1-Project_Report_LATVIA_EN_30-07-2021_FINAL.pdf / (27.06.2023)

Lind, O. P., Hultberg, M., Bergstrand, K.-J., Larsson-Jönsson, H., Caspersen, S., Aspet H. 2021. Biogas Digestate in Vegetable Hydroponic Production: pH Dynamics and pH Management by Controlled Nitrification. Waste Biomass Valor 12, 123–133.

Lopez, A., Rodríguez-Chueca, J., Mosteo, R., Gomez, J., Ormad, M.P. 2020. Microbiological quality of sewage sludge after digestion treatment: A pilot scale case of study. Journal of Cleaner Production. Vol. 254. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120101

Lukehurst, C., T., Frost, P., Al Seadi, T. 2010. Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser. 24 lk.

Luostarinen, S., Tampio, E., Laakso, J., Sarvi, M., Ylivainio, K., Riiko, K., Kuka, K., Bloem, E., Sindhöj, E. 2020. Manure processing as a pathway to enhanced nutrient recycling: Report of SuMaNu platform. Natural resources and bioeconomy studies 62/2020. Natural Resources Institute Finland, Helsinki. 76 lk.

Ma, H., Guo, Y., Qin, Y., Li, Y.-Y., 2018. Nutrient recovery technologies integrated with energy recovery by waste biomass anaerobic digestion. Bioresour. Technol. 269, 520e531.

Maaeluministri määrus nr 73 "Eri tüüpi sõnniku toitainesisalduse arvutuslikud väärtused, põllumajandusloomade loomühikuteks ümberarvutamise koefitsiendid ja sõnnikuhoidla mahu arvutamise metoodika". RT I, 01.10.2019, 11. https://www.riigiteataja.ee/akt/101102019011

Mangolo, F., Dekker, H., Decorte, M., Bezzi, G., Rossi , L., Meers, E., Speelman, S. 2021. The Role of Sequential Cropping and Biogasdoneright™ in Enhancing the Sustainability of Agricultural Systems in Europe. Agronomy, 11, 2102.

Marttinen S., Luostarinen S., Winquist E., Timonen, K. 2015. Rural biogas: feasibility and role in Finnish energy system. Research report no 1.1.3-4, Helsinki, 31 lk. http://bestfinalreport.fi/files/Rural%20biogas%20-%20feasibility%20and%20role%20in%20the%20Finnish%20energy%20system.pdf

Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Turtola, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppila, J., Koskiaho, J., Valve, H., Laine-Ylijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A. & zu Castell-Rüdenhausen, M. 2017. Towards a breakthrough in nutrient recycling: State-of-the-art and recommendations for developing policy instruments in Finland. Natural resources and bioeconomy studies 26/2018 Natural Resources Institute Finland, Helsinki. 54 lk.

Millers, J., Pilvere, I. 2021. Characteristics of the biogas industry of Latvia. Proceedings of the 10th International Scientific Conference Rural Development 2021. Vytautas Magnus University Agriculture Academy, Lithuania.

Molinuevo-Salces B., Gómez X., Morán A., García-González, M. C. 2013. Anaerobic co-digestion of livestock and vegetable processing wastes: fibre degradation and digestate stability. Waste Manag 33, 1332–1338.

Moora, H., Väli, K., Staal, I. 2020. Segaolmejäätmete, eraldi kogutud paberi- ja pakendijäätmete ning elekroonikaromu koostise ja koguste uuring. Lõpparuanne. SEI Tallinn.

Mõttus, M. 2016. Veise vedelsõnniku ja biogaasijaama digestaadi mõju rohumaa saagile ja rohusilo kvaliteedile. Magistritöö. 57 lk.

Möller, K. 2009. Effects of biogas digestion on soil organic matter and nitrogen inputs, flows and budgets in organic cropping systems. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 2009, 84, 179–202.

Möller, K., Müller, T. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. Engineering in Life Sciences 12 (3), 242–257.

Möller, K., Stinner, W. 2010. Effects of organic waste digestion for biogas production on mineral nutrient availability of biogas effluents. Nutr. Cycl. Agroecosys. 87, 395–413.

Möller, K., Stinner, W., Deuker, A., Leithold, G. 2008. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on nitrogen cycle and crop yield in mixed organic dairy farming systems. Nutr. Cycl. Agroecosys. 2008, 82, 209–232.

Müller, K. 2015. Effect of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A rewiev. Agron, Sustain. Dev, 35, 1021–1041.

Møller, H., Nielsen, A., Nakakubo, R., Olsen, H. 2007. Process performance of biogas digesters incorporating pre-separated manure. Livestock Science, 112, 3, 217–23.

Nesse, A., S., Aanrud, S., G., Lyche, J., L., Sogn, T., Kallenborn, R. 2022. Confirming the presence of selected antibiotics and steroids in Norwegian biogas digestate. Environmental Science and Pollution Research 29, 86595–86605.

Nkoa, R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. Agron. Sustain. Dev. 34, 473–492. doi: 10.1007/s13593-013-0196-z

Pantelopoulos, A., Magid, J., Jensen, L., S., Fangueiro, D. 2017. Nutrient uptake efficiency in ryegrass fertilized with dried digestate solids as affected by acidification and drying temperature. Plant Soil 421, 401–416.

Penu, P. 2023. Digestaadi kasutamine vajab täpset ajastamist. Põllumehe Teataja. Oktoober 2023. https://pollumeheteataja.ee/uudis/2023/10/04/digestaadi-kasutamine-vajab-tapset-ajastamist/

Piirsalu, E., Moora, H., Väli, K., Aro, K., Värnik, R., Lillemets, J. 2021. Toidujäätmete ja toidukao teke Eesti toidutarneahelas. SEI Tallinn.

Pitk, P., Raave, H., Tampere, M. 2015. Maaeluministeeriumi RUP projekti „Digestaadi väetusomaduste ja keskkonnamõju võrdlev uuring vedelsõnniku ja mineraalväetisega“ koondraport. 20.12.2015, 47 lk.

Plana, B., V., Noche, B. 2016. A review of the current digestate distribution models: storage and transport Proc. 8 Int. Conf. Waste Manag. Environ, 345–35.

Pretz, T. 2021. Research Cooperation Energy Recovery from Sustainable Sources, Eesti maaülikooli ja Aacheni Tehnikülikooli koostööprojekt (Department of Processing and Recycling (I.A.R.), RWTH Aachen University), 2015-2019, funded by Federal Ministry of Education and Research (Germany), intervjuu professor Thomas Pretz, RWTH Aachen, 24.02.2021

Refinement to the 2006 IPCC Guidelines 2019. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html

Regueiro, I., Siebert, P., Liu, J., Müller-Stöver, D., Jensen, L. S. 2020. Acidified Animal Manure Products Combined with a Nitrification Inhibitor Can Serve as a Starter Fertilizer for Maize. Agronomy 2020, 10, 1941.

Raave, H., Kauer, K., Noormets, M., Selge, A., Viiralt, R. 2010. Nitrogen and potassium leaching from grassland soil depending on applied fertilizer type and rate and sward botanical composition. Proceedings of the 23th General meeting of the European Grassland Federation, 15: Grassland in a changing world. Kiel, Germany August 29th - 2nd September 2010. Ed. Schnyder, H., Isselstein, J., Taube, F., Auerswald, K., Schellberg, J., Wachendorf, M., Hermann, A. Kiel, Germany, 1058−1060.

Raave, H. 2014. Alternatiivsete väetusainete keskkonnahoidliku kasutuse võimalused ja efektiivsus tava- ja maheviljeluses võrdlevalt traditsiooniliste orgaaniliste ja mineraalväetistega. Lõpparuanne, 45 lk.

Raave, H. 2020. Vedelsõnniku laotamise aja mõju N, P ja K leostumisele. Agronoomia (36−44). Tartu: Vali Press.

Raave, H. 2021. Lämmastiku leostumisest ja selle vähendamise võimalustest pärast vedelsõnniku sügisel põllule laotamist. Agronoomia (39−51). Vali Press.

Risberg, K. 2015. Quality and function of anaerobic digestion residues. Doctoral Thesis. Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences Department of Microbiology Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences. 56 lk.

Schumacher, K., Krones, F., McKenna, R., Schultmann, F. 2019. Public acceptance of renewable energies and energy autonomy: a comparative study in the French, German and Swiss Upper Rhine region. Energy Pol. 126, 315e332.

Scaglia, B., D'Imporzano, G., Garuti, G., Negri, M., Adani, F. 2014. Sanitation ability of anaerobic digestion performed at different temperature on sewage sludge. Sci. Total Environ. Vol. 466–467, 888–897 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.114

Slepetiene, A., Kochiieru, M., Skersiene, A., Mankeviciene, A., Belova, O. 2022a. Changes in Stabile Organic Carbon in Differently Managed Fluvisol Treated by Two Types of Anaerobic Digestate. Energies 2022, 15, 5876.

Slepetiene, A., Kochiieru, M., Jurgutis, L., Mankeviciene, A., Skersiene, A., Belova, O. 2022b. The Effect of Anaerobic Digestate on the Soil Organic Carbon and Humified Carbon Fractions in Different Land-Use Systems in Lithuania. Land, 11, 133.

Slepetiene A., Volungevicius J., Jurgutis L., Liaudanskiene I., Amaleviciute-Volunge K., Slepetys J., Ceseviciene, J. 2020. The potential of digestate as a biofertilizer in eroded soils of Lithuania. Waste Manag. ,102, 441–451.

Smith, S.R., Lang, N.L., Cheung, K. H. M., Spanoudaki, K. 2005. Factors controlling pathogen destruction during anaerobic digestion of biowastes. Waste Manag. Vol. 25, 417–425. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.02.010

Sogn, T.A., Dragicevic, I., Linjordet, R. et al. 2018. Recycling of biogas digestates in plant production: NPK fertilizer value and risk of leaching. Int J Recycl Org Waste Agricult 7, 49–58.

Sommer, S. G., Birkmose, T. 2007. Valuable fertilizer from animal manure. Danish Crop Production Seminar 2007, Agromek 2007, Danish Agricultural Advisory Service.

Statistikaamet. https://andmed.stat.ee/et/stat 2 (20.11.2023)

Statistics Finland. 2023. Production of biogas remained on level with the previous year in 2022. https://www.stat.fi/en/publication/cl8mx8evd1ru80cvz12p6n8w6 (26.06.2023)

Stinner, W., Möller, K., Leithold, G. 2008. Effects of biogas digestion of clover/grass-leys,cover crops and crop residues on nitrogen cycle and crop yield in organic stockless farming systems. Eur. J. Agron. 29, 125–134.

Suomen Biokerto ja Biokaasu ry. Biokaasu. https://biokierto.fi/biokaasu/ (27.06.2023)

Svehla, P., Caceres, L.M.V., Michal, P., Tlustos, P. 2020. Nitrification of the liquid phase of digestate can help with the reduction of nitrogen losses. Environmental Technology & Innovation 17, 100514.

Sweden. 2022. National Inventory Report (NIR). https://unfccc.int/documents/461776

Sõnniku proovivõtmise juhend. https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/6186

Tambone F., Orzi V., D'Imporzano G., Adani F. 2017. Solid and liquid fractionation of digestate: mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value. Bioresour Technol 243, 1251–1256.

Tampere, M., Viiralt, R. 2014. The efficiency of biogas digestate on grassland compared to mineral fertilizer and cattle slurry. „Annual 20th International Scientific Conference Proceeding "Research for Rural Developement 2014 " Latvia University of Agriculture, 89−94.

Tampere, M, Kauer, K., Keres, I., Loit, E., Selge, A., Viiralt, R., Raave, H. 2015. The effect of fertilizer and N application rate on nitrogen and potassium leaching in cut grassland. Zemdirbyste-Agriculture, 102 (4), 381−388.

Tilvikienė, V., Šlepetienė, A., Kadžiulienė, Ž. 2018. Effects of 5 years of digestate application on biomass production and quality of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.). Grass Forage Sci. 2018, *73*, 206–217.

Timonen, K., Sinkko, T., Luostarinen, S., Tampio, E., Joensuu, K. 2019. LCA of anaerobic digestion: Emission allocation for energy and digestate. Journal of Cleaner Production 235, 1567–1579.

Toom, M., Talgre, M., Pechter, P., Narits, L. Tamm, S., Lauringson, L. 2019. The effect of sowing date on cover crop biomass and nitrogen accumulation. – Agronomy Research 17, pp. 1779–1787.

Vanden Nesta, T., Ruysschaerta, G., Vandecasteelea, B., Cougnonb, B., Merckxc, R., Reheulb, D. 2015. P availability and P leaching after reducing the mineral P fertilization and the use of digestate products as new organic fertilizers in a 4-year field trial with high P status, Agriculture, Ecosystems and Environment 202, 56–67.

Vaneeckhaute, C., Lebuf, V., Michels, E., Belia, E., Vanrolleghem, P.A., Tack, F.M.G., Meers, E. 2017. Nutrient recovery from digestate: systemic technology review and product classification. Waste Biomass Valor, 8, 21-40.

Veeseadus. RT I, 22.02.2019. https://www.riigiteataja.ee/akt/122022019001 (18.11.2023)

Virolainen-Hynnä, A. 2023. Suomen Biokierto ja Biokaasu ry, Finnish Biocycle and Biogas Association, Eteläranta 10, 00131 Helsinki, Finland, +358 400 987 805, anna.virolainen-hynna@biokierto.fi, www.biokierto.fi

Vitunskienė, V., Aleksandravičienė, A., Čaplikas, J., Dapkuvienė, A. 2023. The strategic concept for the Lithuanian bioeconomy insight for niche bioenergy sectors. Open Research Europe. https://open-research-europe.ec.europa.eu/articles/3-101 (27.06.2023)

Värnik, R., Kriipsalu, M., Kaasik, A., Orupõld, K., Lillemets, J., Aro, K. 2022. Projekt „Bioressursside kõrgema väärindamise huvi tõstmine ja ressursside uuring“. Kagu-Eesti bioressursside uuringu aruanne. 30. detsember 2022. Tartu.

Värnik. R., Lillemets, J., Aro, K. 2021. Projekti “Toidujäätmete ja toidukadude teke Eesti põllumajanduses ja kalanduses” lõpparuanne. Veebruar 2021. Tartu.

Walsh, J., Jones, D., L., Edwards-Jones, G., Williams, A. P. 2012. Replacing inorganic fertilizer with anaerobic digestate may maintain agricultural productivity at less enivironmental cost. Journal, Plant Nutrition Soil Science, 175, 840–845.

Wang, W., Chang, J.-S., Lee, D.-J. 2023. Anaerobic digestate valorization beyond agricultural application: Current status and prospects. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852423001682?via%3Dihub

Weimers, K., Bergstrand, K.-J., Hultberg, M., Aspet H. 2022. Liquid Anaerobic Digestate as Sole Nutrient Source in Soilless Horticulture—Or Spiked With Mineral Nutrients for Improved Plant Growth. Frontiers in Plant Science, 13.

Wentzel, S., Schmidt, R., Piepho, H., P., Semmler-Busch, U., Joergensen, R. G. 2015. Response of soil fertility indices to long-term application of biogas and raw slurry under organic farming. Appl Soil Ecol 96, 99–107.

Witing, F., Prays, N., O’Keeffe, S., Gründling, R., Gebel, M., Kurzer, H.-J. et al. 2018. Biogas production and changes in soil carbon input - a regional analysis. Geoderma, 320, 105–114.