



**Medegefinancierd door
de Europese Unie**

EIP SOMEBIO – Sojamijdend en methaanreducerend voeren op biologische melkveebedrijven

Mogelijkheden voor mitigatie van enterisch methaan voor de
biologische herkauwersector - literatuuroverzicht

Auteur: Jan Valckx

2024

Inhoud

Inleiding	4
Methaan is een sterk maar kortlevend broeikasgas.....	5
Maatstaven voor methaan	7
Algemene strategieën om enterisch methaan te reduceren	7
Verhogen van de dierlijke productiviteit	11
Selecteren van dieren met een lage methaanuitstoot.....	12
De krachtvoerpiste	12
Aandeel krachtvoer	12
Vetsuppletie.....	13
De ruwvoerpiste	15
Verteerbaarheid	16
Meerjarige vlinderbloemigen	16
Voedergewassen met een hoog zetmeelgehalte	17
Grassen met een hoog suikergehalte	18
Weide- en begrazingsbeheer.....	18
Bewaring en verwerking van ruwvoer.....	19
Ingrijpen in de pensfermentatie.....	20
Ionoforen	20
3-nitrooxypropanol (3-NOP).....	21
Zeewieren	22
Alternatieve elektronenacceptoren	24
Essentiële oliën	25
Tannines en saponinen	27
Direct gevoederde microbiële stoffen	28
Samenvatting van mitigatiestrategieën	29
Referenties.....	31

Inleiding

Vlaamse biomelkveehouders zijn al langer op zoek naar meer voederautonomie. Tegelijk kijkt de maatschappij met hoge verwachtingen naar de veehouderij, zeker de biologische: afbouwen van overzeese soja-import en reduceren van methaanuitstoot voor klimaatmitigatie (naast andere uitdagingen zoals stikstof, dierenwelzijn,...). Oplossingen die passen binnen een holistische systeemaanpak typisch voor de biologische landbouw zijn echter niet kant en klaar beschikbaar.

De operationele groep 'Somebio - Sojamijdend en methaanreducerend voeren op biologische melkveebedrijven' gaat samen met een groep geëngageerde biomelkveehouders op zoek naar methaanreducerende voederstrategieën, die tegelijk tegemoet komen aan het afbouwen van soja. Daarbij moet een welbepaalde aanpak uiteraard technisch, bedrijfseconomisch en praktisch haalbaar zijn en voldoen aan het biolastenboek en de biologische principes.

Deze literatuurstudie geeft een overzicht van de theoretische mogelijkheden om enterisch methaan te reduceren, met de nodige randbemerkingen over de toepasbaarheid bij Vlaamse biologische herkauwers.

Methaan is een sterk maar kortlevend broeikasgas

De landbouwsector (in zijn geheel) is verantwoordelijk voor ongeveer 10% van de Vlaamse broeikasgasuitstoot. De helft daarvan is in de vorm van methaan (CH_4) vanuit de veeteelt. Op zijn beurt komt 70% van deze methaanuitstoot van zogenaamde enterische emissies, oftewel emissies afkomstig van fermentatieprocessen van vee, voornamelijk van herkauwers (zie verder). De overige 30% ontstaat voornamelijk vanuit mest en mestopslag van *alle* landbouwhuisdiersoorten.

Methaan is een 28 keer sterker broeikasgas dan koolstofdioxide (CO_2). Daar staat tegenover dat het een kortlevend broeikasgas is en gemiddeld al na 12 jaar is afgebroken in de atmosfeer (tov honderden jaren voor CO_2). Dat maakt het volgens sommigen interessant om door methaanreductie (voornamelijk in de veeteelt) de opwarming van de aarde (tijdelijk) af te remmen en/of om gevaarlijke kantelpunten ('tipping points') van het klimaatsysteem te vermijden. Ondertussen kunnen we dan op zoek naar andere, voornamelijk CO_2 -reducerende maatregelen (maar zie Box).

Methaanproductie is onlosmakelijk verbonden met fermentatie van vezelrijk voer in de pens van herkauwers (de fermentatie in de dikke darm van alle landbouwhuisdiersoorten is ook een bron van enterisch methaan, maar in veel mindere mate dan pensfermentatie bij herkauwers). Herkauwers kunnen geen herkauwers zijn zonder methaanproductie: fermentatie van de cellulose in gras geeft aanleiding tot azijnzuur en waterstofgas (H_2). Dit laatste wordt door methanogene bacteriën in de pens samen met CO_2 (een ander afbraakproduct uit de fermentatie) omgezet tot methaan. Zonder deze afvoer van H_2 in de vorm van methaan zou de penswerking vastlopen. En zonder dit proces zouden herkauwers geen voor de mens onverteerbare materialen (gras, diverse reststromen uit de landbouw en voedingsindustrie) kunnen omzetten naar makkelijk verteerbare en nutriëntdense dierlijke producten (vlees, melk). Bovendien hebben we herkauwers nodig om ruwvoer van vlinderbloemigen, die via natuurlijke stikstoffixatie de broodnodige stikstof in het biologische landbouwsysteem brengen, in de teeltrotatie te benutten en te verwaarden.

Box: een kritische blik op klimaatverandering door enterisch methaan

Methaanuitstoot van (grasverbonden/grondverbonden) herkauwers maakt deel uit van een koolstof (C)-cyclus. Hierbij circuleert de C in principe eeuwigdurend tussen gras, koe en atmosfeer: fotosynthese legt CO_2 vast als koolhydraten in het gras, dat na fermentatie in de koepens methaan geeft, dat na atmosferische afbraak weer bouwstenen geeft voor fotosynthese door het gras, enzoverder....(N.B. Hoe we het grasland en de bodem beheren, zal bijkomend ook nog bepalen of de bodem een emissiebron dan wel een opslag is van C).

Constance methaanemissies die daarvan het gevolg zijn, leiden tot een constante concentratie van methaan in de atmosfeer. Ze veroorzaken dus geen extra opwarming van de aarde, maar houden de historisch veroorzaakte opwarming in stand. Met andere woorden, zolang de veestapel gelijk blijft, of de voeropname per dier gelijk blijft, zorgt de methaanuitstoot van die veestapel dus niet voor een extra opwarmend effect. De uitstoot van koolstofdioxide daarentegen stapelt zich op in de atmosfeer,

wat betekent dat de constante uitstoot van koolstofdioxide een toenemende opwarming van de aarde veroorzaakt.

Hierdoor is er niet één correcte manier om methaan om te zetten in koolstofdioxide-equivalenten, maar zijn er veel verschillende manieren die allemaal gebaseerd zijn op verschillende aannames en waardeoordelen (IPCC 2021, McAuliffe *et al.* 2023). Dit levert bijgevolg zeer uiteenlopende resultaten op van 'hoe erg koeien voor het klimaat zijn': van helemaal niet (of zelfs positief als je ook de bodem meetelt) tot heel erg. In de uitspraak "it's not the cow, it's the how" slaat de "how" op het landbouwsysteem waarin de dieren worden gehouden, en de daaruit voortvloeiende effecten op het klimaat. Maar eigenlijk zou de "how" net zo goed kunnen refereren naar hoe er naar enterisch methaan wordt gekeken in de klimaatboekhouding.

Stel dat we een extreme maatregel zouden invoeren dat we met onmiddellijke ingang met alle veeteelt zouden stoppen. Het effect van een eenmalige reductie van de methaanemissie op het klimaat zou je als volgt kunnen voorstellen: als je ijs in je drankje doet, koelt het snel af, maar als het in de omgeving heet is, neemt het drankje na korte tijd weer de omgevingstemperatuur aan. Het zou een snel effect geven, maar na tientallen jaren zou het nauwelijks merkbaar zijn. Hetzelfde geldt voor een eenmalige toename van de methaanemissie, die leidt tot directe opwarming, maar het langetermijneffect is klein. Dit is heel anders dan koolstofdioxide, waarvan we de kortetermijneffecten van een afname of toename van de uitstoot nauwelijks kunnen meten, maar het effect zal honderden jaren aanhouden.

Gelukkig is er sinds kort consensus bij de klimaatwetenschappers van het Intergouvernementeel Panel over Klimaatverandering (IPCC) om enterisch methaan niet meer als 'nieuw toegevoegde methaan' te beschouwen. De nieuw ontwikkelde rekeneenheid GWP* (Global Warming Potential) houdt hier nu rekening mee (in tegenstelling tot GWP100 en GWP20 in het verleden).

Maatstaven voor methaan

De doeltreffendheid van een bepaalde strategie om enterisch methaan te mitigeren kan op verschillende manieren uitgedrukt worden:

- Verlagen van de totale CH₄-productie (absolute emissies, g per dag),
- Verlagen van de CH₄-opbrengst (Eng: CH₄ yield)(relatieve emissies, g per kg opgenomen droge stof (DS) of
- Verlagen van de CH₄-intensiteit (relatieve emissies, g per kg geproduceerd vlees, melk of wol)

Methaanbeperking kan ook worden geëvalueerd in termen van CH₄-energieverlies als een deel van de bruto energie-inname (BEI), een variabele die bekend staat als Y_m, en als gram CH₄ geproduceerd per kilogram verteerd organisch materiaal (OM). De methaanproductie per kilogram verteerd OM past de CH₄-opbrengst verder aan voor het deel van het ingenomen voer dat daadwerkelijk wordt verteerd en kan veranderingen in het pensfermentatieprofiel weerspiegelen. Y_m geeft op zijn beurt een maatstaf voor hoeveel extra ingenomen energie mogelijk beschikbaar is voor het verhogen van de dierlijke productie wanneer methaanvorming wordt geremd.

Een belangrijke kanttekening is dat CH₄ in sommige gevallen kan afnemen wanneer het wordt uitgedrukt als een bepaalde maatstaf, maar toeneemt wanneer het wordt uitgedrukt als een andere. Door de voeropname te verhogen door de verteerbaarheid van het voer te verhogen of krachtvoer toe te voegen, kan de CH₄-opbrengst afnemen, maar de absolute CH₄-emissie kan ongewijzigd blijven of zelfs toenemen als de DS-opname van het dier toeneemt. Strategieën die de prestaties van dieren en de efficiëntie van de productie verbeteren, hebben de neiging om de CH₄-intensiteit te verlagen omdat ze de voerenergie verdunnen die gepaard gaat met het onderhoud van het individuele dier of de kudde. Ze vertegenwoordigen dus een wenselijke verbetering in de efficiëntie van de uitstoot van broeikasgassen ten opzichte van de voedselvoorziening. Het is echter mogelijk dat een afname van de CH₄-intensiteit de absolute emissies van een boerderij, sector of gebied niet vermindert als de individuele voeropname of het aantal dieren, of beide, toenemen ter compensatie van de afname van de CH₄-intensiteit.

Algemene strategieën om enterisch methaan te reduceren

Onderzoek op het gebied van het terugdringen van enterisch methaan is de afgelopen twee decennia exponentieel gegroeid. Veel van dat onderzoek is uitgevoerd in gangbare omstandigheden, veelal met staldieren die geen toegang hebben tot een uitloop en bijgevolg ook niet grazen. Vanuit een gangbare intensiveringslogica, mist het bovenal vaak een specifieke biologische bril die systeembreed kijkt. Het merendeel van de landbouwkundige herkauwers wereldwijd graast, veelal extensief.

Mitigatiestrategieën voor grazende dieren, waaronder dus biologisch gehouden herkauwers, zijn slechts beperkt onderzocht. Bovendien veronderstellen veel van de voorgestelde maatregelen bijvoeding met bepaalde additieven wat ze de facto niet toepasbaar maakt voor (extensieve) veehouderijssystemen met (veel) begrazing.

Tabel 1 geeft een overzicht van de mogelijke bewezen strategieën om enterisch methaan te reduceren. Tegelijk geeft de tabel aan welke effecten op andere emissies (bv. stikstof) te verwachten

zijn, wat de invloed is op het productieniveau en of er nog andere implicaties verbonden zijn aan het toepassen van een welbepaalde strategie.

Niet alle van de theoretisch beschikbare strategieën en middelen zijn toepasbaar bij biologische herkauwers: soms voldoen ze niet aan de wettelijke normen, soms druisen ze in tegen de biologische principes, of soms botsen ze op praktische bezwaren, bv. het niet vlot beschikbaar zijn van de biologische variant van bepaalde grondstoffen. Dit is ook met een kleurencode aangegeven in Tabel 1.

In wat volgt, bespreken we deze strategieën verder in detail.

Tabel 1 Verschillende bewezen strategieën om enterisch methaan te mitigeren met in de kolommen aanduiding van de verwachte effecten op de methaanuitstoot, eventuele effecten op andere emissies, effecten op de dierlijke productiviteit en eventuele risico's verbonden aan het toepassen van deze strategieën. In rood aangeduid: strategieën die wettelijk niet toegelaten zijn onder Vlaamse biologische omstandigheden; in oranje aangeduid: strategieën die niet wenselijk zijn vanuit de algemene principes van biologische landbouw, maar niet strikt verboden zijn door de biowetgeving; in groen aangeduid: strategieën die potentieel hebben om toegepast te worden onder Vlaamse biologische omstandigheden omdat ze toegelaten zijn volgens de biowetgeving en de algemene principes van biologische landbouw respecteren of versterken, en aansluiting kunnen vinden met de biologische bedrijfsvoering. Aangepast van Beauchemin et al., 2022.

Strategie ¹	Verwachte CH ₄ uitstoot ²		Effecten op andere emissies ³	Dierlijke productiviteit ⁴	Risico's ⁵
	Absoluut (g/d)	Relatief (g/kg vlees of melk)			
VERHOGEN DIERLIJKE PRODUCTIVITEIT					
	↑	↓ tot ↓↓	↑↑↑ (OPW, MEST)	↑	0
SELECTEREN VAN DIEREN MET EEN LAGE CH ₄ -UITSTOOT					
	↓	?	0	↑/↓	0
DE KRACHTVOERPISTE					
Aandeel krachtvoer	↑	↓↓	↑↑↑ (OPW, MEST)	↑	DIER
Vetsuppletie	↓↓	↓ tot ↓↓	↑↑↑ (OPW, MEST)	0 tot ↑	0
DE RUWVOERPISTE					
Verteerbaarheid	↑	↓	↑/↓ (OPW, MEST)	↑	0
Meerjarige vlinderbloemigen	↑/↓	↑/↓	↓/↑ (OPW, MEST)	↑/↓	0 ⁶ of DIER ⁷
Voedergewassen met hoog zetmeelgehalte	↓	↓	↓/↑ (OPW, MEST)	0 tot ↑	0
Grassen met hoog suikergehalte	↓	↓	0 tot ↓ (MEST)	0	0
Weide- en begrazingsbeheer	↑/↓	0 to ↓	↑/↓ (MEST)	↑	0
Bewaring en bewerking	0 tot ↑	0 tot ↓	↑↑↑ (OPW, MEST)	0 tot ↑	0
INGRIJPEN IN DE PENSFERMENTATIE					
Ionoforen (monensin)	0 tot ↓	↓	↑ (OPW)	↑	MAX
3-Nitrooxypropanol (3-NOP)	↓↓↓	↓↓↓	↑ (OPW)	↑/↓	MAX
Zeewier (<i>Asparagopsis spp.</i>)	↓↓↓	↓↓↓	↑ (OPW)	↑/↓	MAX, DIER, MENS, MIL
Alternatieve elektronenacceptoren (organische zuren)	↓↓	↑/↓	↑↑↑ (OPW)	↑/↓	0
Alternatieve elektronenacceptoren (nitraat, sulfaat)	↓↓	↓	0 tot ↑↑↑ (OPW, DIER, MEST)	0 tot ↑	MAX, DIER
Essentiële oliën	↓	0 tot ↓	↑ (OPW)	?	MAX
Tannines and saponinen (via ruwvoer/begrazing)	↓	↑/↓	↑/↓ (MEST)	↑/↓	MAX
Direct gevoederde microbiële stoffen	0	0 tot ↓	↑ (OPW)	0 tot ↑	0

- ¹ Mate van betrouwbaarheid: vermeldingen in
 - Cursief: weinig (<5) *in vivo* peer-reviewed gepubliceerde onderzoeken die gelijktijdig de CH₄-productie en dierprestaties evalueren;
 - Normaal lettertype: 5 tot 10 *in vivo* peer-reviewed gepubliceerde onderzoeken die tegelijkertijd de CH₄-productie en de prestaties van dieren evalueren en geen gepubliceerde meta-analyse voor de specifieke strategie;
 - Vetgedrukt: >10 *in vivo* peer-reviewed gepubliceerde onderzoeken die tegelijkertijd de CH₄-productie en de prestaties van dieren evalueren en dat er ten minste één meta-analyse is gepubliceerd.
- ² ↓ = kleine afname (≤15%); ↓↓ = gemiddelde daling (15–24%); ↓↓↓ = grote afname (≥25%); 0 = minimale of geen verandering; ↑ = toename; ↑/↓ = variabele resultaten; ? = er is meer onderzoek nodig.
- ³ ↑↑↑ = grote stijgingen; ↑ = kleine stijgingen; 0 = minimale of geen wijziging; ↓ = dalingen; ↑/↓ = sommige emissies stijgen en andere dalen, of er wordt netto CO₂ gefixeerd; bronnen van andere emissies: OPW = veranderingen in stroomopwaartse emissies van CO₂ door gebruik van fossiele brandstoffen of N₂O door toepassing van kunstmest; DIER = toename van de uitstoot van enterisch N₂O; MEST = toename emissies van CH₄ en N₂O uit de mest.
- ⁴ ↑ = toename (van welke omvang dan ook); 0 = geen verandering; ↑/↓ = variabele resultaten; ? = er is meer onderzoek nodig.
- ⁵ 0 = geen bekende risico's; MAX = maximale dosis bestaat; DIER = veiligheid voor het dier; MIL = veiligheid voor het milieu; MENS = veiligheid voor de mens.
- ⁶ Geconserveerde vlinderbloemigen of begraasde, tanninehoudende vlinderbloemigen.
- ⁷ Begraasde vlinderbloemigen zonder tannine.

Verhogen van de dierlijke productiviteit

Intensivering door verbeterde voerpraktijken (hoeveelheid en kwaliteit van voer), diermanagement, verbeterde diergezondheid, fokken voor hogere productiviteit en betere reproductieve prestaties resulteert in een grotere individuele dierproductie (Capper *et al.*, 2009; Beauchemin *et al.*, 2020). Dieren die meer produceren, eten over het algemeen meer en verteren en fermenteren meer voer in hun pens, waardoor ze meer CH₄ produceren. Naarmate de productie van het individuele dier echter toeneemt, neemt de emissie van CH₄ op basis van een dierlijk product (d.w.z. de CH₄-emissie-intensiteit) af (Gerber *et al.*, 2013). Dit fenomeen treedt grotendeels op door de verdunning van het onderhoudseffect; naarmate de opname van voedingsstoffen toeneemt, neemt het aandeel ingenomen voedingsstoffen dat wordt gebruikt voor onderhoudsfuncties af, waardoor een groter deel van de ingenomen voedingsstoffen overblijft voor dierlijke productie (Capper *et al.*, 2009). Het mitigatiepotentieel door intensivering van de dierlijke productie is groter in laagproductieve dan in hoogproductieve diersystemen (Gerber *et al.*, 2013) en is aantrekkelijk in lage-inkomenslanden die grotere hoeveelheden voedsaam voedsel moeten produceren (Tricarico *et al.*, 2020).

Belangrijk is dat intensivering meestal leidt tot een hogere stroomopwaartse uitstoot van kooldioxide (CO₂) en lachgas (N₂O) als gevolg van de productie van diervoeder of zelfs van weidebeheer, en ook tot een toename van de mestemissies. Daarom moet er bij een levenscyclusanalyse (LCA) rekening worden gehouden met veranderingen in de uitstoot van alle broeikasgassen (Beauchemin *et al.*, 2020).

De productiviteit van dieren kan worden verhoogd zonder toename van de totale uitstoot van broeikasgassen als de intensiteit van broeikasgassen voldoende wordt verminderd om de toename van de totale productie van dierlijke producten te compenseren. Bovendien kan selectief fokken voor verbeterde voerefficiëntie zonder prestatieverlies ertoe leiden dat dieren minder voer gebruiken om dezelfde hoeveelheid product te produceren (Løvendahl *et al.*, 2018). Nauwkeurig voeren, gericht op de behoefte aan voedingsstoffen van elk individueel dier en zo de voeropname per eenheid product verminderen, kan een ander hulpmiddel zijn om de CH₄-intensiteit te verlagen, met name bij minder efficiënte dieren (Fischer *et al.*, 2020). Het is belangrijk om door te gaan met het onderzoeken van de verbetering van de voerefficiëntie door genetische selectie en precisievoeding, omdat een grotere productie-efficiëntie kan helpen de totale uitstoot van broeikasgassen te verminderen bij gelijke of grotere dierlijke productie (Waghorn en Hegarty, 2011; Tricarico *et al.*, 2022). De balans in de totale uitstoot van broeikasgassen hangt uiteindelijk af van de relatieve proportionele veranderingen in de voerefficiëntie en de totale dierlijke productie.

Verbeterde dierproductiviteit wordt beschouwd als een aantrekkelijke piste voor veehouders omdat het de potentie heeft om de economische productiemarges te vergroten (Gerber *et al.*, 2013). De aantrekkingskracht op producenten en het succes van intensivering als middel om de winstgevendheid van de dierlijke productie te verbeteren, zijn echter sterk afhankelijk van de verhouding tussen productprijzen en productiekosten, risicomijding, toegang tot hoogproductieve rassen, toegang tot krediet, onderwijs en ondernemerschap, onder andere de grootte van de productie-eenheid en de beschikbaarheid van technologie die van toepassing is op lokale omstandigheden.

Selecteren van dieren met een lage methaanuitstoot

Er zijn individuele verschillen in CH₄-productie tussen dieren binnen dezelfde kudde en met hetzelfde voermanagement (de Haas *et al.*, 2017). Zoals met elke geselecteerde eigenschap, zijn de voordelen bij het verlagen van de CH₄-productie die verband houden met genetica permanent en cumulatief (de Haas *et al.*, 2021; Manzanilla-Pech *et al.*, 2021).

Mogelijke associaties met andere interessante eigenschappen moeten worden overwogen. Selecteren tegen totale CH₄-productie selecteert echter vaak tegen DS-opname en productietekenen (Lassen en Løvendahl, 2016; de Haas *et al.*, 2017; Breider *et al.*, 2019; Manzanilla-Pech *et al.*, 2021).

Het verband tussen enterische CH₄-emissies en voerefficiëntie is evenwel niet altijd duidelijk en verschillende studies geven tegenstrijdige resultaten. Dat komt omdat voerefficiëntie een complexe eigenschap is die wordt beïnvloed door tal van aspecten van spijsverterings- en metabolische efficiëntie, los van energieverliezen zoals CH₄ (Herd *et al.*, 2004; Richardson en Herd, 2004).

Opname van CH₄-productie in een selectie-index door de fokkerijen vereist waarschijnlijk vaststelling van een prijs op CH₄ (Beauchemin *et al.*, 2020; de Haas *et al.*, 2021).

Fokkerij is een van de weinige methaanmitigerende strategieën die kunnen worden toegepast op extensieve productiesystemen waar dieren geen voersupplementen krijgen. Een bijkomend voordeel van deze aanpak is dat er geen grote effecten op andere stroomopwaartse of stroomafwaartse emissies van broeikasgassen worden verwacht. De grootste uitdagingen bij de selectie van laag-CH₄-producerende dieren zijn het mogelijke bestaan van ongewenste associaties tussen CH₄-productie en dierproductiviteit en het ontwikkelen van betrouwbare en praktische proxy's voor het voorspellen van CH₄-productie die van toepassing zijn op grote aantallen dieren (productieschaal).

De krachtvoerpiste

Aandeel krachtvoer

Deze sectie bespreekt voedingsstrategieën op basis van hun directe effecten op de CH₄-productie door pensvertering en fermentatie. Effecten die optreden door een toename van de productiviteit zijn besproken in een vorige sectie ('Verhogen van de dierlijke productiviteit').

Een hogere voeropname van herkauwers verkort de verblijftijd van het voer in de pens door snellere passagesnelheden. Een kortere retentietijd beperkt de microbiële toegang tot OM, waardoor de mate van pensfermentatie wordt verminderd en de CH₄-opbrengst en Y_m afnemen, hoewel de totale CH₄-emissies toenemen naarmate er meer voer wordt opgenomen en verteerd (Arndt *et al.*, 2022). Het verhogen van het aandeel krachtvoer in het dieet verhoogt de energiedichtheid van het voer, verlaagt het aandeel structurele koolhydraten, verhoogt de snelheid van de pensuitstroom en verlaagt de pens-pH, waardoor de CH₄-productie per eenheid DS-opname en gefermenteerd voer afneemt (Janssen, 2010). Verwerking van granen en krachtvoer met snel fermenteerbaar zetmeel bevordert de fermentatie van zetmeel in de pens en verhoogt de productie van propionzuur, dat dient als een opslagplaats van metabolisch waterstof als alternatief voor methaanvorming (Janssen, 2010; Ungerfeld, 2015). De snelle fermentatiesnelheid van granen verlaagt ook de pens-pH en remt de groei van protozoa (Janssen, 2010), waardoor de rol van protozoa bij het beschermen van methanogenen tegen zuurstofvergiftiging wordt verminderd en de aanvoer van H₂ voor methanogenese wordt verminderd (Newbold *et al.*, 2015).

Sommige experimenten die krachtvoersuppletie van grazende dieren evalueerden, hebben een afname van de CH₄-opbrengst en -intensiteit aangetoond (Jiao *et al.*, 2014), hoewel de meeste geen verandering in enige maat voor CH₄-productie rapporteerden (Arndt *et al.*, 2022; Vargas *et al.*, 2022). De discrepanties voor graslandstudies kunnen worden toegeschreven aan de substitutiegraad (krachtvoer vs. grasland), graslandkwaliteit of verschillen in methodologie om DS-opname in te schatten. Het verhogen van de krachtvoeropname kan eenvoudig worden gecombineerd met andere mitigatiestrategieën. Verschillende onderzoeken hebben additieve effecten aangetoond van krachtvoer- en vet-opname op het verminderen van de totale CH₄-emissies en emissie-intensiteit (bv. Bayat *et al.*, 2017). Methanogenese-remmers zoals 3-nitrooxypropanol (3-NOP, zie verder, niet toegelaten in de Vlaamse biologische veehouderij!) vertonen synergie met krachtvoer, waardoor het mitigatiepotentieel van remmers wordt verhoogd in rantsoenen met een groot aandeel krachtvoer (Schilde *et al.*, 2021).

Verhoogde voeropname en gebruik van graan en graanverwerking gaan gepaard met verhoogde emissies van CO₂ en N₂O door het gebruik van fossiele brandstoffen en stikstof (N)-meststoffen die worden gebruikt tijdens de voerproductie en -verwerking (Beauchemin *et al.*, 2009). Bovendien resulteert de omzetting van weiland in akkerland in het verlies van koolstof in de bodem. Veranderingen in verteerbaarheid van nutriënten kunnen de hoeveelheid en samenstelling van mest veranderen (Beauchemin en McGinn, 2005; Hristov *et al.*, 2013a; Hristov *et al.*, 2013b) en de CH₄-, ammoniak- en N₂O-emissies uit mest.

Een grotere krachtvoeropname verhoogt de voerkosten en kan klinische en subklinische pensverzuring veroorzaken (Hristov *et al.*, 2022). Melkeiwit- en vetconcentraties kunnen ook afnemen, vooral bij het voeren van rantsoenen op basis van tarwe of haver in vergelijking met rantsoenen op basis van maïs of gerst (Moate *et al.*, 2019). Een verlaging van melkbestanddelen kan de winstgevendheid voor zuivelproducenten verminderen.

Het voeren van granen aan herkauwers die rechtstreeks door mensen kunnen worden geconsumeerd, worden beschouwd als een inefficiënte praktijk die geen gebruik maakt van het vermogen van herkauwers om vezelrijk voer dat ongeschikt is voor mensen om te zetten in bruikbare producten (Beauchemin *et al.*, 2020). Er is meer onderzoek nodig om te karakteriseren hoe de bron en verwerkingsmethode van granen de enterische CH₄-emissies beïnvloeden, en om de juiste rantsoenformuleringen te identificeren met rantsoenen op basis van granen die het negatieve effect op melkvet tegengaan terwijl een CH₄-mitigerend effect behouden blijft. Verder onderzoek zou zich ook moeten richten op het evalueren van de totale uitstoot van broeikasgassen met behulp van een LCA voor individuele boerderijen en geografische regio's (Beauchemin *et al.*, 2008).

Vetsuppletie

Vetten in het rantsoen ontlocken hun CH₄-mitigerende effect via verschillende mechanismen (Newbold *et al.*, 2015):

- toxiciteit tegen methanogenen en protozoa;
- biohydrogenering van onverzadigde vetzuren die dient als een kleine put van metabolische waterstof;
- verschuivende pensfermentatie in de richting van propionzuur, wat resulteert in een lagere CH₄-productie.

Aangezien vetten grotendeels onfermenteerbaar zijn (behalve de glycerolgroep), draagt de vervanging van koolhydraten door lipiden ook bij tot een verminderde enterische CH₄-emissie.

Suppletie van vetten in het rantsoen is een effectieve CH₄-mitigatiestrategie, hoewel de werkzaamheid afhangt van de vorm, bron en hoeveelheid aanvullend vet; de mate van verzadiging; de koolstofketenlengten van vetzuren; en de nutriënten- en vetzuursamenstelling van het basisrantsoen (Patra, 2013). Er zijn verschillende meta-analyses uitgevoerd om het CH₄-mitigerende effect van vetten in het rantsoen bij herkauwers op te helderen (Beauchemin *et al.*, 2008; Patra, 2013; Arndt *et al.*, 2022). De antimethanogene effecten van vetten in het voeder variëren aanzienlijk over een breed scala van omstandigheden. De effecten variëren van een daling van de CH₄-opbrengst met 5,6% (Beauchemin *et al.*, 2008) tot tussen de 3,8 en 4,3% per 10 g/kg (DS) aanvullend vet, afhankelijk van de bron (Patra, 2013, 2014). Vetzuren met middellange ketens zoals myristinezuur en meervoudig onverzadigde vetzuren in vis-, zonnebloem-, lijnzaad- en koolzaadolie zijn de meest effectieve vetzuren voor het verminderen van de CH₄-emissies (bv. Grainger *et al.*, 2010).

Het breken van de huid van oliezaden door ze vóór het voeren te malen, pletten of rollen, zorgt ervoor dat de lipiden in de pens beschikbaar zijn. Oliën zijn doorgaans effectiever dan gemalen oliehoudende zaden (Beauchemin *et al.*, 2008), hoewel deze vergelijking afhangt van de mate van verwerking van de oliehoudende zaden. In een meta-analyse, toonden Arndt *et al.* (2022) aan dat het voeren van oliën of vetten versus oliehoudende zaden vergelijkbare verzachtende effecten had op de totale CH₄-productie (–20 en –20%), CH₄-opbrengst (–15 en –14%) en CH₄-intensiteit voor melkproductie (–12 en –12%). Het voeren van oliehoudende zaden had echter geen effect op de CH₄-intensiteit voor dagelijkse gewichtstoename, terwijl aanvullende oliën en vetten de CH₄-intensiteit van de dagelijkse gewichtstoename ADG met 22% verlaagden (Arndt *et al.*, 2022).

Weinig studies hebben de langetermijneffecten van voedervetten op CH₄-emissies onderzocht. Er zijn aanwijzingen dat ze aanhoudende antimethanogene effecten hebben (Jordan *et al.*, 2006; Grainger *et al.*, 2010), hoewel een recent onderzoek met grazende melkkoeien voorbijgaande effecten van suppletie met oliezaden aantoonde (Muñoz *et al.*, 2021). Het remmende effect van vetten in het voeder op CH₄-emissies is groter bij op krachtvoer gebaseerde rantsoenen dan bij op ruwvoer gebaseerde rantsoenen (Patra, 2013), mogelijk vanwege de lagere pens-pH geassocieerd met op krachtvoer gebaseerde diëten, wat het remmende effect van vetzuren versterkt op methanogenen (Zhou *et al.*, 2015).

Combinaties van vetten in het rantsoen met andere mitigatiestrategieën zijn onderzocht. Een additief effect van vetten in het voeder op CH₄-reductie werd bevestigd wanneer koolzaadolie werd gecombineerd met 3-NOP (Zhang *et al.*, 2021) en wanneer lijnzaadolie werd gecombineerd met nitraat (Guyader *et al.*, 2015). Er was echter geen additief effect wanneer sojaolie werd gecombineerd met extracten die rijk zijn aan tannines (Lima *et al.*, 2019) of saponinen (Mao *et al.*, 2010). (Let op: 3-NOP en nitraat zijn niet toegestaan als voederadditieven in de Vlaamse biologische veehouderij).

Het voeren van een hoge concentratie vetten kan de verteerbaarheid van voer en vezels verminderen (Patra, 2013, 2014; Arndt *et al.*, 2022), wat de uitscheiding van OM en voedingsstoffen en de emissie van CH₄ uit mest zou kunnen verhogen (Hassanat en Benchaar, 2019), hoewel dit mogelijk niet voorkomt bij niveaus van totale voedingssupplementen van <6% droge stof. Vetsuppletie leidt tot een toename van de voederemissies die gepaard gaan met de teelt en het transport van geraffineerde oliën of van hele of geplette oliezaden. Het aanvullen van vetten met 4 tot 6% van de DS in de voeding (totaal vet in de voeding van maximaal 6 tot 8%) kan de melkproductie verbeteren, maar het voeren van hogere concentraties vetten kan nadelige effecten hebben op pensfermentatie,

voervertering en dierprestaties (Patra, 2013, 2014). De meta-analyse uitgevoerd door Arndt *et al.* (2022) toonden aan dat het voeren van oliën en vetten de DS-opname (met 6%) en de verteerbaarheid van vezels (met 4%) verlaagde, maar geen effect had op de melkproductie of dagelijkse gewichtstoename. Het voeren van oliehoudende zaden had echter geen invloed op de DS-opname, maar verminderde de verteerbaarheid (met 8%) en de dagelijkse gewichtstoename (met 13%), zonder effect op de melkproductie (Arndt *et al.*, 2022). Suppletie met vetten die rijk zijn aan langketenige onverzadigde vetzuren kan de voedingskwaliteit van vlees of melk verbeteren door het gehalte aan gezonde vetzuren, waaronder PUFA, CLA en vacceenzuur, te verhogen (Bayat *et al.*, 2015). Een hoog gehalte aan onverzadigde vetzuren in het voeder kan echter de productie van melkvet verminderen, vooral wanneer rantsoenen veel krachtvoer bevatten of wanneer de pens-pH laag is (Bougouin *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2019).

Het is niet bekend dat vetsuppletie een veiligheidsrisico vormt voor dieren en mensen. Het is een strategie die in principe direct inzetbaar is. Het voeren van geraffineerde oliën kan kostbaar zijn en ze passen vaak niet in de goedkoopste rantsoenformuleringen. Het conflicteert bovendien met het gebruik voor humane consumptie. Reststromen van de verwerking van oliehoudende zaden zijn minder duur en geven voorrang aan menselijk gebruik en zijn daarom te verkiezen. Biologische schilfers van oliehoudende zaden zijn omwille van de beperkte fysische/mechanische onttrekking van olie (in vergelijking met gangbare chemische extractie) relatief rijker aan olie dan gangbaar schroot. Hierdoor veroorzaken ze wellicht bij een lager aandeel in het rantsoen reeds CH₄-mitigerende effecten.

Verder onderzoek is nodig om kosteneffectieve en duurzame vetbronnen en hun respectievelijke aanvullende niveaus te identificeren die de CH₄-emissies zouden verminderen zonder de verteerbaarheid van het voer en de dierlijke productie aan te tasten. Er zijn ook onderzoeken nodig om het langetermijneffect van aanvullende vetten bij het onderdrukken van de CH₄-emissie vast te stellen. Gezien de potentiële impact op voeremissies en nutriëntenuitscheiding, moet de effectiviteit van deze mitigatiestrategie worden onderzocht met behulp van LCA.

De ruwvoerpiste

Weilanden en voedergewassen vormen het belangrijkste onderdeel van het rantsoen van herkauwers. Dankzij het unieke spijsverteringssysteem van herkauwers kunnen ze hoogwaardige eiwitten produceren in de vorm van vlees en melk uit ruwvoer, waardoor directe concurrentie om graan dat als menselijk voedsel kan worden gebruikt, wordt vermeden. De opname van cellulosehoudend materiaal verhoogt echter de enterische CH₄-emissies, die substantieel variëren als gevolg van de bron van het voer, de chemische samenstelling, de verteerbaarheid, de bewaringsmethode, de manier van begrazen en andere factoren. Deze variatie creëert kansen voor CH₄-mitigatie via de ruwvoerpiste. Voederproductiesystemen zijn zeer variabel en afhankelijk van de omstandigheden op de boerderij (bijv. bodemtype en vruchtbaarheid, water, klimaat) en managementpraktijken. Deze factoren zijn van invloed op de ruwvoeropbrengst en de voedingswaarde, de koolstofopslag in de bodem, de prestaties van dieren, de mestuitscheiding en uiteindelijk de uitstoot van broeikasgassen. Daarom moet in alle gevallen een verandering in voerbeheer om de enterische CH₄-emissies te verminderen, worden beoordeeld met behulp van regionaal specifieke LCA op bedrijfsniveau die rekening houden met veranderingen in voer- en dierproductiviteit, evenals emissies en putten van alle componenten van het landbouwsysteem, inclusief bodemkoolstof.

Verteerbaarheid

Het verhogen van de verteerbaarheid van voer verhoogt gewoonlijk de DS-opname en verbetert de prestaties van dieren, wat de CH₄-opbrengst en -intensiteit verlaagt. De verteerbaarheid van als hooi of kuilvoer geconserveerd voer kan worden gemaximaliseerd door in een vegetatief stadium te oogsten; in weidesystemen kan de verteerbaarheid worden verbeterd door het begrazingsbeheer te optimaliseren om de maturiteit van het voer te verminderen (bijv. aanpassing van de veebezetting, in een jong genoeg stadium inscharen; Vargas *et al.*, 2022). Hoewel de CH₄-intensiteit afneemt, blijft de absolute CH₄-productie als gevolg van een verhoogde verteerbaarheid van voer gewoonlijk constant of neemt deze toe als gevolg van een hogere DS-opname en een verhoogde fermentatie in de pens (Arndt *et al.*, 2022). Koeien die na een kortere hergroeiperiode vers gesneden gras kregen, produceerden bijvoorbeeld meer melk en dezelfde hoeveelheid CH₄, dus de CH₄-intensiteit was 12% minder bij een kortere hergroeiperiode van het gras (Warner *et al.*, 2015). Warner *et al.* (2016) vergeleek gras ingekuild in 3 stadia van rijpheid en rapporteerde dat het inkuilen van minder volgroeid gras resulteerde in een grotere DS-opname, verteerbaarheid en melk- en CH₄-productie, waarbij de CH₄-intensiteit 24% lager was voor het minst in vergelijking met het meest volgroeide kuilvoer. Daarentegen was de totale CH₄-productie 6% hoger dan die van de meest volgroeide kuil. Macome *et al.* (2018) evalueerde gras ingekuild in 4 stadia van rijpheid en rapporteerde dat de CH₄-opbrengst en -intensiteit van melkkoeien respectievelijk 16 en 21% minder was in vergelijking met het meeste volwassen gras. De totale CH₄-productie werd in die studie niet gerapporteerd.

Verbeterde verteerbaarheid van ruwvoer is gemakkelijk te combineren met andere CH₄-mitigatiestrategieën op bedrijfsniveau. Voerbeheer om de verteerbaarheid te verbeteren heeft invloed op veel andere aspecten van het landbouwsysteem, wat de noodzaak benadrukt om rekening te houden met de gevolgen voor de netto-BKG-emissies. De andere landbouwaspecten die aandacht behoeven, zijn onder meer de productiviteit van dieren, de hoeveelheid en samenstelling van de mest, de opbrengst van biomassa van voedergewassen, koolstofvastlegging tijdens de voedergroei en de input van voedergewassen. Onvolgroeide voedergewassen hebben een hoger N-gehalte, waardoor de N-uitstoot in het milieu kan toenemen als ze niet in balans zijn. Sommige diercategorieën van herkauwers (bv. niet-melkgevende zoogkoeien, dieren met een onderhoudsenergie-inname) vullen de unieke niche van het consumeren van vezelrijk, slecht verteerbaar voer en gewasresten en bijproducten die niet geschikt zijn voor hoogproductieve dieren en kunnen complementair gehouden worden aan bovenstaande systemen met hoge verteerbaarheid.

Meerjarige vlinderbloemigen

In hetzelfde fysiologische groeistadium bevatten vlinderbloemige voedergewassen minder vezel (uitgedrukt als Neutral Detergent Fiber, NDF) dan grassen. Hoewel vezels in vlinderbloemigen meer verhout zijn, is de afname van de verteerbaarheid van vezels bij voortschrijdende maturiteit veel groter voor grassen dan voor vlinderbloemigen. Bovendien kunnen sommige vlinderbloemigen secundaire verbindingen bevatten die de CH₄-productie verminderen (zie verder 'Tanninen en saponinen'). De passagesnelheid vanuit de pens, en bijgevolg de DS-opname, kan groter zijn voor vlinderbloemigen dan voor grassen, wat theoretisch de CH₄-opbrengst zou moeten verlagen. De prestaties van dieren worden vaak verhoogd door vlinderbloemigen toe te voegen aan rantsoenen voor herkauwers, waardoor de CH₄-intensiteit afneemt. Johansen *et al.* (2018) voerde een meta-analyse uit van voedergewassen in gematigde streken in rantsoenen van melkkoeien en concludeerde dat rantsoenen op basis van vlinderbloemigen over het algemeen resulteerden in een hogere DS-

opname en melkproductie dan rantsoenen op basis van gras, hoewel niet alle vlinderbloemigen even effectief waren. Arndt *et al.* (2022) en Vargas *et al.* (2022), aan de andere kant, gaven respectievelijk variabele en meestal geen effecten aan van de opname van niet-tannine-bevattende vlinderbloemigen in weilanden, op verschillende maatstaven van CH₄-productie.

Het is moeilijk om het mitigerende effect als gevolg van de opname van vlinderbloemigen in het voeder te kwantificeren, omdat het afhangt van de kwaliteit van het voer dat wordt vergeleken, aangezien verschillen in voeropname en verteerbaarheid als gevolg van fenologische stadia de resultaten kunnen verwarren. Hoewel toegenomen gebruik van vlinderbloemigen de CH₄-productie of -opbrengst mogelijk niet consequent verlaagt, kan de CH₄-intensiteit afnemen als de voedingswaarde van het rantsoen wordt verbeterd met verhoogde dierprestaties als gevolg.

(Meerjarige) vlinderbloemigen fixeren stikstof, wat de hoeveelheid gebruikte stikstofkunstmest en de bijbehorende emissies vermindert (Schultze-Kraft *et al.*, 2018). In bio gebruiken we uiteraard geen kunstmest en sparen dus aanzienlijke emissies uit. De door vlinderbloemigen gefixeerde stikstof is nog steeds onderhevig aan verliezen en draagt dus potentieel bij aan de N₂O-emissies wanneer hun residuen vergaan (Guyader *et al.*, 2016). Meerjarige vlinderbloemigen kunnen de koolstofopslag in de bodem vergroten (Little *et al.*, 2017) en erosie helpen voorkomen en aangetaste bodems herstellen. De methaanuitstoot uit mest van melkkoeien was lager voor luzerne dan voor maïskuilvoer (Massé *et al.*, 2016), hoewel de ammoniak- en N₂O-emissies groter kunnen zijn als de ruw eiwit (RE)-opname van dieren wordt verhoogd door vlinderbloemigen te voeren (Rotz *et al.*, 2010). De hoge RE concentratie van vlinderbloemigen kan het gebruik van aangekochte voeders (bv. soja) en de bijbehorende uitstoot verminderen (Schultze-Kraft *et al.*, 2018).

Voedergewassen met een hoog zetmeelgehalte

Het gebruik van zetmeelrijke voedergewassen zoals maïskuilvoer en granen kan het zetmeel verhogen en de vezelconcentratie van rantsoenen verminderen. De resulterende pensfermentatie bevordert de productie van propionzuur, dat concurreert met methaanvorming voor metabolische waterstof en ook de pens-pH kan verlagen en methanogene organismen kan remmen. Bij sommige rantsoenen verhoogt het opnemen van zetmeelrijke voedergewassen de verteerbare energie-opname van dieren en verbetert het de prestaties van dieren, waardoor de CH₄-intensiteit afneemt.

Uddin *et al.* (2021) rapporteerden een afname van 2,5% in CO₂-equivalenten (CO₂-e) per kilogram vet- en eiwitgecorrigeerde melk voor maïskuilvoer in vergelijking met luzernekuilvoer in het rantsoen van lacterende melkkoeien. Kleine *et al.* (2017) toonden aan dat, hoewel het vervangen van luzernekuilvoer door maïskuilvoer in het rantsoen van lacterende melkkoeien de enterische CH₄-opbrengst met 10% verlaagde, de verschillen in CO₂-e-emissie-intensiteit tussen de 2 voedersystemen minimaal waren wanneer rekening werd gehouden met bodemkoolstof. Daarom wordt het voeren van zetmeelrijke voedergewassen om de enterische CH₄-emissies te verminderen niet aanbevolen, tenzij onderbouwd door een LCA die veranderingen in de bodemkoolstof omvat, een kennisgebied dat momenteel in ontwikkeling is. Het grootste potentieel voor zetmeelrijke voedergewassen om de totale uitstoot van broeikasgassen te verminderen kan plaatsvinden bij het vervangen van een ander eenjarig voedergewas.

Grassen met een hoog suikergehalte

Suikerrijke cultivars van Engels raaigras (*Lolium perenne* L.) hebben verhoogde concentraties van wateroplosbare koolhydraten (250 tot 350 g/kg DS; Rivero *et al.*, 2020), voornamelijk ten koste van RE en, in sommige gevallen, NDF-concentratie. De grotere concentratie van direct beschikbare koolhydraten verlaagt de verhouding azijnzuur/propionzuur in de pens (Rivero *et al.*, 2020). In-vitro-onderzoeken rapporteren minder CH₄-productie voor grassen met een hoog versus een laag suikergehalte (Lovett *et al.*, 2006). Met behulp van modelleringsbenaderingen, Ellis *et al.* (2012) schatten dat een verhoging van de WSC-concentratie van 40 g/kg DS of meer nodig kan zijn om de *in vivo* CH₄-opbrengst te verlagen, en het mitigatiepotentieel hangt ook af van gelijktijdige veranderingen in CP- en NDF-concentratie en verteerbaarheid. Een meta-analyse van 27 *in vivo* experimenten wees uit dat voor elke 10 g/kg (DS) toename van het gehalte aan wateroplosbare koolhydraten, de CH₄-opbrengst afnam met 0,311 g/kg DS-opname (Vera en Ungerfeld, 2022). Het CH₄-mitigatiepotentieel van grassen met een hoog suikergehalte lijkt te worden verminderd wanneer het voer wordt geconserveerd als hooi of kuilvoer (Staerfl *et al.*, 2012).

Een aspect waarmee rekening moet worden gehouden, is dat de lagere RE-concentratie van grassen met een hoog suikergehalte een negatieve invloed kan hebben op de productiviteit van hoogproductieve herkauwers als niet aan de eiwitbehoeften wordt voldaan (Staerfl *et al.*, 2012), en een evenwicht voor voedingseiwitten vereist. Een LCA van rantsoenveranderingen kan nodig zijn, ook rekening houdend met de ruwvoeropbrengst van verschillende cultivars. Het meeste onderzoek naar grassoorten met een hoog suikergehalte is beperkt gebleven tot het Verenigd Koninkrijk, Nederland en Nieuw-Zeeland. Er zijn in-vivo-onderzoeken nodig om de effecten van suikerrijke grassen op de CH₄-productie, de opbrengst van voedergewassen en de prestaties van dieren in verschillende productiesystemen te kwantificeren. Het effect van selectie op de suikerrijke eigenschap op schimmelziekten en insectenaantasting moet ook nader worden beoordeeld.

Weide- en begrazingsbeheer

Begrazingssystemen variëren afhankelijk van het klimaat, de plantensoort, de bodemsoort en het vee, en omvatten continue begrazing gedurende het hele seizoen, begrazing in rustrotatie, uitgestelde wisselbeweiding en intensief beheerde begrazing. Deze systemen beheren weiden om te voorzien in voedselbronnen voor dieren, waarbij wordt geprobeerd de voedingsbehoeften van het vee in evenwicht te brengen met de beschikbaarheid en kwaliteit van kruiden, terwijl snelle hergroei van weiden en langdurige veerkracht van weiden worden bevorderd. Begrazingsbeheer kan de kwantiteit en kwaliteit van het gras verbeteren, wat leidt tot een hogere dierlijke productie per hectare (Congio *et al.*, 2018; Savian *et al.*, 2018), met verhoogde koolstofvoorraden in de bodem en verminderde CH₄-intensiteit (Guyader *et al.*, 2016). Sommige weidesoorten bevatten ook secundaire plantenstoffen zoals gecondenseerde en hydrolyseerbare tannines en saponinen die de enterische CH₄-productie kunnen verminderen (MacAdam en Villalba, 2015; Kozłowska *et al.*, 2020, zie verder). Naast traditionele op gras gebaseerde systemen, verhogen silvopastorale systemen die bomen en struiken in weilanden opnemen de hoeveelheid biomassa per oppervlakte-eenheid en bieden ze andere ecosysteemdiensten. Silvopastorale systemen bevorderen duurzame intensivering van land, waardoor de biodiversiteit, de efficiëntie van het watergebruik en de productie van biomassa mogelijk toenemen, terwijl het dierenwelzijn wordt bevorderd door schaduw te bieden om hittestress te verlichten (Mauricio *et al.*, 2019). Een heel aantal voor Vlaanderen relevante boom- en struiksoorten die deel kunnen uitmaken van een 'browsebaar' silvopastoraal systeem vertonen ook een significant methaanreductiepotentieel onder *in vitro* omstandigheden (Biomora – Naar een

biologisch verantwoord methaanreducerend rantsoen, Vlaamse bio-onderzoek 2022-2024). Verschillende mechanismen liggen ten grondslag aan het methaanmitigerend effect bij de geteste bomen en struiken (tannines, saponines, rechtstreeks onderdrukkend effect op methanogene organismen, ...).

Begrazingsbeheer voor CH₄-mitigatie houdt rekening met de hoogte van het gras voor en na inscharen en de biomassa om de voederkwaliteit van het gras en de kruiden te maximaliseren (Muñoz *et al.*, 2016; Congio *et al.*, 2018; Savian *et al.*, 2018). Beweidingsbeheer kan de enterische CH₄-intensiteit verlagen, maar de totale CH₄-productie is in de meeste onderzoeken niet veranderd (Arndt *et al.*, 2022; Vargas *et al.*, 2022), en kan toenemen als de DS-opname wordt verhoogd. Veranderingen in de CH₄-productie per eenheid graasoppervlakte zijn op hun beurt afhankelijk van veranderingen in de CH₄-productie per dier en bezettingsgraad. De mate waarin begrazingsbeheer de CH₄-intensiteit verlaagt, is zeer variabel, afhankelijk van het productiesysteem en de lokale omstandigheden. Voor melkvee verbeterde het optimaliseren van het beweidingsbeheer de efficiëntie van de melkproductie met 51%, terwijl de CH₄-intensiteit met 20% daalde en de CH₄-opbrengst met 18%, hoewel de CH₄-emissies per hectare met 29% toenamen (Congio *et al.*, 2018). Grazende melkkoeien met een verschillende biomassa vóór begrazing hadden een vergelijkbare totale CH₄-productie, maar de toename in DS-opname en melkopbrengst met een lage grasmassa (lager in NDF-concentratie) resulteerde in 10% minder CH₄-opbrengst (Muñoz *et al.*, 2016). Voor vleesvee was de CH₄-productie groter voor lichte versus zware continue beweiding omdat planten zich in een verder gevorderd stadium van volwassenheid bevonden, maar de extra CH₄ werd ruimschoots gecompenseerd door een grotere koolstofvastlegging in de bodem (Alemu *et al.*, 2017). Daarom moet bij een optimaal beweidingsbeheer rekening worden gehouden met de productiviteit van zowel dieren als weiden en bodem, en is een LCA nodig om rekening te houden met alle broeikasgasemissies en -verwijderingen (veranderingen in bodemkoolstof), en moeten ook andere ecosysteemdiensten geleverd door graslandecosystemen worden beschouwd.

Implementatie van verbeterd graslandbeheer door boeren kan worden belemmerd door extra kosten (bijv. hekken, drinkbakken, verplaatsen van vee, boomaanplant) en gebrek aan ondersteuning via advies en stimulerende maatregelen.

Bewaring en verwerking van ruwvoer

Het inkuilen van ruwvoer veroorzaakt verliezen in DS en veranderingen in de voedingswaarde, maar goede managementpraktijken kunnen worden gebruikt om kuilvoer van uitstekende kwaliteit te garanderen. Het effect van het inkuilen van ruwvoer op de CH₄-productie zal dus naar verwachting zeer variabel zijn, afhankelijk van de resulterende voerkwaliteit en inkuilpraktijken. Er zijn maar weinig *in vivo* onderzoeken die de directe effecten van de methode voor het bewaren van voedergewassen op de CH₄-productie hebben onderzocht (Knapp *et al.*, 2014). De impact van conserveringsmethoden op CH₄-emissies is voornamelijk te wijten aan effecten op de prestaties van dieren, die de CH₄-intensiteit beïnvloeden (Evans, 2018).

Verwerking van ruwvoer door malen en pelleteren verkleint de deeltjesgrootte, wat de passagesnelheid van de pens verhoogt, de OM-afbraak in de pens vermindert en de fermentatie verschuift naar de productie van propionzuur met minder CH₄-productie. Johnson *et al.* (1996) rapporteerden een afname van 20 tot 40% in CH₄-opbrengst wanneer ruwvoer werd gemalen of gepelleteerd in vergelijking met het voeren van lang ruwvoer. De totale CH₄-productie wordt echter waarschijnlijk niet verlaagd of zelfs verhoogd (Arndt *et al.*, 2022) door voerverwerking bij dieren die

ad libitum worden gevoerd vanwege de verhoogde DS-opname, vooral voor voer van lage kwaliteit (Hironaka *et al.*, 1996).

Het conserveren en verwerken van ruwvoer verhoogt het brandstofverbruik voor machines en de bijbehorende emissies in vergelijking met het grazen van vers gras. Bovendien kan verminderde NDF-verteerbaarheid door verwerking leiden tot verhoogde mestemissies van CH₄ (Knapp *et al.*, 2014), afhankelijk van hoe de mest wordt beheerd. Alvorens een wijziging in de bewaring of verwerking van ruwvoer voor CH₄-beperking aan te bevelen, moeten aanvullende inputs, effecten op de productiviteit van dieren en de broeikasgasemissies van het hele bedrijf worden overwogen.

Ingrijpen in de pensfermentatie

Ionoforen

Ionoforen zijn polyetherverbindingen die de doorlaatbaarheid van celmembranen voor ionen in grampositieve bacteriën en protozoa verhogen, wat resulteert in vertraagde groei en dood. Vele vezelafbrekende pensorganismen (protozoa, bacteriën) produceren H₂ en op deze manier verminderen ionoforen de beschikbaarheid van H₂ voor methaanvorming en verschuiven ze de fermentatie van azijnzuur naar propionzuur (Duffield *et al.*, 2008a). Rapporten over microbiële aanpassing aan ionoforen zijn tegenstrijdig (Appuhamy *et al.*, 2013).

Monensin wordt in veel landen routinematig gebruikt bij weidend vee, maar de effecten op de CH₄-productie zijn over het algemeen klein. De meta-analyse van Appuhamy *et al.* (2013) rapporteerde gemiddelde dalingen in de totale CH₄-productie van tussen 3,6 en 10,7% bij respectievelijk melkkoeien en ossen. Bovendien verbetert monensin de efficiëntie van de voederconversie (Duffield *et al.*, 2008b), waardoor de uitstoot van broeikasgassen door de voederproductie die nodig is om de dierlijke productie in stand te houden, wordt verlaagd.

De aanwezigheid van monensin in de mest bij concentraties die voortvloeien uit de aanbevolen opname in het rantsoen van melkkoeien had geen invloed op de CH₄-productie in de mest (Arikan *et al.*, 2018). Monensin verlaagt de concentratie pens-ammonium, maar er zijn tegenstrijdige resultaten over de effecten ervan op het N-metabolisme en de afgifte aan het milieu (Duffield *et al.*, 2008a). Verhogingen van emissies die verband houden met de productie en het transport van ionoforen zijn klein omdat ze doorgaans in het rantsoen worden opgenomen in concentraties van 50 mg / kg DS of minder.

Toepassing is meer voor de hand liggend in intensieve systemen waarbij dieren dagelijks worden bijgevoerd, maar varianten met langzame afgifte, geschikt voor gebruik bij grazend vee, zijn in de handel verkrijgbaar. Over het algemeen kunnen ionoforen helpen bij het bereiken van een lichte vermindering van de enterische CH₄-productie en de CH₄-intensiteit van producten van herkauwers, en ze hebben gunstige effecten op de productiviteit van dieren. Het gebruik van ionoforen in de voeding van herkauwers is in veel delen van de wereld goedgekeurd en gemeengoed. Maar door de groeiende bezorgdheid over antimicrobiële resistentie kan het gebruik ervan in de toekomst beperkter worden. In Vlaanderen is het gebruik voor alle duidelijkheid niet toegelaten in de biologische veehouderij.

3-nitrooxypropanol (3-NOP)

3-Nitrooxypropanol is een molecuul dat, wanneer opgenomen in kleine doses (60 tot 200 mg/kg DS-opname) in voer voor herkauwers, de CH₄-productie in de pens remt. Chemische remmers van methanogenen worden sinds de jaren zestig *in vitro* en *in vivo* bestudeerd. Onderzoek naar sommige verbindingen werd stopgezet vanwege risico's op toxiciteit, opstapeling in dierlijke producten, vluchtigheid of voorbijgaande *in vivo* effecten. 3-NOP voor CH₄-mitigatie werd gepatenteerd in 2012 (Duval en Kindermann, 2012) en is uitgebreid onderzocht *in silico*, in zuivere enzym-substraatsystemen, in *in vitro* zuivere en gemengde culturen (Duin *et al.*, 2016), en *in vivo* (bv. Yu *et al.*, 2021). 3-NOP richt zich op methyl-co-enzym M-reductase, dat de laatste stap van methaanvorming in methanogene archaea katalyseert. Het werkingsmechanisme is vastgesteld, evenals de producten die het resultaat zijn van het metabolisme in de pens (Duin *et al.*, 2016).

Gemiddeld en bij typische opnameniveaus in rantsoenen van vleesvee (144 ± 82,3 mg/kg DM; gemiddelde ± SD) en melkvee (81 ± 41,2 mg/kg DS; gemiddelde ± SD) verlaagt 3-NOP de CH₄-productie met 30% (Dijkstra *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2020), hoewel dalingen van 80% of meer zijn verkregen in sommige onderzoeken met rantsoenen met een hoog aandeel krachtvoer (Yu *et al.*, 2021). Het effect van 3-NOP op de CH₄-productie is gerelateerd aan de mate van opname in het rantsoen (Yu *et al.*, 2021) en wordt negatief beïnvloed door de concentratie van NDF in het rantsoen (Dijkstra *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2021).

Langdurige *in vivo* remming van enterische CH₄-productie door 3-NOP werd aanvankelijk gerapporteerd door Hristov *et al.* (2015) en is inmiddels in verschillende onderzoeken bevestigd (Yu *et al.*, 2021). Hoewel in de meeste langetermijnonderzoeken de effectiviteit van 3-NOP constant is gebleven, hebben een aantal onderzoeken aangetoond dat de effectiviteit van 3-NOP in de loop van de tijd licht afnam, wat mogelijk verband houdt met de lage dosis die werd gebruikt (Yu *et al.*, 2021).

In de meta-analyse van Jayanegara *et al.* (2018) had 3-NOP geen invloed op de DS-opname van melkvee en vleesvee, terwijl de latere meta-analyse door Kim *et al.* (2020) een afname rapporteerde van de DS-opname met 3-NOP bij vleesvee maar niet bij melkvee. Beide meta-analyses vonden verhogingen of tendensen om melkvet- en eiwitpercentages te verhogen met 3-NOP-suppletie, hoewel Kim *et al.* (2020) een afname van de melkgift met 3-NOP zagen. Er is aangetoond dat de voederconversie-efficiëntie verbeterde bij vleesvee dat 3-NOP kreeg toegediend (Jayanegara *et al.*, 2018). De verteerbaarheid van verschillende voederfracties werd niet beïnvloed (Jayanegara *et al.*, 2018) of verbeterd (Kim *et al.*, 2020), waarvan de laatste mogelijk te wijten is aan een verlaagde DS-opname (Illius en Allen, 1994).

Omdat de aanbevolen voederconcentratie van 3-NOP erg laag is, is de CO₂-uitstoot die gepaard gaat met de productie en het transport ervan ook erg laag. Op basis van de CO₂-emissies van de productie van 3-NOP (Feng en Kebreab, 2020) en de gemiddelde DS-opname, CH₄-productie en 3-NOP-dosis, wordt geschat dat de extra uitstoot van broeikasgassen in verband met de productie en het transport van 3-NOP tussen 1,8 en 5,3% van de daling van de CH₄-emissies die het zou veroorzaken. Nkemka *et al.* (2019) hebben geen effecten op de mestemissie van broeikasgassen als gevolg van het voeren van 3-NOP waargenomen.

Chemische remmers kunnen eenvoudig worden gecombineerd met andere mitigatiestrategieën. Hun goedkeuring vereist dat ze veiligheidstests doorstaan voor dieren, consumenten en het milieu. Bij het dier wordt 3-NOP-koolstof grotendeels gemetaboliseerd tot CO₂, koolhydraten, vetzuren en aminozuren, waarbij minder dan 5% van de oorspronkelijke verbinding wordt uitgescheiden in de

urine (Thiel *et al.*, 2019a). Mutageen en genotoxisch potentieel werden niet gevonden (Thiel *et al.*, 2019b). Chemische remmers van methanogenese hebben goedkeuring nodig van overheidsinstanties, die onlangs is verleend voor 3-NOP in Brazilië, Chili en de Europese Unie, en wordt overwogen in andere landen (Yu *et al.*, 2021). In Vlaanderen is 3-NOP erkend als voederadditief en opgenomen in een ecoregeling. In de biologische veehouderij mag het evenwel niet toegepast worden.

Onderzoek naar de ontdekking van nieuwe chemische remmers is aan de gang (Henderson *et al.*, 2018). De grootste hindernissen voor de wijdverbreide acceptatie van 3-NOP of andere toekomstige chemische remmers, zijn de extra voederkosten als gevolg van hun opname in diervoeders, als er geen consistente productiviteitsvoordelen worden verkregen, en de moeilijkheid om de vereiste dosis aan grazende herkauwers in extensieve productiesystemen in een formaat dat gedurende langere perioden werkt (Hegarty *et al.*, 2021; Ungerfeld *et al.*, 2022).

Zeewieren

Macroalgen (zeewieren) hebben een zeer variabele chemische samenstelling, afhankelijk van de soort, het tijdstip van verzameling en de groeiomgeving, en ze kunnen bioactieve componenten bevatten die methanogenese remmen. Rode zeewieren zoals *Asparagopsis taxiformis* en *Asparagopsis armata* accumuleren gehalogeneerde verbindingen, waarvan bromoform de meest voorkomende is (Machado *et al.*, 2016). Methaan-gehalogeneerde analogen reageren met vitamine B12 om de laatste stap van methanogenese in methanogene archaea te blokkeren (Wood *et al.*, 1968). Andere zeewieren bevatten polysacchariden, eiwitten, peptiden, bacteriocines (geproduceerd door oppervlakte-geassocieerde bacteriën), lipiden, florotannines, saponinen en alkaloiden waarvan bekend is dat ze de CH₄-productie verminderen door archaea en protozoa te onderdrukken, en in sommige gevallen een ongewenste afname van de afbreekbaarheid van voedingsstoffen veroorzaken (Abbott *et al.*, 2020).

In vivo-onderzoeken met schapen, ossen en melkkoeien meldden dosis- en dieetafhankelijke afnames tussen 9 en 98% van de CH₄-productie door *Asparagopsis* aan het dieet toe te voegen (Li *et al.*, 2018; Roque *et al.*, 2019a, 2021; Kinley *et al.*, 2020; Stefanoni *et al.*, 2021). Een substantiële daling van de CH₄-opbrengst voor vleesvee werd bevestigd in een meta-analyse (Lean *et al.*, 2021). De werkzaamheid van *Asparagopsis* voor CH₄-mitigatie hangt af van de concentratie bromoform, die varieert van 3,0 tot 51,0 mg/kg DS-opname (Kinley *et al.*, 2020; Roque *et al.*, 2019a, 2021; Stefanoni *et al.*, 2021). Bovendien kan *Asparagopsis* effectiever zijn in het verlagen van de CH₄-productie met een groot aandeel krachtvoer in het rantsoen dan met rantsoenen met veel ruwvoer (Roque *et al.*, 2021). Er zijn voorlopige zorgen dat *Asparagopsis* op de lange termijn zijn effect verliest (Hristov *et al.*, 2022). Studies naar de werkzaamheid van andere zeewieren op de CH₄-productie zijn meestal beperkt tot *in vitro*-omstandigheden (Abbott *et al.*, 2020), hoewel de belangstelling groeit.

Voedersuppletie met *Asparagopsis* verminderde de voeropname op een dosisafhankelijke manier in de meeste maar niet alle experimenten. Een meta-analyse van experimenten die *Asparagopsis* of bruine algen aanvulden, rapporteerde geen effecten op DMI of ADG en, afhankelijk van de schattingsmethode, een significante of numerieke afname van de verhouding voeding/lichaamsmassa en toename van de melkgift (Lean *et al.*, 2021). Suppletie met *Asparagopsis* bleek de voerefficiëntie te verhogen in enkele kleinschalige onderzoeken naar vleesvee (Kinley *et al.*, 2020; Roque *et al.*, 2021). Er waren geen effecten van de opname van *Asparagopsis* in het dieet op de karkaskwaliteit, vleeskwaliteit of smaak (Kinley *et al.*, 2020; Roque *et al.*, 2021), hoewel een mogelijke afname van de houdbaarheid van rundvlees werd gemeld bij een hoge dosis van inclusie van *Asparagopsis* (Bolkenov *et al.*, 2021). Het effect van opname van *Asparagopsis* op de mestemissie is niet bekend.

Langdurige orale blootstelling van dieren aan hoge concentraties bromoform kan lever- en darmtumoren veroorzaken. Vandaar dat de EPA (2000) de stof classificeerde in groep B2: waarschijnlijk carcinogeen voor de mens. Binnen de gebruikte voederconcentraties (<0,5% van zeewier/DS-opname) werden geen bromoformresiduen gedetecteerd in melk, vlees, vet, organen of uitwerpselen van schapen en runderen of melkvee die *Asparagopsis* kregen (Li *et al.*, 2018; Kinley, *et al.*, 2020; Roque *et al.*, 2019a, 2021). Muizelaar *et al.* (2021), zonder controledieren in hun studie, meldde de transfer van bromoform naar melk bij niet-aangepaste melkkoeien. Bromoform werd echter niet gedetecteerd in melk na 10 dagen continu voeren van *Asparagopsis* op welk suppletieniveau dan ook, wat de mogelijkheid vergroot dat microbiële aanpassing een rol kan spelen bij het verminderen van de stroom bromoform in melk. In een *in vitro*-onderzoek werd bromoform binnen 12 uur na incubatie afgebroken, met dibroommethaan als belangrijkste afbraakproduct (Romero *et al.*, 2022). Ophoping van jodium en bromide in melk (Stefenoni *et al.*, 2021) en jodium in vlees (Roque *et al.*, 2021) is gemeld bij dieren die *Asparagopsis* kregen. Uitgaande van een jodiumconcentratie in melk van 3 mg/l, zoals gerapporteerd door Stefenoni *et al.* (2021) voor koeien aangevuld met *Asparagopsis*, schatten Lean *et al.* (2021) een jodiumconsumptie die 15 keer hoger was dan het maximaal toelaatbare voor kinderen jonger dan 3 jaar die 1 liter melk per dag drinken. Verdere residu- en veiligheidsstudies zijn nodig, inclusief effecten op de orgaanhistologie van behandelde dieren (Glasson *et al.*, 2022). Voor andere zeewieren zijn potentiële toxiciteit en residuen in vlees en melk afhankelijk van het gehalte aan giftige mineralen en de mate van opname van zeewier in het dieet.

De broeikasgasemissies van het op grote schaal telen, oogsten, verwerken (drogen), opslaan en transporteren van zeewier moeten in een LCA worden meegenomen om het netto-effect op de broeikasgasintensiteit van vlees- en melkproductie te bepalen. Er is ook potentieel om bioactieve stoffen uit zeewier te zuiveren of te extraheren, wat de emissies gerelateerd aan drogen en transport zou verminderen. De potentiële wereldwijde aantasting van de ozonlaag in de stratosfeer werd als relatief klein geschat voor de groeiomstandigheden van Australische *Asparagopsis* (Jia *et al.*, 2022), maar er moet rekening worden gehouden met de gevolgen voor de aquatische biodiversiteit als *Asparagopsis* rechtstreeks uit de oceaan zou worden geoogst. Aan de andere kant kan zeewierteelt resulteren in netto CO₂-fixatie en een deel van de koolstof exporteren naar de diepzee, waar het kan worden begraven in sedimenten (Duarte *et al.*, 2017). Ridoutt *et al.* (2022) schatten dat het opnemen van *Asparagopsis* in de voeding van de Australische weidegronden substantieel zou kunnen bijdragen aan het verminderen van de netto-uitstoot van broeikasgassen door de sector met grazend vee.

Bijgevolg hangt de acceptatie van *Asparagopsis* af van het vermogen om de algen duurzaam te laten groeien in aquacultuur of mariene systemen met een consistente concentratie van de actieve verbindingen, die moeten worden gehandhaafd tijdens het transport, de hantering, de opslag en het voeren van dieren. Concentraties van mineralen zoals jodium moeten worden gecontroleerd, zodat de overdracht naar dierlijke producten de veilige limieten niet overschrijdt. Bovendien moet het voeren van *Asparagopsis* mogelijk worden goedgekeurd door regelgevende instanties voordat het op grote schaal wordt toegepast. Het opnemen van andere zeewieren in de voeding van herkauwers kan voor de consument acceptabel zijn als er geen risico op toxiciteit is en er geen bijmaak in vlees of melk is. Er is meer *in vivo* onderzoek nodig om CH₄-mitigatie en productiviteitsveranderingen te bepalen onder verschillende rantsoen- en managementomstandigheden voor zowel bromoform-bevattende als andere zeewieren (Lean *et al.*, 2021). Het gebruik van macroalgen als een antimethanogene strategie kan haalbaar zijn in gesloten en gemengde systemen, maar het is waarschijnlijk een uitdaging om te implementeren in extensieve begrazingssystemen.

Alternatieve elektronenacceptoren

Alternatieve elektronenacceptoren zijn organische (bv. fumaraat, malaat) en anorganische (bv. nitraat, sulfaat) verbindingen die elektronen wegtrekken van methanogenese en deze opnemen in alternatieve routes. Organische elektronenacceptoren zijn pensfermentatietussenproducten die worden gemetaboliseerd tot vluchtig vetzuur (voornamelijk propionzuur), dat kan worden opgenomen en gebruikt door het dier (Carro en Ungerfeld, 2015). Wanneer het volledig is gereduceerd tot ammonium, wordt nitraat opgenomen in microbiële eiwit en ook geabsorbeerd door de penswand en omgezet in ureum in de lever en nieren (Yang *et al.*, 2016). Sulfaat wordt gereduceerd tot waterstofsulfide (dissimilerende reductie) en verdreven, en wordt ook opgenomen in de synthese van microbiële zwavelhoudende aminozuren (assimilerende reductie; Drewnoski *et al.*, 2014).

Over het algemeen variëren de *in vivo* effecten van malaat en fumaraat op de enterische CH₄-productie van geen effecten in sommige onderzoeken tot milde of matige effecten (10 tot 23%) in andere (Carro en Ungerfeld, 2015). De gemiddelde daling van de CH₄-productie in 56 behandelingsmiddelen uit 24 onderzoeken waarin nitraat werd gesupplementeerd, werd geschat op 13,9% bij de gemiddelde nitraatdosis (16,7 g/kg DS), met een grotere werkzaamheid bij melkvee dan bij vleesvee (Feng *et al.*, 2020). De meta-analyse van Arndt *et al.* (2022) ontdekten dat de opname van fumaraat en nitraat als respectievelijk organische en anorganische elektronenacceptoren de totale CH₄-productie met respectievelijk 16 en 17% verminderde. Nitraatsuppletie verminderde de CH₄-intensiteit voor groei en melkproductie met respectievelijk 12 en 15%, en veroorzaakte ook een lichte daling van de DS-opname van 3% zonder de dierlijke productie te beïnvloeden. Suppletie met fumaraat had geen invloed op de CH₄-intensiteit van de melkproductie en er was geen informatie over het effect ervan op de CH₄-intensiteit van de toename van het lichaamsgewicht.

Nitraat kan in de pens gedeeltelijk worden omgezet in N₂O en worden uitgescheiden (Petersen *et al.*, 2015). Lachgas is een zeer krachtig broeikasgas; daarom kan suppletie met nitraat om de CH₄-emissies te verminderen effecten hebben op de emissies van andere broeikasgassen. Bovendien, als nitraat wordt toegevoegd aan een rantsoen dat reeds voldoende eiwit/stikstof bevat, zal de extra N worden afgevoerd naar het milieu en de N₂O-emissies naar de atmosfeer verhogen en het grondwater verontreinigen met nitraat. Nitraatsuppletie komt de productiviteit van dieren niet ten goede, tenzij toegevoegd aan een N-deficiënt dieet (Yang *et al.*, 2016), zoals vaak het geval is in tropische en subtropische gebieden, maar niet in onze contreien.

Nitriet is een tussenproduct bij de reductie van nitraat dat door de penswand kan worden opgenomen en kan reageren met hemoglobine om methemoglobine te vormen, dat geen zuurstof kan transporteren. Deze aandoening kan dodelijk zijn, hoewel het mogelijk is om de pens geleidelijk aan aan te passen aan nitraatsuppletie (Lee en Beauchemin, 2014; Yang *et al.*, 2016). De microbiële omzetting van nitraat naar nitriet verloopt steeds sneller dan de verdere omzetting van nitriet naar ammonium. Hierdoor is er steeds een reëel risico dat bij toedienen van nitraat, nitrietvergiftiging optreedt. Sporen van nitraat kunnen terechtkomen in melk (Guyader *et al.*, 2016) en weefsels (Doreau *et al.*, 2018), maar worden als veilig beschouwd voor de consument. Nitraatvoeding aan dieren is niet goedgekeurd in Noord-Amerika (Beauchemin *et al.*, 2020), maar koolstofkredieten kunnen worden verkregen door nitraat aan rundvlees te voeren in Australië (<https://www.legislation.gov.au/Details/F2015C00580>). Vanwege de risico's op acute toxiciteit kan nitraatsuppletie alleen worden aanbevolen in productiesystemen waar de voeropname nauwlettend wordt gecontroleerd. In Vlaanderen is toedienen van nitraat een erkende methaanreducerende maatregel binnen een coregeling.

Het gebruik van nitraat (bijvoorbeeld calciumnitraat) als een bron van niet-eiwit N is meestal duurder dan ureum (Callaghan *et al.*, 2014). Op dit moment kan de toepassing van nitraat als een antimethanogene strategie in sommige gevallen haalbaar zijn, maar deze is grotendeels afhankelijk van de prijsstelling op de koolstofmarkt, beperking van ammoniak- en N₂O-emissies uit mest en de beschikbaarheid van veilige procedures voor de levering van voer.

Er zijn weinig onderzoeken naar nitraatsuppletie bij zuiver grazende dieren. Waar het vee kon grazen, werd het nitraat gemengd aangeboden met aanzienlijke hoeveelheden krachtvoer (van Wyngaard *et al.*, 2018, 2019; Granja-Salcedo *et al.*, 2019). Voedergewassen met een hoog nitraatgehalte zijn meestal onderzocht vanuit het perspectief dat ze toxiciteit (nitriet) veroorzaken.

Essentiële oliën

Essentiële oliën zijn complexe mengsels van vluchtige lipofiele secundaire metabolieten die verantwoordelijk zijn voor de karakteristieke smaak en geur van een plant (Benchaar en Greathead, 2011). Wanneer geëxtraheerd en geconcentreerd, of chemisch gesynthetiseerd, kunnen essentiële oliën antimicrobiële activiteiten uitoefenen tegen bacteriën en schimmels (Chao *et al.*, 2000). Chemisch gezien zijn etherische oliën variabele mengsels van voornamelijk terpenoïden en een verscheidenheid aan laagmoleculaire alifatische koolwaterstoffen, zuren, alcoholen, aldehyden, acyclische esters of lactonen, en bij uitzondering N- en S-bevattende verbindingen, coumarinen en homologen van fenylpropanoïden (Dorman en Deans, 2000).

De meeste essentiële oliën oefenen hun antimicrobiële activiteiten uit door interactie met processen die verband houden met het bacteriële celmembraan, waaronder elektronentransport, iongradiënten, eiwittranslocatie, fosforylering en andere enzymafhankelijke reacties (Dorman en Deans, 2000). Gram-positieve bacteriën blijken gevoeliger te zijn voor de antibacteriële eigenschappen van essentiële oliën dan gram-negatieve bacteriën. Fenolische verbindingen [bijvoorbeeld thymol en carvacrol in sommige essentiële oliën (bijvoorbeeld tijm en oregano)] kunnen echter de groei van gramnegatieve bacteriën remmen door het buitenste celmembraan te verstoren (Helander *et al.*, 1998). Gram-positieve bacteriën in de pens zijn betrokken bij fermentatieprocessen gekoppeld aan de productie van CH₄ door de afgifte van H₂ (Owens en Goetsch, 1988).

Van etherische oliën zoals oregano, tijm, knoflookolie en zijn derivaten is aangetoond dat ze de CH₄-productie *in vitro* verminderen (Cobellis *et al.*, 2016), maar de resultaten van *in vivo*-onderzoeken waren veel minder overtuigend (Benchaar en Greathead, 2011; Hristov *et al.*, 2022). In beperkte *in vivo*-onderzoeken is aangetoond dat commerciële producten die verschillende essentiële oliën bevatten, de CH₄-productie verminderen. Een commercieel product van oregano-olie (Orego Stim, Meriden Animal Health Ltd.) en een extract van groene thee, en hun mengsel, bijvoorbeeld, gevoerd aan lacterende melkkoeien, had geen invloed op de totale CH₄-productie of CH₄-intensiteit, maar verminderde de CH₄-opbrengst met tussen de 16 en 22% (Kolling *et al.*, 2018). Het voeren van 15 g/dag van een commercieel product met citrusextract en allicine uit knoflook (Mootral GmbH) aan jonge ossen verminderde de enterische CH₄-opbrengst pas met 23% na 12 weken suppletie, maar de persistentie van de daling daarna werd niet bepaald (Roque *et al.*, 2019b). Een afname van 9% van de absolute CH₄-productie in langetermijnstudies werd gemeld in een meta-analyse voor een mengsel van koriander, eugenol, geranylacetaat en geraniol (Agolin Ruminant; Agolin SA) wanneer het aan melkkoeien werd gevoerd aan een dosis van 1 g/d (Belanche *et al.*, 2020).

Van sommige etherische oliën en hun verbindingen is gemeld dat ze de afbraak van voedingseiwitten *in vitro* verminderen, maar *in vivo*-onderzoeken zijn inconsistent (Cobellis *et al.*, 2016). Als deze afname gepaard gaat met een afname van de urinaire N-excretie, kunnen mogelijke afnames van N₂O en ammoniak optreden. Over het algemeen heeft het voeren van de meeste essentiële oliën aan herkauwers geen negatieve invloed op de productiviteit van dieren of de kwaliteit van het product (melk, vlees) (Benchaar *et al.*, 2009); in sommige gevallen zijn verbeteringen gemeld (Belanche *et al.*, 2020). Er zijn echter ook nadelige effecten van sommige etherische oliën op de vertering van voer gemeld (Benchaar *et al.*, 2009; Cobellis *et al.*, 2016). Als de voervertering onder druk staat, kunnen ook de hoeveelheid en de samenstelling van de uitgescheiden mest en de bijbehorende emissies toenemen. Het is mogelijk dat essentiële oliën worden overgedragen op dierlijke producten, wat de organoleptische eigenschappen van vlees en melk kan aantasten.

Bij doseringen die algemeen worden aanbevolen, is de kans dat etherische oliën giftig zijn voor dieren klein. Voorzichtigheid is echter geboden, vooral als essentiële oliën in hoge doses worden toegediend. Sommige etherische olieverbindingen zoals estragol en methyleugenol hebben genotoxische eigenschappen vertoond (Burt, 2004) en kunnen mogelijk irriterend zijn en allergische dermatitis veroorzaken tijdens het hanteren. Van de zwavelhoudende verbindingen in knoflook is aangetoond dat ze verantwoordelijk zijn voor hemotoxische effecten bij vleesvee (Rae, 1999). Van organische zwavelverbindingen uit knoflook is bekend dat ze celbeschadiging veroorzaken (Amagase, 2006).

Essentiële oliën hebben een breed spectrum aan antimicrobiële activiteit, waardoor het moeilijk is om specifieke microbiële groepen aan te pakken om nadelige effecten op de vertering van voer in de pens te voorkomen. De uitdaging blijft om essentiële oliën te identificeren met een redelijk consistente samenstelling die selectief de methaanvorming in de pens remmen, met blijvende effecten en zonder de vertering van voer en de productiviteit van dieren te onderdrukken. Omdat etherische oliën zeer vluchtig zijn, zijn de meeste commerciële producten gecoat en geformuleerd om de afgifte van het actieve ingrediënt te beheersen zodra ze aan het rantsoen van het dier zijn toegevoegd. Sommige essentiële oliën zijn echter onstabiel en hun werkzaamheid kan ook worden beïnvloed door onjuiste opslag of blootstelling aan hitte tijdens productieprocessen van diervoeders, zoals extrusie of pillering.

Er is behoefte aan meer *in vivo* studies om de werkzaamheid van etherische oliën te bepalen. Het assortiment beschikbare etherische oliën is uitgebreid (>3.000) en er is meer werk nodig om de meest effectieve te identificeren om de enterische CH₄-productie te verminderen. Veel van de concentraties die *in vitro* effecten hebben laten zien, zijn te hoog voor *in vivo* toepassingen; daarom is meer onderzoek gerechtvaardigd om optimale doses onder verschillende voederomstandigheden te bepalen. Bovendien zijn de *in vivo* verkregen gunstige effecten niet zo uitgesproken als die *in vitro*, mogelijk als gevolg van microbiële aanpassing. Bijgevolg zijn verdere dierstudies op lange termijn nodig om te onderzoeken in hoeverre microben zich aanpassen aan deze stoffen. Er is ook meer werk nodig om de overdracht van etherische oliën in dierlijke producten en het potentiële effect op de vlees- en melkkwaliteit te beoordelen. Er zijn mogelijkheden om te combineren met andere mitigatiestrategieën met verschillende of vergelijkbare werkingsmechanismen.

Tannines en saponinen

Verschillende secundaire plantenstoffen, waaronder tannines en saponinen, zijn geëvalueerd op hun potentieel om de CH₄-productie van herkauwers te verminderen (Jayanegara *et al.*, 2012; Kozłowska *et al.*, 2020).

Tannines zijn polyfenolische plantaardige stoffen met affiniteit om zich te binden aan eiwitten en andere verbindingen. Er bestaan gecondenseerde en hydrolyseerbare tannines, en van beide soorten tannines is aangetoond dat ze antimethanogene effecten uitoefenen, direct door sommige methanogenen te remmen en indirect door het aantal protozoa te verminderen, die symbiotisch gastheer zijn van methanogenen (Aboagye en Beauchemin, 2019). Een deel van de afname van CH₄ kan ook het gevolg zijn van een afname van de DS-opname en de verteerbaarheid van voedingsstoffen, wat een ongewenste invloed kan hebben op de dierlijke productie.

Er is een groeiende hoeveelheid literatuur die aangeeft dat tannines de CH₄-productie verminderen, zij het met zeer variabele reacties, afhankelijk van de bron, het type en het molecuulgewicht van de tannines en de methanogene gemeenschap die in het dier aanwezig is (Aboagye en Beauchemin, 2019). Een meta-analyse van *in vivo* onderzoeken wees op een lineaire afname van de CH₄-opbrengst van 3,53% (R² = 0,47) bij elke toevoeging van 10 g/kg DS. De afname van de CH₄-opbrengst ging echter gepaard met een afname van de OS-verteerbaarheid van 2,6% per 10 g/kg DS-toevoeging. Hoewel een deel van het CH₄-afname-effect door tannines kon worden toegeschreven aan het feit dat er minder OS werd verteerd, nam ook de CH₄-productie op verteerbare OS-basis af (Jayanegara *et al.*, 2012). Laagmoleculaire hydrolyseerbare tannines (en hun subeenheid galluszuur) lijken effectiever te zijn dan hoogmoleculaire gecondenseerde tannines bij het verminderen van de CH₄-emissies zonder de verteerbaarheid negatief te beïnvloeden (Aboagye en Beauchemin, 2019). Hydrolyseerbare tannines zijn echter vatbaar voor microbiële hydrolyse in de darm, waarbij metabolieten worden geproduceerd die na absorptie toxische effecten op het dier kunnen veroorzaken (McSweeney *et al.*, 2001). Er moet dus voorzichtigheid worden betracht bij het voeren van hoge (d.w.z. >30 g/kg DS) concentraties tannines, vooral hydrolyseerbare tannines.

Er is interesse om het rantsoen van niet-grazende dieren aan te vullen met geconcentreerde extracten van tanninehoudende struiken en bomen [bv. *Acacia mearnsii*, kastanje (*Castanea spp.*) en quebracho (*Schinopsis balansae*); Aboagye en Beauchemin, 2019]. Vlaams *in vitro* onderzoek (Biomora) toonde echter aan dat het sterke methaanreducerend effect van kastanjebladeren (gevroesdroogd) niet gelinkt kan worden aan tannines, maar wellicht aan andere plantactieve componenten.

Een ander belangrijk milieuvoordeel van tannines in het voeder is hun vermogen om het N-gebruik bij herkauwers te verbeteren (Jayanegara *et al.*, 2012). Tannines binden voedingseiwitten in het maagdarmkanaal, wat het N-gebruik kan verbeteren, N-verliezen via de urine kan verminderen en ammoniak- en N₂O-emissies uit uitwerpselen kan verminderen (Hristov *et al.*, 2022). Bijgevolg moet een LCA-benadering worden gebruikt bij het evalueren van tannines als strategie voor het beperken van broeikasgassen. Er moet ook rekening mee worden gehouden dat tannines in de voeding de verteerbaarheid van voedingsstoffen kunnen verminderen, vooral van eiwitten. Dit kan vooral belangrijk zijn bij grazende dieren in de tropen en subtropen, waar weilanden vaak een tekort aan N hebben (Waghorn, 2008).

Hoewel er substantieel bewijs is dat tannines de enterische CH₄-productie verminderen, zijn er meer diervoedingsonderzoeken nodig om de optimale concentraties van verschillende bronnen van gecondenseerde en hydrolyseerbare tannines te identificeren. Verdere effecten op DS-opname, verteerbaarheid, prestaties en gezondheid van dieren (bv. het voorkomen van trommelzucht en het

beheersen van parasieten) en producten (bv. effecten op de biohydrogenering van vetzuren in de pens; Waghorn, 2008; Patra en Saxena, 2011; Tedeschi *et al.*, 2014; Aboagye en Beauchemin, 2019) moeten ook worden overwogen. Er is een gebrek aan informatie beschikbaar over de vraag of het combineren van tannines met andere mitigatiestrategieën additieve effecten op mitigatie heeft.

Saponinen zijn structureel diverse moleculen die zijn onderverdeeld in 2 groepen: triterpeen- en steroïdeglycosiden. De belangrijkste bronnen van saponinen in het voeder van herkauwers zijn afkomstig van *Yucca schidigera*, *Quillaja saponaria*, *Camellia sinensis* en *Medicago sativa* (Jayanegara *et al.*, 2014). Het antimethanogene effect van saponinen is voornamelijk het gevolg van een remming van protozoën in de pens en geassocieerde methanogenen, met als gevolg bevordering van de productie van propionzuur (Adegbeye *et al.*, 2019). Het CH₄-mitigerende effect van saponinen is zeer variabel, afhankelijk van de bron, chemische structuur, dosis saponinen, voedingssamenstelling en waarschijnlijkheid dat de pensmicroben zich aanpassen om saponinen af te breken. Een meta-analyse van in-vitro-onderzoeken gaf aan dat CH₄ (ml/g DS) afnam met toenemende dosis saponinen (Jayanegara *et al.*, 2014). Veel in-vitro-onderzoeken hebben relatief hoge doseringen geëvalueerd, maar hoge concentraties saponinen (>5% DS) en steroïde saponinen van sommige planten kunnen giftig zijn voor dieren. Extrapolatie van de *in vitro* resultaten van Jayanegara *et al.* (2014) geeft aan dat een daling van de CH₄-opbrengst met 1,32% zou worden verwacht per 10 g/kg DS toevoeging aan de voeding, maar met een aanzienlijke variatie in de CH₄-reductie bij de lage concentraties saponinen die doorgaans worden gehanteerd in het rantsoen van herkauwers. Relatief weinig *in vivo*-onderzoeken hebben het gebruik van saponinen voor CH₄-mitigatie onderzocht en de resultaten waren wisselend. Saponinen kunnen een klein of matig antimethanogeen effect uitoefenen bij praktische voederdosissen, maar er zijn meer diervoederstudies nodig om de optimale concentraties van verschillende saponinebronnen te identificeren. Bovendien kunnen saponinen de N-benuttingsefficiëntie verbeteren en bijgevolg milieuvoordelen opleveren door de uitstoot van ammoniak en N₂O uit mest te verminderen (Yurtseven *et al.*, 2018).

Direct gevoederde microbiële stoffen

Direct gevoederde microbiële stoffen zijn levende micro-organismen die, wanneer ze worden ingenomen, de pensfermentatie kunnen wijzigen. Ze worden meestal toegevoegd aan rantsoenen om de vezelvertering te verbeteren of het melkzuurmetabolisme te verbeteren om de pens-pH te stabiliseren, maar er is ook onderzocht of ze CH₄ kunnen verminderen. Direct gevoederde microbiële stoffen kunnen metabole waterstof omleiden naar alternatieve routes dan methaanvorming; bijvoorbeeld productie van melkzuur, succinaat of propionzuur, reductieve azijnzuurvorming of anaerobe ademhaling (Jeyanathan *et al.*, 2014). Een andere benadering is het gebruik van bacteriën die de groei van methanogenen remmen (Jeyanathan *et al.*, 2014). Gisten en de draadschimmel *Aspergillus oryzae* zijn ook onderzocht op hun effecten op de CH₄-productie (Jeyanathan *et al.*, 2014).

De effecten van gisten, *A. oryzae* en melkzuurbacteriën op de CH₄-productie zijn variabel, wat te verwachten is omdat ze niet zijn geselecteerd vanwege hun vermogen om de CH₄-productie te verminderen (Jeyanathan *et al.*, 2014). Ze kunnen echter de melkgift bevorderen (Hristov *et al.*, 2013a) en zo de CH₄-intensiteit verlagen. In *in vitro* culturen heeft de toevoeging van sommige propionbacteriënstammen geleid tot een kleine afname van de CH₄-productie (Alazzeh *et al.*, 2012), terwijl sommige fumaraatreductoren hebben geleid tot een sterkere afname van CH₄ (Kim *et al.*, 2016). Reductieve azijnzuurvormers hadden minimale of geen effecten op *in vitro* pensfermentatie, tenzij tegelijkertijd methaanvorming werd geremd (Nollet *et al.*, 1997).

Hoewel sommige cocultuur- en gemengde cultuurexperimenten proof-of-concept-resultaten hebben opgeleverd dat direct gevoederde microbiële stoffen de CH₄-emissies kunnen verminderen, zijn deze resultaten zelden *in vivo* bevestigd. Dit kan worden verklaard door de hoge doses direct gevoederde microbiële stoffen die *in vitro* kunnen worden bestudeerd maar *in vivo* niet van toepassing zijn. *In vivo* experimenten met propionbacteriën die aan ossen werden gevoerd, vonden geen effecten (Vyas *et al.*, 2014b, 2016) of een lichte daling van de CH₄-opbrengst (Vyas *et al.*, 2014a).

Direct gevoederde microbiële stoffen kunnen mogelijk synergetisch werken met andere strategieën, zoals chemische remmers van methaanvorming (3-NOP), aangezien opgehoopt H₂ als gevolg van de remming van methaanvorming kan worden opgenomen in gunstige routes, zoals reductieve azijnzuurvorming (Nollet *et al.*, 1997). Nitraat- en nitrietreducerende bacteriën zijn samen met nitraat aan *in vitro* culturen in de pens toegevoegd om de CH₄-productie te remmen en tegelijkertijd de nitraatreductie tot ammonium te verbeteren, waarbij nitrietaccumulatie wordt vermeden (Jeyanathan *et al.*, 2014). Deze aanpak resulteerde echter alleen in een numerieke afname van de plasmanitrietconcentratie bij schapen (de Raphélis-Soissan *et al.*, 2014).

Er is een gebrek aan informatie over de effecten van direct gevoederde microbiële stoffen op de prestaties van dieren in experimenten waarbij een afname van de CH₄-productie werd waargenomen. In de studie van Vyas *et al.* (2014a) waarin suppletie met propionbacteriën een kleine daling van de CH₄-opbrengst veroorzaakte, werden geen effecten op de productiviteit van dieren waargenomen. De effecten op stroomopwaartse emissies van andere broeikasgassen die verband houden met het kweken, opslaan en transporteren van direct gevoederde microbiële stoffen zijn vermoedelijk laag. Effecten op verteerbaarheid en mestsamenstelling, en emissies van CH₄ en N₂O uit mest zijn onbekend en zouden voor elke direct gevoerde microbiële stof moeten worden onderzocht.

Veel direct gevoederde microbiële stoffen zijn goedgekeurd voor diervoeding en in de handel verkrijgbaar. Direct gevoederde microbiële stoffen kunnen worden gebruikt in productiesystemen waar dieren dagelijks worden bijgevoerd, aangezien het onwaarschijnlijk is dat de meeste ervan in de pens blijven bestaan, maar ze zijn mogelijk minder veelbelovend voor extensieve productiesystemen. Preparaten van direct gevoederde microbiële stoffen moeten levensvatbaar blijven en gemakkelijk en praktisch te gebruiken, op te slaan en te vervoeren zijn. Elke direct gevoederde microbiële stof die *in vivo* effectief blijkt te zijn, vereist ook toegepast onderzoek om de optimale dosis, frequentie en wijze van toediening vast te stellen.

Samenvatting van mitigatiestrategieën

Onderzoek op het gebied van het terugdringen van enterisch methaan is de afgelopen twee decennia exponentieel gegroeid. Veel van dat onderzoek is uitgevoerd in gangbare omstandigheden, veelal met staldieren die geen toegang hebben tot een uitloop en bijgevolg ook niet grazen. Vanuit een gangbare intensiveringslogica, mist het bovenal vaak een specifieke biologische bril die systeembreed kijkt. Het merendeel van de landbouwkundige herkauwers wereldwijd graast, veelal extensief.

Mitigatiestrategieën voor grazende dieren, waaronder dus biologisch gehouden herkauwers, zijn slechts beperkt onderzocht. Bovendien veronderstellen veel van de voorgestelde maatregelen bijvoeding met bepaalde additieven wat ze de facto niet toepasbaar maakt voor (extensieve) veehouderijsystemen met (veel) begrazing.

Niet alle van de theoretisch beschikbare strategieën en middelen zijn dus toepasbaar bij biologische herkauwers: soms voldoen ze niet aan de wettelijke normen, soms druisen ze in tegen de biologische principes, of soms botsen ze op praktische bezwaren, bv. het niet vlot beschikbaar zijn van de biologische variant van bepaalde grondstoffen.

Referenties

- Abbott, D. W., I. M. Aasen, K. A. Beauchemin, F. Grondahl, R. Gruninger, M. Hayes, S. Huws, D. A. Kenny, S. J. Krizsan, S. Kirwan, V. Lind, U. Meyer, M. Ramin, K. Theodoridou, D. von Soosten, P. Walsh, S. Waters, en X. Xing. 2020. Seaweed and sea-weed bioactives for mitigation of enteric methane: Challenges and opportunities. *Animals (Basel)* 10:2432. <https://doi.org/10.3390/ani10122432>.
- Abdalla Filho, A. L., P. S. Corrêa, L. N. Lemos, D. Dineshkumar, J. Issakowicz, E. H. Ieda, P. M. T. Lima, M. Barreal, C. McManus, T. S. Mui, A. L. Abdalla, en H. Louvandini. 2017. Diets based on plants from Brazilian Caatinga altering ruminal parameters, microbial community and meat fatty acids of Santa Inês lambs. *Small Rumin. Res.* 154:70–77. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2017.07.005>.
- Aboagye, I. A., en K. A. Beauchemin. 2019. Potential of molecular weight and structure of tannins to reduce methane emissions from ruminants: A review. *Animals (Basel)* 9:856. <https://doi.org/10.3390/ani9110856>.
- Adegbeye, M. J., M. M. Elghandour, J. C. Monroy, T. O. Abegunde, A. Z. Salem, A. Barbabosa-Pliego, en T. O. Faniyi. 2019. Potential influence of Yucca extract as feed additive on greenhouse gases emission for a cleaner livestock and aquaculture farming - A review. *J. Clean. Prod.* 239:118074. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118074>.
- Alazzeh, A. Y., H. Sultana, K. A. Beauchemin, Y. Wang, H. Holo, O. M. Harstad, en T. A. McAllister. 2012. Using strains of Propionibacteria to mitigate methane emissions *in vitro*. *Acta Ag-ric. Scand. A Anim. Sci.* 62:263–272. <https://doi.org/10.1080/09064702.2013.773056>.
- Alemu, A. W., H. Janzen, S. Little, X. Hao, D. J. Thompson, V. Baron, A. Iwaasa, K. A. Beauchemin, en R. Kröbel. 2017. Assessment of grazing management on farm greenhouse gas intensity of beef production systems in the Canadian Prairies using life cycle assessment. *Agric. Syst.* 158:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.08.003>.
- Amagase, H. 2006. Clarifying the real bioactive constituents of garlic. *J. Nutr.* 136:716S–725S. <https://doi.org/10.1093/jn/136.3.716S>.
- Appuhamy, J. A. D. R. N., A. B. Strathe, S. Jayasundara, C. Wagner-Riddle, J. Dijkstra, J. France, en E. Kebreab. 2013. Antimethanogenic effects of monensin in dairy and beef cattle: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 96:5161–5173. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5923>.
- Arikan, O. A., W. Mulbry, C. Rice, en S. Lansing. 2018. The fate and effect of monensin during anaerobic digestion of dairy manure under mesophilic conditions. *PLoS One* 13:e0192080. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192080>.
- Arndt, C., A. N. Hristov, W. J. Price, S. C. McClelland, A. M. Pelaez, S. F. Cueva, J. Oh, J. Dijkstra, A. Bannink, A. R. Bayat, L. A. Crompton, M. A. Eugène, D. Enahoro, E. Kebreab, M. Kreuzer, M. McGee, C. Martin, C. J. Newbold, C. K. Reynolds, A. Schwarm, K. J. Shingfield, J. B. Veneman, D. R. Yáñez-Ruiz, en Z. Yu. 2022. Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5°C target by 2030 but not 2050. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 119:e2111294119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111294119>.
- Arndt, C., J. M. Powell, M. J. Aguerre, P. M. Crump, en M. A. Wattiaux. 2015. Feed conversion efficiency in dairy cows: Repeatability, variation in digestion and metabolism of energy and nitrogen, and ruminal methanogens. *J. Dairy Sci.* 98:3938–3950. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8449>.
- Bayat, A. R., P. Kairenius, T. Stefański, H. Leskinen, S. Comtet-Marre, E. Forano, F. Chaucheyras-Durand, en K. Shingfield. 2015. Effect of camelina oil or live yeasts (*Saccharomyces cerevisiae*) on ruminal methane production, rumen fermentation, and milk fatty acid composition in lactating cows fed grass silage diets. *J. Dairy Sci.* 98:3166–3181. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-7976>.
- Bayat, A. R., L. Ventto, P. Kairenius, T. Stefański, H. Leskinen, I. Tapio, E. Negussie, J. Vilkkii, en K. J. Shingfield. 2017. Dietary forage to concentrate ratio and sunflower oil supplement alter rumen fermentation, ruminal methane emissions, and nutrient utilization in lactating cows. *Transl. Anim. Sci.* 1:277–286. <https://doi.org/10.2527/tas2017.0032>.
- Beauchemin, K., M. O. Kreuzer, F. O'Mara, en T. McAllister. 2008. Nutritional management for enteric methane abatement: A review. *Aust. J. Exp. Agric.* 48:21–27. <https://doi.org/10.1071/EA07199>.
- Beauchemin, K. A., en S. M. McGinn. 2005. Methane emissions from feedlot cattle fed barley or corn diets. *J. Anim. Sci.* 83:653–661. <https://doi.org/10.2527/2005.833653x>.

- Beauchemin, K. A., S. McGinn, C. Benchaar, en L. Holtshausen. 2009. Crushed sunflower, flax, or canola seeds in lactating dairy cow diets: Effects on methane production, rumen fermentation, and milk production. *J. Dairy Sci.* 92:2118–2127. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1903>.
- Beauchemin, K. A., E. M. Ungerfeld, R. J. Eckard, en M. Wang. 2020. Fifty years of research on rumen methanogenesis: Lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal* 14(Suppl. 1):s2–s16. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003100>.
- Beauchemin, K.A., E.M. Ungerfeld., A. L. Abdalla, C. Alvarez, C. Arndt, P. Becquet, C. Benchaar, A. Berndt, R. M. Mauricio, T. A. McAllister, W. Oyhantçabal, S. A. Salami, L. Shalloo, Y. Sun, J. Tricarico, A. Uwizeye, C. De Camillis, M. Bernoux, T. Robinson, E. Kebreab. 2022. Invited review: Current enteric methane mitigation options. *J. Dairy Sci.* 105:9297–9326. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22091>.
- Belanche, A., C. J. Newbold, D. P. Morgavi, A. Bach, B. Zweifel, en D. R. Yáñez-Ruiz. 2020. A meta-analysis describing the effects of the essential oils blend Agolin on ruminant on performance, rumen fermentation and methane emissions in dairy cows. *Animals (Basel)* 10:620. <https://doi.org/10.3390/ani10040620>.
- Benchaar, C., en H. Greathead. 2011. Essential oils and opportunities to mitigate enteric methane emissions from ruminants. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166–167:338–355. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.024>.
- Benchaar, C., A. N. Hristov, en H. Greathead. 2009. Essential oils as feed additives in animal nutrition. Pages 111–146 in *Phytogenics in Animal Nutrition*. T. Steiner, ed. Nottingham University Press, Nottingham, UK.
- Bolkenov, B., T. Duarte, L. Yang, F. Yang, B. Roque, E. Kebreab, en X. Yang. 2021. Effects of red macroalgae *Asparagopsis taxiformis* supplementation on the shelf life of fresh whole muscle beef. *Transl. Anim. Sci.* 5:txab056. <https://doi.org/10.1093/tas/txab056>.
- Bougouin, A., C. Martin, M. Doreau, en A. Ferlay. 2019. Effects of starch-rich or lipid-supplemented diets that induce milk fat depression on rumen biohydrogenation of fatty acids and methanogenesis in lactating dairy cows. *Animal* 13:1421–1431. <https://doi.org/10.1017/S1751731118003154>.
- Breider, I. S., E. Wall, en P. C. Garnsworthy. 2019. Short communication: Heritability of methane production and genetic correlations with milk yield and body weight in Holstein-Friesian dairy cows. *J. Dairy Sci.* 102:7277–7281. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15909>.
- Burt, S. 2004. Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods—A review. *Int. J. Food Microbiol.* 94:223–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022>.
- Callaghan, M. J., N. W. Tomkins, I. Benu, en A. J. Parker. 2014. How feasible is it to replace urea with nitrates to mitigate greenhouse gases emissions from extensively managed beef cattle? *Anim. Prod. Sci.* 54:1300–1304. <https://doi.org/10.1071/AN14270>.
- Callaghan, M. J., N. W. Tomkins, G. Hepworth, en A. J. Parker. 2021. The effect of molasses nitrate lick blocks on supplement intake, bodyweight, condition score, blood methaemoglobin concentration and herd scale methane emissions in *Bos indicus* cows grazing poor quality forage. *Anim. Prod. Sci.* 61:445–458. <https://doi.org/10.1071/AN20389>.
- Capper, J. L., R. A. Cady, en D. E. Bauman. 2009. The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. *J. Anim. Sci.* 87:2160–2167. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-1781>.
- Carro, M. D., en E. M. Ungerfeld. 2015. Utilization of organic acids to manipulate ruminal fermentation and improve ruminant productivity. Pages 177–197 in *Rumen Microbiology: From Evolution to Revolution*. A. K. Puniya, R. Singh, en D. N. Kamra, ed. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2401-3>.
- Chao, S. C., D. G. Young, en C. J. Oberg. 2000. Screening for inhibitory activity of essential oils on selected bacteria, fungi and viruses. *J. Essent. Oil Res.* 12:639–649. <https://doi.org/10.1080/10412905.2000.9712177>.
- Cobellis, G., M. Trbalza-Marinucci, en Z. Yu. 2016. Critical evaluation of essential oils as rumen modifiers in ruminant nutrition: A review. *Sci. Total Environ.* 545–546:556–568. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.103>.
- Congio, G. F. S., C. D. A. Batalha, M. B. Chiavegato, A. Berndt, P. P. A. Oliveira, R. T. S. Frighetto, T. M. R. Maxwell, P. Gregorini, en S. C. Da Silva. 2018. Strategic grazing management towards sustainable intensification at tropical pasture-based dairy systems. *Sci. Total Environ.* 636:872–880. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.301>.

- de Haas, Y., M. Pszczola, H. Soyeurt, E. Wall, en J. Lassen. 2017. Invited review: Phenotypes to genetically reduce greenhouse gas emissions in dairying. *J. Dairy Sci.* 100:855–870. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11246>.
- de Haas, Y., R. F. Veerkamp, G. de Jong, en M. N. Aldridge. 2021. Selective breeding as a mitigation tool for methane emissions from dairy cattle. *Animal* 15:100294. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100294>.
- de Raphélis-Soissan, V., L. Li, I. R. Godwin, M. C. Barnett, H. B. Perdok, en R. S. Hegarty. 2014. Use of nitrate and *Propionibacterium acidipropionici* to reduce methane emissions and increase wool growth of Merino sheep. *Anim. Prod. Sci.* 54:1860–1866. <https://doi.org/10.1071/AN14329>.
- Difford, G. F., D. W. Olijhoek, A. L. F. Hellwing, P. Lund, M. A. Bjerring, Y. de Haas, J. Lassen, en P. Løvendahl. 2019. Ranking cows' methane emissions under commercial conditions with sniffers versus respiration chambers. *Acta Agric. Scand. A Anim. Sci.* 68:25–32. <https://doi.org/10.1080/09064702.2019.1572784>.
- Dijkstra, J., A. Bannink, J. France, E. Kebreab, en S. van Gastelen. 2018. Short communication: Antimethanogenic effects of 3-nitro-oxypropanol depend on supplementation dose, dietary fiber content, and cattle type. *J. Dairy Sci.* 101:9041–9047. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14456>.
- Doreau, M., M. Arbre, M. Popova, Y. Rochette, en C. Martin. 2018. Linseed plus nitrate in the diet for fattening bulls: Effects on methane emission, animal health and residues in offal. *Animal* 12:501–507. <https://doi.org/10.1017/S1751731117002014>.
- Dorman, H. J. D., en S. G. Deans. 2000. Antimicrobial agents from plants: Antibacterial activity of plant volatile oils. *J. Appl. Microbiol.* 88:308–316. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.00969.x>.
- Drewnoski, M. E., D. J. Pogge, en S. L. Hansen. 2014. High-sulfur in beef cattle diets: A review. *J. Anim. Sci.* 92:3763–3780. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7242>.
- Duarte, C. M., J. Wu, X. Xiao, A. Bruhn, en D. Krause-Jensen. 2017. Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Front. Mar. Sci.* 4:100. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>.
- Duffield, T. F., A. R. Rabiee, en I. J. Lean. 2008a. A meta-analysis of the impacts of monensin in lactating dairy cattle. Part 1: Metabolic effects. *J. Dairy Sci.* 91:1334–1346. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0607>.
- Duffield, T. F., A. R. Rabiee, en I. J. Lean. 2008b. A meta-analysis of the impacts of monensin in lactating dairy cattle. Part 2: Production effects. *J. Dairy Sci.* 91:1347–1360. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0608>.
- Duin, E. C., T. Wagner, S. Shima, D. Prakash, B. Cronin, D. R. Yáñez-Ruiz, S. Duval, R. Rumbeli, R. T. Stemmler, R. K. Thauer, en M. Kindermann. 2016. Mode of action uncovered for the specific reduction of methane emissions from ruminants by the small molecule 3-nitrooxypropanol. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 113:6172–6177. <https://doi.org/10.1073/pnas.1600298113>.
- Duval, S., en M. Kindermann. 2012. Use of nitrooxy organic molecules in feed for reducing enteric methane production in ruminants, and/or to improve ruminant performance. International Patent WO2012084629A1. Accessed Feb. 7, 2022. <https://patents.google.com/patent/WO2012084629A1/en>.
- Ellis, J. L., J. Dijkstra, J. France, A. J. Parsons, G. R. Edwards, S. Rasmussen, E. Kebreab, en A. Bannink. 2012. Effect of high-sugar grasses on methane emissions simulated using a dynamic model. *J. Dairy Sci.* 95:272–285. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4385>.
- EPA. 2000. Bromoform. Accessed Mar. 14, 2022. www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/documents/bromoform.pdf.
- Evans, B. 2018. The role ensiled forage has on methane production in the rumen. *Anim. Husb. Dairy Vet. Sci.* 2:1–4. <https://doi.org/10.15761/AHDVS.1000143>.
- FAO. 2022. FAOSTAT Database. Accessed Jan 26, 2022. <https://www.fao.org/faostat/en/#search/grassland>.
- Feng, X., en E. Kebreab. 2020. Net reductions in greenhouse gas emissions from feed additive use in California dairy cattle. *PLoS One* 15:e0234289. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234289>.
- Feng, X. Y., J. Dijkstra, A. Bannink, S. van Gastelen, J. France, en E. Kebreab. 2020. Antimethanogenic effects of nitrate supplementation in cattle: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 103:11375–11385. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18541>.

- Fischer, A., N. Edouard, en P. Faverdin. 2020. Precision feed restriction improves feed and milk efficiencies and reduces methane emissions of less efficient lactating Holstein cows without impairing their performance. *J. Dairy Sci.* 103:4408–4422. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17654>.
- Fitzsimons, C., D. A. Kenny, M. H. Deighton, A. G. Fahey, en M. McGee. 2013. Methane emissions, body composition and rumen fermentation traits of beef heifers differing in residual feed intake. *J. Anim. Sci.* 91:5789–5800. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6956>.
- Flay, H. E., B. Kuhn-Sherlock, K. A. Macdonald, M. Camara, N. Lopez-Villalobos, D. J. Donaghy, en J. R. Roche. 2019. Hot topic: Selecting cattle for residual feed intake did not affect daily methane production but increased methane yield. *J. Dairy Sci.* 102:2708–2713. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15234>.
- Foskolos, A., en J. Moorby. 2017. The use of high sugar grasses as a strategy to improve nitrogen utilization efficiency: A meta-analysis. *Adv. Anim. Biosci.* 8:72. <https://doi.org/10.1017/S2040470017001479>.
- Freely, H. C., en T. M. Brown-Brandl. 2013. Enteric methane production from beef cattle that vary in feed efficiency. *J. Anim. Sci.* 91:4826–4831. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4781>.
- García-Chávez, I., E. Meraz-Romero, O. Castelán-Ortega, J. Zaragoza-Esparza, J. Osorio-Avalos, L. E. Robles-Jiménez, en M. González-Ronquillo. 2020. Corn silage, meta-analysis of the quality and yield of different regions in the world. Preprints 2020100094. <https://doi.org/10.20944/preprints202010.0094.v1>.
- Gerber, P. J., A. N. Hristov, B. Henderson, H. Makkar, J. Oh, C. Lee, R. Meinen, F. Montes, T. Ott, J. Firkins, A. Rotz, C. Dell, A. T. Adesogan, W. Z. Yang, J. M. Tricarico, E. Kebreab, G. Waghorn, J. Dijkstra, en S. Oosting. 2013. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: A review. *Animal* 7:220–234. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000876>.
- Gislon, G., S. Colombini, G. Borreani, G. M. Crovetto, A. Sandrucci, G. Galassi, E. Tabacco, en L. Rapetti. 2020. Milk production, methane emissions, nitrogen, and energy balance of cows fed diets based on different forage systems. *J. Dairy Sci.* 103:8048–8061. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18134>.
- Glasson, C. R. K., R. D. Kinley, R. de Nys, N. King, S. L. Adams, M. A. Packer, J. Svenson, C. T. Eason, en M. Magnusson. 2022. Benefits and risks of including the bromoform containing seaweed *Asparagopsis* in feed for the reduction of methane production from ruminants. *Algal Res.* 64:102673. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102673>.
- Grainger, C., en K. A. Beauchemin. 2011. Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Anim. Feed Sci. Technol.* 166–167:308–320. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.021>.
- Grainger, C., R. Williams, T. Clarke, A.-D. Wright, en R. Eckard. 2010. Supplementation with whole cottonseed causes long-term reduction of methane emissions from lactating dairy cows offered a forage and cereal grain diet. *J. Dairy Sci.* 93:2612–2619. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2888>.
- Granja-Salcedo, Y. T., R. M. Fernandes, R. C. Araujo, L. T. Kishi, T. T. Berchielli, F. D. Resende, A. Berndt, en G. R. Siqueira. 2019. Long-term encapsulated nitrate supplementation modulates rumen microbial diversity and rumen fermentation to reduce methane emission in grazing steers. *Front. Microbiol.* 10:614. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00614>.
- Guyader, J., M. Eugène, B. Meunier, M. Doreau, D. P. Morgavi, M. Silberberg, Y. Rochette, C. Gerard, C. Loncke, en C. Martin. 2015. Additive methane-mitigating effect between linseed oil and nitrate fed to cattle. *J. Anim. Sci.* 93:3564–3577. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8196>.
- Guyader, J., H. H. Janzen, R. Kroebel, en K. A. Beauchemin. 2016. Forage use to improve environmental sustainability of ruminant production. *J. Anim. Sci.* 94:3147–3158. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-0141>.
- Hales, K. E., N. Cole, en J. MacDonald. 2012. Effects of corn processing method and dietary inclusion of wet distillers grains with solubles on energy metabolism, carbon–nitrogen balance, and methane emissions of cattle. *J. Anim. Sci.* 90:3174–3185. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4441>.
- Hammond, K. J., J. L. Burke, J. P. Koolaard, S. Muetzel, C. S. Pinares-Patiño, en G. C. Waghorn. 2013. Effects of feed intake on enteric methane of sheep fed fresh white clover (*Trifolium repens*) and perennial ryegrass (*Lolium perenne*) forages. *Anim. Feed Sci. Technol.* 179:121–132. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.11.004>.
- Hammond, K. J., S. O. Hoskin, J. L. Burke, G. C. Waghorn, J. P. Koolaard, en S. Muetzel. 2011. Effects of feeding fresh white clover (*Trifolium repens*) or perennial ryegrass (*Lolium perenne*) on enteric methane emissions from sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166–167:398–404. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.028>.

- Hammond, K. J., D. Pacheco, J. L. Burke, J. P. Koolgaard, S. Muetzel, en G. C. Waghorn. 2014. The effects of fresh forages and feed intake level on digesta kinetics and enteric methane emissions from sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.* 193:32–43. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.04.005>.
- Hassanat, F., en C. Benchaar. 2019. Methane emissions of manure from dairy cows fed red clover-or corn silage-based diets supplemented with linseed oil. *J. Dairy Sci.* 102:11766–11776. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-16014>.
- Hassanat, F., R. Gervais, C. Julien, D. I. Masse, A. Lettat, P. Y. Chouinard, H. V. Petit, en C. Benchaar. 2013. Replacing alfalfa silage with corn silage in dairy cow diets: Effects on enteric methane production, ruminal fermentation, digestion, N balance, and milk production. *J. Dairy Sci.* 96:4553–4567. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6480>.
- Hegarty, R. S., R. A. Cortez Passetti, K. M. Dittmer, Y. Wang, S. Shelton, J. Emmet-Booth, E. Wollenberg, T. McAllister, S. Leahy, K. Beauchemin, en N. Gurwick. 2021. An evaluation of emerging feed additives to reduce methane emissions from livestock. Edition 1. A report coordinated by Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS) and the New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre (NZAGRC) initiative of the Global Research Alliance (GRA). <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/116489>.
- Helander, I. M., H.-L. Alakomi, K. Latva-Kala, T. Mattila-Sandholm, L. Pol, E. J. Smid, L. G. M. Gorris, en A. von Wright. 1998. Characterization of the action of selected essential oil components on Gram-negative bacteria. *J. Agric. Food Chem.* 46:3590–3595. <https://doi.org/10.1021/jf980154m>.
- Henderson, G., G. M. Cook, en R. S. Ronimus. 2018. Enzyme and gene-based approaches for developing methanogen-specific compounds to control ruminant methane emissions: A review. *Anim. Prod. Sci.* 58:1017–1026. <https://doi.org/10.1071/AN15757>.
- Herd, R. M., V. H. Oddy, en E. C. Richardson. 2004. Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle. 1. Review of potential mechanisms. *Aust. J. Exp. Agric.* 44:423–430. <https://doi.org/10.1071/EA02220>.
- Hironaka, R., G. W. Mathison, B. K. Kerrigan, en I. Vlach. 1996. The effect of pelleting of alfalfa hay on methane production and digestibility by steers. *Sci. Total Environ.* 180:221–227. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04948-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04948-7).
- Hristov, A. N., A. Melgar, D. Wasson, en C. Arndt. 2022. Symposium review: Effective nutritional strategies to mitigate enteric methane in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 105:8543–8557. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21398>.
- Hristov, A. N., J. Oh, J. L. Firkins, J. Dijkstra, E. Kebreab, G. Waghorn, H. P. Makkar, A. T. Adesogan, W. Yang, C. Lee, P. J. Gerber, B. Henderson, en J. M. Tricarico. 2013a. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *J. Anim. Sci.* 91:5045–5069. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6583>.
- Hristov, A. N., J. Oh, F. Giallongo, T. W. Frederick, M. T. Harper, H. L. Weeks, A. F. Branco, P. J. Moate, M. H. Deighton, S. R. O. Williams, M. Kindermann, en S. Duval. 2015. An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 112:10663–10668. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504124112>.
- Hristov, A. N., T. Ott, J. Tricarico, A. Rotz, G. Waghorn, A. Adesogan, J. Dijkstra, F. Montes, J. Oh, E. Kebreab, S. J. Oosting, P. J. Gerber, B. Henderson, H. P. S. Makkar, en J. L. Firkins. 2013b. Special Topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: III. A review of animal management mitigation options. *J. Anim. Sci.* 91:5095–5113. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6585>.
- Huws, S. A., C. J. Creevey, L. B. Oyama, I. Mizrahi, S. E. Denman, M. Popova, R. Muñoz-Tamayo, E. Forano, S. M. Waters, M. Hess, I. Tapio, H. Smidt, S. J. Krizan, D. R. Yáñez-Ruiz, A. Belanche, L. Guan, R. J. Gruninger, T. A. McAllister, C. J. Newbold, R. Roehe, R. J. Dewhurst, T. J. Snelling, M. Watson, G. Suen, E. H. Hart, A. H. Kingston-Smith, N. D. Scollan, R. M. do Prado, E. J. Pilau, H. C. Mantovani, G. T. Attwood, J. E. Edwards, N. R. McEwan, S. Morrisson, O. L. Mayorga, C. Elliott, en D. P. Morgavi. 2018. Addressing global ruminant agricultural challenges through understanding the rumen microbiome: Past, present, and future. *Front. Microbiol.* 9:2161. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02161>.
- Illius, A., en M. Allen. 1994. Assessing forage quality using integrated models of intake and digestion by ruminants. Pages 869–890 in *Forage Quality, Evaluation, and Utilization*. G. C. Fahey, M. Collins Jr., D. R. Mertens, en L. E. Moser, ed. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c21>.
- Janssen, P. H. 2010. Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics. *Anim. Feed Sci. Technol.* 160:1–22. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.07.002>.

- Jayanegara, A., F. Leiber, en M. Kreuzer. 2012. Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from *in vivo* and *in vitro* experiments. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl.)* 96:365–375. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01172.x>.
- Jayanegara, A., K. A. Sarwono, M. Kondo, H. Matsui, M. Ridla, E. B. Laconi, en Nahrowi. 2018. Use of 3-nitrooxypropanol as feed additive for mitigating enteric methane emissions from ruminants: A meta-analysis. *Ital. J. Anim. Sci.* 17:650–656. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1404945>.
- Jayanegara, A., E. Wina, en J. Takahashi. 2014. Meta-analysis on methane mitigating properties of saponin-rich sources in the rumen: Influence of addition levels and plant sources. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 27:1426–1435. <https://doi.org/10.5713/ajas.2014.14086>.
- Jeyanathan, J., C. Martin, en D. P. Morgavi. 2014. The use of direct-fed microbials for mitigation of ruminant methane emissions: A review. *Animal* 8:250–261. <https://doi.org/10.1017/S1751731113002085>.
- Jia, Y., B. Quack, R. D. Kinley, I. Pisso, en S. Tegtmeier. 2022. Potential environmental impact of bromoform from *Asparagopsis* farming in Australia. *Atmos. Chem. Phys.* 22:7631–7646. <https://doi.org/10.5194/acp-22-7631-2022>.
- Jiao, H. P., A. J. Dale, A. F. Carson, S. Murray, A. W. Gordon, en C. P. Ferris. 2014. Effect of concentrate feed level on methane emissions from grazing dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97:7043–7053. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-7979>.
- Johansen, M., P. Lund, en M. R. Weisbjerg. 2018. Feed intake and milk production in dairy cows fed different grass and legume species: A meta-analysis. *Animal* 12:66–75. <https://doi.org/10.1017/S1751731117001215>.
- Johnson, D. E., G. W. Ward, en J. J. Ramsey. 1996. Livestock methane: Current emissions and mitigation Potential. Page 219 in *Nutrient Management of Food Animals to Enhance and Protect the Environment*. E. T. Kornegay, ed. Lewis Publishers.
- Jordan, E., D. Lovett, F. Monahan, J. Callan, B. Flynn, en F. O'Mara. 2006. Effect of refined coconut oil or copra meal on methane output and on intake and performance of beef heifers. *J. Anim. Sci.* 84:162–170. <https://doi.org/10.2527/2006.841162x>.
- Kennedy, P. M., en E. Charmley. 2012. Methane yields from Brahman cattle fed tropical grasses and legumes. *Anim. Prod. Sci.* 52:225–239. <https://doi.org/10.1071/AN11103>.
- Kim, H., H. Lee, Y. Baek, S. Lee, en J. Seo. 2020. The effects of dietary supplementation with 3-nitrooxypropanol on enteric methane emissions, rumen fermentation, and production performance in ruminants: A meta-analysis. *J. Anim. Sci. Technol.* 62:31–42. <https://doi.org/10.5187/jast.2020.62.1.31>.
- Kim, S. H., L. L. Mamuad, D. W. Kim, S. K. Kim, en S. S. Lee. 2016. Fumarate reductase-producing enterococci reduce methane production in *in vitro* rumen fermentation. *J. Microbiol. Biotechnol.* 26:558–566. <https://doi.org/10.4014/jmb.1512.12008>.
- Kinley, R. D., G. Martinez-Fernandez, M. K. Matthews, R. de Nys, M. Magnusson, en N. W. Tomkins. 2020. Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *J. Clean. Prod.* 259:120836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120836>.
- Knapp, J. R., G. L. Laur, P. A. Vadas, W. P. Weiss, en J. M. Tricarico. 2014. Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *J. Dairy Sci.* 97:3231–3261. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>.
- Kolling, G. J., S. C. B. Stivanin, A. M. Gabbi, F. S. Machado, A. L. Ferreira, M. M. Campos, T. R. Tomich, C. S. Cunha, S. W. Dill, L. G. R. Pereira, en V. Fischer. 2018. Performance and methane emissions in dairy cows fed oregano and green tea extracts as feed additives. *J. Dairy Sci.* 101:4221–4234. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13841>.
- Kozłowska, M., A. Cieślak, A. Jóźwik, M. El-Sherbiny, A. Stochmal, W. Oleszek, M. Kowalczyk, W. Filipiak, en M. Szumacher-Strabel. 2020. The effect of total and individual alfalfa saponins on rumen methane production. *J. Sci. Food Agric.* 100:1922–1930. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10204>.
- Lassen, J., en P. Løvendahl. 2016. Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using noninvasive methods. *J. Dairy Sci.* 99:1959–1967. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10012>.
- Lean, I. J., H. M. Golder, T. M. D. Grant, en P. J. Moate. 2021. A meta-analysis of effects of dietary seaweed on beef and dairy cattle performance and methane yield. *PLoS One* 16:e0249053. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249053>.

- Lee, C., en K. A. Beauchemin. 2014. A review of feeding supplementary nitrate to ruminant animals: Nitrate toxicity, methane emissions, and production performance. *Can. J. Anim. Sci.* 94:557–570. <https://doi.org/10.4141/cjas-2014-069>.
- Li, X., H. C. Norman, R. D. Kinley, M. Laurence, M. Wilmott, H. Bender, R. de Nys, en N. Tomkins. 2018. *Asparagopsis taxiformis* decreases enteric methane production from sheep. *Anim. Prod. Sci.* 58:681–688. <https://doi.org/10.1071/AN15883>.
- Lima, P. R., T. Apdini, A. S. Freire, A. S. Santana, L. M. L. Moura, J. C. S. Nascimento, R. T. S. Rodrigues, J. Dijkstra, A. F. Garcez Neto, M. A. Á. Queiroz, en D. R. Menezes. 2019. Dietary supplementation with tannin and soybean oil on intake, digestibility, feeding behavior, ruminal protozoa and methane emission in sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.* 249:10–17. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.01.017>.
- Little, S. M., C. Benchaar, H. H. Janzen, R. Kröbel, E. J. McGeough, en K. A. Beauchemin. 2017. Demonstrating the effect of forage source on the carbon footprint of a Canadian dairy farm using whole-systems analysis and the Holos model: Alfalfa silage vs. corn silage. *Climate (Basel)* 5:87. <https://doi.org/10.3390/cli5040087>.
- Løvendahl, P., G. F. Difford, B. Li, M. G. G. Chagunda, P. Huhtanen, M. H. Lidauer, J. Lassen, en P. Lund. 2018. Review: Selecting for improved feed efficiency and reduced methane emissions in dairy cattle. *Animal* 12:s336–s349. <https://doi.org/10.1017/S1751731118002276>.
- Lovett, D. K., D. McGilloway, A. Bortolozzo, M. Hawkins, J. Callan, B. Flynn, en F. P. O'Mara. 2006. *In vitro* fermentation patterns and methane production as influenced by cultivar and season of harvest of *Lolium perenne*. *Grass Forage Sci.* 61:9–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00500.x>.
- MacAdam, J. W., en J. J. Villalba. 2015. Review: Beneficial effects of temperate forage legumes that contain condensed tannins. *Agriculture* 5:475–491. <https://doi.org/10.3390/agriculture5030475>.
- Machado, L., M. Magnusson, N. A. Paul, R. Kinley, R. de Nys, en N. Tomkins. 2016. Identification of bioactives from the red seaweed *Asparagopsis taxiformis* that promote antimethanogenic activity *in vitro*. *J. Appl. Phycol.* 28:3117–3126. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0830-7>.
- Macome, F. M., W. F. Pellikaan, W. H. Hendriks, D. Warner, J. T. Schonewille, en J. W. Cone. 2018. *In vitro* gas and methane production in rumen fluid from dairy cows fed grass silages differing in plant maturity, compared to *in vivo* data. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl.)* 102:843–852. <https://doi.org/10.1111/jpn.12898>.
- Manzanilla-Pech, C. I. V., P. Løvendahl, D. Mansan Gordo, G. F. Gifford, G. E. Pryce, F. Schenkel, S. Wegmann, F. Miglior, T. C. Chud, P. J. Moate, S. R. O. Williams, C. M. Richardson, P. Stothard, en J. Lassen. 2021. Breeding for reduced methane emission and feed-efficient Holstein cows: An international response. *J. Dairy Sci.* 104:8983–9001. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19889>.
- Mao, H. L., J. K. Wang, Y. Y. Zhou, en J. X. Liu. 2010. Effects of addition of tea saponins and soybean oil on methane production, fermentation and microbial population in the rumen of growing lambs. *Livest. Sci.* 129:56–62. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.12.011>.
- Martin, C., D. P. Morgavi, en M. Doreau. 2010. Methane mitigation in ruminants: From microbe to the farm scale. *Animal* 4:351–365. <https://doi.org/10.1017/S1751731109990620>.
- Massé, D. I., G. Jarret, F. Hassanat, C. Benchaar, en N. M. Cata Saady. 2016. Effect of increasing levels of corn silage in an alfalfa-based dairy cow diet and of manure management practices on manure fugitive methane emissions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 221:109–114. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.018>.
- Mauricio, R. M., R. S. Ribeiro, D. S. C. Paciullo, M. A. Cangussú, E. Murgueitio, J. Chará. M. X., en F. Estrada. 2019. Silvopastoral systems in Latin America for biodiversity, environmental, and socioeconomic improvements. Pages 287–297 in *Agroecosystem Diversity: Reconciling Contemporary Agriculture and Environmental Quality*. G. Lemaire, P. Carvalho, S. Kronberg, en S. Recous, ed. Elsevier/Academic Press.
- McDonnell, R. P., K. J. Hart, T. M. Boland, A. K. Kelly, M. McGee, en D. A. Kenny. 2016. Effect of divergence in phenotypical residual feed intake on methane emissions, ruminal fermentation, and apparent whole-tract digestibility of beef heifers across three contrasting diets. *J. Anim. Sci.* 94:1179–1193. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-0080>.
- McSweeney, C., B. Palmer, D. McNeill, en D. Krause. 2001. Microbial interactions with tannins: Nutritional consequences for ruminants. *Anim. Feed Sci. Technol.* 91:83–93. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00232-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00232-2).

- Moate, P., S. Williams, M. Deighton, M. Hannah, B. Ribaux, G. Morris, J. Jacobs, J. Hill, en W. Wales. 2019. Effects of feeding wheat or corn and of rumen fistulation on milk production and methane emissions of dairy cows. *Anim. Prod. Sci.* 59:891–905. <https://doi.org/10.1071/AN17433>.
- Moate, P., S. Williams, J. Jacobs, M. Hannah, K. Beauchemin, R. Eckard, en W. Wales. 2017. Wheat is more potent than corn or barley for dietary mitigation of enteric methane emissions from dairy cows. *J. Dairy Sci.* 100:7139–7153. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12482>.
- Morgavi, D. P., E. Forano, C. Martin, en C. J. Newbold. 2010. Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. *Animal* 4:1024–1036. <https://doi.org/10.1017/S1751731110000546>.
- Muizelaar, W., M. Groot, G. Van Duinkerken, R. Peters, en J. Dijkstra. 2021. Safety and transfer study: Transfer of bromoform present in *Asparagopsis taxiformis* to milk and urine of lactating dairy cows. *Foods* 10:584. <https://doi.org/10.3390/foods10030584>.
- Muñoz, C., P. A. Letelier, E. M. Ungerfeld, J. M. Morales, S. Hube, en L. A. Pérez-Prieto. 2016. Effects of pre grazing herbage mass in late spring on enteric methane emissions, dry matter intake, and milk production of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 99:7945–7955. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10919>.
- Muñoz, C., R. Villalobos, A. M. T. Peralta, M. Morales, N. L. Urrutia, en E. M. Ungerfeld. 2021. Long-term and carryover effects of whole oilseeds on methane emission, milk production, and milk fatty acid profile of grazing dairy cows. *Animals (Basel)* 11:2978. <https://doi.org/10.3390/ani11102978>.
- Newbold, C. J., G. De La Fuente, A. Belanche, E. Ramos-Morales, en N. R. McEwan. 2015. The role of ciliate protozoa in the rumen. *Front. Microbiol.* 6:1313. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01313>.
- Nguyen, S. H., M. C. Barnett, en R. S. Hegarty. 2016. Use of dietary nitrate to increase productivity and reduce methane production of faunated and defaunated lambs consuming protein-deficient chaff. *Anim. Prod. Sci.* 56:290–297. <https://doi.org/10.1071/AN15525>.
- Nkemka, V. N., K. A. Beauchemin, en X. Hao. 2019. Treatment of feces from beef cattle fed the enteric methane inhibitor 3-nitro-oxypropanol. *Water Sci. Technol.* 80:437–447. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.302>.
- Nollet, L., D. I. Demeyer, en W. Verstraete. 1997. Effect of 2-bromo-ethanesulfonic acid and *Peptostreptococcus productus* ATCC 35244 addition on stimulation of reductive acetogenesis in the ruminal ecosystem by selective inhibition of methanogenesis. *Appl. Environ. Microbiol.* 63:194–200. <https://doi.org/10.1128/aem.63.1.194-200.1997>.
- Olijhoek, D. W., P. Løvendahl, J. Lassen, A. L. F. Hellwing, J. K. Höglund, M. R. Weisbjerg, S. J. Noel, F. McLean, O. Højberg, en P. Lund. 2018. Methane production, rumen fermentation, and diet digestibility of Holstein and Jersey dairy cows being divergent in residual feed intake and fed at 2 forage-to-concentrate ratios. *J. Dairy Sci.* 101:9926–9940. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14278>.
- Osborne, V. R., S. Radhakrishnan, N. Odongo, A. Hill, en B. Mc-Bride. 2008. Effects of supplementing fish oil in the drinking water of dairy cows on production performance and milk fatty acid composition. *J. Anim. Sci.* 86:720–729. <https://doi.org/10.2527/jas.2007-0342>.
- Owens, F. N., en A. L. Goetsch. 1988. Ruminant fermentation. Pages 145–171 in *The Ruminant Animal: Digestive Physiology and Nutrition*. D. C. Church, ed. Waveland Press Inc.
- Owens, J. L., B. W. Thomas, J. L. Stoeckli, K. A. Beauchemin, T. A. McAllister, F. J. Larney, en X. Hao. 2020. Greenhouse gas and ammonia emissions from stored manure from beef cattle supplemented 3-nitrooxypropanol and monensin to reduce enteric methane emissions. *Sci. Rep.* 10:19310. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75236-w>.
- Patra, A. K. 2013. The effect of dietary fats on methane emissions, and its other effects on digestibility, rumen fermentation and lactation performance in cattle: A meta-analysis. *Livest. Sci.* 155:244–254. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.023>.
- Patra, A. K. 2014. A meta-analysis of the effect of dietary fat on enteric methane production, digestibility and rumen fermentation in sheep, and a comparison of these responses between cattle and sheep. *Livest. Sci.* 162:97–103. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.01.007>.
- Patra, A. K., en J. Saxena. 2011. Exploitation of dietary tannins to improve rumen metabolism and ruminant nutrition. *J. Sci. Food Agric.* 91:24–37. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4152>.

- Petersen, S. O., A. L. F. Hellwing, M. Brask, O. Højberg, M. Poulsen, Z. Zhu, K. R. Baral, en P. Lund. 2015. Dietary nitrate for methane mitigation leads to nitrous oxide emissions from dairy cows. *J. Environ. Qual.* 44:1063–1070. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.02.0107>.
- Rae, H. A. 1999. Onion toxicosis in a herd of beef cows. *Can. Vet. J.* 40:55–57.
- Renand, G., A. Vinet, V. Decruyenaere, D. Maupetit, en D. Dozias. 2019. Methane and carbon dioxide emission of beef heifers in relation with growth and feed efficiency. *Animals (Basel)* 9:1136. <https://doi.org/10.3390/ani9121136>.
- Richardson, E. C., en R. M. Herd. 2004. Biological basis for variation in residual feed intake in cattle. 2. Synthesis of results following divergent selection. *Aust. J. Exp. Agric.* 44:431–440. <https://doi.org/10.1071/EA02221>.
- Ridoutt, B., S. A. Lehnert, S. Denman, E. Charmley, R. Kinley, en S. Dominik. 2022. Potential GHG emission benefits of *Asparagopsis taxiformis* feed supplement in Australian beef cattle feedlots. *J. Clean. Prod.* 337:130499. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130499>.
- Rivero, M. J., J. P. Keim, O. A. Balocchi, en M. R. F. Lee. 2020. *In vitro* fermentation patterns and methane output of perennial ryegrass differing in water-soluble carbohydrate and nitrogen concentrations. *Animals (Basel)* 10:1076. <https://doi.org/10.3390/ani10061076>.
- Romero, P., A. Belanche, R. Hueso, E. Ramos-Morales, J. K. Salwen, E. Kebreab, en D. R. Yañez-Ruiz. 2022. *In vitro* rumen microbial degradation of bromoform and the impact on rumen fermentation. Page 253 in Proceedings of the 8th International Greenhouse Gas & Animal Agriculture Conference, Orlando, FL.
- Roque, B. M., J. K. Salwen, R. Kinley, en E. Kebreab. 2019a. Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cows' diet reduces enteric methane emission by over 50 percent. *J. Clean. Prod.* 234:132–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.193>.
- Roque, B. M., H. J. Van Lingen, H. Vrancken, en E. Kebreab. 2019b. Effect of Mootral—a garlic- and citrus-extract-based feed additive—on enteric methane emissions in feedlot cattle. *Transl. Anim. Sci.* 3:1383–1388. <https://doi.org/10.1093/tas/txz133>.
- Roque, B. M., M. Venegas, R. D. Kinley, R. de Nys, T. L. Duarte, X. Yang, en E. Kebreab. 2021. Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *PLoS One* 16:e0247820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>.
- Rotz, C. A., F. Montes, en D. S. Chianese. 2010. The carbon footprint of dairy production systems through partial life cycle assessment. *J. Dairy Sci.* 93:1266–1282. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2162>.
- Rowe, S. J., S. M. Hickey, A. Jonker, M. K. Hess, P. Janssen, T. Johnson, B. Bryson, K. Knowler, C. Pinares-Patino, W. Bain, S. Elmes, E. Young, J. Wing, E. Waller, N. Pickering, en J. C. McEwan. 2019. Selection for divergent methane yield in New Zealand sheep – a ten-year perspective. *Proc. Assoc. Advmt. Anim. Breed. Genet.* 23:306–309.
- Savian, J. V., R. M. T. Schons, D. E. Marchi, T. S. Freitas, G. F. da Silva Neto, J. C. Mezzalira, A. Berndt, C. Bayer, en P. C. F. Carvalho. 2018. Rotatinuous stocking: A grazing management innovation that has high potential to mitigate methane emissions by sheep. *J. Clean. Prod.* 186:602–608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.162>.
- Schilde, M., D. von Soosten, L. Hüther, U. Meyer, A. Zeyner, en S. Dänicke. 2021. Effects of 3-nitrooxypropanol and varying concentrate feed proportions in the ration on methane emission, rumen fermentation and performance of periparturient dairy cows. *Arch. Anim. Nutr.* 75:79–104. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2021.1877986>.
- Schultze-Kraft, R., I. Rao, M. Peters, R. Clements, C. Bai, en G. Liu. 2018. Tropical forage legumes for environmental benefits: An overview. *Trop. Grassl. Forrajes Trop.* 6:1–14. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(6\)1-14](https://doi.org/10.17138/TGFT(6)1-14).
- Soltan, Y., A. Abdalla Filho, A. Abdalla, B. Berenchttein, P. Schiavinatto, en C. Costa. 2021. Replacing maize with low tannin sorghum grains: Lamb growth performance, microbial protein synthesis and enteric methane production. *Anim. Prod. Sci.* 61:1348–1355. <https://doi.org/10.1071/AN20605>.
- Soteriades, A. D., A. M. Gonzalez-Mejia, D. Styles, A. Foskolos, J. M. Moorby, en J. M. Gibbons. 2018. Effects of high-sugar grasses and improved manure management on the environmental footprint of milk production at the farm level. *J. Clean. Prod.* 202:1241e1252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.206>.

- Staerfl, S. M., S. L. Amelchanka, T. Kalber, C. R. Soliva, M. Kreuzer, en J. O. Zeitz. 2012. Effect of feeding dried high-sugar ryegrass ('AberMagic') on methane and urinary nitrogen emissions of primiparous cows. *Livest. Sci.* 150:293–301. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2012.09.019>.
- Stefenoni, H. A., S. E. Räisänen, S. F. Cueva, D. E. Wasson, C. F. A. Lage, A. Melgar, M. E. Fetter, P. Smith, M. Hennessy, B. Vecchiarelli, J. Bender, D. Pitta, C. L. Cantrell, C. Yarish, en A. N. Hristov. 2021. Effects of the macroalga *Asparagopsis taxiformis* and oregano leaves on methane emission, rumen fermentation, and lactational performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 104:4157–4173. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19686>.
- Sun, Y., M. S. Allen, en A. L. Lock. 2019. Culture pH interacts with corn oil concentration to affect biohydrogenation of unsaturated fatty acids and disappearance of neutral detergent fiber in batch culture. *J. Dairy Sci.* 102:9870–9882. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16581>.
- Tedeschi, L. O., C. A. Ramírez-Restrepo, en J. P. Muir. 2014. Developing a conceptual model of possible benefits of tannins for ruminant production. *Animal* 8:1095–1105. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000974>.
- Thiel, A., R. Rumbeli, P. Mair, H. Yeman, en P. Beilstein. 2019a. 3-NOP: ADME studies in rats and ruminating animals. *Food Chem. Toxicol.* 125:528–539. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.02.002>.
- Thiel, A., A. C. M. Schoenmakers, I. A. J. Verbaan, E. Chenal, S. Etheve, en P. Beilstein. 2019b. 3-NOP: Mutagenicity and genotoxicity assessment. *Food Chem. Toxicol.* 123:566–573. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.11.010>.
- Tricarico, J. M., Y. de Haas, A. N. Hristov, E. Kebreab, T. Kurt, F. Mitloehner, en D. Pitta. 2022. Symposium review: Development of a funding program to support research on enteric methane mitigation from ruminants. *J. Dairy Sci.* 105:8535–8542. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21397>.
- Tricarico, J. M., E. Kebreab, en M. A. Wattiaux. 2020. MILK Symposium review: Sustainability of dairy production and consumption in low-income countries with emphasis on productivity and environmental impact. *J. Dairy Sci.* 103:9791–9802. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18269>.
- Uddin, M. E., H. A. Aguirre-Villegas, R. A. Larson, en M. A. Wattiaux. 2021. Carbon footprint of milk from Holstein and Jersey cows fed low or high forage diet with alfalfa silage or corn silage as the main forage source. *J. Clean. Prod.* 298:126720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126720>.
- Ungerfeld, E. M. 2015. Shifts in metabolic hydrogen sinks in the methanogenesis-inhibited ruminal fermentation: A meta-analysis. *Front. Microbiol.* 6:37. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00037>.
- Ungerfeld, E. M. 2020. Metabolic hydrogen flows in rumen fermentation: Principles and possibilities of intervention. *Front. Microbiol.* 11:589. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00589>.
- Ungerfeld, E. M., K. A. Beauchemin, en C. Muñoz. 2022. Current perspectives on achieving pronounced enteric methane mitigation from ruminant production. *Front. Anim. Sci.* 2:795200. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.795200>.
- United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition. 2021. Global methane assessment: benefits and costs of mitigating methane emissions. United Nations Environment Programme, Nairobi. Accessed Mar. 14, 2022. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/35917/GMA_ES.pdf.
- van Lingen, H. J., M. Niu, E. Kebreab, S. C. Valadares Filho, J. A. Rooke, C.-A. Duthie, A. Schwarm, M. Kreuzer, P. I. Hynd, M. Caetano, M. Eugène, C. Martin, M. McGee, P. O'Kiely, M. Hünerberg, T. A. McAllister, T. T. Berchielli, J. D. Messana, N. Peiren, A. V. Chaves, E. Charmley, N. A. Cole, K. E. Hales, S.-S. Lee, A. Berndt, C. K. Reynolds, L. A. Crompton, A.-R. Bayat, D. R. Yáñez-Ruiz, Z. Yu, A. Bannink, J. Dijkstra, D. P. Casper, en A. N. Hristov. 2019. Prediction of enteric methane production, yield and intensity of beef cattle using an intercontinental database. *Agric. Ecosyst. Environ.* 283:106575. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106575>.
- van Wyngaard, J. D. V., R. Meeske, en L. J. Erasmus. 2018. Effect of dietary nitrate on enteric methane emissions, production performance and rumen fermentation of dairy cows grazing kikuyu-dominant pasture during summer. *Anim. Feed Sci. Technol.* 244:76–87. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.08.005>.
- van Wyngaard, J. D. V., R. Meeske, en L. J. Erasmus. 2019. Effect of dietary nitrate on enteric methane emissions, production performance and rumen fermentation of dairy cows grazing ryegrass pasture during spring. *Anim. Feed Sci. Technol.* 252:64–73. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.04.006>.
- Vargas, J., E. Ungerfeld, C. Muñoz, en N. DiLorenzo. 2022. Feeding strategies to mitigate enteric methane emission from ruminants in grassland systems. *Animals (Basel)* 12:1132. <https://doi.org/10.3390/ani12091132>.

- Velazco, J. I., R. M. Herd, D. J. Cottle, en R. S. Hegarty. 2017. Daily methane emissions and emissions intensity of grazing beef cattle genetically divergent for residual feed intake. *Anim. Prod. Sci.* 57:627–635. <https://doi.org/10.1071/AN15111>.
- Vera, N., en E. M. Ungerfeld. 2022. Effect of water-soluble carbohydrates content in *Lolium perenne* on enteric methane emissions: Meta-analysis. Page 241 in *Proc. 8th Int. Greenhouse Gas and Anim. Agric. Conf. Orlando, FL. University of Florida*.
- Vyas, D., A. Alazeh, S. M. McGinn, T. A. McAllister, O. M. Harstad, H. Holo, en K. A. Beauchemin. 2016. Enteric methane emissions in response to ruminal inoculation of *Propionibacterium* strains in beef cattle fed a mixed diet. *Anim. Prod. Sci.* 56:1035–1040. <https://doi.org/10.1071/AN14801>.
- Vyas, D., E. J. McGeough, S. M. McGinn, T. A. McAllister, en K. A. Beauchemin. 2014a. Effect of *Propionibacterium* spp. on ruminal fermentation, nutrient digestibility, and methane emissions in beef heifers fed a high-forage diet. *J. Anim. Sci.* 92:2192–2201. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7492>.
- Vyas, D., E. J. McGeough, R. Mohammed, S. M. McGinn, T. A. McAllister, en K. A. Beauchemin. 2014b. Effects of *Propionibacterium* strains on ruminal fermentation, nutrient digestibility and methane emissions in beef cattle fed a corn grain finishing diet. *Animal* 8:1807–1815. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001657>.
- Waghorn, G. 2008. Beneficial and detrimental effects of dietary condensed tannins for sustainable sheep and goat production—Progress and challenges. *Anim. Feed Sci. Technol.* 147:116–139. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.09.013>.
- Waghorn, G. C., en R. S. Hegarty. 2011. Lowering ruminant methane emissions through improved feed conversion efficiency. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166–167:291–301. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.019>.
- Warner, D., S. C. Podesta, B. Hatew, G. Klop, H. van Laar, A. Bannink, en J. Dijkstra. 2015. Effect of nitrogen fertilization rate and regrowth interval of grass herbage on methane emission of zero-grazing lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98:3383–3393. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-9068>.
- Weber, T. L., X. Hao, C. D. Gross, K. A. Beauchemin, en S. X. Chang. 2021. Effect of manure from cattle fed 3-nitrooxypropanol on anthropogenic greenhouse gas emissions depends on soil type. *Agronomy (Basel)* 11:371. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020371>.
- Winichayakul, S., R. Cookson, R. Scott, J. Zhou, X. Zou, M. Roldan, K. Richardson, en N. Roberts. 2008. Delivery of grasses with high levels of unsaturated, protected fatty acids. *Proc. N. Z. Grassl. Assoc.* 70:211–216. <https://doi.org/10.33584/jnzg.2008.70.2721>.
- Wood, J. M., F. S. Kennedy, en R. S. Wolfe. 1968. The reaction of multihalogenated hydrocarbons with free and bound reduced vitamin B12. *Biochemistry* 7:1707–1713. <https://doi.org/10.1021/bi00845a013>.
- Yang, C., J. A. Rooke, I. Cabeza, en R. J. Wallace. 2016. Nitrate and inhibition of ruminal methanogenesis: Microbial ecology, obstacles, and opportunities for lowering methane emissions from ruminant livestock. *Front. Microbiol.* 7:132. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00132>.
- Yu, G., K. A. Beauchemin, en R. Dong. 2021. A review of 3-nitrooxy-propanol for enteric methane mitigation from ruminant livestock. *Animals (Basel)* 11:3540. <https://doi.org/10.3390/ani11123540>.
- Yurtseven, S., M. Avci, M. Cetin, I. Öztürk, en M. Boğa. 2018. Emissions of some greenhouse gases from the manure of ewes fed on pomegranate peel, yucca extract, and thyme oil. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 16:4217–4228. https://doi.org/10.15666/aeer/1604_42174228.
- Zhang, X. M., M. L. Smith, R. J. Gruninger, L. Kung Jr., D. Vyas, S. M. McGinn, M. Kindermann, M. Wang, Z. L. Tan, en K. A. Beauchemin. 2021. Combined effects of 3-nitrooxypropanol and canola oil supplementation on methane emissions, rumen fermentation and biohydrogenation, and total tract digestibility in beef cattle. *J. Anim. Sci.* 99:skab081. <https://doi.org/10.1093/jas/skab081>.
- Zhao, Y. G., N. E. O'Connell, en T. Yan. 2016. Prediction of enteric methane emissions from sheep offered fresh perennial ryegrass (*Lolium perenne*) using data measured in indirect open-circuit respiration chambers. *J. Anim. Sci.* 94:2425–2435. <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0334>.
- Zhou, X., J. Zeitz, L. Meile, M. Kreuzer, en A. Schwarm. 2015. Influence of pH and the degree of protonation on the inhibitory effect of fatty acids in the ruminal methanogen *Methanobrevibacter ruminantium* strain M1. *J. Appl. Microbiol.* 119:1482–1493. <https://doi.org/10.1111/jam.12955>.