



Sachstand

Auswirkungen des Einsatzes von Nitrifikations- und Ureasehemmern in der Landwirtschaft

Auswirkungen des Einsatzes von Nitrifikations- und Ureasehemmern in der Landwirtschaft

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 079/16
Abschluss der Arbeit: 12. Dezember 2016
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit,
Bildung und Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Definitionen	4
2.1.	Nitrifikation	4
2.2.	Urease	4
2.3.	Nitrifikations- und Ureasehemmer	5
3.	Problemstellung	6
4.	Auswirkungen des Einsatz von Nitrifikations- und Ureasehemmern in der Landwirtschaft	7
4.1.	Auswaschung in Grund- und Oberflächengewässer	8
4.2.	Auswirkungen auf den Boden	9
4.3.	Auswirkungen auf die Biodiversität	11
4.4.	Ertragsauswirkungen	11
4.5.	Auswirkungen auf Nutztiere und Menschen	12
4.6.	Emissionseffekte	13
5.	Zum Abbauverhalten von Nitrifikations- und Ureasehemmern	14
6.	Entfernung von Nitrifikations- und Ureasehemmern aus dem Trinkwasser	15
7.	Literaturverzeichnis	16

1. Einleitung

Landwirtschaftlich ist Stickstoff (chemisch N) im Bereich der Pflanzenzüchtung von grundlegender Bedeutung. Für die Pflanzenproduktion sind dabei zwei Quellen wichtig: Stickstoff kommt entweder als gebundenes Ammonium in organischem Material und Bodenlebewesen vor oder in Form von Stickstoffverbindungen in Bodenlösungen. Pflanzen verwerten dabei Ammonium oder Nitrat hauptsächlich als Stickstoffquelle, ferner aber auch in gebundener Form (beispielsweise Harnstoff, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$).¹ Fügt man aus Ertragssteigerungsgründen dem Dünger Stickstoffquellen zu, ergibt sich das Problem, dass die Pflanzen verhältnismäßig wenig (und langsam) Stickstoff aufnehmen und dadurch das überschüssige Stickstoff Auswirkungen auf die Umwelt haben kann (sowohl auf die Hydrosphäre wie auf die Atmosphäre). Darum werden Strategien entwickelt, die Aufnahme optimal zu gestalten und die Verluste beispielsweise durch Auswaschung infolge von Regen minimal zu halten. Hierbei werden insbesondere sog. Nitrifikations- und Ureasehemmer als Agrarhilfsstoffe eingesetzt. Einzelne Inhibitoren kommen nicht nur in der Landwirtschaft vor. Die Inhibitoren Dicyandiamid und 1H-1,2,4-Triazol finden auch in Industrieprozessen Anwendung oder entstehen als Metaboliten beispielsweise in Triazol-Fungiziden. In der vorliegenden Arbeit wird auf verschiedene ökologische und gesundheitliche Auswirkungen eingegangen, die sich durch die Anwendung von Nitrifikations- und Ureasehemmern ergeben.

2. Definitionen

2.1. Nitrifikation

Als Nitrifikation oder Nitrifizierung bezeichnet man „die Oxidation von freiem Ammoniak (NH_3) zu Nitrat (NO_3^-) durch die Aktivität von nitrifizierenden Bakterien im Boden. Für den Stickstoffkreislauf ist die Nitrifikation von großer Bedeutung, da sie für die Bereitstellung von Nitrat, der Hauptstickstoffquelle der höheren Pflanzen, der entscheidende Prozess ist.“²

2.2. Urease

Urease ist ein Enzym, das Harnstoff in Anwesenheit von Wasser zu Ammoniak und CO_2 umwandelt. Es kommt besonders in Pflanzensamen und Mikroorganismen, aber auch Wirbellosen, vor. Auch in der Medizin sind Bakterien, die Urease produzieren, bedeutsam, beispielsweise *Helicobacter pylori*. Nachweisverfahren für *Helicobacter pylori* (Urease-Tests) machen sich dabei diese Eigenschaft zunutze, sie sprechen auf die Anwesenheit von Urease an.

1 M. Scheurer, F. Sacher: Bedeutung von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren für die Trinkwasserversorgung, energie/wasser-praxis 9/2014, im Internet abrufbar unter: <http://www.tzw.de/de/projekte/stoffbewertung/studie-zur-bedeutung-von-nitri-674/> [zuletzt abgerufen am 6. Dezember 2016].

2 Definition Nitrifikation im Kompaktlexikon der Biologie, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, im Internet abrufbar unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/nitrifikation/8216> [zuletzt abgerufen am 6. Dezember 2016].

2.3. Nitrifikations- und Ureasehemmer

Nitrifikationshemmer (Nitrifikationsinhibitoren) sind chemische Zusatzstoffe in Düngemitteln, die die Nitrifikation des Ammoniumanteils zeitlich verzögern. Hierbei wird die bakterielle Oxidation des Ammonium-Ions (NH_4^+) unterdrückt, „indem die Aktivität von *Nitrosomonas* spp. im Boden [...gehemmt] wird. Bakterien vom Typ *Nitrosomonas* wandeln Ammonium in Nitrit (NO_2^-) um, das wiederum von *Nitrobacter* und *Nitrosobolus* weiter zu Nitrat (NO_3^-) oxidiert wird. Stickstoff wird folglich durch die Nitrifikationsinhibitoren länger in der Ammonium-Form gehalten, um die Zeit für eine Aufnahme durch die Pflanzen zu verlängern.“³

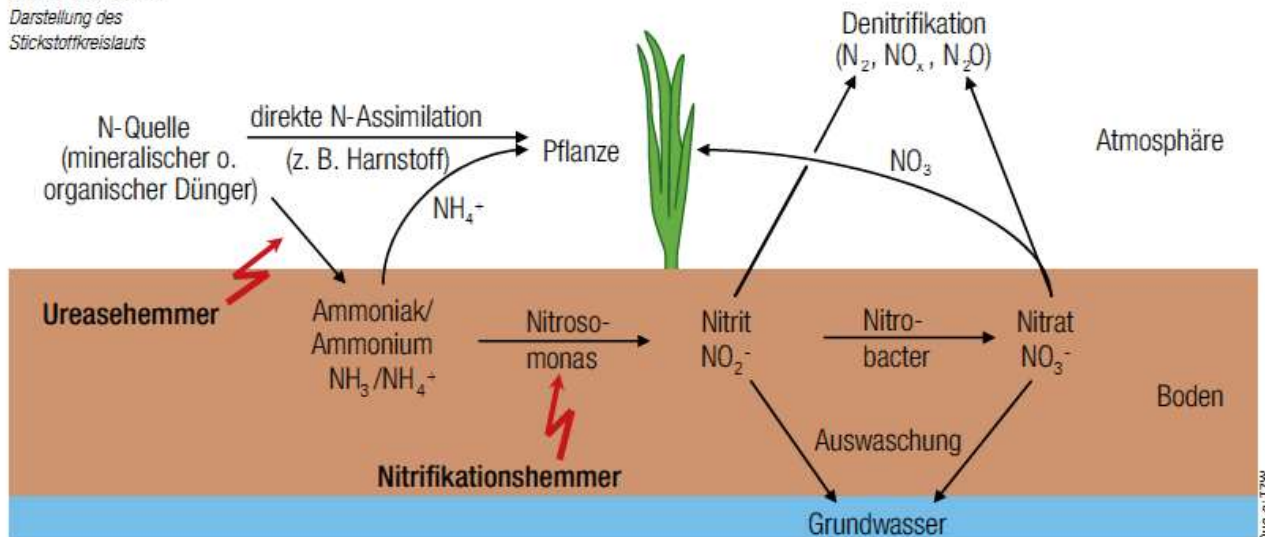
Ureasehemmer (Ureaseinhibitoren) sind Agrarhilfsstoffe, die die Geschwindigkeit der Harnstoffhydrolyse (Spaltung von Harnstoff durch Wasser) herabsetzen. Ihre Wirkung wird maßgeblich durch Bodeneigenschaften (Feuchte, Temperatur, pH-Wert, organischer Substanzgehalt und Textur) beeinflusst. So zeigen Ureasehemmer auf sandigem Boden und sandigen Lehmböden eine erhöhte Wirksamkeit. Es existieren anorganische und organische Ureasehemmer. Besonders gut untersuchte anorganische Ureasehemmer sind Schwermetallsalze. „Zu den als Ureasehemmer eingesetzten und bewerteten organischen Verbindungen zählen zum überwiegenden Teil Phenol-derivate mit unterschiedlicher Substitution wie Chinone, Catechole und Aminokresole sowie Amido-Derivate der Phosphorsäure und der Thiophosphorsäure unterschiedlichen Substitutionsgrades.“⁴

Die nachfolgende Grafik stellt die drei Haupt-Stickstoffquellen für Pflanzen (Ammonium (NH_4^+), Nitrat (NO_3^-) und direkte N-Assimilation z.B. über Harnstoff) sowie die Ansatzstellen für Urease- und Nitrifikationshemmer schematisch zusammen:

3 M. Scheurer, F. Sacher: Bedeutung von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren für die Trinkwasserversorgung, energie/wasser-praxis 9/2014, im Internet abrufbar unter: http://www.tzw.de/de/projekte/stoffbewertung/studie_zur_bedeutung_von_nitri-674/ [zuletzt abgerufen am 6. Dezember 2016].

4 Franz Schinner, Renate Sonnleitner: Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik Band III, Springer-Verlag, 1997, ISBN 978-3-642-63904-3.

Abb. 1: Schematische Darstellung des Stickstoffkreislaufs



Quelle: M. Scheurer, F. Sacher: Bedeutung von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren für die Trinkwasserversorgung, energie/wasser-praxis 9/2014.⁵

3. Problemstellung

Landwirtschaftlich erstrebenswert ist eine optimale Ausnutzung von Stickstoffquellen. Verwendet man Stickstoffdünger, um den Pflanzen eine optimale Stickstoffversorgung zu bieten, ergibt sich allerdings das Problem, dass diese zunächst verhältnismäßig ineffizient sind, da nur wenig des aufgebrauchten Stickstoffes von den Pflanzen genutzt wird. Nitrat (aus Ammonium) kann zwar von den Pflanzen leicht aufgenommen werden (als Bodenlösung), ist aber andererseits auch sehr mobil und wird über Regen in Gewässer getragen und trägt zur Eutrophierung bei.

Stickstoffverluste an die Umwelt infolge von Nitratauslaugung, gasförmigen Verlusten von Ammoniak, Stickstoff und Stickoxiden sind insgesamt groß. Etwa 30-40 Prozent des Stickstoffes, der in Nutztierlandwirtschaft eingetragen wird, stammen laut einer neuseeländischen Studie aus Klee (Stickstoffquelle) und Stickstoffdüngemitteln.⁶

Vor diesem Hintergrund wurden Nitrifikations- und Ureasehemmer entwickelt, die die Zeitspanne zur Stickstoffquellen-Ausnutzung für die Pflanze verlängern. Von diesen erhofft man sich

5 Quelle: M. Scheurer, F. Sacher: Bedeutung von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren für die Trinkwasserversorgung, energie/wasser-praxis 9/2014, im Internet abrufbar unter: http://www.tzw.de/de/projekte/stoffbewer-tung/studie_zur_bedeutung_von_nitri-674/ [zuletzt abgerufen am 6. Dezember 2016].

6 DC Edmeades: Nitrification and Urease Inhibitors, a review of the national and international literature on their effects on nitrate leaching, greenhouse gas emissions and ammonia volatilisation from temperate legume-based pastoral systems, ISSN: 1172-4005, Juli 2004. Im Internet abrufbar unter: <http://www.waikatoregion.govt.nz/PageFiles/2883/TR04-22.pdf> [zuletzt abgerufen am 7. Dezember 2016].

eine Ertragssteigerung. Nicht nur die Auswirkungen auf die Ökologie, sondern auch ökonomische Aspekte werden aber nach wie vor kontrovers diskutiert.

4. Auswirkungen des Einsatz von Nitrifikations- und Ureasehemmern in der Landwirtschaft

In einer Studie aus dem Jahr 2004 wird Literatur zu den Effekten von Nitratauslaugung, Treibhausgasemissionen und Ammoniakverflüchtigung im Bereich des Hülsenfruchtanbaus diskutiert.⁷ Trotz einiger deutlich positiver Effekte in Hinblick auf Stickstoffverlust (und damit verbundenen Ertragssteigerungen) seien die Ergebnisse sehr unterschiedlich. In der Literatur werden auch „keine Effekte“⁸ sowie „negative Auswirkungen“⁹ dokumentiert. Bislang sehe es in der Forschung so aus, dass keine gravierenden negativen Auswirkungen auf die Boden- und Wasserqualität nachweisbar seien¹⁰, ebenso wie es keine Auswirkungen auf die tierische und menschliche Gesundheit gebe.¹¹

In einer aktuellen Studie des „Institute for Sustainability Leadership“ der University of Cambridge¹² werden verschiedene ökonomische Aspekte der modernen Landwirtschaft beleuchtet. Ein Kapitel beschäftigt sich mit dem Einsatz von Nitrifikations- und Ureasehemmern. Die Autoren stellen unterschiedliche in der wissenschaftlichen Literatur publizierten Auswirkungen auf Boden, Wasser, Biodiversität und Ertrag zusammen, können aber abschließend nur darauf hinweisen, dass Auswirkungen auf Basis dieser Datenlage weiter erforscht werden müssten.

In einer bereits 2006 veröffentlichten Studie einer deutschen Forschungsgruppe wurde in Gefäßversuchen der Einfluss zahlreicher Faktoren auf die Wirkweise eines Ureaseinhibitors untersucht.¹³ Die Wissenschaftler kommen dabei zu folgenden Schlussfolgerungen: „Mit den dargestellten Versuchen sollte der Einfluss des Zusatzes eines Ureaseinhibitors zur Harnstoffdüngung auf die Harnstoffumsetzung im Boden, die Ammoniakverflüchtigung und die Verwertung des Düngers-N durch Hafer im Komplex untersucht werden. [...] Der geprüfte Ureaseinhibitor verzö-

7 Ebd.

8 z.B. L.L. Hendrickson: Corn yield response to the urease inhibitor NBPT: five year summary. *Journal of production agriculture* 5: 131-137.

9 Seite 9 in: DC Edmeades (2004).

10 z.B. H.J. Di, K.C. Cameron: Effects of temperature and application rate of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), on nitrification rate and microbial biomass in a grazed pasture soil. *Australian journal of soil research*. *Australian Journal of Soil Research* 42(8) January 2004.

11 Ebd. Seite viii.

12 CISL. (2016). Commercial gains from addressing natural capital challenges in the dairy sector: Doing business with nature. Report by the Natural Capital Leaders Platform. Cambridge, UK: CISL, im Internet abrufbar unter: <http://www.cisl.cam.ac.uk/publications/publication-pdfs/natural-capital-challenges-dairy-technical-report.pdf> [zuletzt abgerufen am 7. Dezember 2016]

13 F. Herbst, W. Gans & W. Merbach: Einfluss eines Urease-Inhibitors bei Harnstoff-Düngung auf den Stickstoff-Umsatz im Boden, die Ammoniak-Verflüchtigung und die Verwertung des Stickstoffs durch Hafer, *Pflanzenbauwissenschaften*, 10 (1). S. 37–43, 2006, ISSN 1431-8857.

gerte deutlich die Harnstoffhydrolyse. Dadurch stand bei der Harnstoffdüngung mit Ureaseinhibitor den Pflanzen Harnstoff in einem größeren Umfang und über einen längeren Zeitraum zur Verfügung. Entsprechend geringer war hier die Ammoniumkonzentration im Boden. Gleichzeitig war auch der Anstieg des pH-Wertes im Boden bei Inhibitoreinsatz geringer. [...] Für das Auftreten von Ammoniak ist aber der pH-Wert an der Bodenoberfläche maßgebend. [...] In den Gehalten an Chlorophyll und bei den N-Fractionen in den Pflanzen bestanden zwischen den Düngungsvarianten keine bzw. nur geringe Unterschiede. [...] Insgesamt kann geschlussfolgert werden, dass die veränderte Bereitstellung der pflanzenverfügbaren N-Formen bei Inhibitoreinsatz (mehr Harnstoff-N, weniger Ammonium-N) keine Veränderungen im Gehalt an den N-Inhaltsstoffen und in ihrem Verhältnis zueinander bewirkt hat. Auch in der von den Pflanzen aufgenommenen N-Menge hat der Inhibitor keine Unterschiede bewirkt. [...] Der Reduzierung der Denitrifikation durch den Einsatz eines Ureaseinhibitors kommt in den durchgeführten Versuchen offensichtlich eine größere Bedeutung zu als der Verminderung der Ammoniakverflüchtigung. [...] Bezüglich der Übertragbarkeit der erzielten Resultate auf Feldbedingungen kann davon ausgegangen werden, dass bei Einsatz eines wirksamen Ureaseinhibitors unter vergleichbaren Temperatur- und Bodenbedingungen eine ähnliche Verzögerung der Harnstoffhydrolyse auch im Feld möglich ist. Bei höheren Temperaturen und anderen Bodenbedingungen kann es auch zu einer schnelleren Hydrolyse und höheren Ammoniakverlusten kommen. Bei praxisüblichen Düngergaben sind an den Pflanzen keine Blattspitzenvergilbungen zu erwarten. Unter solchen Bedingungen wäre eine gleiche oder höhere Trockenmassebildung möglich, falls es ohne Inhibitoreinsatz zu hohen N-Verlusten kommen würde. Damit wäre auch eine höhere Ausnutzung des Dünger-N durch die Pflanzen verbunden.“¹⁴

4.1. Auswaschung in Grund- und Oberflächengewässer

Eine Vielzahl Studien findet positive Effekte (von Nitrifikationshemmern und Ureasehemmern) in Hinblick auf die Feststellung von Nitrat im Wasser. So wird oftmals ein verringerter Nitratge-

alt gegenüber Kontrollgruppen dokumentiert. Zudem ist zu beachten, dass Temperatur, Zeitpunkt des Eintrags, Menge, Regenfall und Bodenzusammensetzung eine Auswirkung auf die Effizienz der Inhibitoren und die Dauer des beobachteten Effekts haben.¹⁵

In einer wissenschaftlichen Studie aus dem Jahr 2012 hat eine irische Forschergruppe festgestellt, dass der Nitrifikationsinhibitor DCD (Dicyandiamid) signifikant zur Reduzierung des NO₃⁻ Verlustes durch Auswaschung auf Graslandschaften beitragen kann.¹⁶

4.2. Auswirkungen auf den Boden

Die bereits erwähnte Übersichtsstudie zu ökonomischen Aspekten der modernen Landwirtschaft stellt auf Basis der ausgewerteten Studien bezüglich Auswirkungen von Nitrifikations- und

-
- 15 (a) Monaghan, R. M., Smith, L. C., & Ledgard, S. F. (2009). The effectiveness of a granular formulation of dicyandiamide (DCD) in limiting nitrate leaching from a grazed dairy pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(2), 145-159.
- (b) Di, H. J., & Cameron, K. C. (2007). Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor - a lysimeter study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79(3), 281-290. doi: 10.1007/s10705-007-9115-5 34.
- (c) Di, H. J., & Cameron, K. C. (2005). Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 109(3-4), 202-212. doi: 10.1016/j.agee.2005.03.006
- (d) Singh, J., Saggar, S., & Bolan, N. S. (2009). Influence of dicyandiamide on nitrogen transformation and losses in cow-urine-amended soil cores from grazed pasture. *Animal Production Science*, 49(3), 253-261. doi: 10.1071/EA08200 37.
- (e) Ledgard, S. F., Luo, J., Sprosen, M. S., Wyatt, J. B., Balvert, S. F., & Lindsey, S. B. (2014). Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on pasture production, nitrous oxide emissions and nitrate leaching in Waikato, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 57(4), 294-315. doi: 10.1080/00288233.2014.928642 38.
- (f) Dennis, S. J., Cameron, K. C., Di, H. J., Moir, J. L., Staples, V., Sills, P., & Richards, K. G. (2012). Reducing Nitrate Losses from Simulated Grazing on Grassland Lysimeters in Ireland Using a Nitrification Inhibitor (Dicyandiamide). *Biology and Environment-Proceedings of the Royal Irish Academy*, 112B(1), 79-89. doi: 10.3318/Bioe.2011.24
- (g) Cameron, K. C., Di, H. J., & Moir, J. L. (2014). Dicyandiamide (DCD) effect on nitrous oxide emissions, nitrate leaching and pasture yield in Canterbury, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 57(4), 251-270. doi: 10.1080/00288233.2013.797914 41.
- (h) Menneer, J. C., Sprosen, M. S., & Ledgard, S. F. (2008). Effect of timing and formulation of dicyandiamide (DCD) application on nitrate leaching and pasture production in a Bay of Plenty pastoral soil. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51(3), 377-385. doi: 10.1080/00288230809510468
- (i) Williamson, J. C., Menneer, J. C., & Torrens, R. S. (1996). Impact of dicyandiamide on the internal nitrogen cycle of a volcanic, silt loam soil receiving effluent. *Applied Soil Ecology*, 4(1), 39-48. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0929-1393\(96\)00100-X](http://dx.doi.org/10.1016/0929-1393(96)00100-X)
- (j) Di, H. J., & Cameron, K. C. (2004). Treating grazed pasture soil with a nitrification inhibitor, eco-n (TM), to decrease nitrate leaching in a deep sandy soil under spray irrigation - a lysimeter study. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 47(3), 351-361. (zitiert in: CISL. (2016))
- 16 S.J. Dennis et al: Reducing Nitrate Losses from Simulated Grazing on Grassland Lysimeters in Ireland Using a Nitrification Inhibitor (Dicyandiamide), *Biology & Environment Proceedings of the Royal Irish Academy* 112B(1):79-89 · March 2012 DOI: 10.2307/23188065.

Ureasehemmern auf dem Boden weder eindeutig negative noch eindeutig positive Effekte (Bodengesundheit sowie Boden-Biota) fest.¹⁷ Eher positiv zu werten ist beispielsweise das Ergebnis eines neuseeländischen Wissenschaftlerteams aus dem Jahr 2010. Die Autoren konstatieren, dass die Anwendung des Nitrifikationshemmers Dicyandiamid (DCD) auf Feldern eine verhältnismäßig „gutartige“ Maßnahme darstelle und damit bei der Bekämpfung der Umweltauswirkungen infolge intensiver Landwirtschaft ein wichtiges Instrument sei.¹⁸ In dieser Studie waren in drei Laborexperimenten die Auswirkungen von DCD auf die Artenvielfalt von Bodenbakterienpopulationen, Regenwürmern und Springschwänzen untersucht worden. Eine molekulare Analyse hatte ergeben, dass die Anwendung von DCD keinen Einfluss auf die Zusammensetzung der bakteriellen Boden-Phyla hatte, wohl aber Zugabe von Rinderharn, was zu einer raschen Veränderung in der bakteriellen Vielfalt führte.¹⁹

-
- 17 (a) Monaghan, R. M., Smith, L. C., & Ledgard, S. F. (2009). The effectiveness of a granular formulation of dicyandiamide (DCD) in limiting nitrate leaching from a grazed dairy pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(2), 145-159.
- (b) Menneer, J. C., Sprosen, M. S., & Ledgard, S. F. (2008). Effect of timing and formulation of dicyandiamide (DCD) application on nitrate leaching and pasture production in a Bay of Plenty pastoral soil. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51(3), 377-385. doi: 10.1080/00288230809510468
- (c) Williamson, J. C., Menneer, J. C., & Torrens, R. S. (1996). Impact of dicyandiamide on the internal nitrogen cycle of a volcanic, silt loam soil receiving effluent. *Applied Soil Ecology*, 4(1), 39-48. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0929-1393\(96\)00100-X](http://dx.doi.org/10.1016/0929-1393(96)00100-X)
- (d) O'Callaghan, M., Nelson, T., Lardner, R., Carter, P., Gerard, E., & Brownbridge, M. (2010). Nontarget impacts of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil biota. Paper presented at the 19th World Congress of Soil Science.
- (e) Di, H. J., & Cameron, K. C. (2004). Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on potassium, magnesium and calcium leaching in grazed grassland. *Soil Use and Management*, 20(1), 2-7. doi: 10.1079/Sum2003205
- 18 O'Callaghan, M., Nelson, T., Lardner, R., Carter, P., Gerard, E., & Brownbridge, M. (2010). Nontarget impacts of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil biota. Paper presented at the 19th World Congress of Soil Science; im Internet abrufbar unter: <http://iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/1885.pdf> [zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2016].
- 19 Ebd.

4.3. Auswirkungen auf die Biodiversität

In verschiedenen Studien zeigte die Anwendung des Nitrifikationshemmers DCD keinen Effekt auf die Anwesenheit von Nicht-Target Boden-Mikroorganismen.²⁰ Allerdings wurde in einer Studie nachgewiesen, dass die Populationen spezifischer Ammonium-oxidierender Bakterien reduziert waren.²¹ Die Auswirkungen auf Invertebraten sind wenig untersucht worden. Eine Studie zeigt, dass die Anwendung von DCD keinen Effekt auf Springschwanz-Populationen hat, allerdings die Populationen anwachsen bei Ausbringung von Urin.²²

4.4. Ertragsauswirkungen

Eine Mehrzahl Publikationen weist eine Ertragssteigerung verschiedener Nutzpflanzen bei der Anwendung insbesondere des Nitrifikationshemmers DCD nach.²³ Es gibt allerdings auch Hin-

-
- 20 (a) O'Callaghan, M., Gerard, E. M., Carter, P. E., Lardner, R., Sarathchandra, U., Burch, G., Bell, N. (2010). Effect of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on microbial communities in a pasture soil amended with bovine urine. *Soil Biology & Biochemistry*, 42(9), 1425-1436. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.05.003
(b) Di, H. J., Cameron, K. C., Shen, J. P., Winefield, C. S., O'Callaghan, M., Bowatte, S., & He, J. Z. (2011). Methanotroph abundance not affected by applications of animal urine and a nitrification inhibitor, dicyandiamide, in six grazed grassland soils. *Journal of Soils and Sediments*, 11(3), 432-439. doi: 10.1007/s11368-010-0318-z
(c) Dai, Y., Di, H. J., Cameron, K. C., & He, J. Z. (2013). Effects of nitrogen application rate and a nitrification inhibitor dicyandiamide on methanotroph abundance and methane uptake in a grazed pasture soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(12), 8680-8689. doi:10.1007/s11356-013-1825-4
(d) Guo, Y. J., Di, H. J., Cameron, K. C., Li, B. W., Podolyan, A., Moir, J. L., He, J. Z. (2013). Effect of 7-year application of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), on soil microbial biomass, protease and deaminase activities, and the abundance of bacteria and archaea in pasture soils. *Journal of Soils and Sediments*, 13(4), 753-759. doi: 10.1007/s11368-012-0646-2
- 21 O'Callaghan, M., Gerard, E. M., Carter, P. E., Lardner, R., Sarathchandra, U., Burch, G., Bell, N. (2010). Effect of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on microbial communities in a pasture soil amended with bovine urine. *Soil Biology & Biochemistry*, 42(9), 1425-1436. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.05.003
- 22 O'Callaghan, M., Nelson, T., Lardner, R., Carter, P., Gerard, E., & Brownbridge, M. (2010). Nontarget impacts of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil biota. Paper presented at the 19th World Congress of Soil Science
- 23 (a) Monaghan, R. M., Smith, L. C., & Ledgard, S. F. (2009). The effectiveness of a granular formulation of dicyandiamide (DCD) in limiting nitrate leaching from a grazed dairy pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(2), 145-159.
(b) Moir, J. L., Cameron, K. C., & Di, H. J. (2007). Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil mineral N, pasture yield, nutrient uptake and pasture quality in a grazed pasture system. *Soil Use and Management*, 23(2), 111-120. doi: DOI 10.1111/j.1475-2743.2006.00078.x
(c) Di, H. J., & Cameron, K. C. (2007). Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor – a lysimeter study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79(3), 281-290. doi: 10.1007/s10705-007-9115-5
(d) Di, H. J., & Cameron, K. C. (2005). Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 109(3-4), 202-212. doi: 10.1016/j.agee.2005.03.006

weise auf den gegenteiligen Effekt, der allerdings bei Anwendung eines anderen Nitrifikationshemmer, DMPP, nicht nachweisbar war.²⁴ Im Übersichtsartikel, in dem die genannten Studien diskutiert werden²⁵, wird erklärend darauf hingewiesen, dass man zur Beurteilung die ausgebrachten Mengen beachten müsse. Zudem sei auch der genaue Typus des Inhibitors wichtig, etwa ob es sich um eine Mixtur oder DCD allein handle. Nicht zuletzt spielten der Zeitpunkt der Ausbringung und die Wetterverhältnisse eine ausschlaggebende Rolle. In einer aktuellen australischen Studie²⁶ wurden weder für einen Nitrifikationsinhibitor (DMPP) noch für einen Ureaseinhibitor (NBPT) ein Effekt in Hinblick auf den Ertrag, den Stickstoff-Oxidfluss oder die Auswaschung gegenüber der Kontrollgruppe festgestellt. Die Autoren führen dies auf klimatische Bedingungen zurück und weisen darauf hin, dass es notwendig sei, genau abzuklären, unter welchen Bedingungen Stickstoff-Zyklus-Inhibitoren effizient einsetzbar seien. Auch in einer spanischen Metaanalyse aus dem Jahr 2014 wurde darauf hingewiesen, dass trotz der beobachteten positiven Effekte in Hinblick auf Getreideertrag eine genaue Definition der Umweltbedingungen und Management-Faktoren notwendig sei.²⁷

4.5. Auswirkungen auf Nutztiere und Menschen

Insgesamt ist die Toxizität der Inhibitoren auf Tiere und Menschen weniger untersucht als die Auswirkung auf Boden und Wasser. In einer in diesem Jahr veröffentlichten Metastudie zur Produktionssteigerung durch die Anwendung von Nitrifikationsinhibitoren bemerken die Autoren, dass zwar insgesamt die beiden betrachteten Inhibitoren (DCD und DMPP) eine unterschiedliche Toxizität aufwiesen, aber die Beurteilung der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit weiterer Studien bedürfe.²⁸

-
- 24 (a) Sprosen, M. S., Ledgard, S. F., & Lindsey, S. B. (2009). Effect of rate and form of dicyandiamide application on nitrate leaching and pasture production from a volcanic ash soil in the Waikato. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(1), 47-55.
(b) Macadam, X. M. B., del Prado, A., Merino, P., Estavillo, J. M., Pinto, M., & Gonzalez-Murua, C. (2003). Dicyandiamide and 3,4-dimethyl pyrazole phosphate decrease N₂O emissions from grassland but dicyandiamide produces deleterious effects in clover. *Journal of Plant Physiology*, 160(12), 1517-1523. doi: Doi 10.1078/0176-1617-01006
- 25 CISL (2016).
- 26 W.J. Dougherty et al.: Nitrification (DMPP) and urease (NBPT) inhibitors had no effect on pasture yield, nitrous oxide emissions, or nitrate leaching under irrigation in a hot-dry climate, *Soil Research* 54(5) 675-683 <http://dx.doi.org/10.1071/SR15330>, 25. Juli 2016.
- 27 D. Abalos et al: Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 189 (2014) 136–144.
- 28 Schlußfolgerungen in: M. Yang et al.: Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis, *Scientific Reports* 6, Article number: 22075 (2016) doi:10.1038/srep22075.

Am 6. Mai 2013 fand ein Treffen der Düngemittel-Arbeitsgruppe (Expertengruppe) der EU-Kommission statt. Aus dem Protokoll²⁹ geht hervor, dass Frankreich, basierend auf Angaben der French Safety Assessment Authority ANSES, Bedenken geäußert hatte, wonach einzelne Metaboliten nicht ausreichend charakterisiert seien und durch Auswaschung in Grund- und Oberflächenwasser gelangten, wodurch sie für Umwelt und menschliche Gesundheit Risiken darstellen könnten. Die Kritik bezog sich dabei auf den Inhibitor DMPP, ein Wirkstoff, der von der Firma BASF entwickelt wurde. Aufgrund dieser Bedenken hatte das Unternehmen BASF Stellung zu den Äußerungen von ANSES bezogen. Für DMPP habe man kein Risiko bei Arbeitern und Landwirten feststellen können. Zudem habe eine Studie gezeigt, dass über zwei Jahre hinweg das Expositionsrisiko durch Rückstände in vier verschiedenen Kulturen für Konsumenten unbedeutend war. Selbst bei unkorrekt starkem Gebrauch von DMPP sei kein Risiko feststellbar gewesen. Deutschland vertrat die Meinung, dass hiermit Abschätzungen für die Risiken von DMPP geliefert und den Bedenken ausreichend geantwortet seien.³⁰

Zudem wurden Informationen von BASF zum neuen Ureaseinhibitor LIMUS gefordert. Auch hierzu vertritt BASF die Meinung, dass LIMUS kein Risiko für die menschliche Gesundheit und Umwelt darstelle.³¹

Während Auswirkungen erhöhter Nitratkonzentrationen auf die menschliche Gesundheit immer wieder Gegenstand wissenschaftlicher Studien sind, konnten Toxizitätsstudien zu Säugetieren und Menschen, die die Wirkung von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren selbst untersuchen, im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht gefunden werden.

4.6. Emissionseffekte

In einer englischen Studie aus dem Jahr 2014 wurde untersucht, welchen Einfluss der Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren (vorwiegend DCD und DMPP) auf die Reduktion von N₂O Emissionen hat.³² DCD erwies sich als sehr effektiv für die Verringerung der direkten N₂O-Emissionen bei Dünger- und Vieh-Urin-Anwendungen mit mittleren Reduktionswirkungsgraden von 39, 69 und 70 Prozent für Ammoniumnitrat, Harnstoff und Vieh-Urin. Diese Effekte waren bei anderen Inhibitoren nicht nachweisbar. Insgesamt konnten Auswirkungen der Nitrifikationshemmer auf NH₃-Verflüchtigung, NO₃-Auslaugung, Ernteertrag oder Ernte-N-Abnahme festgestellt werden.

Auch in diesem Bereich ist wiederum zu beachten, dass die genauen Umweltgegebenheiten eine grundlegende Bedeutung haben. So wird in einer Empfehlung im Themenheft „Forschung“ des

29 Fertilisers Working Group (E01320): Minutes of the Fertiliser Working Group Meeting, 6th May 2013, vom 2. Dezember 2013 (ENTR/F2). Im Internet abrufbar unter: <http://ec.europa.eu/transparency/regexpert/index.cfm?do=groupDetail.groupDetailDoc&id=10656&no=2>, zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2016.

30 Ebd. Seite 2.

31 Ebd. Seite 3.

32 T.H. Misselbrook: An assessment of nitrification inhibitors to reduce nitrous oxide emissions from UK agriculture. Environmental Research Letters, Volume 9, Number 11, November 2014.

Senats der Bundesforschungsinstitute des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft³³ zu Bedenken gegeben:

„Neben diesen Punkten und den Emissionen aus der Herstellung der Nitrifikationshemmstoffe, die direkten Einfluss auf die Treibhausgasbilanz haben, sind nicht zuletzt auch ökotoxikologische Langzeitwirkungen der Hemmstoffe relevant. Auf welchen Standorten und in welchem Umfang die aufgezeigten Potenziale der Emissionsminderung realisiert werden können, ist bisher noch nicht abschließend geklärt. Auf gut belüfteten, sandigen Standorten, auf denen die direkten N₂O-Emissionen meist gering sind, dürfte das Potenzial der Nitrifikationsinhibitoren eher im Bereich der Vermeidung der Nitrat auswaschung und der indirekten N₂O-Emissionen liegen. Auf Standorten mit feinkörnigen Böden, die zu erhöhten N₂O-Emissionen neigen, ist wahrscheinlich der Einfluss auf die direkte N₂O-Emission dominant. [...] Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage kann der Einsatz von Nitrifikationshemmstoffen derzeit nicht als ausreichend gesicherte Klimaschutzmaßnahme in der deutschen Landwirtschaft gewertet werden“³⁴.

5. Zum Abbauverhalten von Nitrifikations- und Ureasehemmern

Auf dem bereits zitierten Treffen der Fertilisers Working Group der Kommission der EU³⁵ äußerte sich die Firma BASF auf Nachfrage der Experten zum Abbauverhalten von DMPP und LIMUS wie folgt:

„Soil analysis showed that DMPP metabolites disappeared in the soil after 60 days. BASF felt confident that they have been able to describe all metabolites and the metabolic pathway of DMPP. Furthermore, using a leaching model, Focus Pearl, the quantity of metabolites in the leachate was investigated. Predictions showed that even in a worst case scenario the quantity of metabolites in the leachate are well below the threshold of the toxicological level (10mg/litre). Toxicological analysis of the DMPP metabolites shows that they are less toxic than the parent compound and that there is no potential for accumulation in the human body as they are rapidly excreted.“³⁶

„LIMUS is synthesized directly from a mixture of NBPT and NPPT (the active ingredients) generated in a reaction with tetraphosphorochloride and ammonia. A difference of one C-H link between two active ingredients means that they have similar levels of degradation. Chemical and spectroscopic characterisation shows that the urease inhibitor contains NBTP at 63%, NPPT at 22%, secondary compounds at 10%, further secondary compounds such as amines below 4% and dimerease derivatives below 1%. The primary and secondary compounds degrade in the soil

33 Senat der Bundesforschungsinstitute des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft: Minderung von Stickstoff-Emissionen aus der Landwirtschaft, 1/2014, ISBN 3955470156, 9783955470159, im Internet abrufbar unter: http://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn054531.pdf [zuletzt abgerufen am 8. Dezember 2016].

34 Ebd. Seite 33f.

35 Fertilisers Working Group (E01320): Minutes of the Fertiliser Working Group Meeting, 6th May 2013, vom 2. Dezember 2013 (ENTR/F2).

36 Ebd. Seite 2.

within 20 days and the dimers degrade within 130 days, therefore, LIMUS was found biodegradable in soil. Furthermore, there are no effects on mortality or fertility on soil invertebrates e.g. earthworms and soil microflora/fauna. Using a standard leaching test, Focus Pearl, in 9 different EU sites (FR, FI, DE, IT, ES, AT, UK, GR, PT) and on six different crops winter/spring cereals, cauliflower, potatoes, lettuce and maize where the amount of urease inhibitor was 1.05 kg LIMUS/ha, the annual average leaching was below the drinking water limit for PPP.³⁷

6. Entfernung von Nitrifikations- und Ureasehemmern aus dem Trinkwasser

In einem Bericht über die „Bedeutung von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren für die Trinkwasserversorgung“³⁸ wird die Belastung von deutschen Fließgewässern in Hinblick auf Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren untersucht, dabei stellen die Autoren fest: „Die Nitrifikationshemmer 1H-1,2,4-Triazol und DCD wurden als neue Umweltkontaminanten identifiziert. Die bisherigen Erkenntnisse zu ihrem Vorkommen in deutschen Fließgewässern lassen punktuelle Eintragsquellen vermuten. Das Auftreten der beiden Verbindungen in durch Oberflächenwasser beeinflussten Rohwässern, die zur Trinkwassergewinnung genutzt werden, ist aufgrund ihrer Mobilität und Persistenz nicht auszuschließen.“³⁹

In einer Publikation aus diesem Jahr geht eine deutsche Wissenschaftlergruppe der Frage des Vorkommens und Verbleibs von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren in Gewässern nach.⁴⁰ Dabei wurden 1H-1,2,4-Triazol und Dicyandiamid (DCD) erstmalig in deutschen Oberflächengewässern nachgewiesen. 1H-1,2,4-Triazol fand sich nur an einzelnen Stellen. DCD hingegen war in den deutschen Oberflächengewässern ubiquitär präsent. Beide Verbindungen wurden auch in mindestens einer Abwasserbehandlungsanlage nachgewiesen. Andere Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren wurden nicht detektiert. Laborversuche zeigten, dass sowohl 1H-1,2,4-Triazol als auch DCD nicht leicht biologisch abbaubar sind und nicht zu Hydrolyse neigen. Ozonisierung und Aktivkohlefiltration erwiesen sich als Entfernungsmaßnahme als ungeeignet.

37 Ebd. Seite 3.

38 M. Scheurer, F Sacher: Bedeutung von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren für die Trinkwasserversorgung, energie/Wasser 9/2014.

39 Ebd. Seite 75.

40 M. Scheurer et al.: Occurrence and fate of nitrification and urease inhibitors in the aquatic environment, Environ. Sci.: Processes Impacts, 8. April 2016, DOI: 10.1039/c6em00014b.

7. Literaturverzeichnis

Abalos, D. et al: Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 189 (2014) 136–144.

Cambridge Institute for Sustainability Leadership: Commercial gains from addressing natural capital challenges in the dairy sector: Doing business with nature . Report by the Natural Capital Leaders Platform. Cambridge, UK: CISL, im Internet abrufbar unter: <http://www.cisl.cam.ac.uk/publications/publication-pdfs/natural-capital-challenges-dairy-technical-report.pdf> [zuletzt abgerufen am 7. Dezember 2016].

Cameron, K. C., Di, H. J., & Moir, J. L. (2014). Dicyandiamide (DCD) effect on nitrous oxide emissions, nitrate leaching and pasture yield in Canterbury, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 57(4), 251-270. doi: 10.1080/00288233.2013.797914 41.

Dai, Y., Di, H. J., Cameron, K. C., & He, J. Z. (2013). Effects of nitrogen application rate and a nitrification inhibitor dicyandiamide on methanotroph abundance and methane uptake in a grazed pasture soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(12), 8680-8689. doi:10.1007/s11356-013-1825-4.

Dennis, S. J., Cameron, K. C., Di, H. J., Moir, J. L., Staples, V., Sills, P., & Richards, K. G. (2012). Reducing Nitrate Losses from Simulated Grazing on Grassland Lysimeters in Ireland Using a Nitrification Inhibitor (Dicyandiamide). *Biology and Environment-Proceedings of the Royal Irish Academy*, 112B(1), 79-89. doi: 10.3318/Bioe.2011.24.

Di, H. J., & Cameron, K. C. (2004). Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on potassium, magnesium and calcium leaching in grazed grassland. *Soil Use and Management*, 20(1), 2-7. doi: 10.1079/Sum2003205.

Di, H. J., & Cameron, K. C. (2004). Treating grazed pasture soil with a nitrification inhibitor, econ (TM), to decrease nitrate leaching in a deep sandy soil under spray irrigation - a lysimeter study. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 47(3), 351-361.

Di, H. J., & Cameron, K. C. (2005). Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 109(3-4), 202-212. doi: 10.1016/j.agee.2005.03.006.

Di, H. J., & Cameron, K. C. (2005). Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 109(3-4), 202-212. doi: 10.1016/j.agee.2005.03.006.

Di, H. J., & Cameron, K. C. (2007). Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor - a lysimeter study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79(3), 281-290. doi: 10.1007/s10705-007-9115-5 34.

Di, H. J., & Cameron, K. C. (2007). Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor – a lysimeter study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79(3), 281-290. doi: 10.1007/s10705-007-9115-5.

-
- Di, H. J., Cameron, K. C., Shen, J. P., Winefield, C. S., O'Callaghan, M., Bowatte, S., & He, J. Z. (2011). Methanotroph abundance not affected by applications of animal urine and a nitrification inhibitor, dicyandiamide, in six grazed grassland soils. *Journal of Soils and Sediments*, 11(3), 432-439. doi: 10.1007/s11368-010-0318-z.
- Di, H.J., Cameron, K.C.: Effects of temperature and application rate of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), on nitrification rate and microbial biomass in a grazed pasture soil. *Australian journal of soil research*. Australian Journal of Soil Research 42(8) · January 2004.
- Dougherty, W.J. et al.: Nitrification (DMPP) and urease (NBPT) inhibitors had no effect on pasture yield, nitrous oxide emissions, or nitrate leaching under irrigation in a hot-dry climate, *Soil Research* 54(5) 675-683 <http://dx.doi.org/10.1071/SR15330>, 25. Juli 2016.
- Edmeades, D.C.: Nitrification and Urease Inhibitors, a review of the national and international literature on their effects on nitrate leaching, greenhouse gas emissions and ammonia volatilisation from temperate legume-based pastoral systems, ISSN: 1172-4005, Juli 2004. Im Internet abrufbar unter: <http://www.waikatoregion.govt.nz/PageFiles/2883/TR04-22.pdf> [zuletzt abgerufen am 7. Dezember 2016].
- EU-Kommission: Fertilisers Working Group (E01320): Minutes of the Fertiliser Working Group Meeting, 6th May 2013, vom 2. Dezember 2013 (ENTR/F2).
- Guo, Y. J., Di, H. J., Cameron, K. C., Li, B. W., Podolyan, A., Moir, J. L., He, J. Z. (2013). Effect of 7-year application of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), on soil microbial biomass, protease and deaminase activities, and the abundance of bacteria and archaea in pasture soils. *Journal of Soils and Sediments*, 13(4), 753-759. doi: 10.1007/s11368-012-0646-2.
- Hendrickson, L.L.: Corn yield response to the urease inhibitor NBPT: five year summary. *Journal of production agriculture* 5: 131-137.
- Herbst, F., Gans, W., Merbach, W.: Einfluss eines Urease-Inhibitors bei Harnstoff-Düngung auf den Stickstoff-Umsatz im Boden, die Ammoniak-Verflüchtigung und die Verwertung des Stickstoffs durch Hafer, *Pflanzenbauwissenschaften*, 10 (1). S. 37–43, 2006, ISSN 1431-8857.
- Ledgard, S. F., Luo, J., Sprosen, M. S., Wyatt, J. B., Balvert, S. F., & Lindsey, S. B. (2014). Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on pasture production, nitrous oxide emissions and nitrate leaching in Waikato, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 57(4), 294-315. doi: 10.1080/00288233.2014.928642 38. Macadam, X. M. B., del Prado, A., Merino, P., Estavillo, J. M., Pinto, M., & Gonzalez-Murua, C. (2003). Dicyandiamide and 3,4-dimethyl pyrazole phosphate decrease N₂O emissions from grassland but dicyandiamide produces deleterious effects in clover. *Journal of Plant Physiology*, 160(12), 1517-1523. doi: 10.1078/0176-1617-01006.
- Menneer, J. C., Sprosen, M. S., & Ledgard, S. F. (2008). Effect of timing and formulation of dicyandiamide (DCD) application on nitrate leaching and pasture production in a Bay of Plenty pastoral soil. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51(3), 377-385. doi: 10.1080/00288230809510468.

Menneer, J. C., Sprosen, M. S., & Ledgard, S. F. (2008). Effect of timing and formulation of dicyandiamide (DCD) application on nitrate leaching and pasture production in a Bay of Plenty pastoral soil. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51(3), 377-385. doi: 10.1080/00288230809510468.

Misselbrook, T.H.: An assessment of nitrification inhibitors to reduce nitrous oxide emissions from UK agriculture. *Environmental Research Letters*, Volume 9, Number 11, November 2014.

Moir, J. L., Cameron, K. C., & Di, H. J. (2007). Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil mineral N, pasture yield, nutrient uptake and pasture quality in a grazed pasture system. *Soil Use and Management*, 23(2), 111-120. doi: DOI 10.1111/j.1475-2743.2006.00078.x

Monaghan, R. M., Smith, L. C., & Ledgard, S. F. (2009). The effectiveness of a granular formulation of dicyandiamide (DCD) in limiting nitrate leaching from a grazed dairy pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(2), 145-159.

Monaghan, R. M., Smith, L. C., & Ledgard, S. F. (2009). The effectiveness of a granular formulation of dicyandiamide (DCD) in limiting nitrate leaching from a grazed dairy pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(2), 145-159.

Monaghan, R. M., Smith, L. C., & Ledgard, S. F. (2009). The effectiveness of a granular formulation of dicyandiamide (DCD) in limiting nitrate leaching from a grazed dairy pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(2), 145-159.

O'Callaghan, M., Nelson, T., Lardner, R., Carter, P., Gerard, E., & Brownbridge, M. (2010). Nontarget impacts of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil biota. Paper presented at the 19th World Congress of Soil Science.

O'Callaghan, M., Nelson, T., Lardner, R., Carter, P., Gerard, E., & Brownbridge, M. (2010). Nontarget impacts of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil biota. Paper presented at the 19th World Congress of Soil Science; im Internet abrufbar unter: <http://iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/1885.pdf> [zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2016].

O'Callaghan, M., Gerard, E. M., Carter, P. E., Lardner, R., Sarathchandra, U., Burch, G., Bell, N. (2010). Effect of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on microbial communities in a pasture soil amended with bovine urine. *Soil Biology & Biochemistry*, 42(9), 1425-1436. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.05.003.

Scheurer, M., Sacher, F.: Bedeutung von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren für die Trinkwasserversorgung, energie/wasser-praxis 9/2014, im Internet abrufbar unter: http://www.tzw.de/de/projekte/stoffbewertung/studie_zur_bedeutung_von_nitri-674/ [zuletzt abgerufen am 6. Dezember 2016].

Schinner, F., Sonnleitner, R.: *Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik Band III*, Springer-Verlag, 1997, ISBN 978-3-642-63904-3.

Senat der Bundesforschungsinstitute des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft: Minderung von Stickstoff –Emissionen aus der Landwirtschaft, 1/2014, im Internet abrufbar unter: http://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn054531.pdf [zuletzt abgerufen am 8. Dezember 2016].

Singh, J., Saggar, S., & Bolan, N. S. (2009). Influence of dicyandiamide on nitrogen transformation and losses in cow-urine-amended soil cores from grazed pasture. *Animal Production Science*, 49(3), 253-261. doi: 10.1071/EA08200 37.

Spektrum: Kompaktlexikon der Biologie, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, im Internet abrufbar unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/nitrifikation/8216> [zuletzt abgerufen am 6. Dezember 2016].

Sprosen, M. S., Ledgard, S. F., & Lindsey, S. B. (2009). Effect of rate and form of dicyandiamide application on nitrate leaching and pasture production from a volcanic ash soil in the Waikato. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(1), 47-55.

Williamson, J. C., Menneer, J. C., & Torrens, R. S. (1996). Impact of dicyandiamide on the internal nitrogen cycle of a volcanic, silt loam soil receiving effluent. *Applied Soil Ecology*, 4(1), 39-48. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0929-1393\(96\)00100-X](http://dx.doi.org/10.1016/0929-1393(96)00100-X).

Williamson, J. C., Menneer, J. C., & Torrens, R. S. (1996). Impact of dicyandiamide on the internal nitrogen cycle of a volcanic, silt loam soil receiving effluent. *Applied Soil Ecology*, 4(1), 39-48. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0929-1393\(96\)00100-X](http://dx.doi.org/10.1016/0929-1393(96)00100-X).

Yang, M. et al.: Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis, *Scientific Reports* 6, Article number: 22075 (2016) doi: 10.1038/srep22075.