Louis Bolk Instituut

Emissies van lachgas bij natte teelten

Een literatuurstudie

Waas Thissen en Jeroen Pijlman

Deze literatuurstudie is uitgevoerd In opdracht van STOWA/NOBV

© 2022 Louis Bolk Instituut

Emissies van lachgas bij natte teelten - Een literatuurstudie

Waas Thissen en Jeroen Pijlman

Trefwoorden: broeikasgassen, veen, landgebruik, stikstof

Publicatienummer 2022-049 LbP

32 pagina's

www.louisbolk.nl
info@louisbolk.nl
T 0343 523 860
Kosterijland 3-5
3981 AJ Bunnik
@LouisBolk

Louis Bolk Instituut: Onderzoek en advies ter bevordering van duurzame landbouw, voeding en gezondheid

Inhoud

1 Inleiding en achtergrond **4**

2 Opzet van het literatuuronderzoek **5**

2.1 Vraagstelling en onderzoeksdoel 5
2.2 Methode 5

3 Lachgasvorming in bodems **7**

3.1 Lachgasvorming bij nitrificatie en denitrificatie 7
3.2 Belangrijkste invloed factoren lachgasvorming 8

4 Lachgasvorming in veenbodems en bij natte teelten op veen **10**

4.1 Factoren welke lachgasvorming op veenbodems beïnvloedden 10
4.2 Factoren die lachgasvorming bij natte teelten op veen beïnvloeden 11

5 Wat kunnen we leren uit de rijstteelt op het gebied van lachgasemissies? **22**

5.1 Rijstteelt: lachgas en methaan 22
5.2 Processen en maatregelen gerelateerd lachgas en methaan 23
5.3 Mogelijke doorvertaling kennis rijstteelt voor lisdoddeteelt op veen 24

7 Verwachte emissies van lachgas bij vier grondwaterstanden voor natte teelten op veen **27**

8 Conclusies **30**

Literatuur **32**

1 Inleiding en achtergrond

Het NOBV heeft aan het LBI – in het kader van de klankbordgroep voor het NOBV – gevraagd een literatuurstudie te doen naar het effect van droogval op lachgasemissies uit de bodem bij natte teelten. Binnen VIPNL natte teelten wordt onderzoek gedaan naar en ervaring opgedaan met mogelijke teeltsystemen voor natte teelten. Vanuit dit onderzoek is er ook behoefte aan meer inzicht in mogelijke lachgasemissies bij natte teelten.

Droogval is een mogelijke methode om enerzijds methaanemissies uit natte teelten te beperken, maar op basis van onderzoek uit rijstteelt en veenweiden valt af te leiden dat droogval omstandigheden mogelijk juist kunnen leiden tot lachgasemissies. Daarnaast zou droogval ook CO_2 emissies kunnen opleveren. Natte teelten op veengronden worden ingezet met als doel het leveren van ecosysteemdiensten (beperken bodemdaling, broeikasgasemissies, beperken belasting waterkwaliteit en waterkwantiteit en herbergen van biodiversiteit) te vergroten en een verdienmodel voor de grondbeheerder te creëren. Mitigatie van broeikasgasemissies is een belangrijke beoogde ecosysteemdienst van natte teelten, welke samenhangt met de teeltinrichting, productie en het kunnen leveren van andere ecosysteemdiensten. Het is daarom van belang inzicht te vergroten over mogelijke lachgasemissies bij verschillende teeltomstandigheden, en inzicht te vergroten over mogelijke trade-offs tussen methaan, CO_2 en lachgasemissies uit natte teelten.

2 Opzet van het literatuuronderzoek

Dit hoofdstuk beschrijft kort de vraagstelling, het onderzoeksdoel en de gebruikte methode van de literatuurstudie

2.1 Vraagstelling en onderzoeksdoel

De vraagstelling van deze literatuurstudie is:

1. of er een risico is op de vorming van lachgasemissies bij natte teelten;

   En *als* er significante lachgasemissies op kunnen treden:
2. welke factoren daarin de belangrijkste rol spelen en hoe zich dat verhoudt tot verschillende omstandigheden (o.a. peil boven maaiveld, kortere versus langere droogval);
3. een orde van grootte van de lachgasemissies uit literatuur af te leiden.

Deze informatie wil het NOBV gebruiken om het risico van lachgasemissies te vergelijken ten opzichte van de huidige CO_2-emissies uit Nederlandse veenbodems en de emissies van methaan zoals die tot nu toe gevonden zijn door het NOBV bij de lisdoddeteelt in Zegveld en Ankeveen. Daarnaast wil het NOBV deze informatie gebruiken om de mogelijke noodzaak te bepalen/onderbouwen voor het uitvoeren van lachgasmetingen bij experimenten met droogval om methaanemissies te reduceren bij lisdoddeteelt.
Binnen VIPNL natte teelten wil men de informatie gebruiken om te kunnen inschatten wat mogelijke lachgasemissies zijn bij verschillende potentiële natte teelten en natte teelten systemen.

2.2 Methode

Naast de reeds door het NOBV gestuurde literatuur, is gezocht naar studies over processen en factoren rondom lachgasvormingen emissies uit veengronden onder natuurlijke/natte teelt/paludicultuur omstandigheden en naar studies rondom lachgasemissies uit rijstteelt;

De belangrijkste bevindingen uit de gevonden studies zijn als volgt gerapporteerd;

1. De belangrijkste factoren welke de vorming van lachgas beïnvloedden in de bodem;
2. De belangrijkste factoren welke de vorming van lachgas beïnvloedden in veenbodem en in natte teelten op veen;
3. De verwachte verhouding van deze factoren in relatie tot een aantal verschillende teeltsituaties, namelijk;
   a. Een natte teelt met een constant waterpeil van ca. 20-30 cm boven maaiveld;
   b. Een natte teelt met een constant waterpeil rond of net onder maaiveld;
   c. Een natte teelt met een waterpeil van ca. 20-30 cm onder maaiveld;

   d. Een natte teelt met een fluctuerend waterpeil tussen 20-30 cm boven maaiveld, en 20-30 cm onder maaiveld. Hierbij wordt ook gekeken of er relevante informatie beschikbaar is over de lengte van de droogvalperiode en het risico op lachgasemissies.
4. Wat vanuit de rijstteelt af te leiden is en mogelijk toepasbaar is op natte teelten, met een focus op lisdodde.

Op basis van de belangrijkste bevindingen zijn vervolgens conclusies geschreven rondom de onderzoeksvragen.

3 Lachgasvorming in bodems

Dit hoofdstuk behandeld kort het proces van lachgasvorming, en de algemene factoren die de vorming van lachgas beïnvloeden in bodems.

3.1 Lachgasvorming bij nitrificatie en denitrificatie

Lachgas (N_2O) is een potent broeikasgas; 1 kg is equivalent aan bijna 300 kg CO_2 broeikasgas-potentieel. Het wordt geproduceerd door bodem-microbiota als bijproduct van nitrificatie of als tussenproduct in denitrificatie. Denitrificatie zorgt voor de grootste bijdrage aan lachgasvorming. Volledige denitrificatie is de omzetting van nitraat naar stikstofgas. Denitrificatie treedt op onder zuurstofloze omstandigheden, waarbij organische stof in de bodem een energiebron is voor denitrificerende bacteriën. Nitrificatie is de omzetting van ammonium naar nitraat. Voor dit proces is zuurstof nodig. Onder zuurstofarme omstandigheden wordt nitrificatie geremd, en is lachgasvorming mogelijk. Nitrificatie en denitrificatie kunnen gelijktijdig in de bodem voorkomen of afwisselend tijdens droge en natte perioden (Slier en Velthof, 2021).

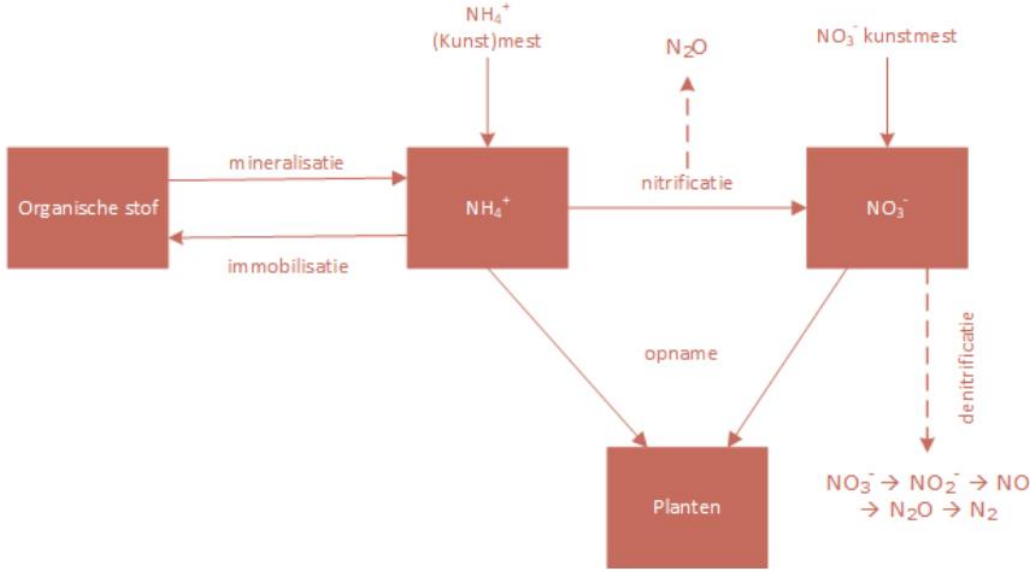
In figuur 1 zijn de processen van nitrificatie en denitrificatie beschreven en weergeven in relatie tot een aantal processen die de vorming beïnvloeden. De processen van nitrificatie en denitrificatie kunnen ook als volgt vereenvoudigd beschreven worden (naar Velthof & van 't Hull):

Nitrificatie:

NH_4^+ (Ammonium) → NO_2^- (Nitriet) → NO_3^- (Nitraat) *(waarbij ook N_2O (lachgas) kan vrijkomen)*.

Denitrificatie:

NO_3^- (Nitraat) → NO_2^- (Nitriet) → NO_x (stikstofoxiden) → N_2O (lachgas) → N_2 (stikstofgas)



Figuur 1. Verband tussen processen die kunnen leiden tot lachgasemissie (Naar Ussir i& Lal, 2013, in Slier & Velthof, 2021).

3.2 Belangrijkste invloed factoren lachgasvorming

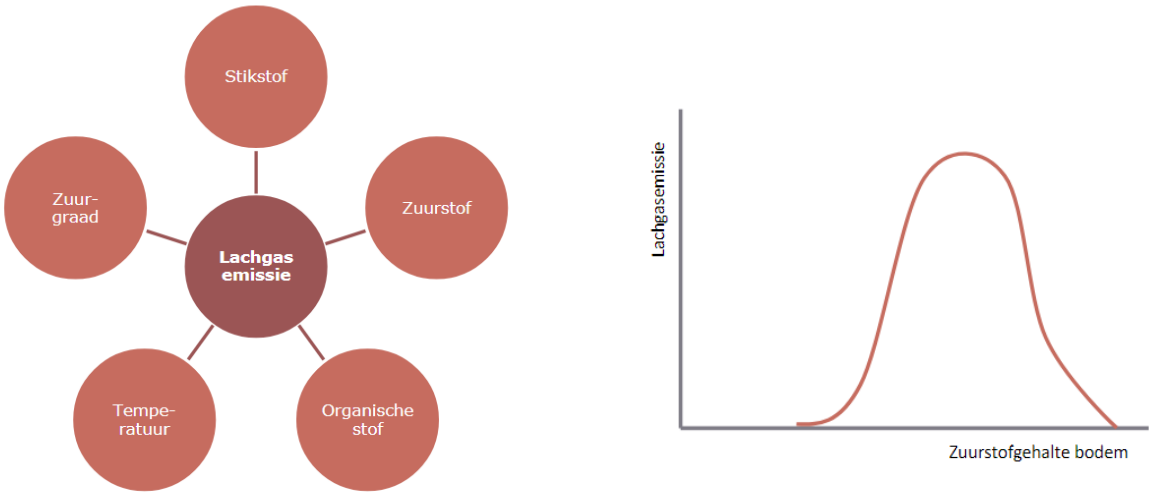
De belangrijkste factoren die de vorming van lachgas beïnvloeden zijn (Slier & Velthof, 2021) (Figuur 2):

- 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

Verderop in deze literatuurstudie is een uitgebreidere toelichting over hoe deze factoren de vorming van lachgas beïnvloeden, in de context van een veengrond. We gaan hier wel kort in op de factor *zuurstof*, omdat deze in algemene zin van groot belang is bij de vorming van lachgas.

Voor zowel denitrificatie als nitrificatie is het belangrijk om te noemen dat *zuurstofarme* omstandigheden zorgen voor verhoogde lachgasemissies. Bij *zuurstofarme* omstandigheden zorgt *incomplete* denitrificatie voor de vorming van voornamelijk lachgas, en wordt bij *incomplete* nitrificatie ook lachgas gevormd. Onder *zuurstofloze* omstandigheden vind *complete* denitrificatie en dus de vorming van stikstofgas plaats, en bij *complete* nitrificatie wordt weinig lachgas gevormd. Vandaar dat de grootste lachgasemissies worden verwacht in gronden onder omstandigheden die tussen volledig *zuurstofrijk* en *zuurstofloos* zijn (Slier & Velthof, 2021) (Figuur 2, rechts). Onder andere het niveau, maar ook wisselingen van het bodemvochtgehalte hebben een grote invloed op het zuurstofgehalte in de bodem, en daarmee dus een grote invloed op lachgasemissies. Bodemvochtgehalten kunnen hoog zijn door hoge grondwaterpeilen, maar bijvoorbeeld ook als gevolg van neerslag. Daarnaast kunnen onder andere planten en management een rol

spelen in het zuurstofgehalte van de bodem. Hier is in het volgende hoofdstuk dieper op in gegaan.



Figuur 2. De belangrijkste factoren die de vorming van lachgas bepalen, en de invloed van zuurstof in de bodem op de vorming van lachgas (conceptueel) (Slier & Velthof, 2021).

4 Lachgasvorming in veenbodems en bij natte teelten op veen

Dit hoofdstuk behandeld de specifieke factoren die de emissies van lachgas *op veen* kunnen beïnvloeden, en die de emissies van lachgas bij natte teelten op veen kunnen beïnvloeden.

4.1 Factoren welke lachgasvorming op veenbodems beïnvloedden

In veengronden is denitrificatie het proces wat het meeste bijdraagt aan lachgasemissies. In veengebieden zijn de belangrijkste factoren die denitrificatie bepalen;

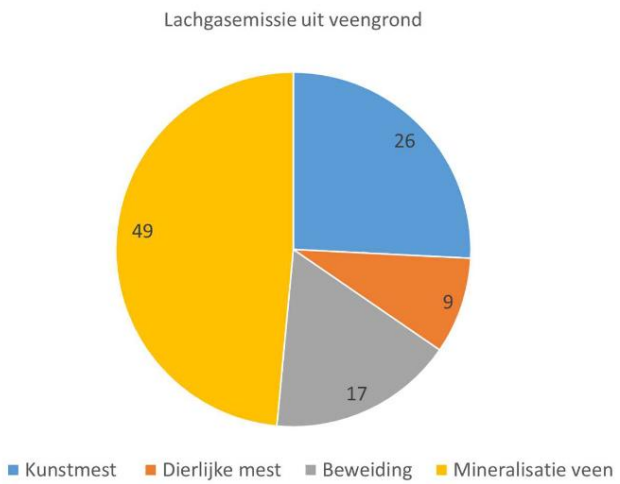
1) de kwaliteit van de organische stof in de bodem (o.a. N gehalte en C/N ratio),
2) de zuurstofvoorziening van de bodem,
3) de beschikbaarheid van nitraat (en concurrentie om de opname van nitraat door planten),
4) de microbiële activiteit.

In natuurlijke veengebieden zorgen hoge grondwaterstanden voor weinig zuurstof in de bodem, waardoor er beperkte of geen mineralisatie is, een lage nitrificatiesnelheid is en daardoor beperkt nitraat beschikbaar is. Natuurlijke veengebieden hebben over het algemeen een lage denitrificatieactiviteit, waardoor lachgasemissies relatief laag zijn (Tauchnitz et al., 2015).

In veenweiden zijn er 'extra' stikstofbronnen voor nitrificatie en denitrificatie. In grote lijnen twee bronnen te noemen (Velthof & van 't Hull), namelijk:

1) stikstof uit veenmineralisatie
2) stikstof uit toegediende bemesting (drijfmest, kunstmest en/of weidemest).

In Figuur 3 is voor Nederlandse veenweiden te zien welke bronnen van lachgas naar schatting in verhouding belangrijk zijn. Emissies uit toegediende stikstof zijn opgesplitst in "Dierlijke Mest", "Kunstmest", en "Beweiding". In grote lijnen is te zien dat beide bronnen min of meer in de verhouding 50/50 bijdragen aan emissies van lachgas uit veen (Emissieregistratie, in Velthof & van 't Hull).



Figuur 3. Geschatte herkomst van lachgasemissies uit veenweiden (Emissieregistratie, in Velthof & van 't Hull).

4.2 Factoren die lachgasvorming bij natte teelten op veen beïnvloeden

Op basis van de literatuur kunnen er in elk geval effecten van de volgende factoren worden verwacht op lachgasvorming bij natte teelten op veengrond. Van belang hierbij is op te merken dat deze factoren ook onderling effect op elkaar hebben:

1) Grondwaterpeil en bodemvochtgehalte;
2) De initiële nutriënten(stikstof)-rijkdom van het veen en stikstofaanvoer via water of bemesting;
3) Samenstelling en activiteit bodemleven;
4) Het gebruikte gewas;
5) De hoeveelheid en het type van organische stof;
6) Betreden van het veld, zoals bij het machinaal oogsten van biomassa.

4.2.1 Grondwaterpeil en bodemvochtgehalte

Wat betreft de grondwaterstand in relatie tot de twee hoofdbronnen van lachgas op veenweiden, hebben Velthof & van 't Hull de volgende hypotheses over vernatting gesteld. De hypotheses rondom de verandering van de lachgasemissies zijn in relatieve zin ten opzichte van elkaar zijn gesteld.

1. Bij vernatting neemt de lachgasemissie vanuit veenmineralisatie af;
2. Bij vernatting neemt de lachgasemissie vanuit toegediende stikstof toe.

Deze hypotheses rondom lachgasemissie bij vernatting van veenweiden zijn als volgt te onderbouwen:

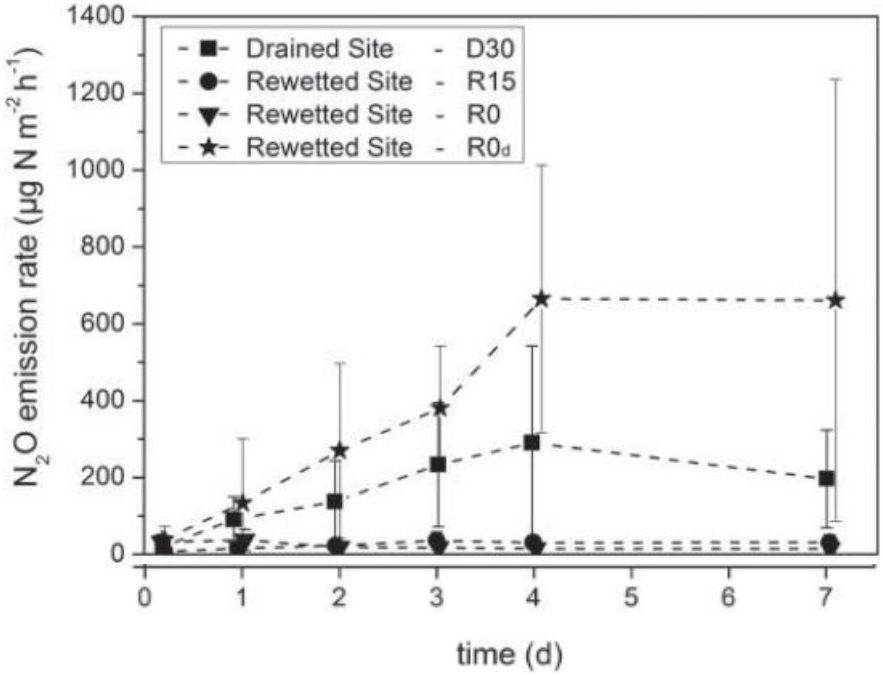
1. Bij vernatting van veen zal de afbraak van organische stof afnemen, waardoor ook minder stikstofmineralisatie plaatsvindt, en de emissie van lachgas vanuit nitrificatie en denitrificatie zal afnemen (Slier & Velthof, 2021). Zo vonden van Beek et al. (2011) een negatief verband tussen de grondwaterstand onder maaiveld en de lachgasemissie uit een onbemest grasland op veengrond (m.a.w. bij hogere grondwaterstanden een lagere lachgasemissie) (Figuur 5);
2. Bij vernatting van veen zal de grondwaterstand hoger worden, waardoor er in de bovenste laag van de bodem sneller minder zuurstof aanwezig is, bijvoorbeeld na neerslag. Dit kan gunstiger zijn voor onvolledige denitrificatie, waardoor de emissie van lachgas uit toegediende stikstof kan toenemen.

Hierbij moet worden opgemerkt dat bij volledige vernatting, en dus volledige zuurstofloze omstandigheden, er weinig tot geen lachgasemissies zullen zijn, omdat er onder deze omstandigheden *complete* denitrificatie kan plaatsvinden (Slier & Velthof, 2021) (Figuur 2).

Deze verwachting werd onder andere bevestigd in een studie van Vroom et al. (2018). Zij onderzochten het effect van grote Lisdodde (*Typha latifolia*) op o.a. de emissies van lachgas uit een nutriënten-arm veen uit Friesland onder hernatte omstandigheden (constant waterpeil boven maaiveld, startende van +5 cm), in een mesocosm proef. In deze studie werd slechts kortstondig lachgas gemeten rondom het aanbrengen van nitraat (150 kg N per hectare). Op alle meetdagen was de meerderheid van de emissies onder de

detectiegrens (< 1,88 mg N_2O/m^2/dag (Vroom et al., 2018), omgerekend <18.8 g N_2O/ha/dag. Naar verwachting was in deze studie het gros van de tijd de denitrificatie van nitraat compleet als gevolg van het waterpeil boven de bodem, en werd er zodoende weinig lachgas geproduceerd, maar voornamelijk stikstofgas.

Tauchnitz et al. (2015) onderzochten het effect van de grondwaterstand op lachgasemissies uit denitrificatie van een nutriënten-arme veengrond in centraal-Duitsland, welke in de periode 1750-1776 was gedraineerd, en gedeeltelijk was vernat in 2005. Ze maten lachgasemissies in de uitgangssituatie van het systeem (constant waterpeil van -30 cm) en drie verschillende hernatte omstandigheden (constant waterpeil van -15 cm, constant waterpeil van 0 cm, en fluctuerend waterpeil tussen 0 cm en -6 cm). De initiële lachgasemissies waren erg laag (14±11 µg N_2O-N/m2/uur, omgerekend 5.3 g N_2O/ha/dag), wat verklaard werd door een lage hoeveelheid van nature aanwezig nitraat in de bodem. Na toevoeging van isotoop-gelabeld nitraat (30 kg N/ha) werden de hoogste emissies van lachgas gevonden bij een fluctuerend waterpeil (maximaal 665 µg N_2O-N/m2/uur, omgerekend 251 g N_2O/ha/dag). Deze waren meer dan twee keer zo hoog als bij het gedraineerde waterpeil van -30 cm (maximaal 291 µg N_2O-N/m2/uur, omgerekend 110 g N_2O/ha/dag). En bij constant -15 en 0 cm waren er nauwelijks emissies van lachgas (maximaal 36 en 37 µg N_2O-N/m2/uur, respectievelijk, omgerekend 13-14 g N_2O/ha/dag) (Figuur 4).



Figuur 4. Emissies van lachgas bij vier verschillende beheren van grondwater. D30 is een constant waterpeil van -30 cm; R15 is een(constant waterpeil van -15 cm; R0 is een constant waterpeil van 0 cm; $R0_d$ een fluctuerend waterpeil tussen 0 cm en -6 cm (aangepast van Tauchnitz et al., 2015).

Als verklaring voor de verschillen in lachgasemissies tussen de behandelingen in Tauchnitz et al. (2015) werden genoemd; 1) de beschikbaarheid van nitraat en 2) een hogere grondwaterstand welke het denitrificatiepotentieel vergroot en fysieke effecten heeft op de

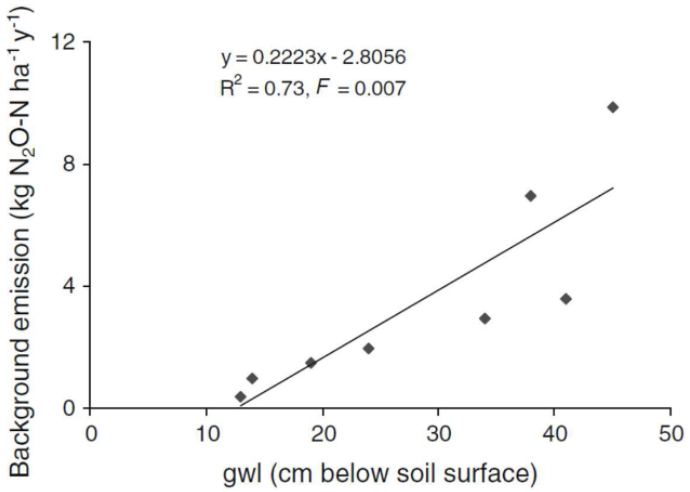
hoeveelheid opgeloste N-gassen in het grondwater. Zij concludeerden dat een stijgende grondwaterstand samengaat met een vergrote hoeveelheid opgeloste N-gassen in het water, lagere diffusie snelheden naar de atmosfeer en meer bubbelvorming. Als verklaring voor de verschillen in lachgasemissies tussen een constant waterpeil van 0 cm en een fluctuerend waterpeil van 0 cm t/m -6 cm – beide behandelingen bevatten bij aanvang van de proef ongeveer evenveel opgelost lachgas in de waterverzadigde zone – werd genoemd dat bij een constant waterpeil opgebouwd lachgas minder goed via diffusie getransporteerd kon worden naar de atmosfeer. Er werd genoemd hoe bij het fluctuerende waterpeil van 0 t/m -6 cm met het zakken van het waterpeil de limiterende factor (het water) wegviel voor diffuse transportatie, waardoor het opgebouwde lachgas via diffusie de atmosfeer kon bereiken. Naast het belang van een constante waterverzadigde zone die diffusie van lachgas remt, is de verblijftijd van lachgas in het water belangrijk. Waar lachgas voor langere tijd accumuleert in de waterverzadigde zone, zijn er ook voor langere tijd zuurstofloze omstandigheden die complete denitrificatie en de omzetting van lachgas naar stikstofgas bevorderen.

Het is dus van belang om te benadrukken dat de bijdrage aan lachgasemissies van denitrificatie in de waterverzadigde zone naar de atmosfeer niet alleen sterk afhangt van de productie- en consumptiesnelheden van lachgas, maar ook van convectief- of diffuus transport van lachgas naar de atmosfeer welke kunnen toenemen bij wisselende grondwaterpeilen. Als verklaring voor de verschillen in emissies tussen een fluctuerend waterpeil van 0 cm t/m -6 cm en -30 cm noemt Tauchnitz et al. (2015) hoe bij -30 cm er geen waterverzadigde laag was, en er dus ook geen limiterende factor voor diffuse transportatie aanwezig was. Hierdoor was er geen lachgasopbouw in de waterverzadigde laag, gevolgd door een plotselinge ontsnapping van lachgas uit een voorheen waterverzadigde laag; in plaats daarvan was er een meer continue vorming en emissie van lachgas vanaf het begin van de proef, en geen afbraak van lachgas in een waterverzadigde laag boven 30 cm onder maaiveld.

Bij natuurlijke venen met een hoge grondwaterstand zijn de emissies van lachgas doorgaans erg klein; minder dan 0.45 tot 79.9 µg N_2O–N/m2/uur (Tauchnitz et al., 2015). Daarentegen zijn bij gedraineerde venen met een lage grondwaterstand de emissies van lachgas erg groot; wel tot aan 1735 µg N_2O–N/m2/uur (omgerekend tot 654 g N_2O/ha/dag) (Tauchnitz et al., 2015).

Ook op Nederlandse veenbodems werd deze relatie tussen veenmineralisatie en de grondwaterstand gevonden. Van Beek et al. (2011) vonden een hogere lachgasemissie bij een grondwaterstand van -40 cm dan bij een grondwaterstand van -17 cm (zowel met als zonder bemesting). De emissies uit veenmineralisatie ("Background emission") waren in dit onderzoek gemiddeld 3.2±2.9 kg N_2O-N/ha/jaar (omgerekend 14±12 g N_2O/ha/dag), en sterk afhankelijk van - en correleerde met - de gemiddelde grondwaterstand (Figuur 5). Hoewel dit verband met een beperkt aantal meetpunten is gelegd, past het binnen de lijn der

verwachtingen (hypothese 1 zoals geformuleerd door Velthof & van 't Hull). De verklaring voor dit verband ligt bij de vermindere afbraaksnelheid van veen, omdat er bij hogere grondwaterstanden een kleinere bodemlaag resteert waar zuurstof de bodem in kan dringen en waar omstandigheden tussen volledig aeroob en anaeroob zijn (Figuur 2). Daardoor vindt er een verminderde stikstofmineralisatie plaatsvind, waardoor er minder stikstof beschikbaar zal zijn voor lachgasvorming, en is de bodemlaag waar lachgas gevormd kan worden dunner. Enkele mogelijke verklaringen voor de spreiding binnen de grafiek zijn de bepaling van de grondwaterstand (het zijn jaargemiddelden) en mogelijk ook ruimtelijke variaties op korte afstanden in de bodem (bijvoorbeeld stikstofgehalten en snelheid van mineralisatie en onvolledige (de)nitrificatie in verschillende bodemlagen).



Figuur 5. Correlatie tussen lachgasemissies uit veenmineralisatie ("achtergrondemissies") en de grondwaterstand in cm onder het maaiveld. Hoe hoger de grondwaterstand, hoe minder emissies uit veenmineralisatie, en vice versa (Van Beek et al., 2011).

4.2.2 Het effect van de initiële nutriënten-rijkdom van het veen en van stikstofaanvoer

Initiële nutriëntrijkdom

In een nutriënten-rijk veen, doorgaans met een relatief lager C/N ratio, zal verlagen van de grondwaterstand logischerwijs vaker leiden tot meer lachgasemissies, dan wanneer eenzelfde verlaging in een nutriënten-arm veen plaats zou vinden (Regina et al., 1996; in Tauchnitz et al., 2015). Er is dan tenslotte meer beschikbare stikstof aanwezig in de bodem die bij mineralisatie vrijkomt. Wanneer de voedselrijke laag van voormalige veenweiden voor de start van vernatting wordt verwijderd, neemt de nutriëntenrijkdom sterk af, waardoor mogelijk ook lachgasemissies kunnen worden vermeden. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat emissies zich kunnen verplaatsen met het verplaatsen van de toplaag, omdat de voedselrijke toplaag weer elders terecht komt (ophogen percelen, maken van dijkjes voor natte velden, etc.). Anderzijds kan, wanneer de toplaag niet wordt verwijderd, de eventuele bodembewerking die nodig is voor de aanleg van natte teelten ook leiden tot extra

mineralisatie waar ammonium en vervolgens nitraat kan worden gevormd, waarbij extra risico op lachgasvorming bestaat afhankelijk van het grondwaterpeil en de hoeveelheid neerslag na bodembewerking.

Stikstofaanvoer

Bij bemesting als factor bij lachgasemissies, is het concept "de 4 J's" van grote invloed op de mogelijke vorming van lachgas (Velthof & van 't Hull). De 4 "*J's*" gaat over de of het "*juiste*":

- **Hoeveelheid** bemesting
- **Tijdstip** van bemesting
- **Plaats** van bemesting
- **Soort** bemesting

Deze factoren, in combinatie met andere factoren zoals de grondwaterstand, zijn mede sterk bepalend in de mate waarin bemesting met stikstof leidt tot vorming van lachgas en emissies naar de atmosfeer.

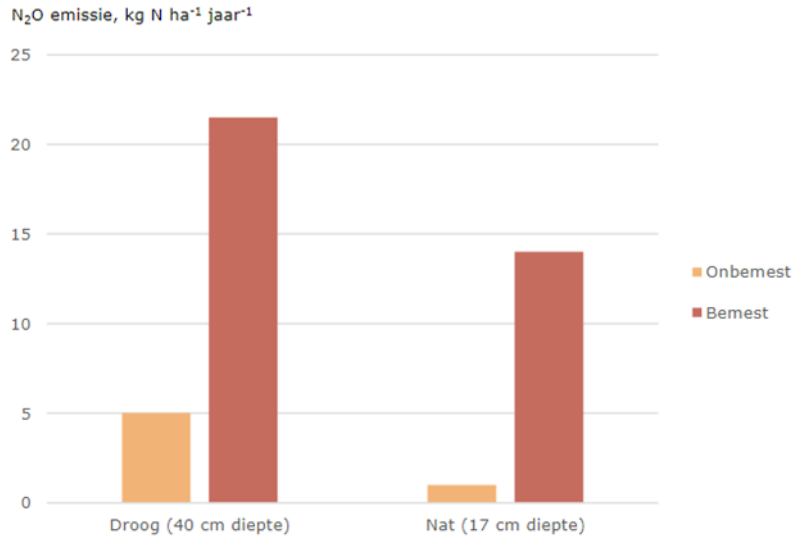
Kandel et al. (2019) vonden dat bemesting met 160 kg N/ha/jaar de lachgasemissies sterk doet stijgen in vergelijking tot de emissies uit veenmineralisatie ("achtergrondemissies") zonder bemesting. Het betrof in deze studie een paludicultuur-systeem met rietgras (*Phalaris arundinacea*) op een nutriënten-rijk (ook N-rijk, totale N is 3% in toplaag) veen in Denenmarken onder verschillende vernatte omstandigheden. Het veen had een vrij lage C/N-verhouding van 11-13, en was dus mogelijk een relatief goed beschikbare bron voor microbiële processen (Klemedtsson et al., 2005; in Kandel et al., 2019). Er werd bij alle behandelingen met dezelfde hoeveelheden en typen bemest: twee keer per jaar met 80 kg N/ha waarvan 2/3 NO_3–N en 1/3 NH_4–N (in totaal 160 kg N/ha). De grondwaterstanden waren gemiddeld jaarrond -9 cm (controle), -3 cm (semi-vernat), en -1 cm (vernat). Het grondwaterpeil bevond zich meestal rondom het maaiveld bij de vernatte (-1 cm) percelen, terwijl de semi-vernatte (-3 cm) en controlepercelen (-9 cm) seizoensgebonden afnames in de grondwaterstand vertoonden in perioden tussen maart en oktober, en zakten dan tot een diepte van respectievelijk -20 en -40 cm.

Emissiepieken van tussen de 1.9 en 5.0 mg N_2O/m2/uur (omgerekend 456 en 1200 g N_2O/ha/dag) in jaar 1 en tussen de 1.1 en 2.0 mg N_2O/m2/uur (omgerekend 264 en 480 g N_2O/ha/dag) in jaar 2 werden gevonden rondom de periode van bemesting; buiten de periode van bemesting waren de emissies erg laag, namelijk tussen de -0.09 en 0.09 mg N_2O/m2/uur (omgerekend -22 en 22 g N_2O/ha/dag). Hieruit was herleid dat de emissies uit veenmineralisatie ("achtergrondemissies") minimaal waren. Alleen in jaar 2 werd er een significant verschil gevonden tussen de controle- versus de hernatte en semi-hernatte percelen, waarbij de controle-percelen minder uitstoten dan de hernatte percelen. Mogelijk kan dit resultaat verklaard worden door een uitgesprokener effect van N-bemesting bij een hogere grondwaterstand, wat een zuurstofarmer milieu en daarmee een hogere denitrificatie snelheid opleverde (Karki et al., 2015; in Kandel et al., 2019). Wat in deze studie niet mee is

genomen is het effect van fluctuatie van de grondwaterstand op diffuse transportatie van lachgas.

Uit de studie van Kandel et al. (2019) zijn een aantal belangrijke zaken af te leiden, namelijk 1) dat de studie de hypothesen onderschrijft dat in vernatte veengronden N_2O fluxen vooral worden gedomineerd door stikstofbemesting, 2) het vernatten van veengronden waarbij bemesting sterk wordt geëxtensiveerd ten opzichte van veenweiden leidt tot lage achtergrond lachgasemissies, en 3) dat er potentieel geoptimaliseerd kan worden in natte teelten door bemesting in te zetten wanneer het gewas het zo optimaal mogelijk kan opnemen (bijv. voorjaarsbemesting), zodat planten zo effectief mogelijk kunnen concurreren voor beschikbare stikstof met microbieel leven. Ook suggereren Kandel et al. (2019) dat kan worden gekeken naar het mesttype, door bijvoorbeeld voor ammonium-N in plaats van nitraat-N te kiezen. Bemestingsproeven met lisdodde zijn daarom bijvoorbeeld met ureum uitgevoerd als stikstofbron (Bestman et al. 2022).

Van Beek et al. (2011) vonden ook een sterk effect van toegediende stikstof op de totale hoeveelheid emissies van lachgas, bij twee grondwaterstanden -40 cm (21±2 kg N/ ha/ jaar, omgerekend 95 g N_2O/ha/dag) en -17 cm (14±3 kg N/ ha/ jaar, omgerekend 60 g N_2O/ha/dag omgerekend) op een veenweide in Zegveld (Figuur 6). De toegediende hoeveelheid stikstof varieerde tussen de 321 (min) en 557 (max) kg N per hectare per jaar, en was afkomstig uit weidemest van melkvee. Bij een grondwaterstand van -40 cm en -17 waren respectievelijk slechts 22% en 10% van de emissies afkomstig uit veenmineralisatie ("achtergrondemissies") en de rest uit emissies van toegediende stikstof. De resultaten uit van Beek et al. (2011) lijken dus in overeenkomst te zijn met de verwachting dat bij vernatting de lachgasemissies uit veenmineralisatie zullen afnemen, maar *verhoudingsgewijs* de emissies uit toegediende stikstof zullen toenemen (hypotheses Velthof & van 't Hull).



Figuur 6. Lachgasemissies in kg N per hectare per jaar in onderzoek van Van Beek et al. (2011) (Slier & Velthof, 2021).

In natte teelten kan daarnaast ook spelen dat vernatting wordt gerealiseerd met de inlaat van relatief nitraatrijk water, bijvoorbeeld als het water afkomstig is van omliggende agrarische percelen. Dit zou er toe kunnen leiden dat lachgasemissies stijgen gedurende perioden waarin actief water vanuit de omliggende percelen naar de natte teelten wordt gepompt (Kandel et al. 2019).

4.2.3 Aanwezigheid en activiteit van het bodemleven

Nitrificerende en denitrificerende bacteriën zijn verantwoordelijk voor de processen van nitrificatie en denitrificatie. De aanwezigheid en activiteit van deze bacteriën wordt beïnvloedt door verschillende factoren, en is daarmee van invloed op lachgasvorming.

Regina et al. (1996) deden een studie naar Finse veenbodems met een gemiddelde grondwaterstand van -4 t/m -28 cm op ongestoorde locaties en gemiddelde grondwaterstanden van -13 t/m -73 cm op gedraineerde locaties. Zij vonden dat lachgas fluxen positief waren gecorreleerd met de hoeveelheid nitraatoxidators, het nitrificatie potentieel, N, P, Ca, K gehalte en pH van de bodem, naast een effect van grondwaterniveau. Hieruit kon worden afgeleid dat lachgasvorming in zure en/of meer nutriëntarme bodems doorgaans relatief lager is, dan in nutriëntrijkere bodems of bodems met een hogere pH.

Temperatuur is ook een belangrijke factor van invloed op het nitrificatie en denitrificatieproces. Over het algemeen geldt dat onder een hogere temperatuur de snelheid van deze processen toeneemt (Dhondt et al. 2004; Bloemerts en de Vries, 2009). Slier en Veldhof, 2021 beschreven: *de verhouding van de eindproducten van denitrificatie (N_2, NO_x, en N_2O) wordt echter ook beïnvloed door de temperatuur. Hoe lager de temperatuur, hoe meer lachgas er wordt gevormd in verhouding. Een toenemende temperatuur leidt zo 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 de totale hoeveelheid lachgasemissies is daardoor moeilijk te voorspellen.*

Voor natte teelten lijkt de temperatuur met name van belang in relatie tot de teelt en het teeltsysteem. Hogere temperaturen in zomer en najaar vallen ook samen met een hogere biomassaproductie. Wanneer delen van die biomassa op de bodem terecht komen, bijvoorbeeld door veroudering (zoals afstervend blad), kan makkelijk afbreekbaar organisch materiaal beschikbaar komen voor mineralisatie. Dit zou kunnen betekenen dat teeltsystemen welke bijvoorbeeld relatief veel sterfte van plantdelen kennen of relatief lagere N opnames kennen tijdens de warmere perioden van het jaar, tot een relatief grotere lachgasvorming zouden kunnen leiden. Dit kan zowel direct als indirect, door competitie voor stikstof tussen planten en micro-organismen, of door de aanvoer van organisch gebonden stikstof of de aanvoer van organische materiaal als voedingsbron voor microben om reeds aanwezige stikstof af te breken.

Reddy en Patrick (1975) onderzochten het effect van de periode waarin afwisselend omstandigheden waren met en zonder zuurstof, op de hoeveelheid stikstofverliezen in een

leemgrond gebruikt voor rijstteelt. Zij vergeleken frequenties van het 2 tot maximaal 64 dagelijks wisselen van aerobe en anearobe omstandigheden. Zij concludeerden dat in bodems waarin het redox-potentiaal laag genoeg is voor denitrificatie, het laten toenemen van de frequentie van wisselingen tussen aerobe en anearobe omstandigheden zal leiden tot grotere stikstofverliezen. In deze studie waren geen lachgasfluxen gemeten. Van deze studie kan wel afgeleid dat denitrificatie, en dus mogelijk ook lachgasvorming, al in de eerste dagen na het uitzakken van grondwaterpeil kan plaatsvinden.

4.2.4 Het gebruikte gewas

De aanwezigheid en het type gebruikt gewas in de natte teelt kan op verschillende wijzen invloed hebben op lachgasvorming, namelijk onder andere via:

1) De timing en hoeveelheid van N opname door het gewas;
2) De aanwezigheid van aerenchym in het gewas;
3) Onttrekking van vocht uit de bodem en beïnvloeden van vochtverdamping vanuit de bodem;
4) Effect van beworteling op structuur en poriëngroottes van de bodem;
5) Het type biomassa wat het gewas produceert (bladrijk, houtig of mos);
6) Het type gewas in relatie tot het teeltsysteem.

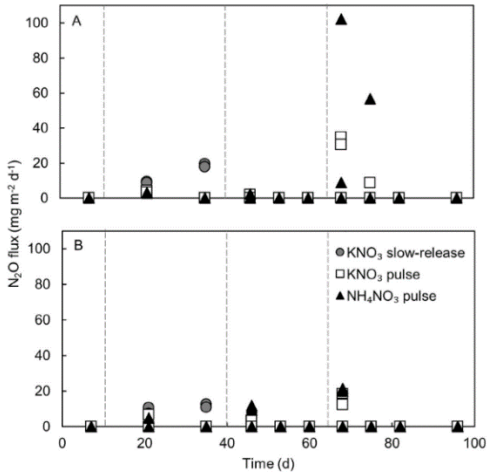
Het effect van beplanting op de stikstofopname en de emissies van lachgas

In het onderzoek van Kandel et al. (2019) wordt genoemd hoe de stikstofopname door een natte teelt de emissies van lachgas zou kunnen verminderen. Er zou door opname van stikstof door planten minder stikstof overblijven voor microben die via denitrificatie tot lachgas omgezet kan worden (competitie voor stikstof).

Het competitie effect voor stikstof door plantengroei om lachgasvorming te vermijden, speelt vooral in systemen die onvolledige denitrificatie kennen. Vroom et al. (2018) vonden dat grote Lisdodde (*Typha latifolia*) erg effectief is in het opnemen van stikstof uit (porie)water en bodem. Daarentegen werd bij niet-begroeide behandelingen ook veel verlies van stikstof gemeten (91-99%) wat toegeschreven wordt aan voornamelijk *complete* denitrificatie, wat waarschijnlijk te wijten is aan een grondwaterpeil dat continue boven de bodem bleef.

Bij teelten die lachgasvormingen hebben kan het van belang zijn groeiomstandigheden zo optimaal mogelijk te houden in perioden waarin risico's voor lachgasvorming het hoogst zijn (bijv. wanneer stikstofgehalten of –aanvoer in bodem en water toenemen en/of wanneer temperaturen hoog zijn), zodat de competitie van planten voor stikstof ten opzichte van micro-organismen groter is. Vroom et al. (2018) vonden in ieder geval dat voor de opname van NH_4 uit water grote lisdodden sneller waren dan bacteriën. Zij vonden bijvoorbeeld dat lachgasemissie toenames twéé keer voorkwamen na toediening van een nitraat-houdende meststof *zonder beplating* en slechts één keer *met beplanting*,

hoewel hier geen statistisch bewijs voor werd gevonden. Ook leek het erop dat de daling van lachgasemissies sneller plaatsvond *met* beplanting dan *zonder* beplanting (Figuur 7).



Figuur 7. Bescheiden toenames van emissies van lachgas na toediening van verschillende nitraathoudende meststoffen. Boven (A) is zonder beplanting, onder (B) is met beplanting van Grote lisdodde. De verticale strepen representeren toediening van de meststoffen (Vroom et al., 2018).

Het effect van beplanting met aerenchymen op de diffuse transportatie van lachgas

Het effect van plantenwortels met luchtholten (het *aerenchym)* op de emissies van lachgas uit veen is mogelijk aanwezig. Aerenchym zijn ruimten tussen plantencellen welke zuurstofuitwisseling tussen de atmosfeer en de wortels van de plant mogelijk maakt. Aerenchym komt voor bij moerasplanten als lisdodde, riet, egelskop en zeggen. Zo vond men in Duits onderzoek dat de lachgasemissies bij beplanting met riet (*Phragmites australis*) ongeveer twee keer zo hoog was als bij niet-geplante behandelingen. Er werd aangenomen dat dit veroorzaakt werd door een transport van lachgas via diffusie door het *aerenchym* van riet (en dat dit dus zo een "*bypass*" was van de verzadigde anaërobe laag in de bodem) (Ruckauf et al., 2004; in Tauchnitz et al., 2015). Ook Deens onderzoek vond dat rietgras (*Phalaris arundinacea*) een belangrijke rol speelt bij het vergemakkelijken diffuus transport van lachgas van de wortelzone naar de atmosfeer (Jørgensen et al., 2012; in Tauchnitz et al., 2015). Vroom et al. (2018) noemen verder hoe aanvoer van zuurstof naar de wortelzone veenmineralisatie zou kunnen versnellen, wat uiteindelijk weer tot meer lachgasvorming zou kunnen leiden.

Opmerkelijk is dat in de studie van Vroom et al. (2018) van grote lisdodde in mesocosms met een waterpeil boven het niveau van de bodem, de aanwezigheid van lisdodde geen significante invloed leek te hebben op de emissies van lachgas. Dit terwijl het aerenchym van lisdodde mogelijk een rol zou kunnen spelen in transportatie van lachgas naar de atmosfeer via diffusie. Mogelijk was het effect van het waterpeil zo groot dat denitrificatie nagenoeg volledig verliep, ondanks de aanwezigheid van lisdodde met aerenchym.

Onttrekking van vocht uit de bodem en beïnvloeding van verdamping vanaf de bodem door begroeiing

Gewassen onttrekken vocht uit de bodem als ze groeien. Zo is de gemiddelde geschatte gewasverdamping van lisdodde 4-12 mm/dag, vrij vergelijkbaar met gras. Daarnaast beïnvloedt de aanwezigheid van planten de vochtverdamping vanaf de bodem en/of het wateroppervlak (Borst en Geurts, in Bestman et al. 2022). Met name bij waterpeilen rond of onder maaiveld en tijdens perioden van droogte kan gewasgroei leiden tot het verder uitzakken van het (grond)waterpeil.

Effect van beworteling op structuur en poriëngroottes in de bodem

Beworteling en doorworteling van de bodem hebben een effect op de structuur en poriëngroottes in de bodem. Dit heeft weer een effect op de snelheid waarmee poriën worden gevuld met water of zuurstof, bijvoorbeeld tijdens fluctuerende peilen, en kan daarmee een effect hebben op de vorming van lachgas (Lu et al. 2020).

Type biomassa wat een gewas produceert

Verwacht mag worden dat meer grasachtige soorten zoals riet, rietgras, lisdodde of zeggen, ten opzichte van (veen)mossen of houtige gewassen zoals wilg, meer makkelijk afbreekbare biomassa kunnen opleveren die in het water of op een drassige bodem valt, wat tot meer lachgasemissies kan leiden. Slier & Velthof (2021) schreven: "*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 deze 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 die van 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 toegediende organische stof dient als energiebron voor denitrificerende micro-organismen.*" Hoewel Slier & Velthof (2021) het potentiële effect van gewasresten op lachgasemissies beschreven voor minerale gronden en niet specifiek voor een situatie met natte teelten op veengrond, mag worden verwacht dat ook bij natte teelten het stikstofgehalte en de C/N ratio van gewasresten een effect kunnen hebben op lachgasvorming.

Het type gewas in relatie tot het teeltsysteem

Bij verschillende (potentiële) natte teelten passen verschillende teeltsystemen. De opzet van een teeltsysteem heeft invloed heeft op het management van de bodem en het gewas. Bijvoorbeeld, als een gewas beperkt of niet zodevormend is zoals lisdodde, en er machinaal geoogst wordt, kan dit schade opleveren aan gewas en bodem (Bestman et al. 2022). Op basis van onder andere Tauchnitz et al. (2015) kan de *hypothese* worden gesteld dat betreding van een natte teelt met bijvoorbeeld machines zou kunnen leiden tot een

kortstondige piek van lachgasemissies, doordat trillingen en bodemcompactie de grondwaterstand en/of watervulling van poriën kan veranderen en convectief- of diffuus transport van lachgas kan vergroten. Voor zover wij weten is er geen onderzoek beschreven naar het effect van betreding of oogsten van een veengrond op lachgasemissies. Het NOBV weet uit haar metingen wel dat er verhoogde methaanemissies zijn bij de oogst, waarschijnlijk als gevolg van bovengenoemde mechanismes (Erik Janssen, persoonlijke communicatie, 2022). Mogelijk zou dit fenomeen voor lachgas hetzelfde kunnen zijn. In een teeltsysteem met rijpaden of dijken, waarin het gewas niet machinaal wordt bereden, kan het effect van bewerkingen op bodemverdichting en –trilling veel kleiner zijn. Een voorbeeld hiervan is de veenmosteelt in Duitsland[1]. Voor zover wij weten is er geen onderzoek gedaan naar het effect van trillingen vanaf rijpaden op methaan- of lachgasemissies uit natte teelten.

4.2.5 De hoeveelheid en het type van organische stof

Des te makkelijker organische stof is af te breken, des te makkelijker nitrificerende bacteriën er energie kunnen uithalen voor de omzetting van nitraat. In landbouwgronden komt gemakkelijk afbreekbare organische stof voor in gewasresten, mest, wortels van gewassen, grasland en veen (Slier & Velthof, 2021). Ook het type veen speelt een rol bij de mineralisatie van veen. Venen met een hoog organisch stof gehalte, en een lager C/N ratio kennen over het algemeen een grotere mineralisatiesnelheid (Williams, 1983). Ook kan de aanwezigheid van andere nutriënten het kleigehalte in de organische stof en de deeltjesgrootte van veen een rol spelen in de mineralisatie en nitrificatie (Williams, 1983; Regina et al. 1996; Van Agtmaal et al. 2020).

[1] https://www.moorwissen.de/torfmooskultivierung.html

5 Wat kunnen we leren uit de rijstteelt op het gebied van lachgasemissies?

In de rijstteelt is veel onderzoek gedaan naar maatregelen om methaan- en lachgasemissies te beperken. Kennis rondom de beperking van deze emissies is mogelijk toepasbaar bij het inschatten van effecten van maatregelen op lachgasemissies bij natte teelten op veengrond.

5.1 Rijstteelt: lachgas en methaan

Het merendeel van de rijst (ca. 88%) wordt geteeld bij waterstanden boven maaiveld (zogenoemde paddy's), op minerale gronden. De rijstteelt is op wereldschaal de belangrijkste methaanbron van de landbouw, en is vaak ook een bron van lachgas. Stikstofbemesting wordt veelvuldig toegepast, omdat stikstof vaak een limiterende factor is voor rijstproductie. Ook wordt het water uit de percelen vaak afgelaten na het groeiseizoen, en in sommige teeltsystemen ook tijdens het groeiseizoen, waardoor de gronden meermalig wisselen tussen aerobe en anaerobe omstandigheden (Ishii et al. 2011).

Ishii et al. (2011) en Hussain et al. (2015) schreven review-artikelen over de stikstofcyclus en het beperken van broeikasgasemissies in de rijstteelt. Hussain et al. (2015) beschreven dat management van bemesting en bodemvocht omstandigheden de belangrijkste factoren zijn voor lachgasemissies uit rijstteelt. Na een lange periode van onder water staan, hebben rijstvelden een bodemprofiel ontwikkeld waarin lagen ontstaan van oxidatie en reductie. Bemesting in de vorm van ammonium-stikstof wordt genitrificeerd (hiervoor is zuurstof nodig) in een dunne 'oxidatie laag' rond de bodem-water overgang, waarbij nitraat wordt gevormd. Het nitraat gaat vervolgens naar de diepere reductie laag waar het gedenitrificeerd (geen zuurstof voor nodig) wordt en lachgas wordt gevormd. Wanneer er vervolgens gedurende het groeiseizoen afwisselende droge en natte perioden voorkomen, kan het lachgas wat in de waterverzadigde lagen is geproduceerd door waterdamping (water verlaat de bodem, en in water opgelost lachgas komt vrij) naar boven komen en naar de atmosfeer emitteren. Ook noemen Hussain et al. (2015) dat stikstofgassen afkomstig uit microbiële processen kunnen worden geëmitteerd via plantenweefsel (rijst heeft aerenchym), met name wanneer velden onder water staan. Wanneer velden droogvallen, vindt de grootste lachgasemissie via de bodem plaats. Verder noemt men dat makkelijk beschikbare stikstof uit bemesting tot hogere lachgasniveaus leidt dan meer organisch gebonden stikstof. Ook noemt men dat de beschikbaarheid van koolstof en bodemvocht de productie van lachgas vergroten, mits er voldoende nitraat aanwezig is.

Ishii et al. (2011) beschreven dat rijstvelden een relatief kleinere bron zijn van lachgas dan 'droge' landbouwgronden. De reden hiervoor is de sterke denitrificatie activiteit in rijstvelden, en dat het gros van de stikstofverliezen in de vorm van stikstofgas (N_2) optreedt (volledige denitrificatie). Er zijn in rijstvelden vaak voldoende lachgas oxiderende micro-organismen aanwezig. In natuurlijke natte ecosystemen is daarnaast ook gevonden dat de

zuurstof die vrijkomt bij de oxidatie van lachgas, kan worden gebruikt voor het afbreken van methaan. Er kan dus een interactie zijn tussen de aanwezigheid van lachgas en de afbraak van methaan. In de rijstteelt is dit nog niet aangetoond.

Hussain et al. (2015) beschreven ook dat tijdens het onder water staan van rijstvelden, het redox potentiaal in de bodem sterk afneemt door opeenvolgende biochemische reacties. Het redox potentiaal wordt ook wel oxidatie potentiaal genoemd, en is een maat voor het kunnen verwerven van energie (elektronen) voor o.a. micro-organismen door het afbreken / oxideren van verbindingen. (Relatief makkelijk) afbreekbare organische stof is na onderlopen de belangrijkste energiebron voor methanogene micro-organismen. Koolstof welke niet door planten wordt vastgelegd, komt meestal vrij in de bodem en kan worden omgezet in methaan door de methanogenen.

5.2 Processen en maatregelen gerelateerd lachgas en methaan

Ishii et al. (2011) en Hussain et al. (2015) beschreven processen en maatregelen voor het verminderen van minerale verliezen (C, N) tijdens de rijstteelt. Hieronder zijn deze opgesomd:

- *Gebruiken van organische stikstofverbindingen voor bemesting*; Hierdoor is er minder nitraat beschikbaar voor denitrificatie, de belangrijkste bron van lachgas. Rijst neemt ammonium sneller op dan nitraat (net als bijvoorbeeld lisdodde). Ammonium kan vrijkomen uit organisch gebonden stikstof (mineralisatie). Wel is de mineralisatie beperkt in een waterverzadigde laag, omdat hier zuurstof voor nodig is. Maar deze beperkte zuurstofbeschikbaarheid remt ook weer nitrificatie.
- *Het dieper wegleggen van ammoniumbemesting*; Hierdoor komt het ammonium minder snel bij de dunne 'oxidatie laag' bovenin het rijstteelt systeem, en wordt de vorming van nitraat geremd, en daarmee ook de vorming van lachgas.
- *Het afstemmen van stikstofbemesting op de behoefte van de plant*; Hierdoor is er meer competitie tussen planten en micro-organismen voor stikstof. In levende planten vastgelegd stikstof is niet beschikbaar voor nitrificatie en denitrificatie.
- *Het gebruik van nitrificatie remmers en/of slow release meststoffen*; Bedoeld om de concentratie aanwezig nitraat in de teelt te remmen, waardoor de competitie tussen planten en micro-organismen voor stikstof groter is en er minder lachgas kan worden gevormd.
- *Sturen op organisch gebonden koolstof in de teeltlaag*; Dit kan door bijvoorbeeld plantresten niet te laten liggen na oogst. Beschikbaar organisch gebonden koolstof is een energiebron voor het denitrificatieproces. Anderzijds zijn hier tegengestelde resultaten mee behaald op het gebied van lachgas in de rijstteelt, waarschijnlijk omdat plantresten met een hoog C/N ratio ook kunnen zorgen voor stikstof immobilisatie in bepaalde situaties. Geïmmobiliseerde stikstof is niet beschikbaar voor nitrificatie en denitrificatie.
- *Aanpassingen in het irrigatiepatroon / water af laten lopen in het midden van het groeiseizoen*; dit wordt in de rijstteelt gedaan als er voldoende scheuten zijn, en wordt

met name gedaan om methaanvorming te voorkomen. Wel kan het op korte termijn extra methaanemissie opleveren doordat in de bodem aanwezig methaan vrijkomt door het afzakkende water. Ook verbetert het de adsorptie van stikstof in de bodem, door de aanwezigheid van zuurstof. De lengte en timing van deze periode is van grote invloed op de remming van methaanemissies. Voor natte teelten kan het dus betekenen dat sommige natte teelten kwetsbaar zijn voor verliezen van broeikasgassen, als het gaat om tijdelijke (ongestuurde) droogval, bijvoorbeeld door een watertekort.

- *Afwisselend nat en droge veldomstandigheden door water op en af een veld te laten lopen of afwisselend wel of niet te draineren*: Het verschil met water af laten lopen in het midden van het groeiseizoen is dat bij deze maatregel de tijd tussen peilwisselingen vaak kort is, waardoor er een beperktere wisseling is tussen anaerobe en aerobe omstandigheden in de bodem. Ook deze maatregel geeft een significante reductie van methaan in rijstteelt, maar effecten op lachgas zijn wisselend en sterk afhankelijk van het vochtgehalte in de bodem. Wanneer er geen zuurstof in de bodem dringt, wordt denitrificatie beperkt geremd, terwijl het afzakken van de waterkolom wel kan zorgen voor het vrijkomen van opgelost lachgas.
- *Veranderingen in grondbewerkingen*: Rijstteelt is een éénjarige teelt, wat betekent dat het elk jaar opnieuw gezaaid wordt, waar doorgaans bodembewerking bij wordt gedaan. Bodembewerking en –verstoring kunnen er voor zorgen dat bodemaggregaten verstoord worden en er meer bodemleven beschikbaar koolstof vrijkomt. Deze koolstof kan als energiebron gebruikt worden voor denitrificatie en leiden tot extra lachgas, mits er nitraat aanwezig is.
- *Genotype selectie*: In de rijstteelt is er ook ervaring opgedaan met verandering van het DNA, waardoor de plant minder suiker bij de wortels produceert en meer zetmeel bovengronds, en waardoor waarschijnlijk het minder interessant is voor methaanvormende bacteriën nabij de wortels van rijstplanten te leven. Dit zou ook een effect kunnen hebben op lachgasemissies (Williams, 2021). Ook zou mogelijk met selectie kunnen gestuurd op genotypes met een hogere stikstof opname of een verschillend stikstof opname patroon.

5.3 Mogelijke doorvertaling kennis rijstteelt voor lisdoddeteelt op veen

Lisdoddeteelt wordt tot nu in Nederland voornamelijk gedaan met waterpeilen permanent boven maaiveld, in het groeiseizoen of jaarrond. De reden hiervoor is dat lisdodde onder deze omstandigheden goed gedijt (productie) (zie o.a. Bestman et al. 2021) en lisdodde van nature in ondergelopen bodems groeit. Het laten afzakken van het waterpeil in delen van het jaar is bij lisdoddeteelt, net als bij rijstteelt, een mogelijke maatregel om methaanemissies te beperken. Kijkend naar literatuur over teeltsystemen en lachgas- en methaanemissies van rijstvelden, dan zouden de volgende hypothesen en aanbevelingen kunnen worden gesteld voor lisdoddeteelt:

- Bemesting en bodemvocht zijn in rijst de belangrijkste factoren voor het ontstaan van lachgasemissies. Dit komt overeen met het beeld voor lachgasemissies uit veengronden, en zou daarom ook van toepassing kunnen zijn voor lisdoddeteelt. Omdat natte teelten waarschijnlijk vaker in een nutriëntenarmer milieus zullen worden geteeld dan rijst (bij rijst wordt relatief veel gemakkelijk denitrificeerbare stikstof uit bemesting aangevoerd om een hoge opbrengst te behalen, terwijl het concept achter natte teelten ook het verbeteren van het leveren van ecosysteemdiensten zoals waterkwaliteit en klimaatmitigatie omvat), kan in natte teelten mogelijk de factor beschikbaar koolstof (wat als energiebron wordt gebruikt door micro-organismen tijdens denitirificatie) relatief belangrijker zijn in natte teelten dan in rijstteelt. Wanneer ook bij natte teelten maximaal ingezet wordt op een hoge opbrengst, en er daarom stikstofbemesting toegediend wordt, kan de factor beschikbaar stikstof ook in natte teelten belangrijk zijn. Stikstofgehalten in bodem en water, en de hoeveelheid makkelijk afbreekbaar koolstof, in combinatie met het toegepaste watermanagement, zouden daarom een indicatie kunnen geven voor de mate van lachgasvorming in natte teelten;
- Wanneer voor (stikstof)bemesting wordt gekozen;
    - Het bemesten met organisch gebonden stikstof of (slow-release) ammonium in plaats van nitraat;
    - De stikstofgift afstemmen qua hoeveelheid en timing op de stikstofopname, en bemesten in meerdere kleinere giften in plaats van een grotere gift;
    - Eventueel stikstofmeststoffen wat dieper in de bodem brengen, om nitrificatie te beperken in een mogelijke 'oxidatie-laag' bovenin de teeltlaag. De vorming van een 'oxidatie-laag' en 'reductie-laag' zou mogelijk ook kunnen spelen in natte teelten met een waterlaag boven maaiveld, zoals lisdodde. Hier zou nader onderzoek naar kunnen gedaan.
- Bij droogval (om methaanemissie te beperken),
    - het veld zover laten droogvallen dat er zuurstofintreding in de bodem kan zijn waardoor gedeeltelijke denitrificatie (waarbij lachgas kan gevormd) wordt beperkt. Kanttekening hierbij is dat er mogelijk wel CO_2 gevormd kan worden uit aerobe afbraak van organische stof.
    - toe te passen na belangrijkste periode van stikstofopname door planten (ca. vanaf/na de bloeiperiode), omdat vanaf dat moment de competitie tussen stikstof voor plantopname en denitrificatie door microben afneemt, en lisdodde bij (te extreme) droogval waarschijnlijk minder stikstof zal opnemen als gevolg van geremde plantgroei.

  Opmerking: Onbedoelde droogval door watertekort kan dus een probleem zijn, omdat dan niet op het ideale peil in de ideale periode voor minimale broeikasgasemissies kan worden gestuurd.

- Onderzoek te doen naar het effect van het afsterven van blad en plantdelen welke in het water en op de bodem vallen, omdat het een bron van makkelijk afbreekbaar koolstof is en zo een energiebron kan zijn voor denitrificatie. Maar anderzijds zou het ook kunnen zorgen voor binding van stikstof in microbiële biomassa (immobilisatie). In de periode tussen herfst en vroeg voorjaar sterft het bovengrondse deel van de lisdodde af, wat deze periode geschikt maakt voor de oogst als bouwmateriaal toepassing. Tegelijk valt er in deze periode ook biomassa op de bodem door de afsterving. Mogelijk kan het sturen op een laag waterpeil in het najaar samen gaan met het beperken van lachgasverliezen, afkomstig van of gestimuleerd door beschikbaar koolstof uit plantenresten, zodat denitrificatie in die periode geremd wordt.
- Bij oogst mogelijke effecten op bodemberoering door insporing en/of draaien van machines op de bodem te beperken, omdat dit ook tot extra beschikbaar koolstof voor micro-organismen kan leiden.
- Te kijken of er verschil is tussen stikstofopname hoeveelheid en timing tussen kleine en grote lisdodde, of genetische varianten binnen kleine en grote lisdodde, omdat dit verband kan houden met de hoeveelheid beschikbaar stikstof voor nitrificatie en denitrificatie op verschillende tijdstippen in het groeiseizoen op verschillende tijdstippen in het groeiseizoen.
- Eventuele wisselingen in peilen niet te abrupt te laten verlopen, zodat grote emissiepieken van in water opgelost lachgas (en evt. methaan) worden vermeden.

7 Verwachte emissies van lachgas bij vier grondwaterstanden voor natte teelten op veen

Teeltomstandigheden van natte teelten kunnen zeer uiteenlopend zijn, wat het complex maakt om een algemeen beeld te schetsen van mogelijke lachgasemissies uit natte teelten. Daarom is in dit hoofdstuk voor vier waterpeilscenario's beschreven hoe verwacht wordt dat belangrijke factoren die lachgasemissies beïnvloeden zich verhouden.

De vier scenario's zijn:

1) "Boven"; een constant waterpeil van enkele decimeters boven maaiveld, bijv. 20-30 cm.
2) "Rond"; een constant waterpeil rond maaiveld.
3) "Onder"; een constant waterpeil tot enkele decimeters onder maaiveld, bijv. 20-30 cm onder maaiveld.
4) "Fluctuerend"; een fluctuerend waterpeil van enkele decimeters boven en onder maaiveld, bijv. 20-30 cm boven en onder maaiveld.

De resultaten van de verwachtingen rondom lachgasemissies zijn samengevat in Tabel 1. "Boven" en "Rond" zijn hierin samengenomen, omdat er voor deze scenario vergelijkbare verwachtingen zijn omtrent factoren die lachgasemissievorming kunnen beïnvloeden. Bij het peilscenario "Rond" is namelijk de kans groot dat door onbedoelde peilfluctuatie het waterpeil periodiek tot onder het maaiveld uitzakt (tenzij er bijvoorbeeld een actief waterinfiltratiesysteem aanwezig is), waardoor het qua lachgas-dynamiek meer op scenario "Rond" gaat lijken. Een verdere toelichting per scenario is onder de tabel uitgeschreven.

Tabel 1. Verwachte typische lachgasemissies bij verschillende peilscenario's in natte teelten, en rol van belangrijke factoren op die emissie.

	Scenario			
	"Boven"	"Rond"	"Onder"	"Fluctuerend"
Verwachte typische lachgasemissie	Doorgaans laag		Significant, vnl. afh. van N beschikbaarheid uit mineralisatie en/of andere aanvoer, en piekend kort na neerslag en/of N aanvoer	Significant, vnl. afh. van N beschikbaarheid uit mineralisatie en andere aanvoer, en frequentie en mate van uitzakken waterpeil *onder* maaiveld, en piekend kort na uitzakken peil, neerslag en/of N aanvoer
Rol van factoren				
"Achtergrond" / veenmineralisatie	Nihil		Van belang, vnl. afh. van mate N mineralisatie en grondwaterstand	Van belang, vnl. afh. van mate N mineralisatie, hoe diep water onder maaiveld uitzakt en periode van uitzakken grondwaterstand
Stikstof aanvoer / bemesting	Nihil, m.u.v. mogelijke		Van belang, vnl. afh. van mate van N aanvoer,	Van belang, vnl. afh. van mate van N aanvoer, moment van aanvoer,

	emissiepieken na bemesting	moment van aanvoer, type N en bij aanvoer van organisch gebonden N ook mineralisatiesnelheid	type N en bij organisch gebonden N ook mineralisatiesnelheid i.c.m. de timing van het uitzakken van het waterpeil onder maaiveld
Planten met aerenchym	Mogelijk van belang		
Betreding / beroering bodem	Van belang		

"Boven" en "Rond"

Omdat er bij deze waterregimes zuurstofloze/arme omstandigheden in de bodem mogen worden verwacht, worden er nagenoeg geen emissies van lachgas verwacht. Het proces van denitrificatie kan volledig verlopen en er zal dus vooral stikstofgas gevormd worden. De verwachting is dat dit zo zal zijn ongeacht de hoeveelheid denitrificeerbare stikstof, welke normaliter in veenbodems voorkomt. Zelfs wanneer het veen van nature nutriëntenrijk is en/of er in het verleden veel bemesting is geweest zal, op enkele uitzonderingen na, stikstof ofwel door complete denitrificatie worden omgezet in stikstofgas, ofwel opgenomen worden door het gewas. Volledig vernatte systemen zijn na (relatief kort) tijd doorgaans nitraatarm, vanwege het uitblijven van mineralisatie waarvoor zuurstof nodig is en door denitrificatie van nitraat onder zuurstofloze omstandigheden.

Uitzonderingen op de verwachte lage lachgasemissies zijn o.a. situaties met stikstofbemesting waarna mogelijk kortstondige emissiepieken voorkomen. Deze emissiepieken zijn mogelijk (deels) te ondervangen door bemesting af te stemmen op de plantopname, en frequenter in kleinere hoeveelheden te bemesten, al is over bemestingsfrequentie in relatie tot giftgrootte en lachgasemissies geen literatuur gevonden. Een andere uitzondering hierop zou de periode direct na eerste vernatting kunnen zijn van een voedselrijke veenbodem, zoals een veenweide met een voedselrijke teeltlaag opgebouwd met historische bemesting. Echter, voor deze specifieke situatie zijn geen studies gevonden die emissies van lachgas hebben gerapporteerd.

Er is tegenstrijdige informatie rondom planten met *aeranchym* in de literatuur (zoals lisdodde of riet in dit scenario welke gedijen bij een waterpeil boven or rond maaiveld), voor dit scenario. Mogelijk is er bij deze soorten kans op lachgasemissies, omdat er via het *aeranchym* een weg gecreëerd wordt vanuit de rhizosfeer (wortelzone) naar de atmosfeer waarlangs lachgas via diffusie uit de bodem kan ontsnappen, omdat zuurstof de wortelzone kan bereiken. Echter, in een deel van de studies met planten met aerenchym was dit effect op lachgas wel gevonden, en in andere studies niet.

Bij een waterpeil boven of rond maaiveld zou betreding en of beroering van de bodem, bijvoorbeeld door een oogstmachine, wel voor een emissiepiek afkomstig uit water opgelost lachgas kunnen zorgen, als gevolg van voornamelijk fysieke effecten op het water op en in de bodem. Echter, ook voor deze specifieke situatie zijn geen studies gevonden die lachgasemissies hebben gerapporteerd.

"Onder"

Bij een waterpeil onder maaiveld kan er theoretisch sprake zijn van een constant waterpeil. Het lijkt echter voor de hand liggend dat een constant waterpeil in de praktijk niet haalbaar is, als gevolg van neerslag, onttrekking van water door gewassen, (gewas)verdamping en grondwaterdynamiek. Een voorbeeld hiervan is de grondwaterpeildynamiek van veenweiden met pompgestuurde waterinfiltratiesystemen (WIS). Ook bij WIS waar actief op een grondwaterpeil van enkele decimeters onder maaiveld wordt gestuurd, blijkt het grondwaterpeil alsnog te fluctueren gedurende het groeiseizoen (Living Lab Boeren op Hoog Water, 2022). Het is dan ook aan te nemen dat in de praktijk een constant waterpeil onder maaiveld, een waterpeil betekent wat onder maaiveld fluctueert afhankelijk van neerslag, onttrekking door het gewas, verdamping en grondwaterdynamiek. In het opzicht van peilfluctuaties onder maaiveld lijkt dit scenario dan ook op het scenario "Fluctuerend".

"Fluctuerend"

Bij fluctuerende peilen wordt het grootste risico op lachgasvorming verwacht wanneer het peil onder maaiveld is. In die situatie kan zuurstof indringen in de bodem, en kan er onvolledige (de)nitrificatie optreden. Wanneer het peil boven maaiveld komt, en boven maaiveld eventueel fluctueert, worden er kleinere effecten verwacht op lachgasemissies, omdat het water zorgt voor zuurstofloosheid in de bodem en denitrificatie volledig kan plaatsvinden. Wel kunnende wisselende peilen ook hier zorgen voor het vrijkomen van in het water opgelost lachgas.

Zodra waterpeilen onder maaiveld zakken, kan er lachgas vrijkomen welke in het grondwater was opgelost en kan mineralisatie op gang komen wat weer een nieuwe bron van denitrificeerbare stikstof oplevert. De mate en de periode van het uitzakken van het waterpeil zijn daarom van belang voor de grootte van de lachgasemissies, naast ook de snelheid van het wisselen tussen aerobe en anaerobe omstandigheden in de bodem, wat ook denitrifcatie kan bevorderen. Het wisselen tussen microbiële omzettingen onder aerobe en anaerobe omstandigheden lijkt op kort tijdsschaal plaats te kunnen vinden (dagen).

In de scenario's "Onder" en "Fluctuerend" spelen ook de effecten van planten met aerenchym, en de mogelijke effecten van betreding en beroering van de bodem. Bijkomend is, ten opzichte van de scenario's "Onder" en "Fluctuerend", dat juist wanneer het waterpeil onder maaiveld zakt, het effect van betreding op lachgasvorming mogelijk groter wordt, omdat er niet alleen via trilling opgelost lachgas uit de bodem kan vrijkomen, maar ook omdat de bodem verdicht kan worden waardoor er minder vocht in de verdichte laag past. Het is overigens niet duidelijk of betreding van de bodem altijd een negatief effect heeft op lachgasemissies. Het zou in bepaalde situaties bijvoorbeeld ook tot een toename van anaerobie en daarmee volledige denitrificatie kunnen zorgen, als er nitraat is.

8 Conclusies

De vraagstelling van deze literatuurstudie was:

1. of er een risico is op de vorming van lachgasemissies bij natte teelten;

   En *als* er significante lachgasemissies op kunnen treden:

2. welke factoren daarin de belangrijkste rol spelen en hoe zich dat verhoudt tot verschillende omstandigheden (o.a. peil boven maaiveld, kortere versus langere droogval);
3. een orde van grootte van de lachgasemissies uit literatuur af te leiden.

Ad 1.

Op basis van de besproken literatuur, kan worden geconcludeerd dat er lachgasemissies in natte teelten op veen kunnen plaatsvinden, en dat de omvang van die emissie onderworpen is aan vele variabelen.

Ad 2.

Lachgasemissies kunnen zeer snel na wisseling van omstandigheden plaatsvinden. De belangrijkste factoren die de lachgasemissie lijken te beïnvloeden zijn de hoeveelheid beschikbaar stikstof en het (grond)waterpeil. Wanneer er weinig stikstof aanwezig is, dan zal het grondwaterpeil ook nauwelijks effect hebben op de uitstoot van lachgas. Daarentegen, als er wel significante hoeveelheden stikstof aanwezig zijn, dan zijn het grondwaterpeil en de fluctuatie hiervan belangrijke invloed factoren die effect kunnen hebben op lachgasvorming. Van groot belang is dan de hoeveelheid stikstof, het type aanwezige stikstof (organisch gebonden N, NH_4^+-N of NO_3^--N en NO_2-N), de mate van droogval (zuurstof indringing in de bodem) en de lengte van droogval. Daarnaast spelen andere factoren een rol welke de activiteit van het bodemleven beïnvloedden zoals C/N ratio, aanwezigheid van andere mineralen, pH en temperatuur van de bodem en/of het sediment op de bodem. Bij de aanname dat natte teelten waarschijnlijk vaker in relatief meer voedingsarme milieus plaatsvinden (uitgaande van een teeltsysteem dat stuurt op een integrale doelenset, en niet alleen op een zo'n hoog mogelijke productie waarin wordt bemest) ten opzichte van bijvoorbeeld veenweiden of rijstteelt, is de factor beschikbaar koolstof voor micro-organismen mogelijk relatief belangrijker in natte teelten. Wordt er wel bemest in natte teelten, dan wordt de factor beschikbaar stikstof van groter of groot belang.

In matig gedraineerde agro-ecosystemen op veen (drainage tot enkele decimeters, wat mogelijk ook bij natte teelten kan voorkomen) zijn piek fluxen van lachgas vaak zijn gelinkt aan het gecombineerde effect van stikstofbemesting gevolgd door intensieve regenval. Dit gecombineerde effect zal minder groot zal zijn onder (bijna volledig) vernatte omstandigheden, omdat in vernatte omstandigheden de nitrificatiesnelheid lager ligt (hiervoor is zuurstof nodig) waardoor ook de denitrificatieactiviteit lager is. Wanneer

bemesting wordt toegepast in natte teelten op veengrond, dan spelen hier de factoren hoeveelheid, timing, bemestingssoort en plaats een rol op mogelijke lachgasvorming.

Ad 3.

Uit literatuur is af te leiden dat lachgasemissies bij waterpeilen boven en rond maaiveld vaak laag zullen zijn, met name als waterpeilen constant zijn (ordegrootte tot enkele grammen N_2O/ha/dag). Bij deze situaties kan nitraat vaak volledig worden gedenitrificeerd tot stikstofgas, en gaat lachgas niet of beperkt verloren aan het water/waterbodemoppervlak. Uitzonderingen hierop kunnen bemestingsmomenten zijn waarop relatief hoge concentraties stikstof in een systeem kunnen komen, bodembetreding bij bijvoorbeeld machinale biomassa oogst, sterke waterpeildalingen en mogelijk de aanwezigheid van plantensoorten met aerenchym.

Verder is uit de literatuur af te leiden dat een waterpeil onder maaiveld en fluctuerend waterpeil naar verwachting kunnen leiden tot hogere lachgasemissies, mits er afbreekbare vormen van stikstof aanwezig zijn. Bij een constant waterpeil onder maaiveld zullen effecten van verlies van opgelost lachgas in het water minder spelen en zal lachgas in veel gevallen waarschijnlijk vaker worden afgebroken tot stikstofgas, dan bij fluctuerend waterpeil. Echter, in de praktijk zal een constant waterpeil onder maaiveld heel moeilijk te handhaven zijn, als gevolg van neerslag, wateronttrekking door gewasgroei en verdamping vanaf gewas, water en/of bodem. Ordegroottes van gerapporteerde lachgasemissies van de in deze literatuurstudie gebruikte literatuur, varieerden tussen ruim 10 tot 251 g N_2O/ha/dag bij constante grondwaterpeilen onder maaiveld en fluctuerende peilen rond en onder maaiveld bij natuurlijke veengronden tot 1200 g N_2O/ha/dag bij een bemeste rietgrasteelt op veengrond. Op jaarschaal kunnen emissies variëren tussen minder dan een kilo tot meer dan tien kilo/ha/jaar. Op basis van metingen bij grasland lijken hogere uitschieters van tientallen kilo's/ha/jaar mogelijk te zijn, mits er voldoende substraat (stikstof) omzetbaar is en bij fluctuerende grondwaterpeilen. Hierbij moet worden opgemerkt dat lachgasemissies zeer variabel zijn in de tijd en tussen jaren, en het emissiepatroon vaak sterke pieken kent, met name als er wordt bemest, en dat niet in alle studies gedurende het gehele jaar is gemeten.

Literatuur

Baggs, L. en L. Philippot. (2011). Nitrous oxide production in the terrestrial environment. Nitrogen cycling in bacteria: Molecular analysis (edited by: James W. B. Moir). Caister academic press, U.K.

Bestman, M. J. Pijlman, Y. Egas, O. van Hal, A. Koornneef, F. Lenssinck en N. van Eekeren. 2022. Eindrapportage Veen Voer en Verder II. Louis Bolk Instituut, rapport 2022-029.

Bloemerts en de Vries, 2009. Relationships between nitrous oxide emissions from natural ecosystems and environmental factors. Wageningen, Alterra rapport 1853.

Dhondt, K., Boeckx, P., Hofman, G. & Van Cleemput, O. (2004). Temporal and spatial patterns of denitrification enzyme activity and nitrous oxide fluxes in three adjacent vegetated riparian buffer zones. Biology and Fertility of Soils, 40, 243–251.

Ishii, S., Ikeda, S., Minamisawa, K. & Senoo, K. (2011). Nitrogen Cycling in Rice Paddy Environments: Past Achievements and Future Challenges. Microbes and Environments, 26, 282–292.

Hussain, S., Peng, S., Fahad, S., Khaliq, A., Huang, J., Cui, K. & Nie, L. (2015). Rice management interventions to mitigate greenhouse gas emissions: a review | SpringerLink. , 22, 3342–3360.

Kandel, T.P, . S. Karki, L. Elsgaard, P. E. Lærke. (2019). Fertilizer-induced fluxes dominate annual N2O emissions from a nitrogen-rich temperate fen rewetted for paludiculture. Nutr cycl agroecosyst, https://doi.org/10.1007/s10705-019-10012-5.

Lu, J., Zhang, Q., Werner, A. D., Li, Y., Jiang, S., & Tan, Z. (2020). Root-induced changes of soil hydraulic properties – A review. Journal of Hydrology, 125203.

Reddy, K. R., & Patrick, W. H. (1975). Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential, organic matter decomposition and nitrogen loss in a flooded soil. Soil Biology and Biochemistry, 7(2), 87–94.

Regina, K., Nykänen, H., Silvola, J. & Martikainen, P.J. (1996). Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity. Biogeochemistry, 35, 401–418.

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

Tauchnitz, N., O. Spott, R. Russow, S. Bernsdorf, B. Glaser en R. Meissner. (2015). Release of nitrous oxide and dinitrogen from a transition bog under drained and rewetted conditions due to denitrification: results from a [15N]nitrate–bromide double-tracer study, Isotopes in Environmental and Health Studies, DOI: 10.1080/10256016.2015.1011634.

Van Agtmaal, M., J.G.C. Deru, J. Pijlman, R. van Uffelen, F. Lenssinck. (2020). Kleibagger als bodemverbeteraar: Veenverrijking met klei voor vermindering bodemdaling en CO2 emissie in de veenweiden. Bodem, 2 april.

Van Beek. C.L., M. Pleijter en P.J. Kuikman. (2011). Nitrous oxide emissions from fertilized and unfertilized grasslands on peat soil. Nutr Cycl Agroecosyst 89:453–461.

Velthof, G. en J. van 't Hull. (2022). Lachgasemissie uit veengronden. Presentatie, 31 pp.

Williams, B. L. (1983). The nitrogen content of particle size fractions separated from peat and its rate of mineralization during incubation. Journal of Soil Science, 34(1), 113–125.