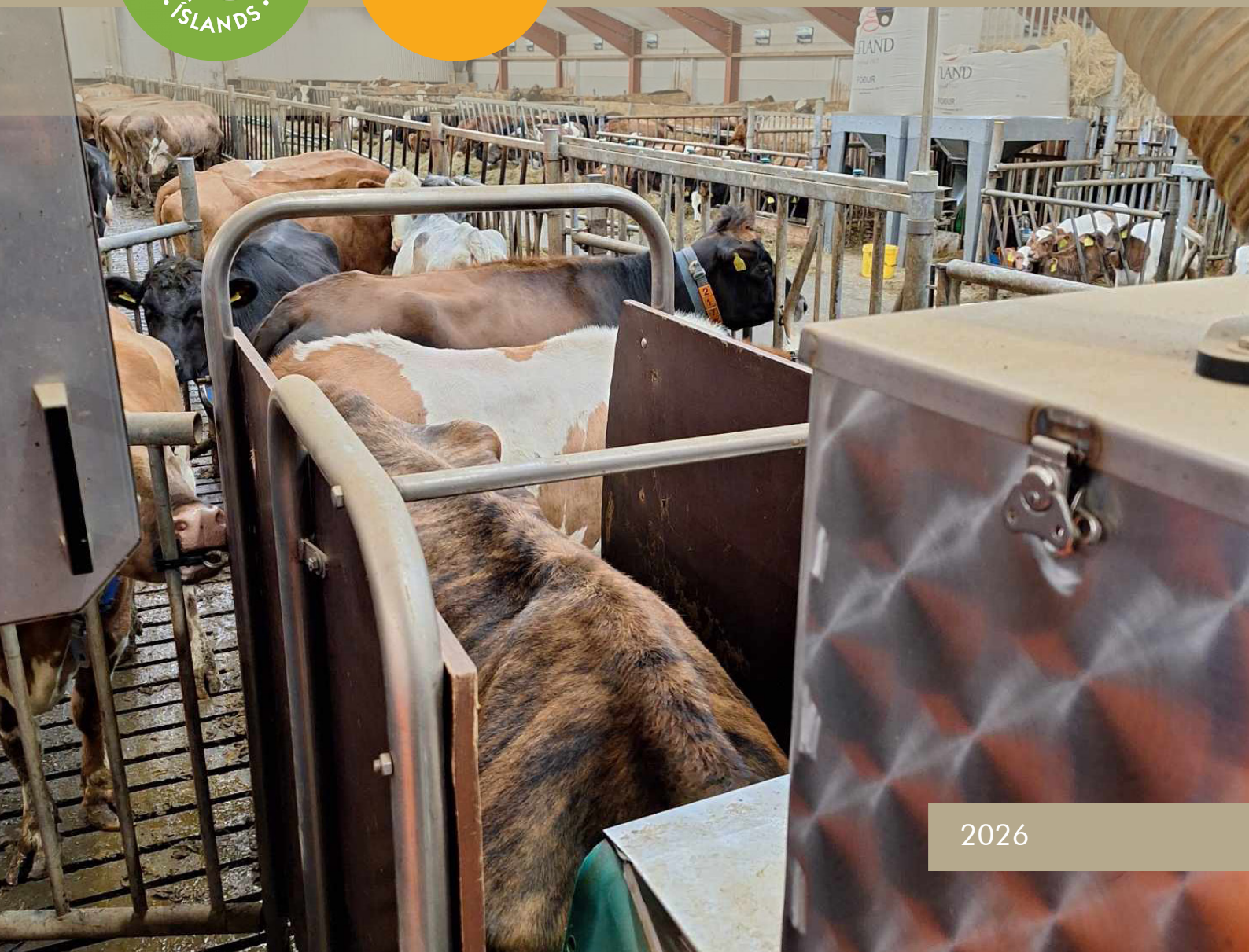
Iðragerjun íslenskra mjólkurkúa

Mælingar, spálíkön og uppfærsla loftslagsbókhalds

Jóhannes Kristjánsson, Gunnhildur Gísladóttir og Jóhannes Sveinbjörnsson

Rit LbhÍ
nr. 190



2026

Landbúnaðarháskóli Íslands, 2026.
Rit LbhÍ nr. 190
ISSN 1670-5785
ISBN 978-9935-512-74-1

Verkefnið var styrkt af: matvælaráðuneytinu- nú atvinnuvegaráðuneyti- og umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytinu. Verkefnið var einnig styrkt af þróunarfé nautgriparæktar.
Höfundar: Jóhannes Kristjánsson, Gunnhildur Gísladóttir og Jóhannes Sveinbjörnsson.
Ljósmynd á forsíðu: Gunnhildur Gísladóttir

Landbúnaðarháskóli Íslands starfar á sviði sjálfbærrar auðlindanýtingar, búvísinda, umhverfisvísinda, skipulagsfræði og matvælaframleiðslu á norðurslóðum. Fagfólk skólans nýtur akademísks frelsis og hefur sjálfdæmi við val á viðfangsefnum, túlkun niðurstaðna og birtingu þeirra, innan ramma starfsreglna skólans. Hlutverk Rits LbhÍ er að miðla faglegri þekkingu en það er ekki ritrýnt. Efni hvers rits er á ábyrgð höfunda og ber ekki að túlka sem álit Landbúnaðarháskóla Íslands.

Efnisyfirlit/Contents

Verkefnið 1
Fræðilegur bakgrunnur 2
Melting hjá jórturdýrum - hvers vegna myndast metan? 2
Áhrif fóðurs á metanlosun 5
Áhrif framleiðslukerfa, kynbóta og framleiðni á metanlosun 6
Mælingar á metanlosun- GreenFeed eða öndunarklefar? 7
Reiknilíkön af losun gróðurhúsalofttegunda (GHG) frá jórturdýrum 8
Mælingar á metanlosun, prófun á spálíkönum, uppfærsla reikniaðferða fyrir Loftslagsbókhald Íslands 10
Afleiðingar af breyttum reikniaðferðum 13
Þakkir 15
Heimildaskrá 16

Verkefnið

Í aðgerðaráætlun stjórnvalda í loftslagsmálum 2024 er losun vegna landbúnaðar metin 22% af samfélagslosun (ESR) Íslands árið 2022. Af losun vegna landbúnaðar teljast 62% vera vegna losunar frá búfé, einkum vegna iðragerjunar í nautgripa- og sauðfjárrækt og vegna geymslu búfjáráburðar. Í aðgerðaáætluninni er gert ráð fyrir að losun gróðurhúsalofttegunda frá landbúnaði minnki um 16% frá 2005 til 2030. Nokkrar aðgerðir eru skilgreindar í aðgerðaráætlun stjórnvalda, verkefnið sem hér er gerð grein fyrir fellur undir S.C.4.1. – - Rannsóknir og greining á metanlosun búfjár og S.C.4.3. sem snýr að notkun íblöndunarefna í fóður jórturdýra, sjá: https://www.co2.is/adgerdir/s4c-bufe

Metanlosun íslenskra búfjártegunda hefur verið áætluð í losunarbókhaldi Íslands til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna og Evrópusambandsins. Þær áætlanir byggja á stöðluðum aðferðum IPCC og taka ekki sérstakt tillit til íslenska kúakynsins eða fóðursamsetningar hérlendis. Nákvæmara væri að byggja þessa útreikninga á innlendum rannsóknaniðurstöðum líkt og nágrannaþjóðir okkar gera.

Landbúnaðarháskóli Íslands gerði árið 2021 samning við umhverfis-og auðlindaráðuneytið (UAR), sem tryggði kaup og uppsetningu á Greenfeed metanmælingarbúnaði sem mælir metanlosun frá búfé. Mælingar með búnaðinum hófust í fjósi LbhÍ á Hvanneyri á haustmánuðum 2022. Stuðningur fékkst úr þróunarfé nautgriparæktar til að hefja rannsóknavinnu. Í upphafi árs 2023 var svo gerður samningur milli LbhÍ annars vegar og matvælaráðuneytisins (MAR) og umhverfis- orku- og loftslagsráðuneytisins (URN) hins vegar, um verkefni sem hefur það að markmiði að bæta upplýsingar og mat á losun gróðurhúsalofttegunda vegna iðragerjunar frá íslenskum nautgripum í losunarbókhaldi Íslands.

Verkefnið hefur skv. samningnum þríþættan tilgang:

- Að safna gögnum um metanlosun íslenskra nautgripa við fjölbreyttar aðstæður og fóðrun.
- Að greina þau gögn þannig að það staðfesti með alþjóðlega viðurkenndum hætti réttmætar aðferðir til að meta losun metans frá iðragerjun nautgripa á Íslandi út frá upplýsingum um fóður og gripi.
- Að út frá þeim upplýsingum sem fyrir liggja eftir þessar rannsóknir verði með raunhæfum hætti hægt að leiðbeina íslenskum nautgripabændum um aðferðir til að draga úr metanlosun frá iðragerjun íslenskra nautgripa.

Til að vinna að þessum markmiðum var verkáætlunin einnig þríþætt:

- **Að mæla metanlosun nautgripa í þremur fjósum.**
- **Fræðileg vinna og úrvinnsla gagna með það að markmiði að uppfæra aðferðir við útreikninga á metanlosun íslenskra mjólkurkúa, í samræmi við leiðbeiningar IPCC.**
- Samanburðarmælingar í Hvanneyrarfjósi á áhrifum ólíkra fóðurtegunda á metanlosun nautgripa.

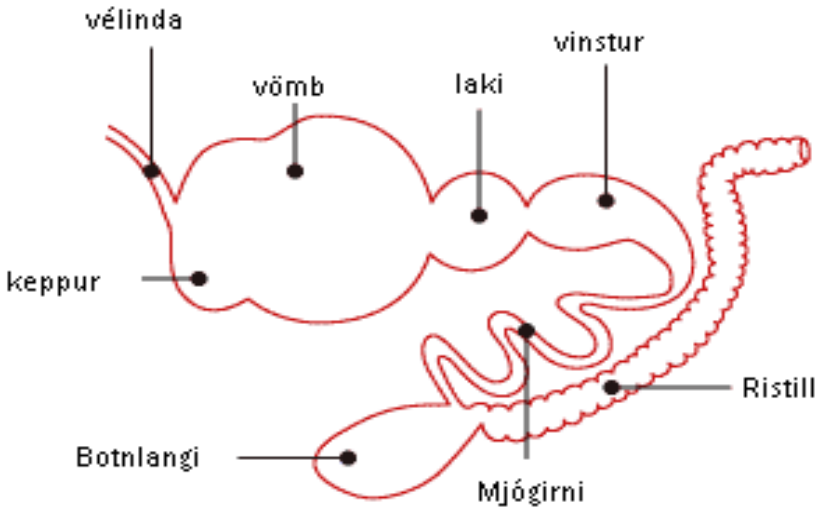
Skýrsla þessi gerir grein fyrir fyrstu tveimur atriðunum í verkáætluninni, feitletraðir hér að ofan. Þriðja atriði verkáætlunarinnar er tekið fyrir í tveimur sjálfstæðum ritum í LbhÍ-ritröðinni sem gera grein fyrir áhrifum íblöndunarefnanna Bovaer og Agolin á metanlosun og afurðamyndun kúa í Hvanneyrarfjósi samkvæmt rannsóknum sem gerðar voru innan þessarar sömu verkáætlunar.

Næsti kafli í skýrslunni sem hér liggur fyrir er fræðilegur bakgrunnur sem er nokkuð ítarlegur í ljósi þess að hér er um að ræða fyrstu rannsóknir á þessu sviði hérlendis. Þar á eftir kemur svo útdráttur á íslensku úr meginhluta verkefnisins, sem birtur hefur verið sem ritrýnd grein á ensku í ritinu Icelandic Agricultural and Environmental Sciences (Kristjánsson o.fl., 2025); þar sem meginefnið er: mælingar á metanlosun mjólkurkúa í þremur fjósum, prófun á spálíkönum, uppfærsla reikniaðferða fyrir Loftslagsbókhald Íslands og að síðustu – sem sér kafli í þessari skýrslu: næmnisgreining og umfjöllun um afleiðingar af breyttum reikniaðferðum.

Fræðilegur bakgrunnur

Melting hjá jórturdýrum - hvers vegna myndast metan?

Meltingarkerfi jórturdýra (nautgripir, sauðfé, geitur, sjá 1. mynd) er mjög frábrugðið meltingarkerfi einmaga dýra (maður, svín, fuglar). Fyrir framan þennan eina maga sem er svipaður í öllum dýrum, hafa jórturdýrin þrjá maga sem heita, talið framan frá: vömb, keppur og laki. Fjórði maginn í jórturdýrum, vinstrin, hefur mjög sambærilega virkni og maginn í einmaga dýrunum, þar meltist fæðan fyrir tilstilli ensíma sem dýrið framleiðir sjálft. Svo



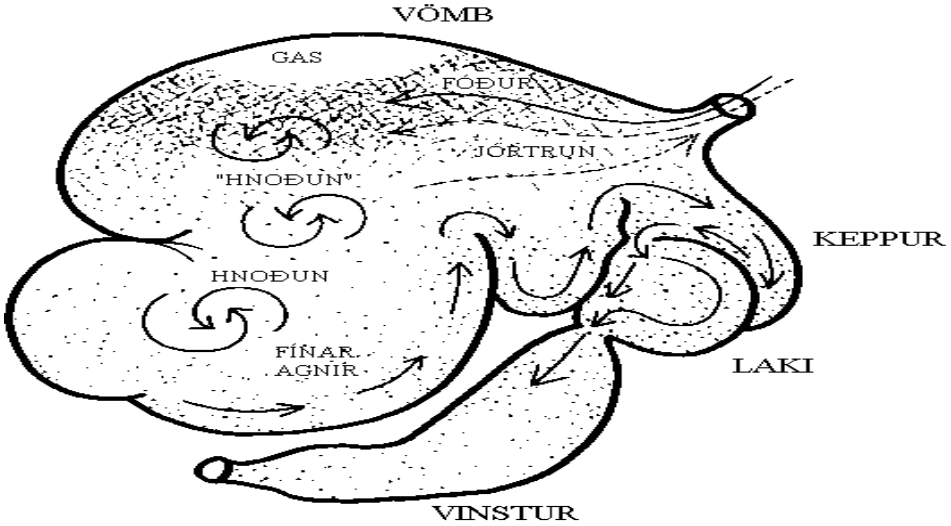
1. mynd. Meltingarkerfi jórturdýra

heldur melting og upptaka næringarefna áfram í smáþörmum, þetta er líka sameiginlegt með jórturdýrum og einmaga dýrum.

Það er þetta sem gerist í fyrstu mögunum þremur hjá jórturdýrunum sem skilur þau frá einmaga dýrunum hvað varðar fæðuval og meltingu. Tvenns konar ferlar eru þar einkum að verki, jórtrun og örverumelting. Jórtrun felst í að tyggja fóðrið margsinnis; ósjálfráðar vambarhreyfingar senda tugguna endurtekið frá vömbinni upp vélindað, til tyggingar í munni. En eins og sjá má á 2. mynd eru fóðurefnin lagskipt í vömbinni. Megin hluti þeirra er í vökvafasa, ofan á honum fljóta grófustu fóðuragnirnar, sem blandast vökvafasanum vegna þeirrar hnoðunar sem hinar ósjálfráðu vambarhreyfingar leiða til. Við endurtekna jórtrun verða fóðuragnirnar sífellt fíngerðari, loftminni og eðlisþyngri. Þetta gerir það að verkum að þær botnfalla í vömbinni og geta þá haldið leið sinni áfram eins og örvarnar á 2. mynd sýna, í gegnum kepp og laka og til vinstrar. Efsti fasinn í vömbinni er svo gas sem verður til við gerjun örvera þar á fóðurefnunum. Þetta gas leitar upp og er losað út um vélindað.

Jórturdýr hafa í fremri hluta meltingarvegar síns svo öfluga örveruflóru að hún breytir frumuveggjum plantna (tréni) í næringu fyrir dýrið og N-samböndum af ólíku tagi (NPN-sambönd, non-protein-nitrogen) í alvöru prótein. Fyrir einmaga dýr (menn, svín, hænsni,

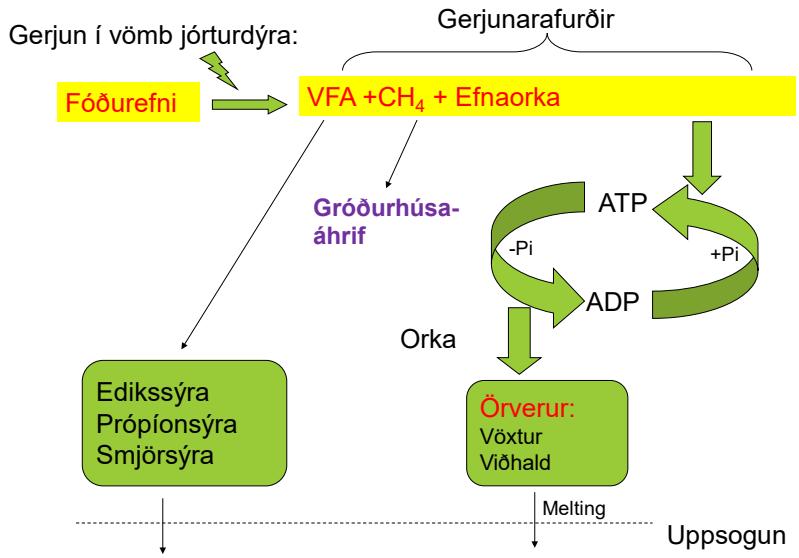
o.s.frv.) eru tréni og NPN-sambönd ekki næringarefni. Jórturdýr eru því forsenda fyrir nýtingu graslendis í heiminum til matvælaframleiðslu auk þess sem þau nýta ýmsan “úrgang” frá annarri framleiðslu.



2. mynd. Grófari hluti fóðursins í vömbinni er eðlisléttur og flýtur ofan á vökvafasa vambarinnar, sem inniheldur uppleyst næringarefni á mismunandi stigum meltingar. Neðst eru eðlisþungar fóðuragnir sem eru á leið út úr vömbinni. Efst í vömbinni er gas sem verður til við gerjunina og er losað út um vélindað.

Örverurnar í vömb jórturdýra brjóta niður og gerja fóðrið og fá út úr því efni og orku (ATP) sér til viðhalds og fjölgunar (3. mynd). Örverurnar eru svo meltar í smáþörmum jórturdýrsins, sem fær út úr því prótein með mjög hagstæðri amínósýrusamsetningu sem er gjarnan meiri

hluti af heildar próteinnæringu dýrsins. Rokgjarnar fitusýrur (volatile fatty acids = VFA) verða til við gerjunina. Frá sjónarhóli örveranna eru þær aukaafurðir en fyrir jórturdýrið eru þær hráefni og orkugjafar sem standa að jafnaði undir meiri hluta af orkuþörfum dýrsins. Til að vömbin súrni ekki um of þarf hún að losa sig við vetni, sem losnar við framleiðslu á edikssýru og smjörsýru en binst við framleiðslu á própíonsýru. Restina af vetninu losar vömbin sig við á formi vatns (H_2O) og metans (CH_4). Metan er því hliðarafurð vambargerjunar sem hvorki örverurnar né dýrið hafa neitt beint gagn af, en er þó óhjákvæmilegt að verði til í einhverjum mæli.



3. mynd. Gerjun fóðurefna í vömb

Í 1. töflu eru fræðilegir útreikningar fyrir gerjun á einu móli kolvetna (glúkósaígildi) (Beever, 1993). Trénisgerjandi örverur framleiða hlutfallslega mikið af edikssýru og metani. Sterkjugerjandi örverur framleiða minna metan en hærra hlutfall própíonsýru. Ef mikill sykur er í fóðri verður hlutfall smjörsýru óvenju hátt, og því fylgir líka metanframleiðsla. Það er þó fjarri því að fræðilegir útreikningar á borð við þessa skýri allan breytileika í hlutföllum einstakra VFA og metans. Til dæmis hefur verið sýnt fram á að gerjunarhraði bæði trénis og sterkju hefur áhrif á þessi hlutföll í gerjunarafurðum (Sveinbjörnsson o.fl., 2006 b & c). Snemmslegið, hraðgerjanlegt gróffóður leiðir til minni metanmyndunar en sama magn af tréni úr síðslegnu, hæggerjanlegu gróffóðri. Svo þó að upp að vissu marki megi draga úr losun CH_4 á hvert kg framleiddrar mjólkur með því að hækka kjarnfóðurhlutfall, er líka valkostur að auka gróffóðurgæði í sama tilgangi.

Ef mannkynið ætlar sér ekki að hætta að nýta graslendi til matvælaframleiðslu þá verðum við að sætta okkur við að eitthvað metan losni vegna næringarþarfar okkar mannanna. Hins vegar er margt hægt að gera til að draga úr metanframleiðslu á hverja einingu af framleiddri afurð (lítra mjólkur, kg kjöts, o.s.frv.).

1. tafla. Fræðilegir útreikningar fyrir gerjun á einu móli kolvetna (glúkósaígildi) (Beever, 1993).

Fóður	**Edikssýra**	**Própíonsýra**	**Smjörsýra**	**CH_4**	**ATP**	**VFA alls**
Hátt hlutfall trénis (gróffóður)	1.34	0.45	0.11	0.61	4.62	1.90
Hátt hlutfall sterkju (korn)	0.90	0.70	0.20	0.38	4.38	1.80
Hátt hlutfall sykurs (melassi)	0.94	0.40	0.33	0.54	4.50	1.67

Síðustu þrjá áratugi hefur á alþjóðavísu miklum fjármunum verið beint í rannsóknir sem hafa það að markmiði að finna leiðir til að draga úr metanlosun frá jórturdýrum. Áhrif fóðrunar og sérstakra íblöndunarefna í fóður hafa verið mikið skoðuð. Einnig möguleikar á kynbótum búfjár í þá átt að draga úr metanlosun. Rannsóknir á örveruflóru vambarinnar og áhrifum af samsetningu hennar á metanframleiðslu eru mjög ofarlega á baugi. Hvernig er hægt að hafa áhrif á örveruflóruna með kynbótum búfjár annars vegar og með fóðrun hins vegar? Hér á eftir verður farið yfir eitthvað af því helsta sem rannsóknir síðustu áratuga hafa leitt í ljós í þessum efnum.

Áhrif fóðurs á metanlosun

Eins og fram kemur hér á undan hefur lengi verið vitað að hráefnin í fóðrinu hafa töluverð áhrif á gerjunarmunstur í vömbinni. Nánar tiltekið hafa fóðurhráefnin áhrif á samsetningu örveruflórunnar sem aftur hefur áhrif á gerjunarmynstrið í vömbinni, það er hversu mikið myndast af mismunandi VFA og metani. Mikið af hæggerjanlegum kolvetnum, einkum tréni, í fóðrinu hefur í för með sér að mikið er framleitt af edikssýru og metani. Aukin sterkja í fóðri ýtir undir própíonsýrumyndun en dregur úr metanlosun (Tafla 1). Tréni í fóðri er jórturdýrunum hins vegar nauðsynlegt til að viðhalda eðlilegri starfsemi vambarinnar.

Trénisríkt gróffóður er oftast ódýrara en sterkjuríkt kjarnfóður, einkum ef kjarnfóðrið er innflutt um langan veg eins og meiri hluti þess sem notað er hérlendis. Fóðrun búfjár er málamiðlun margra atriða. Heilsufar gripsins þarf alltaf að vera í forgrunni, bæði af siðfræðilegum og hagfræðilegum ástæðum. Ef gripurinn á að framleiða mikið, eins og kýr á fyrri hluta mjaltaskeiðs gera, er réttlætanlegt bæði m.t.t. hagfræði- og velferðarþátta að fara með kjarnfóðurhlutfallið nokkuð hátt en á geldstöðu hníga öll rök að því að fóðra fyrst og fremst á gróffóðri.

Á dæmigerðu mjólkurkúafóðri enda á bilinu 5-7% af heildarorku fóðursins sem metan. Sauvant & Giger-Reverdin (2009) tóku saman hundruðir alþjóðlegra rannsókna og sýndi

greining þeirra boglínusamband hlutfalls metans af heildarorku fóðurs við kjarnfóðurhlutfall. Eftir því sem kjarnfóðurhlutfall hækkar á bilinu frá 35% til 60% af heildarfóðri lækkar metan sem hlutfall af heildarorku, en við hækkun kjarnfóðurhlutfalls yfir 60% eru þessi áhrif lítil og nokkuð misvísandi.

Áhrif framleiðslukerfa, kynbóta og framleiðni á metanlosun

Huhtanen o.fl. (2022) notuðu Karólínu, norrænt hermilíkan af mjólkurkú (Danfær o.fl., 2006; Sveinbjörnsson o.fl., 2006 a; Huhtanen o.fl., 2015) til að meta þróun í metanlosun mjólkurkúa í Finnlandi fyrir tímabilið 1960-2020. Fjöldi kúa í lok tímabilsins er aðeins 22,5% af því sem var í upphafi en hver kýr framleiðir þrefalt meiri mjólk á ári. Heildarmjólkurframleiðslan árið 2020 er tæpum þriðjungi minni en í upphafi en metanframleiðslan er í heildina 56% minni. Metanframleiðsla á hvern lítra mjólkur var 36% minni árið 2020 heldur en 1960. Þetta er sú tala sem raunverulega skiptir mestu máli, að því gefnu að tilgangurinn með því að halda mjólkurkýr sé að framleiða mjólk, og að metanframleiðsla sem fylgir mjólkurframleiðslunni sé eitt af þeim atriðum sem beri að horfa á þegar lagt er mat á hagkvæmni og umhverfisáhrif framleiðslunnar. Í þessari finnsku rannsókn var tekið tillit til endurnýjunarhraða kúastofnsins á hverjum tíma, metan framleitt af kvígum í uppeldi er hluti af myndinni. Einnig var tekið tillit til breytinga á meðalþyngd kúnna og meðalsamsetningar á fóðri (prótein- og trénisinnihald).

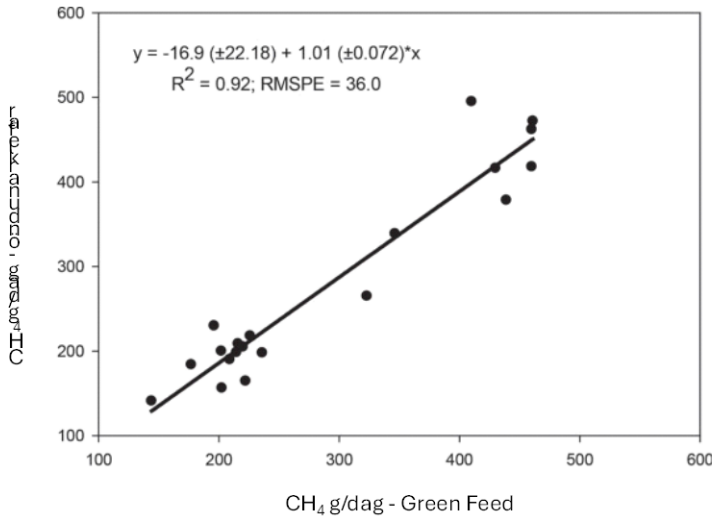
Niðurstöður rannsóknar Huhtanen o.fl. (2022) eru ágætt dæmi til að skýra hvert þær áherslur sem hafa verið ríkjandi á undanförnum áratugum í mjólkurframleiðslu hafa leitt varðandi metanlosun frá mjólkurkúm. Þessar áherslur eru líkar á Íslandi og í Finnlandi, bæði kynbætur og áherslur í fóðrun hafa miðað að því að framleiða meiri mjólk eftir hvern grip. Meðalnyt á hverja mjólkurkú var á Íslandi um tvöfalt meiri árið 2020 en 1960, hjá búum í sameiginlegu skýrsluhaldi, sjá: https://rml.is/is/forrit-og-skyrsluhald/nautgriparaekt/huppais-ymis-tolfraedi/afurdathroun-i-mjolk. Breytingin væri eflaust meiri ef notuð væru gögn fyrir allar kýr í landinu, en þau eru ekki til staðar svo langt aftur í tímann á vef Hagstofu Íslands. Þó hefur ekki orðið þreföldun á afurðum eftir grip frá 1960-2020 hér líkt og í Finnlandi. Það má væntanlega bæði rekja til minni fjölbreytni í heimaframleiddu fóðri hérlendis, og þess að við höldum okkur enn við hið fornnorræna íslenska kúakyn, á meðan Finnar ná hraðari erfðaframförum með kynbótasamstarfi við önnur lönd, með víðari erfðahóp.

Hvað sem hraða þróunarinnar líður þá er hún í sömu átt á Íslandi eins og í Finnlandi og flestum ríkjum hins vestræna heims. Lögð hefur verið megin áhersla á vaxandi fóðurnýtingu, það er að framleiða vaxandi magn mjólkur fyrir hverja einingu næringarefna og fóðurorku. Í grein sinni sýna Huhtanen o.fl. (2022) mjög vel hvernig það hefur leitt til minnkandi metanframleiðslu á hvert kg framleiddrar mjólkur. Jafnvel eru færð rök fyrir því að árangurinn hefði ekki orðið meiri þó áherslan hefði beinlínis (og einhliða) verið á að draga úr metanframleiðslu á hvert kg mjólkur. Bent er á að stærstu tækifærin til að draga úr metanlosun frá landbúnaði sé að styðja við breytingar í landbúnaði í þróunarríkjum, þar sem meirihluta jórturdýra heimsins er að finna, þannig að framleiðni per grip aukist og metanlosun á hvern lítra mjólkur aukist líkt og gerst hefur í okkar heimshluta.

Áhrif kjarnfóðurhlutfalls og annarra atriða er varða fóðursamsetningu á losun gróðurhúsalofttegunda ætti að meta í mun stærra samhengi. Þó að grasfóðrun sé almennt meira metanmyndandi en kornfóðrun, geta heildar gróðurhúsaáhrif korns í sumum framleiðslukerfum verið meiri en grass, talið í CO_2-ígildum, einkum ef tekið er tilliti til kolefnisjöfnuðar jarðvegs (Gislon o.fl., 2020). Það má setja spurningarmerki við það auka notkun á korni í jórturdýrafóður, þar sem korn má nota beint til manneldis, eða á skilvirkari hátt til framleiðslu dýraafurða hjá einmaga dýrum.

Mælingar á metanlosun- GreenFeed eða öndunarklefar?

GreenFeed er sjálfvirk mælistöð sem notuð er til að mæla metan(CH_4) og koltvísýring(CO_2) sem kýr, sauðfé og önnur jórturdýr anda frá sér. GreenFeed búnaðurinn samanstendur af fóðurtrogi, staðsetningarskynjurum, kjarnfóðurskammtara, loftdælubúnaði og gasmælum. Kjarnfóður er notað til að lokka gripi í fóðurtrogið og á meðan þeir éta fóðrið er loft frá fóðurtroginu dregið að gasmælunum. Á þann hátt er hægt að mæla metan og koltvísýring frá andardrætti kúnna. Tækið skynjar staðsetningu gripsins í troginu sem eykur nákvæmni mælinganna. Hver mæling tekur stuttan tíma (3-7 mín) en þær eru framkvæmdar nokkrum sinnum á dag yfir nokkurra vikna tímabil. Tækið er færanlegt og hægt að nota það við ýmsar aðstæður (Hristov o.fl., 2015). Þar sem gripir koma sjálfviljugir í básinn og mælingar fara fram á sjálfvirkan hátt, er auðvelt að framkvæma endurteknar mælingar á fjölda gripa og fá þannig nákvæmar niðurstöður um metanlosun (Jonker o.fl., 2016). Bestar niðurstöður nást með því að framkvæma sem flestar mælingar á sama grip og er mælt með að mælingar fari fram í a.m.k. 17 daga til að ná góðum niðurstöðum (Arbre o.fl., 2016).



4. mynd. Losun CH_4 frá iðragerjun – samanburður mælinga með Green Feed og öndunarklefum (Hristov o.fl., 2018)

Hinn „gullni staðall“ í mælingum á metanlosun frá iðragerjun eru s.k. öndunarklefar (respiration chambers=RC). Aðferðin byggir á að tilraunadýrinu er komið fyrir í klefa með stýrðu gegnumrennsli andrúmslofts. Mæling á styrkmismuninum milli úttaks og inntaks ásamt rennslishraða gefur heildarmagn metans sem losað er (Gardiner o.fl., 2015). Aðrar aðferðir eins og GreenFeed metanmælingabásinn eru bornar saman við RC, til að meta gildi þeirra. Vandinn er þó sá að beinn samanburður RC og GreenFeed (GF) er tæknilega erfiður. Þegar báðar aðferðir hafa verið notaðar í sömu tilraun ber þeim þó mjög vel saman eins og meðfylgjandi mynd sýnir; mælingar gerðar með RC eru á y-ás en mælingar með GF á x-ás (Hristov o.fl., 2018).

Til að geta borið RC og GF niðurstöður saman út frá stærra og fjölbreyttara gagnasafni var valin sú leið í nýlegri rannsókn (Huhtanen o.fl., 2019) að bera GF mælingar saman við niðurstöður fengnar með líkingum sem þróaðar voru út frá RC mælingum. Gagnasafnið byggðist á 83 fóðurmeðferðum í 30 tilraunum sem framkvæmdar voru í Ástralíu, Belgíu, Frakklandi, Nýja-Sjálandi, Svíþjóð, UK og USA; við mjög mismunandi aðstæður og með ólíka gripi. Metanlosun mæld með GreenFeed (GF) var borin saman við spágildi fengin með 18 misflóknum líkingum sem allar voru þróaðar út frá metanmælingum gerðum í öndunarklefa (RC). Í stuttu máli sagt var útkoman sú að þessum aðferðum bar mjög vel saman, sem rennir stoðum undir notkun GreenFeed búnaðarins í þessum tilgangi.

Reiknilíkön af losun gróðurhúsalofttegunda (GHG) frá jórturdýrum

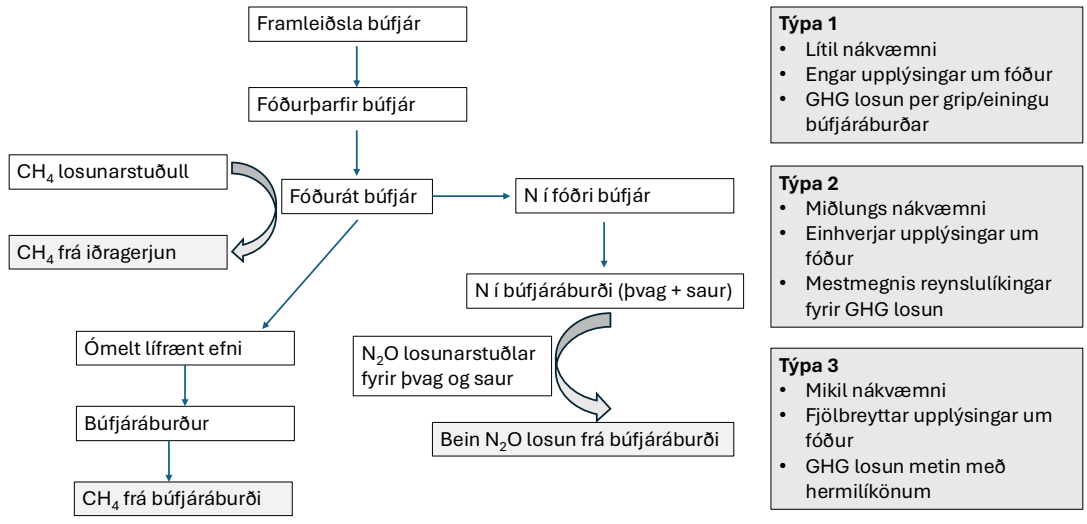
Mati á losun GHG frá jórturdýrum má skipta í þrjú skref (Vibart o.fl., 2021):

1. Að meta daglegt fóðurát (í kg þurrefnis), byggt á metnum fóðurþörfum og meðal orkustyrk fóðursins, fyrir hvern flokk búfjár.
2. Að meta það hlutfall fóðurorkuinntöku sem verður að CH_4, gjarnan táknað Y_m eða MCF (metan conversion factor).
3. Að reikna myndun gróðurhúsalofttegunda (CH_4 og N_2O) frá búfjáráburði.

Meðfylgjandi mynd, íslenskuð úr grein (Vibart o.fl., 2021) dregur þetta ferli útreikninga ágætlega saman og flokkar þær aðferðir sem notaðar eru í þrjár megin týpur 1, 2 og 3. Týpa 1 eru mjög einföld líkön, nota fasta losunarstuðla fyrir CH_4 frá hverjum flokki búfjár og fyrir N_2O á hverja einingu búfjáráburðar. Þau samsvara Tier 1 í loftslagsbókhaldi þjóða skv. IPCC (2006). Týpa 2 eru nokkru ítarlegri líkön, nota mismunandi Y_m stuðla eftir flokkum jórturdýra, þar sem orka losuð á formi metans er á bilinu 5-7% af heildarorku fóðursins. Líkön af týpu 2 innifela öll skrefin þrjú hér að ofan, en taka þó mismikið tillit til áhrifa af efnaeiginleikum fóðursins á Ym innan hvers flokks búfjár. Þess vegna flokka Vibart o.fl. (2021) þau í týpur 2a, 2b og 2c.

Reikniaðferðin fyrir metanlosun frá iðragerjun sem notuð er hérlendis (Jón Guðmundsson, 2016) mundi flokkast sem týpa 2a og samsvarar jafnframt Tier 2 skv. IPCC (2006), þar sem hún hefur mismunandi Ym fyrir ólíka flokka búfjár en tekur ekkert beint tillit til efnaeiginleika fóðursins. Týpa 2b notar spálíkingar fyrir metanmyndun sem byggja á grunnþáttum eins og fóðrunarstigi, meltanleika og kjarnfóðurhlutfalli. Týpa 2c innifelur spálíkingar sem taka nánara tillit til einstakra efna í fóðri, eins og fitu, sterkju, trénis o.s.frv. Dæmi um líkan sem

mundi flokkast sem týpa 2c er það sem Norfor-fóðurmatskerfið fyrir mjólkurkýr notar (Nielsen o.fl., 2013), en það reiknar metanmyndun út frá heildaráti, fitu- og trénishlutfalli í fóðri. Týpa 3 eru líkön sem leitast við að herma undirliggjandi ferla, taka tillit til þess orsakasamhengis sem er milli efnaeiginleika fóðurs, framleiðslueiginleika dýrsins, fóðuráts, meltingar, afurðamyndunar og myndunar gróðurhúsalofttegunda. Þróun líkana af þessu tagi á sér rætur í þörfinni fyrir að bæta fóðurnýtingu og framleiðni gripa og búa, en vegna þess



5. mynd. Reiknilíkön fyrir losun gróðurhúsalofttegunda frá búfjárrækt – eiginleikar og flokkun eftir nákvæmni (Vibart o.fl., 2021)

hve flókin þau eru í notkun enn sem komið er hafa þau ekki náð útbreiðslu í almennri fóðuráætlanagerð. Fóðurmatskerfi eins og Norfor (Volden, 2011) sem tekið var upp sameiginlega á fjórum Norðurlöndum (Noregi, Svíþjóð, Íslandi og Danmörku); sem er eins og áður sagði býsna þróuð útgáfa af týpu 2 líkani, hefur náð inn vissum hlutum af þeirri þekkingu sem flóknari hermilíkön (týpa 3) fela í sér. Það mikilvægasta í því sambandi er að Norfor spáir fyrir um fóðurát, út frá upplýsingum um gripi og fóður. Eins og ráða má af skemanu á 5. mynd eru góðar spár um fóðurát alltaf gríðarlega mikilvægur þáttur, ekki bara í fóðuráætlanagerð, heldur einnig í útreikningum á losun GHG frá búfjárframleiðslu, bæði frá iðragerjun og búfjáráburði. Þetta á við sama hversu flókið líkanið sem notað er til að meta GHG er að öðru leyti. Því væri það stórt skref í betra mati á GHG frá búfjárframleiðslu að nýta fyrirliggjandi kerfi á borð við Norfor til að meta fóðurát sem réttast og sömuleiðis að meta áhrif fóðureiginleika á metanmyndun að því marki sem Norfor ræður við.

Á síðari árum hefur einn megin drifkrafturinn í þróun flóknari hermilíkana af Týpu 3 verið sú viðleitni að reyna að spá með nákvæmari hætti fyrir um metanlosun út frá upplýsingum um fóður og gripi. Alemu o.fl. (2011) gerðu samanburð á fjórum þekktum líkönum af því tagi (Murphy o.fl., 1982; Bannink o.fl., 2006; Sveinbjörnsson o.fl., 2006 a; Nozière o.fl., 2010) með tilliti til nákvæmni þeirra í að meta gerjunarafurðir (edikssýra, própíonsýra, smjörsýra og metan) í réttum hlutföllum miðað við in vivo mælingar. Líkan Bannink o.fl. (2006) mat metanlosun réttast af þessum fjórum líkönum (r^2=0.71; RMSPE 9.8%).

Mælingar á metanlosun, prófun á spálíkönum, uppfærsla reikniaðferða fyrir Loftslagsbókhald Íslands

Gerð er grein fyrir þessum hluta verkefnisins í ritrýndri grein á ensku í ritinu Icelandic Agricultural and Environmental Sciences (Kristjánsson o.fl., 2025). Það sem hér fer á eftir er stuttur útdráttur úr aðferðafræði og niðurstöðum sem birtast með mun ítarlegri hætti í greininni. Markmið rannsóknarinnar var að uppfæra reikniaðferðir Loftslagsbókhalds Íslands fyrir metanlosun (CH_4) frá mjólkandi íslenskum kúm. Rannsóknin skiptist í fjóra áfanga, og hér fylgir stutt yfirlit um hvern þeirra:

Áfangi 1: Gögnum var safnað á þremur kúabúum um metanlosun frá iðragerjun íslenskra mjólkurkúa. Á hverju búanna voru 50 til 70 mjólkurkýr. Gróffóður eða heilfóður var gefið eftir átlyst á fóðurgang og kjarnfóður gefið í mjaltaþjónum og kjarnfóðurbásum á einstaklingsgrunni út frá reiknuðum fóðurþörfum. Green-Feed tækinu var komið fyrir í því fjósi sem mælingar fóru fram í hverju sinni og það notað til mælinga á metanlosun samkvæmt leiðbeiningum framleiðanda (Zimmermann o.fl., 2012). Ekki var aðstaða til að mæla át á einstaklingsgrunni en það var áætlað með spálíkingum Norfor-fóðurmatskerfisins. Mælingarnar fóru fram á búi 1 (skólabúinu á Hvanneyri) í september til október 2022, á búi 2 í febrúar til mars 2023 og á búi 3 í apríl til maí 2023. Kýrnar sem nýttust í rannsóknina voru á bilinu 36-39 á hverju búanna þriggja, en gerðar voru ákveðnar kröfur um fjölda heimsókna í GreenFeed básinn, þær þurftu að vera ≥10 á tveggja vikna tímabili. Mælingar gengu vel, helstu niðurstöður þeirra og upplýsingar um breiddina í gögnunum eru í 2. töflu.

2. tafla. Fjöldi kúa með gildar mælingar, meðaltöl mælinga (staðalfrávik, lægstu-hæstu gildi í svigum) fyrir tímalengd (daga) frá burði, fóðurát, dagsnyt og metanlosun á þriggja vikna mælingatímabili.

	Bú 1	Bú 2	Bú 3
Fjöldi gripa	39	36	36
Fjöldi heimsókna í GreenFeed á grip	68.3 (29.0;15-137)	61.1 (23.5;14-112)	58.9 (19.5;18-105)
Dagar frá burði	189 (113.4;10-402)	161 (71.4;29-349)	201 (102.8;47-540)
Dagsnyt, kg á grip	19.1 (8.3; 2.6-36.0)	22.3 (7.9;12.1-39.4)	25.3 (7.4;12.9-42.0)
Gróffóður/heilfóður, reiknað át kg þe á dag	9.6 (1.0;7.8-12.1)	11.8 (1.2;9.7-14.2)	10.0 (1.1;8.0-12.1)
Kjarnfóður, kg þe á grip á dag	5.2 (3.2;1.2-12.4)	4.8 (2.7;1.0-10.7)	6.1 (2.2;1.9-9.8)
CH_4 losun, g á grip á dag	332 (42.6; 227-447)	371 (47.1; 274-471)	354 (45.7; 249-451)
Y_m,% heildarorku (GEI) sem verður að CH_4	6.9 (1.0;4.6-9.3)	6.9 (1.3;4.7-9.7)	6.6 (1.2;4.8-9.6)

Áfangi 2: Gögn úr áfanga 1 notuð til að meta getu nokkurra líkinga til að spá fyrir um metanlosun íslenskra mjólkurkúa.

Líkingarnar sem voru prófaðar eru þróaðar út frá nákvæmum upplýsingum úr skipulögðum tilraunum, um fóðurát, efnasamsetningu fóðurs og metanlosun, sem ekki eru að jafnaði aðgengilegar á landsvísu. Önnur þeirra líkinga sem kom best út í þessum prófunum er sú sem Norfor-fóðurmatskerfið notar. Í ljósi þess þróuðust svo seinni áfangar verkefnisins. Niðurstöðurnar úr áföngum 1 og 2 sýna að Norfor-fóðurmatskerfið, með líkingu Nielsen et al. (2013) fyrir metanlosun, átspálíkingum Norfor og upplýsingum um innihald fóðursins af

tréni (NDF) og fitusýrum spáir fyrir um raunlosun metans frá einstökum gripum með nákvæmni sem telst vel ásættanleg á alþjóðlega mælikvarða. Því var ákveðið að byggja frekari þróun reikniaðferða fyrir metanlosun mjólkurkúa í Loftslagsbókhaldi Íslands á Norfor-fóðurmatskerfinu. Þó að þær breytur sem Norfor-kerfið notar til að spá fyrir um metanlosun geti verið aðgengilegar á einstökum búum eru þær það almennt ekki á landsvísu. Reikniaðferðir í Loftslagsbókhaldi þurfa að miðast við breytur sem auðvelt er að nálgast árlega á landsvísu.

Áfangi 3: Að mynda með Norfor-fóðurmatskerfinu gagnagrunn með fóðuráætlunum sem spanna vítt svið framleiðslustigs og fóðursamsetninga.

Í þessum áfanga var Norfor-fóðurmatskerfið notað til að herma alls 64 mismunandi samsetningar fóðurs fyrir íslenskar mjólkurkýr á ársgrundvelli. Þessar fóðursamsetningar spanna vítt svið í gróffóðurgæðum, kjarnfóðurnotkun, fituinnihaldi í fóðri og meðalnyt. Tekið er mið af meðaltölum skýrsluhalds um samsetningu kúahjarða með tilliti til aldurs (mjaltaskeiða). Gert var ráð fyrir uppbyggingu og niðurbroti holda í gegnum mjaltaskeiðið samkvæmt staðlaðri kúrfu í Norfor; einnig var mjaltakúrfan með stöðluðu lagi Norfor. Töflur 6 og 7 í IAS-greininni (Kristjánsson o.fl., 2025) gera ítarlega grein fyrir þessum fóðursamsetningum og áhrifum þeirra á metanlosun.

Áfangi 4: Þróun á vinnulíkani til að meta iðragerjun mjólkurkúa fyrir Loftslagsbókhald Íslands.

Tölfræðileg greining á gagnagrunninum sem myndaður var í áfanga 3 var gerð með það að markmiði að finna sem hentugast vinnulíkan til að meta iðragerjun mjólkurkúa fyrir Loftslagsbókhald Íslands. Á grundvelli niðurstaðna er mælt með að vinnulíkanið hafi eftirfarandi skýribreytur: árleg meðalnyt af orkuleiðréttri mjólk, kjarnfóðurmagn á kú á ári og hlutfall fitusýra í kjarnfóðri.

Til þess að reikna EF og GEI mælum við með því að nota eftirfarandi jöfnur:

$$EF = 89.8 + 0.00129 \times ECM + 0.0118 \times kjarnfóður - 0.181 \times FAc$$

$$GEI = 134.4 + 0.0087 \times ECM + 0.0268 \times kjarnfóður + 0.344 \times FAc$$

Þar sem:

EF = Metanmyndun frá iðragerjun, kg CH_4 á kú á ári

GEI = Heildarorkuinntaka, MJ á kú á dag (meðaltal yfir árið)

ECM = Meðalnyt íslenskra mjólkurkúa, mæld í kg orkuleiðréttrar mjólkur (ECM) á kú á ári

Kjarnfóður = Kjarnfóðurnotkun, kg þurrefnis á kú á ári

FAc = fitusýruinnihald í kjarnfóðri, g í kg þurrefnis af kjarnfóðri

Þegar EF og GEI er þekkt má reikna Y_m þannig:

$$Y_m\ (\%) = \frac{EF \times 55.65}{GEI \times 365} \times 100$$

Árleg meðalnyt per grip af orkuleiðréttri mjólk er birt árlega á vef RML. Íslenska skammstöfunin OLM (orkuleiðrétt mjólk) samsvarar ensku skammstöfuninni ECM (energy corrected milk). Á vef RML eru einnig birtar niðurstöður heyefnagreininga, sem má nota til að meta árlega líklegt meðaltal meltanleika lífræns efnis í gróffóðri. Í IAS-greininni (Kristjánsson et al., 2025) er svo birt líking (Equation 1) sem má nota til að reikna árlegt kjarnfóðurmagn á kú út frá meðalnytinni og meltanleika gróffóðursins, þannig:

$$Kjarnfóður = 4006.9 + 0.558 \times ECM - 75.53 \times \mathrm{OMDf}$$

Þar sem:

Kjarnfóður = Kjarnfóðurnotkun, kg þurrefnis á kú á ári

OMD_f = Meltanleiki lífræns efnis í gróffóðri (%)

Þriðju breytuna, sem ásamt ársnytinni og kjarnfóðurhlutfallinu er notuð í útreikninga á metanlosun, það er fitusýruinnihald í kjarnfóðri, þarf að nálgast út frá áætluðum tölum um innflutning á kjarnfóðurblöndum og um efnainnihald þeirra. Eins og nánari grein er gerð fyrir í IAS-greininni, (Kristjánsson et al., 2025, bls. 67), var áætlað út frá bestu fyrirliggjandi gögnum að meðal fitusýruinnihald í kjarnfóðri fyrir íslenskar mjólkurkýr árið 2025 væri 41,5 g í kg þurrefnis af kjarnfóðri. Æskilegt væri að til staðar væri opinber gagnagrunnur með þessum upplýsingum, en þangað til verður að uppfæra viðmið við slíka útreikninga í samvinnu við fóðursala eins og gert var í þessu verkefni.

Afleiðingar af breyttum reikniaðferðum

Framangreind tillaga um uppfærslu á aðferðum til að meta metanlosun frá iðragerjun mjólkurkúa á Íslandi ætti að vera framför frá núverandi aðferðum, sérstaklega við að greina áhrif fóðursamsetningar og nythæðar á metanlosun. Loftslagsbókhaldið ætti að verða réttara að þessu leyti. Uppfærðar aðferðir mundu líka senda mun skýrari skilaboð um áhrif lykilbreyta á metanlosun á hvert kg orkuleiðréttrar mjólkur. Það ætti að vera auðveldara fyrir íslenska kúabændur að bregðast við til að draga úr metanlosun á hvern lítra mjólkur ef skilaboðin frá loftslagsbókhaldinu eru skýr um áhrif gróffóðurgæða, kjarnfóðurmagns og annarra lykilþátta í fóðrun og bústjórn. Þessu eru öllu gerð miklu betri skil í þeim aðferðum sem hér eru lagðar til heldur en í núverandi aðferðum. Næmnisgreiningar í 3. töflu sýna að fyrir 5% hækkun á meltanleika gróffóðurs (OMD_f) má búast við 4% lækkun á metanlosun á hvert kg orkuleiðréttrar mjólkur. Svipaðri lækkun á metanlosun mætti ná með því að hækka árlega nyt um 500 kg orkuleiðréttrar mjólkur í gegnum aukningu kjarnfóðurmagns sem næmi um 280 kg þurrefnis á hvern grip, ef meltanleiki gróffóðurs væri óbreyttur. Kjarnfóðurverð á Íslandi er hátt enda hráefnin að mestu innflutt. Aðstæður til að framleiða gott gróffóður úr grasi eru hins vegar góðar.

Sú aðferðafræði sem hér er mælt með til notkunar í loftslagsbókhaldi er því hvetjandi til að forgangsraða gagnvart auknum gróffóðurgæðum á kúabúum frekar en að setja ofuráherslu á að auka kjarnfóðurgjöf til að auka nyt og draga úr metanlosun á hvert kg orkuleiðréttrar mjólkur. Meira af fitusýrum í kjarnfóðri ætti líka samkvæmt tillögum okkar að breyttum aðferðum að minnka metanlosun á hvern lítra orkuleiðréttrar mjólkur. Þar verður þó að hafa í huga að sumar uppsprettur fitusýra geta haft hátt kolefnisspor vegna annarra ástæðna en þeirra sem snúa að metanlosun (Olijhoek o.fl., 2025).

3. tafla. Næmisgreiningar fyrir reikniaðferðirnar sem mælt er með fyrir EF (losun kg CH_4 á hvern grip á ári) og GEI (heildarorku á grip á dag) gagnvart breytingum á nyt orkuleiðréttrar mjólkur (ECM kýr^{-1} ár^{-1}) og meltanleika lífræns efnis í gróffóðri (OMDf %)

ECM kýr^{-1} ár^{-1}	OMDf %	kg þ.e. kjarnf. kýr^{-1} ár^{-1}	kg þ.e. kjarnf. kg ECM^{-1}	EF kg CH_4 kyr^{-1} ár^{-1}	GEI MJ kýr^{-1} dag^{-1}	Y_m %	kg CH_4 kg ECM^{-1}	Sviðsmynd no.
5750	65.0	2306	0.40	117.2	260.0	6.9	0.0204	1
	70.0	1928	0.34	112.7	249.9	6.9	0.0196	2
	75.0	1551	0.27	108.3	239.8	6.9	0.0188	3
	80.0	1173	0.20	103.8	229.6	6.9	0.0181	4
6000	65.0	2445	0.41	119.2	265.9	6.8	0.0199	5
	70.0	2068	0.34	114.7	255.8	6.8	0.0191	6
	75.0	1690	0.28	110.3	245.7	6.8	0.0184	7
	80.0	1313	0.22	105.8	235.6	6.8	0.0176	8
6250	65.0	2585	0.41	121.1	271.8	6.8	0.0194	9
	70.0	2207	0.35	116.7	261.7	6.8	0.0187	10
	75.0	1830	0.29	112.2	251.6	6.8	0.0180	11
	80.0	1452	0.23	107.8	241.5	6.8	0.0172	12
6500	65.0	2724	0.42	123.1	277.7	6.8	0.0189	13
	70.0	2347	0.36	118.6	267.6	6.8	0.0183	14
	75.0	1969	0.30	114.2	257.5	6.8	0.0176	15
	80.0	1592	0.24	109.7	247.4	6.8	0.0169	16
6750	65.0	2864	0.42	125.1	283.7	6.7	0.0185	17
	70.0	2486	0.37	120.6	273.5	6.7	0.0179	18
	75.0	2109	0.31	116.2	263.4	6.7	0.0172	19
	80.0	1731	0.26	111.7	253.3	6.7	0.0165	20
7000	65.0	3003	0.43	127.0	289.6	6.7	0.0181	21
	70.0	2626	0.38	122.6	279.4	6.7	0.0175	22
	75.0	2248	0.32	118.1	269.3	6.7	0.0169	23
	80.0	1871	0.27	113.7	259.2	6.7	0.0162	24
7250	65.0	3143	0.43	129.0	295.5	6.7	0.0178	25
	70.0	2765	0.38	124.5	285.4	6.7	0.0172	26
	75.0	2388	0.33	120.1	275.2	6.7	0.0166	27
	80.0	2010	0.28	115.6	265.1	6.6	0.0159	28
7500	65.0	3282	0.44	131.0	301.4	6.6	0.0175	29
	70.0	2905	0.39	126.5	291.3	6.6	0.0169	30
	75.0	2527	0.34	122.1	281.2	6.6	0.0163	31
	80.0	2150	0.29	117.6	271.0	6.6	0.0157	32
7750	65.0	3422	0.44	132.9	307.3	6.6	0.0172	33
	70.0	3044	0.39	128.5	297.2	6.6	0.0166	34
	75.0	2667	0.34	124.0	287.1	6.6	0.0160	35
	80.0	2289	0.30	119.6	276.9	6.6	0.0154	36

Þakkir

Verkefnið var styrkt af matvælaráðuneytinu- nú atvinnuvegaráðuneyti- og umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytinu. Verkefnið var einnig styrkt af þróunarfé nautgriparæktar. LbhÍ þakkar þennan stuðning. Vegna þátttöku í verkefninu og fyrir afbragðs gott samstarf eru einnig færðar þakkir bændunum á Litla-Ármóti þeim Hrafnhildi Baldursdóttur og Ragnari Finni Sigurðssyni og bændunum á Stóra-Ármóti þeim Höskuldi Gunnarssyni og Hildu Pálmadóttur. Egill Gunnarsson þáverandi bústjóri Hvanneyrarbúsins og Björn Ingi Ólafsson fjósameistari fá sömuleiðis þakkir fyrir hjálp við framkvæmd verkefnisins, margvíslega aðstoð og andlegan stuðning. Jóhanna Gísladóttir og Þóroddur Sveinsson starfsmenn LbhÍ fá einnig þakkir fyrir hjálp við að koma verkefninu á laggirnar.

Heimildaskrá

Alemu A. W., Dijkstra J., Bannink A., France J. & E. Kebreab, 2011. Rumen stoichiometric models and their contribution and challenges in predicting enteric methane production. Anim. Feed Sci.Technol. 166-67:761-778. Doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.054

Arbre M., Rochette Y., Guyader J., Lascoux C., Gómez L. M., Eugène M., Morgavi D. P., Renand G., Doreau M. & Martin C., 2016. Repeatability of enteric methane determinations from cattle using either the SF tracer technique or the GreenFeed system. Animal Production Science 56(2-3):238-243. Doi: 10.1071/An15512

Bannink A., Kogut J., Dijkstra J., France J., Kebreab E., Van Vuuren A. M. & Tamminga S., 2006. Estimation of the stoichiometry of volatile fatty acid production in the rumen of lactating cows. J.theor.Biol. 238(1):36-51. Doi: 10.1016/j.jtbi.2005.05.026

Beever D. E., 1993. Rumen Function. Pages 187-215 (Ch.9) in: Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism. J. M. Forbes and J. France, ed. CAB International, New York.

Danfær, A., Huhtanen P., Uden P., Sveinbjörnsson J. & Volden H., 2006. The Nordic Dairy Cow Model, Karoline - Description. Ch. 32 (pp. 383-406) in: Nutrient digestion and utilisation in farm animals: modelling approaches. Edited by E. Kebreab, J. Dijkstra, A. Bannink, W. J. J. Gerrits & J. France. CAB International, Wallingford, UK,. http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-5948973155&partnerID=MN8TOARS

Gardiner T. D., Coleman M. D., Innocenti F., Tompkins J., Connor A., Garnsworthy P. C., Moorby J. M., Reynolds C. K., Waterhouse A. & Wills, D., 2015. Determination of the absolute accuracy of UK chamber facilities used in measuring methane emissions from livestock. Measurement 66:272-279. Doi: 10.1016/j.measurement.2015.02.029

Gislon G., Ferrero F., Bava L., Borreani G., Dal Prà A., Pacchioli M. T., Sandrucci A., Zucali M. & Tabacco E., 2020. Forage systems and sustainability of milk production: Feed efficiency, environmental impacts and soil carbon stocks. J Clean Prod 260. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121012

Hristov A. N., Kebreab E., Niu M., Oh J., Bannink A., Bayat A. R., Boland T. M., Brito A. F., Casper D. P., Crompton L. A., Dijkstra J., Eugène M., Garnsworthy P. C., Haque N., Hellwing A. L. F., Huhtanen P., Kreuzer M., Kuhla B., Lund P., Madsen J., Martin C., Moate P. J., Muetzel S., Muñoz C., Peiren N., Powell J. M., Reynolds C. K., Schwarm A., Shingfield K. J., Storlien T. M., Weisbjerg M. R., Yáñez-Ruiz D. R. & Yu Z., 2018. : Uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models. J.Dairy Sci. 101(7):6655-6674. Doi: 10.3168/jds.2017-13536

Hristov A. N., Oh J., Giallongo F., Frederick T., Weeks H., Zimmerman P. R., Harper M. T., Hristova R. A., Zimmerman R. S. & Branco A. F., 2015. The Use of an Automated

System (GreenFeed) to Monitor Enteric Methane and Carbon Dioxide Emissions from Ruminant Animals. Jove-J Vis Exp (103). Doi: 10.3791/52904

Huhtanen P., Astaptsev A. & Nousiainen J., 2022. Methane production inventory between 1960-2020 in the Finnish dairy sector and the future mitigation scenarios. Agr Food Sci 31(1):1-11. Doi: 10.23986/afsci.113752

Huhtanen P., Ramin M. & Hristov A. N., 2019. Enteric methane emission can be reliably measured by the GreenFeed monitoring unit. Livest Sci 222:31-40. Doi:10.1016/j.livsci.2019.01.017

Huhtanen P., Ramin M. & Udén P., 2015. Nordic dairy cow model Karoline in predicting methane emissions: 1. Model description and sensitivity analysis (vol 178, pg 71, 2015). Livest Sci 181:271-271. Doi: 10.1016/j.livsci.2015.10.013IPCC, 2006.

Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme (eds). H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K.Tanabe, Published: IGES, Japan. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html

Jonker A., Molano G., Antwi C. & Waghorn, G. C., 2016. Enteric methane and carbon dioxide emissions measured using respiration chambers, the sulfur hexafluoride tracer technique, and a GreenFeed head-chamber system from beef heifers fed alfalfa silage at three allowances and four feeding frequencies. J. Anim. Sci. 94(10):4326-4337. Doi: 10.2527/jas.2016-0646

Jón Guðmundsson, 2016. Greining á losun gróðurhúsalofttegunda frá íslenskum landbúnaði. Landbúnaðarháskóli Íslands: 71 bls. https://www.researchgate.net/publication/310794824_Greining_a_losun_grodurhusalofttegunda_fra_islenskum_landbunadi [accessed Jul 28 2024].

Kristjánsson J., Gísladóttir G. & Sveinbjörnsson, J., 2025. Measurements of methane emissions in Icelandic dairy herds, evaluation of methane prediction models and application of results to update calculation methods for the National Inventory in Iceland. Icelandic Agricultural and Environmental Sciences 38, 57-75, Doi:10.16886/IAS.2025.05

Murphy M. R., Baldwin R. L. & Koong L. J., 1982. Estimation of stoichiometric parameters for rumen fermentation of roughage and concentrate diets. J. Anim. Sci. 55:411-421.

Nielsen N. I., Volden H., Åkerlind M., Brask M., Hellwing A. L. F., Storlien T. & Bertilsson, J., 2013. A prediction equation for enteric methane emission from dairy cows for use in NorFor. Acta Agr Scand a-An 63(3):126-130. Doi: 10.1080/09064702.2013.851275

Nozière P., Ortigues-Marty I., Loncke C. & Sauvant D., 2010. Carbohydrate quantitative digestion and absorption in ruminants: from feed starch and fibre to nutrients available for tissues. Animal 4(7):1057-1074. Doi: 10.1017/S1751731110000844

Olijhoek D. W., Mogensen L., Lund P., Nielsen N. I., Weisbjerg M. R., Borsting C. F. & Kristensen T., 2025. Perspectives on the effectiveness of applicable nutritional

strategies to mitigate enteric methane over different intensive dairy production system characteristics. Livest Sci 294. Doi: 10.1016/j.livsci.2025.105666:

Sauvant D. & Giger-Reverdin S., 2009. Modelling of digestive interactions and methane production in ruminants. Productions Animales 22(5):375-384.

Sveinbjörnsson J., Huhtanen P. & Udén, P., 2006a. The Nordic dairy cow model Karoline – development of VFA sub-model. Ch. 1 (pp. 1-14) in: Nutrient digestion and utilisation in farm animals: modelling approaches. Edited by E. Kebreab, J. Dijkstra, A. Bannink, W. J. J. Gerrits & J. France. CAB International, Wallingford, UK,. http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-4349195384&partnerID=MN8TOARS

Sveinbjörnsson J., Murphy M. & Uden P., 2006 b. Effect of the level of dry matter and protein and degradation rate of starch on in vitro ruminal fermentation. Anim. Feed Sci.Technol. 130(3-4):191-203. Doi:10.1016/j.anifeedsci.2006.01.006

Sveinbjörnsson J., Murphy M. & Uden, P., 2006 c. Effect of the proportions of neutral detergent fibre and starch, and their degradation rates, on in vitro ruminal fermentation. Anim. Feed Sci.Technol. 130(3-4):172-190. Doi:10.1016/j.anifeedsci.2006.01.005

Vibart R., de Klein C., Jonker A., van der Weerden T., Bannink A., Bayat A. R., Crompton L., Durand A., Eugene M., Klumpp K., Kuhla B., Lanigan G., Lund P., Ramin M. & Salazar, F., 2021. Challenges and opportunities to capture dietary effects in on-farm greenhouse gas emissions models of ruminant systems. Sci Total Environ 769. Doi:10.1016/j.scitotenv.2021.144989

Volden, H. 2011. Norfor- The Nordic feed evaluation system. EAAP Publication No.130. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands.