



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 46/2019

Nurmi biokaasun raaka-aineena

RED II direktiivin mukainen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta

Saija Rasi, Karetta Timonen, Katri Joensuu, Kristiina Regina,
Perttu Virkajärvi, Hannele Pulkkinen, Elina Tampio, Ville Pyykkönen
ja Sari Luostarinen

Nurmi biokaasun raaka-aineena

RED II direktiivin mukainen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta

Saija Rasi, Karetta Timonen, Katri Joensuu, Kristiina Regina, Perttu Virkajärvi,
Hannele Pulkkinen, Elina Tampio, Ville Pyykkönen ja Sari Luostarinen



Maa- ja metsätalousministeriö

Viittausohje:

Rasi, S., Timonen, K., Joensuu, K., Regina, K., Virkajärvi, P., Pulkkinen, H., Tampio, E., Pyykkönen, V. & Luostarinen, S. 2019. Nurmi biokaasun raaka-aineena - RED II direktiivin mukainen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 29 s.

Saija Rasi, ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-4007-9783>



ISBN 978-952-326-788-6 (Painettu)

ISBN 978-952-326-789-3 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-789-3>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Saija Rasi, Karetta Timonen, Katri Joensuu, Kristiina Regina, Perttu Virkajärvi, Hannele Pulkkinen, Elina Tampio, Ville Pyykkönen ja Sari Luostarinen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2019

Julkaisuvuosi: 2019

Kannen kuva: Saija Rasi

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Saija Rasi, Kareta Timonen, Katri Joensuu, Kristiina Regina, Perttu Virkajärvi, Hannele Pulkkinen, Elina Tampio, Ville Pyykkönen ja Sari Luostarinen

Luonnonvarakeskus

Uusiutuvan energian direktiivi (RED II) vuosille 2021–2030 julkaistiin joulukuussa 2018. Direktiivi sisältää sitovat EU-tason kestävyyskriteerit biomassoille, joita käytetään energian tuotantoon. Kestävyyskriteereillä halutaan varmistaa, että bioenergian lisääntyvä käyttö EU:ssa tuottaa merkittäviä kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiä fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. Uudessa direktiivissä kestävyyskriteerit laajenevat koskemaan myös kiinteällä biomassalla sekä biokaasulla tuotettua sähkö-, lämpö-, ja jäähdytysenergiaa.

Tämän työn tavoitteena oli tarkastella kestävyyskriteerejä ja raaka-ainekohtaisia kasvihuonepäästökertoimia Suomessa viljeltävälle nurmelle, kun nurmea käytetään biokaasun tuotannossa. Direktiivissä on biokaasun osalta oletusarvoja lietalannalle, maissille, lanta-maissi sekoituksille sekä biojättelelle. Tässä työssä päästökertoimet laskettiin viljelylle nurmelle (kivennäis- ja eloperäisellä maalla), suojaväyhykenurmelle sekä apilapitoiselle nurmelle. Lisäksi kertoimet laskettiin kolmannelle rehusedolle kun ensimmäinen ja toinen sato käytetään säilörehuksi sekä viljelykierrossa olevalle nurmelle (viherlannoitusnurmena). Lisäksi työssä laskettiin laitosesimerkkejä, joissa laskettiin laitoksen kokonaispäästö ja vertailtiin sitä direktiivissä annettuihin fossiilisiin vertailuarvoihin.

Koska nurmen viljelykäytänteet vaihtelevat, on raportin tuloksista huomioitava, etteivät ne päde sellaisille tapauksille, missä viljelykäytänteet eroavat merkittävästi tässä esimerkissä käytetyistä lähtöoletuksista. Tässä työssä käytettyjen oletusten pohjalta voidaan kuitenkin päätellä, että jos nurmea viljellään pelkästään energiantuotantoa varten, on direktiivin mukaisiin päästövähennyksiin haastava päästä. Tämä pätee erityisesti sähkön- ja lämmöntuotannossa, missä päästövähennysvaatimukset ovat korkeimmat, kuin liikenteen polttoaineen tuotannossa. Päästövähennysvaatimus tulee myös kiristymään sähkön- ja lämmöntuotannon osalta vuoden 2026 jälkeen.

Päästövähennyksiin on mahdollista kuitenkin päästä, jos prosessissa käytetään esimerkiksi viherlannoitukseen tarkoitettua nurmea, kolmannen sadon nurmea tai nurmea käytetään lisäsyötteenä esimerkiksi lannan kanssa. Ravinteiden kierrättämisen ja liikenteen uusiutuvien polttoaineiden tavoitteiden saavuttamiseksi lannan prosessointia olisikin tärkeä edistää ja nurmen käyttö lisä raaka-aineena edistäisi näitä tavoitteita, sillä nurmesta saatava lisäenergia parantaa biokaasulaitoksen taloudellista kannattavuutta.

Asiasanat: Biokaasu, kasvihuonekaasupäästö, nurmen viljely, RED II direktiivi, uusiutuva energia

Sisällys

1. Johdanto	5
2. Nurmen viljelyn päästöt.....	7
2.1. Rajaukset.....	7
2.2. Lähtötiedot.....	7
2.3. Laskentamenetelmät	8
2.4. Tulokset.....	9
2.5. Arvio nurmeen perustuvan biokaasutuotannon vaikutuksesta maaperän hiilivarastoihin.....	13
3. Esimerkkitarkastelut nurmea käsitteleville biokaasulaitoksille.....	15
3.1. Rajaukset.....	15
3.2. Lähtötiedot.....	15
3.2.1. Tarkasteltavat biokaasuesimerkit ja käytettävät raaka-aineet	15
3.2.2. Biokaasulaitoksen energiantuotanto ja -kulutus	16
3.3. Laskentamenetelmät	17
3.4. Allokointisäännöt	19
3.5. Tulokset.....	19
3.5.1. Sähkön ja lämmön päästöt ja päästövähennykset.....	19
3.5.2. Liikennepolttoaineen päästöt ja päästövähennykset	21
3.5.3. Herkkyysanalyysi	22
Lantabonus.....	22
Mädätysjäännöksen käyttö nurmen lannoitteena.....	25
Pidemmät kuljetusmatkat.....	25
4. Johtopäätökset.....	27

1. Johdanto

Uusiutuvan energian direktiivi (RED II) vuosille 2021–2030 julkaistiin joulukuussa 2018 (Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources)¹. Jäsenmaiden tulee saattaa voimaan direktiivin mukaiset kansalliset säädökset viimeistään 30.6.2021 mennessä. Direktiivi sisältää sitovat EU-tason kestävyyskriteerit biomassoille, joita käytetään energian tuotantoon. Kestävyyskriteereillä halutaan varmistaa, että bioenergian lisääntyvä käyttö EU:ssa tuottaa merkittäviä kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiä fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. Uudessa direktiivissä kestävyyskriteerit laajenevat koskemaan myös kiinteällä biomassalla sekä biokaasulla tuotettua sähkö-, lämpö-, ja jäähdytysenergiaa. Nykyiset kriteerit koskevat nestemäisiä ja kaasumaisia liikenteen biopolttoaineita sekä lämmityksessä ja sähköntuotannossa käytettäviä bionesteitä. Kestävyyskriteerit koskevat biomassan alkuperäin lisäksi biomassan ja bioenergian elinkaaren aikaisia päästöjä, joista tulee muodostua tietty vähennys fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. Vuoden 2021 alusta tai myöhemmin käynnistyville laitoksille päästövähennysvaatimus sähkölle, lämmölle ja jäähdytykselle on 70 % ja 2026 tai sen jälkeen käynnistyville laitoksille 80 %. Liikenteessä käytettävälle biokaasulle päästövähennys on 65 % (2021 alusta tai myöhemmin käynnistyvät laitokset). Päästökriteerit tulee täyttää, jotta bioenergiatuotteet voidaan laskea mukaan uusiutuvan energian tavoitteisiin ja jotta ne voivat hyötyä uusiutuvan energian tuista. Kriteerit koskevat kokonaislämpöteholtaan yli 2 MW biokaasulaitoksia, jotka tuottavat sähköä, lämpöä tai jäähdytystä. Jäsenvaltiot voivat kuitenkin soveltaa kestävyyttä ja kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiä koskevia kriteerejä laitoksiin, joiden kokonaislämpöteho on pienempi. Biokaasua ajoneuvojen polttoaineeksi tuottavia laitoksia kriteerit koskevat kaikissa kokoluokissa.

Direktiivin vaatima päästövähennys voidaan todentaa joko käyttämällä direktiivissä annettuja oletusarvoja eri biomassoille ja prosesseille tai laskemalle päästövähennys itse. Biokaasun osalta direktiivissä on oletusarvoja lietalannalle, maissille, lanta-maissi sekoituksille sekä biojätteelle. Oletusarvot on laskettu varovaisuusperiaatteen mukaisesti, esimerkiksi kuljetusten ja polttoaineen käytön laskennallisia päästöjä on korotettu 20 % ja prosessoinnin päästöjä 40 %. Kun päästövähennys lasketaan itse, on otettava huomioon raaka-aineiden tuotannon päästöt sekä energian tuotantoa koskevat päästöt (jos raaka-aine tuotetaan energiantuotantoon, jätteille ja sivuvirroille lasketaan vain tuotannon päästöt). Laskennassa on huomioitava polton hyötysuhde sekä polton CH₄ ja N₂O päästöt. Kun biokaasuntuotannossa käytetään raaka-aineena lantaa, voidaan laskentaan sisällyttää bonus, joka on -45 gCO_{2ekv}/MJ lantaa (lannasta saatava energia). Koska päästöt allokoidaan sivutuotteille energiallokoinnilla, ei biokaasulaitoksen jäännökselle voida allokoida päästöjä (jäännöksen lämpöarvo on nolla). Jäännöksen käyttö voidaan kuitenkin laskea korvaamaan synteettisiä lannoitteita, mutta jäännöksen levityksestä aiheutuvat N₂O päästöt tulee huomioida.

Laskennassa voidaan huomoida paremmista maatalouskäytännöistä johtuvasta maaperän hiilikertymästä saatavat vähennykset päästöissä (e_{esca}), jos esitetään vankkaa ja todennettavissa olevaa näyttöä siitä, että maaperän hiilikertymä on kasvanut tai sen voidaan kohtuudella olettaa kasvaneen asianomaisten raaka-aineiden viljelyn aikana. Tällaisia käytäntöjä ovat mm. maanmuokkauksen vähentäminen tai lopettaminen, parantunut viljelykierto, maanpeitekasvien käyttö, viljelykasvien jätteistä huolehtiminen ja orgaanisen maanparannusaineksen käyttö.

Lisäksi voidaan huomioida maankäytön muutoksista johtuneet hiilivarrantojen muutoksista aiheutuva annualisoidut päästöt (e_l), joka lasketaan jakamalla kokonaispääsöt tasaisesti 20 vuodelle. Jos biomassa tuotetaan huonontuneessa ja sittemmin kunnostetussa maassa, voidaan laskennassa huomioida 29 gCO_{2ekv}/MJ hyvitys. Tällöin on esitettävä näyttöä että alue ei ole ollut maanviljelykäytössä

¹ <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>

tai muussa käytössä tammikuussa 2008 ja se on vakavasti huonontunutta maata, mukaan lukien aiemmin maanviljelykäytössä ollut maa. Hyvitystä voidaan soveltaa enintään 20 vuoden ajan siitä, kun maa on otettu maanviljelykäyttöön, edellyttäen, että hiilivarantojen säännöllinen kasvu ja eroosion merkittävä väheneminen varmistetaan

Direktiivin artiklan 31(2) mukaan jäsenvaltiot voivat toimittaa komissiolle kertomuksia, jotka sisältävät tietoja maatalouden raaka-aineiden viljelyn tyypillisistä kasvihuonekaasupäästöistä niille alueilla, jotka on luokiteltu tilastollisten alueyksiköiden nimikkeistön NUTS- tasolle 2 tai tarkemmin eritellylle NUTS- tasolle. Kertomuksiin on liitettävä kuvaus päästöjen tason laskemisessa käytetyistä menetelmistä ja tietolähteistä. Käytettävissä menetelmissä on otettava huomioon maaperän ominaispiirteet, ilmasto ja oletetut raaka-ainetuotot.

Tämän työn tavoitteena oli tarkastella kestävyyskriteerejä ja raaka-ainekohtaisia kasvihuonepäästökertoimia Suomessa viljeltävälle nurmelle. Päästökertoimet laskettiin viljellylle nurmelle (kivennäis- ja eloperäisellä maalla), suojavyöhykenurmelle sekä apilapitoiselle nurmelle. Lisäksi kertoimet laskettiin kolmannelle rehusadolle kun ensimmäinen ja toinen sato käytetään säilörehuksi sekä viljelykierrossa olevalle nurmelle. Näitä kasvihuonekaasupäästökertoimia käyttäen työssä laskettiin esimerkitapauksia biokaasulaitoksen kokonaispäästöistä sekä päästövähennyksistä kun laitoksen tuottama kaasu käytetään joko sähkön- ja lämmöntuotannossa (CHP) tai liikenteen polttoaineena. Herkkyystarkasteiluissa huomioitiin mädätteen käyttö lannoitteena korvaten mineraalilannoitteita sekä biokaasun käyttö korvaten viljelyssä käytetty fossiilinen polttoaine. Lisäksi laskennassa huomioitiin lantabonus.

Laskenta on tehty RED2 direktiivin laskusääntöjen mukaan, mutta koska kansallista lainsäädäntöä raportin kirjoitusvaiheessa vasta valmistellaan, voi lopullisissa tulkinnoissa olla eroa. Lopulliset tulokset direktiivistä tehdään kansallisen implementoinnin yhteydessä sekä valvovan viranomaisen toimesta. Lisäksi on huomioitava että tässä työssä esitetyt päästökertoimet pätevät vain niissä tapauksissa, missä viljelyn lähtötiedot vastaavat tässä työssä käytettyjä lähtötietoja. Tuloksia tuleekin lukea suuntaa-antavina ja jos viljelykäytänteet poikkeavat tässä työssä käytetyistä, tulee kertoimet laskea aina tapauskohtaisesti.

2. Nurmen viljelyn päästöt

2.1. Rajaukset

Nurmenviljelyn ilmastovaikutus arvioitiin elinkaariarvioinnin (Life cycle assessment, LCA) avulla. Laskennassa huomioitiin kasvihuonekaasuista hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄) ja typpioksiduuli (N₂O). Viljelyn päästöihin sisällytettiin tuotantopaneosten (lannoitteet, kalkitusaineet, säilörehun säilöntäaine, kylvösiemenet, polttoaineet ja kasvinsuojeluaineet) valmistuksesta aiheutuvat päästöt ja viljelyn aikaiset peltotyökoneiden suorat päästöt maanmuokkauksista, kylvöstä, lannoituksesta, kasvinsuojeluruiskutuksista, kalkitusaineiden levityksestä ja nurmen korjuusta. Lisäksi huomioitiin maahan lisäystä typpilannoituksesta, kasvintähteiden hajoamisesta ja eloperäisten maiden orgaanisen aineksen hajoamisesta aiheutuvat suorat N₂O päästöt, sekä typen huuhtoumasta ja haihdunnasta aiheutuvat epäsuorat N₂O -päästöt ja hiilidioksidin vapautuminen kalkitusaineista. Suojavyöhykenurmien osalta päästölaskennassa huomioitiin vain peltotyökoneiden suorat päästöt nurmen korjuusta, sekä polttoaineen ja säilörehun säilöntäaineen valmistuksen aiheuttamat päästöt.

2.2. Lähtötiedot

Nurmenviljelyn sato- ja lannoitustasojen lähtötietoina käytettiin Enrebeef-hankkeen aineistoa (Pulkinen ym. 2019), joka perustuu Pro Agrian lohkotietopankin aineistoihin nautakarjatilojen nurmien viljelystä vuosilta 2002–2011. Suojavyöhykenurmien osalta tiedot saatiin Hoidettu viljelemätön pelto hankkeen aineistosta (Niemeläinen ym. 2014) (Taulukot 1, 2 ja 3). Muiden kuin suojavyöhykenurmien osalta oletettiin, että nurmi perustetaan suojaviljaan, ja perustamisvuoden jälkeen varsinaisia nurmen satovuosia on viljelykierrossa kolme (Pulkinen ym. 2019). Säilörehun säilöntäainetta oletettiin käytettävän 5 litraa tonnia säilörehun kuiva-ainetta kohti (Tuomisto & Helenius 2008). Direktiivin mukaan viljelyn tyyppilliset päästöt on luokiteltava tilastollisten alueyksiköiden nimikkeistön NUTS-tasolle 2 tai tarkemmin eritellylle NUTS-tasolle. Tässä työssä kaikille NUTS2 tasoille käytetään samoja satotason vaihteluvälejä kuin taulukossa 1, sillä sadon vaihtelut johtuen eri viljelykäytännöistä (lannoitustaso) ja pellon kasvukunnosta ovat suurempia kuin alueelliset satovaihtelut Suomessa (Laine ym. 2017).

Tilanteissa joissa a) kahden ensimmäisen korjuukerran sadot käytetään rehuksi ja vuoden kolmannen korjuukerran sato biokaasulaitoksella, tai b) biokaasun tuotannossa käytetään viherlannoitusnurmea, laskennassa huomioitiin vain nurmen korjuun aiheuttamat päästöt ja oletettiin että satotaso on huomionnan satotasoluokan (taulukko 1) mukainen.

Lisäksi tarkasteltiin kahta skenaariota, joista ensimmäisessä peltoviljelyn polttoaineena käytetään biokaasua (joka on tuotettu hyvän satotasoluokan heinänurmisäilörehusta) ja toisessa väkilannoite-typpi on korvattu mädätteen typpellä.

Taulukko 1. Satotaso kg kuiva-ainetta /ha satotasoluokittain.

Satotasoluokka	Kivennäismaa		Eloperäinen maa	Suojavyöhyke
	Heinänummisäilörehu	Apilanummisäilörehu	Heinänummisäilörehu	
Hyvä	7530	7530	7530	-
Keskimääräinen	5550	5550	5550	2775
Huono	3040	3040	3040	-

Taulukko 2. Typpilannoitus, kg N/ha.

Satotasoluokka	Kivennäismaa		Eloperäinen maa	Suojavyöhyke
	Heinänummisäilörehu	Apilanummisäilörehu	Heinänummisäilörehu	
Hyvä	180	90	130	-
Keskimääräinen	156	78	106	0
Huono	92	46	42	-

Taulukko 3. Nurmen korjuukerrat per vuosi

Satotasoluokka	Kivennäismaa		Eloperäinen maa	Suojavyöhyke
	Heinänummisäilörehu	Apilanummisäilörehu	Heinänummisäilörehu	
Hyvä	3	3	3	-
Keskimääräinen	2	2	2	1
Huono	2	2	2	-

2.3. Laskentamenetelmät

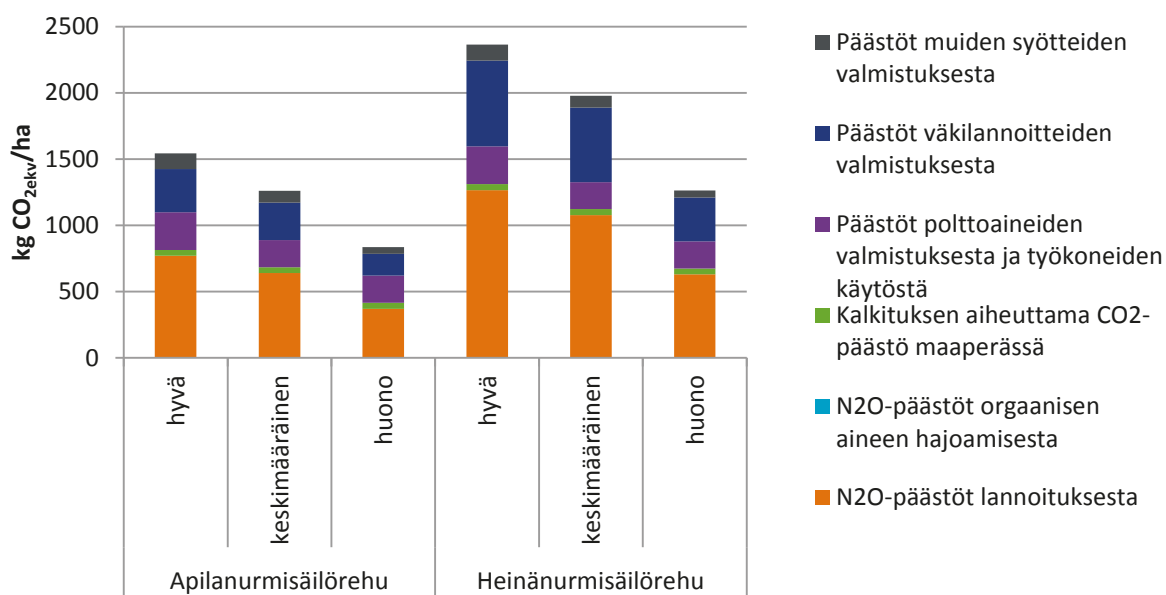
Laskennassa noudatettiin RED II:n ja IPCC:n (2006) laskentaohjeistuksia. Laskennassa käytetyt tuotantopanosten valmistuksen päästökertoimet on esitelty taulukossa 4. Kylvösiementen päästökertoimen lähtötiedot saatiin aiemmasta hankkeesta (Saarinen ym. 2014), ja kasvinsuojeluaineiden (glyfosaatti) ja dieselin valmistuksen päästökertoimet Ecoinvent 3 -tietokannasta (Wernet ym. 2016). Työkoneiden polttoaineen käyttö arvioitiin keskimääräisen polttoainekulutuksen mukaan (Mikkola & Ahokas 2009 ja Grönroos & Voutilainen 2001). Maanmuokkauksen polttoainekulutus vaihtelee maalajiryhmien (savimaat, muut kivennäismaat, eloperäiset maat) välillä. Maalajiryhmien osuudet käytössä olevasta viljelymaasta arvioitiin Viljavuuspalvelun (2010) tilastotietojen ja viljellyn peltopinta-alan alueellisen jakauman (Luke 2018) mukaan. Työkoneiden käytöstä aiheutuvat suorat päästöt arvioitiin LIPASTO yksikköpäästöt -tietokannan (2017) tietojen avulla. Viljelyn päästöt satoluokittain per raaka-aineen energiasisältö (MJ) laskettiin direktiivin mukaisesti huomioiden eri nurmien metaanintuotantopotentiaaleista 90 %.

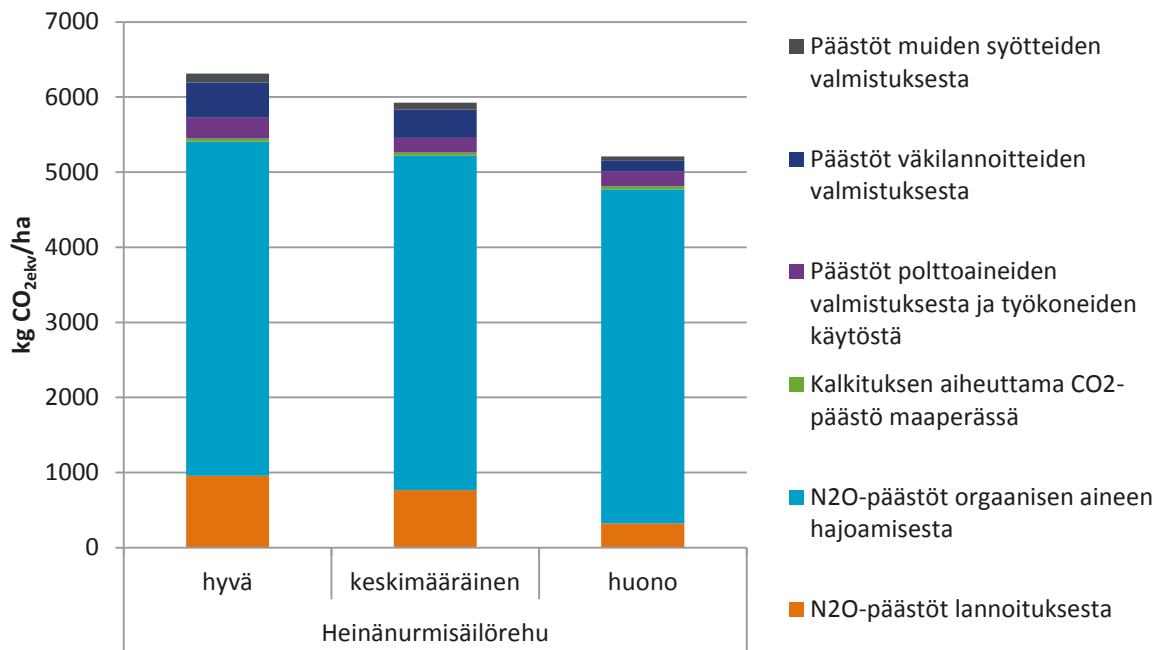
Taulukko 4. Syötteiden valmistuksen päästökertoimet, kg CO_{2ekv}/kg.

Syöte	kg CO _{2ekv} /kg	Lähde
Kalkkikiven valmistus	0,0116	IPCC 2006
Lannoitteen valmistus	3,6	Yara 2015
Säilörehun säilöntäaineen valmistus	3,073	Grönroos & Voutilainen 2001

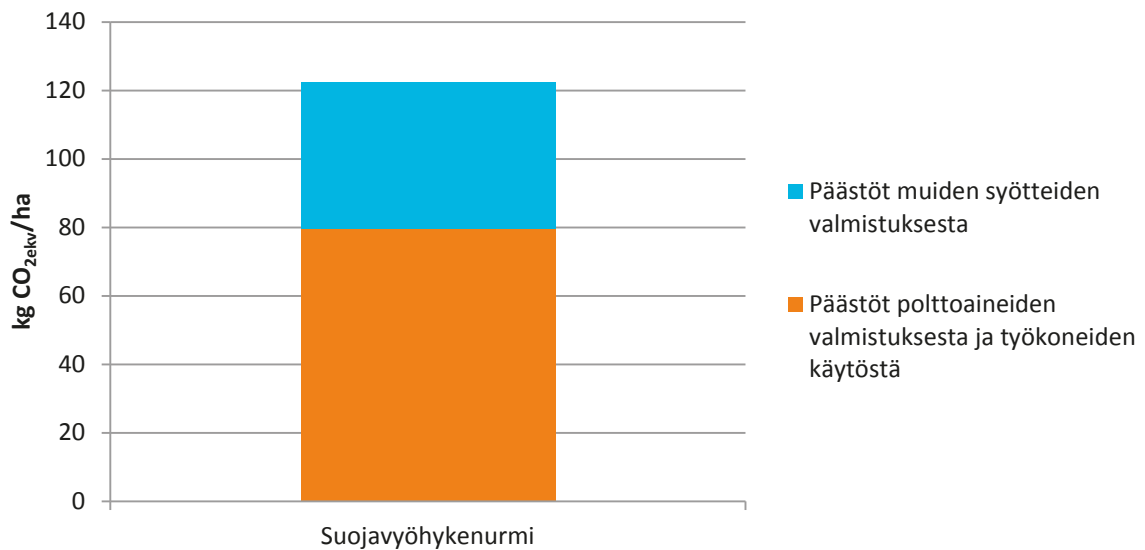
2.4. Tulokset

Viljelyn päästöt kivennäismaalla ja eloperäisellä maalla suhteutettuna viljelyalaan on esitetty kuvissa 1, 2 ja 3. ja suhteutettuna kuiva-ainesatoon kuvissa 4, 5 ja 6. Eloperäisellä maalla viljeltäessä ilmasto-vaikutus on huomattavasti suurempi kuin kivennäismaalla viljeltäessä. Myös satotasoluokalla on suuri vaikutus ilmastovaikutukseen, huonon satotasoluokan nurmea käytettäessä viljelyn ilmastovaikutus voi jopa tuplaantua verrattuna hyvään satotasoluokkaan.

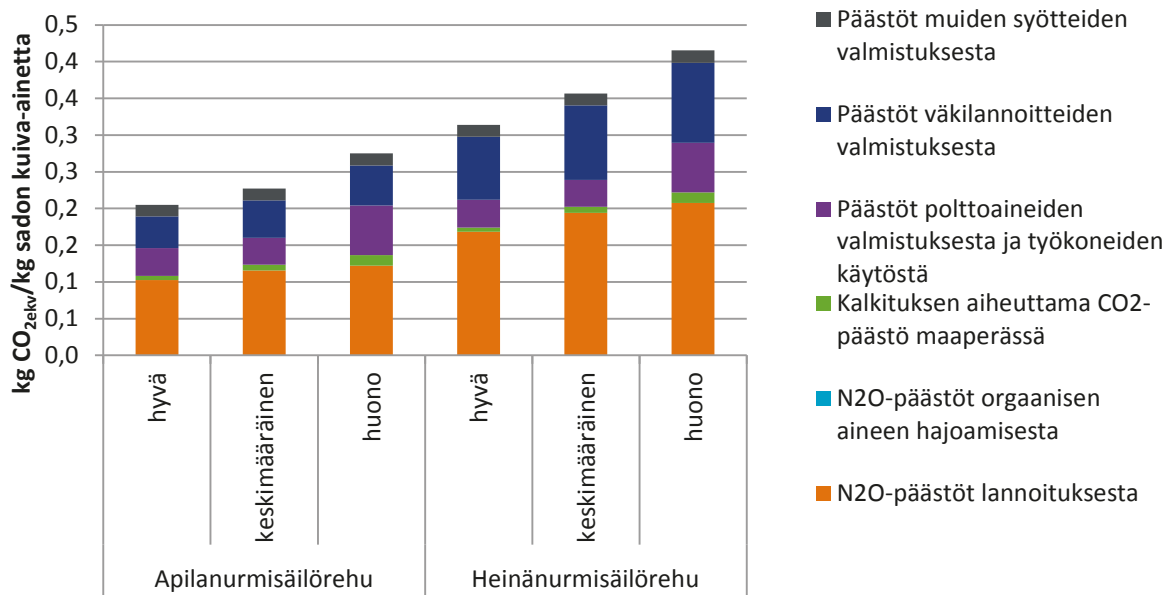
**Kuva 1.** Apila- ja heinäurmen viljelyn päästöt kivennäismaalla satotasoluokittain suhteutettuna viljelyalaan.



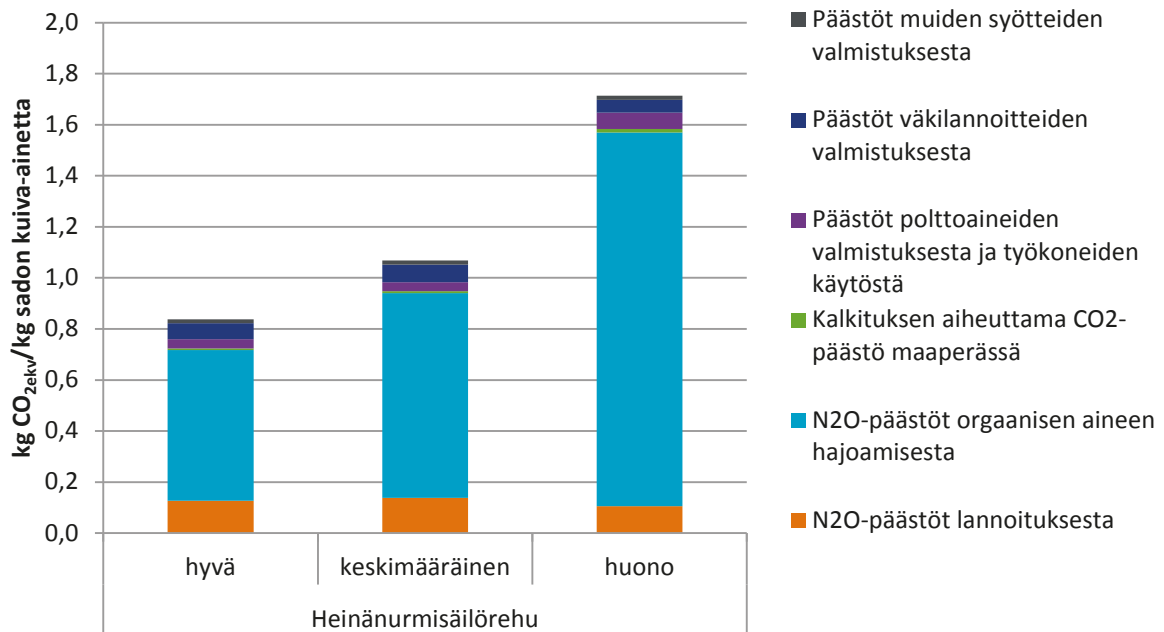
Kuva 2. Heinänurmen viljelyn päästöt eloperäisellä maalla satotasoluokittain suhteutettuna viljelyalaan.



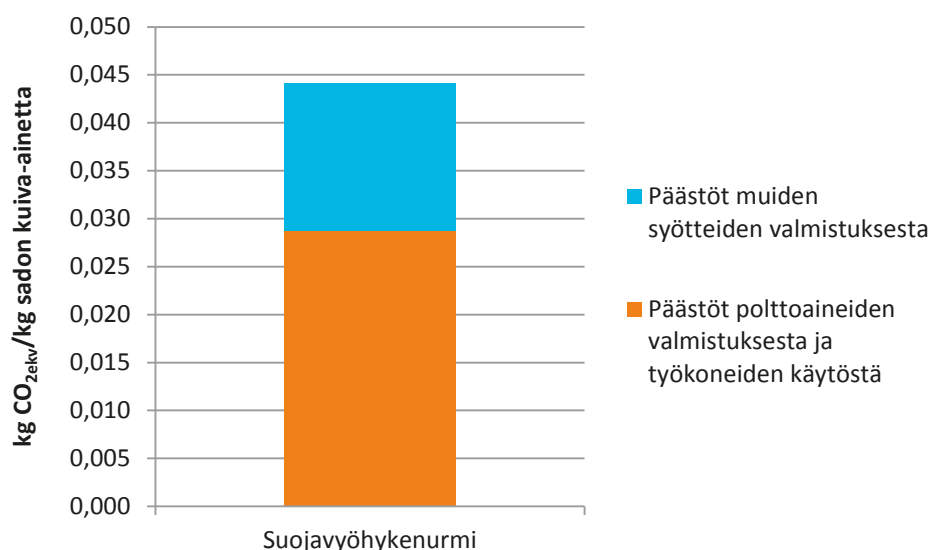
Kuva 3. Suojavyöhykenurmen tuotannon päästöt suhteutettuna viljelyalaan, kaikki maalajit.



Kuva 4. Apila- ja heinäturmen viljelyn päästöt kivennäismaalla satotasoluokittain suhteutettuna kuiva-ainesatoon.



Kuva 5. Heinäturmen viljelyn päästöt eloperäisellä maalla satotasoluokittain suhteutettuna kuiva-ainesatoon.



Kuva 6. Suojavyöhykenurmen tuotannon päästöt suhteutettuna kuiva-ainesatoon, kaikki maalajit

Viljelyn päästöt suhteutettuna raaka-aineesta saatavaan energiasisältöön ($\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$) on esitetty taulukossa 5. Luku pätee vain, jos raaka-aineista tuotetaan biometaania liikenteen polttoaineeksi ja itse biokaasulaitoksen käyttämä energia tuotetaan ulkopuolisella energialla. Kun laitos käyttää omaa tuotantoaan biokaasulaitoksen energianlähteenä, tulee päästölaskennassa huomioida myyntiin menevä energiamäärä, josta on vähennetty oman tuotannon tarvitsema energiamäärä.

Taulukossa 5 on laskettu päästökertoimet myös tilanteessa, jossa säilörehua korjataan kasvukauden aikana kolme kertaa, ensimmäisen ja toisen korjuukerran sato käytetään säilörehuksi ja kolmannen korjuukerran sato biokaasuksi, sekä tilannetta, missä biokaasun tuotannossa käytetään viherlannoitusnurmea.

Taulukko 5. Nurmen ja apilanurmen viljelyn päästöt satoluokittain $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$.

Raaka-aine	Satotasoluokka		
	hyvä	keskimääräinen	huono
Heinänurmi kivennäismaa	28,2	32,0	37,3
Heinänurmi eloperäinen maa	75,3	96,0	154,0
Apilanurmi (kivennäismaa)	20,1	22,3	27,0
Suojavyöhykenurmi	-	4,4	-
Kolmas heinänurmen korjuu (kivennäismaalla)	-	-	6,1
Viherlannoitusnurmi	-	-	6,3

Viljelyn päästöjä voidaan vähentää käyttämällä työkoneissa biometaania (esim. kaasukäyttöiset traktorit) tai korvaamalla mineraalilannoitteita biokaasulaitoksen mädätteellä. Taulukossa 6 on nähtävissä päästövähennys verrattuna tässä työssä käytettyihin oletuksiin (taulukko 5) kun mineraalilannoitteet korvataan mädätteen liukoisella tyypellä sekä työkoneissa korvataan fossiiliset polttoaineet biometaanilla (joka on tuotettu hyvän satotasoluokan heinänurmisäilörehusta). Näistä suurimman päästövähennyksen sai aikaan väkilannoitetypen korvaaminen mädätteen liukoisella tyypellä. Vähennys on suurin kivennäismaalla viljeltävällä heinänurmisäilörehulla, koska sitä lannoitetaan eniten. Taulukos-

sa 6 laskettu vähennys mineraalilannoitteen korvaamisesta on teoreettinen ja vastaa tilannetta jossa kaikki mineraalilannoite korvattaisiin mädätteellä, mikä on usein haastavaa johtuen mädätteen fosfori- ja typpisuhteesta sekä orgaanisen tyypin ja liukoisen tyypin suhteesta. Käytännössä tällaisen vähennyksen saa vain, jos mädäte jatkojalostetaan mineraalityyppiä vastaavaksi lannoitetuotteeksi, ja silloin sen valmistamiseen kuluva energia tulee huomioida laskelmissa. Todellinen vähennys tuleekin laskea laitoskohtaisesti sen mukaan, paljon mineraalityyppiä on korvattu ja mikä on mädätteen kokonaistyyppipitoisuus.

Taulukko 6. Päästövähennys, (suhteutus kuiva-ainesatoon, hyvä satotasoluokka)

Nurmityyppi	Biometaani peltoviljelyn polttoaineena	Mädätejäännös typpi-lannoitteena
Apilanurmisäilörehu kivennäismaalla	-9 %	-12 %
Heinänumrisäilörehu kivennäismaalla	-6 %	-18 %
Heinänumrisäilörehu eloperäisellä maalla	-2 %	-6 %

2.5. Arvio nurmeen perustuvan biokaasutuotannon vaikutuksesta maaperän hiilivarastoihin

Nurmea hyödyntävän bioenergiatuotannon kasvu johtaisi siihen, että nykyisiä nurmia korjattaisiin entistä tehokkaammin. Nykyisin kolmannen niiton biomassa jää usein peltoon, mutta lisääntynyt kiinnostus bioenergiantuotantoon voisi lisätä kolmannen sadon käyttöä. Tällöin maahan jäisi vähemmän kasvintähteitä ja hiilivarasto nurmilla voisi pienentyä. Toisaalta hiiltä myös palautuu maahan mädätteessä, mikä kompensoi hiilen hävikkiä.

Lisääntyvä bioenergiantuotanto voisi lisätä nurmialan tarvetta. Tämä saattaisi johtaa kehitykseen, jossa nurmi syrjäyttäisi yksivuotista viljelyä. Koska maaperän hiilitase on nurmen viljelyssä parempi kuin yksivuotisen kasvin viljelyssä (Kuva 7, Heikkinen ym. 2013), nurmen lisääntynyt käyttö tarkoittaisi sitä että peltoalan käyttö ja viljelykierrat kaiken kaikkiaan olisivatkin nykyistä parempia maaperän hoidon kannalta. Siten bioenergiakäyttö voisi potentiaalisesti parantaa peltojen keskimääräistä hiilitasetta. Kun tarkastellaan nurmen nykykäyttöä (rehuntuotantoon, viherlannoitukseen, kesannoissa ja suojaväyhykkeissä), nurmialaa on nykyisellään enemmän kuin sitä keskimääräisenä vuonna tarvitaan, joten suuri nurmialan kasvu on tässä käytössä epätodennäköistä. Jos nurmea kuitenkin otetaan viljan viljelykiertoon entistä enemmän maaperän hoidollisissa tarkoituksissa, alat voivat muuttua. Nurmialat voivat lisääntyä silloin alueilla, joilla ei ole rehunkäyttöä.

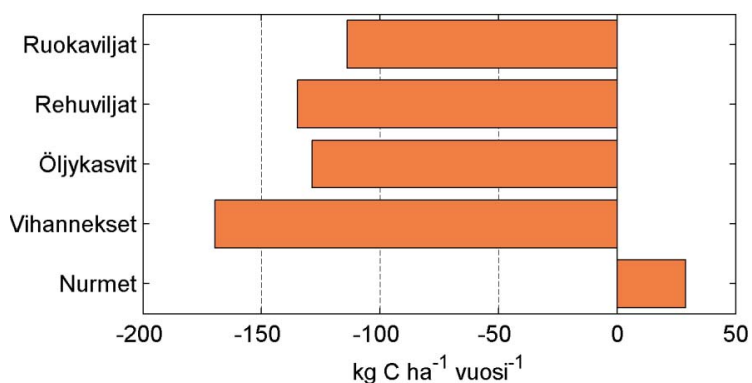
Voidaan arvioida, ettei nurmea hyödyntävän bioenergiatuotannon kasvu aiheuttaisi pellonraivausta, sillä peltoalaa on enemmän kuin nykyinen ruuantuotanto vaatii. Lisäksi peltolohkokesterin ulkopuolisia hylättyjä peltoja voitaisiin hyödyntää biomassan tuotannossa.

Bioenergian tuotannon yleistyminen saattaa kannustaa viljelijöitä aluskasvien käyttöön, sillä niitä voi myös käyttää bioenergian raaka-aineena. Esimerkiksi kerääjäkasvin biomassa olisi korjattavissa ennen maan kyntöä myöhään syksyllä, mutta sen hyödyntämistä voi rajoittaa suhteellisen pieni (1–2 t/ha) tuotos. Kerääjäkasvien yleistymisellä olisi hyviä vaikutuksia maaperän hiilivarastoihin, sillä Suomessa tyypilliset aluskasvien biomassat hillitsevät hiilivaraston vähenemistä noin 130 kg C/ha vuodessa (Heikkinen ym., käsikirjoitus). Vaikka osa hiilestä poistuu systeemistä, eikä noin suurta vaikutusta ole odotettavissa, juuret ja muut kasvintähteet ja peltoon mahdollisesti palaava mädäte parantaisivat hiilitasetta verrattuna tilanteeseen, jossa pelto jää sadonkorjuun jälkeen paljaaksi.

Direktiivi edellyttää vankkaa ja todennettavissa olevaa näyttöä hiilivaraston kasvusta. Muutosten todentaminen lohko kohtaisesti lienee epärealistinen tavoite, vaikka direktiivi näin periaatteessa ohjeistaakin. Ohje ei kuitenkaan sulje pois sitä vaihtoehtoa, että hiilivaraston kasvu todennetaan tietyllä joukolla peltoja (esim. Luken maaperäseuranta), ja tätä tulosta käytettäisiin kaikille bioenergiapelloille. Näytöksi voisi käydä myös se, että kivennäismaan peltojen kokonaishiilivarastot kasvaisivat YK:n ilmastopimuksen alla tehtävässä raportoinnissa. Näin ei kuitenkaan ole kovin monena vuonna tapahtunut, vaan kehitys on ollut enemmän päinvastainen.

Suurin hehtaarikohtainen hyöty nurmista saadaan turvepelloilla, jos nurmenviljely korvaa yksivuotisten kasvien viljelyä. Tällöin hiilidioksidipäästö voi vähentyä jopa 8 t/ha/vuosi, tai 16 t/ha/vuosi, jos samalla voidaan myös nostaa pohjaveden pintaa 30 cm:iin (IPCC 2014). Tässä tapauksessa kyseessä ei siis ole hiilivaraston kasvu vaan sen vähenemisen hidastuminen.

Kaiken kaikkiaan voidaan arvioida, ettei nurmeen perustuva biokaasuntuotanto vähentäisi maaperän hiilivarastoa viljelysmailla. Se, lisääntyykö varasto, riippuu siitä, muuttuisiko pellonkäyttö nurmivaltaisemmaksi. Jos nurmentuotanto kasvaa sellaisiin mittoihin, että pellonkäyttö muuttuu nykyistä nurmivaltaisemmaksi, on mahdollista, että peltojen keskimääräinen hiilitase parani nykyisestä.

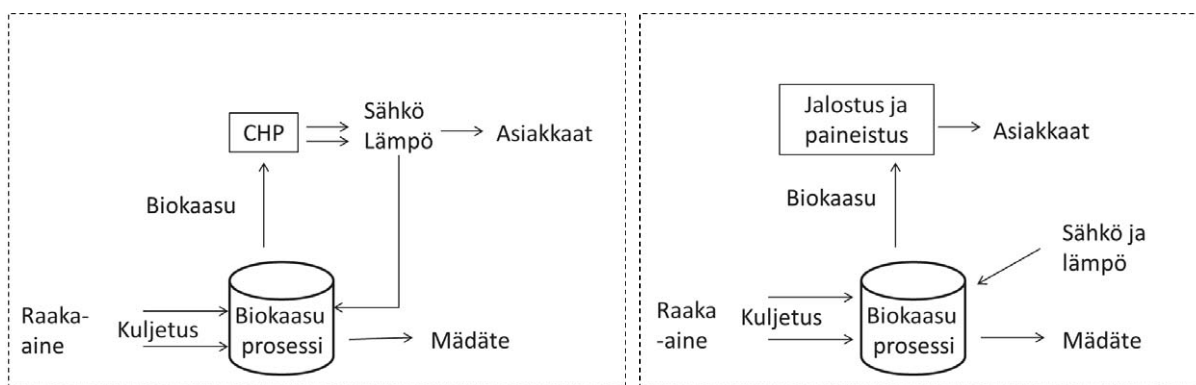


Kuva 7. Hiilivarastomuutos kivennäismailla erilaisilla viljelykasveilla Luken maaperäseurannan mukaan (Saari-
nen ym. 2019).

3. Esimerkkitarjot nurmea käsitteleville biokaasulaitoksille

3.1. Rajaukset

Nurmen (ja lannan) biokaasutuotannon ilmastovaikutus sähköksi ja lämmöksi sekä liikennepolttoaineeksi arvioitiin elinkaariarvioinnin (Life cycle assessment, LCA) avulla (Kuva 8). Laskennassa huomioitiin kasvihuonekaasuista hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4) ja typpioksiduuli (N_2O).



Kuva 8. Systeimirajaukset esimerkkilaitoksille.

Nurmea (ja lantaa) käsittelevässä biokaasuketjussa tarkastelu lähtee syötteenä hyödynnettävän nurmen viljelyn päästöistä (ks. Luku 2). Nurmi (ja lanta) kuormataan puoliperävaunurekkaan tilalla (25 t) ja kuljetetaan tilalta biokaasulaitokselle (20 km) käsittelyyn. Perustarkastelussa puoliperävaunurekan oletettiin palaava takaisin tyhjällä kuormalla sillä laitoksessa muodostuvaa jäännöstä ei kuljeteta paluukuljetuksena takaisin tilalle lannoitteeksi. Nurmi (ja lanta) kuormataan biokaasureaktoriin (polttoainekulutus $0,06 \text{ l/m}^3$), missä muodostuva biokaasu johdetaan jälkikaasuuntumisaltaan yhteydessä olevaan kaasuväylään ja edelleen joko sähköä ja lämpöä tuottavaan CHP-yksikköön tai liikennepolttoaineen jalostusyksikköön. Lannan osalta tapahtui myös sekoitusta ennen kuormausta ja sen polttoainekulutukseksi arvioitiin $0,3 \text{ l/m}^3$. Laitoskoko laskettiin niin että CHP esimerkissä laitoksen koko on noin 2 MW. Liikennekaasuesimerkissä käytettiin samoja raaka-aineiden massamääriä kuin CHP esimerkissä.

3.2. Lähtötiedot

3.2.1. Tarkasteltavat biokaasuesimerkit ja käytettävät raaka-aineet

Työssä tarkasteltiin viittä erilaista syöteseosta ja niiden käsittelystä koostuvia ketjuja (taulukko 7). Syötteen ominaisuudet on esitetty taulukossa 8. Lisäksi tehtiin herkkyystarkastelut, joissa ketjut 1–3 laskettiin niin että nurmen lisäksi laitokseen tulisi lisäksi 20 % lantaa (laitoskoon pysyessä CHP esimerkissä noin 2 MW kokoisena).

Taulukko 7. Tarkasteltavien ketjujen syötemassat.

Tarkasteltava ketju	Syötteet (märkäpaino)
Biokaasuketju 1	Säilörehunurmea (kivennäismaa) 62 000 t/a
Biokaasuketju 2	Säilörehunurmea (eloperäinen maa) 62 000 t/a
Biokaasuketju 3	Apilanurmea 74 000 t/a
Biokaasuketju 4	Naudan liettelantaa 27 000 t/a Naudan kuivalantaa 27 000 t/a Sian liettelantaa 54 000 t/a Säilörehunurmea (kivennäismaa) 27 000 t/a
Biokaasuketju 5	Viherlannoitusnurmea 48 000 t/a

Taulukko 8. Syötteiden ominaisuudet tuorepainossa (Ravinnelaskuri, Bionurmi, Valuegrass, ja Biokaasuapilahankkeet).

	TS (%)	VS (%)	N _{tot} (g/kg)	NH ₄ -N (g/kg)	P _{tot} (g/kg)	BMP m ³ CH ₄ /tVS
Säilörehunurmi	30,0	27,0	7,68	0,3	0,87	310
Apilanurmi	26,2	24,1	11,02	0,38	0,69	290
Viherlannoitusnurmi	40,0	36,0	5,0	0,4	0,64	300
Naudan liettelanta	9,0	7,2	5,0	2,9	0,9	210
Naudan kuivalanta	30,1	25,6	5,4	1,9	1,0	200
Sian liettelanta	8,2	7,0	4,6	2,9	1,0	320

Mädätteen massa laskettiin syötteiden kokonaismäärän ja biokaasuksi muuntuvan massan (ks. kpl 3.2.2.) määrän erotuksena. Mädätteen ravinnetaseet laskettiin syötteiden ominaisuuksien (taulukko 8) ja käsiteltävien massamäärien (taulukko 7) avulla. Ravinnetaseissa huomioitiin lisäksi typen liukois-tuminen prosessissa, perustuen orgaanisen aineen ja orgaanisen typen (kokonaistyyppi – ammonium-tyyppi) vähenemän suhdeluun. Biokaasuprosessissa tapahtuva syötteen orgaanisen aineen (VS) pitoisuuden vähenemä laskettiin biokaasun massan (oletus: 60 til% metaania, 40 til.% hiilidioksidia) perusteella. Orgaanisen typen pitoisuuden vähenemä laskettiin kertomalla VS-pitoisuuden vähenemä luvulla 0,6. Kerroin perustuu ruokajätteellä tehtyyn kokeeseen (Tampio ym. 2015). Orgaanisen typen vähenemän perusteella laskettiin väkilannoitetyyppä korvaavan ammoniumtypen pitoisuus ja tonni-määrä mädätteessä.

3.2.2. Biokaasulaitoksen energiantuotanto ja -kulutus

Biokaasulaitoksen tuottama energiamäärä laskettiin syötemateriaalien metaanintuottopotentialin ja orgaanisen aineen (VS) pitoisuuden avulla huomioiden eri energiantuotantomuotojen hyötysuhteet. Metaanintuotto kerrottiin kertoimella 90 %, jotta tuotto vastaisi potentiaalın sijaan jatkuvatoimisessa reaktorissa todennäköisimmin saavutettavaa metaanintuottoa. Biokaasuketjuissa syötteistä biokaasuksi muuttuva massamäärä laskettiin metaanin ja hiilidioksidin tiheyden (NTP olosuhteissa) sekä oletetun biokaasun koostumuksen avulla (60 % CH₄, 40 % CO₂) (Tampio ym 2016).

Biokaasuprosessin lämpöenergian tarve arvioitiin syötteen lämmittämiseen (12 asteesta 40 asteeseen) kuluvan energian avulla (kaava 1). Ketjuissa prosessiin ei sisältynyt hygienisointia.

$$\Delta E = c \times m \times \Delta t, \quad (\text{kaava 1})$$

missä

ΔE = lämmittämiseen tarvittava energia

c = aineen ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg^oC ($c_{\text{vesi}} = 4,18$ kJ/kg^oC)

m = massa, kg

Δt = lämpötilan muutos, ^oC

Käytännössä lämmönvaihtimien avulla talteenotettava lämpö vähentää reaktorin/raaka-aineen lämmitystarvetta, mutta sitä ei huomioitu tässä laskennassa. Myöskään lämpöhäviöitä ei ole huomioitu.

Biokaasulaitoksen sähkönkulutuksen oletettiin olevan 3 % laitoksen tuottamasta energiasta (Pöschl ym. 2010). Biokaasulaitoksen tuottaman biokaasun energiakäyttöä ja kaasun jalostustarvetta tarkasteltiin kahdessa eri vaihtoehdossa: sähkön ja lämmön tuotanto CHP-yksikössä ja kaasun jalostus liikennepolttoaineeksi. CHP-vaihtoehdossa oletettiin, että biokaasulaitos pystyy korvaamaan omaa energiankulutustaan tuottamallaan energialla, jolloin ostosähkölle ja -lämmölle ei ole tarvetta. Liikennepolttoainevaihtoehdossa jalostustekniikan energiankulutuksena käytettiin 0,70 kWh per tuotettu metaanikuutio, mikä sisältää myös kaasun paineistuksen tankkausasemalla. Liikennepolttoainevaihtoehdossa oletuksena oli, että kaikki biokaasuprosessin tuottama energia ohjataan liikennepolttoaineen tuotantoon, jolloin sekä biokaasulaitoksen että kaasun jalostuksen ja paineistuksen kuluttama energia tuotettiin ostosähköllä ja – lämmöllä. Kaasun tankkausaseman oletettiin sijaitsevan biokaasulaitoksen yhteydessä. Laskennassa käytetyt hyötysuhteet on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Laskennassa käytetyt energiantuotannon hyötysuhteet (Marttinen ym 2015).

Energiantuotantomuoto	Hyötysuhde (%)
CHP, sähkö	35
CHP, lämpö	50
Liikennepolttoaine	99

3.3. Laskentamenetelmät

Biokaasuketjujen elinkaarisia ympäristövaikutuksia arvioitiin noudattaen REDII ohjeistusta ja kansainvälisiä elinkaariarviointimenetelmän standardeja (ISO 2006a, ISO 2006b) sekä soveltaen edellä esitettyjä rajauksia ja muita oletuksia.

Ympäristövaikutukset on arvioitu kokonaisketjuille vuositasolla, ja ne on kohdistettu per MJ myyntiin tuotettua energiaa (sähköä ja lämpöä tai liikennepolttoainetta). Tarkasteltu ympäristövaikutusluokka on ilmastonmuutos (eli muita ympäristövaikutusluokkia, kuten rehevöityminen, ei huomioida). Ketjuissa syntyvät päästöt yhteismitallistettiin ympäristövaikutusluokkiin ekvivalenttikertoimilla (taulukko 10).

Taulukko 10. Käytetyt karakterisointikertoimet (RED II direktiivi).

Päästömuuttuja Ilmastonmuutos	Ekvivalenttikerroin kg CO _{2ekv} /kg
CO ₂	1
CH ₄	23
N ₂ O	296

Ympäristövaikutusten laskennassa on huomioitava, että tarkastelluissa biokaasuprosesseissa hyödynnettävistä raaka-aineista nurmea ei luokitella jätteeksi eikä nollapäästöiseksi, mikäli sitä viljellään varta vasten biokaasun tuotantoa varten. Esimerkkiketjujen viljelyn aikaisissa päästöissä hyödynnettiin luvussa 2 arvioituja nurmen ja apilan hyvän satotason mukaisia päästöjen oletusarvoja per sadon kuiva-ainepitoisuus (taulukko 11). Näiden mukaan laskettiin viljelyn aikaiset päästöt kertomalla päästöt laitoksen vuosittaisen syötemäärän kuiva-ainemassalla ja kohdistamalla ne laitoksen tuottamalle nettosähkölle ja lämmölle tai liikennepolttoaineelle.

Taulukko 11. Nurmenviljelyn päästöt, kgCO_{2ekv}/kg kuiva-ainesatoa

	Hyvä satotaso
Säilörehunurmi (Kivennäismaa)	0,314
Säilörehunurmi (eloperäinen maa)	0,838
Apilanurmi	0,205
Viherruokaturmi	0,068

Yhdessä esimerkkiketjussa sekä herkkyysanalyysin lanta-bonustarkasteluissa osa nurmesta syötteenä korvataan lannalla. Lanta luokitellaan jätteeksi ja nollapäästöiseksi ympäristövaikutusten laskennassa, sillä sen tuotannon eli esim. karjatalouden ja lietalouden varastoinnin päästöt kohdennetaan allokointisääntöjen mukaisesti lihalle ja maidolle eikä biokaasuprosessille. Lantaa varastoidaan kuitenkin lyhyemmän aikaa mautiloilla biokaasun tuotannosta johtuen, mikä johtaa pienempiin varastoinnin aikaisiin päästöihin. Lannan parempi käsittely on huomioitu direktiivissä lantahyvitysten (-45 g CO_{2ekv}/MJ) kautta ja tämä on huomioitu lantaa hyödyntävissä laitosesimerkeissä.

Kuljetukset viljelytoimenpiteiden aikana sisällytettiin viljelyn päästöihin. Erikseen esitettävät kuljetusten päästöt sisältävät syötteen kuormauksen puoliperävaunurekkaan (25 t) tilalla ja kuljetuksen tilalta biokaasulaitokselle (20 km). Kuljetuksissa huomioitiin edestakainen matka, mutta puoliperävaunurekan oletettiin palaavan takaisin tyhjällä kuormalla, sillä laitoksessa muodostuvaa jäännöstä ei tarkastella näissä esimerkkiketjuissa eikä sitä siten katsota kuljetettavan paluukuljetuksena takaisin tilalle lannoitteeksi. Kuljetusten päästökertoimet perustuvat VTT:n LIPASTO-tietokantaan.

Biokaasun tuotannolle sähköksi (CHP – laitokselle) päästöt laskettiin perustuen REDII ohjeistukseen, jossa sähkön tuotantoon päätyvän biokaasun päästöt ovat 12,5 gCO_{2ekv}/MJ laitoksen tuottamaa energiaa (direktiivissä: Käytössä olevasta polttoaineesta aiheutuvat muut kuin hiilidioksidipäästöt). Esimerkkilaitosten CHP-laitoksen vuosittainen päästöt saatiin kertomalla tämä päästömäärä laitoksen vuosittaisella energian tuotantomäärällä ja lopuksi kohdistamalla päästöt myytäväksi päätyväälle energialla lämmölle ja sähkölle REDII mukaisten allokointiohjeistusten mukaisesti (ks. Luku 3.4.).

Liikennepolttoaineyksikkö ei tässä esimerkissä hyödynnä omaa sähkön- ja lämmöntuotantoa vaan reaktoriin tarvittava energia ostetaan ulkopuolelta. Liikennepolttoaineen tapauksessa reaktorin sähkön kulutuksen lisäksi tuotantoon sisältyy vielä jalostuksen ja paineistuksen sähkön kulutus (Suomen keskimääräinen sähkö). Reaktorin tarvitsema lämpö oletettiin tehtävän puuhakkeella (metsätalou-

desta peräisin olevista tähteistä). Tämän lisäksi laskennassa huomioitiin vielä polttoaineen kulutuksen päästöt syötteen kuormauksesta reaktoriin. Ketjun eri vaiheiden päästöt sekä kokonaispäästö kohdistettiin lopputuotteelle eli per myytäväksi päätyvä liikennepolttoaine (MJ).

Laitoksen päästövähennys lasketaan vertaamalla laitoksen kokonaispäästöä fossiilisiin vertailuarvoihin (kaava 2).

$$Päästövähennys = \frac{\text{fossiilinen vertailuarvo} - \text{bioenergiatuotteen kokonaispäästö}}{\text{fossiilinen vertailuarvo}} \quad (\text{kaava 2})$$

Fossiiliset vertailuarvot sähkölle, lämmölle ja liikenteen polttoaineelle ovat annettu direktiivissä (sähkö 183 gCO_{2ekv}/MJ, lämpö 80 gCO_{2ekv}/MJ ja liikenne 94 gCO_{2ekv}/MJ).

3.4. Allokointisäännöt

Päästöt tulee kohdistaa nettoenergialle, joka päättyy laitoksen ulkopuolelle myyntiin oman energian käytön jälkeen. CHP:n tapauksessa allokointi sähkölle ja lämmölle lasketaan kaavoilla 3 ja 4:

$$EC_{el} = \frac{E}{\eta_{el}} \left(\frac{C_{el} \times \eta_{el}}{C_{el} \times \eta_{el} + C_h \times \eta_h} \right) \quad (\text{kaava 3})$$

$$EC_h = \frac{E}{\eta_h} \left(\frac{C_h \times \eta_h}{C_{el} \times \eta_{el} + C_h \times \eta_h} \right) \quad (\text{kaava 4})$$

Missä,

E = kokonaispäästö biokaasulle (kohdistettuna nettoenergialle) ennen kuin se kohdistetaan sähkölle ja lämmölle.

η_{el} : sähkön hyötysuhde 0,35

η_h : lämmön hyötysuhde 0,5

C_{el} : sähkön Carnot – hyötysuhde on 1

C_h : lämmön Carnot – hyötysuhde on 0,354

3.5. Tulokset

3.5.1. Sähkön ja lämmön päästöt ja päästövähennykset

Tulokset esitetään RED II mukaan systeemijaon mukaisesti: viljely, biokaasuprosessi, jalostus, kuljetus ja paineistus (taulukko 12) kohdistettuna nettosähkölle ja -lämmölle (1 MJ sähköä ja 1 MJ lämpöä). Nettosähköllä ja -lämmöllä tarkoitetaan tuotettua sähköä ja lämpöä, josta on vähennetty laitoksen itsensä kuluttama sähkö ja lämpö. Tästä syystä päästöt per 1 MJ sähköä ja 1MJ lämpöä ovat suuremmat kuin koko laitoksen tuottamalle energialle RED II ohjeistuksessa annettu arvo 12,5 g CO_{2ekv}/MJ laitoksen tuottamaa energiaa. Biokaasuprosessin aikaiset päästöt syntyvät käytössä olevasta polttoaineesta ja siitä aiheutuvista muista kuin hiilidioksidipäästöistä, sillä biokaasu on biogeeninen kaasu CO₂ -päästöjen osalta, ja ainoastaan muut kasvihuonekaasupäästöt huomioidaan CO₂ ekvivalenteissa. Lantabonusta ei ole jaettu ketjun eri vaiheille, eli toisin sanoen eri vaiheet eivät sisällä lantahyvitystä, vaan se on huomioitu ainoastaan lopputuotteen päästöissä g CO_{2ekv}/MJ nettoenergiaa (taulukko 13). Kuljetusten kokonaispäästöt vuositasona saman syötteen osalta eivät vaihdelleet, sillä käsiteltävät massat (niiden kuormaus ja kuljetus) ja etäisyydet olivat samat. Eroja syntyi eri esimerkien välillä johtuen käsiteltävien syötteiden eri massamääristä. Myös nettoenergian määrät, joille päästöt kohdistettiin, olivat eri syötteillä eri suuruiset.

Taulukko 12. Nurmesta tuotetun sähkön ja lämmön päästöt ketjuvaiheittain kohdistettuna lopputuotteelle eli nettoenergialle (sähkö + lämpö) (MJ).

Laitosesimerkki	Nurmen viljely	Biokaasu-prosessi*	Jalostus	Kuljetus	Paineistus	Yhteensä
	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä
Säilörehunurmi (kivennäismaa)	92,2	28,1	0,0	1,0	0,0	121,3
Säilörehunurmi (eloperäinen maa)	246,0	28,1	0,0	1,0	0,0	275,2
Apilanurmi	64,0	28,6	0,0	1,3	0,0	93,8
Lanta + Säilörehunurmi	43,5	30,8	0,0	4,4	0,0	78,8**
Viherlannoitusnurmi	19,8	27,8	0,0	0,8	0,0	48,4
	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä
Säilörehunurmi (Kivennäismaa)	32,7	10,0	0,0	0,4	0,0	43,0
Säilörehunurmi (eloperäinen maa)	87,2	10,0	0,0	0,4	0,0	97,6
Apilanurmi	22,7	10,1	0,0	0,4	0,0	33,3
Lanta + Säilörehunurmi	15,4	10,9	0,0	1,6	0,0	27,9**
Viherlannoitusnurmi	7,0	9,9	0,0	0,3	0,0	17,2

* Käytössä olevasta polttoaineesta aiheutuvat muut kuin hiilidioksidipäästöt

**ilman lantabonusta

Laitoksen tuottamalle tuotteelle saatavat päästövähennykset (kaava 2) on esitetty taulukossa 13. Vuoden 2021 alusta tai myöhemmin käynnistyville laitoksille päästövähennysvaatimus sähkölle, lämmölle ja jäähdytykselle on 70 % ja 2026 tai sen jälkeen käynnistyville laitoksille 80 %. Nurmen viljelyn aiheuttamien päästöjen vuoksi direktiivin mukaisesti päästövähennystavoitteisiin päästiin vain viherlannoitusnurmea ja lantaa hyödyntävien laitosten osalta, vaikka nurmea ja apilaa hyödyntävät laitokset olivatkin vähempipäästöisiä kuin fossiiliset vertailukohteet. Eloperäisellä maalla viljeltyä nurmea hyödyntävät laitokset olivat päästöiltään jopa korkeammat kuin fossiilinen, kun laskennassa ei huomioida nurmen hyötyjä eloperäisillä mailla (kappale 2.5).

Taulukko 13. Sähkön ja lämmön tuotannon päästöjen hyvitykset ja päästövähennykset verrattuna fossiiliseen sähköön ja lämpöön.

Laitosesimerkki	Yhteensä	Lantahyvityksen jälkeen	Päästövähennys
	g CO₂ekv/MJ sähköä		Päästövähennys %
Säilörehunurmi (kivennäismaa)	121,3		34
Säilörehunurmi (eloperäinen maa)	275,2		-50
Apilanurmi	93,8		49
Lanta + Säilörehunurmi	78,8	15,5	92
Viherlannoitusnurmi	48,4		74
	g CO₂ekv/MJ lämpöä	g CO₂ekv/MJ lämpöä	
Säilörehunurmi (Kivennäismaa)	43,0		46
Säilörehunurmi (eloperäinen maa)	97,6		-22
Apilanurmi	33,3		58
Lanta + Säilörehunurmi	27,9	5,5	93
Viherlannoitusnurmi	17,2		79

3.5.2. Liikennepolttoaineen päästöt ja päästövähennykset

Tulokset esitetään RED II mukaan systeemiä mukaisesti: viljely, biokaasuprosessi, jalostus, kuljetus ja paineistus (Taulukot 14 ja 15). Biokaasuprosessin aikaiset päästöt syntyvät reaktorin kuluttaman sähkön ja lämmön tuotannosta. Tämän lisäksi prosessiin sisällytettiin syötteen kuormaus. Lantabonusta ei ole jaettu ketjun eri vaiheille eli toisin sanoen, eri vaiheet ei sisällä lantahyvitystä, vaan se on huomioituna ainoastaan lopputuotteen päästöissä g CO₂ekv/MJ nettoenergiaa (taulukko 15).

Taulukko 14. Liikennepolttoaineen tuotannonpäästöt ketjuvaiheittain kohdistettuna kokonaistuotannolle polttoainetta (MJ).

Laitosesimerkki	Nurmen viljely	Biokaasu-prosessi	Jalostus	Kuljetus	Paineistus	Yhteensä
	g CO₂ekv/MJ	g CO₂ekv/MJ	g CO₂ekv/MJ	g CO₂ekv/MJ	g CO₂ekv/MJ	g CO₂ekv/MJ
Säilörehunurmi (kivennäismaa)	35,2	6,6	2,8	0,4	2,1	47,2
Säilörehunurmi (eloperäinen maa)	93,9	6,6	2,8	0,4	2,1	105,9
Apilanurmi	24,0	6,9	2,8	0,5	2,1	36,3
Lanta + Säilörehunurmi	15,1	8,0	2,8	1,4	2,1	29,4*
Viherlannoitusnurmi	7,6	6,7	2,8	0,3	2,1	19,6

*ilman lantabonusta

Laitoksen tuottamalle tuotteelle saatavat päästövähennykset (ks kaava 2) on esitetty taulukossa 15. Vuoden 2021 alusta tai myöhemmin käynnistyville laitoksille päästövähennysvaatimus liikenteessä käytettävälle biokaasulle on 65 %. Näistä esimerkeistä vain lantaa sisältävät tai viherlannoitusnurmea käyttävät laitokset pääsivät vaadittuun päästövähennykseen, vaikka säilörehunurmi ja apilanurmi ovat vähempipäästöisiä kuin fossiilinen vertailuarvo. Erityisesti apilanurmen päästövähennys on hyvin lähellä direktiivin raja-arvoa, joten pienillä viljelykäytänteiden muutoksilla tai lannan käyttämisellä lisäsyötteenä, on päästövähennys mahdollista saavuttaa. On myös huomioitava, että tulokseen vaikuttaa myös satotaso, joka voi todellisuudessa olla tässä laskennassa käytettyä hyvää satotasoa (7530 tTS/ha) korkeampi. Viljelyn osalta laitokset, joissa raaka-aineena käytetään eloperäisellä maalla viljeltyä nurmea, olivat huomattavasti suurimmat ja kokonaispäästöt ovat fossiilisia vertailuarvoja suuremmat, kun nurmen hyötyjä eloperäisillä mailla ei huomioida (luku 2.5).

Taulukko 15. Liikennepolttoaineen tuotannon päästöjen hyvitykset ja päästövähennykset verrattuna fossiiliseen polttoaineeseen.

Laitosesimerkki	Yhteensä	Lantahyvityksen jälkeen	Päästövähennys
	g CO _{2ekv} /MJ	g CO _{2ekv} /MJ	%
Säilörehunurmi (kivennäismaa)	47,2		50
Säilörehunurmi (eloperäinen maa)	105,9		-13
Apilanurmi	36,3		61
Lanta + Säilörehunurmi	29,4	3,8	96
Viherlannoitusnurmi	19,6		79

3.5.3. Herkkyysanalyysi

Lantabonus

Tässä osiossa arvioitiin sitä, miten päästöihin vaikuttaa nurmen korvaaminen osittain lannalla (noin 20 % syötteen märkäpainosta) (taulukko 16) ottaen huomioon lannan nollapäästöjen lisäksi lantabonus (45 g CO_{2ekv}/MJ).

Taulukko 16. Tarkasteltavien ketjujen syötemassat.

Tarkasteltava ketju	Syötteen
Säilörehunurmi (kivennäismaa) + lanta	Säilörehunurmea (kivennäismaa) 59 200 t/a Naudan lietalantaa 14 800 t/a
Säilörehunurmi (eloperäinen maa) + lanta	Säilörehunurmea (eloperäinen maa) 59 200 t/a Naudan lietalantaa 14 800 t/a
Apilanurmi + lanta	Apilanurmea 69 600 t/a Naudan lietalantaa 17 400 t/a

Päästöt viljelyn osalta ovat pienemmät lantabonus-esimerkeissä kuin perusesimerkeissä (taulukko 17), sillä ne sisältävät nollapäästöistä lantaa, jolloin päästöt kohdistetaan nurmen ja lannan yhteisnettoenergialle. Myös prosessoinnin aikaiset päästöt vaihtelevat erilaisen energiatuotannon ja kulutuksen takia. Kuljetusten päästöt lantabonus-esimerkkien osalta ovat suuremmat kuin perusesimerkkien, sillä niissä on suuremmat massat kuljetettavana tilalta laitokselle. Myös lanta ja nurmi kuljetetaan

erikseen puoliperävaunurekoilla, mikä johtaa tuplamäärään tyhjiä takaisinkuljetuksia laitokselta tilalle. Myös energiamäärät, joille kuljetukset kohdennetaan, vaihtelevat.

Taulukko 17. Sähkön ja lämmön päästöt ketjuvaiheittain kohdistettuna nettoenergialle (MJ) (ilman lantabonus-ta).

Laitosesimerkki	Nurmen viljely	Biokaasu-prosessi	Jalostus	Kuljetus	Paineistus	Yhteensä
	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä
Säilörehunurmi (kivennäismaa) +lanta	89,5	28,5	0,0	1,5	0,0	119,5
Säilörehunurmi (eloperäinen maa) +lanta	238,8	28,5	0,0	1,5	0,0	268,8
Apilanurmi +lanta	61,7	29,0	0,0	1,8	0,0	92,5
	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä
Säilörehunurmi (kivennäismaa) +lanta	31,7	10,1	0,0	0,5	0,0	42,4
Säilörehunurmi (eloperäinenmaa) +lanta	84,7	10,1	0,0	0,5	0,0	95,3
Apilanurmi +lanta	21,9	10,3	0,0	0,6	0,0	32,8

Vaikka näissä esimerkeissä päästövähennys verrattuna fossiiliseen vertailuarvoon kasvaa (taulukko 18), ei esimerkit edelleenkään pääse vaadittuihin päästövähennyksiin. Näissä esimerkeissä lannan määrä ei vielä kompensoi nurmen viljelystä aiheutuvia päästöjä, vaan lannan (tai muun vähäpäästöisen raaka-aineen) osuus laitoksessa tulisi olla huomattavasti suurempi, kun biokaasusta tuotetaan sähköä ja lämpöä.

Taulukko 18. Sähkön ja lämmön päästöt, lantahyvitykset ja päästövähennykset (%).

Laitosesimerkki	Yhteensä	Lantahyvityksen jälkeen	Päästövähennys
	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	g CO ₂ ekv/MJ sähköä	%
Säilörehunurmi (kivennäismaa) +lanta	119,5	115,1	37
Säilörehunurmi (eloperäinen maa) +lanta	268,8	264,4	-44
Apilanurmi +lanta	92,5	87,2	53
	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	g CO ₂ ekv/MJ lämpöä	
Säilörehunurmi (kivennäismaa) +lanta	42,4	40,8	49
Säilörehunurmi (eloperäinenmaa) +lanta	95,3	93,7	-17
Apilanurmi +lanta	32,8	30,9	61

Myös liikennepolttoaineen tuotannon tapauksessa päästöt vähenevät kun laitokseen lisätään lantaa (taulukko 19). Koska päästövähennystavoite on liikenteen polttoaineen osalta pienempi kuin sähkön ja lämmön tuotannossa, päästään apilanurmen kanssa yli vaaditun päästövähennyksen (taulukko 20). Lisäksi esimerkki kivennäismaalla tuotetusta nurmesta on hyvin lähellä vaadittua päästövähennystä, joka esimerkiksi hieman suuremmalla satotasolla voisi päästä toivottuun vähennykseen. Edelleen eloperäisellä maalla tuotettu nurmi tuottaa merkittävästi enemmän päästöjä, eikä tässä esimerkissä käytetty lantamäärä kompensoi viljelystä aiheutuvia päästöjä.

Taulukko 19. Liikennepolttoaineen päästöt ketjuvaiheittain kohdistettuna myyntiin päätyvälle polttoaineelle (MJ).

Laitosesimerkki	Nurmen viljely	Biokaasu-prosessi	Jalostus	Kuljetus	Paineistus	Yhteensä
	g CO ₂ ekv/MJ	g CO ₂ ekv/MJ	g CO ₂ ekv/MJ	g CO ₂ ekv/MJ	g CO ₂ ekv/MJ	g CO ₂ ekv/MJ
Säilörehunurmi (kivennäismaa) +lanta	33,7	6,8	2,8	0,6	2,1	46,0
Säilörehunurmi (eloperäinen maa) +lanta	89,9	6,8	2,8	0,6	2,1	102,2
Apilanurmi +lanta	22,8	7,1	2,8	0,7	2,1	37,4

Taulukko 20. Liikennepolttoaineen lantahyvitykset ja ja päästövähennykset (%).

Laitosesimerkki	Yhteensä	Lantahyvityksen jälkeen	Päästövähennys
	g CO _{2ekv} /MJ	g CO _{2ekv} /MJ	%
Säilörehunurmi (kivennäismaa) +lanta	46,0	33,7	64
Säilörehunurmi (eloperäinen maa) +lanta	102,2	89,9	4
Apilanurmi +lanta	37,4	23,5	75

Mädätysjäännöksen käyttö nurmen lannoitteena

Kun mineraalilannoitteen sijasta nurmen viljelyssä käytetään biokaasun tuotannossa muodostunutta mädätettä, voidaan lannoitteen tuotannon päästöt mädätteen osalta laskea nolaksi, sillä kaikki päästöt on allokoitu energialle. Tämä on huomattavasti pienempi verrattuna mineraalilannoitteen valmistuksen päästöihin 3,6 kg CO_{2ekv}/kg N (Yara). Laskennassa on kuitenkin huomioitava mädätteen päästöt kuljetuksista pellolle, levityksestä pellolla sekä suorat ja epäsuorat N₂O päästöt pellolta. Marttinen 2015 & Timonen 2019 mukaan mädätteen kuljetusten, levitysten ja N₂O -päästöt ovat hieman suuremmat verrattuna mineraalilannoitteen kuljetusten ja levitysten päästöihin sekä suoriin ja epäsuoriin N₂O päästöihin. Mädätteen peltokäytön päästöille ei kuitenkaan ole omia päästökertoimia joten ne on laskettu soveltaen IPCC ohjeistusta (2006).

Tässä raportissa käytetyille esimerkkilaitoksille tehtiin herkkyystarkastelu, jossa mädätteen oletettiin korvaavan mineraalilannoitetta mädätteen sisältämän liukoisen typen määrän mukaisesti. Koska esimerkkilaskuissa käytetyt raaka-aineet sisälsivät korkeat kokonaistypen lähtötasot, muodostuivat mädätteen käytön päästöt suuremmiksi kuin mineraalilannoitteen päästöt (joissa kaikki käytetty tyyppi on liukoista tyyppiä). Tämä on mahdollista sellaisille orgaanisille lannoitteille, joissa kokonaistyyppiä on paljon suhteessa liukoisen typen määrään, koska viljelyn päästö lasketaan kokonaistypen ja lannoitusmäärä liukoisen typen perusteella. Lisäksi näissä esimerkeissä mädätettä muodostui enemmän kuin sitä laskennassa käytetyille nurmipelloille voitaisiin viedä, eli mädätettä käytettäisiin näissä esimerkkitapauksissa myös muussa viljelyssä korvaamaan mineraalilannoitteita. Tätä ei voida kuitenkaan laskea REDII mukaan laitoksen hyväksi, sillä laskennassa allokoidaan päästöjä tuotteiden lämpöarvon mukaan, joka mädätteelle on nolla, ja mineraalilannoitteen korvaus voidaan huomioida vain biokaasulaitokselle tuotettujen raaka-aineiden mukaan.

Tässä esimerkissä käytetyille laitoksille suositeltaisiinkin mädätteen jatkojalostusta, jolloin mädätteen sisältämä liukoinen tyyppi voitaisiin hyödyntää tehokkaammin, eikä lannoitteen kokonaistypen määrä kasvaisi niin suureksi. Tällöin päästäisiin lähelle taulukon 6 mukaisia päästövähennyksiä. Huomioitavaa on, että näissä esimerkeissä huomioitiin typen liukoistuminen biokaasuprosessissa maltillisesti, mikä vaikuttaa suoraan tarvittavaan mineraalilannoitteen määrään. Päästölaskenta tulisikin aina tehdä todellisille liukoisen ja kokonaistypen arvoille.

Pidemmät kuljetusmatkat

Kuljetusetäisyyksien muutoksien vaikutuksia päästöihin tarkasteltiin tapauksessa, jossa etäisyys tilalta laitokselle ja takaisin olisikin 100 km eikä 20 km (taulukko 19). Maataloudesta peräisin oleville raaka-aineille 100 km kuljetusetäisyys ei ole kovin realistinen, mutta laskenta tehtiin esimerkinomaisesti kuvastamaan kuljetusten merkitystä kokonaispäästöissä.

Taulukko 21. Kuljetuksen vaikutus peruslaitosesimerkkien päästöihin.

Laitosesimerkki	Kuljetus 20 km	Kuljetus 100 km
	g CO₂ekv/MJ nettosähköä	g CO₂ekv/MJ nettosähköä
Säilörehunurmi (kivennäismaa)	1,0	4,5
Säilörehunurmi (eloperäinen maa)	1,0	4,5
Apilanurmi	1,3	5,5
Lanta + Säilörehunurmi	4,4	12,3
	g CO₂ekv/MJ nettolämpöä	g CO₂ekv/MJ nettolämpöä
Säilörehunurmi (Kivennäismaa)	0,4	1,6
Säilörehunurmi (eloperäinen maa)	0,4	1,6
Apilanurmi	0,4	1,9
Lanta + Säilörehunurmi	1,6	4,4
	g CO₂ekv/MJ polttoainetta	g CO₂ekv/MJ polttoainetta
Säilörehunurmi (kivennäismaa)	0,4	1,7
Säilörehunurmi (eloperäinen maa)	0,4	1,7
Apilanurmi	0,5	2,1
Lanta + Säilörehunurmi	1,4	4,3

4. Johtopäätökset

Kun nurmea viljellään biokaasuntuotantoa varten ja sitä käytetään ainoana raaka-aineena prosessissa, on REDII direktiivin mukaisiin päästövähennyksiin haastavaa päästä. Erityisesti sähkön ja lämmöntuotannossa, joissa päästövähennysvaatimukset ovat liikennepolttoaineita suuremmat, nurmenviljelystä aiheutuvat päästöt aiheuttavat sen, ettei päästövähennys fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna ole riittävän korkea. Päästövähennyksiin on kuitenkin mahdollista päästä, jos nurmi on vain osa biokaasulaitoksen raaka-aineista tai nurmi on alun perin viljelty muuta tarkoitusta varten, esim. viherlannoitusnurmeksi. Myös suojavyohykkeiden vihermassojen päästöt jäävät alhaisiksi, mutta niiden käyttöä biokaasulaitoksen ainoana raaka-aineena saattaa rajoittaa alhainen satotaso. Suojavyöhykkeiden nurmet soveltuisivatkin mainiosti lisäämään esimerkiksi lantaa käyttävien biokaasulaitosten energiantuotantoa, ilman että tuotannon päästöt nousisivat liian korkeiksi.

Heinänurmen viljelyn päästöt (28,2 gCO_{2ekv}/MJ, hyvä satotaso) ovat korkeammat kuin direktiivissä esimerkkinä käytetyn maissin (13-21 gCO_{2ekv}/MJ). Tämä johtuu sekä erilaisista viljelykäytännöistä, maaperästä, että maissin korkeammasta satotasosta, jolloin myös maissista saatava energiamäärä on nurmeen verrattuna suurempi. Apilanurmen tapauksessa päästöt ovat alhaisemmat (20,1 gCO_{2ekv}/MJ), johtuen apilanurmen pienemmästä lannoitetarpeesta. Myös maissin käyttö yksinään biokaasun raaka-aineena on huomattu olevan haasteellista päästötarkastelujen kannalta (esim. Liebetrau ym. 2017 ja REDII direktiivi). Sekä tässä työssä saatu tulos, että kansainväliset tutkimukset (mm. Liebetrau ym. 2017) puoltavat kuitenkin energiakasvien käyttöä yhdessä lannan kanssa. Nurmen hyödyntäminen energiantuotantoon Suomessa edistäisi lannan tehokkaampaa käyttöä, sillä nurmi lisää prosessin energiantuottoa (Luostarinen ym 2019) ja päästövähennykset lannan kanssa on täysin saavutettavissa.

Eloperäisillä pelloilla viljely on näillä laskentamenetelmillä lähtökohtaisesti suuri päästölähde. On kuitenkin huomioitava että nurmen viljely eloperäisillä mailla olisi suotavampaa kuin yksivuotisten kasvien viljely, jolloin voidaan hidastaa hiilivaraston vähenemistä. Erityisesti viljelykierron lisääminen eloperäisillä mailla olisi hyvä maaperän hoidon kannalta. Tässä raportissa lasketut päästöt viherlannoitusnurmelle jäivät alhaisiksi, sillä laskennassa oletettiin että biokaasulaitokselle allokoidaan päästöjä vain nurmen keruusta ja mädätteen kuljetuksesta. Tästä laskentatavasta ei kuitenkaan ole vielä kansallista tulkintaa ja valvova viranomainen tulee jatkossa tekemään tulkinnan, miten viherlannoitusnurmen päästölaskenta tulee suorittaa.

Mädätteen hyödyntäminen ei näissä esimerkkitapauksissa ilman mädätteen jatkojalostusta vähentänyt viljelyn aikaisia päästöjä. Tämä johtui pääosin mädätteen korkeasta kokonaistypipitoisuudesta, jonka vuoksi mädätettä ei voida käyttää täysimääräisesti juuri kyseessä olevan laitoksen nurmen viljelyssä. Laskennassa ei voida kuitenkaan huomioida sitä, että mädätettä voidaan käyttää lannoitteena myös muussa viljelyssä, eli vähentää päästöjä esimerkiksi viljan tai rehun viljelyssä. Päästöjen laskenta mädätteen käytöstä on kaiken kaikkiaan haastavaa ja tarvittaisiinkin enemmän kokeellista tietoa päästöistä jalostettujen orgaanisten lannoitteiden osalta.

Päästötavoitteiden saavuttamiseksi biokaasulaitoksiin päätyvä nurmi pitäisi ensisijaisesti olla kasvatettu jotain muuta kuin energiantuotantoa silmällä pitäen. Esimerkiksi nurmet, jotka on viljelty viherlannoitusnurmen tai turvemaiden päästöjen vähentämisen, maanparannuksen tai huuhtoutuman vähentämisen vuoksi, ovat hyviä raaka-aineita biokaasulaitokselle, sillä niillä on positiivisia ympäristövaikutuksia myös energiantuotannon ulkopuolella.

Viitteet

- Grönroos, J., & Voutilainen, P. 2001. Maatalouden tuotantotavat ja ympäristö. Inventaarioanalyysin tulokset. Suomen ympäristökeskus, Helsinki
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V. & Regina, K. 2013. Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974-2009. *Global Change Biology* doi: 10.1111/gcb.12137
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Luostarinen, S. & Regina, K. 2019. Persistence of organic matter amendments in agricultural soils. Käsikirjoitus.
- Huuskonen, A. (toim.) 2018. Nurmi tehokkaasti naudanhilaksi. Tuloksia NautaNurmi-hankkeen tutkimuksista. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 67/2018. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 40
- IPCC 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Intergovernmental panel on climate change.
- IPCC 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland.
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index.html>
- Laine, A., Högnäsbacka, M., Niskanen, M., Ohralahti, K., Jauhiainen, L., Kaseva, J. & Nikander, H. 2017. Virallisten lajikekoekiden tulokset 2009-2016. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 1/2017.
- Liebetrau, J., Reinelt, T., Agostini, A. & Linke, B. 2017. Methane emissions from biogas plants. IEA Bioenergy: Task 37: 2017: 12.
- LIPASTO yksikköpäästöt -tietokanta 2017. Työkoneiden keskimääräinen päästö ja energia polttoainelitraa kohden Suomessa vuonna 2016. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.
http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muut/tyokoneet/tyokoneet_litra.htm päivitys 6.7.2017
- Luke 2018. Käytössä oleva maatalousmaa. Luonnonvarakeskus.
<http://stat.luke.fi/kaytossa-oleva-maatalousmaa>
- Luostarinen, S., Tampio, E., Niskanen, O., Koikkalainen, K., Kauppila, J., Valve, H., Salo, T. & Ylivainio, K. 2019. Lantabiokaasutuen toteuttamisvaihtoehdot. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 75 s.
- Marttinen, S., Tampio, E., Sinkko, T., Timonen, K., Luostarinen, S., Grönroos, J., Manninen, K. 2015. Biokaasulaitokset - syötteistä lopputuotteisiin. Energia, ravinteet ja ympäristövaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2015.
- Mikkola, H. J., & Ahokas, J. 2009. Energy ratios in Finnish agricultural production. *Agricultural and food science*, 18(3-4), 332–346.
- Niemeläinen, O., Hyvönen, T., Jauhiainen, L., Lötjönen, T., Virkkunen, E., Uusi-Käppä, J. 2014. Hoidettu viljelemätön pelto biokaasuksi – biomassan sopivuus syötteeksi ja korjuun vaikutukset tukiohjelmien muiden tavoitteiden saavuttamiseen. MTT Kasvintuotannon tutkimus, Jokioinen.
- Pulkkinen, H., Hietala, S., Virkajärvi, P., Järvenranta, K., Nousiainen, J., Huuskonen, A., Silvenius, F., Katajajuuri, J.-M. 2019. Environmental impacts of primary production of Finnish beef. Luonnonvarakeskus, Helsinki.
- Saarinen, M., Sinkko, T., Joensuu, K., Silvenius, F., & Ratilainen, A. 2014. Ravitsemus ja maaperävaikutukset ruoan elinkaariarvioinnissa: SustFoodChoice-hankkeen loppuraportti. MTT Raportti 186.
- Saarinen, M., ym. 2019. Ruokavaliomuutoksen vaikutukset ja muutosta tukevat politiikkayhdistelmät. RuokaMinimi-hankkeen loppuraportti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja, käsikirjoitus.
- Tampio, E., Marttinen, S., Rintala, J. 2016. Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems. *J Clean Prod* 125, 22-32.

- Tampio, E., Ervasti, S. & Rintala, J. 2015. Characteristics and agronomic usability of digestates from laboratory digesters treating food waste and autoclaved food waste. *Journal of Cleaner Production* 94: 86–92.
- Timonen, K., Sinkko, T., Luostarinen, S., Tampio, E., Joensuu, K. 2019. LCA of anaerobic digestion: Emission allocation for energy and digestate (in press). Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619320402>
- Tuomisto, H. L., & Helenius, J. (2008). Comparison of energy and greenhouse gas balances of biogas with other transport biofuel options based on domestic agricultural biomass in Finland.
- Viljavuuspalvelu 2010. Maalajisuhteet: Pintamaalajien näytemäärät ja prosentuaaliset osuudet 2006-2010. <https://www.tuloslaari.fi/>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), pp.1218–1230. Saatavilla: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Yara, 2015. The carbon footprint of fertilizers. Saatavilla: http://yara.com/doc/29413_Yara_carbon_life_cycle.pdf



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000