



Nitrificatieremmers in de Nederlandse landbouw

Potentiële vermindering van lachgasemissie

Alterra-rapport 2016
ISSN 1566-7197

Peter Kuikman, René Schils, Christy van Beek en Gerard Velthof

Nitrificatieremmers in de Nederlandse landbouw

In opdracht van SenterNovem, in het kader van Reductieprogramma Overige Broeikasgassen (ROBP080027)/

Nitrificatieremmers in de Nederlandse landbouw

Potentiële vermindering van lachgasemissie

Peter Kuikman, René Schils, Christy van Beek en Gerard Velthof

Alterra-rapport 2016

Alterra Wageningen UR
Wageningen, 2010

Referaat

Kuikman, P., R. Schils, Ch. van Beek en G. Velthof, 2010. *Nitrificatieremmers in de Nederlandse landbouw, potentiële vermindering van lachgasemissie*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2016. 33 blz.; 1 fig.; 6 tab.; 41. ref.

Nitrificatieremmers kunnen de emissie van lachgas tot 70% verlagen. In Nederland zou het gebruik van nitrificatieremmers de jaarlijkse lachgasemissie kunnen reduceren met circa 0.6 Mton CO₂-equivalenten (12%). De grootste reducties zijn haalbaar bij de toediening van kunstmest en dierlijke mest. In Nederland zijn recent vooral ervaringen opgedaan met de producten Entec en Piadin. De meerkosten bedragen globaal €20,- per ha. Gemiddeld worden deze kosten niet terugverdiend met een hogere opbrengst. Voor de inzet van nitrificatieremmers zijn twee verschillende strategieën denkbaar, namelijk een zogenaamde 'no regret' strategie waarin bijvoorbeeld bij iedere toediening van kunstmest en dierlijke mest een nitrificatieremmer wordt toegediend, of een 'target' strategie waarbij de toediening alleen plaatsvindt onder emissiegevoelige omstandigheden. Voor de Nederlandse omstandigheden ontbreken op het moment resultaten van veldexperimenten waarmee die omstandigheden te identificeren zijn die in een maximale werking van de nitrificatieremmer resulteren.

Trefwoorden: Nitrificatieremmer, lachgas, landbouw, kosten, broeikasgassen

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.boomblad.nl/rapportenservice.

© 2009 Alterra Wageningen UR, Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland
Telefoon 0317 48 07 00; fax 0317 41 90 00; e-mail info.alterra@wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra Wageningen UR.

Alterra B.V. aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2016

Wageningen, maart 2010

Inhoud

Samenvatting	7
Summary	9
1 Inleiding	11
1.1 Achtergrond	11
1.2 Doel en vraagstelling	11
2 Literatuuroverzicht	13
2.1 Werkingsprincipe	13
2.2 Effect van nitrificatieremmers op lachgasemissie	13
3 Neveneffecten	17
3.1 Landbouwkundige effecten	17
3.2 Risico's	17
4 Potentiële emissiereductie	19
4.1 Werkwijze	19
4.2 Emissiereductie lachgas in Nederland	20
4.3 Emissiereductie via nitrificatieremmers per bron	22
4.3.1 Kunstmest	22
4.3.2 Dierlijke mest	22
4.3.3 Vlinderbloemigen	24
4.3.4 Scheuren van grasland	25
4.3.5 Histosolen	25
4.3.6 Gewasresten	26
4.3.7 Overige mogelijkheden	26
5 Potentiële toepassing	27
5.1 Kosten en baten	27
5.1.1 Entec	27
5.1.2 Piadin	28
5.2 Aanbevelingen	28
Literatuur	31

Samenvatting

De Nederlandse landbouw draagt via de emissie van lachgas (N_2O) bij aan de uitstoot van broeikasgassen. Eén van de mogelijkheden om de emissie van lachgas te reduceren is de inzet van nitrificatieremmers. Deze stoffen remmen de omzetting van ammonium naar nitraat, en voorkomen daarmee de emissie van lachgas. Momenteel zijn er drie groepen nitrificatieremmers die landbouwkundig van praktische betekenis zijn: pyridines (nitrapyrin), dicyaandiamide (DCD) en pyrazolen (DMPP). In deze studie is vooral het effect beoordeeld van nitrificatieremmers op de lachgasemissie, maar ook op agronomische en milieukundige neveneffecten. Buitenlandse studies, met name uit Nieuw Zeeland, laten zien dat nitrificatieremmers de emissie van lachgas zo'n 50 tot 70% kunnen verlagen. In Nieuw Zeeland is het gebruik van nitrificatieremmers inmiddels opgenomen in de nationale emissieregistratie. Bij gebruik van dicyaandiamide (DCD) is emissiefactor voor urine-stikstof 67% lager, en de emissiefactor voor nitraatuitspoeling 53% lager. In 2007 is DCD toegepast op 3.5% van de oppervlakte op melkveebedrijven.

Nitrificatieremmers kunnen de gewasopbrengst verhogen. Vooral op grasland zijn in sommige jaren opbrengstverhoging in de orde van 20% gevonden, maar daar staan ook jaren tegenover waarin geen opbrengsteffect is gevonden. Op bouwland worden nagenoeg geen positieve agronomische effecten gevonden. In Nederland zijn recent vooral ervaringen opgedaan met de producten Entec (ammonium-sulfaatsalpeter kunstmest met DMPP) en Piadin (los toe te voegen nitrificatieremmer). De meerkosten bedragen globaal € 20,- per ha. Gemiddeld worden deze kosten niet terugverdiend met een hogere opbrengst.

Het gebruik van nitrificatieremmers brengt een aantal potentiële risico's mee voor mens, dier en milieu. De toegelaten nitrificatieremmers zijn beoordeeld op (eco)toxicologische gevaren. Uit de beschikbare gegevens blijkt dat bij het beoogde gebruik geen nadelige neveneffecten zijn te verwachten.

Op grond van een aantal aannamen over theoretisch maximale emissiereductie, potentiële reductie en praktijktoepassing is voor Nederland een jaarlijkse emissiereductie berekend van 0.592 Mton CO_2 -equivalenten bij het gebruik van nitrificatieremmers. Dat is ongeveer 12% van de huidige emissie door gebruik van stikstof in landbouw. De grootste reducties zijn haalbaar bij de toediening van kunstmest en dierlijke mest. Een kleinere bijdrage kan worden verwacht uit andere bronnen van stikstof en lachgas zoals klaver in grasland, graslandscheuren, mineralisatie van stikstof uit histosolen/veengronden en gewasresten. Aanvullend kan een bijdrage worden verwacht uit vermindering van de indirecte emissie van lachgas uit grond- en oppervlaktewater na uitspoeling van nitraat omdat de uitspoeling door toepassing van nitrificatieremmers zal verminderen.

Voor de inzet van nitrificatieremmers zijn twee verschillende strategieën denkbaar, namelijk een zogenaamde 'no regret' strategie waarin bijvoorbeeld bij iedere toediening van kunstmest en dierlijke mest een nitrificatieremmer wordt toegediend, of een 'target' strategie waarbij de toediening alleen plaatsvindt onder emissiegevoelige omstandigheden. De eerste strategie garandeert een maximale emissiereductie tegen relatief hoge kosten, die dan als een soort verzekeringspremie moeten worden beschouwd. De tweede strategie is kosteneffectiever, maar kan uiteindelijk tot een lagere emissiereductie leiden. Voor de Nederlandse omstandigheden ontbreken op het moment resultaten van veldexperimenten waarmee de omstandigheden te identificeren zijn die in een maximale werking van de nitrificatieremmer resulteren. Bij een eventuele grootschalige inzet van nitrificatieremmers is het zinvol om een lange termijn monitoring op te zetten om eventuele nadelige neveneffecten op bodem en milieu waar te kunnen nemen. Momenteel spelen vergelijkbare vragen over het effect op de lachgasemissie en kosteneffectiviteit ook in de ons omringende landen. Wellicht kan een gezamenlijke internationale aanpak van de vragen voordelen bieden, bijvoorbeeld door waarnemingen in meerdere landen tegelijk en onder vergelijkbare omstandigheden en protocollen uit te voeren.

Summary

The Dutch agricultural sector contributes to global warming through the emission of nitrous oxide (N₂O). An option to reduce the emission of nitrous oxide are the nitrification inhibitors. These compounds inhibit the conversion of ammonium to nitrate, and thus avoid the emission of nitrous oxide. Currently there are three groups of nitrification inhibitors that are of agronomical significance: pyridines (nitrpyrin), dicyandiamide (DCD) and pyrazoles (DMPP). This study mainly evaluates the impact of nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions, but also looks at agronomic and environmental side-effects.

Studies abroad, particularly from New Zealand, show that nitrification inhibitors reduce nitrous oxide emissions around 50 to 70%. In New Zealand the use of nitrification inhibitor is now included in the national emission inventory. When DCD is used, the emission factor for urinary nitrogen is 67% lower, and the emission factor for nitrate leaching is reduced with 53%. In 2007, DCD was applied at 3.5% of the area of dairy farms.

Nitrification inhibitors can increase crop yields. Especially on grass in some years yield increases in the order of 20% were found, but there are also years with no agronomic effect. On arable land there are virtually no positive agronomic effects. In the Netherlands, recent experience exist with the products Entec (ammonium sulfate fertilizer with DMPP) and Piadin (separately added nitrification inhibitor). The costs are generally around € 20, - per ha. On average these costs are not offset with higher yields.

The use of nitrification inhibitor brings a number of potential risk to humans, animals and the environment. Registered nitrification inhibitors were assessed on (eco) toxicological hazards. The available data show that with the intended use no adverse side effects are to be expected.

Based on assumptions about theoretical maximum emissions, potential reduction and practical application, we estimated an annual emission reduction for the Netherlands of 0.59 megatons of CO₂-equivalents. That is about 12% of the current emissions related to nitrogen use in agriculture. The largest reductions are achieved with fertilizers and animal manures. A smaller contribution can be expected from other sources of nitrogen such as clover in grassland, grassland renovation, nitrogen mineralization from histosols and plant residues. Additional effects are to be expected from reduced indirect emissions of nitrous oxide from nitrate leaching. For the use of nitrification inhibitors two different strategies are conceivable, namely a 'no regrets' strategy which, for instance with each application of fertilizers and manure, a nitrification inhibitor is used, or a more specific strategy in which application takes place only under specific conditions. The first strategy ensures a maximum emission reduction at relatively high costs. It could be considered as a sort of insurance. The second strategy is cost effective, but may ultimately lead to lower emission reductions. For Dutch conditions, there is a lack of experimental results to identify those circumstances in which a maximum effect of the nitrification inhibitor is to be expected. A potential general use of nitrification inhibitors should be accompanied with a long term monitoring system to assess any adverse effects on soils and environment. Currently, similar questions about the effect on nitrous oxide emissions and cost effectiveness are relevant for neighbouring countries. Therefore, a concerted international approach might be sensible.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De huidige Nederlandse klimaatambities vragen om een terugdringing van niet-CO₂ broeikasgassen tot een niveau van 25 tot 27 Mton CO₂-equivalenten in 2020. Het Reductieplan Overige niet-CO₂ - Broeikasgassen (ROB) is één van de instrumenten om deze doelstelling te realiseren. Het ROB richt zich op het verminderen van de uitstoot van methaan (CH₄) en lachgas (N₂O) via een doelgroepgerichte aanpak. Eén van de sectoren waar het ROB zich op richt is de landbouw (zie <http://www.senternovem.nl/roblandbouw>).

In Nederland draagt de landbouw voor ongeveer 13% bij aan de uitstoot van broeikasgassen, vooral door lachgas en methaan. Lachgas komt vooral vrij uit de bodem en methaan via pensfermentatie en uit dierlijke mest. Voor de landbouw is er geen kwantitatieve doelstelling voor vermindering van broeikasgasemissies vastgesteld, maar wel een kwalitatieve doelstelling: implementeren van kosteneffectieve maatregelen in de praktijk. In het convenant 'Schone en Zuinige agrosectoren' is tussen Rijk en de sector afgesproken de uitstoot van overige broeikasgassen te reduceren met 4 tot 6 Mton ten opzichte van 1990.

Het gebruik van nitrificatieremmers staat sinds enige jaren (internationaal) opnieuw in de belangstelling. Het toepassen van nitrificatieremmers is een maatregel die mogelijk perspectiefrijk is om de emissie van lachgas bij de bemesting van grasland en bouwland te reduceren. Ook vanuit de praktijkprojecten blijkt er behoefte aan meer inzicht in de mogelijkheden van het gebruik en de effectiviteit van nitrificatieremmers in de Nederlandse landbouw.

In 2004 heeft Alterra voor het programma ROB een verkennend onderzoek verricht naar de mogelijkheden tot het verminderen van emissies van lachgas uit landbouwgronden bij toepassing van verschillende mestsoorten (Dolfing et al., 2004). Uit het onderzoek kwam onder meer naar voren dat er voor inzicht in de daadwerkelijke effecten van nitrificatieremmers veldexperimenten noodzakelijk zijn; de resultaten van de laboratoriummetingen laten minder emissie van lachgas zien maar soms is er sprake van geen effect of zelfs een toename.

In Nieuw Zeeland heeft de afgelopen jaren veel onderzoek plaatsgevonden naar het gebruik van nitrificatieremmers in de veehouderij. Dit onderzoek wordt voornamelijk geïnitieerd door het Pastoral Greenhouse Gas Research Consortium (<http://www.pggrc.co.nz/Research>). Gezien de perspectieven van nitrificatieremmers wil het programma ROB de praktische mogelijkheden van het gebruik van nitrificatieremmers in de Nederlandse landbouw in beeld brengen. Ook in China wordt veel onderzoek uitgevoerd naar toepassing en effectiviteit van nitrificatieremmers. In de jaren 2005-2008 zijn minimaal zestien publicaties verschenen in de peer-reviewed internationale literatuur over nitrificatieremmers.

1.2 Doel en vraagstelling

Dit project heeft als doel om de bestaande kennis van het gebruik van nitrificatieremmers onder Nederlandse omstandigheden te actualiseren en deze kennis te vertalen naar praktische mogelijkheden voor het gebruik van nitrificatieremmers bij de bemesting van grasland en bouwland in Nederlandse omstandigheden.

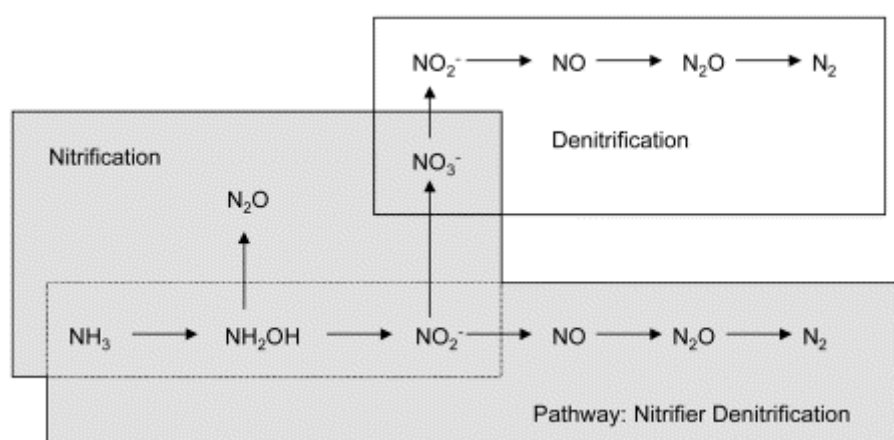
In het project worden op basis van een actualisatie van de kennis over nitrificatieremmers de volgende vragen beantwoord:

- Wat zijn de potenties van het gebruik van nitrificatieremmers bij bemesting van grasland en bouwland onder Nederlandse omstandigheden voor de reductie van de lachgasemissie?
- Hoe duurzaam is het toepassen van nitrificatieremmers? Wat zijn de effecten op mens, dier en milieu?
- Wat zijn de praktische mogelijkheden voor het gebruik van nitrificatieremmers in de Nederlandse landbouw?

2 Literatuuroverzicht

2.1 Werkingsprincipe

Nitrificatieremmers grijpen in op de omzetting van ammonium naar nitraat (figuur 1) door middel van remming van het enzym ammoniummonooxygenase. Er zijn wel honderden stoffen bekend die nitrificatie beïnvloeden (Zerulla et al., 2000). Het merendeel is niet bruikbaar omdat de werkingsperiode te kort is, of omdat ze een negatief effect hebben op het milieu. Momenteel zijn er drie groepen nitrificatieremmers die landbouwkundig van praktische betekenis zijn: pyridines (nitrapyrin), dicyaandiamide (DCD) en pyrazolen (DMPP). Nitrapyrin en DCD zijn al wat langer op de markt, terwijl DMPP van recentere datum is. Nitrapyrin wordt gebruikt in de Verenigde Staten. DCD wordt vooral gebruikt in Europa en Nieuw Zeeland.



Figuur 1

De belangrijkste omzettingen bij de vorming van lachgas uit ammonium. Nitrificatieremmers grijpen in op de eerste stap (Wrage et al., 2001)

Een geschikte nitrificatieremmer moet over een aantal eigenschappen beschikken, namelijk efficiënt en economisch in gebruik, een betrouwbare werking gedurende het groeiseizoen, geen opbouw van resistentie, vergelijkbaar transportgedrag als ammonium en niet bacteriedodend of giftig voor planten, dieren en andere bodemorganismen.

2.2 Effect van nitrificatieremmers op lachgasemissie

In onderstaand overzicht wordt een beknopte beschrijving gegeven van de voortgang van international onderzoek naar het gebruik van nitrificatie remmers in de periode 2005-2008. Dit overzicht dient als aanvulling op de studie van Dolfin et al. (2004) met een overzicht van de literatuur tot 2005. Wetenschappelijke literatuur is geraadpleegd met behulp van Web of Science. Toegepaste of 'grijze' literatuur is geraadpleegd via Google. In beide gevallen is gewerkt met de zoekstring 'nitrification inhibitor soil nitrous oxide'. Volgens Web of Science zijn er in de periode 2005-2009 55 wetenschappelijke publicaties verschenen waarin de zoektermen voorkomen. Na 'screening' blijven hier nog 34 van over (zie literatuur). Van de 34 publicaties werken er 26 met dicyandiamide (DCD), zijn er dertien uitgevoerd in Nieuw Zeeland en hebben er zeven betrekking op grasland. Er zijn slechts vijf veldproeven gedaan, in Spanje (2), Nieuw Zeeland, Indonesië en

India. Ook wat betreft incubatieproeven zijn er weinig studies verschenen die vergelijkbaar zijn met de Nederlandse situatie: er is één studie verricht in Duitsland (Barth et al. 2008).

Dolfing et al. (2004) concludeerden dat het ook in Nederland mogelijk moet zijn om de emissie van lachgas uit landbouwgronden terug te dringen door nitrificatieremmers toe te passen. De grootte van het effect was voorsnog moeilijk in te schatten. Met name de in Duitsland behaalde resultaten waren veelbelovend en deden vermoeden dat 40% haalbaar moet zijn. Deze literatuurstudie maakte echter ook duidelijk dat er nog vele vragen zijn, met name ten aanzien van de lange termijn stabiliteit van de gebruikte remmers (vooral DCD, en in mindere mate ook DMPP). Verder bleek duidelijk dat bepaalde remmers in de ene grond beter werken dan in de andere grond, en dat ook de combinatie van remmer en type kunstmest een rol speelt, evenals het weer. Aansluitend aan de literatuurstudie is een laboratoriumscreening uitgevoerd van DCD en DMPP in combinatie met kunstmest en dierlijke mest. De resultaten gaven een gemengd beeld met duidelijke verschillen tussen de zand- en de kleigrond. De emissies na 30 dagen waren zeer variabel en dit leidde tot slechts weinig significante verschillen in de behandelingen met en zonder nitrificatieregger. Het gebruik van DCD leidde tot een halvering van deze emissies op zand, maar had geen effect op klei. DMPP had op beide gronden geen effect. Op geen van beide gronden leidde het gebruik van DMPP of DCD tot een vermindering van de emissie van lachgas bij het gebruik van KAS. Bij het gebruik van ZA leidde DMPP tot een halvering van de emissie op zand, terwijl DCD geen effect had. Op klei was de trend juist omgekeerd.

In de periode 2005-2009 zijn drie review artikelen verschenen over nitrificatie remmers.

Saggar et al. (2008) concluderen dat nitrificatie remmers potentie hebben om N₂O- emissies van beweide grasland te verminderen, maar dat de effectiviteit van deze maatregel als integraal onderdeel van de bedrijfsvoering nog getest moet worden.

De Klein and Eckard (2008) concluderen dat op dit moment nitrificatie remmers, dieet-aanpassingen en kunstmestbeheer de meest belovende technieken zijn om N₂O emissies op korte termijn te reduceren. Echter, De Klein and Eckard (2008) benadrukken dat dergelijke technieken in het geheel moeten worden bekeken, dus op bedrijfsniveau in plaats van op perceelsniveau, omdat reducties in het ene compartiment tot verhogingen in het andere bedrijfscompartiment kunnen leiden. Net als Saggar et al. (2008) concluderen De Klein and Eckard (2008) dat meer onderzoek nodig is op bedrijfs- of ketenniveau.

Clough et al. (2007) geven een review van het gebruik van dicyandiamide om N₂O- emissies te reduceren uit urineplekken. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van ECO-N, een commerciële spray met dicyandiamide die direct op de bodem wordt aangebracht. Door het gebruik van ECO-N kunnen emissie-factoren naar beneden worden bijgesteld.

Bij het zoeken naar toegepaste literatuur valt op dat in veel landen commerciële toepassingen van nitrificatie remmers (voornamelijk dicyandiamide DCD) op de markt worden gebracht. Deze instellingen hebben allemaal wel een rapport met daarin een aantal bevindingen. Deze rapporten bemoeilijken het zoeken naar relevante literatuur en een objectieve interpretatie van de resultaten. De meeste commerciële toepassingen van nitrificatie remmers komen uit Australië en Nieuw Zeeland, maar er is ook een voorbeeld uit Duitsland.

Nitrificatieremmers in Nieuw Zeeland

Di en Carmeron (2008) hebben de resultaten van veldwaarnemingen naar de toepassing van DCD op begraasde graslanden in Nieuw Zeeland beschreven met het doel de omzetting van ammoniumstikstof naar nitraat (nitrificatie) en daarmee denitrificatie en de uitspoeling van nitraat te beperken met als gevolg ook minder verlies van stikstof in de vorm van lachgas. DCD in de vorm van het commercieel verkrijgbare ECO-N werd toegepast op het gehele perceel na begrazing met koeien. Di and Carmeron (2002) lieten al zien dat de toepassing van DCD leidt tot een ongeveer 70% lagere uitspoeling van nitraat in het voorjaar en de herfst. De recente metingen laten een 63% lagere uitspoeling van nitraat zien voor zowel urine van melkvee, schapen en vleesvee. Di et al. (2007) laat zien dat toepassing van DCD leidt tot een gemiddeld 70% lagere emissie van lachgas bij toepassing van urine in de herfst op heel verschillende grondsoorten in Nieuw Zeeland. Met een

lagere uitspoeling van nitraat als gevolg zal de toepassing van DCD niet alleen leiden tot een lagere directe emissie van lachgas, maar zeer waarschijnlijk ook tot een lagere indirecte emissie van lachgas. Zowel directe (uit de bodem) als indirecte emissie (uit grond- en oppervlaktewater na uitspoeling uit landbouw) van lachgas zal lager zijn. Di et al. (2008) vermelden verder dat de opbrengst van gras bij toepassing van DCD 30% hoger is; dit is een gevolg van sterke verbetering van de efficiëntie van gebruik van stikstof met als gevolg dat meer stikstof beschikbaar is voor opname door gras of een gewas. Deze opbrengstverhoging is vastgesteld voor urine-aanwending tot 1000 kg N per ha en DCD van 10 kg werkzame stof per ha (Di and Cameron, 2007).

In Nieuw-Zeeland maken de emissies van broeikasgassen uit de landbouw ongeveer 50% van alle emissies van broeikasgassen uit. Deze emissies groeien met ongeveer 1% per jaar en de potentiële kosten in Emission Trading Schemes zijn navenant hoog en bedragen in theorie tot 500 miljoen Euro in de eerste *commitment period* van het Kyoto Protocol (Leslie et al., 2008). In Nieuw-Zeeland is dan ook volop aandacht voor mogelijkheden om de emissie van broeikasgassen uit de landbouw terug te dringen. Voor de emissie van lachgas gaat die aandacht vrijwel volledig uit naar toepassing van nitrificatieremmers. De sector is actief in een consortium dat door de sector zelf en de overheid gezamenlijk wordt gefinancierd; deelnemende industrieën zijn Fonterra (dairy & melk), Meat & Wool (rund en schaaap), Fertilizer Manufacturers en verschillende onderzoeksinstituten (AgResearch, DEEResearch, DairyInstight & PGG Wrightson). Het onderzoek voor lachgas en nitrificatieremmers is vooral gericht op zogenaamde '*proof of function*' waarnemingen. Hierin is de toepassing van de nitrificatieremmer Dicyandiamide (DCD) voor vermindering van lachgas-emissie uit urine bij weidegang aan de orde. Deze resultaten zijn bemoedigend en wijzen op een vermindering in de orde van 70% ten opzichte van urine zonder nitrificatieremmer (DCD) (Leslie et al., 2008). Overigens worden in Nieuw Zeeland ook nieuwe (en betere) nitrificatieremmers ontwikkeld door de kunstmestindustrie die zijn gebaseerd op de 'oude' nitrificatieremmers DCD zoals ECO-N®. In Europa heeft BASF een nitrificatieremmer ontwikkeld op basis van de werkzame stof DMPP; deze is commercieel beschikbaar als ENTEC®.

De komende jaren zal onderzoek naar toepassing van DCD in Nieuw Zeeland doorgaan en is gericht op het verzamelen van onderbouwing waarmee de toepassing van DCD als een effectieve technologie in de internationale rapportage van emissies van broeikasgassen kan worden gerechtvaardigd. Maar daarnaast zal het onderzoek moeten aantonen dat de toepassing van DCD voor ondernemers in de landbouw aantrekkelijk is. Hiertoe wordt onderzocht in hoeverre toepassing van DCD leidt tot een productieverhoging omdat minder stikstof verloren gaat via uitspoeling. Er zijn inmiddels plannen geconcretiseerd om over te gaan tot veldmetingen op een groot aantal locaties in Nieuw-Zeeland. De start van dergelijke meetcampagnes wordt ieder moment verwacht (mondelinge mededeling, Harry Clark, voorzitter PGgRc).

In de NIR in Nieuw- Zeeland (<http://www.mfe.govt.nz/publications/climate/greenhouse-gas-inventory-2009/new-zealands-greenhouse-gas-inventory.pdf>) wordt nu gebruik gemaakt van bijgestelde emissiefactoren. Bij gebruik van DCD is de emissiefactor voor urine-stikstof 67% lager, en de emissiefactor voor nitraatuitspoeling 53% lager. In 2007 is DCD toegepast op 3.5% van de oppervlakte op melkveebedrijven. De nationale emissiereductie door toepassing van DCD kwam uit op 0.2%.

Nitrificatieremmers in Nederland

In Nederland zijn in de jaren tachtig en negentig van de afgelopen eeuw ook DCD en andere nitrificatieremmers toegepast. Dit onderzoek was voornamelijk gericht op de mogelijkheden om via remming van nitrificatie de uitspoeling van nitraat naar grond- en oppervlaktewater te verminderen. NMI heeft in het project Koeien en Kansen het effect van gebruik van de nitrificatieremmer DMPP met ammoniumkunstmest (ENTEC) onderzocht. Alterra heeft in opdracht van ROB in 2004 laboratoriumonderzoek uitgevoerd naar het effect van het gebruik van een serie beschikbare nitrificatieremmers in zand en klei bij toepassing van kunstmest en dierlijke mest op de vorming en emissie van lachgas (Dolfing et al., 2004).

3 Neveneffecten

3.1 Landbouwkundige effecten

Den Boer en Bakker (2002) hebben gedurende twee jaar op verschillende graslandpercelen van Koeien-en-Kansen-bedrijven de opbrengst van de eerste snede met Entec vergeleken met KAS. De stikstofbemesting met Entec bedroeg 80% van de bemesting met KAS. De opbrengsten met Entec waren gelijk of hoger dan die met KAS. Op een aantal percelen heeft mogelijk de zwavel in Entec een positieve bijdrage geleverd. Bakker en Den Boer (2003) onderzochten ook de toevoeging van DMPP aan drijfmest. Zij vonden een 4% hogere opbrengst door toevoeging van DMPP aan drijfmest. In datzelfde jaar had ENTEC echter geen opbrengstverhogend effect ten opzichte van KAS. Zij concludeerden dat ENTEC vooral in natte voorjaren een positief effect heeft, terwijl in droge voorjaren geen effect verwacht mag worden. In een intern rapport van NMI (Bussink, 1999; alleen samenvatting beschikbaar) wordt een significant positief effect van ENTEC gerapporteerd.

DSM heeft de gegevens van opbrengstproeven bij verschillende akkerbouwgewassen bijeengebracht op www.nutrinorm.nl:

- In winterprei had ENTEC geen effect op de veilbare opbrengst (onderzoek van PRI).
- In aardappelen had ENTEC een gering (-2% tot +9%) effect op de opbrengst. Toevoeging van Piadin aan drijfmest leverde een besparing op van 10 kg kunstmest-N (onderzoek NMI).
- In wintertarwe op löss was de opbrengst met ENTEC 2% hoger dan met KAS (onderzoek PPO).

In Duitsland (NRWF: Haus Riswick, ppt-presentatie) is toevoeging van Piadin aan drijfmest onderzocht bij toediening op grasland. In de eerste snede vonden ze een opbrengstverhoging van 15%. Echter, in de tweede snede werd dat volledig teniet gedaan, zodat er per saldo geen effect was.

Bakker en Den Boer (2003) somden samenvattend de volgende voordelen op die deels met elkaar verstrengeld zijn:

- hogere stikstofopname door het gewas
- lagere nitraatuitspoeling
- hogere gewasopbrengst
- hogere stikstofbenutting N-benutting door planten
- lagere kunstmestgift bij gelijkblijvende opbrengsten
- voorkomen van hoge gehalten aan nitraat in groenten
- een afname van de werkdruk van de boeren door een grotere flexibiliteit in het moment van bemesting

Helaas zijn in deze proeven geen metingen van de lachgasemissie verricht, zodat er geen koppeling is te maken tussen het emissiereducerend effect en het agronomische effect.

3.2 Risico's

Het gebruik van nitrificatieremmers brengt een aantal potentiële risico's mee voor mens, dier en milieu. De potentiële risico's zijn ophoping in de bodem, uitspoeling naar grondwater of oppervlaktewater, ophoping in landbouwproducten en inname door dier en mens.

Tot 2008 werden aanvragen voor de toelating van nitrificatieremmers via de meststoffenwet geregeld. Dat betekent dat een ontheffingsaanvraag via het RIKILT liep. De stof is dan getoetst op identificeerbaarheid, eenduidigheid, landbouwkundige werkzaamheid en gevaar voor bodem en water. Hierbij wordt niet alleen naar

de uitgangsstof gekeken, maar ook naar de afbraakproducten. Tegenwoordig is de procedure voor meststoffen anders. Maar bovendien wordt een nitrificatieremmer niet meer gezien als een meststof, en valt ze dus niet onder de meststoffenwet. Het zijn ook geen biociden of gewasbeschermingsmiddelen, en vallen dus ook niet onder het CTB. Zodoende vallen nitrificatieremmers onder de regelgeving milieugevaarlijke stoffen. Voor toelating dienen producenten zelf aan te tonen dat de stof geschikt is voor het doel, en dat het bij het gebruik waarvoor het ontwikkeld is, niet milieugevaarlijk is. Stoffen die in Europa zijn toegelaten krijgen een EINECS- nummer. De uitvoering ligt in handen van REACH, dat in Nederland bij het RIVM is ondergebracht. Nitrificatieremmers die volgens deze Europese regelgeving zijn toegestaan, mogen ook in Nederland worden gebruikt. De nitrificatieremmers DCD, DMPP en Triazol-3MP (Piadin) zijn toegelaten in Europa en in Nederland.

Nitrapyrin is bijtend en explosief. Ook zijn er steeds meer aanwijzingen dat dit middel schadelijk is voor het milieu. In de Verenigde Staten is Nitrapyrin geregistreerd als bestrijdingsmiddel, terwijl DCD als meststof is geregistreerd. DCD is vrijwel niet toxisch en heeft geen mutageen effect op bacteriën (OECD: <http://www.inchem.org/documents/sids/sids/461585.pdf>).

Lange termijn studies hebben geen carcinogeen effect laten zien. Risico's voor menselijke gezondheid worden niet verwacht. DCD is uitspoelingsgevoelig en heeft bovendien een toxisch effect op witte klaver. Als daardoor minder biologische stikstofbinding optreedt, gaat het gepaard met een verlaging van de stikstofbenutting. DMPP is (eco-)toxicologisch onderzocht in het kader van het Europese registratieproces. De toxicologische toets bestond uit een aantal dierproeven met ratten, muizen en konijnen en omvatte de acute toxiciteit, huidsensibilisering, subacute toxiciteit, prenatale toxiciteit en longtoxiciteit. Bovendien is de mutagene werking op bacteriën getest. De conclusie is dat DMPP matig toxisch is. Op grond van deze toets is er geen negatief gezondheidseffect op gebruikers te verwachten. De ecotoxicologische toets bestond uit acute toxiciteitstesten voor vissen, watervlooien, algen, regenwormen en bacteriën. Daaruit bleek dat DMPP onschadelijk is voor waterorganismen. Bovendien is een negatief effect op bodemorganismen onwaarschijnlijk. De nitrificerende bacteriën worden gedurende een beperkte tijd geremd. Langdurige effecten zijn niet te verwachten. Uitspoeling naar het grondwater is niet te verwachten. Geen van deze onderzoeken gaf aanleiding om DMPP niet toe te laten.

In Nieuw Zeeland zijn nitrapyrin, DCD en DMPP toegelaten. De Auckland Regional Council heeft in 2008 nitrificatieremmers expliciet benoemd als organische chemicaliën met een potentieel opkomend milieukundig probleem. Zij zien een toename in het gebruik, terwijl de lange termijn milieukundige effecten nauwelijks onderzocht zijn.

Voor zover wij weten hebben Nederlandse milieuorganisaties geen stelling genomen over de wenselijkheid van het gebruik van nitrificatieremmers. Ook de Technische Commissie Bodembescherming heeft hierover geen adviezen uitgebracht.

Uit de beschikbare gegevens blijkt dat er bij het beoogde gebruik geen nadelige neveneffecten zijn te verwachten. Er zijn echter geen studies bekend waarin het lange termijn effect (> 10 jaar) is bestudeerd. Bij een eventuele grootschalige inzet van nitrificatieremmers is het zinvol om een lange termijn monitoring op te zetten om eventuele nadelige effecten waar te kunnen nemen.

4 Potentiële emissiereductie

In de voorgaande onderdelen zijn de recente inzichten uit de wetenschappelijke literatuur en de landbouwpraktijk beschreven. In dit hoofdstuk worden die gegevens gebruikt om een schatting te maken van de potentiële reductie van de lachgasemissie door de toepassing van nitrificatieremmers in Nederland. De productie van nitrificatieremmers gaat gepaard met emissies in de sectoren energie en industriële processen. Vanwege de lage doseringen zijn deze emissies naar verwachting relatief laag. Ze zijn bij de onderstaande analyse buiten beschouwing gelaten.

4.1 Werkwijze

De reële emissiereductie door nitrificatieremmers is het product van drie factoren, namelijk de theoretisch maximale reductie, de potentiële reductie en de praktische reductie.

$$E_{\text{NI}} = R_{\text{max, theorie}} \times R_{\text{potentieel}} \times R_{\text{praktijk}}$$

E_{NI} = Reële emissiereductie (%) door de inzet van nitrificatieremmers

$R_{\text{max, theorie}}$ *Theoretisch maximale reductiefactor.*

Als nitrificatieremmers altijd worden toegepast bedraagt de emissiereductie 50% omdat nitrificatieremmers geen perfecte stoffen zijn die nitrificatie volledig en gedurende langere tijd stopzetten. Dit wordt onder andere veroorzaakt door de biologische afbreekbaarheid van nitrificatieremmers. De afbraaksnelheid is afhankelijk van de bodemtemperatuur. Bij bodemtemperaturen boven de 12°C zijn nitrificatieremmers minder (lang) werkzaam. De waarde van 50% is conservatief geschat op basis van de metingen zoals die in de literatuur zijn gerapporteerd.

$R_{\text{potentieel}}$ *Potentiële reductiefactor.*

Nitrificatieremmers hebben niet altijd effect. Een effect is alleen te verwachten onder die bodemomstandigheden waarbij nitrificatie en denitrificatie zonder nitrificatieremmer wel zouden optreden. Temperatuur, bodemvocht en de aanwezigheid van makkelijk afbreekbare koolstof en minerale stikstof in de vorm van ammonium of nitraat zijn de sturende bodemfactoren voor nitrificatie en denitrificatie. Onder omstandigheden waarbij geen of weinig nitrificatie gevolgd door denitrificatie optreedt, is de inzet van nitrificatieremmers minder effectief. Er is een gebrek aan goed onderbouwde gegevens om deze factor in te schatten. Wij hebben geen reden om af te wijken van het gemiddelde van 0 tot 100%. Daarom schatten wij dit voorlopig op 50%.

R_{praktijk} *Praktische reductiefactor.*

De toepassing van nitrificatieremmers is niet in alle omstandigheden praktisch toepasbaar. De waarde varieert van 10 tot 90%, afhankelijk van het toepassingsgebied. Hoge waarden zijn aangenomen bij specifieke en duidelijke momenten van stikstoftoediening, zoals bij kunstmest en dierlijke mest het geval is en waardoor de nitrificatieremmer gericht en vrijwel gelijktijdig kan worden toegepast. Lage waarden zijn ingesteld bij diffuse processen zoals stikstofbinding en mineralisatie die over het algemeen voortdurend plaatsvinden en/of waarbij het moeilijk is om op het juiste moment de juiste hoeveelheid nitrificatieremmer toe te passen.

De bovenstaande rekenregels zijn geïmplementeerd in een eenvoudig spreadsheetmodel. Daarmee is het mogelijk om, bijvoorbeeld ten behoeve van aanvullende verkenningen, de waarde van de drie factoren te variëren.

De berekeningen zijn uitsluitend gericht op het effect op de directe lachgasemissies. Hiervoor is gekozen omdat in veld- en laboratoriumstudies uitsluitend de directe lachgasemissie wordt gemeten. Het effect op de indirecte lachgasemissies, via een verlaging van de nitraatuitspoeling, wordt niet rechtstreeks gemeten. Het effect op de indirecte lachgasemissie is nog onzekerder dan het effect op de directe emissie.

4.2 Emissiereductie lachgas in Nederland

Het gebruik van nitrificatieremmers kan een jaarlijkse emissiereductie opleveren van 0.592 Mton CO₂-equivalenten (tabel 1). Dat is ongeveer 12% van de huidige emissie N₂O als gevolg van het gebruik van stikstof in landbouw (uitgedrukt in CO₂-equivalenten). De grootste reducties in Nederland zijn haalbaar bij de toediening van kunstmest en dierlijke mest. Samen zijn deze twee bronnen verantwoordelijk voor driekwart van de jaarlijkse stikstofaanvoer naar de bodem, en voor 65% van de lachgasemissie uit landbouw. Een kleinere bijdrage kan worden verwacht uit andere bronnen van stikstof en lachgas zoals klaver in grasland, graslandscheuren, mineralisatie van stikstof uit histosolen/veengronden en gewasresten.

De reële emissiereductie van 0.6 Mt CO₂-equivalenten is in drie stappen afgeleid en weergegeven in de laatste kolom in tabel 1. De maximaal haalbare emissiereductie bedraagt 4 kt N, terwijl de potentiële reductie is geschat op 2 kt N (zie tabel 1). Bij de maximaal haalbare emissiereductie is uitsluitend de inherente restrictie ten aanzien van generieke, niet volledige remming (50%) van de werking van nitrificatieremmers aangebracht. Bij de berekening van de potentiële emissiereductie is uitsluitend rekening gehouden met het gegeven dat toegepaste nitrificatieremmers niet onder alle omstandigheden werkzaam zullen zijn (50%) en met name niet wanneer het relatief droog is (zogenaamde water filled pore space <70%) of warm is (>12 °C). Het is evident dat de gekozen uitgangspunten voor de reductiefactoren in deze potentiële en de praktische emissiereductie zeer bepalend zijn voor de uitkomsten. Op dit gebied bestaat in de wetenschappelijke literatuur geen consensus over de effectiviteit van nitrificatieremmers.

Tabel 1.

Samenvattend overzicht van de jaarlijkse emissiereductie van lachgas die haalbaar is bij toepassing van nitrificatieremmers in Nederland. De reële reductie is een functie van de maximale reductie, potentiële reductie en een toepassingsfactor

Bron	Stikstof- aanvoer (10 ⁶ kg N)	Stikstof- aanvoer (10 ⁶ kg N)	Lachgas-emissie (10 ⁶ kg N)	Maximale reductie (10 ⁶ kg N)	Potentiële reductie (10 ⁶ kg N)	R _{praktijk}	Reële reductie (10 ⁶ kg N)	Reële reductie (10 ⁶ kg CO ₂ -eq.)
	NIR 2005	Dit rapport						
Kunstmest	269	279	2.8	0.7	0.4	0.9	0.3	158
Mesttoediening	282	297	4.1	1.6	0.8	0.9	0.7	335
Weidemest	81	63	2.08	1.0	0.5	0.25	0.1	61
Klaver	5	8	0.08	0.0	0.0	0.1	0.002	1
Grasland scheuren	-	16	0.2	0.1	0.1	0.9	0.045	21
Mineralisatie veen	52	52	1.0	0.5	0.3	0.1	0.026	12
Gewasresten	32	34	0.3	0.2	0.1	0.1	0.009	4
Totaal	721	749	11	4	2		1.3	592

In aanvulling op de gegevens in tabel 1 kan een bijdrage worden verwacht uit vermindering van de - indirecte - emissie van lachgas uit grond- en oppervlaktewater na uitspoeling van nitraat omdat de uitspoeling door toepassing van nitrificatieremmers zal verminderen. In Nederland was de lachgasemissie uit nitraatuitspoeling in 2005 8.62 kt N₂O, oftewel 2.57 Mt CO₂-equivalenten. Een veronderstelde verlaging van de nitraatuitspoeling met 10% zou dan tot een aanzienlijke, additionele verlaging van de lachgasemissie leiden van 0.26 Mt CO₂-equivalenten.

Een verdere aanvulling op de gegevens in tabel 1 zou kunnen ontstaan indien de toepassing van nitrificatieremmers leidt tot een efficiënter gebruik van stikstof in de landbouw. Dit is een vergelijkbaar effect als productieverhoging bij gelijkblijvende stikstofgift zoals verwacht in Nieuw Zeeland. Indien deze verhoging van efficiëntie leidt tot minder gebruik van kunstmeststof zal de emissie van lachgas uit kunstmeststof dalen. Dit effect is geringer dan het effect op indirecte emissies en op grond van de wisselende resultaten van proeven in Nederland en Duitsland moeilijk te kwantificeren.

Tot slot is in onderstaande analyse uitgegaan van onafhankelijke toepassing voor verschillende bronnen. Het is echter goed mogelijk dat toepassing bij een bron, zoals kunstmest, ook een reducerend effect heeft op de emissies uit andere bronnen, zoals uit mineralisatie uit veen of uit urineplekken.

4.3 Emissiereductie via nitrificatieremmers per bron

4.3.1 Kunstmest

In Nederland wordt hoofdzakelijk kalkammonsalpeter (KAS met 50% ammonium en 50% nitraatstikstof) gebruikt, gevolgd door NPK-meststoffen en ammoniumsulfaat (uitsluitend ammoniumstikstof). De toediening van kunstmest op grasland en bouwland vindt vooral in voorjaar en zomer plaats (maart tot en met augustus). De toepassingsfactor voor nitrificatieremmers aan kunstmest schatten wij zeer hoog (90%) in omdat de toepassing van kunstmest samen met nitrificatieremmers in praktische zin goed te combineren is. Deze werking wordt uiteraard toegepast op het gedeelte ammoniumstikstof in de kunstmest. En, de beschikbaarheid van specifieke kunstmest varianten met nitrificatieremmers zal naar verwachting alleen maar toenemen (bijvoorbeeld ENTEC van BASF met werkzame stof DMPP; ECO-N met als werkzame stof DCD).

4.3.2 Dierlijke mest

Dierlijke mest bevat stikstof in organische vorm en als ammonium. Driekwart van de dierlijke mest in Nederland wordt toegediend na opslag in een mestkelder of elders, terwijl een kwart tijdens beweiding wordt uitgescheiden. Toediening van dierlijke mest is gereguleerd en aan wettelijke bepalingen onderworpen en vindt plaats tussen 15 februari en 1 september en voornamelijk gedurende het groeiseizoen. De piek van toediening is in het voorjaar. In vergelijking met kunstmest komt relatief zeer vroege toediening voor direct vanaf 15 februari met hoger risico op denitrificatie in het natte voorjaar. Alleen zijn er wel verdere restricties in de zin dat dierlijke mest niet mag worden toegepast op bevroren bodem en onder zeer natte omstandigheden (water op het land).

De toepassing van nitrificatieremmers bij de toediening van dierlijke mest schatten wij maximaal (90%) omdat het technisch eenvoudig is te realiseren om de toedieningsapparatuur te voorzien van een doseerinstallatie voor nitrificatieremmers.

Tabel 2.

Jaarlijks gebruik van kunstmest. De maximale emissiereductie van 50% is berekend over uitsluitend het ammoniumdeel van de meststof

Product	Totale toediening (1000 kg N)	Ammonium-N (%)	Ammoniak- emissie (1000 kg N)	Netto toediening (1000 kg N)	EF* (kg N/kg N)	Emissie (1000 kg N)	Emissie- reductie (%)	Maximale Emissie- reductie (1000 kg N)
Ammoniumnitraat	3293	50	171	3122	0.011	34	25	9
Ammoniumsulfaat	29298	100	3311	25987	0.0055	143	50	71
Ammoniumsulfaatsalpeter	4826	73	396	4430	0.011	49	37	18
Chilisalpeter	355	0	0	355	0.011	4	0	0
Diammoniumfosfaat	1295	100	96	1199	0.0055	7	50	3
Gemengde stikstofmeststof	8095	50	202	7893	0.011	87	25	22
Kalisalpeter	780	0	0	780	0.011	9	0	0
Kalkammonsalpeter	174526	50	4363	170163	0.011	1872	25	468
Kalksalpeter	155	7	0	155	0.011	2	4	0
Monoammoniumsulfaat	30	100	2	28	0.0055	0	50	0
Overige NPK, NP en NK meststoffen	41935	55	1887	40048	0.011	441	28	121
NPKMg meststoffen	3826	50	96	3730	0.011	41	25	10
Stikstofmagnesia	5561	50	139	5422	0.011	60	25	15
Ureum	5271	100**	754	4517	0.0055	25	50	12
Vloeibare ammoniak	0	-	0	0				
Zwavel gecoat ureum	0	-	0	0				
Niet nader genoemde producten	0	-	0	0				
Totaal	279246		11417	267829		2772		750

* 0.9 * EF minerale gronden + 0.1 * EF veen

** volledige omzetting naar ammonium

Bij beweiding schatten we de toepassing matig (25%). Dit is het gevolg van het toegepaste beweidingssysteem dat in Nederland bestaat uit standweiden, omweiden en allerlei combinaties. Bij standweiden zou de nitrificatieremmer moeten worden toegepast op het gehele veld en meerdere malen per jaar. Bij veel gebruikte omweidingssystemen wordt enige dagen na het vrijkomen van het perceel opnieuw kunstmest of drijfmest toegediend. Samen met die handeling kunnen eenvoudig en in een bewerking ook nitrificatieremmers worden toegediend. Echter, de effectiviteit voor werking van de nitrificatieremmer in urineplekken van beweiding zal afhankelijk zijn van de periode tussen urinelozing en mesttoediening. Hoe korter de rotaties in beweiding gevolgd door bemesting en hoe sneller daarna nitrificatieremmers worden toegediend, des te effectiever het effect van nitrificatieremmers zal zijn.

In enkele toekomstscenario's wordt uitgegaan van 25% mestverwerking. Innovatieve technieken voor verwerking van dierlijke mest (vergisting) en bewerking (scheiding, filtratie) leiden tot andere verhoudingen tussen organische stikstof en ammoniumstikstof in de overblijvende residuen en meststoffen. Bij vergisting ontstaat een meststof met meer ammoniumstikstof waardoor de inzet van nitrificatieremmers zinvoller wordt. Bij mestscheiding ontstaat een vaste fractie met veel organische stikstof en een dunne fractie met veel ammoniumstikstof. Daardoor kan over het algemeen efficiënter worden bemest. Nitrificatieremmers zullen voor de dunne fractie zinvol zijn. Toepassing van nitrificatieremmers aan deze bewerkte en verwerkte meststoffen is vanwege de geringe omvang niet meegenomen in de berekening hier.

Tabel 3.

Jaarlijks toediening van dierlijke mest op bouwland en grasland. De maximale emissiereductie van 50% is berekend over het ammoniumdeel (62%) van de meststof

	Totale toediening (1000 kg N)	Ammoniak- emissie (1000 kg N)	Netto toediening (1000 kg N)	EF (kg N/kg N)	Emissie (1000 kg N)	Emissie- reductie (%)	Maximale Emissie- reductie (1000 kg N)
Toediening bouwland	120.1	18	102.1	0.0162	1.65	0.31	0.512746
Toediening grasland	177.2	23.7	153.5	0.0162	2.49	0.31	0.770877
Weide	62.9	2.08	60.82	0.0162	0.99	0.31	0.305438
Totaal	360.2	43.78	316.42		5.126004		1.589061

4.3.3 Vlinderbloemigen

Bij biologische stikstofbinding wordt luchtstikstof (N_2) vastgelegd in plantaardig eiwit. Door middel van de afbraak van eiwit komt ammonium in de bodemoplossing. Bij de herziening van de IPCC in 2006 is de directe emissie door biologische stikstofbinding op nul gezet. Er is onvoldoende bewijs dat het bindingsproces zelf tot emissie van lachgas leidt. Dat laat onverlet dat de stikstof die vrijkomt door de afbraak van vlinderbloemigen tot emissie leidt (ROB-rapporten). Die wordt in principe al meegenomen bij berekening van de emissie uit gewasresten, dierlijke mest en urine. In onderstaande tabel wordt de, nog steeds toegepaste, Nederlandse emissiefactor van 1% gebruikt.

Stikstofbinding vindt plaats gedurende hele groeiseizoen, maar stikstof komt ook en soms zelfs voornamelijk vrij na het groeiseizoen. Daarom schatten we de effectiviteit van nitrificatieremmers en toepassing in op minimaal (10%) voor toepassing in witte klaver in grasland.

In de kleinere gewassen zoals in luzerne wordt een aantal keren bemest en dit biedt wellicht mogelijkheden om nitrificatieremmers eenvoudig toe te dienen in een werkgang. Eenzelfde zou kunnen gelden voor peulvruchten wanneer gewasresten hier worden bewerkt; overigens behoren de gewasresten van peulvruchten tot de stikstofrijke gewasresten.

Tabel 4.*Jaarlijks biologische stikstofbinding en emissie van lachgas*

	Oppervlakte (1000 ha)	Stikstofbinding (kg/ha)	Netto toediening (1000 kg N)	EF (kg N/kg N)	Emissie (1000 kg N)
Peulvruchten	0.271	165	0.045	0.01	0.00044
Luzerne	0.644	400	0.26	0.01	0.0026
Witte klaver in grasland	50	150	7.5	0.01	0.075
Totaal	50.9		7.8		0.078

4.3.4 Scheuren van grasland

In Nederland wordt jaarlijks zo'n 70.000 ha permanent grasland gescheurd en opnieuw ingezaaid, waarbij het gras wordt doodgespoten. Hierbij komt via relatief snelle afbraak van organische stof ammoniumstikstof in het bodem terecht. Scheuren is toegestaan gedurende het groeiseizoen, van 1 februari tot 10 mei op zand en löss, en van 1 februari tot en met 15 september op klei en veen. In onderstaande tabel wordt uitgegaan van scheuren in het voorjaar. De toepassing schatten we maximaal (90%) in omdat het scheuren van grasland vrijwel altijd gepaard gaat met het vooraf doodspuiten van de bestaande zode. Het is technisch eenvoudig te realiseren om bij het doodspuiten van grasland nitrificatieremmers over de zode te verdelen. Daarnaast wordt jaarlijks tussen de 10.000 en 50.000 ha grasland doodgespoten en doorgezaaid. Deze oppervlakte is zeer wisselend en sterk afhankelijk van het voorkomen van strenge winters en langere perioden van droogte. Deze cijfers zijn niet meegenomen in dit overzicht maar bieden zonder meer goede perspectieven om gemakkelijk een nitrificatieremmer bij het doodspuiten gelijktijdig toe te passen. Het scheuren van een graszode voor de inzaai van een akkerbouwgewas (vruchtwisseling) is ook niet meegenomen in deze gegevens omdat de statistieken daarvoor niet toereikend zijn en een schatting niet eenvoudig is te maken.

Tabel 5.*Jaarlijks stikstofmineralisatie na het scheuren van grasland en emissie van lachgas*

	Oppervlakte (1000 ha)	Mineralisatie (kg N/ha)	Netto toediening (1000 kg N)	EF (kg N/kg N)	Emissie (1000 kg N)
Klei	12	300	4	0.01	0.04
Zand	55	200	11	0.01	0.11
Veen	3	450	1	0.04	0.05
Totaal	70		16		0.20

4.3.5 Histosolen

Nederland heeft ruim 200.000 ha veengrond die landbouwkundig wordt gebruikt. Bij de afbraak van organische stof komt ook (ammonium)stikstof vrij. Wij schatten de toepassing minimaal in (10%) vanwege het geleidelijk aan vrijkomen van stikstof uit mineralisatie en omdat het relatief moeilijk is om de nitrificatieremmer bij de bron van nitrificatie en van lachgas te brengen indien dit op grotere diepte plaatsvindt.

Tabel 6.*Jaarlijks stikstofmineralisatie uit veengronden en emissie van lachgas*

	Oppervlakte (1000 ha)	Mineralisatie (kg N/ha)	Netto toediening (1000 kg N)	EF (kg N/kg N)	Emissie (1000 kg N)
Totaal	220	235	51.7	0.02	1.03

4.3.6 Gewasresten

Bij de oogst van akkerbouw- en tuinbouwgewassen blijft vrijwel altijd een gewasrest over en achter op het land. Bij de afbraak van deze gewasresten komt ammoniumstikstof vrij. De toepassing schatten we minimaal (10%) in omdat de gewasresten na de oogst geleidelijk afbreken en de mineralisatie van stikstof en vorming van ammoniumstikstof niet direct op gang komt. Wel is het mogelijk om eventueel nader onderscheid te maken tussen stikstofrijke (veel stikstof bevattende) en stikstofarme (weinig stikstof bevattende) gewasresten. Aan de stikstofrijke gewasresten kan een hogere effectiviteit van toepassing worden toegekend op basis van de waargenomen relatief snelle mineralisatie van stikstof en groot risico op nitrificatie zoals tot uiting komt in uitspoeling van nitraat. Indien er meer en meer groenbemesters (hoog N-gehalte in gewasresten) en vanggewassen worden geteeld of opgenomen in het bouwplan zal de effectiviteit van nitrificatierepressors wellicht toenemen. In ieder geval neemt emissie van lachgas wel toe als de hoeveelheid gewasresten van groenbemesters en vanggewassen toeneemt.

Tabel 6.*Jaarlijks stikstofmineralisatie uit gewasresten en emissie van lachgas*

	Totale toediening (1000 kg N)	Ammoniak- emissie (1000 kg N)	Netto toediening (1000 kg N)	EF* (kg N/kg N)	Emissie (1000 kg N)
Akkerbouw	814		30.3	0.01	0.30
Tuinbouw	46		4.2	0.01	0.042
Totaal	860		34.5		0.345

4.3.7 Overige mogelijkheden

Het effect van toepassing van nitrificatierepressors bij grondbewerking sec is niet verwerkt; mineralisatie van stikstof en nitrificatie met lachgasproductie als gevolg via deze bewerking wordt niet meegenomen als bron in de nationale berekening van emissie van lachgas.

5 Potentiële toepassing

5.1 Kosten en baten

Betrouwbare informatie over het gebruik van nitrificatieremmers ontbreekt. Een schatting van de FAO uit 1997 noemt 1860 miljoen ha in de Verenigde Staten, waarvan het overgrote deel nitrapyrin is en slechts 200.000 ha DCD. Dezelfde bron noemt voor West Europa een toepassing van DCD op 200.000 ha bouwland. De NIR (2007) in Nieuw Zeeland noemt 3.5% van de oppervlakte grasland op melkveebedrijven waar DCD wordt gebruikt.

De nitrificatieremmers DCD en Nitrapyrin worden in Nederland nauwelijks gebruikt. DMPP wordt sporadisch gebruikt in tuinbouw en vollegroentsgrondteteelt en op grasland in de melkveehouderij. Piadin wordt toegevoegd aan drijfmest. Cijfers over het gebruik zijn niet bekend. De overwegingen om nitrificatieremmers in te zetten zijn vrijwel uitsluitend gebaseerd op een hoger economisch rendement. Als er milieukundige overwegingen een rol spelen, hebben die vooral betrekking op een betere stikstofbenutting in het algemeen en een verlaging van de nitraatuitspoeling. De reductie van lachgasemissies speelt nauwelijks een rol bij de keuze van nitrificatieremmers.

Kosten bestaan uit de kostprijs van de nitrificatieremmer, afschrijving van investeringen in toedieningsapparatuur en extra arbeid. De baten komen uit een extra opbrengst of een besparing op de kunstmestgift. Hieronder wordt voor ENTEC en Piadin een berekening van de kosten gegeven en de benodigde opbrengststijging of kunstmestbesparing om de kosten terug te winnen. Hierbij gaan we uit van een ruwvoerprijs van € 0,10 per kilogram droge stof en een kunstmestprijs¹ (KAS) van € 0,67 per kg N. De eventuele baten van vermeden CO₂-emissie zijn in deze beschouwing niet meegenomen.

5.1.1 Entec

Entec is een ASS-meststof waaraan de nitrificatieremmer DMPP is toegevoegd. ASS kost € 0,79 per kg N, terwijl Entec € 0,88 per kg N kost, dus 12% hoger. Ten opzichte van KAS zijn de meerkosten 33%. Op grasland kan in de eerste twee sneden 100 kg N per ha worden gebruikt in de vorm van Entec. De meerkosten bedragen dan € 22,- per ha, die terugverdiend moeten worden met 220 kilogram droge stof of een besparing van 33 kg N uit KAS. De gunstigste proefresultaten laten een gelijke of zelfs wat hogere opbrengst zien in combinatie met een 20% lagere stikstofgift. Stel dat inderdaad de stikstofgift met Entec 20 kg N per ha lager kan zijn, dan moet er nog een opbrengstverhoging van 100 kg droge stof per ha worden gerealiseerd om de kosten terug te verdienen. In sommige jaren en op sommige bedrijven is dat inderdaad gerealiseerd. Daartegenover staan echter resultaten die geen opbrengstverhoging lieten zien. Op bouwland zijn gemiddeld geen of zeer geringe opbrengsteffecten gevonden, waardoor het twijfelachtig is of de meerkosten terugverdiend kunnen worden.

¹ Prijzen kunstmest naar mondelinge navraag bij Triferto, januari 2010

5.1.2 Piadin

Piadin kost € 5,- per liter en wordt eenmalig toegediend in een dosering van 4 liter per ha. De kosten per ha bedragen dus € 20,-. Het middel kan eenvoudig met mest gemengd worden bij het vullen van de drijfmesttank voorafgaand aan toediening. In dit voorbeeld worden daarvoor geen extra arbeidskosten toegerekend. Er zijn inmiddels loonwerkers die een doseersysteem hebben geïnstalleerd op de toedieningsapparatuur. De kosten bedragen € 1000,- tot € 1500,-. De afschrijving op een dergelijke investering zal niet of nauwelijks tot een verhoging van het loonwervtarief leiden. De kosten van € 20,- per ha dienen terugverdiend te worden door een opbrengstverhoging van 200 kilogram droge stof per ha of een kunstmestbesparing van 30 kg N. De gerapporteerde resultaten van proefvelden laten bij aardappelen een besparing zien van 10 kg N, en bij grasland geen opbrengsteffect. Met deze uitgangspunten blijkt dat de kosten niet of nauwelijks worden terugverdiend.

5.2 Aanbevelingen

De potentiële emissiereductie door nitrificatieremmers ligt in de orde van 0,6 Mt CO₂-equivalenten. Maar deze schatting is omgeven door tal van onzekerheden over de effectiviteit en het toepassingsbereik. Vooral nog liggen de grootste kansen bij de toepassing in combinatie met kunstmest en dierlijke mest. Bij kunstmest is een reductie van 0,16 Mt CO₂-equivalenten mogelijk, en bij dierlijke mest zelfs 0,34 Mt CO₂-equivalenten. Het emissiereducerend potentieel van nitrificatieremmers is daarmee zeker perspectiefvol in vergelijking met andere lachgas-reductiemaatregelen.

Kosteneffectiviteit

Een succesvolle toepassing als reductiemaatregel is alleen mogelijk als de maatregel kosteneffectief is. Daarnaast is het noodzakelijk om het effect zichtbaar te maken in de nationale emissieregistratie. Toepassing in de nationale systematiek vergt een wetenschappelijk onderbouwde aanpassing van de emissiefactoren bij het gebruik van nitrificatieremmers. Vervolgens dient het gebruik van nitrificatieremmers via een monitoringssysteem betrouwbaar vastgelegd te kunnen worden. Daarbij dient onderscheid te worden gemaakt tussen nitrificatieremmers die al aan kunstmeststoffen zijn toegevoegd en nitrificatieremmers die op het boerenbedrijf worden toegevoegd aan mest.

Nitrificatieremmers zullen alleen toegepast worden als de kosten minimaal goedgemaakt worden door een stijging van de opbrengsten of een besparing op het kunstmestgebruik. Hoewel diverse studies wel opbrengstverhogingen aantonen, zijn de resultaten niet consistent. Daarnaast is het gebruik van nitrificatieremmers vooral getoetst in combinatie met ammoniummeststoffen. Indien er een verschuiving plaats gaat vinden van KAS naar meststoffen met een hoger aandeel ammonium, dan heeft dat gevolgen voor het verzurend effect. Dat dient gecompenseerd te worden met extra kalk, wat kosten met zich meebrengt, en een geringe verhoging van de emissie van CO₂ uit bekalking.

Uit de beschikbare resultaten van proefvelden blijkt dat de maatregel slechts in enkele situaties kostenneutraal is. In de meeste gevallen zullen de additionele kosten zo'n € 20,- per hectare bedragen.

Eventuele beleidsmaatregelen die de kosten voor het gebruik van stikstof verhogen, zoals een belasting op stikstof, kunnen het gebruik van nitrificatieremmers sneller lonend maken. Verder is het niet uit te sluiten dat een grootschaliger gebruik op termijn tot een kostenverlaging per eenheid product kan leiden.

Strategiekeuze

Voor de inzet van nitrificatieremmers zijn twee verschillende strategieën denkbaar, namelijk een zogenaamde 'no regret' strategie waarin bijvoorbeeld bij iedere toediening van kunstmest en dierlijke mest een nitrificatieremmer wordt toegediend, of een 'target' strategie waarbij de toediening alleen plaatsvindt onder emissiegevoelige omstandigheden. De eerste strategie garandeert een maximale emissiereductie tegen

relatief hoge kosten, die dan als een soort verzekeringspremie moeten worden beschouwd. De tweede strategie is kosteneffectiever, maar kan uiteindelijk tot een lagere emissiereductie leiden.

Het ligt voor de hand om als eerste een mogelijke toepassing in combinatie met kunstmest en dierlijke mest verder te verkennen. Immers, er zijn meststoffen voorhanden waaraan al een nitrificatieremmer is toegevoegd en er zijn losse nitrificatieremmers beschikbaar voor toevoeging aan dierlijke mest. Tot op heden zijn nog geen veldexperimenten uitgevoerd waarin de lachgasemissie is gemeten. Het onderzoek dient er onder andere op gericht te zijn om, met het oog op de tweede strategie, die omstandigheden te identificeren die een maximale werking van de nitrificatieremmer geven. Het is aan te bevelen om bij toekomstige veldexperimenten eveneens de agronomische (droge-stofopbrengsten en stikstofopname van het gewas), milieukundige (nitraatuitspoeling, ammoniakemissie) en eco-toxicologische (ophoping, uitspoeling) parameters te meten. Daarmee wordt meteen duidelijk of de maatregel economisch kan worden toegepast en milieukundig verantwoord is. Het meten van de nitraatuitspoeling is noodzakelijk om een betere inschatting te kunnen maken van het effect op indirecte lachgasemissies. Bij een eventuele grootschalige inzet van nitrificatieremmers is het zinvol om een lange termijn monitoring op te zetten om eventuele nadelige effecten waar te kunnen nemen. Dat is een belangrijke voorwaarde voor toepassing in de praktijk. Op dit moment lijkt het niet zinvol om het gebruik van nitrificatieremmers bij andere stikstofbronnen dan kunstmest en dierlijke mest verder te verkennen.

Internationale aanpak

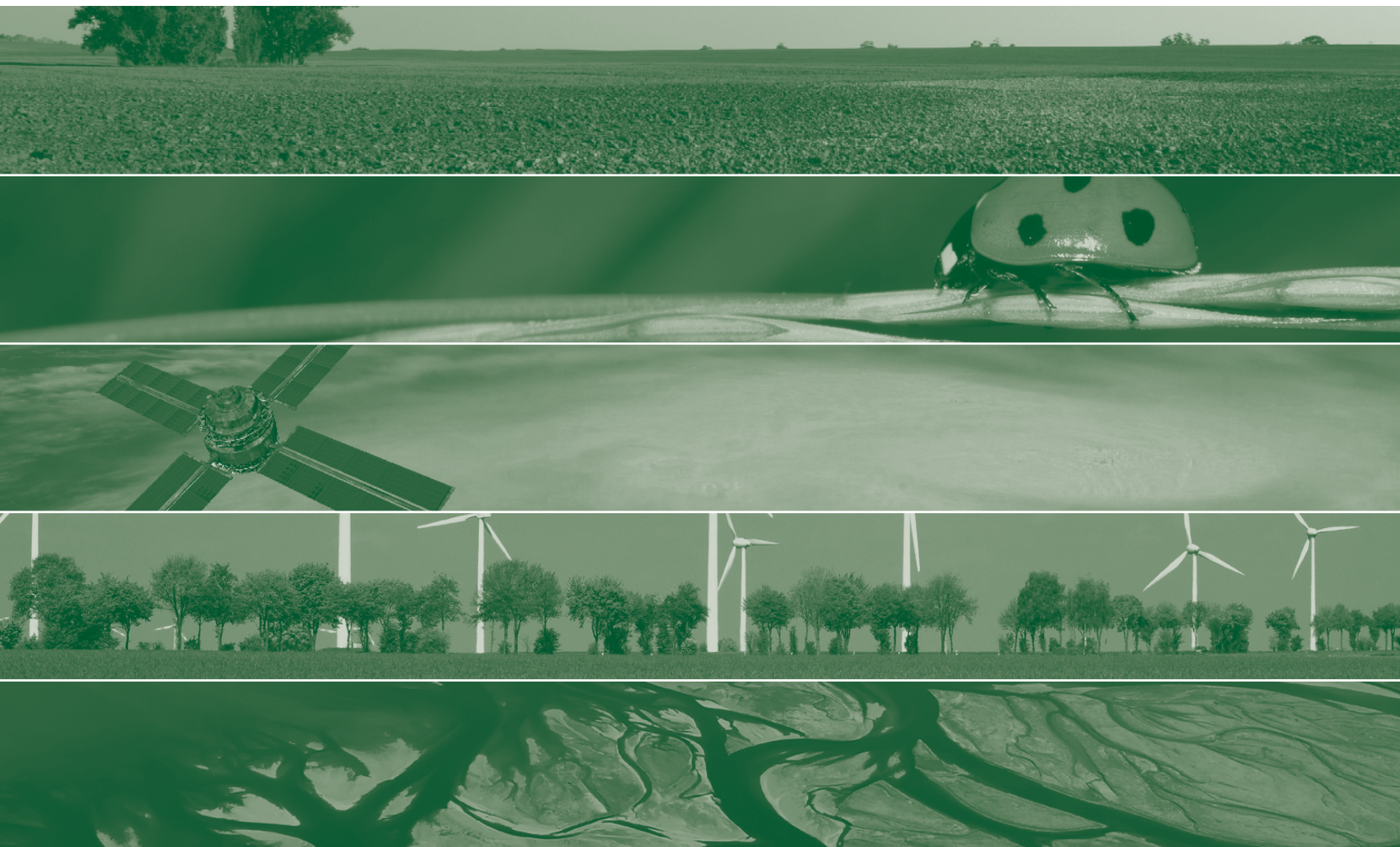
Momenteel spelen vergelijkbare vragen over het effect op de lachgasemissie en kosteneffectiviteit ook in de ons omringende landen (Moran et al., 2008) en zeker ook in Nieuw Zeeland. Natuurlijk kan er worden geleerd van de ervaringen in andere landen en van experimenten en waarnemingen. Wellicht kan een gezamenlijke internationale aanpak van de vragen voordelen bieden, bijvoorbeeld door waarnemingen in meerdere landen tegelijk en onder vergelijkbare omstandigheden en protocollen uit te voeren. Op deze manier worden experimenten gerepliceerd en is het waarschijnlijker dat de resultaten over effecten, stikstofgebruik en meeropbrengsten goed kunnen worden geduid.

Literatuur

- Asing, J., S. Saggar, J. Singh and N.S. Bolan, 2008. *Assessment of nitrogen losses from urea and an organic manure with and without nitrification inhibitor, dicyandiamide, applied to lettuce under glasshouse conditions*. Csiro Publishing, pp. 535-541.
- Bakker, R.F. en D.J. den Boer, 2003. *Toevoeging van nitrificatieremmer aan dunne rundermest op grasland 2003. Literatuurstudie en oriënterend veldonderzoek*. NMI rapport 20, pp. 34.
- Barth, G., S. von Tucher and U. Schmidhalter, 2008. Effectiveness of 3,4-dimethylpyrazole phosphate as nitrification inhibitor in soil as influenced by inhibitor concentration, application form, and soil matric potential. *Pedosphere* 18: 378-385.
- Boeckx, P., X. Xu and O. van Cleemput, 2005. *Mitigation of N₂O and CH₄ emission from rice and wheat cropping systems using dicyandiamide and hydroquinone*. Springer, pp. 41-49.
- Cameron, K.C. and H.J. Di, 2004. Nitrogen leaching losses from different forms and rates of farm effluent applied to a Templeton soil in Canterbury, New Zealand. *N. Z. J. Agric. Res.* 47: 429-437.
- Clough, T.J., H.J. Di, K.C. Cameron, R.R. Sherlock, A.K. Metherell, H. Clark and G. Rys, 2007. Accounting for the utilization of a N₂O mitigation tool in the IPCC inventory methodology for agricultural soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 78: 1-14.
- De Klein, C.A.M. and R.J. Eckard, 2008. *Targeted technologies for nitrous oxide abatement from animal agriculture*. Csiro Publishing, pp. 14-20.
- Den Boer, D.J. en R.F. Bakker, 2002. *Meer gras met minder stikstof; voorjaarsmeststoffen op grasland, 2001 en 2002*. NMI, Wageningen. Koeien en Kansen Rapport nr. 15.
- Di, H.J. and K.C. Cameron, 2004. Effects of temperature and application rate of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), on nitrification rate and microbial biomass in a grazed pasture soil. *Aust. J. Soil Res.* 42: 927-932.
- Di, H.J. and K.C. Cameron, 2006. Nitrous oxide emissions from two dairy pasture soils as affected by different rates of a fine particle suspension nitrification inhibitor, dicyandiamide. *Biol. Fertil. Soils* 42: 472-480.
- Di, H.J., K.C. Cameron and R. Christie, 2008. *Improving Nitrogen Cycling Efficiency of Intensively Grazed Pastures Using Nitrification Inhibitors*. IRA Crossroads Asia Pacific conference (http://www.fertilizer.org/ifacontent/download/15807/227888/version/1/file/2008_melbourne_di.pdf)
- Di, H.J. and K.C. Cameron, 2008. Sources of nitrous oxide from N-15-labelled animal urine and urea fertiliser with and without a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD). *Aust. J. Soil Res.* 46: 76-82.
- Di, H.J., K.C. Cameron and R.R. Sherlock, 2007. Comparison of the effectiveness of a nitrification inhibitor, dicyandiamide, in reducing nitrous oxide emissions in four different soils under different climatic and management conditions. *Soil Use Manage.* 23: 1-9.
- Hadi, A., O. Jumadi, K. Inubushi and K. Yagi, 2008. Mitigation options for N₂O emission from a corn field in Kalimantan, Indonesia. *Soil Sci. Plant Nutr.* 54: 644-649.
- Hatch, D., H. Trindade, L. Cardenas, J. Carneiro, J. Hawkins, D. Scholefield and D. Chadwick, 2005. Laboratory study of the effects of two nitrification inhibitors on greenhouse gas emissions from a slurry-treated arable soil: impact of diurnal temperature cycle. *Biol. Fertil. Soils* 41: 225-232.

- Hergoualc'h, K., U. Skiba, J.M. , Harmand. and R. Oliver, 2007. Processes responsible for the nitrous oxide emission from a Costa Rican Andosol under a coffee agroforestry plantation. *Biol. Fertil. Soils* 43: 787-795.
- Herrmann, A.M., E. Witter and T. Katterer, 2007. Use of acetylene as a nitrification inhibitor to reduce biases in gross N transformation rates in a soil showing rapid disappearance of added ammonium. *Soil Biol. Biochem.* 39: 2390-2400.
- Jumadi, O., Y. Hala, A. Muis, A. Ali, M. Palennari, K. Yagi and K. Inubushi. 2008. Influences of chemical fertilizers and a nitrification inhibitor on greenhouse gas fluxes in a corn (*Zea mays* L.) field in Indonesia. *Microbes Environ.* 23: 29-34.
- Kelliher, F.M., T.J. Clough and H. Clark, 2007. *Developing revised emission factors for nitrous oxide emissions from agricultural pasture treated with nitrification inhibitor*. MAF.
- Kelliher, F.M., T.J. Clough, H. Clark, G. Rys and J.R. Sedcole, 2008. The temperature dependence of dicyandiamide (DCD) degradation in soils: A data synthesis. *Soil Biol. Biochem.* 40: 1878-1882.
- Kelly, K.B., F.A. Phillips and R. Baigent, 2008. *Impact of dicyandiamide application on nitrous oxide emissions from urine patches in northern Victoria, Australia*. Csiro Publishing Csiro Publishing, pp. 156-159.
- Malla, G., A. Bhatia, H. Pathak , S. Prasad, N. Jain and J. Singh, 2005. Mitigating nitrous oxide and methane emissions from soil in rice-wheat system of the Indo-Gangetic plain with nitrification and urease inhibitors. *Chemosphere* 58: 141-147.
- Meijide, A., J.A. Diez, L. Sanchez-Martin, S. Lopez-Fernandez and A. Vallejo, 2007. Nitrogen oxide emissions from an irrigated maize crop amended with treated pig slurries and composts in a Mediterranean climate. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121: 383-394.
- Menendez, S., P. Merino, M. Pinto, C. Gonzalez-Murua and J.M. Estavillo, 2006. 3,4-dimethylpyrazol phosphate effect on nitrous oxide, nitric oxide, ammonia, and carbon dioxide emissions from grasslands. *J. Environ. Qual.* 35: 973-981.
- Menendez, S., R. Merino, M. Pinto, C. Gonzalez-Murua and J.M. Estavillo, 2009. Effect of N-(n-butyl) Thiophosphoric Triamide and 3,4 Dimethylpyrazole Phosphate on Gaseous Emissions from Grasslands under Different Soil Water Contents. *J. Environ. Qual.* 38: 27-35.
- Merino, P., S. Menendez, M. Pinto, C. Gonzalez-Murua and J.M. Estavillo, 2005. 3,4-dimethylpyrazole phosphate reduces nitrous oxide emissions from grassland after slurry application. *Soil Use Manage.* 21: 53-57.
- Mkhabela, M.S., R. Gordon, D. Burton, A. Madani and W. Hart, 2006a. Effect of lime, dicyandiamide and soil water content on ammonia and nitrous oxide emissions following application of liquid hog manure to a marshland soil. *Plant Soil* 284: 351-361.
- Mkhabela, M.S., R. Gordon, D. Burton, A. Madani, W. Hart and A. Elmi. 2006b. Ammonia and nitrous oxide emissions from two acidic soils of Nova Scotia fertilised with liquid hog manure mixed with or without dicyandiamide. *Chemosphere* 65: 1381-1387.
- Moran, D., M. MacLeod, E. Walla, V. Eory, P. Pajot, R. Matthews, A. McVittie , A., Barnes, B. Rees, A. Moxey, A. Williams and P. Smith, 2008. UK Marginal Abatement Cost Curves for the Agriculture and Land Use, Land-Use Change and Forestry Sectors out to 2022, with Qualitative Analysis of Options to 2050. Final Report to the Committee on Climate Change
- Saggar, S., K.R. Tate, G. Giltrap and J. Singh, 2008. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide and methane in New Zealand terrestrial ecosystems and their mitigation options: a review. *Plant Soil* 309: 25-42.

- Singh, S. and A. Verma, 2007. Environmental review: The Potential of Nitrification Inhibitors to Manage the Pollution Effect of Nitrogen Fertilizers in Agricultural and Other Soils: A Review. *Environmental Practice* 9: 266-279.
- Singh, J., S. Saggar and N.S. Bolan, 2009. Influence of dicyandiamide on nitrogen transformation and losses in cow-urine-amended soil cores from grazed pasture. *Anim. Prod. Sci.* 49: 253-261.
- Singh, J., S. Saggar, D.L. Giltrap and N.S. Bolan, 2008. *Decomposition of dicyandiamide (DCD) in three contrasting soils and its effect on nitrous oxide emission, soil respiratory activity, and microbial biomass - an incubation study*. Csiro Publishing, pp. 517-525.
- Smith, L.C., C.A.M. de Klein and W.D. Catto, 2008a. Effect of dicyandiamide applied in a granular form on nitrous oxide emissions from a grazed dairy pasture in Southland, New Zealand. *N. Z. J. Agric. Res.* 51: 387-396.
- Smith, L.C., C.A.M. de Klein, R.M. Monaghan and W.D. Catto, 2008b. *The effectiveness of dicyandiamide in reducing nitrous oxide emissions from a cattle-grazed, winter forage crop in Southland, New Zealand*. Csiro Publishing Csiro Publishing, pp. 160-164.
- Suter et al., 2006. *A Review of Nitrification Inhibitors and Other Nitrogen Cycle Modifiers in New Zealand Pastoral Agriculture*.
- Tao, X., T. Matsunaka and T. Sawamoto, 2008. *Dicyandiamide application plus incorporation into soil reduces N₂O and NH₃ emissions from anaerobically digested cattle slurry*. Csiro Publishing Csiro Publishing, pp. 169-174.
- Vallejo, A., L. Garcia-Torres, J.A. Diez, A. Arce and S. Lopez-Fernandez S. 2005. Comparison of N losses (NO₃⁻, N₂O, NO) from surface applied, injected or amended (DCD) pig slurry of an irrigated soil in a Mediterranean climate. *Plant Soil* 272: 313-325.
- Verma, A., L. Tyagi and S.N. Singh, 2008. Attenuation of N₂O emission rates from agricultural soil at different dicyandiamide concentrations. *Environ. Monit. Assess.* 137: 287-293.
- Watanabe, T., 2006. Influence of 2-chloro-6 (trichloromethyl) dicyandiamide on nitrous oxide emission conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 52: 226-232.
- Zaman, M., M.L. Nguyen, J.D. Blennerhassett and B.F. Quin, 2008. Reducing NH₃, N₂O and NO₃-N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers. *Biol. Fertil. Soils* 44: 693-705.



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

Meer informatie: www.alterra.wur.nl