30 vragen en antwoorden over lachgasemissie uit landbouwgronden

Slim Landgebruik

Colofon

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research met subsidie van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend Programma Slim Landgebruik (BO-53-002).

Wageningen Environmental Research
Augustus, 2021

Contact: Slimlandgebruik@wur.nl

Auteurs: Thalisa Slier & Gerard Velthof

Vormgeving: Thalisa Slier

Verwijzing: Slier, T. & Velthof, G. L. (2021). *30 vragen en antwoorden over lachgasemissie uit landbouwgronden.* Wageningen Environmental Research.

Voorwoord

Lachgas is een broeikasgas dat vele malen sterker is dan koolstofdioxide. Een van de belangrijkste bronnen van lachgas zijn bemeste landbouwgronden. Om te kunnen voldoen aan de klimaatdoelstellingen voor 2030 is het van groot belang om lachgasemissies uit landbouwgronden te verminderen. Hiervoor is een goed begrip van de processen die leiden tot lachgasemissie noodzakelijk.

In opdracht van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit is in het kader van het beleidsondersteunend programma Slim Landgebruik gevraagd de belangrijkste vragen en antwoorden rondom lachgasemissies uit landbouwgronden op een toegankelijke manier te beschrijven. Deze publicatie kan daarmee bijdragen aan een beter begrip van de complexe processen rondom lachgas.

Inleiding

In 2015 heeft Nederland zich in Parijs gecommitteerd aan het klimaatakkoord. De doelstelling van dit akkoord is het beperken van de opwarming van de aarde. Om deze doelen te behalen is het reduceren van broeikasgasemissies van essentieel belang. Lachgas is een zeer sterk broeikasgas, vele malen sterker dan koolstofdioxide. Lachgasemissies in Nederland komen met name uit de landbouwgronden. Het klimaatdoel voor de Nederlandse minerale landbouwgronden is een jaarlijkse additionele reductie van 0.5 Mton CO_2-eq vanaf 2030. Dit doel kan worden bereikt door het verhogen van het organische stofgehalte in de bodem. Echter kan een toename van de organische stofgehalte leiden tot een toename van lachgasemissies. Daarnaast leidt bemesting tot lachgasemissies. Wat kunnen we in Nederland doen om lachgasemissie te verminderen? Deze publicatie is geschreven om antwoord te geven op een dertigtal vragen rondom lachgasemissie uit landbouwgronden. Daarmee kan deze publicatie bijdragen aan een beter begrip van de processen waaronder lachgas wordt gevormd. Tevens biedt deze publicatie inzicht de maatregelen die genomen kunnen worden om lachgasemissie te verminderen. Deze publicatie is geschreven voor zowel de politiek en overheid, als het bedrijfsleven en maatschappelijke organisaties. Maar ook voor boeren die uiteindelijk dagelijks bezig zijn met de landbouwbodems biedt deze publicatie inzichten. De dertig vragen en antwoorden zijn grofweg op te delen in drie secties. Allereerst wordt er antwoord gegeven op de vragen die bijdragen aan de basiskennis over lachgas. Daarna wordt verder ingegaan op processen die van invloed zijn op lachgasemissies uit de landbouw. Als laatste komen de verschillende maatregelen aan bod die in de landbouw kunnen worden toegepast en het effect van deze maatregelen op lachgasemissies.

Inhoudsopgave

1. Wat is lachgas?
2. Is lachgas schadelijk?
3. Hoe wordt lachgas gevormd?
4. Wat zijn de factoren die lachgasemissie uit bodems bepalen?
5. Wat is de relatie met stikstof- en koolstofkringloop?
6. Wat zijn de belangrijkste bronnen van lachgas in Nederland?
7. Wat is de trend in lachgasemissie in Nederland?
8. Wat zijn de belangrijkste bronnen van lachgas in de wereld?
9. Wat is de trend in lachgasemissie in de wereld?
10. Hoe wordt lachgasemissie gemeten?
11. Hoe wordt lachgasemissie gemonitord en gerapporteerd?
12. Is een actualisatie van de emissiefactoren nodig?
13. Wat is het effect van weer op lachgasemissie?
14. Wat is het effect van bemesting op lachgasemissie?
15. Zijn er verschillen in lachgasemissie tussen verschillende kunstmeststoffen?
16. Zijn er verschillen tussen soorten mest en heeft mestbewerking een effect op lachgasemissie?

17. Wat is het effect van toedieningstechniek van mest en kunstmest op lachgasemissie?

18. Leiden nitrificatieremmers tot minder lachgasemissie?

19. Hebben gewasresten een effect op lachgasemissie?

20. Heeft de grondsoort een effect op lachgasemissie?

21. Heeft beweiding een effect op lachgasemissie?

22. Heeft drainage van veengronden een effect op lachgasemissie?

23. Heeft graslandvernieuwing een effect op lachgasemissie?

24. Heeft bodemverdichting een effect op lachgasemissie?

25. Wat zijn de factoren die lachgasemissie uit stallen bepalen?

26. Welke bemestingsmaatregelen kunnen worden genomen om lachgasemissie te beperken?

27. Welke overige maatregelen kunnen worden genomen om lachgasemissie te beperken?

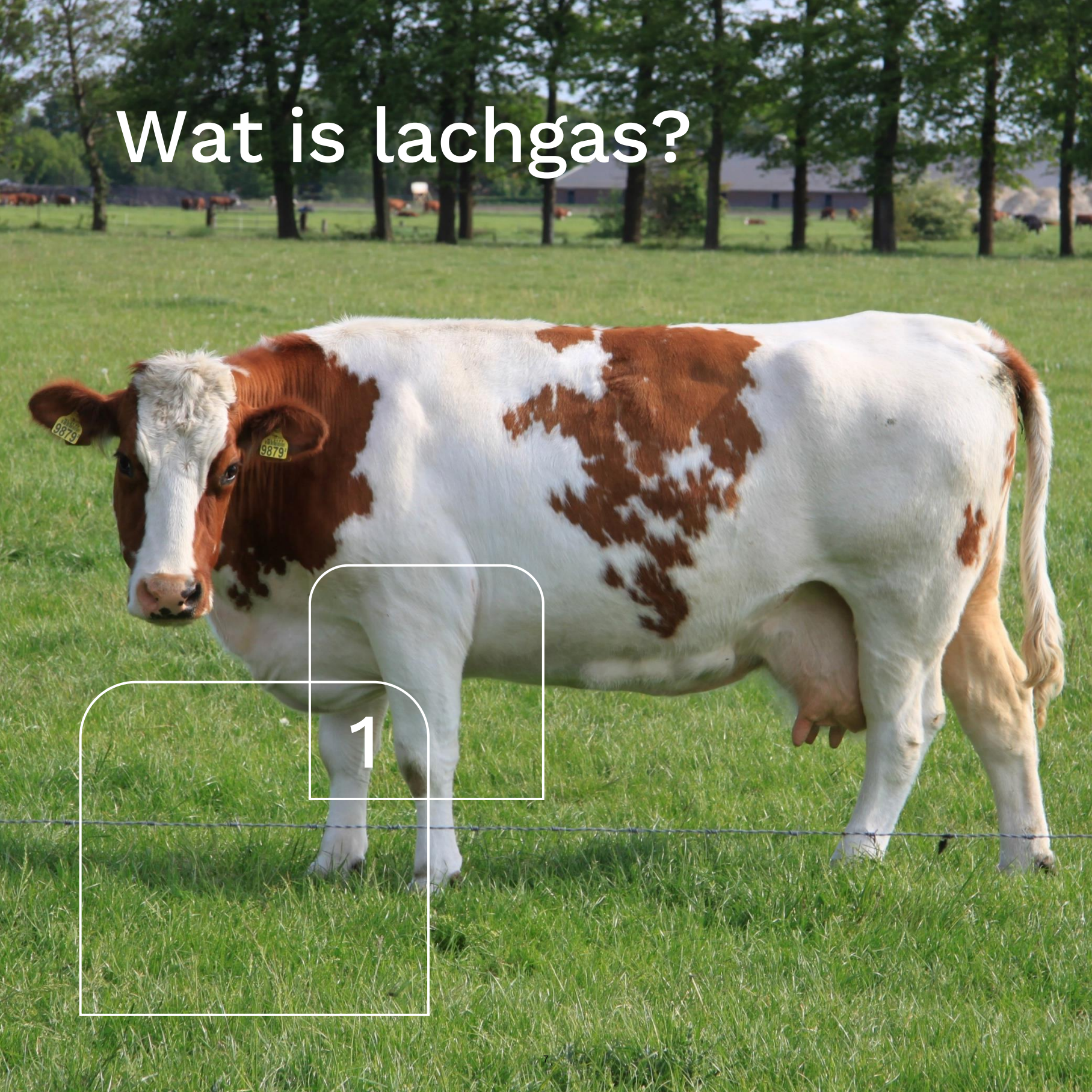
28. Hebben maatregelen in het kader van het mest- en ammoniakbeleid een effect op lachgasemissie?

29. Hebben maatregelen om koolstof op te slaan in bodems een effect op lachgasemissie?

30. Hebben maatregelen om methaanemissie te beperken een effect op lachgasemissie?

Referenties

Wat is lachgas?



1

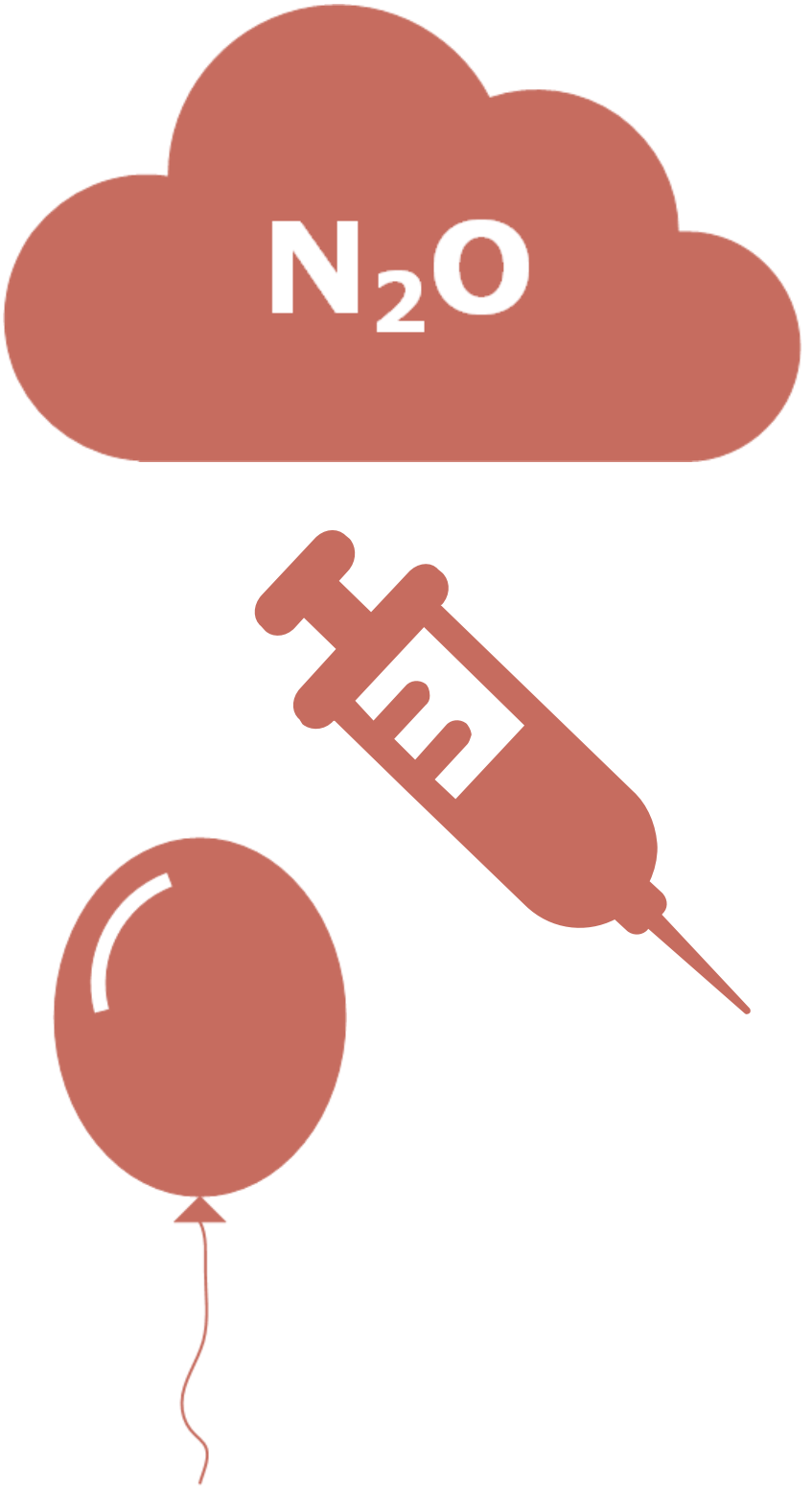
Lachgas, ook wel distikstofmonoxide genoemd, is een kleurloos niet-ontvlambaar gas dat van nature in kleine hoeveelheden voorkomt in de atmosfeer (±300 ppb). De chemische aanduiding voor lachgas is N_2O.

Lachgas is een sterk broeikasgas, vele malen sterker dan koolstofdioxide (CO_2). Met het aardopwarmingsvermogen wordt aangegeven hoe groot het opwarmende effect van verschillende gassen is. Dit vermogen wordt uitgedrukt ten opzichte van CO_2. Lachgas heeft een aardopwarmingsvermogen dat 265 keer sterker is dan CO_2 over een tijdsschaal van 100 jaar. Lachgas is een sterker broeikasgas dan CO_2 doordat de verblijfsduur van lachgas in de atmosfeer met 121 jaar erg lang is. Daarnaast heeft lachgas een sterke absorptiecapaciteit van infrarode straling, waardoor een lachgasmolecuul in staat is om veel warmte afkomstig van de aarde vast te houden.

Lachgas is niet alleen bekend om het feit dat het een sterk broeikasgas is. In de medische wereld wordt lachgas gebruikt om mensen onder narcose te brengen. Tegenwoordig zijn er echter meer geschikte middelen die worden toegepast als narcosemiddel. Lachgas wordt nog wel gebruikt als kortdurende pijnstiller, door bijvoorbeeld tandartsen en ambulancepersoneel.

Daarnaast is lachgas bekend als drug. Door lachgas te inhaleren, bijvoorbeeld door middel van een ballon, ontstaat een kortdurende maar sterke roes. Hierbij daalt het bewustzijn en wordt de waarneming beïnvloed, waardoor beeld en geluid anders binnen komen. Dat kan onder andere leiden tot euforie, ook wel lacherigheid. Vandaar de term ‘lach’ gas.

De laatste bekende toepassing van lachgas wordt gevonden in de auto- en motorsport. Daar wordt het gas gebruikt als oxidator om het vermogen van de motor te verhogen.



Is lachgas schadelijk?

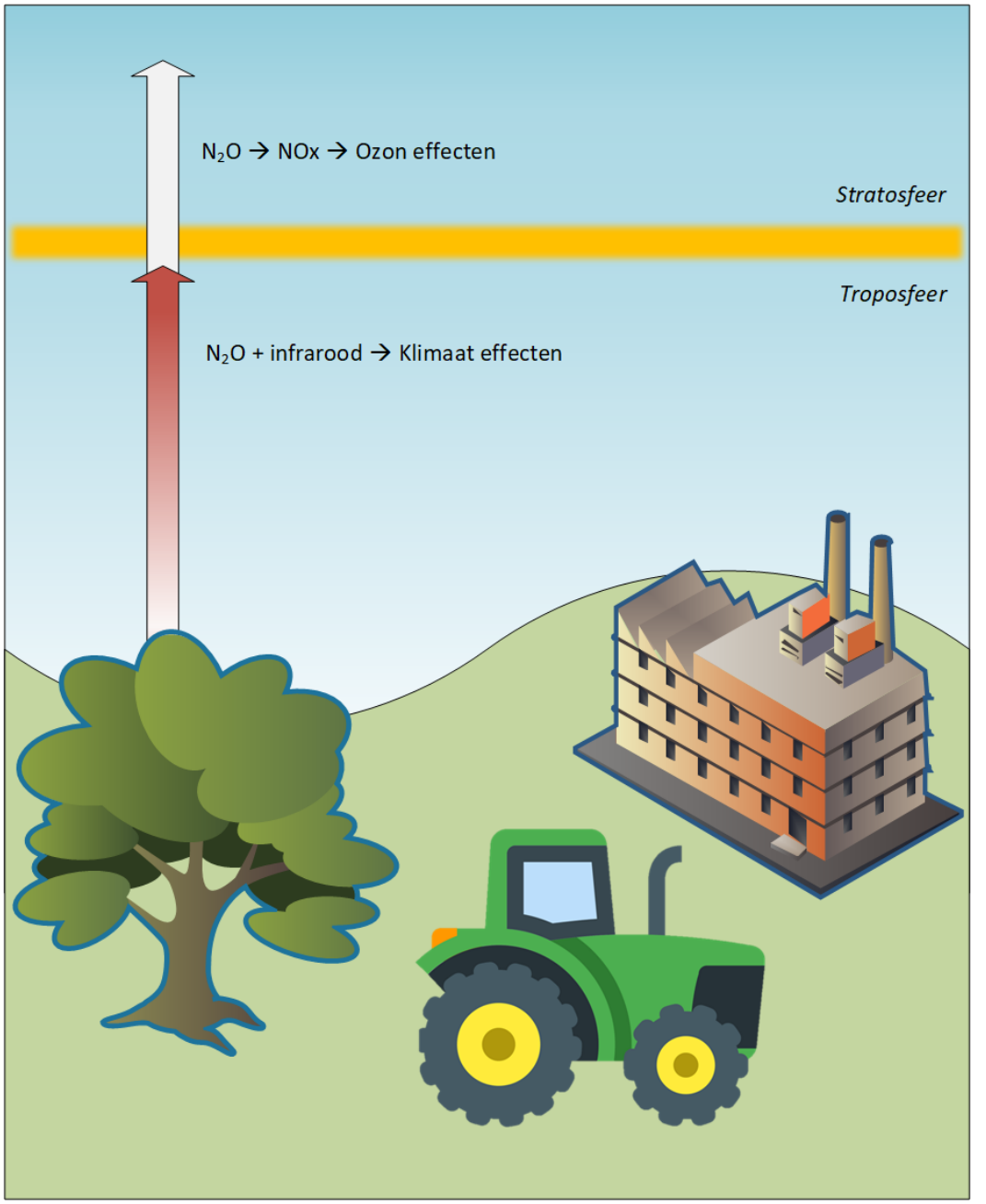
2

Lachgas komt van nature in kleine hoeveelheden in de atmosfeer voor en vormt daarbij geen risico voor het milieu. De natuurlijke concentraties lachgas in de atmosfeer zijn ook dusdanig laag dat ze geen schadelijk effect hebben op mens en dier.

Lachgas is een sterk broeikasgas. Een toename van de concentratie lachgas in de atmosfeer leidt tot een versterkt broeikasgaseffect, wat wel schadelijk kan zijn voor het milieu, mens en dier.

Naast een bijdrage aan het broeikaseffect heeft lachgas ook de eigenschap dat het de ozonlaag afbreekt. De Nederlandse Nobelprijs winnaar Paul Crutzen[1] was een van de eersten die ontdekte dat lachgas een rol heeft bij de afbraak van de ozonlaag. Lachgas heeft de grootste bijdrage aan het afbreken van de ozonlaag sinds de concentraties van de voor de ozonlaag schadelijke chloorfluorkoolstofverbindingen (cfk's) sinds het Montreal Protocol sterk zijn afgenomen.

Lachgas heeft geen negatief effect op de natuur. Lachgas is een stikstofverbinding en wordt in de lucht afgebroken en heeft geen bijdrage aan depositie van stikstof op natuur. De stikstofdepositie op natuur is afkomstig van ammoniak (NH_3) en stikstofoxiden (NO_x). In het kader van het stikstofbeleid worden geen specifieke maatregelen genomen om lachgasemissie te reduceren.



Schadelijke effecten van lachgas in de troposfeer en de stratosfeer (naar Wuebbles, 2009).

[1] https://www.mediatheque.lindau-nobel.org/laureates/crutzen

Hoe wordt lachgas gevormd?

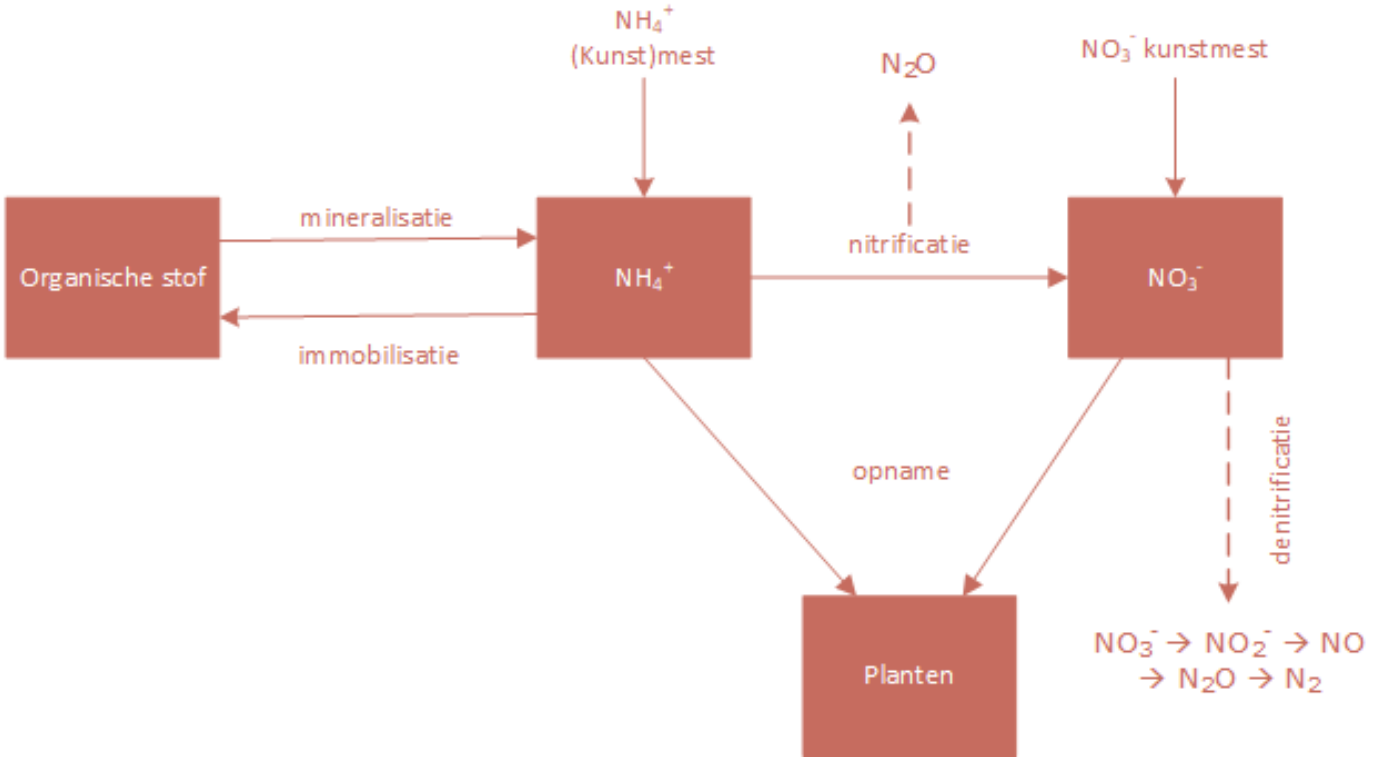
3

Lachgas komt op natuurlijke wijze vrij wanneer nitraat (NO_3^-) wordt gevormd (nitrificatie) of wordt afgebroken (denitrificatie). Deze processen maken onderdeel uit van de stikstofkringloop en treden op in bodems en water, maar ook in mestopslagen en composthopen.

Denitrificatie zorgt voor de grootste bijdrage aan lachgasvorming. Denitrificatie is de microbiologische omzetting van nitraat naar de gasvormige stikstofverbindingen stikstofgas (N_2), lachgas en stikstofoxiden (NO_x). Dit proces treedt op onder zuurstofloze omstandigheden. Organische stof in de bodem is de energiebron voor denitrificerende bacteriën. De afbraak van organische stof heet mineralisatie. Het omgekeerde proces, waarbij stikstof wordt gebonden aan organische stof, heet immobilisatie. Hoe gemakkelijker de organische stof is af te breken, hoe gemakkelijker de denitrificerende bacteriën er energie uithalen voor de omzetting van nitraat. In landbouwgronden komt gemakkelijk afbreekbare organische stof voor in gewasresten, mest, wortels van gewassen, grasland en veen.

Nitrificatie is de microbiologische omzetting van ammonium (NH_4^+) naar nitraat. Voor dit proces is zuurstof nodig. Onder zuurstofarme omstandigheden wordt nitrificatie geremd en kan er lachgas worden gevormd.

Nitrificatie en denitrificatie kunnen gelijktijdig in de bodem voorkomen of afwisselend tijdens droge en natte perioden. Ook zijn er bepaalde soorten bacteriën die zowel kunnen nitrificeren als denitrificeren. Onder specifieke omstandigheden waarbij nitriet (NO_2^-) in de bodem wordt gevormd, kan ook chemische denitrificatie plaatsvinden in de bodem en leiden tot lachgasemissie. Hoge ammoniakconcentraties in de bodem, zoals bijvoorbeeld in urineplekken en in de buurt van korrels van ureummeststof, kunnen nitrificatie remmen en leiden tot vorming van nitriet en lachgas.



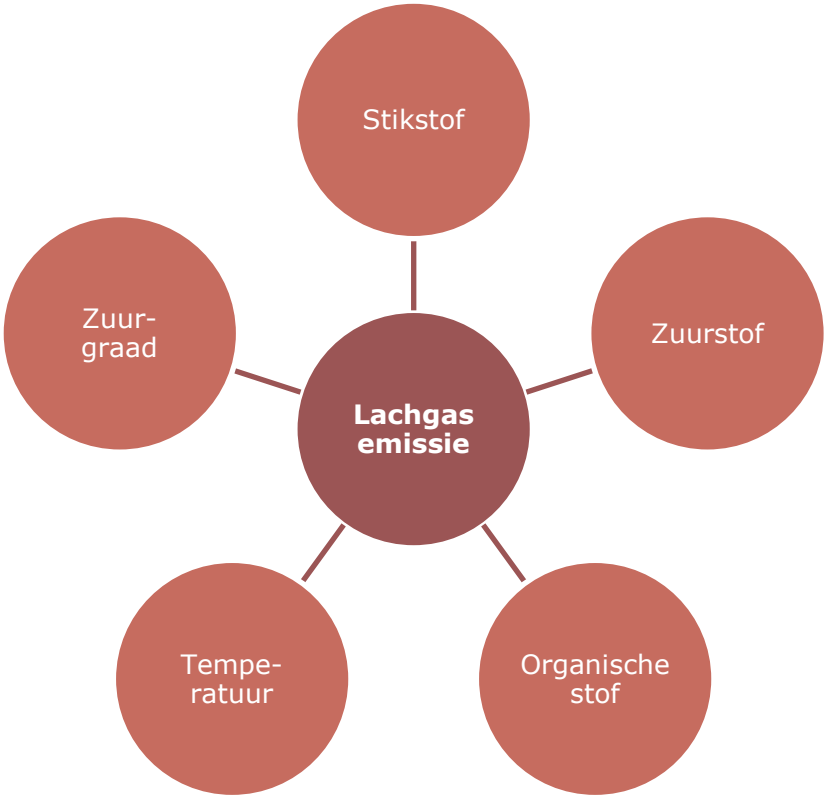
Verband tussen processen die kunnen leiden tot lachgasemissie. Naar Ussiri & Lal, 2013.

Wat zijn de factoren die lachgasemissie uit bodems bepalen?

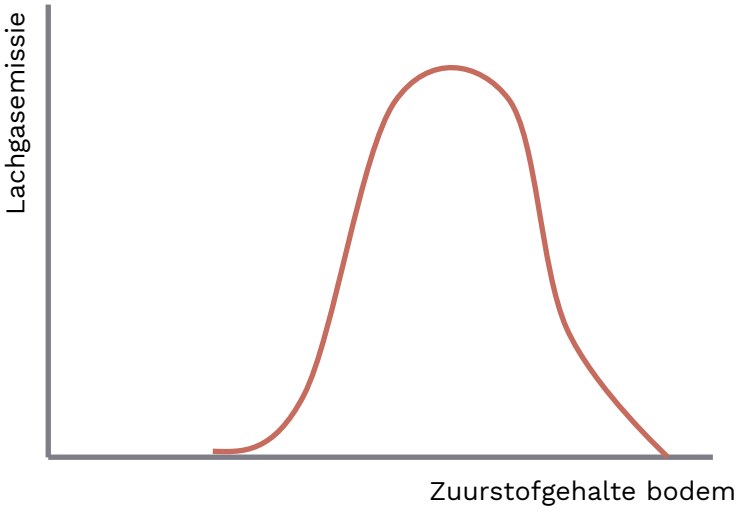
4

De belangrijkste factoren die een rol spelen bij lachgasemissie uit bodems zijn:
- de hoeveelheid stikstof in de bodem
- het zuurstofgehalte in de bodem
- de hoeveelheid organische stof in de bodem
- de temperatuur
- de zuurgraad (pH) van de bodem

Stikstof. Voor nitrificatie is er ammonium nodig. Ammonium kan direct worden toegediend aan de bodem met kunstmest en/of dierlijke mest en via depositie uit de atmosfeer. Ammonium kan ook worden gevormd uit mineralisatie van organische stof in mest, gewasresten, veen en de bodem. Bij nitrificatie wordt nitraat gevormd. Dit nitraat kan worden gedenitrificeerd door bacteriën tot stikstofgassen, waaronder lachgas. Daarnaast kan nitraat rechtstreeks worden toegediend met kunstmest of via atmosferische depositie in de bodem terecht komen. Het risico op lachgasemissie neemt toe naarmate er meer minerale stikstof (ammonium + nitraat) in de bodem aanwezig is.



Zuurstofgehalte. Voor nitrificatie is zuurstof nodig. Lachgas wordt tijdens nitrificatie gevormd als nitrificatie enigszins geremd wordt door een laag zuurstofgehalte. Denitrificatie treedt op tijdens zuurstofloze omstandigheden. Bij volledig zuurstofloze omstandigheden is stikstofgas (N_2) het eindproduct van denitrificatie, lachgasvorming treedt met name op als er weinig zuurstof aanwezig is en denitrificatie niet optimaal verloopt. De hoeveelheid neerslag, beregening, grondwaterstand en biologische zuurstofconsumptie bij afbraakprocessen in de bodem zijn factoren die een groot effect hebben op het zuurstofgehalte in de bodem en daarmee op lachgasemissie.



Organische stof. Organische stof, bestaande uit koolstof (C), waterstof (H), zuurstof (O) en stikstof (N), fosfor (P) en zwavel (S) heeft verschillende effecten op lachgasemissie. Gemakkelijk afbreekbare organische stof is de energiebron voor denitrificerende bacteriën en bepaalt daardoor in sterke mate de denitrificatieactiviteit in de bodem. Organische stof heeft daarnaast ook effecten op het zuurstofgehalte in de bodem. Bij afbraak van organische stof door bacteriën wordt zuurstof geconsumeerd, waardoor zuurstofarme condities kunnen ontstaan. Organische stof heeft daarentegen ook een positief effect op de bodemstructuur en daarmee de luchtgevulde poriën van de bodem. Organische stof bevat tevens stikstof, die na mineralisatie vrij kan komen en tot lachgasemissie kan leiden.

Temperatuur. Nitrificatie en denitrificatie zijn biologische processen, waarvan de activiteit toeneemt naarmate de temperatuur hoger wordt. De verhouding van de eindproducten van denitrificatie (N_2, NO_x en N_2O) wordt beïnvloed door de temperatuur. Hoe lager de temperatuur, hoe relatief meer lachgas er wordt gevormd. Een toenemende temperatuur, leidt tot een hoger totaal stikstofverlies door denitrificatie maar tot een afname van het aandeel lachgas in het totale stikstofverlies. Het netto effect van temperatuur op denitrificatie is daardoor moeilijk te voorspellen.

Zuurgraad. Biologische processen zoals nitrificatie en denitrificatie worden geremd bij verzuring van de bodem. Verzuring leidt daarom tot een afname van de lachgasemissie. Het aandeel lachgas in het totale stikstofverlies door denitrificatie, de verhouding $N_2O/(N_2O + N_2 + NO_x)$, neemt daarentegen toe bij een dalende zuurgraad.

Interactie tussen factoren. De genoemde factoren kunnen elkaar versterken. Het risico op lachgasemissie is het grootst als meerdere factoren optimaal zijn voor de productie van lachgas.

Wat is de relatie met de stikstof- en koolstofkringloop?

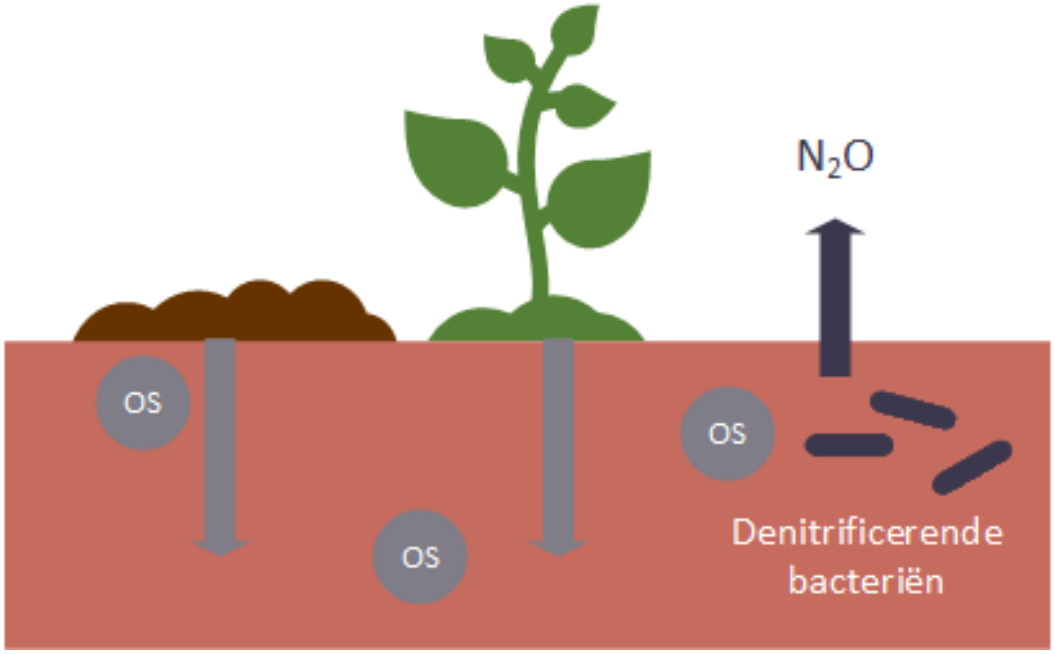
5

Organische stof in de bodem bestaat uit een brede verzameling van verbindingen van de atomen C, H, O, N, P en S met verschillende eigenschappen. Organische stof beïnvloedt de biologische, fysische en chemische bodemkwaliteit, afhankelijk van de hoeveelheid en samenstelling van de organische stof.

De kringlopen van koolstof en stikstof zijn sterk aan elkaar gekoppeld. Lachgas wordt gevormd tijdens nitrificatie en denitrificatie. Denitrificatie wordt gezien als een van de sleutelprocessen in de biogeochemische stikstofkringloop, waarmee het de grootste bron vormt van lachgasemissies. Er is een relatie tussen gemakkelijk afbreekbare organische stof in de bodem en lachgasemissies. Afbreekbare organische stof voorziet in koolstof en vormt een energiebron voor heterotrofe denitrificerende organismen. Dit zijn organismen die koolstof uit organische stof gebruiken als energiebron en daarbij nitraat kunnen omzetten in lachgas.

Daarnaast draagt de organische stof in de bodem bij aan een verhoogde activiteit van micro-organismen. Hierdoor neemt de zuurstofconsumptie door deze organismen toe. Het gevolg is een afnemend zuurstofgehalte, waardoor zuurstofloze condities ontstaan in de bodem. Onder zuurstofloze omstandigheden treedt denitrificatie op en onder zuurstofarme omstandigheden neemt de lachgasproductie tijdens nitrificatie toe. Het risico op de emissie van lachgas neemt dus toe bij een toename in gemakkelijk afbreekbare organische stofgehalte.

Stikstofmineralisatie is het proces waarbij organisch gebonden stikstof wordt afgebroken tot ammonium. Ammonium kan door nitrificerende bacteriën worden omgezet in nitraat en dit kan leiden tot lachgasemissie. Stikstofmineralisatie kan met name leiden tot meer lachgasemissie en nitraatuitspoeling indien het optreedt tijdens perioden in het jaar waarin er geen gewas aanwezig is of indien er bij de stikstofbemesting van het gewas geen rekening wordt gehouden met de stikstof die vrijkomt door mineralisatie.



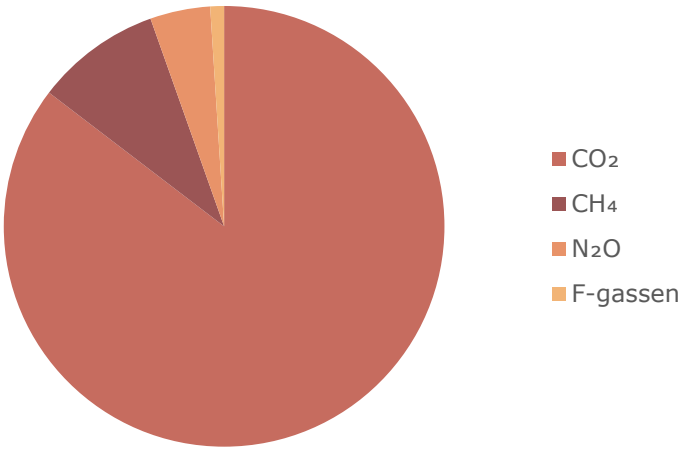
Visuele weergave van de interactie tussen de koolstof- en stikstofkringloop. Organische stof (OS) uit mest, gewassen en gewasresten dienen als energiebron voor denitrificerende bacteriën, waarbij deze nitraat omzetten in o.a. lachgas (N_2O).

Wat zijn de belangrijkste bronnen van lachgas in Nederland?

6

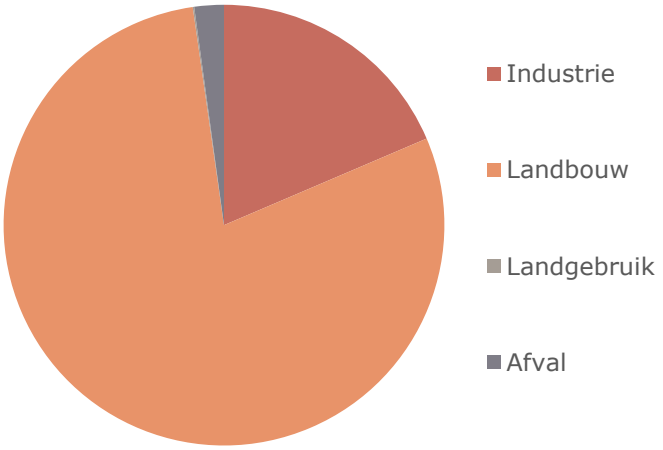
In Nederland draagt lachgas met 8,3 Mton CO_2-equivalenten (eq) voor 4,4% bij aan de totale uitstoot van broeikasgassen in Nederland (Figuur A). De landbouw is de belangrijkste bron van lachgasemissie, met een aandeel van 73% van de totale lachgasemissie in Nederland (Figuur B). Binnen de landbouw zijn de landbouwgronden de grootste bron van lachgasemissies met een aandeel van 64% van de totale lachgasemissies van Nederland. Andere sectoren die verantwoordelijk zijn voor lachgasemissies zijn de chemische industrie (16%) en afvalbewerking (2%).

Binnen de landbouwsector dragen toediening van kunstmest (1,4 Mton CO_2-eq in 2018) en dierlijke mest (1,3 Mton CO_2-eq) met ieder ongeveer 25% het meest bij aan de lachgasemissie. Dit is voor zowel kunstmest als dierlijke mest gelijk aan ongeveer 16% van de totale lachgasemissie in Nederland (of 0,7% van de totale broeikasgasemissies). Ook de urine en mest van grazend vee zorgt voor een significante bijdrage aan lachgasemissies van 11% van de totale lachgasemissie in Nederland (Figuur C).

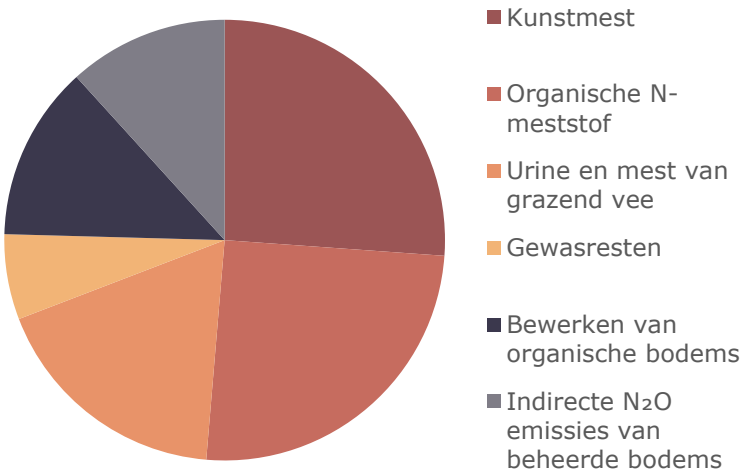


A

Het aandeel per broeikasgas (CO_2, CH_4, N_2O en F-gassen) aan de totale uitstoot van broeikasgassen in Nederland, in percentages gebaseerd op CO_2-equivalenten (Emissieregistratie, 2018).



B



C

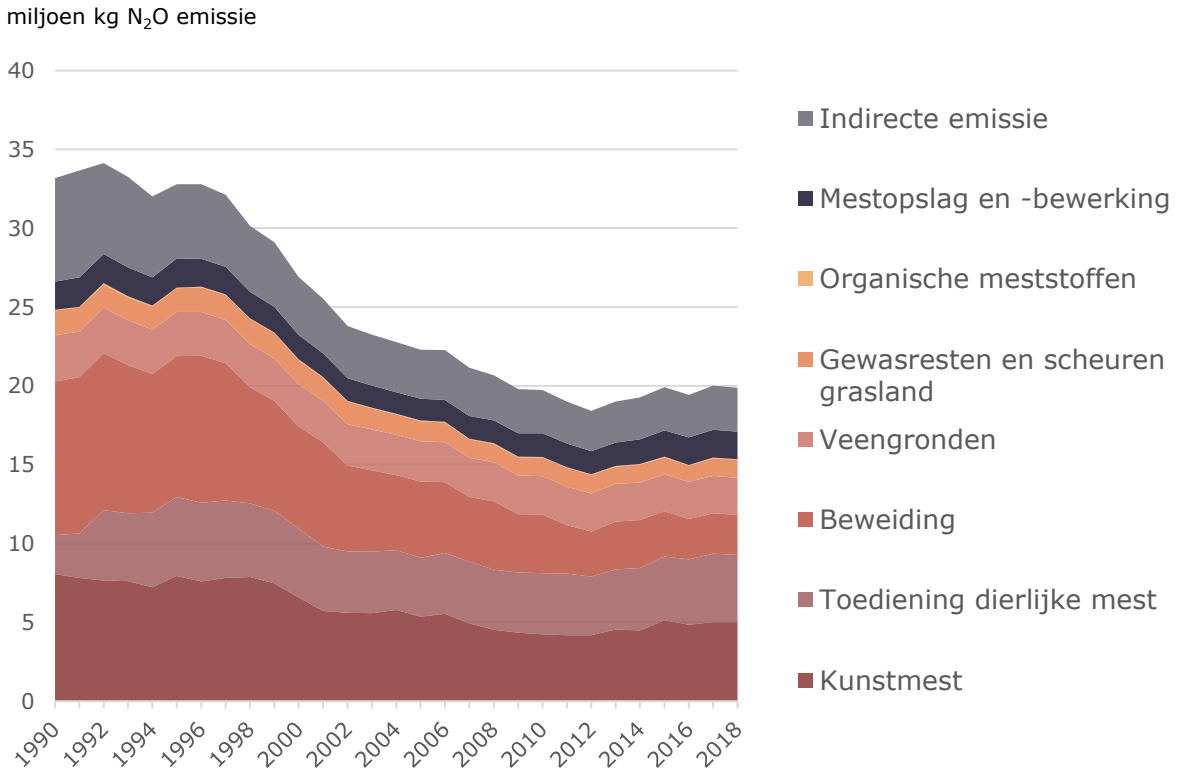
Bronnen van lachgasemissie in Nederland B) per sector en C) uit landbouwbodems in het jaar 2018, op basis van Ruyssenaars et al. (2020).

Wat is de trend van lachgasemissie in Nederland?

7

Sinds het referentiejaar 1990 zijn de lachgasemissies met 54% afgenomen in Nederland, van 18,8 Mton CO_2-eq in 1990 naar 8,3 Mton CO_2-eq in 2017. Deze forse afname is met name het resultaat van een forse afname (80%) in de emissies uit de industriële processen door het gebruik van katalysatoren bij de productie van nitraathoudende kunstmest.

Binnen de landbouwsector heeft de grootste afname van lachgasemissies plaatsgevonden in de categorie landbouwbodems (42% afname sinds 1990). Deze afname, die rond 1990 is ingezet, is met name het resultaat van een afname in het kunstmestgebruik en beweiding. Indirecte lachgasemissies, welke zijn gerelateerd aan stikstofuitspoeling en ammoniakemissie, zijn hierdoor ook afgenomen. Deze afnemende trends zijn voornamelijk veroorzaakt door bemestingsnormen in het mestbeleid in Nederland. In begin jaren ’90 is echter ook een toename van de lachgasemissie waarneembaar. Om ammoniakemissies te reduceren is in 1995 in het mestbeleid opgenomen dat drijfmest in de bodem geïnjecteerd dient te worden, waar dit voorheen nog oppervlakkig werd toegediend, wat leidt tot meer minerale stikstof in de bodem.



Trends en lachgasemissie per broncategorie uit de landbouwbodems in miljoen kg N_2O emissie, 1990-2018 (Emissieregistratie, 2018).

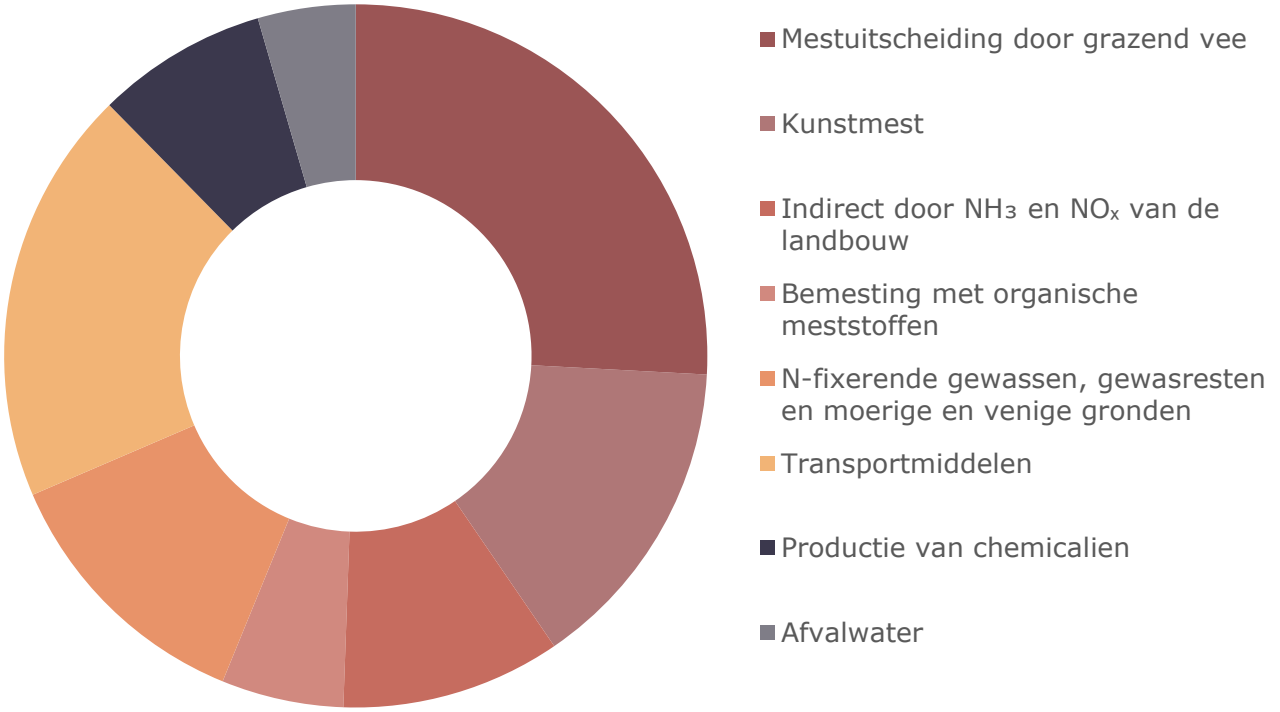
Wat zijn de belangrijkste bronnen van lachgas in de wereld?

8

Lachgasemissie draagt wereldwijd voor 6% bij aan het totaal van de broeikasgasemissies. De landbouw zorgt voor de grootste bijdrage van lachgasemissies; 75% van de lachgasemissies komt van de landbouw.

De belangrijkste bronnen van lachgasemissies uit de landbouw zijn van mestuitscheiding door grazend vee en toediening van kunstmest (23% en 13%, respectievelijk). Andere belangrijke bronnen van lachgas in de landbouw zijn indirecte lachgasemissies gerelateerd aan ammoniak emissies en nitraatuitspoeling (9%), emissies als gevolg van het toedienen van organische meststoffen (5%) en emissies van stikstof-fixerende gewassen, gewasresten en de zogenaamde venige en moerige gronden, samen verantwoordelijke voor 11% van de emissies.

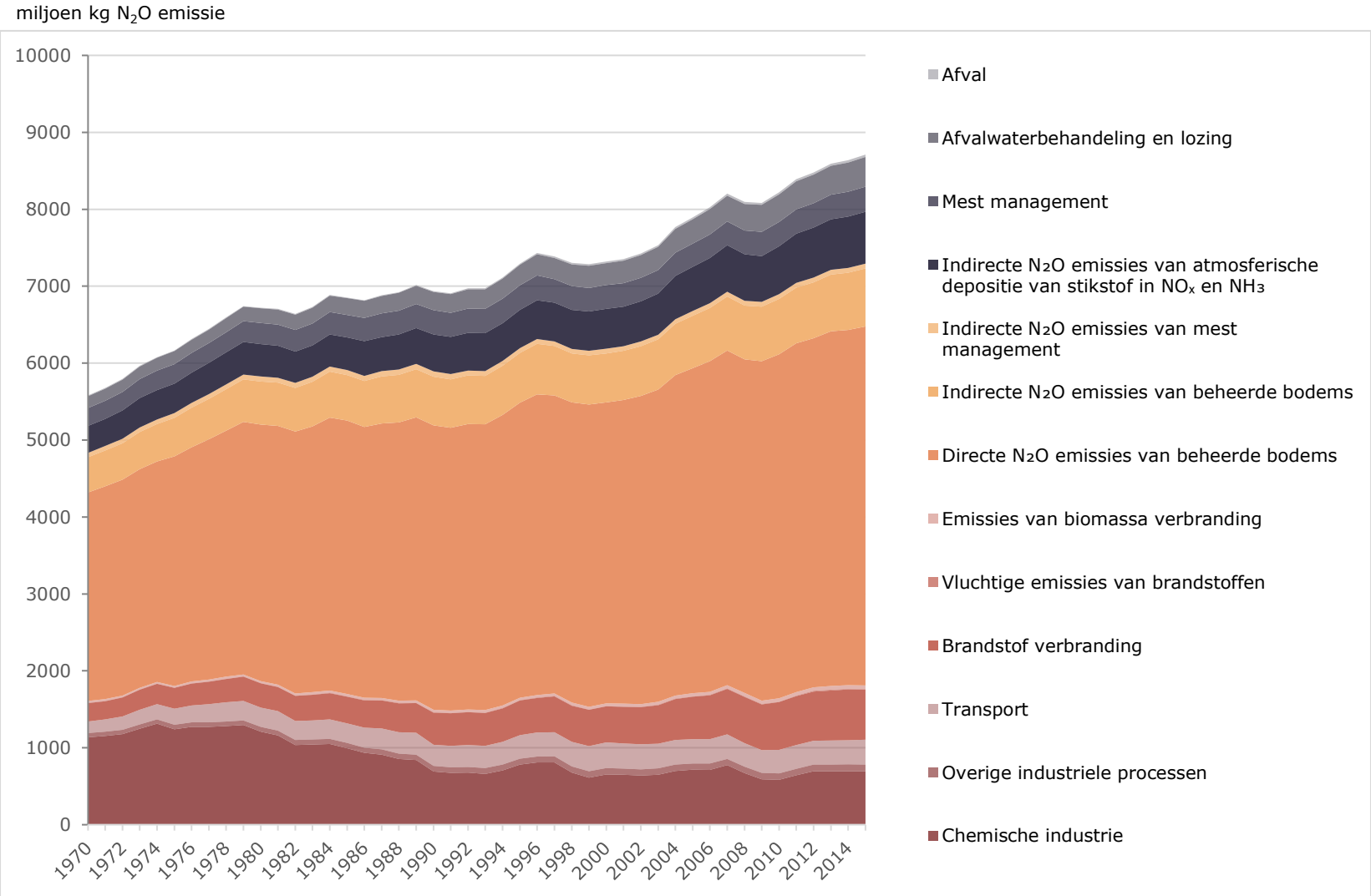
Naast emissies door landbouwactiviteiten ontstaan lachgasemissies ook als gevolg van brandstofverbranding van met name transportmiddelen (17%), de productie van chemicaliën (7%) en door afvalwater (4%).



Grootste bronnen van lachgasemissie in de wereld in het jaar 2018 (naar Olivier & Peters, 2019).

Wat is de trend van lachgasemissie in de wereld?

Lachgasemissies zijn in het jaar 2018 wereldwijd met 0,8% gestegen, naar een totaal van 2800 Mton CO_2-eq. Ook in 2015 en 2016 is de lachgasemissie gestegen (met respectievelijk 0,9% en 0,6%). De lachgasemissie in 2018 was 30% hoger dan in 1960, toen de emissie 2200 Mton CO_2-eq bedroeg. Deze forse toename wordt met name veroorzaakt door hogere emissies uit de landbouw. In de chemische industrie namen de emissies af. De grootste afname heeft plaatsgevonden in Europa. In India, China, Brazilië en Mexico zijn de emissies sterk gestegen de afgelopen 10 jaar.



Wereldwijde trend in lachgasemissie, opgedeeld naar belangrijkste bron (Bron: EDGAR v.5.0).

Hoe wordt lachgasemissie gemeten?

10

Voor het meten van lachgasemissies uit bodems zijn meerdere methodes beschikbaar. Voor het meten zijn twee stappen vereist: 1) het verzamelen van gasmonsters en 2) het analyseren van deze gasmonsters. Voor het verzamelen van de gasmonsters uit de bodem is de 'chamber' methode, oftewel de kamermethode, populair. Bij deze methode wordt een kamer van 0,1 tot 0,5 m^2, in de vorm van een box of cilinder, over het bodemoppervlak geplaatst, waarbij de kamer luchtdicht wordt afgesloten en er geen lucht van buitenaf in de kamer terecht kan komen. Meestal wordt de kamer voor een bepaalde periode op de bodem geplaatst, waarbij de lachgasconcentratie kan accumuleren tot een hogere concentratie dan in de buitenlucht.

Waar vroeger het gas uit de kamer werd afgevangen met een injectiespuit en deze vervolgens op het laboratorium werd geïnjecteerd in de gasanalyzer, gaat tegenwoordig vaak de gasanalyzer mee het veld in en wordt ter plekke de concentratie bepaald doordat de kamer wordt verbonden aan de gasanalyzer met slangen.

Experimentele opzet voor het uitvoeren van N_2O metingen. Via slangen wordt het gas uit de kamers naar de gas-analyser gevoerd.

Voor het bepalen van de lachgasconcentratie kunnen twee meettechnieken worden gebruikt, namelijk gaschromatografie of optische technieken. Bij gaschromatografie wordt gebruik gemaakt van een detector die elektronen opvangt. De optische technieken zijn gebaseerd op het vermogen van gassen om infrarood te absorberen, waarbij ieder gas dit doet op een unieke golflengte. Het grote voordeel van deze techniek ten opzichte van gaschromatografie is het vermogen om continue metingen uit te voeren. De gasanalyzers die in het veld kunnen worden toegepast zijn meestal gebaseerd op optische meettechnieken.

Met de kamermethode wordt de emissie over een klein oppervlak bepaald, die vervolgens wordt geëxtrapoleerd naar een grotere schaal. Met micro-meteorologische methodes, zoals Eddy covariance, kan over een groot oppervlak (10^2-10^4 m^2) de gasflux worden bepaald. Bij deze methoden worden sensoren in torens geplaatst, waarbij de windsnelheid, temperatuur en gasconcentraties worden gemeten.

Naast metingen van emissies uit de bodem met kamers of micro-meteorologische methoden (bottom-up), wordt steeds meer gebruik gemaakt van metingen van lachgasconcentraties in de atmosfeer en atmosferische modellen (top down) om emissies te berekenen.

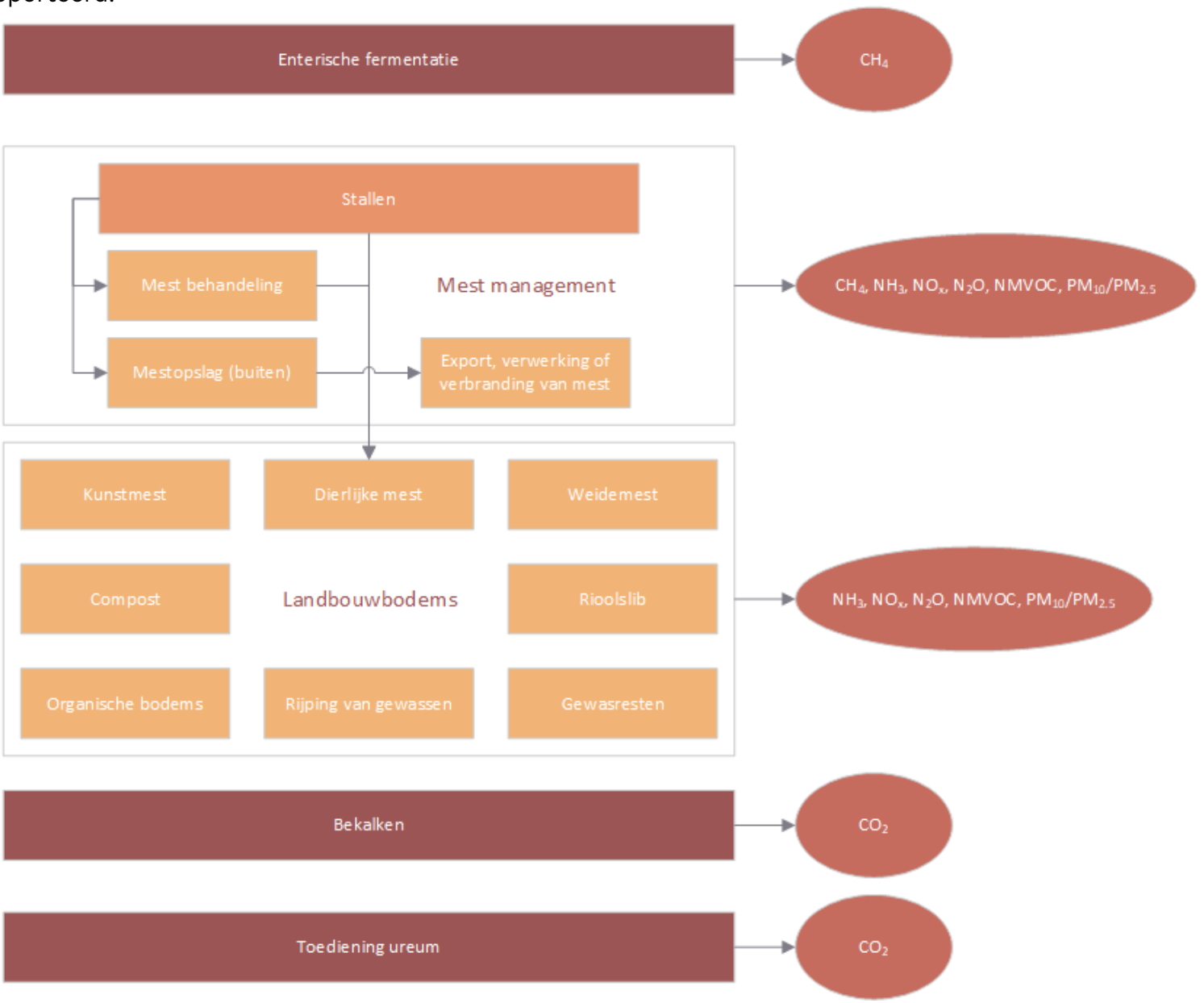
Eddy covariance opstelling voor het meten van de N_2O gasflux over een groot oppervlak.

Hoe wordt lachgasemissie gemonitord en gerapporteerd?

11

Landen moeten in het kader van het Klimaatverdrag van Parijs hun broeikasgasemissies rapporteren aan de United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Deze rapportage vindt plaats in een National Inventory Report (NIR), die moet voldoen aan de richtlijnen opgesteld door de Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In Nederland wordt de rapportage uitgevoerd door Emissieregistratie.

De lachgasemissie uit de landbouw die Nederland rapporteert wordt berekend met National Emission Model Agriculture (NEMA). Met dit model worden ook de emissies van methaan, ammoniak en fijnstof berekend. De methode wordt beschreven in een methoderapport en de uitgangspunten en resultaten worden jaarlijks gerapporteerd.



Processen en emissies uit de landbouw welke zijn opgenomen in het National Emission Model Agriculture (NEMA)

Er zijn twee hoofdbroncategorieën waarvan lachgasemissie wordt gerapporteerd, namelijk de emissie uit stallen en mestopslagen en de emissie uit landbouwgronden. Bij landbouwgronden wordt onderscheid gemaakt naar kunstmest, dierlijke mest, beweiding, zuiveringsslib, overige organische meststoffen zoals compost, gewasresten, mineralisatie van veengronden en scheuren van grasland. Ook wordt de indirecte lachgasemissie berekend die gerelateerd is aan stikstofuitspoeling en ammoniakemissie.

Lachgasemissie wordt berekend uit een activiteit en een emissiefactor. De activiteit (uitgedrukt in stikstof) is bijvoorbeeld de hoeveelheid mest die in een stal wordt opgeslagen, hoeveel kunstmest en dierlijke mest er worden toegediend en hoeveel beweiding er plaats vindt. Activiteiten worden veelal afgeleid uit statistieken, zoals de Landbouwtelling. De emissiefactor is de hoeveelheid lachgasstikstof die wordt geproduceerd per eenheid toegediende of aanwezige stikstof en wordt om die reden vaak aangeduid als percentage van de totale hoeveelheid stikstof die betrokken is bij een activiteit.

In NEMA worden standaard IPCC-emissiefactoren voor stallen en opslagen gebruikt; de lachgasemissie bedraagt 0,2% van de geproduceerde N voor drijfmest en 0,5% van de geproduceerde N voor vaste mest, behalve voor pluimveemest (emissiefactor 0,1%) en geitenmest (1,0%). Voor de emissie uit landbouwgronden worden specifieke emissiefactoren voor Nederland gehanteerd, behalve voor mineralisatie uit veengronden en indirecte emissies. In onderstaande tabel staat een overzicht gegeven van de emissiefactoren voor landbouwgronden.

Naast de bronnen van lachgas uit de landbouw moet ook de lachgasemissie veroorzaakt door landgebruiksveranderingen (LULUCF) worden gerapporteerd.

Emissiefactoren voor lachgas uit landbouwgronden (van der Zee et al. 2021; Velthof & Mosquera, 2011).

Lachgasbron	Grondsoort	N_2O-emissiefactor, % van N	
		Grasland	Bouwland
Dierlijke mest, ammoniak-emissiearm	Minerale gronden	0,3	1,3
	Veengronden	1,0	-
Dierlijke mest, bovengronds	Minerale gronden	0,1	0,6
	Veengronden	0,5	-
Kunstmest	Minerale gronden	0,8	0,7
	Veengronden	3,0	-
Beweiding	Minerale gronden	2,5	-
	Veengronden	6,0	-
Gewasresten	Alle	1,0	
Zuiveringsslib	Alle	0,9	
Organische meststoffen	Alle	0,4	
Stikstofmineralisatie veen	Veengronden	2,0	
Indirecte lachgasemissie: N uitspoeling	n.v.t.	0,75	
Indirecte lachgasemissie: N depositie	n.v.t.	1,0	
Scheuren van grasland	Alle	5,5 kg N per ha	

Is een actualisatie van de emissiefactoren nodig?

12

Nederland hanteert een landenspecifieke methodiek om lachgasemissie uit landbouwgronden te berekenen (zie Vraag 11). Het doel van de landenspecifieke methode is om de lachgasemissie zo nauwkeurig mogelijk te bereken en te rapporteren. Daarnaast moet het met de methodiek mogelijk zijn om de effecten van maatregelen te berekenen; alleen dan kan de reductie in broeikasgasemissies worden gekwantificeerd en kan worden bepaald of Nederland voldoet aan de klimaatdoelstellingen uit het Klimaatakkoord en de Parijs-conventie. In het kader van het Klimaatakkoord zijn er afspraken gemaakt over de reductie van broeikasgasemissies uit veengronden en minerale gronden[1].

Veengronden zijn een grote bron van koolstofdioxide en er loopt onderzoek naar de effecten van verhoging van het grondwaterpeil en aanpassing aan drainage op de emissies van koolstofdioxide en lachgas. Op termijn kunnen op basis van dit onderzoek de lachgasemissiefactoren voor veengronden geactualiseerd en verfijnd worden, waarbij rekening wordt gehouden met grondwaterpeil en/of drainage.

Koolstofopslag in minerale gronden is een van de maatregelen uit het klimaatakkoord. Maatregelen voor koolstofopslag hebben ook een effect op lachgasemissie, omdat de koolstof- en stikstofkringlopen aan elkaar verbonden zijn (Vraag 5). Er loopt onderzoek naar de effecten van koolstofmaatregelen op lachgasemissie en dit zal op termijn kunnen leiden tot actualisatie en verfijning van emissiefactoren voor bemesting op minerale gronden.

Uit resultaten van het beschikbare onderzoek blijkt dat er grote verschillen kunnen bestaan in lachgasemissie tussen kunstmestsoorten (tabel uit Vraag 15). Dit biedt mogelijkheden om lachgasemissie te beperken door afstemming van kunstmestsoort op gewas, bodemcondities en weer. Er zijn op dit moment echter onvoldoende gegevens om specifieke emissiefactoren voor kunstmestsoorten af te leiden in de Nederlandse rekenmethodiek.

[1]Zie hoofdstuk C4 Landbouw en Landgebruik uit het Klimaatakkoord, 2019.

Ook laten veld- en incubatiestudies grote verschillen in lachgasemissie zien tussen mestsoorten (bijvoorbeeld een hogere emissie uit varkensmest dan rundermest), toedieningstechnieken (bijvoorbeeld een lagere emissie bij diep injecteren dan ondiep injecteren) en bewerkte mesten (bijvoorbeeld een hogere emissie bij mineralenconcentraat dan bij de dikke fractie van mest). Inzicht in dit soort verschillen in lachgasemissie kan worden gebruikt om maatregelen af te leiden om lachgasemissie te beperken. Een actualisatie en verfijning van lachgasemissiefactoren is hiervoor nodig.

Een deel van de lachgasemissiefactoren die in Nederland worden gehanteerd, is gebaseerd op onderzoek uit de jaren ’90 en een deel is gebaseerd op onderzoek uit de periode 2000-2010. Sinds 2011 zijn er geen nieuwe emissiefactoren afgeleid uit experimenteel onderzoek. In 2019 is veldonderzoek gestart naar lachgasemissie uit veengronden en minerale gronden, dat op termijn zal leiden tot actualisatie van een deel van de emissiefactoren. In de review door de IPCC in 2018 van de Nederlandse methodiek om lachgasemissie te berekenen zijn vragen gesteld over de toepasbaarheid van emissiefactoren die in de jaren ’90 zijn afgeleid. Dit geeft aan dat actualisatie van emissiefactoren niet alleen gericht moet zijn op nieuwe maatregelen, zoals drainage van veengronden, koolstofmaatregelen in minerale gronden en mestbewerking, maar ook op de verbetering van de onderbouwing van de emissiefactoren die nu worden toegepast. Deze verbeteringen verminderen de onzekerheden in de gerapporteerde emissies.

Mineralenconcentraten waarvan de lachgasemissie middels een incubatieproef wordt bepaald.

Wat is het effect van het weer op lachgasemissie?

13

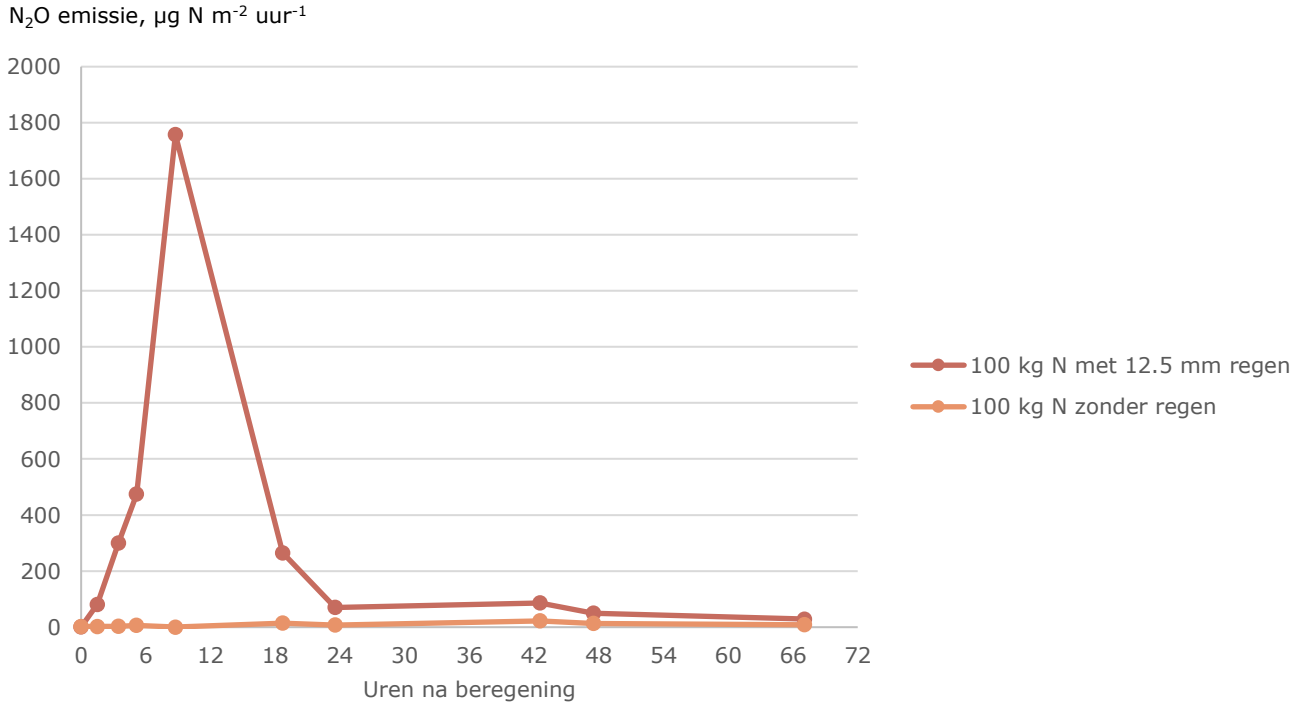
Neerslag heeft een groot effect op het zuurstofgehalte in de bodem en daardoor op lachgasemissie. Dit geldt met name als de neerslag valt op een bodem die veel minerale stikstof bevat, bijvoorbeeld doordat er bemest is.

Een regenbui kan leiden tot een kortstondige piek in de lachgasemissie. Hoge lachgasemissies ontstaan als een periode van droogte wordt gevolgd door een natte periode. Langdurige neerslag waarbij de bodem verzadigd raakt, kan leiden tot een lage lachgasemissie omdat luchtstikstof dan het belangrijkste eindproduct is van denitrificatie als gevolg van zuurstofloze omstandigheden.

Zoals in het vorige hoofdstuk aangegeven heeft de temperatuur tegengestelde effecten op lachgasemissie. Daardoor kan lachgasemissie bij zowel warm als koud weer optreden.

In perioden van vorst en dooi kunnen hoge pieken van lachgas ontstaan. Het exacte mechanisme hiervan is niet bekend. Een mogelijk oorzaak is dat lachgas zich ophoopt in de bodem onder de bevroren laag en vrijkomt bij dooi. Een andere verklaring is dat delen van organische stof in de bodem door de vorst fysisch uit elkaar vallen en dat deze organische stof gemakkelijk afbreekbaar is voor bacteriën. Schattingen geven aan dat op mondiale schaal de lachgasemissie met 17-28% wordt onderschat doordat de verhoogde emissie tijdens cycli van vorst en dooi niet mee worden genomen in berekeningen van emissies.

Wind heeft geen effect op lachgasemissie, omdat lachgas biologisch wordt gevormd. Dit is in tegenstelling tot ammoniakemissie, een fysisch-chemisch proces, dat sneller verloopt als er meer wind is.



Lachgasemissie uit grasland op zandgrond met en zonder beregening op t=0 na bemesting met 100 kg N per ha (Van der Bolt, niet gepubliceerde resultaten)

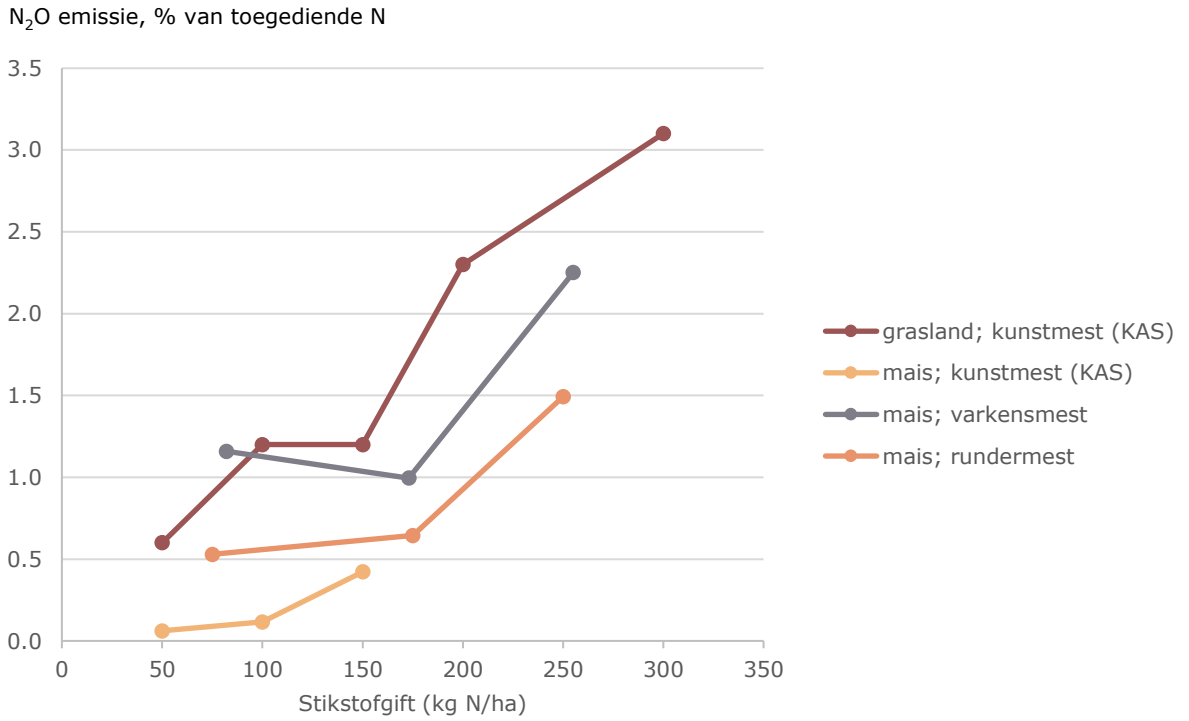
Wat is het effect van bemesting op lachgasemissie?

14

De lachgasemissie neemt toe naarmate de stikstofgift hoger wordt. Vaak neemt de emissiefactor voor lachgas (in % van toegediende N) toe, naarmate de stikstofgift hoger wordt. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt doordat de processen nitrificatie en denitrificatie sneller verlopen en er relatief meer lachgas wordt geproduceerd tijdens denitrificatie als er meer minerale stikstof in de bodem aanwezig is. Daarnaast neemt de stikstofbenutting door een gewas af als er meer stikstof wordt toegediend. Daardoor kan minerale stikstof langer in de bodem aanwezig zijn, waardoor het risico op lachgasemissie toeneemt.

In de emissierapportages wordt uitgegaan van één gemiddelde emissiefactor, zonder rekening te houden met een effect van stikstofgift. Ook de IPPC gaat uit van een emissiefactor die onafhankelijk is van de hoogte van de stikstofbemesting.

Naast de grootte van de stikstofgift tijdens bemesting hebben ook de soort kunstmest en toedieningstechniek een effect op lachgasemissie, dit wordt verder uitgelegd in de Vragen 15 en 17.



Relatie tussen stikstofgift en N_2O-emissiefactor voor grasland (Velthof et al., 1996) en maïsland (Velthof en Mosquera, 2011).

Zijn er verschillen in lachgasemissie tussen verschillende kunstmeststoffen?

15

Er zijn een groot aantal soorten meststoffen. Uit onderzoek blijkt dat de hoogste lachgasemissie uit kunstmest optreedt als nitraathoudende kunstmesten, zoals kalkammonsalpeter (KAS) en kalksalpeter, onder natte omstandigheden aan grasland wordt toegediend.

Onder droge omstandigheden is de lachgasemissie veel lager. Onder deze omstandigheden is de emissie bij ureumhoudende meststoffen vaak hoger dan bij nitraathoudende meststoffen. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt doordat na toediening van ureum ammoniak in de bodem ontstaat. Ammoniak kan nitrificatie in de bodem remmen, waardoor de kans dat lachgas als bijproduct kan ontstaan toeneemt.

In de IPPC-richtlijnen wordt geen onderscheid gemaakt naar kunstmestypen. Dit komt doordat de verschillen in lachgasemissie tussen kunstmesttypen alleen zichtbaar zijn onder specifieke omstandigheden. De IPCC-emissiefactoren zijn gebaseerd op gemiddelden van alle studies van over de gehele wereld, waarin geen duidelijke verschillen bestaan tussen kunstmesttypen. In landenspecifieke methoden om lachgasemissie te berekenen kan rekening worden gehouden met verschillen in lachgasemissie tussen kunstmesttypen. Hierop kunnen dan maatregelen worden gebaseerd, zoals het niet gebruiken van nitraathoudende meststoffen onder natte omstandigheden.

Lachgasemissie (% van toegediende N, bij toediening van 80 kg N/ha) bij toepassing van verschillende typen kunstmeststoffen op 1) kleigrond in relatief droge omstandigheden, 2) zandgrond onder natte omstandigheden en 3) zandgrond onder zeer natte omstandigheden (Velthof et al., 1997).

Kunstmesttype	Kleigrond, 13 mm neerslag; gemiddelde temperatuur 6,0 °C	Zandgrond 42 mm neerslag; gemiddelde temperatuur 8,2 °C	Zandgrond, 68 mm neerslag; gemiddelde temperatuur 16,0 °C
Kalkammonsalpeter	< 0,1	5,2	8,3
Kalksalpeter	< 0,1	5,2	12,0
Ammoniumsulfaat	< 0,1	0,2	1,0
Ammoniumsulfaat + nitrificatieremmer DCD	-	<0,1	0,1
Ureum	< 0,1	<0,1	0,7

Zijn er verschillen tussen soorten mest en heeft mestbewerking een effect op lachgasemissie?

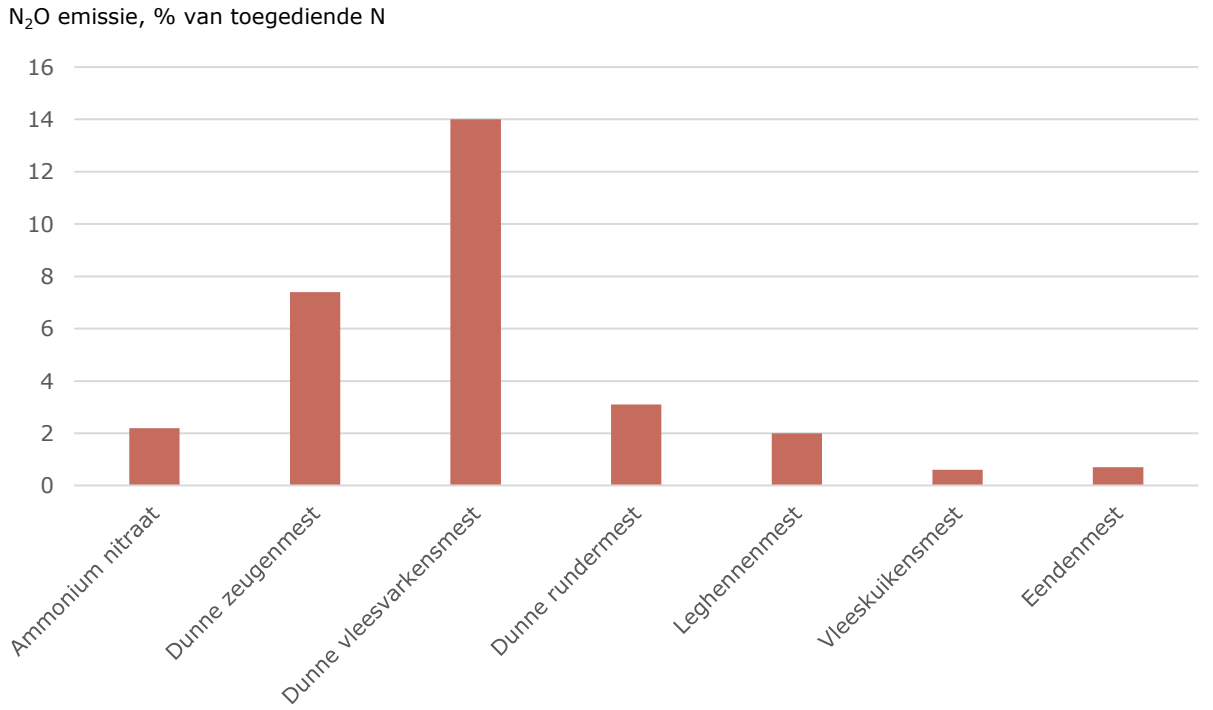
16

Met dierlijke mest wordt ammonium, organische stikstof en organische stof toegediend. Bij mest bepaalt niet alleen de aanvoer van stikstof het risico op lachgasemissie, maar ook de aanvoer van gemakkelijk afbreekbare organische stof.

Het risico op lachgasemissie uit varkensdrijfmest is hoger dan uit andere mesten. Dit wordt veroorzaakt doordat de stikstof in varkensmest uit een relatief groot aandeel ammoniumstikstof bestaat en omdat varkensmest relatief veel gemakkelijk afbreekbare organische stof bevat, zoals vluchtige vetzuren. De lachgasemissie die ontstaat als gevolg van het toedienen van pluimveemest aan de bodem is lager dan de emissie als gevolg van dunne varkens- en rundermesten (zie onderstaand figuur).

Bij het scheiden van mest ontstaan twee producten, de dikke en dunne fractie. De dikke fractie bevat relatief veel organische stof en de stikstof is grotendeels in organische vorm aanwezig. De dunne fractie bevat weinig organische stof en de stikstof is grotendeels als ammonium aanwezig. In sommige mestbewerkingsinstallaties wordt water uit de dunne fractie verwijderd door middel van omgekeerde osmose. Het product dat hieruit ontstaat heet mineralenconcentraat. Toediening van de dunne fractie en mineralenconcentraat kan leiden tot verhoogde ammoniakconcentraties in de bodem. Dit kan leiden tot vorming van lachgas tijdens nitrificatie.

In grasland is veel gemakkelijk afbreekbare organische stof aanwezig. Toediening van organische stof via mest of de dikke fractie van gescheiden mest leidt daardoor tot een beperkt effect op lachgasemissie. In bouwland is minder gemakkelijk afbreekbare organische stof aanwezig, waardoor de beschikbaarheid van organische stof een limiterende factor is voor lachgasemissie. Toediening van mest of de dikke fractie kan daarom in bouwland leiden tot een hogere lachgasemissie.



Lachgasemissie van kunstmest (ammoniumnitraat) en dierlijke mesten in een incubatiestudie van Velthof et al. (2003).

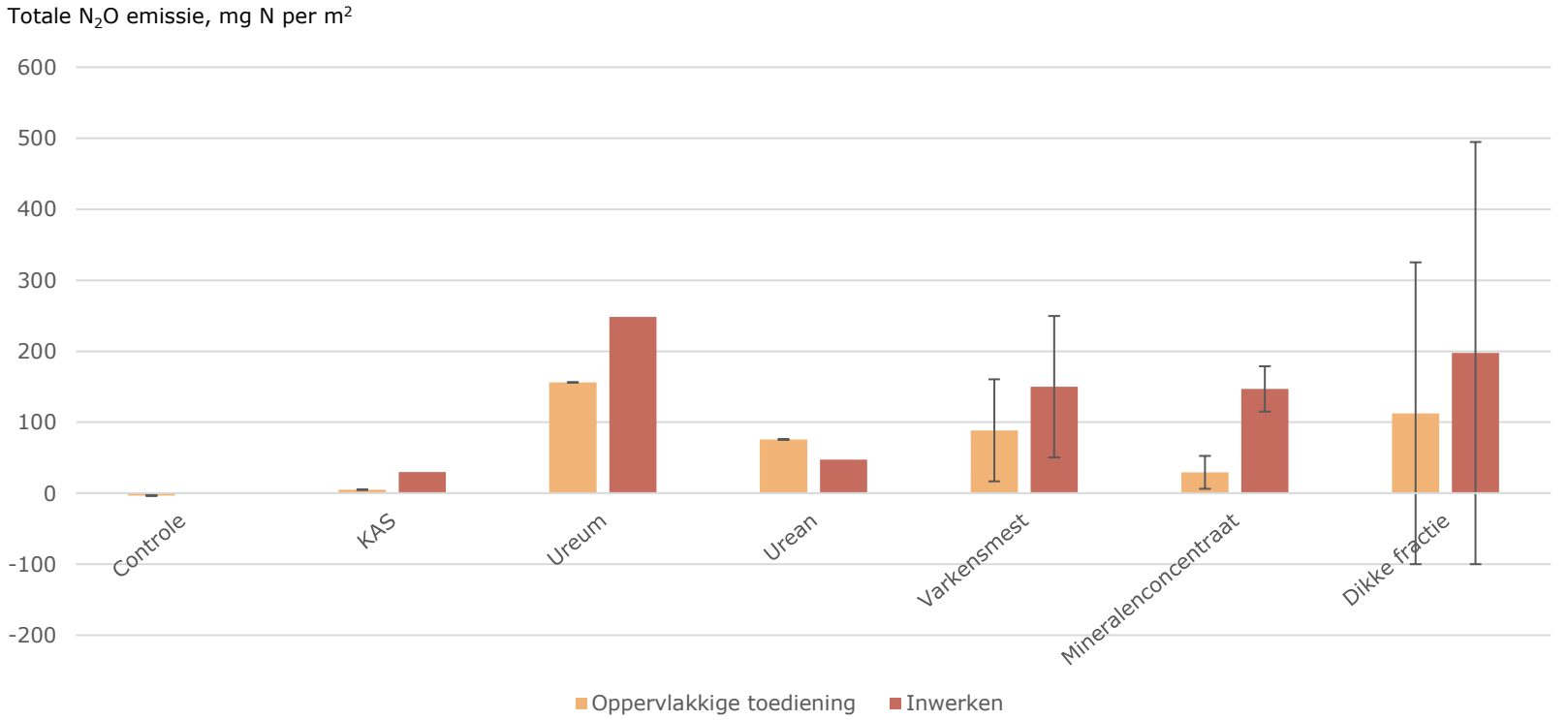
Wat is het effect van toedieningstechniek van mest en kunstmest op lachgasemissie?

17

Het inwerken of injecteren van een meststof of dierlijke mest in de bodem leidt in het algemeen tot een verhoogd risico op lachgasemissie. Bij mesten en ureumhoudende meststoffen wordt dit voor een deel veroorzaakt doordat de ammoniakemissie wordt beperkt, waardoor het stikstofgehalte in de bodem toeneemt. Daarnaast wordt de stikstof bij inwerken in de bodem gebracht, waar het zuurstofgehalte lager is dan bij oppervlakkig toediening. Dit verhoogt het risico op lachgasemissie. Het oppervlakkig toedienen van mest leidt dus tot een lager risico op lachgasemissie. Oppervlakkig toedienen van mest leidt echter tot hoge ammoniakemissie, resulterend in stikstofdepositie op natuurgebieden.

Gemiddelde lachgas emissiefactoren in % van N toegediend gebaseerd op Velthof en Mosquera, (2011).

Meststof en toedieningsmethode	N_2O emissie, % van N		
	Grasland Kleigrond	Grasland Zandgrond	Snijmais zandgrond
Kalkammonsalpeter, oppervlakkig	2,2	1,2	0,1
Runderdrijfmest, zodenbemesting	0,3	0,5	0,9
Runderdrijfmest, oppervlakkig	0,1	0,1	0,4
Varkensdrijfmest, bouwlandinjectie	*	*	3,6
Varkensdrijfmest, oppervlakkig	*	*	0,9



Totale lachgasemissie van KAS, ureum, urean, dunne varkensmest, mineraalconcentraat en de dikke fractie van varkensmest na oppervlakkige toediening en inwerken in bouwland op zand in een incubatiestudie onder gecontroleerde condities. Het resultaat van de dunne varkensmest, mineraalconcentraat en de dikke fractie geven het gemiddelde ± standaard deviatie van vier mestbewerkingsinstallaties (Velthof & Hummelink, 2011).

Leiden nitrificatieremmers tot minder lachgasemissie?

18

Nitrificatieremmers zijn stoffen die de nitrificatie, de microbiële omzetting van ammonium naar nitraat, remmen. Nitrificatieremmers zijn ooit ontwikkeld om het nitrificatieproces te vertragen en daarmee nitraatuitspoeling te beperken en stikstofbenutting door het gewas te verhogen. Nitrificatieremmers kunnen ook de lachgasemissie remmen die wordt veroorzaakt door nitrificatie en indirect door denitrificatie van nitraat afkomstig van de nitrificatie.

Nitrificatieremmers kunnen aan kunstmest en aan dierlijke mest worden toegediend. Nitrificatieremmers hebben geen effect op de lachgasemissie uit nitraathoudende meststoffen zoals kalksalpeter en maar een beperkt effect op meststoffen waarvan de stikstof voor de helft bestaat uit nitraat (bijvoorbeeld kalkammonsalpeter).

Bekende nitrificatieremmers zijn dicyandiamide DCD en 3,4-dimethyl pyrazole fosfaat (DMPP). Internationale studies laten zien dat deze remmers de lachgasemissie met 30-50% kunnen verminderen.

Effect van nitrificatieremmers op lachgasemissie (Gilsanz et al., 2016).

Nitrificatieremmer	Gewas	Afname N_2O-emissie (%)*
DCD	Bouwland	36 (8)
	Grasland	48 (52)
DMPP	Bouwland	38 (9)
	Grasland	46 (8)

*Percentage geeft het gemiddelde effect. Tussen haakjes staat het aantal observaties weergegeven.

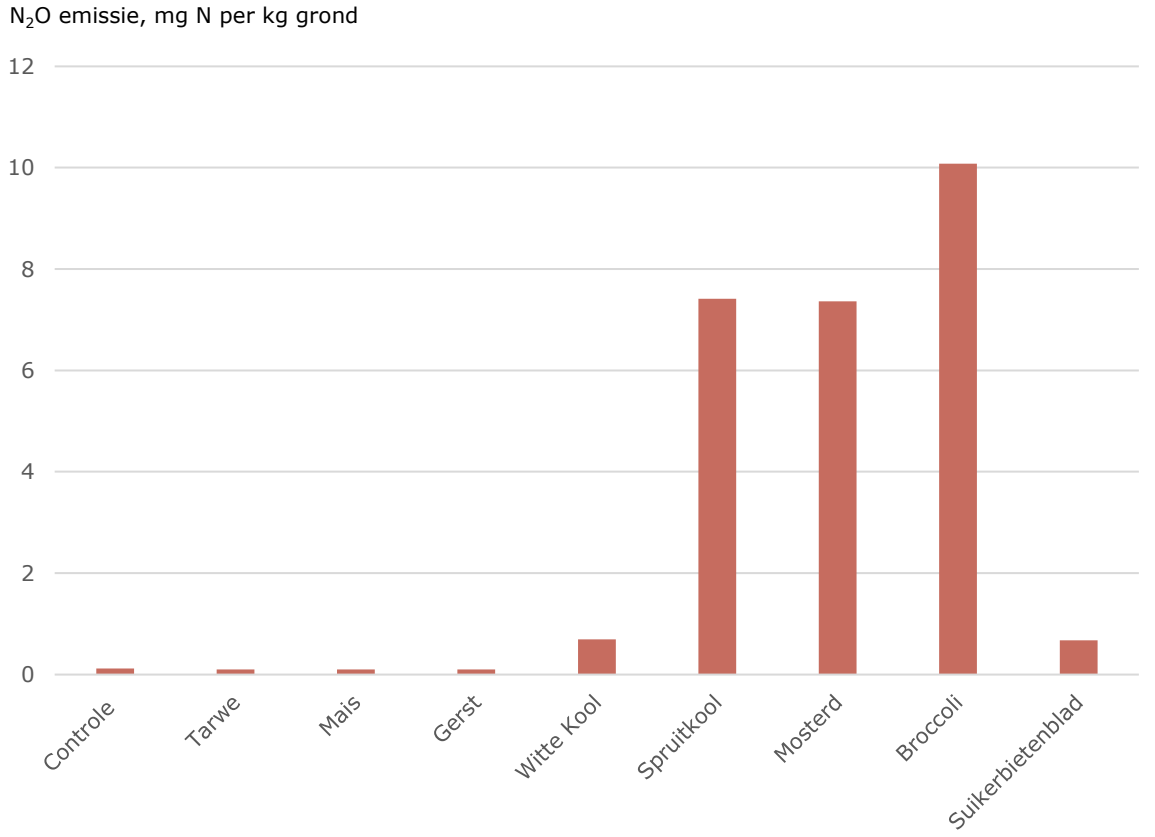
Hebben gewasresten een effect op lachgasemissie?

19

Gewasresten bevatten stikstof en organische stof, waardoor er lachgas kan ontstaan als gewasresten op het veld worden achtergelaten. De hoeveelheid stikstof en organische stof in gewasresten en de afbreekbaarheid van organische stof zijn belangrijke factoren die bepalen hoeveel lachgas er uiteindelijk wordt geëmitteerd. Gewasresten met weinig stikstof (hoge C/N-verhouding) en stabiele organische stof, zoals stro van granen, resulteren in een lagere lachgasemissie dan bladachtige biomassa, zoals bij koolsoorten.

De organische stof in gewasresten kan ook leiden tot lachgasemissie uit het reeds in de bodem aanwezige nitraat. Toediening van gemakkelijk afbreekbare organische stof aan een bodem die nitraat bevat kan leiden tot lachgasemissie, doordat de organische stof dient als energiebron voor denitrificerende micro-organismen.

Het inwerken van gewasresten in de bodem verhoogt de lachgasemissie ten opzichte van het op het bodemoppervlak laten liggen, omdat inwerken de afbraak van gewasresten vergroot.



Lachgasemissie uit gewasresten toegediend aan een zandgrond (Velthof et al. 2002)

Heeft de grondsoort een effect op lachgasemissie?

20

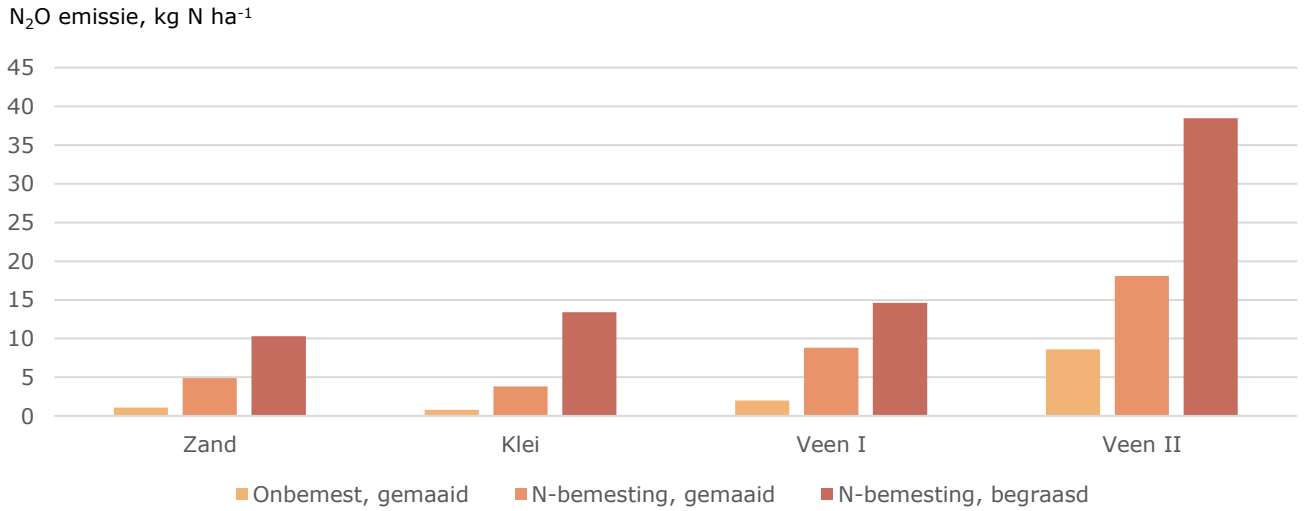
De grondsoort beïnvloedt lachgasemissie via verschillende factoren, namelijk het zuurstofgehalte in de bodem, het gehalte aan afbreekbare organische stof, water- en gastransport en de zuurgraad (pH). Deze factoren beïnvloeden de bodemprocessen mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie en de N_2O/N_2-verhouding van de producten van denitrificatie.

Potentiële denitrificatie is de maximale denitrificatie die kan optreden onder zuurstofloze omstandigheden en in aanwezigheid van voldoende nitraat. De potentiële denitrificatie van veengronden is veel hoger dan die van minerale gronden, waardoor het risico op lachgas veel hoger is. Daarnaast zijn veengronden door de hogere grondwaterstand natter dan minerale gronden. Voor veengronden worden hogere emissiefactoren gehanteerd dan voor minerale gronden (tabel bij Vraag 11).

Uit analyse van de beschikbare meetgegevens in Nederland volgt geen duidelijk verschil in lachgasemissie tussen klei- en zandgronden. Daarom wordt er geen onderscheid gemaakt in emissiefactoren tussen zand- en kleigronden.

Potentiele denitrificatie (mg N per kg bodem per dag; Munch en Velthof, 2007).

Bodemlaag	Grassland				Snijmais	
	Veen (n=3)	Klei (n=3)	Löss (n=2)	Zand (n=3)	Löss (n=2)	Zand (n=3)
0 – 20 cm	267	151	65	26	20	11
20 – 40 cm	317	125	30	4	9	4
40 – 60 cm	116	5	1	0,1	1	0,1
60 – 80 cm	61	0,9	0,3	0,5	0,3	0
80 – 100 cm	39	0,6	0,2	0,2	0,1	0



Gemiddelde N_2O emissie uit verschillende grondsoorten wanneer onbemest en gemaaid, N-bemest en gemaaid en N-bemest en begraasd (Velthof et al. 1996)

Heeft beweiding een effect op lachgasemissie?

21

Beweiding leidt tot een toename van lachgasemissie. Hierbij spelen de volgende factoren een rol:

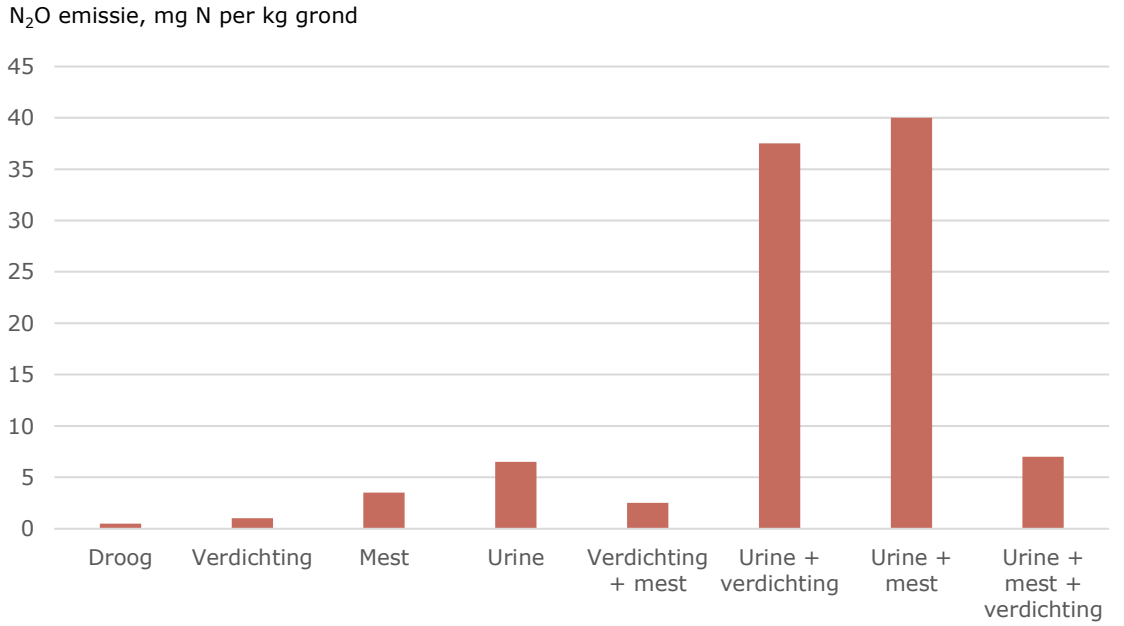
- De stikstofconcentratie in urineplekken is hoog. De ureum die in de bodem terechtkomt leidt lokaal tot een hoge ammoniakconcentratie in de bodem. Ammoniak remt nitrificatie waardoor lachgas gevormd kan worden.

- De mestflatten, ook wel de koeienvlaaien, zijn plekken met veel organische stof en een hoge zuurstofconsumptie. Dit kan leiden tot verhoogde denitrificatie.

- Betreding van de weide door koeien leidt lokaal tot compactie van de bodem en dit kan leiden tot zuurstofarme omstandigheden in de bodem en een verhoogde denitrificatie.

Overlappende urineplekken en mestflatten met compactie kunnen lokaal tot hotspots van lachgas leiden, omdat de concentraties stikstof en organische stof hoog zijn en het gehalte aan zuurstof laag. Er kunnen ook plekken ontstaan waar de zuurstofconsumptie zo hoog is, dat de lachgasemissie afneemt. Onderstaand figuur toont dit voor de combinatie mest, urine en compactie. Daarnaast bestaat urine uit verschillende componenten. Er zijn aanwijzingen dat verandering van de samenstelling van urine kan leiden tot minder lachgasemissie. Een van de bestanddelen van urine is hippuurzuur. Er zijn aanwijzingen dat de hippuurzuur de vorming van lachgas uit urine kan remmen.

De emissiefactor van beweiding is veel hoger dan van het toedienen van mest aan grasland (zie Vraag 11). Beweiding leidt daarmee tot een hogere lachgasemissie dan aanwenden van drijfmest.



N_2O emissie als gevolg van beweiding door mest, urine, compactie en een combinatie van deze factoren (Van Groenigen et al. 2005).

Heeft drainage van veengronden een effect op lachgasemissie?

22

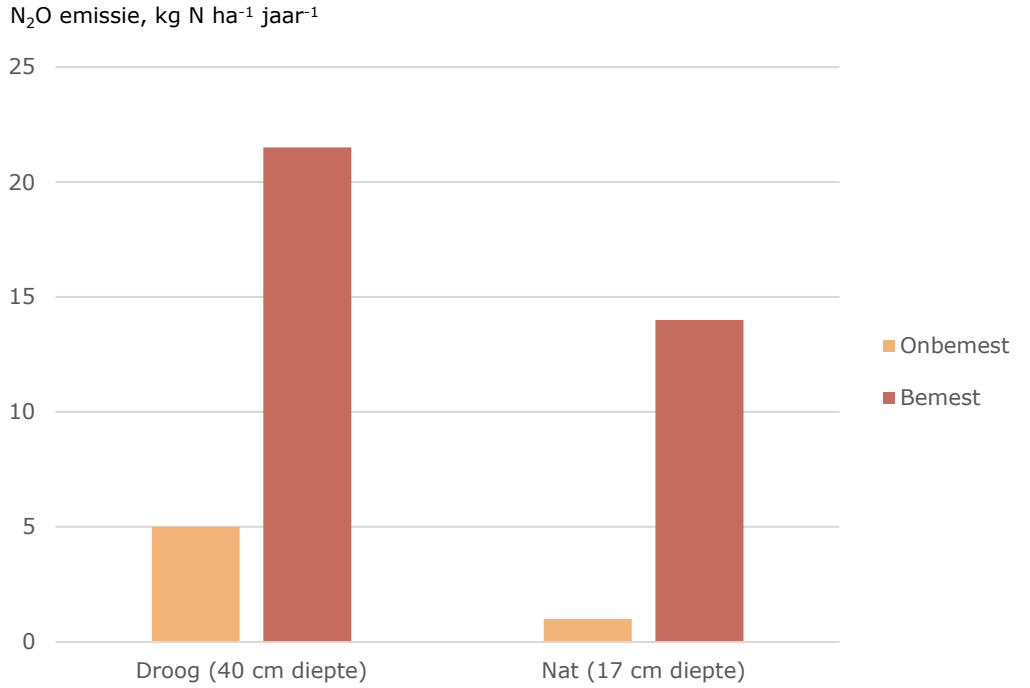
Gedraineerde veengronden zijn een grote bron van koolstofdioxide doordat het droogliggende veen oxideert. Aanpassen van drainage, bijvoorbeeld onderwaterdrainage of een hoger grondwaterpeil, wordt gezien als een maatregel om veenafbraak en daarmee bodemdaling en CO_2-emissie in het veenweidegebied te beperken.

Veengronden zijn ook een belangrijke bron van lachgasemissie en de grondwaterstand heeft een groot effect op de hoogte van lachgasemissie. Verandering in drainage kan leiden tot een verandering van de omvang van de lachgasemissie.

Er spelen twee bronnen van lachgas een rol, namelijk lachgas uit stikstof die is vrijgekomen uit mineralisatie van veen en lachgas uit stikstof toegediend als kunstmest of dierlijke mest. Bij vernatting van veen, zal de afbraak van organische stof afnemen, waardoor minder stikstof vrijkomt door mineralisatie en zal de lachgasemissie uit gemineraliseerde N afnemen. De lachgasemissie uit kunstmest en dierlijke mest zal hoger worden bij vernatting omdat de omstandigheden voor denitrificatie gunstiger worden. Als de bodem volledig verzadigd raakt met water, ontstaan er zuurstofloze omstandigheden en zal de lachgasemissie dalen (zie ook Vraag 4).

In onderzoek op vier percelen in Zegveld, leidde een hogere grondwaterstand tot een lagere lachgasemissie, zowel uit mineralisatie (onbemest) als bemesting (zie onderstaand figuur).

Het netto effect van verandering van drainage van veengronden is lastig te voorspellen, omdat er meerdere bronnen van lachgas zijn die ieder anders reageren op het vochtgehalte.



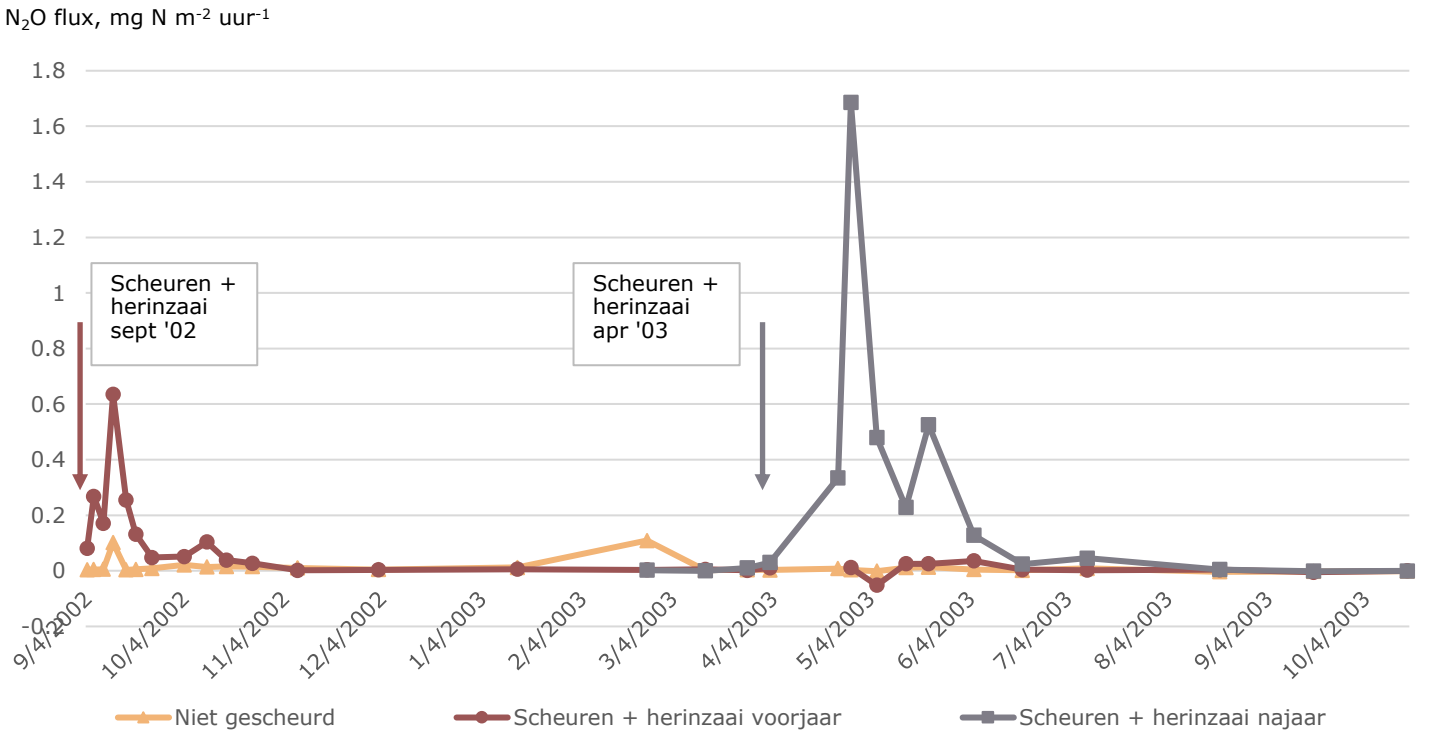
Gemiddelde N_2O emissie van twee droge (grondwaterstand op 40 cm diepte) en twee natte percelen (grondwaterstand op 17 cm diepte) zonder bemesting en met bemesting, in Zegveld in 2008 en 2009 (Van Beek et al. 2011)

Heeft graslandvernieuwing een effect op lachgasemissie?

23

In grasland accumuleert organische stof door de relatief grote aanvoer van organische stof via gewas- en wortelresten in grasland, het gebruik van dierlijke mest en de afwezigheid van grondbewerking. Door het scheuren (ploegen) van grasland voor graslandvernieuwing middels herinzaai of omzetting naar bouwland, treedt er een sterke afbraak op van de organische stikstof in de bodem. Door het vrijkomen van deze stikstof neemt het risico op emissie van lachgas toe na het scheuren van grasland, zowel bij scheuren in het voorjaar als najaar (zie onderstaand figuur). De hoeveelheid neerslag en de hoeveelheid minerale stikstof in de bodem in de periode na scheuren bepalen in sterke mate de totale lachgasemissie.

Na herinzaai zal de nieuwe graszode veel stikstof vastleggen en dit zal lachgasemissie beperken. Bij omzetten van grasland naar bouwland zal er veel langer een verhoogde hoeveelheid stikstof in de bodem aanwezig zijn en dit zal waarschijnlijk gedurende een langere periode leiden tot een verhoogde lachgasemissie.



Lachgasemissie uit niet-gescheurd grasland, grasland gescheurd in het voorjaar en grasland gescheurd in het najaar (Velthof et al., 2010).

Heeft bodemverdichting een effect op lachgasemissie?

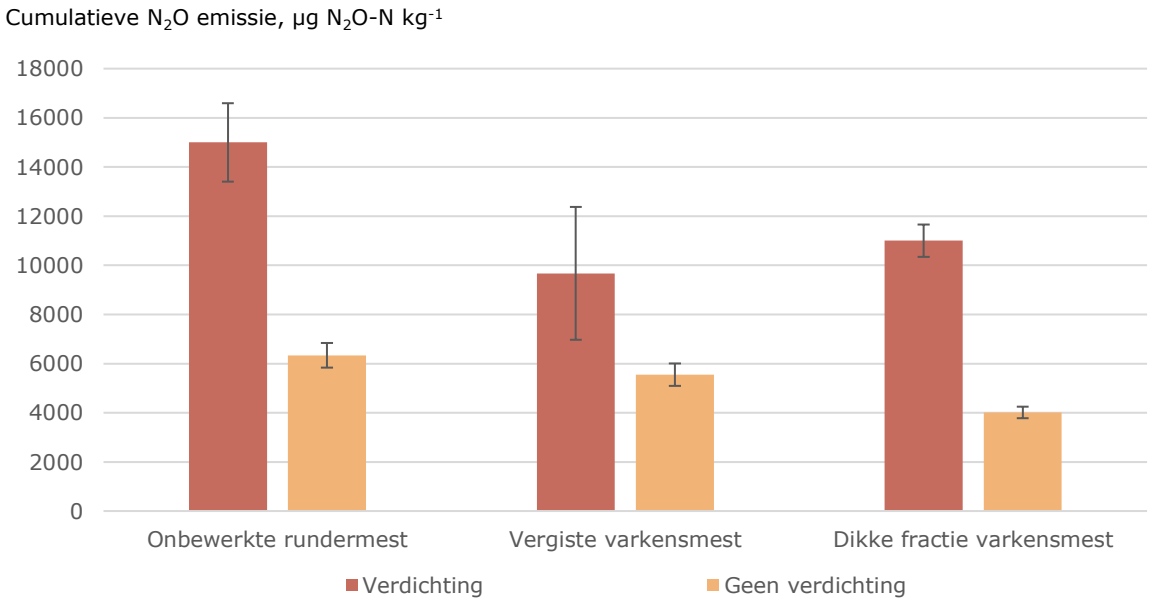
24

Bodemverdichting wordt meestal veroorzaakt door verdichting en vervorming van de bodemstructuur door landbouwvoertuigen. Dit geldt vooral bij bewerkingsactiviteiten op het verkeerde moment en/of apparatuur met een te hoge bandendruk. Ook kan pleksgewijs bodemverdichting optreden door betreding door koeien.

Door verdichting daalt het poriënvolume van de bodem en dit beïnvloedt de doorlatendheid van de bodem voor water en lucht, de bewortelbaarheid en de zuurstofvoorziening. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen verdichting van de bovengrond (0-30 cm) en ondergrond.

Verdichting van de bovengrond kan leiden tot een hogere lachgasemissie. De bovengrond is de laag met de hoogste denitrificatiecapaciteit (tabel van Vraag 20) en het hoogste gehalte aan minerale stikstof. Daarnaast is de transportroute van lachgas naar de atmosfeer (diffusie door de bodem) kort en is de kans dat het geproduceerde lachgas wordt omgezet tot stikstofgas kleiner dan wanneer lachgas in diepere bodemlagen wordt geproduceerd. De bovengrond kan worden geploegd, waardoor de verdichting kan worden opgeheven. Uit onderzoek naar geen of beperkte grondbewerking als maatregel om koolstof in de bodem op te slaan, blijkt dat het risico op lachgasemissie door beperkte grondbewerking toeneemt.

Verdichting van de ondergrond onder de ploegzool (dieper dan 30 cm) is een doorlopend cumulatief proces, dat op de lange termijn resulteert in een blijvend homogeen verdichte ondergrond. In minerale gronden is de denitrificatiecapaciteit van de bodemlagen dieper dan 30 cm relatief beperkt (tabel van Vraag 20). Daarnaast is de transportroute van lachgas dat in de ondergrond wordt geproduceerd naar de atmosfeer lang, waardoor de kans dat lachgas onderweg naar de atmosfeer wordt omgezet naar stikstofgas groot is. De lachgasemissie uit de verdichte ondergrond zal daarom beperkt zijn. Verdichte ondergrond kan mogelijk wel leiden tot een hogere lachgasemissie uit de bovengrond, indien de opbrengst en stikstofopname door het gewas wordt beperkt en indien de infiltratiecapaciteit van water in de bodem beperkt wordt en er zuurstofarme omstandigheden ontstaan. Verdichting van de ondergrond is veel moeilijker op te heffen dan van de bovengrond.



Cumulatieve N_2O emissie bij een oppervlakkig verdichte en geen verdichte bodem bij verschillende typen meststoffen (resultaten uit onderzoek Te Pas & van 't Hull, 2020)

Wat zijn de factoren die lachgasemissie uit stallen bepalen?

25

In stallen wordt de stikstof die door landbouwdieren wordt uitgescheiden als urine en mest opgevangen in vloeibare vorm (drijfmest) of vaste vorm (stalmest). Drijfmest in een opslag is zuurstofloos en de zuurstof die in de drijfmest dringt wordt direct geconsumeerd. De ammonium die in de drijfmest aanwezig is kan door de afwezigheid van zuurstof niet worden genitrificeerd tot nitraat. Er is daardoor geen nitraat in de mest aanwezig, waardoor er geen denitrificatie kan optreden. Mogelijk zijn er nog wel plekken met ingedroogde mest op de stalvoer en langs de randen van de opslag waar wel nitrificatie-denitrificatie kan optreden. Omdat er weinig tot geen nitrificatie en denitrificatie optreedt in stallen met drijfmest, zal er in deze stallen dus geen of amper lachgas worden gevormd. Meer dan 90% van de stallen in Nederland is gebaseerd op drijfmest.

In stallen met vaste mest wordt vaak stro of een ander organisch materiaal, zoals houtsnippers, toegevoegd. In vaste mest kan zuurstof doordringen en mest kan composteren. Ook kan nitrificatie en denitrificatie optreden. Omdat er gemakkelijk afbreekbare organische stof aanwezig is in stalmest en het zuurstofgehalte relatief laag is, kan de aanwezigheid van nitraat leiden tot de vorming van lachgas.

Nederland hanteert op dit moment standaard IPCC-emissiefactoren voor de berekening van lachgasemissie uit stallen. In lopende projecten naar ammoniak- en methaanemissies uit stallen en mestopslagen wordt vaak ook lachgasemissie bepaald. Deze gegevens kunnen op termijn worden gebruikt voor het afleiden van landen-specifieke emissiefactoren van stallen.

Ligboxstal waarbij mest en urine via de roosters in de vloer in de mestput terecht komen als drijfmest .

Welke bemestingsmaatregelen kunnen worden genomen om lachgasemissie te beperken?

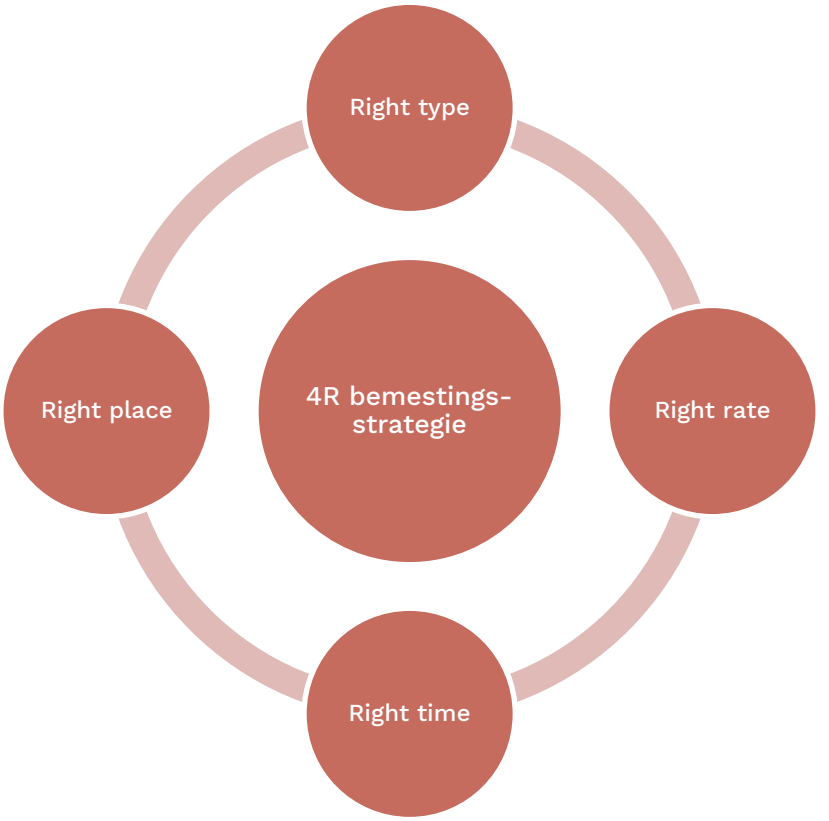
26

Uit Vraag 4 blijkt dat verschillende factoren een rol spelen bij lachgasemissie uit landbouwgronden. Het hoogste risico treedt op onder natte omstandigheden als er veel minerale stikstof in de bodem zit. De lachgasemissie is hoger uit bodems met een hoog gehalte aan organische stof.

Bemesting is de grootste bron van lachgas. De zogenaamde “4 R” bemestingsstrategie is een strategie om lachgasemissie te beperken, Dit wil zeggen dat stikstofbemesting plaatsvind met het juiste type, in de juiste hoeveelheid, op het juiste tijdstip en op de juiste plaats (zie onderstaand figuur).

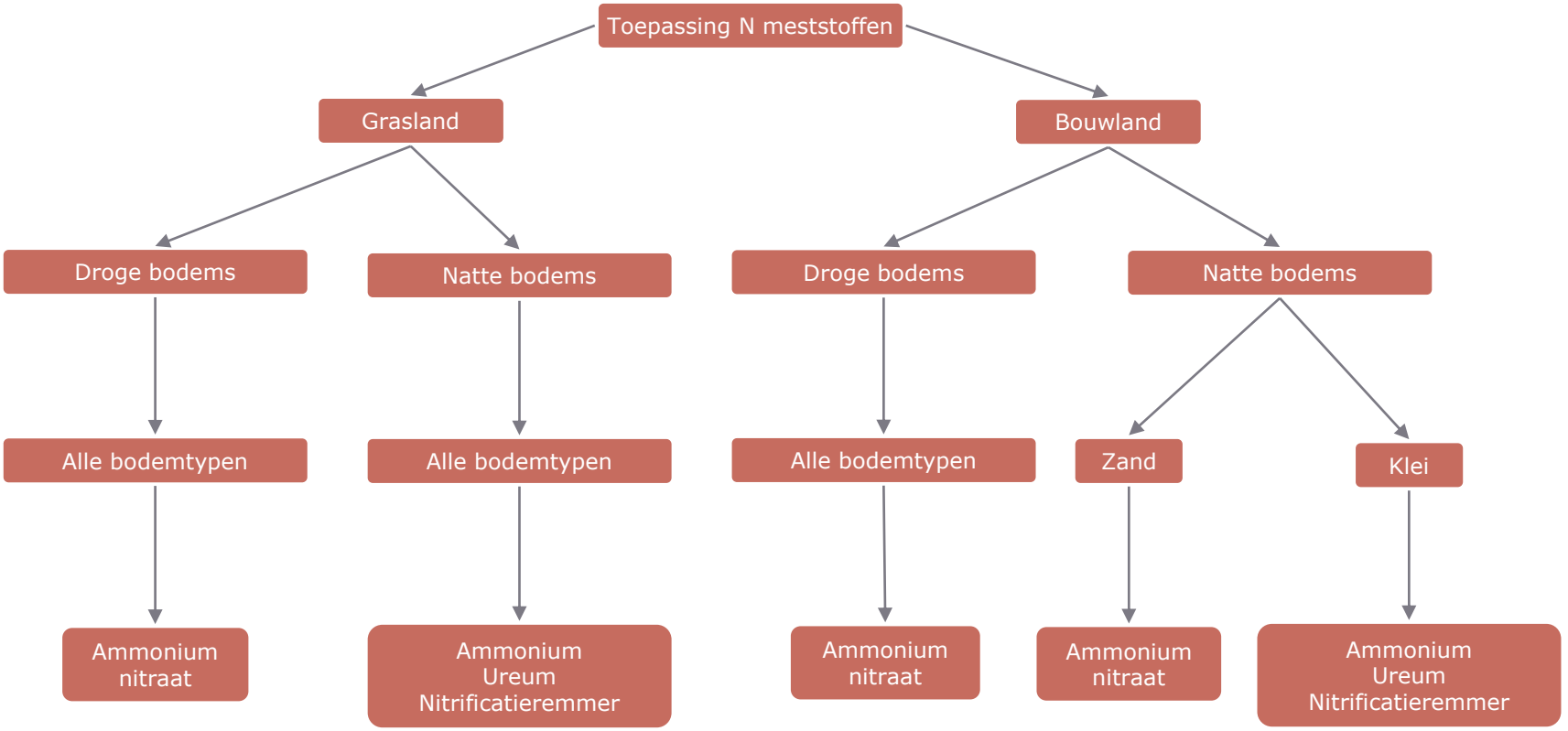
Juiste type. In gronden met een hoge denitrificatiecapaciteit, zoals veengronden en grasland, kan nitraathoudende kunstmest onder natte omstandigheden leiden tot een hoge lachgasemissie. Het gebruik van ammoniummeststoffen onder natte omstandigheden kan de lachgasemissie sterk verminderen. Nitraathoudende kunstmest kan ook tot lachgasemissie leiden indien het wordt toegediend aan een perceel waaraan recentelijk dierlijke mest is toegediend. De organische stof uit de mest en de nitraat uit de kunstmest kunnen leiden tot een verhoogde lachgasemissie. Door mestbewerking kan de samenstelling van dierlijke mest worden veranderd (minder minerale stikstof en organische stof), waardoor lachgasemissie uit dierlijke mest kan worden verminderd.

Juiste hoeveelheid. De hoeveelheid stikstof die wordt toegediend moet worden afgestemd op de behoefte van het gewas en waar mogelijk moet de stikstof in verschillende giften verspreid over het groeiseizoen worden toegediend. Dit beperkt het gehalte aan minerale stikstof in de bodem en daarmee het risico op lachgasemissie. Gewas- en grondanalyses en precisiebemestingstechnieken (zoals rijenbemesting) kunnen worden toegepast om de hoeveelheid bemesting af te stemmen op de gewasbehoefte.



Juiste tijdstip. Het risico op lachgasemissie is het hoogst als de hoeveelheid minerale stikstof in de bodem is verhoogd. De stikstof moet daarom toegediend worden vlak voor en/of in de periode waarop het gewas stikstof opneemt. Neerslag leidt tot een toename van lachgasemissie. Het uitstellen van bemesting tot een drogere periode leidt daardoor tot minder lachgasemissie.

Juiste plaats. Oppervlakkige toediening van (kunst)mest leidt tot een lagere lachgasemissie dan injecteren. Oppervlakkige toediening leidt daarentegen tot een hogere ammoniakemissie. Ammoniak is ook een bron van indirecte lachgasemissie, zodat beperken van ammoniakemissie ook lachgasemissie beperkt.



Beslisboom voor de keuze van minerale N-meststoftypen om het risico op N_2O-emissie te verkleinen (Velthof & Rietra, 2018).

Welke andere maatregelen dan bemestingsmaatregelen kunnen worden genomen om lachgasemissie te beperken?

27

Uit Vraag 4 blijkt dat verschillende factoren een rol spelen bij lachgasemissie uit landbouwgronden. Het hoogste risico treedt op onder natte omstandigheden als er veel minerale stikstof in de bodem zit. De lachgasemissie is hoger uit bodems met een hoog gehalte aan organische stof.

Beweiding

De lachgasemissie door beweiding kan worden verminderd door het beperken van beweiding en het niet meer of beperkt beweiden in het najaar. Deze maatregelen verminderen de emissie van lachgas omdat er meer mest in de stal en opslag komt in plaats van in de wei. De emissie uit drijfmest is lager dan uit weidemest.

Gewasresten

De lachgasemissie uit gewasresten kan worden verlaagd door het verwijderen van stikstofrijke gewasresten en het niet direct inwerken van gewasresten.

Scheuren van grasland

De lachgasemissie door scheuren van grasland kan worden beperkt door verbetering van het graslandbeheer waardoor er minder vaak vernieuwd hoeft te worden. Ook kan een beperking van de bemesting van gewas of het ingezaaide gewas direct na het scheuren leiden tot een minder lachgasemissie.

Waterbeheer

Lachgas wordt gevormd tijdens natte omstandigheden in aanwezigheid van minerale stikstof in de bodem. Door het afstemmen van drainage, beheer van grondwaterpeil en/of beregening (hoeveelheid en tijdstip) op momenten dat er veel stikstof in de bodem aanwezig is (bijvoorbeeld vlak na de bemesting) kan de lachgasemissie worden beperkt.

Door middel van beperking van weweiding en goed waterbeheer kunnen lachgasemissies beperkt worden.

Hebben maatregelen in het kader van het mest- en ammoniakbeleid een effect op lachgasemissie?

28

Het Nederlandse mest- en ammoniakbeleid bestaat uit gebruiksnormen voor bemesting, middelvoorschriften voor beperking van nutriëntenuitspoeling en middelvoorschriften voor beperking van de ammoniakemissie.

Er zijn drie gebruiksnormen in het mestbeleid: dierlijke mest (uitgedrukt in stikstof), werkzame stikstof in mest en kunstmest en fosfaat. Het verminderen van bemesting leidt tot minder lachgasemissie.

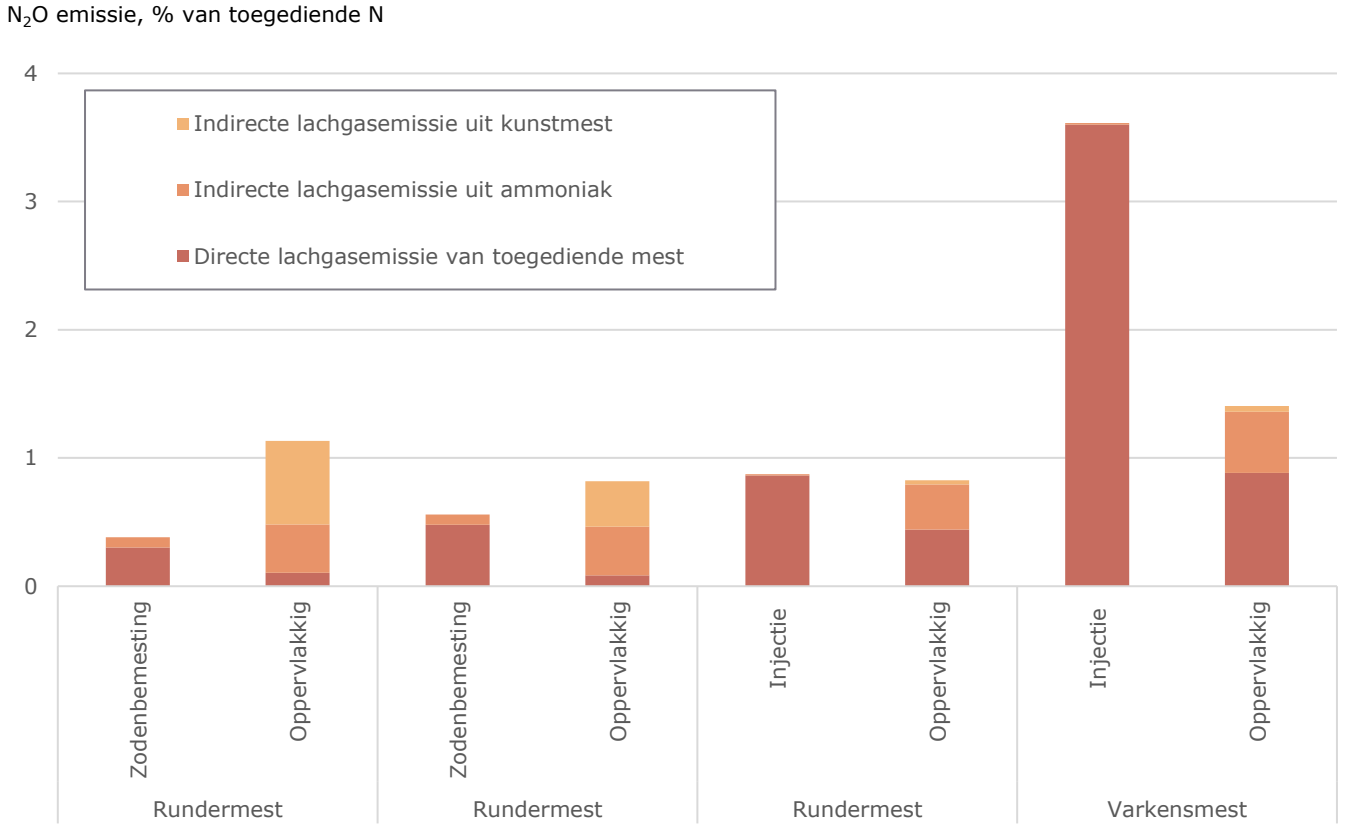
De belangrijkste middelvoorschriften ter beperking van nutriëntenuitspoeling zijn bepalingen van de periode waarop mest en kunstmest mag worden toegediend (niet in de herfst en winter), beperking van bemesting op hellingen, op drassige, ondergelopen, besneeuwde of bevroren grond of tijdens irrigatie, de verplichting om vanggewassen te telen na de oogst van snijmaïs, onbemeste bufferzones langs waterlopen en beperkingen aan het scheuren van grasland. Deze maatregelen leiden in het algemeen tot minder lachgasemissie, omdat de benutting van nutriënten verbeterd wordt door het nemen van deze maatregelen. Daarnaast wordt er met deze maatregelen voorkomen dat er onder zeer natte omstandigheden wordt bemest.

Een scenarioberekening met als uitgangsjaar 2014 laat zien dat door maatregelen uit het mestbeleid de lachgasemissie met 33% is afgenomen ten opzichte van de emissie in 1995. De sterkste reductie in lachgasemissie is veroorzaakt door minder kunstmest- en mestgebruik, een lagere stikstofexcretie door melkkoeien (onder andere dooreen lagere bemesting) en minder beweiding. De implementatie van het mestbeleid heeft dus geleid tot minder lachgasemissie.

Onderzaai van gras in een veld met snijmais, om nutriëntenuitspoeling te verminderen

Om ammoniakemissie door mesttoediening te beperken moet mest emissiearm worden toegediend door middel van mestinjectie of onderwerken. Het emissiearm bemesten leidt over het algemeen tot een toename van lachgasemissie. Dit wordt veroorzaakt door een combinatie van twee factoren, namelijk i) doordat de ammoniakemissie wordt beperkt, is er meer stikstof in de bodem dat kan worden omgezet in lachgas en ii) de mest wordt bij injectie/onderwerken in zuurstofarmere omstandigheden toegediend dan bij oppervlakkige toediening. Dit kan leiden tot denitrificatie, waardoor lachgasemissie ontstaat. Emissiearme bemesting leidt tot minder stikstofverlies dan oppervlakkige toediening van mest. Om dezelfde gewasopbrengst te realiseren is er meer kunstmest nodig bij oppervlakkige mesttoediening dan bij emissiearme bemesting.

Daarnaast is ammoniak een bron van indirecte lachgasemissie, waardoor beperking van ammoniakemissie via emissiearme bemesting ook tot minder lachgasemissie leidt. Als er rekening wordt gehouden met de behoefte aan kunstmest en de indirecte lachgasemissie door ammoniak, is het verschil in totale lachgasemissie tussen emissiearm bemesten en oppervlakkige toediening veel kleiner dan op basis van directe lachgasemissie uit toegediende mest.



Directe en indirecte lachgasemissie bij emissiearme en oppervlakkige mesttoediening (Velthof en Mosquera, 2011).

Hebben maatregelen om koolstof op te slaan in bodems een effect op lachgasemissie?

29

Organische stof kan via vier mechanismen een effect hebben op lachgasemissie:

- afbreekbare organische stof is de energiebron voor denitrificerende bacteriën;
- bij afbraak van organische stof wordt zuurstof geconsumeerd en dit kan leiden tot zuurstofloze omstandigheden in de bodem, waardoor denitrificatie toeneemt;
- organische stof is belangrijk voor de bodemstructuur. Structuurbederf door een laag gehalte aan organische stof kan de leiden tot een lager zuurstofgehalte in de bodem. Dit kan zowel leiden tot een hogere lachgasemissie als lagere lachgasemissie (onder compleet zuurstofloze omstandigheden wordt lachgas gereduceerd naar stikstofgas). Waarschijnlijk speelt de grondsoort hierbij een rol; in kleigronden is de kans op zuurstofloze omstandigheden waarbij lachgas wordt gereduceerd tot stikstofgas groter dan in zandgrond;
- in organische stof kan minerale stikstof worden vastgelegd (immobilisatie) of vrijkomen (mineralisatie) en dat kan leiden tot meer of minder lachgasemissie.

Beschrijving van de effecten van maatregelen om koolstof vast te leggen in minerale landbouwgronden op de emissie van N_2O. Het is aangenomen dat de genoemde maatregelen leiden tot een verhoging van het gehalte aan organische stof. Uit Lesschen et al. 2021.

Maatregel	Effect op N_2O-emissie
Minder grondbewerking	Indien minder grondbewerking leidt tot een slechtere structuur en zuurstofvoorziening van bodems dan kan dit leiden tot een hogere N_2O-emissie uit toegediende meststoffen.
Niet scheuren van grasland	Het minder vaak scheuren van grasland leidt tot een lager risico op N_2O-emissie. Ook het risico op nitraatuitspoeling en de daaraan gerelateerde indirecte N_2O-emissie neemt af.
Telen van vanggewassen en winter-gewassen	Het risico op N_2O-emissie neemt toe bij een bemest wintergewas (groenbemester) door de stikstofbemesting. Een onbemest vanggewas neemt stikstof op na de oogst van het hoofdgewas, waardoor risico op N_2O-emissie en nitraatuitspoeling in de winter afneemt. Het onderploegen van een winter- en vanggewas kan leiden tot een toename van de N_2O-emissie.
Achterlaten gewasresten	
Stikstofrijke	Stikstofrijke gewasresten zijn over het algemeen gemakkelijk afbreekbaar en hebben een lage C/N-verhouding. Er is een duidelijk risico op toename van N_2O-emissie en nitraatuitspoeling (indirecte N_2O-emissie) als deze gewasresten in de bodem achterblijven. In de huidige praktijk blijven de gewasresten meestal achter in de bodem.
Stikstofarm (o.a. stro)	Het effect op N_2O-emissie is beperkt, omdat de organische stof relatief moeilijk afbreekbaar is en de C/N-verhouding hoog is. Minerale stikstof in de bodem wordt vastgelegd bij de vertering van stro waardoor risico op nitraatuitspoeling en (indirecte) N_2O emissie lager wordt. Een deel van het stro wordt momenteel afgevoerd na de oogst.

Maatregel	Effect op N_2O-emissie
Meer organische meststoffen	
Drijfmest	Het risico op N_2O-emissie neemt toe naarmate er meer drijfmest wordt toegediend. Drijfmest bevat veel minerale N en gemakkelijk afbreekbare C. Er is ook een risico op nitraatuitspoeling (indirecte N_2O-emissie).
Vaste fractie na scheiden	Het risico op N_2O-emissie is kleiner dan bij drijfmest. Er is een risico op N_2O-emissie, omdat de vaste fractie minerale N en gemakkelijke afbreekbare C bevat. Ook risico op nitraatuitspoeling (indirecte N_2O-emissie) neemt toe.
Digestaat	Het risico op N_2O-emissie is vergelijkbaar met drijfmest. Door vergisting is het gehalte aan minerale N hoger en die van gemakkelijke afbreekbare C lager dan van drijfmest. Er is een risico op een hogere N_2O-emissie.
Stalmest	Er is een risico op N_2O-emissie, maar lager dan bij drijfmest, vaste fractie en digestaat, omdat stalmest minder minerale N en gemakkelijke afbreekbare C bevat.
GFT-Compost	Risico op N_2O-emissie is kleiner dan bij drijfmest, omdat GFT-compost minder minerale N en gemakkelijke afbreekbare C bevat.
Groencompost	Risico op N_2O-emissie is lager dan de andere genoemde organische meststoffen, omdat groencompost veel minder minerale N en gemakkelijke afbreekbare C bevat.

Hebben maatregelen om methaanemissie te beperken een effect op lachgasemissie?

30

Pensfermentatie in rundvee en de opslag van mest zijn de twee belangrijkste bronnen van methaan uit de landbouw. Landbouwgronden zijn geen bron van methaan, omdat deze gronden zuurstof bevatten. Zuurstof remt methaanvorming.

In veengronden die voor landbouw worden gebruikt kan methaan in de verzadigde ondergrond worden gevormd. Deze methaan wordt tijdens transport door de zuurstofhoudende bovengrond omgezet tot koolstofdioxide, waardoor er geen methaanemissie naar de atmosfeer optreedt. Natte veengronden in natuurgebieden en moerassen zijn wel een bron van methaanemissie.

Een belangrijke maatregel om methaanemissie uit pensfermentatie in rundvee te beperken is aanpassing van het rantsoen, bijvoorbeeld door middel van meer snijmaïs en minder gras in het rantsoen. Deze aanpassingen kunnen leiden tot veranderingen in de mestsamenstelling, zowel de organische stof als de stikstof. Door veranderingen in mestsamenstelling kan de lachgasemissie na toediening van mest veranderen. Ook de landbouwkundige werking van de mest kan veranderen, waardoor er meer of minder kunstmest nodig is. Als maatregelen om methaanemissie te beperken er toe leiden dat er meer snijmaïs en minder grasland komt, dan zal de lachgasemissie toenemen doordat grasland wordt omgezet in bouwland.

Opslag van drijfmest leidt tot methaanemissie. Deze emissie kan worden beperkt door mest te vergisten en biogas op te vangen en mest te be- en verwerken tot een dunne en dikke fractie. Ook rantsoenmaatregelen die leiden tot veranderingen in mestsamenstelling kunnen een effect hebben op de methaanemissie uit de mestopslag.

Als rantsoenaanpassingen en/of maatregelen met betrekking tot mestopslag leiden tot een lager minerale stikstofgehalte in mest, dan zal de lachgasemissie na toediening aan bodems lager zijn. Als de afbreekbaarheid van organische stof afneemt dan zal de lachgasemissie ook afnemen.

Daarnaast zijn er allerlei technische maatregelen mogelijk in de stal, zoals koelen van mest en afvangen van methaan uit de stallucht. Dit soort maatregelen hebben geen of een beperkt effect op lachgasemissie.

Aanpassingen in het veerantsoen naar meer snijmais kunnen leiden tot een afname van methaanemissies, maar leiden mogelijk ook tot een toename van lachgasemissies.

Referenties

Vraag 1

IPCC, 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P. M.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 1535 pp.

Van Goor, M. (2018). Lachgas – Update maart 2018 [Factsheet]. Geraadpleegd op 13 november 2019, van https://www.trimbos.nl/docs/fff0f1ee-c774-4ed0-adbb-b63493d6450f.pdf.

Vraag 2

Chalk, P.M. and Smith, C.J. (1983) Chemodenitrification. In: Freney, J.R., Simpson, J.R. (Eds.), Gaseous loss of nitrogen from plant-soil systems. Developments in Plant and Soils Sciences 9, 65-89.

Ussiri, D. and Lal, R. (2013). Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation. Springer

Ward, B. B., Arp, D. J., & Klotz, M. G. (Eds.). (2011). Nitrification. American Society for Microbiology Press.

Wrage-Mönnig, N., Horn, M.A., Well, R., Müller, C., Velthof, G., Oenema, O. (2018) The role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide revisited, Soil Biology and Biochemistry 123, A3-A16

Vraag 3

Wuebbles, D. J. (2009). Nitrous oxide: no laughing matter. Science, 326(5949), 56-57.

Vraag 5

Jetten, M. S. (2008). The microbial nitrogen cycle. Environmental microbiology, 10(11), 2903-2909.

Mosier, A., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S., & Van Cleemput, O. (1998). Closing the global N2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. Nutrient cycling in Agroecosystems, 52(2-3), 225-248.

Gruber, N., & Galloway, J. N. (2008). An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. Nature, 451(7176), 293.

Ussiri, D., & Lal, R. (2012). Soil emission of nitrous oxide and its mitigation. Springer Science & Business Media.

Vraag 6

Olivier , J.G., Schure, K.M. & Peters, J.A.H.W., (2017). Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions: 2017 report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.

Olivier J.G.J. and Peters J.A.H.W. (2019), Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions: 2019 report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.

Velthof, G. L., & Rietra, R. P. J. J. (2018). Nitrous oxide emission from agricultural soils (No. 2921). Wageningen Environmental Research.

Vraag 7

Ruyssenaars, P. G., Coenen, P. W. H. G., Rienstra, J. D., Zijlema, P. J., Arets, E. J. M. M., Baas, K., ... & van Huis, E. P. (2020). Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990-2018: National Inventory Report 2020. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).

Emissieregistratie, 2018. Retrieved at 27-10-2020 from http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/erpub/international/broeikasgassen.aspx

Vraag 8

Ruyssenaars, P. G., Coenen, P. W. H. G., Rienstra, J. D., Zijlema, P. J., Arets, E. J. M. M., Baas, K., ... & van Huis, E. P. (2020). Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990-2018: National Inventory Report 2020. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).

Velthof, G. L., & Rietra, R. P. J. J. (2018). Nitrous oxide emission from agricultural soils (No. 2921). Wageningen Environmental Research.

Vraag 9

Olivier J.G.J. and Peters J.A.H.W. (2020), Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions: 2019 report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.

Vraag 10

Bergamaschi, P., Corazza, M., Karstens, U., Athanassiadou, M., Thompson, R. L., Pison, I., ... & Dlugokencky, E. (2015). Top-down estimates of European CH 4 and N 2 O emissions based on four different inverse models. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(2), 715-736.

Ussiri, D., & Lal, R. (2012). Soil emission of nitrous oxide and its mitigation. Springer Science & Business Media.

Rapson, T. D., & Dacres, H. (2014). Analytical techniques for measuring nitrous oxide. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 54, 65-74.

Vraag 11

Arets, E. J. M. M., J. W. H. van der Kolk, G. M. Hengeveld, J. P. Lesschen, H. Kramer, P. J. Kuikman and M. J. Schelhaas (2019) Greenhouse gas reporting of the LULUCF sector in the Netherlands. Methodological background, update 2019. WOt Technical report 146. Statutory Research Tasks Unit for Nature & the Environment (WOT Natuur & Milieu), Wageningen UR, Wageningen

Bruggen, C. van, A. Bannink, C.M. Groenestein, J.F.M. Huijsmans, L.A. Lagerwerf, H.H. Luesink, G.L. Velthof & J. Vonk (2020). Emissies naar lucht uit de landbouw, 1990-2018. Berekeningen met het model NEMA. Wageningen, WOT Natuur & Milieu, WOt-technical report 178. 224 p

Ruyssenaars, P. G., Coenen, P. W. H. G., Rienstra, J. D., Zijlema, P. J., Arets, E. J. M. M., Baas, K., ... & van Huis, E. P. (2020). Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990-2018: National Inventory Report 2020. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).

van der Zee, T., Bannink, A., van Bruggen, C., Groenestein, K., Huijsmans, J., van der Kolk, J., ... & Vonk, J. (2021). Methodology for estimating emissions from agriculture in the Netherlands. Calculations for CH4, NH3, N2O, NOx, NMVOC, PM10, PM2. 5 and CO2 using the National Emission Model for Agriculture (NEMA)–Update 2021.

Velthof, G.L., and Mosquera, J. (2011). Calculation of nitrous oxide emission from agriculture in the Netherlands: update of emission factors and leaching fraction. Alterra report 2151 Alterra Wageningen UR, Wageningen, the Netherlands.

Vraag 13
Wagner-Riddle, C., Congreves, K.A., Abalos, D., Berg, A.A., Brown, S.E., Ambadan, J.T., Gao,X., Tenuta, M., 2017. Globally important nitrous oxide emissions from croplands induced by freeze–thaw cycles. Nature Geoscience 10, 279–283.

Vraag 14
Velthof G.L., Brader, A.B. and Oenema, O. (1996) Seasonal variations in nitrous oxide losses from managed grasslands in the Netherlands. Plant and Soil 181: 263-274.

Velthof, G.L., Mosquera, J. (2011) The impact of slurry application technique on nitrous oxide emission from agricultural soils. Agriculture, Ecosystems and Environment 140, 298 - 308.

Vraag 15
Stehfest, E., Bouwman, L., 2006. N2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. Nutrient Cycling in Agroecosystems 74

Velthof G.L., Oenema, O., Postma, R. and van Beusichem, M.L. (1997) Effects of type and amount of applied nitrogen fertilizer on nitrous oxide fluxes from intensively managed grassland. Nutrient Cycling in Agroecosystems 46: 257-267.

Vraag 16
Velthof, G. L., Kuikman, P. J., & Oenema, O. (2003). Nitrous oxide emission from animal manures applied to soil under controlled conditions. Biology and fertility of soils, 37(4), 221-230.

Vraag 17
Velthof, G. L., & Hummelink, E. (2011). Ammoniak-en lachgasemissie bij toediening van mineralenconcentraten. Resultaten van laboratoriumproeven in het kader van de Pilot Mineralenconcentraten. Alterra, Wageningen.

Velthof, G. L., & Mosquera, J. (2011). The impact of slurry application technique on nitrous oxide emission from agricultural soils. Agriculture, ecosystems & environment, 140(1-2), 298-308.

Vraag 18
Gilsanz, C., Báez, D., Misselbrook, T. H., Dhanoa, M. S. & Cárdenas, L. M. 2016. Development of emission factors and efficiency of two nitrification inhibitors, DCD and DMPP. Agriculture, Ecosystems & Environment, 216, 1-8.

Vraag 19
Velthof, G. L., Kuikman, P. J., & Oenema, O. (2002). Nitrous oxide emission from soils amended with crop residues. Nutrient cycling in agroecosystems, 62(3), 249-261.

Vraag 20
Velthof, G. L., Brader, A. B., & Oenema, O. (1996). Seasonal variations in nitrous oxide losses from managed grasslands in The Netherlands. Plant and Soil, 181(2), 263-274.

Munch, J. C., & Velthof, G. L. (2007). Denitrification and agriculture. In Biology of the nitrogen cycle (pp. 331-341). Elsevier.

Vraag 21
Van Groenigen, J. W., Palermo, V., Kool, D. M., Kuikman, P. J. 2006. Inhibition of denitrification and N2O emission by urine-derived benzoic and hippuric acid. Soil Biology and Biochemistry 38, 2499–2502.

Van Groenigen, J. W., Velthof, G. L., Van der Bolt, F. J. E., Vos, A., Kuikman, P. J. 2005. Seasonal variation in N2O emissions from urine patches: effects of urine concentration, soil compaction and dung. Plant and Soil 273, 15–27.

Vraag 22
Velthof G.L. (1997) Nitrous oxide emissions form intensively managed grasslands. PhD thesis, Wageningen University.

Van Beek, C. L., Pleijter, M., & Kuikman, P. J. (2011). Nitrous oxide emissions from fertilized and unfertilized grasslands on peat soil. Nutrient cycling in agroecosystems, 89(3), 453-461.

Vraag 23
Velthof, G.L., Hoving, I.E., Dolfing, J., Smit, A., Kuikman, P.J., Oenema, O. (2010) Method and timing of grassland renovation affects herbage yield, nitrate leaching, and nitrous oxide emission in intensively managed grasslands. Nutrient Cycling in Agroecosystems 86 (3). - p. 401 - 412.

Vraag 24
Six, J., Ogle, S. M., Breidt, F. J., Conant, R. T., Mosier, A. R. & Paustian, K. (2004). The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. Global Change Biology 10, 155–160.

Vraag 26
Velthof, G. L., & Rietra, R. P. J. J. (2018). Nitrous oxide emission from agricultural soils (No. 2921). Wageningen Environmental Research.

Vraag 28
Velthof, G.L., Koeijer, T., Schröder, J. J., Timmerman, M., Hooijboer, A., Rozemeijer, J., van Bruggen, C., & Groenendijk, P. (2017). Effecten van het mestbeleid op landbouw en milieu: Beantwoording van de ec postvragen in het kader van de evaluatie van de meststoffenwet. (Wageningen Environmental Research rapport; No. 2782).

Velthof, G. L., & Mosquera, J. (2011). The impact of slurry application technique on nitrous oxide emission from agricultural soils. Agriculture, Ecosystems and Environment, 140(1-2), 298-308.

Vraag 29
Lesschen, J.P., Hendriks, C.H., Slier, T., Porre, R.J., Velthof, G.L., Rietra, R., 2021. De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw. Wageningen, Wageningen Environmental Research.