Vlaanderen
is landbouw & visserij

ILVO Mededeling D/2023/02
Januari 2023

Ureaseremmers als ammoniak reducerende maatregel in melkveestallen

Veiligheidsaspecten – Marktbeschikbaarheid in Vlaanderen - Toepassingsmethoden

ILVO
Instituut voor Landbouw-,
Visserij- en Voedingsonderzoek

www.ilvo.vlaanderen.be

Dit onderzoek werd uitgevoerd door ILVO in opdracht van Boerenbond.

Ureaseremmers als ammoniak reducerende maatregel in melkveestallen

ILVO MEDEDELING D/2023/02

Januari 2023

ISSN 1784-3197

Wettelijk Depot: D/2023/10.970/02

Auteurs

Chari Vandenbussche

Eva Brusselman

ILVO

Ureaseremmers als ammoniak reducerende maatregel in melkveestallen

Veiligheidsaspecten – Marktbeschikbaarheid in Vlaanderen - Toepassingsmethoden

Inhoudsopgave

1 Inleiding 5
2 Onderzoek naar de werking van ureaseremmers 6
2.1 Bodemtoepassingen 6
2.2 Toepassingen op mest en in de stal 6
3 Veiligheid en wetgeving 10
3.1 Veiligheid voor mens, dier en milieu 10
3.2 Veiligheid in de voedselketen 10
3.3 Veiligheid van infrastructuur 12
3.4 Ureaseremmers als additief in bemesting 12
4 Marktbeschikbaarheid 14
5 Toepassingsmethoden 15
5.1 Mestrobot 15
5.2 Vernevelings- en sproeisystemen 15
5.3 Huidige status en verdere onderzoeksmogelijkheden 16
5.4 Huidige status 16
5.4.1 NBPT 16
5.4.2 NPPT 17
5.4.3 PPDA 17
5.5 Mogelijkheden voor verder onderzoek 18
5.5.1 Gebruik bovenop de vloer 18
5.5.2 Gebruik in de mestput 18
5.5.3 Mestcontainertesten 19
6 Referenties 20

1 Inleiding

De bron voor de emissie van ammoniak uit veestallen is urine. Urine bevat ureum dat onder invloed van het enzym urease wordt afgebroken via hydrolyse. Dit vormt ammoniumcarbonaat, een stof die onstabiel is en verder afbreekt tot ammoniak, koolstofdioxide en water.

Een ureaseremmer is een chemische verbinding die ervoor zorgt dat de werking van het urease enzym afgeremd wordt waardoor er uiteindelijk minder ammoniak kan vervluchtigen. Al sinds 1935 wordt het potentieel van ureaseremmers onderzocht. Hierbij werd vooral getracht om het vervluchtigen van stikstof bij bemesting met ureum op het land tegen te gaan. Er is ook beperkt onderzoek aanwezig waarbij het potentieel van ureaseremmers in de veeteeltsector bekeken werd. Terwijl er voor het gebruik als additief in bemesting al duizenden stoffen getest, gepatenteerd en sommige commercieel beschikbaar gemaakt zijn, staat het gebruik van ureaseremmers in de stal, daarentegen, nog meer in de kinderschoenen. Bij het zoeken naar mogelijke ureaseremmers voor gebruik in de stal kan er dus gebruik gemaakt worden van reeds gekende stoffen uit de bemestingsonderzoeken. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met de verschillende omstandigheden tussen het gebruik van ureaseremmers op het land en in de stal. Terwijl het in de bodem enkele dagen duurt voor het toegediende ureum gehydrolyseerd is, gebeurt dit op een stalvloer al binnen enkele uren tot een dag. Daarnaast is er in de stal een continue afzetting van urine en dus ureum op de stalvloer, wat het chronisch gebruik van ureaseremmers noodzakelijk maakt. Door dit chronische gebruik moet er extra gelet worden op de toxiciteit van de gebruikte producten voor mens, dier, plant en milieu.

In 2008 werd een verkennend onderzoek uitgevoerd rond het gebruik van ureaseremmers in melkveestallen in Nederland (Smits & Bokma, 2008). Ureaseremmers leken toen een veelbelovende methode om de ammoniakemissies in de stal te verminderen, maar er was een gebrek aan onderzoek in Nederlandse praktijkomstandigheden. Ook de kosteneffectiviteit was onduidelijk. Deze wordt grotendeels bepaald door de prijs van de ureaseremmer, het mestverwijderingssysteem en de doseerinstallatie. Daarnaast is de veiligheid van de ureaseremmers voor het gebruik bij dieren een cruciaal punt om de toepassing ervan te laten slagen. Ook Byrne et al. (2020) onderzochten het potentieel van ureaseremmers in de veeteelt. Het toepassingsgebied was hierbij het gebruik van commercieel beschikbare ureaseremmers in begraasde weides. Ook in deze publicatie wordt veiligheid bij het gebruik van deze stoffen als belangrijk aandachtspunt vermeld.

In dit rapport geven we eerst een beknopt overzicht van het reeds uitgevoerde onderzoek rond ureaseremmers (2 Onderzoek naar de werking van ureaseremmers). In Hoofdstuk 3 gaan we dieper in op de veiligheid en wetgeving bij het gebruik van ureaseremmers in een melkveestal. Vervolgens overlopen we mogelijkse toepassingsmethodes om de applicatie van deze ureaseremmers in de stal te automatiseren. In het laatste hoofdstuk (6 Huidige status en verdere onderzoeksmogelijkheden) wordt de huidige status van de ureaseremmers die ingezet kunnen worden in melkveestallen besproken en bekijken wat de verdere onderzoeksmogelijkheden zijn.

2 Onderzoek naar de werking van ureaseremmers

2.1 Bodemtoepassingen

In de laatste 90 jaar zijn heel wat stoffen getest als ureaseremmers en er wordt nog steeds gezocht naar nieuwe en betere alternatieven. In een boek geschreven door Kiss and Simihaian (2002) werd uitgebreid gerapporteerd over meer dan 15.000 verschillende geteste of gepatenteerde stoffen voor gebruik als ureaseremmer in de bodem. Door de grote verscheidenheid aan onderzoeksopstellingen en omgevingscondities kunnen de resultaten van verschillende onderzoeken soms anders of zelfs tegenstrijdig zijn. Allerlei condities zoals pH, bodem- of mestsamenstelling, ureumgehalte, concentratie aan ureaseremmer, temperatuur, duur van de proef, vochtgehalte, e.d. kunnen de effectiviteit van de verschillende stoffen beïnvloeden. Dit maakt het vergelijken van verschillende studies en resultaten niet evident. Vaak kan het bepalen van het mechanisme waarmee de onderzochte stof urease inhibeert of onderzoek naar de stabiliteit van de stof inzicht geven over waarom dit zo is. Algemeen gezien kunnen we stellen dat de inhibitie van urease toeneemt met een hoger aandeel zand in de grond en het gebruik van een grotere concentratie ureaseremmer. De effectiviteit neemt dan weer af bij hogere temperatuur, incubatietijd, urease activiteit, kleigehalte, organisch koolstofpercentage, de hoeveelheid ureum of aanwezige stikstof. De mate van inhibitie van urease is niet eenzijdig gelinkt aan de pH. Toch kan pH een grote invloed hebben aangezien de activiteit en de stabiliteit van de verschillende ureaseremmers hieraan gelinkt kan zijn. Via vergelijkende studies die verschillende componenten testen in dezelfde omstandigheden kan er een duidelijker beeld verkregen worden van de effectiviteit van de verschillende ureaseremmers ten opzichte van elkaar. Toch kunnen sommige gekozen omstandigheden net nadelig of voordelig zijn voor bepaalde componenten. Enige voorzichtigheid in de interpretatie van de resultaten blijft dus noodzakelijk.

Bij een langdurig onderzoek op bodemstalen door Hartbrich et al. (1978) werden op de korte termijn (1-2 dagen) zeer goede inhibities van ammoniakemissies (> 90%) gehaald door verschillende quinones, de meeste maleimides, enkele dithiocarbamaten, tetramehtylthiuram sulfide, 2-mercapto-5-methylmercapto-1,3,4-thiadiazole, dazomet en PPDA (phenyl phosphorodiamidate). Vooral PPDA, 2,5-dimethyl-benzoquinone, dazomet en enkele maleimides toonden een langdurige werking tot 12 of 14 dagen na toediening. Na de jaren '80 werden ook nog andere interessante stoffen onderzocht zoals NBPT (N-(n-Butyl)thiophosphoric triamide), NPPT (N-(n-Propyl)thiophosphoric triamide), en 2-NPT (N-(2-nitrophenyl) phosphoric triamide). Deze toonden veelbelovende resultaten in de bodem en werden later gecommercialiseerd als ureaseremmend additief voor meststoffen. In Tabel 1 staat een kort overzicht van de meest gekende en in de prakrijk toegepaste ureaseremmers en een samenvatting van hun werkzaamheid in bodem en/of in de stal. In de paragraaf hierboven werden nog stoffen met potentieel als ureaseremmer vermeld. Deze lijken echter niet verder onderzocht te zijn en/of werden niet commercieel beschikbaar gemaakt als ureaseremmer. Sommige van deze stoffen worden wel gebruikt als nematocide, fungicide of bacteriocide.

2.2 Toepassingen op mest en in de stal

Het meeste onderzoek naar ureaseremmers is gebeurd in de context van het gebruik in de bodem. Wanneer enkel gekeken wordt naar onderzoek op mest of in de stal zijn NBPT, PPDA en CHPT de meest voorkomende stoffen. In een laboproef op runderdrijfmest door Varel et al. (1997) werd aangetoond dat PPDA beter presteerde dan NBPT en NBPT beter dan CHPT bij een dosering van 10 mg ureaseremmer per liter drijfmest. Ook in een praktijkonderzoek in feedlots in de Verenigde Staten kon aangetoond worden dat bij applicatie van NBPT meer resterend ureum in de mest aanwezig was na 4 dagen dan bij applicatie van CHPT (Varel et al., 1999). Bij onderzoek op

varkensmest, leek CHPT dan weer een betere kandidaat dan PPDA, maar niet bij rundermest (Varel, 1997). **Vooral het herhaald toedienen van de ureaseremmers lijkt een cruciaal element te zijn om ureum vast te houden en dus de ammoniakuitstoot te verminderen.**

Door zijn snelle en effectieve werking is PPDA een goede kandidaat voor gebruik in een stalomgeving. PPDA kan een langdurige werking hebben, maar hoe lang het product zal werken is afhankelijk van pH, licht en temperatuur. PPDA is zowel gevoelig voor te hoge als te lage pH en is het meest stabiel rond pH 7. Verder breekt het sneller af bij veel licht en bij hogere temperaturen zoals het geval is in de zomer. Door herhaalde toediening op de stalvloer kan de invloed van deze factoren beperkt worden. In een onderzoek door Hagenkamp-Korth, Haeussermann, et al. (2015) met dagelijkse toepassingen van 2,5mg/m^2 PPDA-inhibitor op drie verschillende melkveestallen gedurende 3 seizoenen kon de urease-activiteit gemiddeld met 80% verminderd worden, met een lagere graad van inhibitie in de zomer (66-78%) dan in de winter (96%).

In een recent praktijkonderzoek met PPDA werd de jaarlijkse ammoniakemissiereductie ingeschat op 10-31% in melkveestallen met mechanische ventilatie en een roostervloer (Bobrowski, van Dooren, et al., 2021). Bij een gelijkaardige studie bij 2 praktijkstallen met een volle vloer en natuurlijke ventilatie werd een ammoniakemissiereductie van 40-68% bekomen, met een geschatte jaarlijkse emissiereductie tot 58% (Bobrowski, Willink, et al., 2021) wanneer dagelijks 2,5 mg Inhibitor K verneveld werd op de stalvloer. In beide onderzoeken werden metingen uitgevoerd in overeenstemming met het VERA protocol[1] en werd een case-control onderzoek in de tijd uitgevoerd, met metingen in de winter, de zomer en in een tussenseizoen. Ook de urease activiteit werd bepaald in de referentieperiode en tijdens de behandelingsperiode. Hierbij werd een gemiddelde verminderde urease-activiteit van 79-113% gemeten bij de stallen met volle vloer en natuurlijke ventilatie en 90-149% bij de roostervloer en mechanische ventilatie.

In Spanje werd een onderzoek uitgevoerd in een natuurlijk geventileerde varkensstal waarbij twee compartimenten gebruikt werden in een case-control setting (Calvet et al., 2022). Beide afdelingen hadden een gescheiden mestput die geleegd werd voor het begin van de proef. In elke afdeling werden 70 gelten met een gemiddeld startgewicht van 70kg geplaatst. In de case afdeling werd, na een opstartperiode van 2 dagen zonder behandeling, gedurende 12 dagen dagelijks 0.17mL/m^2 inhibitor EBN (25% w/v phosphorodiamidate, verdund tot 0,2% met water) verneveld in de mestput. Dit gebeurde via manuele toepassing tussen de spleten in de roosters met een ruggedragen drukspuit. Gedurende deze 12 dagen werd een gemiddelde ammoniakemissiereductie bekomen van 29% ten opzichte van de controleafdeling. De proef werd uitgevoerd tijdens de zomer.

Een gelijkaardig onderzoek werd uitgevoerd met Inhibitor K in Duitsland in een vleesvarkensbedrijf met volle roostervloer en mechanische ventilatie (Schulte et al., 2022). De experimenten werden uitgevoerd in 5 identieke afdelingen met 4 hokken per afdeling en 10 varkens per hok. In totaal waren er 4 test periodes van 32 dagen (bestaande uit 14 dagen referentie, 4 dagen applicatie en 14 dagen uitloopperiode), verspreid over 3 afmestrondes en alle seizoenen in de periode 2019-2020. Hierdoor was het mogelijk om zowel een case-control doorheen de tijd als een directe case-control over de verschillende compartimenten uit te voeren. In 3 afdelingen werd tijdens de applicatieperiode dagelijks respectievelijk 10, 25 of 50 mg/m ureaseremmer op de roosters verdeeld via een ruggedragen drukspuit. In 1 van de afdelingen werd enkel met water gespoten, in de laatste afdeling werd niets toegepast (controle). Hieruit bleek dat het vernevelen van water geen effect had op de ammoniakemissies, 10 mg/m ureaseremmer zorgde voor een ammoniakemissiereductie van 11% en 25 mg/m voor 21%. Het verder verhogen van de toegediende

[1] https://www.vera-verification.eu/test-protocols/

hoeveelheid ureaseremmer tot 50 mg/m zorgde niet voor een verdere verlaging van de ammoniakemissie. Wel zorgde het toedienen van de hoogste concentratie (50mg/m^2) voor een langdurigere inhibitie tot 4 dagen na de laatste toediening. Het is duidelijk dat een hogere dosis per m nodig is voor varkens dan voor koeien. Hiervoor zijn volgende verklaringen mogelijk: varkens hebben een kleiner loopoppervlak, ze hebben een hogere stikstofuitstoot en de temperatuur in de stal zal veelal hoger liggen dan bij koeien.

Ook NBPT lijkt een goede kandidaat door zijn langdurig sterke werking in de bodem. NBPT heeft wel een tragere opstart omdat het eerst aeroob omgezet moet worden tot het effectievere NBPTo. Het effect van deze trage opstart bij toepassing op een stalvloer zou nog verder onderzocht moeten worden. Daarnaast is het waarschijnlijk dat NBPT minder werkzaam zal zijn in anaerobe omstandigheden, zoals gemengd in een mestput. Een ammoniakemissie-reductie van 49-66% werd bekomen bij het gebruik van 1-2 kg NBPT/ha met een herhaalbehandeling elke 8 dagen in een labotest waarbij de afzetting van urine op een mestoppervlak werd gesimuleerd (Parker et al., 2005). In een setting met emissiekamers kon een reductie van ammoniakemissie van 26% tot 33% bekomen worden bij een 4-daags herhaalde toepassing van NBPT (Parker et al., 2011). In een 42 dagen durend onderzoek door Parker et al. (2016) werd 2 tot 40 kg NBPT/ha toegepast in een wekelijkse doseringssysteem bij 8 feedlot paddocks. De emissiemetingen waren niet consistent genoeg om een significant verschil te geven, maar er werd respectievelijk 9% (niet significant) en 20% meer stikstof teruggevonden in de verzamelde mest samples van respectievelijk de behandelde paddock met wekelijkse toediening van 2 kg NBPT/ha en de paddock met een oplopende toepassingsdosis (1kg/ha op dag 0 en dag 7; 4kg/ha op dag 14 en 40kg/ha op dag 18) dan in die van de controle. Feedlots komen niet voor in Vlaanderen. Voor ureaseremmers hebben ze ook ongunstige omstandigheden door directe weersinvloeden zoals direct zonlicht, regen en wind en de ondergrond die bestaat uit zand en mest. De kans bestaat dat de resultaten bij het gebruik van NBPT op stalvloeren in Vlaanderen gunstiger zouden kunnen zijn dan deze die bereikt werden in de feedlots in de Verenigde Staten. In een vergelijkende test door Reinhardt-Hanisch et al. (2009) werd Agrotain® (NBPT) vergeleken met enkele nieuwe urease inhibitoren. Hierbij werden de ureaseremmers toegevoegd aan runderdrijfmest in een containeropstelling. Vervolgens werd gedurende 5 dagen elke 24 uur 100ml ureumoplossing toegevoegd (20mg/l) toegevoegd. Na 7 dagen had de beste inhibitor (bij een concentratie van 0.1%) slechts 15% van de toegevoegde ureum omgezet naar ammoniak en ammonium. Bij dezelfde concentratie NBPT (Agrotain®) was dit 76%.

Een overzicht van de meest gekende ureaseremmers en de resultaten uit onderzoeken in praktijkomstandigheden op het veld en bij rundvee (waar beschikbaar) is te vinden in Tabel 1.

Tabel 1. Overzicht van gekende ureaseremmers en hun ammoniakreducerend potentieel vastgesteld in praktijkproeven bij bemesting op het veld en bij rundvee.

	Verminderde NH_3-emissies in praktijkomstandigheden	
Ureaseremmer	Bij rundvee	Op veld
NBPT (N-(n-butyl) thiophosphoric triamide)	49-66% in lab-simulatie van feedlots voor vleesvee (Parker et al., 2005)	53% (Cantarella et al., 2018)
NPPT (N-(propyl) thiophosphoric triamide)	/	50% (S. Li et al., 2015)
NBPT+NPPT	/	83% (Q. Li et al., 2015)
2-NPT (N-(2-nitrophenyl) phosphoric triamide)	/	26-83% (Ni et al., 2014)
PPDA (phenyl phosphorodiamidate)	Roostervloer: 10-31% (Bobrowski, van Dooren, et al., 2021) Volle vloer: 40-68%	Enkele bemesting: 97% 3-voudige bemesting: 51% (Rodgers et al. (1987))

	(Bobrowski, Willink, et al., 2021)	
HQ (Hydroquinone)	Weinig effect op NH_3-emissies, wel op NO_2 en CH_4 tijdens lab-simulatie (Liao et al., 2018)	30% (Park et al., 2021)

3 Veiligheid en wetgeving

Ureaseremmers zijn vooral gekend voor hun gebruik als bemestingsadditief. Wanneer ureaseremmers in de stal toegepast worden om de ammoniakemissies te verminderen, moet een veilig gebruik van het product gegarandeerd zijn. In een melkveestal met roostervloer wordt ingeschat dat ongeveer 60-70% van de ammoniak geproduceerd op de vloer en 30-40% afkomstig is uit de mestput (van den Bogaert & Boussery, 2020). Ureaseremmers hebben bijgevolg het grootste potentieel bij gebruik op de loopgedeeltes, waar de mest en urine achtergelaten worden. Wanneer ureaseremmers echter gebruikt worden bovenop de vloer, kunnen de dieren in contact komen met het toegepaste product om nadien in de mestput terecht te komen. Hierbij moet er dus rekening gehouden worden met mogelijke veiligheidsrisico's op verschillende vlakken en doorheen de volledige keten:

a) *Veiligheid voor mens en dier*
In eerste instantie mogen de stoffen niet acuut of chronisch schadelijk zijn voor de dieren of het personeel in de stal die met het product in contact kunnen komen.

b) *Veiligheid in de voedselketen*
Er mag geen ongewenste invloed zijn op vlees- of melkproducten door het gebruik van ureaseremmers in de stal.

c) *Veiligheid van (stal)infrastructuur*
De producten mogen geen negatieve inwerking hebben op de infrastructuur in de stal, een gevaar vormen in de mestput of een nadelig effect hebben op een eventuele vergister.

d) *Veiligheid bij gebruik als bemesting of bij compostering*
De ureaseremmer en hulpstoffen, evenals de eventueel resterende verbindingen mogen geen noemenswaardige schadelijke invloed hebben op het milieu wanneer de inhoud van de mestput gebruikt wordt als bemesting op het veld of verwerkt wordt.

3.1 Veiligheid voor mens, dier en milieu

In de Europese Economische Ruimte (EER) vallen alle gebruikte en verhandelde chemische stoffen onder de REACH-regelgeving (verordening 1907/2006). REACH staat voor registratie, evaluatie, autorisatie en beperking van chemische stoffen. Alle producenten of importeurs die meer dan 1 ton van een bepaalde chemische stof produceren of verhandelen moeten deze stof registreren in de REACH-databank. Dit houdt o.a. in dat een veiligheidsinformatieblad (Safety Data Sheet of SDS) opgesteld dient te worden om de risico's die verbonden zijn aan het gebruik van de stoffen te identificeren en te beheersen. Dit omvat toxiciteit (oraal, dermaal en via inhalatie), irritatie van huid en ogen, carcinogeniteit en voortplantingstoxiciteit. Het Europees Agentschap voor chemische stoffen (ECHA) en de lidstaten beoordelen de ingediende dossiers en kunnen indien nodig restricties voor het gebruik van de stof opleggen. Ook ureaseremmers vallen onder deze REACH-regelgeving. Elk afzonderlijk product zal, afhankelijk van de gebruikte actieve stof en eventuele oplosmiddelen en hulpstoffen, een eigen SDS-fiche moeten hebben die de directe risico's van het gebruik van het product en de juiste voorzorgsmaatregelen toelicht. Op basis hiervan zal duidelijk worden hoe het product veilig gebruikt kan worden.

3.2 Veiligheid in de voedselketen

Voor het gebruik van ureaseremmers bij voedselproducerende dieren is het belangrijk dat het product (ureaseremmer incl. andere stoffen in de formulering) geen toxische effecten op de dieren of personeel in de stal heeft (zie ook de voorgaande sectie) en geen gevaar inhoudt voor de

voedselveiligheid. In 2013 was er bezorgdheid over de voedselveiligheid in Nieuw-Zeeland toen residuen van de nitrificatie inhibitor dicyandiamide (DCD) teruggevonden werden in melkproducten nadat de koeien gegraasd hadden op een weide die behandeld was met deze nitrificatieremmer. Dit terwijl de stof slechts 2 maal per jaar toegepast wordt. DCD heeft een lage toxiciteit en de teruggevonden concentraties werden niet gevaarlijk geacht voor de volksgezondheid. Toch werd deze nitrificatieremmer uit voorzorg uit de handel gehaald. Om te vermijden dat een dergelijke situatie zich voordoet voor ureaseremmers, moet de regelgeving nauwgezet opgevolgd worden en moeten de risico's zo goed mogelijk ingeschat en beperkt worden.

Naast de algemene REACH-regelgeving is er geen specifieke regelgeving omtrent het gebruik van ureaseremmers bij (productie)dieren. Zolang er geen aangepaste regelgeving is, vallen ureaseremmers onder de algemene voedselveiligheidswetgeving, waaronder verordening nr. 852/2004 rond levensmiddelenhygiëne en verordening 853/2004 omtrent specifieke hygiënevoorschriften voor levensmiddelen van dierlijke oorsprong. In België is het Federaal Agentschap voor de Veiligheid van de Voedselketen (FAVV) verantwoordelijk voor de evaluatie van risico's, het controleren van producten en het crisismanagement voor de voedselketen. Na communicatie met deze dienst blijkt dat het toepassen van ureaseremmers in de stal een mogelijk risico vormt op uitwendige contaminatie van de dieren. Daardoor kan er niet uitgesloten worden dat een dergelijke toepassing geen risico's inhoudt voor de voedselveiligheid en dierengezondheid. Zonder een grondige risicoanalyse en goedkeuringsprocedure kan het FAVV een toepassing op staloppervlakken (met mogelijke contaminatie van aanwezige dieren) dan ook niet in overweging nemen.

Om toelating te krijgen om een product te gebruiken dat mogelijks in de voedselketen terecht kan komen, moet grondig onderzoek gebeurd zijn naar de risico's en mogelijke ongewenste gevolgen. In eerste instantie moet de toxiciteit van het gebruikte product voor mens, dier en milieu nagegaan worden via blootstellingsstudies. Aan de hand hiervan kunnen de maximumgrenzen voor aanwezige residuen in het milieu of in voedsel bepaald worden, de zogenaamde maximum residual levels (MRL) of tolerable daily intake (TDI). Hiermee wordt rekening gehouden om de "best practices" (zoals aangewezen toepassingsmethoden, de geschikte dosis, de frequentie van gebruik, e.d.) op te stellen en mee te nemen in de verdere risicoanalyse.

In het beste geval is er geen rechtstreeks contact tussen de dieren en de ureaseremmers, bijvoorbeeld wanneer het product rechtstreeks in de mestput gebruikt wordt. In dat geval volstaat het om via de SDS-fiche de veiligheid van het product na te gaan. Anders zal er moeten aangetoond worden dat de kans op absorptie of consumptie van het product door de dieren minimaal is en er dus ook geen risico is dat de stof of zijn residuen in het dier en bijgevolg zijn dierlijke producten terechtkomen. Wanneer dit wel zo is, zal ingeschat moeten worden welke dosissen opgenomen kunnen worden. Hierbij wordt uitgegaan van een worst-case scenario. Aan de hand hiervan moet bepaald worden welke risico's hieraan verbonden zijn voor het dier en of er residuen in melk en vlees terug te vinden zijn. Daarvoor is het belangrijk om ook te beschikken over goede detectiemethoden die deze stoffen kunnen opsporen in voedselmatrices en in het milieu. Melk bevat bijvoorbeeld veel componenten, zoals vet, eiwitten en suikers, die een correcte analyse kunnen verstoren. Zo is er bijna altijd een voorbereidende procedure nodig van het staal om deze residuen te elimineren voor de start van de analyse. Het is ook belangrijk dat, mochten er resterende inhibitors teruggevonden worden in de melk of het vlees, er onderzocht wordt welke effecten de daaropvolgende verwerkingsstappen voor consumptie (zoals verwarming, verdamping,...) hebben op deze componenten en afgeleide chemische stoffen die in het product kunnen voorkomen.

Het is duidelijk dat er een lange procedure van onderzoeken, testen en analyses nodig zijn voor het opstellen van een aanvraagdossier voor de toepassing van een ureaseremmend product in de stal. Hoewel er geen specifieke template beschikbaar is voor dit dossier bij het FAVV, kan wel gekeken worden naar de "Guidance for the preparation of dossiers for zootechnical additives" (EFSA Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed et al., 2012) en het meer recente, maar minder toepasselijke "Scientific Guidance for the submission of dossiers on Food Enzymes" (EFSA Panel on Food Contact Materials et al., 2021), die uitgegeven werden door het Europese Agentschap voor Voedselveiligheid (EFSA). Dergelijk dossier kan ingediend worden bij het wetenschappelijk comité van het FAVV ter beoordeling van het product.

3.3 Veiligheid van infrastructuur

Er is geen specifieke regelgeving over welke stoffen en producten gebruikt mogen worden in een stal. Naast de veiligheid van gebruik voor mens, dier en milieu, is het wel belangrijk dat de gebruikte stof geen nadelige effecten heeft op de infrastructuur in de stal. Hierbij kunnen we denken aan corrosie van metalen, aantasting van beton of rubberen vloerelementen, en dergelijke. Daarnaast is het belangrijk dat de gebruikte producten niet bijdragen aan potentieel ontploffingsgevaar in de mestput. Informatie hieromtrent zal in de SDS-fiche van het product teruggevonden kunnen worden.

daarnaast is het ook belangrijk dat de veiligheid gegarandeerd blijft in bijkomende infrastructuur, zoals een vergister. In een onderzoek door Hagenkamp-Korth, Ohl, et al. (2015) bleek er geen negatief effect te zijn van het toevoegen van verschillende concentraties aan ureaseremmer (Inhibitor K) op de biogas- of methaanproductie. Onderzoek naar het gebruik van ureaseremmers in compostering, tonen een verminderde ammoniakvorming en verhoogde stikstofinhoud van het eindproduct aan. Het toevoegen van ureaseremmer zorgde voor een verlaagde enzymactiviteit in het thermofiele stadium en verhoogde de activiteit in de rijpingsfase (Jiang et al., 2020).

3.4 Ureaseremmers als additief in bemesting

Aangezien ureaseremmers die verneveld worden op de vloer of in de mestput in de mest terecht komen en dus ook mee op het veld verspreid worden bij bemesting, moet ook de veiligheid en regelgeving als mestadditief nagegaan en nageleefd worden. In tegenstelling tot het gebruik van ureaseremmers in de stal, werd het gebruik ervan als additief in bemesting wel opgenomen in de Europese wetgeving via verordening (EG) nr. 2003/2003. De sindsdien goedgekeurde ureaseremmers en de toegelaten hoeveelheden kunnen teruggevonden worden in Tabel 2. Dit betekent dat enkel deze stoffen al een goedkeuring hebben en dat voor andere ureaseremmers toelating gevraagd zal moeten worden indien van toepassing. Nieuwe ureaseremmers kunnen in deze lijst worden opgenomen na beoordeling van de ingediende dossiers, die volgens de richtlijnen voor deze stoffen moeten worden uitgewerkt. Wanneer een bemestingsproduct een ureaseremmer bevat moet dit duidelijk vermeldt worden.

Verordening 2003/2003 werd vanaf 16 juli 2022 vervangen worden door verordening 2019/1009.

Tabel 2. Geregistreerde urease remmers als additief in meststoffen volgens EG 2003/2003 en latere wijzigingen.

Type urease-remmer	Actief ingrediënt	Jaar van registratie	Minimum- en maximumgehalte aan ureaseremmers in gewichts-percentage van de totale stikstof in de vorm van ureumstikstof
NBPT	N-(n-butyl) thioposphoric triamide (NBPT)	2008	Min 0.09

			Max. 0.20
2NPT	N-(2-nitrophenyl) phosphoric triamide (2-NPT)	2012/2003	Min 0.04 Max. 0.15
NBPT + NPPT	N-(n-Butyl) thiophosphoric acid triamide (NBPT) en N-(n-Propyl) thiophosphoric acid triamide (NPPT) in een 3:1 ratio	2014	Min 0.02 Max 0.3

4 Marktbeschikbaarheid

Op de markt zijn vooral ureaseremmers beschikbaar in formuleringen voor gebruik op het veld als meststofadditief of soms in directe combinatie met een ureumhoudende meststof. Dit betreft producten die een van de Europees goedgekeurde werkzame stoffen (weergegeven in

Tabel 2) bevat, zoals meststofadditieven Agrotain® (NBPT), Didin® (NBPT + nitrificatie inhibitor) en Limus® Clear (NBPT + NPPT) of meststoffen gecombineerd met een ureaseremmer zoals Novurea® (NBPT), Nexur® (NBPT), PIAGRAN® pro (2-NPT) en ALZON® neo-N (2-NPT + nitrificatie inhibitors). Specifieke producten voor gebruik in de stal of in de mestput lijken nog niet beschikbaar te zijn op de markt. Hiervoor kan in eerste instantie gekeken worden naar welke producten gebruikt werden bij de bovengenoemde onderzoeken in veestallen. Zo zijn er studies waarbij gebruik is gemaakt van Agrotain® (NBPT), NBPT (zonder verder specificaties), CHPT, Inhibitor K (PPDA) en Inhibitor EBN (een PDA).

Agrotain® is een product dat origineel op de markt kwam als meststofadditief en ook een Europese toelating hiervoor heeft. Verder zijn er verschillende NBPT-bevattende meststofadditieven op de markt. Er zijn echter nog geen onderzoeken geweest met NBPT in veestallen in Europa. In de Verenigde Staten werd de werkzaamheid van NBPT wel getest in feedlots.

CHPT, een ureaseremmende stof die ook voorkwam bij enkele onderzoeken in de veeteelt, is niet geregistreerd bij de ECHA en wordt dus niet op grote schaal verhandeld in het Europese Economische Ruim.

Inhibitor K en inhibitor EBN zijn nog niet commercieel beschikbaar en zijn ook nog niet goedgekeurd als additief in bemesting.

Een overzicht van gekende commerciële producten die ureaseremmers bevatten wordt weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3. Overzicht van bestaande ureaseremmende producten en hun marktbeschikbaarheidsstatus.

Product	Bedrijf	Actieve stof	Marktbeschikbaar
Inhibitor K	SKWP	PPDA	Nog niet
Inhibitor EBN	Fertinagro	PDA	Nog niet
Limus® Clear	BASF	NBPT + NPPT	Beschikbaar als bemestingsadditief
Active Stabilizer PLUS	Active Agriscience	NBPT + DMMP	Beschikbaar als bemestingsadditief
Didin®	Omex	NBPT + DCD	Beschikbaar als bemestingsadditief, voornamelijk tegen nitrificatie
Agrotain®	Koch	NBPT	Beschikbaar als bemestingsadditief

5 Toepassingsmethoden

Zoals in de vorige secties aan bod kwam, is het frequent toedienen van de ureaseremmers op de stalvloer noodzakelijk om de urease-activiteit te onderdrukken en dus een blijvende emissiereductie te kunnen bekomen. In de meeste onderzoeken werden de ureaseremmers manueel toegediend met behulp van een ruggedragen drukspuit. Wanneer de toepassing van een ureaseremmer dagelijks moet gebeuren, kan manuele toediening een grote werklast veroorzaken bij de veehouder. Daarnaast kan het juist en gelijkmatig doseren van de gewenste hoeveelheid ureaseremmer een uitdaging zijn. Daarom bekijken we welke mogelijkheden er zijn voor automatisatie van de toepassing van ureaseremmers. Een belangrijke kanttekening hierbij is dat de ureaseremmers zelf vaste stoffen zijn, ze moeten dus opgelost worden in solventen om deze als een vloeistof te kunnen toepassen. Welke solventen geschikt zijn als oplosmiddel hangt af van de oplosbaarheid en de stabiliteit van de ureaseremmer in het solvent. Ook de fysische eigenschappen van het solvent en de bekomen oplossing zijn van groot belang om deze automatische verspreiding van de ureaseremmers vlot te laten verlopen.

5.1 Mestrobot

In sommige melkveestallen worden mestrobots gebruikt die de vloer van de loopgangen meerdere keren per dag van mest ontdoen. Mestrobots kunnen uitgerust zijn met watersproeiers om de vloer te bevochtigen zodat er gemakkelijker geschoven kan worden. In sommige gevallen is er naast het bevochtigingswater aan de voorkant van de mestrobot ook een sproeier die achteraan de mestrobot gemonteerd is. Een optie zou kunnen zijn om ureaseremmers aan dit water toe te voegen voor de automatische verdeling van ureaseremmers op de loopgedeeltes in de stal. In de onderzoeken door Bobrowski werd de ureaseremmer inhibitor K één keer per dag over de roosters verdeeld. In het geval van de mestrobot zou bekeken moeten worden wat de beste toepassingsmethode is: de ureaseremmer verder verdunnen en tijdens elke schoonmaakbeurt vernevelen of slechts één keer per dag de ureaseremmer toevoegen aan het reinigingswater. In dat laatste geval zal ook onderzocht moeten worden wat het effect is van de andere reinigingsbeurten op de werking en aanwezigheid van het verdeelde ureaseremmend product.

In het onderzoek door Bobrowski, Willink, et al. (2021) werd 2,5mg ureaseremmer toegevoegd in 50 ml water per vierkante meter. Deze dosering is haalbaar met mestrobots.

5.2 Vernevelings- en sproeisystemen

In sommige melkveestallen worden automatische mestschuiven met ketting, kabel of touw gebruikt die meerdere keren per dag de mest van de loopgangen verwijderen. Zo'n mestschuif heeft geen gemonteerde watersproeier. Ook wanneer de mest manueel of machinaal verwijderd wordt, is er geen watertoediening. In dat geval zou gebruik gemaakt kunnen worden van een ander sproeisysteem, zoals besproeiingsinstallaties die in de vloer of laag op de muur gemonteerd zijn en gericht de vloer bevochtigen. In dit geval zou een ureaseremmend product aan het water toegevoegd kunnen worden.

Er bestaan ook vernevelaars die hogerop gemonteerd worden. Deze zijn eerder bedoeld als verkoelingssysteem voor de koeien op warme dagen. Deze installatie is niet geschikt voor het verdelen van ureaseremmers op de stalvloer. In de eerste plaats wordt het water uit deze installaties zeer fijn verneveld van bovenaf en gebeurt deze verneveling niet plaats-specifiek op de loopgangen. Daarnaast kan de verspreiding van de vernevelde vloeistof moeilijk gecontroleerd worden, aangezien wind en obstakels een grote invloed kunnen hebben op de locatie waar de vernevelde vloeistof terechtkomt. Deze manier van toepassen resulteert ook in de vorming van aerosolen die ingeademd kunnen worden of kunnen neerdalen op de koeien en hun rantsoen. Dit vergroot het risico op blootstelling van de koeien en het personeel in de stal aan dit product.

5.3 Huidige status en verdere onderzoeksmogelijkheden

Ureaseremmers lijken een groot potentieel te hebben voor het verminderen van ammoniakemissies in de Vlaamse melkveestallen. Toch lijkt de status van de ureaseremmers in dit toepassingsgebied niet veel geëvolueerd ten opzichte van wat werd geconcludeerd door Smits & Bokma in 2008 (Smits & Bokma, 2008). Hieronder bespreken we de huidige status van en de onderzoeksmogelijkheden rond de verschillende ureaseremmers die aan bod kwamen in de voorgaande secties.

5.4 Huidige status

5.4.1 NBPT

NBPT-houdende producten zijn commercieel beschikbaar als bemestingsadditief. In het ideale geval kunnen deze producten rechtstreeks in de stal toegepast worden. Voor deze producten mist echter praktijkgericht onderzoek in situaties die van belang zijn in Vlaanderen. Ook de nodige dosis voor gebruik op de roostervloer of in de mestput zou nog verder onderzocht moeten worden. Daarnaast moet ook de veiligheid van de producten bekeken worden wanneer het tussen de dieren gebruikt zou worden. Aangezien NBPT een zeer lage dampdruk heeft en dus niet uit de mestput zal verdampen, lijkt gebruik ervan in de mestput een haalbare kaart. Op voorwaarde dat de verneveling in de mestput niet te fijn is, waardoor de stof in kleine druppeltjes door de lucht zou kunnen zweven en alsnog in aanraking zou kunnen komen met de dieren. Daarnaast mag de gebruikte hoeveelheid in de mestput niet hoger zijn dan de maximale concentratie zoals aangegeven in Tabel 2. De maximale waarde voor NBPT is zeer belangrijk, aangezien NBPT mobiel tot zeer mobiel (K_{ow}=1-2) is in de bodem en zo een risico vormt op uitlogen en het vervuilen van het grondwater. Bovendien is NBPT niet gemakkelijk biodegradeerbaar in water of in de bodem.

Tabel 4. Classificatie van risico's van de verschillende ureaseremmers volgens REACH.

Chemische naam	*CAS-nummer*	*Classificatie volgens REACH*
NBPT N-(n-butyl)-thiofosforzuurtriamide	94317-64-3	H318 – ernstig oogletsel H361 – voortplantingstoxiciteit
NPPT N-propylphosphorothioic triamide	916809-14-8	H319 – ernstige oogirritatie H361 – voortplantingstoxiciteit
PPDA Phenylphosphorodiamidate	7450-69-3	H302 – schadelijk bij inslikken H319 – ernstige oogirritatie

NBPT wordt gezien als niet-toxisch voor zoogdieren, aangezien zowel dermaal als oraal de LD50 (dosis die dodelijk is voor 50% van de dieren) hoger is dan 2000 mg/kg lichaamsgewicht (Europees Agentschap voor chemische stoffen). Het is licht sensibiliserend voor de huid (kans op allergie) en veroorzaakte lichte en omkeerbare huidirritatie bij 2 van de 15 proefdieren. NBPT heeft wel de hoogste risico-klasse voor onomkeerbare schade aan de ogen (zie Tabel 4). Dit werd onderzocht bij konijnen bij een dosis van 80mg NBPT in 0,1ml water/oog. De laagste NOAEL (no observed adverse effect level) voor chronische inname was deze voor voortplantingstoxiciteit en ligt op 17 mg/kg lichaamsgewicht per dag.

Voor gebruik tussen de dieren heeft NBPT een lage bioconcentratiefactor van 3,162 lipide/kg nat gewicht, wat maakt dat het weinig waarschijnlijk is om te accumuleren in vis of in de voedselketen. In een studie door Van de Ligt et al. (2019) werden 14 melkkoeien gedurende 28 dagen dagelijks oraal gedoseerd met 0 (2 koeien), 1 (3 koeien), 3 (3 koeien) of 10 (6 koeien) mg NBPT/kg lichaamsgewicht. Tweemaal daags werden melksamples afgenomen en werd de hoeveelheid NBPT hierin bepaald. Na de 28 dagen durende periode werden de dieren geëuthanaseerd en werd de

aanwezigheid van NBPT in lever, nieren, spier- en vetweefsel onderzocht. De ondergrens voor kwantificatie van NBPT in melk was 0.05 ppm. Gedurende de proef werd deze 1 keer overschreden (waarde 0.053 ppm) op de laatste dag voor 1 van de 6 koeien in de behandelgroep van 10 mg NBPT/kg lichaamsgewicht. Alle andere samples bleven onder de onderste kwantificatiegrens van 0.05 ppm. Voor weefsels was de ondergrens voor kwantificatie 0.04 ppm. Alle samples voor lever, nier, spieren en vet bleven onder deze grens, behalve bij het onderhuids vetsample van 1 dier (waarde 0.368 ppm) dat de hoogste dosis toegediend kreeg. Van de groep die een dagelijkse dosering van 10 mg NBPT/kg lichaamswicht ondergingen werd na de proef telkens nog 1 dier bijgehouden voor 3, 7 en 14 dagen voor het dier geëuthanaseerd werd en de aanwezigheid van NBPT in het lichaam nagegaan werd. In deze periode werd geen NBPT meer toegediend. Bij deze dieren bleven alle melk en weefselsamples onder de ondergrens voor kwantificatie.

Voor NBPT is nog geen dosering per vierkante meter gekend in melkveestallen. Wanneer dezelfde dosering als PPDA (2,5mg/m^2.dag) gebruikt zou worden, komt dit voor een gemiddelde stal van 100 koeien en 5,5m^2 looppaden per koe, overeen met een dagelijkse verdeling van 1375mg NBPT verspreid over de loopvloeren in de stal. Zelfs mocht een vaars van 375kg op dagelijkse basis deze volledige dosis voor de stal innemen, zou dit overeenkomen met 3,7 mg NBPT/kg lichaamsgewicht. Dit scenario is echter weinig waarschijnlijk.

5.4.2 NPPT

NPPT wordt niet op zichzelf gebruikt als urease inhibitor, maar wordt in sommige formuleringen gebruikt in combinatie met NBPT. NPPT is structureel zeer gelijkend op NBPT. Hierdoor kunnen vele eigenschappen van NPPT overgenomen van NBPT. Zo werd er in een 28-dagen durende studie geen schadelijk effect gevonden op de reproductieve organen voor NPPT, maar wordt deze door de ECHA wel geclassificeerd als "verdacht van het veroorzaken van reproductieve schade met mogelijk schade voor de vruchtbaarheid en het ongeboren kind". NPPT veroorzaakt net als NBPT ernstige oogschade. Het is niet acuut toxisch. Voor herhaald oraal gebruik gedurende 28 dagen was de laagste bekomen NOAEL-waarde 18.1 mg/kg lichaamsgewicht/dag, wat vergelijkbaar is met de waarde van 17 mg/kg lichaamsgewicht per dag van NBPT.

5.4.3 PPDA

Voor PPDA (de ureaseremmer gebruikt in inhibitor K) werd al vooruitgang geboekt t.o.v. de situatie in 2008 met praktijkonderzoek in melkveestallen in omstandigheden die ook in Vlaanderen van toepassing zijn. Het product dat in deze onderzoeken gebruikt werd, is echter nog niet commercieel beschikbaar en zou eerst toelating moeten krijgen van de bevoegde instanties (op vlak van veiligheid in de voedselketen en veiligheid in het milieu) vooraleer het praktijkgebruik van start kan gaan.

PPDA heeft een dampdruk van 0.001 Pa bij 20°C, waardoor het niet uit de mestput zal verdampen. In tegenstelling tot NBPT en NPPT, is PPDA gemakkelijk biodegradeerbaar. PPDA wordt zeer beperkt geabsorbeerd door de huid (0,92%). PPDA is schadelijk bij inname, met een LD50 tussen de 300-500mg/kg lichaamsgewicht. Tijdens een proef bij ratten werd geen reproductieve schade opgemerkt. De hoogste geteste dosis hierbij was 200mg/kg lichaamsgewicht/dag. Er is nog geen onderzoek gebeurd naar de aanwezigheid van PPDA in melk en vlees na het toedienen van PPDA, zoals bij NBPT het geval is. Door zijn lage P_{ow} en hoge biodegradeerbaarheid, lijkt de kans op bioaccumulatie echter klein.

5.5 Mogelijkheden voor verder onderzoek

5.5.1 Gebruik bovenop de vloer

Wanneer de ureaseremmers bovenop de vloer toegepast worden, is de kans groter dat de dieren in contact komen met het toegepaste product. Indien nodig en mogelijk, kan het contact met de dieren beperkt worden door het toepassen van het product te laten gebeuren op momenten waarop de dieren niet in de stal aanwezig zijn, bijvoorbeeld wanneer de dieren zich in de wachtruimte bevinden of tijdelijk op de weide staan. Verder gebeurt dit het best zo dicht mogelijk tegen het vloeroppervlak door gericht sproeien op de vloer door mestrobots of via een besproeiingssysteem op vloerhoogte. Onafhankelijk van de uiteindelijk gekozen toepassingstechniek, zal de veiligheid van het product eerst grondig nagegaan en beoordeeld moeten worden. Het verkrijgen van toestemming door het FAVV is nodig vooraleer een commercieel product in de Vlaamse praktijkstallen toegepast kan worden. Dit vergt inspanning van de producent, aangezien het opstellen van zo'n dossier product-specifiek is.

Voor de uitvoering van onderzoek bij vloertoepassingen in een praktijkstal, zal gewacht moeten worden tot een bepaald product toelating heeft verkregen.

Interessante onderzoekspistes bij toepassing op de vloer bij melkveestallen zijn:

- Optimalisatie van ammoniakreductie
    - Effect van toepassingsfrequentie
    - Effect van toepassingsvolume
    - Interactie tussen toepassingstijdstip en (overige) passages mestrobot
- Automatische toepassingstechniek
    - Optimalisatie van de techniek
    - Logging van de toepassing (ikv borging)

5.5.2 Gebruik in de mestput

Wanneer de ureaseremmers niet bovenop de stalvloer, maar onder de roosters gebruikt worden, kan rechtstreeks contact tussen de dieren en de ureaseremmers vermeden worden. Zowel PPDA, NBPT als NPPT hebben een lage dampdruk van 0.001 Pa bij 20°C. Dit betekent dat zeer weinig product zal verdampen en in de stallucht teruggevonden zal worden. Daarnaast vormen deze stoffen ook geen ontploffingsgevaar en zijn ze niet brandbaar en niet oxiderend. Op voorwaarde dat ook de oplosmiddelen en additieven in het commercieel product ook veilig zijn op deze vlakken, kunnen de stoffen veilig in de mestput gebruikt worden zonder een gevaar te vormen voor de veiligheid van de stal of de dieren die erin gehuisvest worden.

Daarnaast moet voor de toepassing van de mest op het land rekening gehouden worden met de regelgeving omtrent het gebruik van ureaseremmers in meststoffen en mag de totale gebruikte hoeveelheid in de mestput niet hoger zijn dan de maximale concentratie zoals aangegeven in Tabel 2. PPDA staat momenteel niet in deze lijst.

Het gebruik van ureaseremmers in een praktijkstal onder de roosters lijkt praktisch wel haalbaar. Echter, in een melkveestal komt het grootste gedeelte van de ammoniakuitstoot van de vloer en minder uit de mestput. Daarom kunnen we verwachten dat de effectiviteit van het gebruik van ureaseremmers voor het verminderen van de ammoniakuitstoot onder de roosters in melkveestallen eerder beperkt zal zijn. In varkensstallen, waar er in verhouding meer uitstoot is uit de mestput, zou dit onderzoek relevanter zijn.

5.5.3 Mestcontainertesten

Met behulp van mestcontainertesten, kunnen verschillende ureaseremmers en het effect van verschillende dosissen vergeleken worden.

Voor PPDA is er al heel wat (praktijkgericht) onderzoek gebeurd om de juiste dosering en effectiviteit te bepalen bij toepassingen op drijfmest. Voor NBPT is dit minder het geval en lijken containertesten een interessantere optie om de effectiviteit te vergelijken met PPDA en de meest efficiënte dosering te bepalen in gecontroleerde omstandigheden.

Containertesten kunnen ook uitgevoerd worden met stalmest. Zowel voor PDPA als voor NBPT kan dit soort test interessant zijn om het reductiepotentieel van deze producten in te kunnen schatten bij toepassing in ingestrooide stallen.

6 Referenties

Bobrowski, A. B., van Dooren, H. J., Ogink, N., Hagenkamp-Korth, F., Hasler, M., & Hartung, E. (2021). Reduction of ammonia emissions by using a urease inhibitor in a mechanically ventilated dairy housing system [Article]. *Biosystems Engineering*, *204*, 115-129. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.01.006

Bobrowski, A. B., Willink, D., Janke, D., Amon, T., Hagenkamp-Korth, F., Hasler, M., & Hartung, E. (2021). Reduction of ammonia emissions by applying a urease inhibitor in naturally ventilated dairy barns [Article]. *Biosystems Engineering*, *204*, 104-114. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.01.011

Byrne, M. P., Tobin, J. T., Forrestal, P. J., M., D., C.G., N., K., R., E., C., Hogan, S. A., & F., O. C. T. (2020). Urease and Nitrification Inhibitors—As Mitigation Tools for Greenhouse Gas Emissions in Sustainable Dairy Systems: A Review. *Sustainability*, *12*(6018). https://doi.org/10.3390/su12156018

Calvet, S., Arrufat, B., Salaet, I., Atares, S., Sobreviela, A., Herrero, C., Romero, J., & Estellésa, F. (2022). A urease inhibitor reduces ammonia emission in fattening pigs reared on slatted floor in summer conditions. *Biosystems Engineering*, *211*, 43-53. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.06.009

Cantarella, H., Otto, R., Soares, J. R., & Silva, A. G. B. (2018). Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. *J Adv Res*, *13*, 19-27. https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.008

EFSA Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed, Aquilina, G., Bories, G., Chesson, A., Pier Sandro Cocconcelli, J. d. K., Dierick, N. A., Gralak, M. A., Gropp, J., Halle, I., Hogstrand, C., Kroker, R., Leng, L., Puente, S. L., Haldorsen, A.-K. L., Mantovani, A., Martelli, G., Mézes, M., Renshaw, D., Saarela, M., . . . Westendorf, J. (2012). Guidance for the preparation of dossiers for zootechnical additives. *EFSA Journal*, *10*(1).

EFSA Panel on Food Contact Materials, E., Processing, A., Lambre, C., Barat Baviera, J. M., Bolognesi, C., Cocconcelli, P. S., Crebelli, R., Gott, D. M., Grob, K., Lampi, E., Mengelers, M., Mortensen, A., Riviere, G., Steffensen, I. L., Tlustos, C., Van Loveren, H., Vernis, L., Zorn, H., Glandorf, B., . . . Chesson, A. (2021). Scientific Guidance for the submission of dossiers on Food Enzymes. *EFSA J*, *19*(10), e06851. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6851

Europees Agentschap voor chemische stoffen. *N-butylphosphorothioic triamide*. https://echa.europa.eu/nl/registration-dossier/-/registered-dossier/16245/7/3/2

Hagenkamp-Korth, F., Haeussermann, A., & Hartung, E. (2015). Effect of urease inhibitor application on urease activity in three different cubicle housing systems under practical conditions [Article]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, *202*, 168-177. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.010

Hagenkamp-Korth, F., Ohl, S., & Hartung, E. (2015). Effects on the biogas and methane production of cattle manure treated with urease inhibitor. *Biomass & Bioenergy*, *75*, 75-82. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.02.014

Hartbrich, H. J., Oertel, M., Held, P., Rothe, G., Thieme, H., Klepel, M., & Siegling, S. (1978). Application of urease inhibitors - a possibility for reducing the ammonia nitrogen losses in urea fertilization. 1. Researches on the urease-inhibiting potencies of chemical substances [Application of urease inhibitors - a possibility for reducing the ammonia nitrogen losses in urea fertilization. 1. Researches on the urease-inhibiting potencies of chemical substances]. *Speziell Agronomie Forsch. Praxis*, *8*, 20-24.

Jiang, J., Wang, Y., Guo, F., Zhang, X., Dong, W., Zhang, X., Zhang, X., Zhang, C., Cheng, K., Li, Y., & Zhu, G. (2020). Composting pig manure and sawdust with urease inhibitor: succession of nitrogen functional genes and bacterial community. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 36160-36171. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09696-y

Kiss, S., & Simihaian, M. (2002). *Improving efficiency of urea furtilizers by inhibition of soil urease activity* (1 ed.). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1843-1

Li, Q., Yang, A., Wang, Z., Roelcke, M., Chen, X., Zhang, F., Pasda, G., Zerulla, W., Wissemeier, A. H., & Liu, X. (2015). Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China. *Field Crops Research*, *175*, 96-105. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.005

Li, S., Li, J., Lu, J., & Wang, Z. (2015). Effect of Mixed Urease Inhibitors on N Losses From Surface-applied Urea. *International Journal of Agricultural Science and Technology*, *3*(1), 23-27. https://doi.org/10.12783/ijast.2015.0301.04

Liao, W., Liu, C., & Gao, Z. (2018). Impacts of feedlot floor condition, deposition frequency, and inhibitors on N2O and CH4 emissions from feedlot dung and urine patches. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *68*(7), 700-712. https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1453392

Ni, K., Pacholski, A., & Kage, H. (2014). Ammonia volatilization after application of urea to winter wheat over 3 years affected by novel urease and nitrification inhibitors. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *197*, 184-194. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.007

Park, S. H., Lee, B. R., & Kim, T. H. (2021). Urease and nitrification inhibitors with pig slurry effects on ammonia and nitrous oxide emissions, nitrate leaching, and nitrogen use efficiency in perennial ryegrass sward. *Animal Bioscience*, *34*(12), 2023-2033. https://doi.org/10.5713/ab.21.0046

Parker, D. B., Pandrangi, S., Greene, L. W., Almas, L. K., Cole, N. A., Rhoades, M. B., & Koziel, J. A. (2005). Rate and frequency of urease inhibitor application for minimizing ammonia emissions from beef cattle feedyards. *Transactions of the Asae*, *48*(2), 787-793. https://doi.org/10.13031/2013.18321

Parker, D. B., Rhoades, M. B., Baek, B. H., Koziel, J. A., Waldrip, H. M., & Todd, R. W. (2016). Urease inhibitor for reducing ammonia emissions from an open-lot beef cattle feedyard in the Texas High Plains. *Applied Engineering in Agriculture*, *32*(6), 823-832. https://doi.org/10.13031/aea.32.11897

Parker, D. B., Rhoades, M. B., Cole, N. A., & Sambana, V. P. (2011). Effect of urease inhibitor application rate and rainfall on ammonia emissions from beef manure. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, *55*(1), 211-218. https://doi.org/10.13031/2013.41248

Reinhardt-Hanisch, A., Grimm, H., & Hartung, E. (2009). Basic studies on the effects of novel urease inhibitors in livestock husbandry. *Landtechnik*, *2*, 102-105.

Schulte, H., Ammon, C., Hagenkamp-Korth, F., & Hartung, E. (2022). Investigating the time-dependent dose-response relationship of ammonia emissions reduction through the application of a urease inhibitor in pig fattening houses. *Biosystem Engineering*, *222*, 45-61. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.07.008

Smits, M. C. J., & Bokma, S. (2008). *Verkenning perspectief van ureaseremmers voor beperking van ammoniakemissie uit Nederlandse melkveestallen*.

Van de Ligt, J., Borghoff, S. J., Yoon, M., Ferguson, L. J., DeMaio, W., & McClanahan, R. H. (2019). Nondetectable or minimal detectable residue levels of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide in bovine tissues and milk from a 28-d NBPT dosing study. *Translational Animal Science*, *3*(4), 1606-1616. https://doi.org/10.1093/tas/txz153

van den Bogaert, T., & Boussery, K. (2020). *Ammoniakemissiereductie in rundveestallen*.

Varel, V. H. (1997). Use of urease inhibitors to control nitrogen loss from livestock waste. *Bioresource Technology*, *62*(1-2), 11-17. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00130-2

Varel, V. H., Nienaber, J. A., & Byrnes, B. H. (1997). Urease inhibitors reduce ammonia emissions from cattle manure. Symposium on ammonia and odour emissions from animal production facilities, Vinkeloord, Netherlands.

Varel, V. H., Nienaber, J. A., & Freetly, H. C. (1999). Conservation of nitrogen in cattle feedlot waste with urease inhibitors. *Journal of Animal Science*, *77*(5), 1162-1168. https://doi.org/10.2527/1999.7751162x

Contact

Chari Vandenbussche
Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek ILVO
Burg. Van Gansberghelaan 115, bus 1
9820 Merelbeke
T +32 9 272 27 46
chari.vandenbussche@ilvo.vlaanderen.be

Deze publicatie kan ook geraadpleegd worden op:
www.ilvo.vlaanderen.be ⇨ nieuws ⇨ type ⇨ mededeling

Vermenigvuldiging of overname van gegevens is toegestaan mits duidelijke bronvermelding.

ILVO

Aansprakelijkheidsbeperking

Deze publicatie werd door ILVO met de meeste zorg en nauwkeurigheid opgesteld. Er wordt evenwel geen enkele garantie gegeven omtrent de juistheid of de volledigheid van de informatie in deze publicatie. De gebruiker van deze publicatie ziet af van elke klacht tegen ILVO of zijn ambtenaren, van welke aard ook, met betrekking tot het gebruik van de via deze publicatie beschikbaar gestelde informatie.
In geen geval zal ILVO of zijn ambtenaren aansprakelijk gesteld kunnen worden voor eventuele nadelige gevolgen die voortvloeien uit het gebruik van de via deze publicatie beschikbaar gestelde informatie.

Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek
Burg. Van Gansberghelaan 92
9820 Merelbeke - België

T +32 9 272 25 00
ilvo@ilvo.vlaanderen.be
www.ilvo.vlaanderen.be