



Stikstofbenutting en nitraatuitspoeling bij dierlijke mest en kunstmest op gemaaid grasland

Resultaten van veld-, pot- en incubatieproeven in 2018-2021

Wim van Dijk, René Rietra, Mart Ros & Willem de Visser



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH



Stikstofbenutting en nitraatuitspoeling bij dierlijke mest en kunstmest op gemaaid grasland

Resultaten van veld-, pot- en incubatieproeven in 2018-2021

Wim van Dijk¹, René Rietra¹, Mart Ros¹ & Willem de Visser¹

¹ Wageningen University & Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Stichting Wageningen Research (WR) in opdracht van en gefinancierd door het Ministerie van LNV [in het kader van het beleidsondersteunend onderzoek, project nummer BO-43-101-015).

WR is een onderdeel van Wageningen University & Research, samenwerkingsverband tussen Wageningen University en de Stichting Wageningen Research.

Wageningen, Mei 2024

Rapport WPR-1336

Van Dijk, W., R.P.J.J. Rietra, M. Ros & W. de Visser, 2024. Stikstofbenutting en nitraatuitspoeling bij dierlijke mest en kunstmest op gemaaid grasland. Resultaten van veld-, pot- en incubatieproeven in 2018-2021. Wageningen Research, Rapport WPR-1336. 78 blz.; 19 fig.; 21 tab.; 36 ref.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/657782>

In Nederland is het gebruik van dierlijke mest in plaats van kunstmest op grasland en de gevolgen daarvan voor de nitraatuitspoeling regelmatig onderwerp van discussie. Daarom zijn in de periode 2018-2021 een veldproef en ondersteunende pot- en incubatieproeven uitgevoerd, waarbij gebruik van kunstmest en dierlijke mest is vergeleken bij maaigrasland. De resultaten lieten zien dat de gewasstikstofbenutting bij kunstmest hoger was dan bij dierlijke mest ook als de recente nawerking uit toegediende mestgiften in het verleden werd meegenomen. In het algemeen werden geen duidelijke verschillen in nitraatuitspoeling tussen kunstmest en dierlijke mest gevonden.

Trefwoorden: stikstof, kunstmest, dierlijke mest, uitspoeling, grasland

© 2024 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business Unit Agrosysteemkunde, P.O. Box 16, 6700 AA Wageningen, The Netherlands; T +31 (0)317 48 07 00; www.wur.eu/plant-research

KvK: 09098104 te Arnhem
VAT NL no. 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Rapport WPR-1336

Foto omslag: Pas gemaaid grasland (eigendom WUR)

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Achtergrond	11
1.2 Doel	12
1.3 Globale aanpak	13
1.4 Leeswijzer	13
2 Veldproef	15
2.1 Inleiding	15
2.2 Materiaal en methode	15
2.2.1 Locatie	15
2.2.2 Experimentele opzet	16
2.2.3 Metingen	19
2.2.4 Berekening N-benutting en -werking	20
2.2.5 Statistische analyse	21
2.2.6 Weersomstandigheden	21
2.3 Resultaten	23
2.3.1 N-opbrengst gras	24
2.3.2 ANR en ANE	27
2.3.3 N-werkingscoëfficiënt	30
2.3.4 Minerale bodem-N	33
2.3.5 Nitraatuitspoeling	34
2.3.6 Uitspoeling organische stikstof	38
2.3.7 Stikstofmineralisatie van bodem op het einde van het veldexperiment	38
3 Pot- en incubatieproeven	41
3.1 Inleiding	41
3.2 Materialen en Methoden	41
3.2.1 Potproef	41
3.2.2 Stikstofmineralisatie van organische meststoffen	45
3.2.3 Potentiële denitrificatie	45
3.3 Resultaten	45
3.3.1 Lachgasemissies	45
3.3.2 Grasopbrengst en N-opname	46
3.3.3 Stikstofuitspoeling	46
3.3.4 Potentiële denitrificatie	50
3.3.5 Bodemeigenschappen	51
3.3.6 Stikstofmineralisatie van meststoffen	51
4 Discussie en conclusies	53
4.1 Discussie	53
4.2 Conclusies	56
Referenties	59
Bijlage 1 Proefveldschema veldexperiment	61
Bijlage 2 Tijdstippen bemesting en oogst van het gras	62
Bijlage 3 Berekening optreden horizontaal transport van grondwater	63

Bijlage 4	Drogestofopbrengst gras (kg per ha)	64
Bijlage 5	N-opbrengst gras (kg per ha)	66
Bijlage 6	Minerale bodem-N in het voorjaar (kg per ha)	68
Bijlage 7	Minerale bodem-N in de herfst (kg per ha)	69
Bijlage 8	Nitraatconcentratie in het bovenste grondwater (mg/l)	71
Bijlage 9	Methodiek metingen incubatie-experiment	73
Bijlage 10	Resultaten pot- en incubatie-proeven	75

Woord vooraf

In het kader van het Additionele Onderzoek voor LNV met betrekking tot het 6^e Nederlandse Actieprogramma voor de EU Nitraatrichtlijn is experimenteel onderzoek uitgevoerd naar de verschillen in gewasbenutting van stikstof en nitraatuitspoeling tussen dierlijke mest en kunstmest op maaigrasland. Aanleiding was de discussie over de uitspoelingsrisico's van kunstmest t.o.v. dierlijke mest op maaigrasland. Dit rapport beschrijft de resultaten van de veldproef en de aanvullende pot- en incubatieproeven.

Speciale dank gaat uit naar Jaap Schröder voor het ontwikkelen van de proefopzet en de begeleiding van de veldproef in 2018 en 2019, Paul Goedhart bij de ondersteuning bij de statistische analyse van de veldproef en Rima Porre voor de ondersteuning bij de statistische analyse en de opmaak van figuren bij de pot- en incubatieproeven.

De auteurs

Samenvatting

In Nederland is het gebruik van dierlijke mest in plaats van kunstmest op grasland en de gevolgen daarvan voor de nitraatuitspoeling regelmatig onderwerp van discussie. Enerzijds kan de kans op nitraatuitspoeling bij gebruik van dierlijke mest groter zijn als gevolg van ontijdige mineralisatie van de organische stikstof (N) in perioden waarin geen of slechts beperkte N-opname door gewassen plaatsvindt of door negatieve niet-N-effecten zoals schade door de toediening. Aan de andere kant kan een combinatie van verhoogde gasvormige N-verliezen (o.a. ammoniakvervluchtiging en denitrificatie), een meer geleidelijk vrijkomen van N uit mest en eventueel een hogere opname van N door het gewas als gevolg van positieve niet-N-effecten, resulteren in een verlaagd risico van uitspoeling. Om de impact van de soort meststof op de N-benutting door gras en de nitraatuitspoeling te onderzoeken, zijn een meerjarige veldproef, een potproef en een aantal incubatieproeven uitgevoerd.

Opzet onderzoek

In de veldproef zijn verschillende soorten kunstmest en dierlijke mest met elkaar vergeleken. Bij de kunstmestsoorten ging het om kalkammonsalpeter (KAS) en ureum met een ureaseremmer, bij de dierlijke mestsoorten zijn rundveedrijfmest, vergiste rundveedrijfmest en varkensdrijfmest meegenomen. In 2018 is bij de beide kunstmestsoorten bij de bemesting van de eerste snede ook een latere toediening meegenomen (eind maart vs. half april). Per kunstmest- en dierlijke mestsoort zijn vier bemestingsregimes met elkaar vergeleken: een controle zonder N-bemesting en een jaarlijkse N_{totaal}-bemesting van 300 kg per ha voor één, twee en drie opeenvolgende jaren. Deze opzet geeft de mogelijkheid om zowel de eerstejaars N-benutting (hier weergegeven met apparent N-recovery, ANR) als de nawerking in de jaren erna vast te stellen. De ANR werd berekend als het verschil in N-opname tussen het bemeste en onbemeste object gedeeld door de N-gift. Jaarlijks werd de N-opname door het gras, de hoeveelheid minerale bodem-N in de herfst (laag 0-60 cm-mv) en het nitraatgehalte in het bovenste grondwater gemeten.

Aanvullend op de veldproef is een potproef uitgevoerd met gras, waarin twee kunstmestsoorten (KAS en ammoniumsulfaat) en een aantal dierlijke mestproducten (o.a. rundveedrijfmest en vergiste rundveedrijfmest) met elkaar zijn vergeleken. In het experiment zijn twee groeicycli van elk 52 dagen uitgevoerd met per cyclus een N-bemesting van 100 kg N_{totaal} per ha. Deze vergelijking is gedaan met drie grondsoorten: grond uit de bovenlaag van een gras- en bouwlandperceel op zandgrond en grond uit de ondergrond van een graslandperceel op zandgrond. Naast de N-opname van het gras is de lachgasemissie (als indicator van denitrificatie) en de nitraatuitspoeling gemeten. Aan het eind van het experiment is in incubatieproeven de potentiële denitrificatie en de N-mineralisatie gemeten van grond uit de bovenste bodemlaag van de potproef.

Veldproef

In de veldproef bedroeg gemiddeld over de jaren (2018, 2019 en 2020) de eerstejaars ANR 0,75 tot 0,80 voor de kunstmestsoorten en 0,42 tot 0,56 voor de dierlijke mestsoorten. Tussen de beide kunstmestsoorten was het verschil in eerstejaars ANR gemiddeld over de jaren niet significant. In de afzonderlijke jaren waren er wel verschillen. In 2018 was bij KAS bij de vroege toediening de ANR significant lager dan bij de late toediening (0,76 vs 0,83), bij UREUM was het verschil in ANR tussen de vroege en late toediening (0,76 vs 0,80) niet significant. In 2020 was de ANR van UREUM significant lager dan die van KAS (0,72 vs 0,83).

De eerstejaars ANR was voor varkensdrijfmest significant hoger dan voor de (vergist) rundveedrijfmest: 0,56 vs 0,42-0,44. Wanneer ook het tweede en derde jaar, nadat de bemesting was gestopt, werden meegenomen steeg de ANR met 0,06 tot 0,13 (nawerkingseffect). Dit effect werd niet waargenomen bij de kunstmestsoorten.

Op basis van de verschillen in ANR tussen dierlijke mest en kunstmest kan de N-werkingscoëfficiënt van de dierlijke mest worden berekend. Deze geeft aan welk deel van de toegediende dierlijke mest-N dezelfde werking heeft als kunstmest. Gemiddeld over de jaren bedroeg de eerstejaars werkingscoëfficiënt 0,55-0,57 voor (vergist) rundveedrijfmest en 0,73 voor varkensdrijfmest. Inclusief de nawerking steeg de N-werkingscoëfficiënt naar 0,62-0,65 voor (vergist) rundveedrijfmest en 0,84 voor varkensdrijfmest.

In twee van de drie jaar was in het jaar van toediening bij de bemeste objecten de hoeveelheid minerale bodem-N in de herfst significant hoger bij de objecten met dierlijke mest dan bij de objecten met kunstmest. In de daaropvolgende onbemeste jaren, werden geen verschillen gevonden in minerale bodem-N tussen dierlijke mest en kunstmest.

Bemesting leidde in de winter na het jaar van toediening gemiddeld over de meststoffen tot significant hogere nitraatgehalten in het bovenste grondwater t.o.v. van de controle. Het nitraatgehalte verschilde in het algemeen niet tussen de dierlijke mest en kunstmestobjecten, dat gold voor zowel het jaar van bemesting als de jaren nadat de bemesting was gestopt. Bij de veldproef was alleen bij de vroeg toegediende KAS in 2018 het nitraatgehalte in het bovenste grondwater significant hoger dan bij de dierlijke mestsoorten RDM en VDM. In het algemeen waren de nitraatgehalten relatief laag uiteenlopend van circa 15 tot 30 mg nitraat per liter.

Pot- en incubatieproeven

In de potproef was, evenals in de veldproef, de ANR van de kunstmest-N hoger dan van de dierlijke mest-N. Ook hier werden geen verschillen in nitraatuitspoeling gevonden tussen de kunstmest en de dierlijke mestsoorten. In één van de twee groeicycli was de lachgasemissie bij het object met rundveedrijfmest hoger dan bij het KAS-kunstmest-object. Bij één van de drie meegenomen grondsoorten in de pottenproef (graslandondergrond) was de potententiele denitrificatie bij digestaat en dunne fractie (maar niet bij rundveedrijfmest) hoger dan bij de controle en de kunstmeststoffen. Dit kan duiden op meer gasvormige N-verliezen.

De incubatieproef waarin de mineralisatie is gemeten liet zien dat alleen bij grond waarop vloeibare mestproducten waren toegediend, er sprake was van extra mineralisatie (t.o.v. de controle zonder dierlijke mest), terwijl dit bij de vaste producten niet het geval was.

Conclusie

Samenvattend kan worden gesteld dat het gebruik van dierlijke mest vergeleken met kunstmest een significant lagere N-benutting gaf in het jaar van toediening. Ook wanneer de nawerking in het tweede en derde jaar na toediening werd meegenomen bleef dit verschil aanwezig. De gevonden verschillen in gewasbenutting hebben echter gemiddeld niet geleid tot duidelijke verschillen in nitraatgehalte in het bovenste grondwater.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Voor een goede gewasproductie is in de meeste gevallen bemesting nodig w.o. stikstof (N). De N-bemesting heeft echter ook invloed op de milieukwaliteit o.a. via gasvormige N-verliezen en de nitraatuitspoeling naar het grond- en oppervlaktewater. Bij de bemesting wordt gebruik gemaakt van organische mest en/of kunstmest, meestal van een combinatie van beide. Bij organische mest gaat het voor een belangrijk deel om dierlijke mest. In Nederland is een discussie ontstaan over de vraag in hoeverre de keuze van de meststof, dierlijke mest of kunstmest, de nitraatuitspoeling beïnvloedt.

De benutting van N uit meststoffen door het gewas wordt bepaald door de mate waarin deze beschikbaar is voor opname door het gewas en de efficiëntie, waarmee het gewas de beschikbare N opneemt. De beschikbaarheid wordt beïnvloed door 1) gasvormige N-verliezen door ammoniakvervluchtiging bij toediening en door denitrificatie, 2) de mate van synchronisatie van de beschikbaarheid van opneembare N met de actieve N-opname door het gewas en 3) verliezen door uit en afspoeling.

Ammoniakverliezen zijn vooral bij toepassing met ondiepe injectietechnieken, zoals op grasland, hoger dan bij de meeste kunstmeststoffen. Zo bedraagt voor grasland de emissiefactor voor ammoniak-N bij toediening van dunne mest met emissiearme technieken 17-25%, terwijl de emissiefactor voor kunstmeststoffen 2-14% is (Van Bruggen et al., 2023). Bij toediening op bouwland via diepe injectie bedraagt de emissiefactor voor ammoniak-N slechts 2% van de ammoniak-N. Naast ammoniakverliezen kunnen denitrificatieverliezen voor dierlijke mest-N hoger zijn dan voor kunstmest-N, omdat de organische stof in de dierlijke mest als substraat kan dienen voor denitrificerende bacteriën (Velthof & Rietra, 2018; Zaman et al., 2012). Gasvormige N-verliezen zijn niet gewenst, maar verlagen het risico van nitraatuitspoeling.

Bij zowel dierlijke mest- als kunstmest-N speelt ook de synchronisatie van de beschikbaarheid van opneembare N met de gewas-N-opname een belangrijke rol bij de gewasbenutting en de risico's van nitraatuitspoeling. Bij dierlijke mest zal een deel van de organische N mineraliseren buiten de periode dat het gewas actief N opneemt, hierna ontijdige mineralisatie genoemd, en kan deels verloren gaan door uitspoeling. Aangezien de N-opnameperiode voor gras langer is dan voor veel bouwlandgewassen, is de impact van de ontijdige mineralisatie voor grasland kleiner dan voor bouwlandgewassen (Schröder et al., 2007a). Bij benutting van de organische N in dierlijke mest speelt ook mee dat een deel pas vrijkomt in jaren nadat de dierlijke mest is toegediend. Bij een vergelijking met kunstmest is het van belang dat dit lange termijn effect wordt meegenomen.

Vlak na de bemesting kan het ook zijn dat de beschikbaarheid van opneembare N hoger is dan de opnamesnelheid door het gewas. Dit speelt vooral bij gebruik van meststoffen met veel minerale N. Met name in situaties met intensieve regenval kort na de bemesting kan minerale N uitspoelen. Voor kunstmest die volledig uit minerale N bestaat en waarbij de N vaak deels in de vorm van het makkelijk uitspoelbare nitraat aanwezig is, is dit risico groter dan voor dierlijke mest die deel maar voor een deel uit minerale N bestaat. Dit argument werd ook aangedragen door De Boer (2017) voor de stelling dat gebruik van rundveedrijfmest minder uitspoeling zou geven dan gebruik van kunstmest. Uit modelberekeningen (o.a. op basis van neerslagpatronen) bleek echter dat de combinatie van intensieve regenval vlak na de bemesting onder Nederlandse omstandigheden relatief weinig voorkomt (CDM, 2017).

Het gebruik van dierlijke mest kan ook leiden tot niet-N-effecten op de groei en N-opname van het gewas. Met dierlijke mest wordt ook organische stof aangevoerd. Dit kan op termijn leiden tot een hoger organische stofgehalte in de bodem en daardoor bijvoorbeeld tot een iets hogere waterbeschikbaarheid. De laatste kan een gunstig effect hebben op de N-opname door het gewas. Bij gebruik op grasland zullen naar verwachting niet-N-effecten als gevolg van extra organische stof eerder optreden op bouwland dan op grasland vanwege de hoge organische stofaanvoer vanuit gewasresten van gras. Ook op bouwland is het effect van extra organische stof op de opbrengst in het algemeen overigens niet altijd duidelijk (Hijbeek et al., 2017; Edmeades, 2003), hoewel er soms voor specifieke gewassen wel positieve effecten werden gevonden (De Haan et al., 2017; Hijbeek et al., 2017).

Positieve niet-N-effecten kunnen ook een gevolg zijn van extra aanvoer van andere nutriënten zoals fosfaat, kali, magnesium en micronutriënten. Wat betreft de macronutriënten wordt daar doorgaans voor gecompenseerd in de objecten zonder of met minder organische mest.

Er kan ook sprake zijn van *negatieve* niet-N-effecten. Bij gebruik van dierlijke mest is dit bijvoorbeeld het geval bij schade aan de graszode bij de toediening door verbranding, besmeuring met mest of insporing onder natte omstandigheden.

In het algemeen blijkt uit experimenten waarin dierlijke mest is vergeleken met kunstmest dat de N-benutting door het gewas bij dierlijke mest lager is dan van kunstmest, ook als rekening wordt gehouden met de nawerking van de organische N in dierlijke mest (Schils et al., 2000; Schröder, 2007b; Webb et al., 2013). Ook in de Nederlandse advisering gebruikte werkingscoëfficiënten zijn lager dan 100% en lopen, afhankelijk van dierlijke mestsoort, uiteen van 30 tot 80% (www.bemestingsadvies.nl). Bij gebruik van dierlijke mest is nawerking in de jaren na toediening een relevante factor bij de beoordeling van de N-benutting door het gewas. Dit werd ook bevestigd door een langjarig onderzoek van Müller et al. (2011), waaruit bleek dat de N-opname door het gewas in de tijd toenam bij jaarlijks gebruik van rundveedrijfmest, terwijl deze bij jaarlijks gebruik van alleen kunstmest gelijk bleef. De toename van de N-opname bij de dierlijke mest hing af van de omvang van de jaarlijkse dierlijke mestgift.

Een hogere N-benutting bij kunstmest betekent niet dat de nitraatuitspoeling lager hoeft te zijn. Zoals eerder aangegeven hangt dit af van wat de oorzaak is van de lagere N-benutting bij gebruik van dierlijke mest. Als dit vooral een gevolg is van gasvormige verliezen heeft dat niet direct gevolgen voor de nitraatuitspoeling.

Wat betreft de verschillen in N-uitspoeling tussen organische mest en kunstmest is het beeld in de (inter)nationale literatuur wisselend. Uit Schröder et al. (2010) bleek dat vervanging van kunstmest door dierlijke mest bij een gelijke aanvoer van werkzame N (niveau 300-340 kg N per ha per jaar) niet leidde tot een verschil in uitspoeling bij maaigrasland. De Boer et al. (2022) vergeleken op maaigrasland een combinatie van dierlijke mest en kunstmest met alleen kunstmest beide bij een gelijke aanvoer van werkzame N (circa 320 kg N per ha) en vond in twee van de drie veldproeven een lager nitraatgehalte bij de combinatie van dierlijke mest en kunstmest. In beide genoemde onderzoeken betrof de duur van het onderzoek twee jaar, waardoor lange termijn effecten van de organische N uit dierlijke mest slechts beperkt zichtbaar werden. Kayser et al. (2015) vergeleken toediening van dierlijke mest en kunstmest op maaigrasland bij een viertal N-bemestingsniveaus en vonden dat de nitraatuitspoeling afhing van het N-bemestingsniveaus, maar dat er geen verschil was in uitspoeling tussen dierlijke mest en kunstmest bij vergelijkbare N-bemestingsniveaus. Jarvis et al. (1987) vergeleken in een 5-jarige proef met grasland op een zandgrond in Ruurlo een N-bemesting met alleen kunstmest (kalkammonsalpeter) met een N-bemesting met diverse combinaties van dierlijke mest en kunstmest. Bij een gelijke aanvoer van werkzame N was de nitraatuitspoeling bij de objecten met alleen kunstmest hoger dan bij de combinaties dierlijke mest en kunstmest, respectievelijk, circa 10% en 5% van de aangevoerde werkzame N spoelde uit. De auteurs gaven aan dat dit deels zou kunnen zijn veroorzaakt door meer gasvormige verliezen bij de combinaties van dierlijke mest en kunstmest. In een tweejarig lysimeteronderzoek met gras op kleigrond werd een bemesting met varkensdrijfmest vergeleken met kunstmest (ammoniumnitraat) bij een jaarlijkse aanvoer van 400 kg werkzame N per ha (o'Callaghan & Flowers, 1981). De gemeten uitspoeling bij de bemesting met varkensmest was lager dan die bij kunstmest. In het ene jaar bedroeg de uitspoeling 153 kg N per ha bij de varkensmest en 163 kg N per ha bij de kunstmest, in het andere jaar bedroeg de uitspoeling, respectievelijk, 26 en 46 kg N per ha.

Om de vraag te beantwoorden of gebruik van dierlijke mest-N leidt tot een verschil in nitraatuitspoeling met gebruik van kunstmest-N, is een meerjarige veldproef met maaigrasland aangelegd op een zandgrond. Aanvullend is een potproef en een aantal incubatieproeven uitgevoerd, waarin is gekeken naar verschillende verliesprocessen.

1.2 Doel

Het doel van dit project is het vaststellen van verschillen in gewas-N-benutting en nitraatuitspoeling tussen dierlijke mest en kunstmest op maaigrasland en het aangeven van oorzaken van waargenomen verschillen.

Het onderzoek focust op grasland, omdat de discussie rond N-verliezen tussen dierlijke mest en kunstmest in de praktijk zich vooral op dit gewas richt.

1.3 Globale aanpak

Het onderzoek bestond uit een combinatie van een meerjarige veldproef en pot- en incubatieproeven waarin kunstmeststoffen en dierlijke mestsoorten worden vergeleken bij eenzelfde totale N-aanvoer. De veldproef is zo opgezet dat ook effecten van mest na het jaar van toepassing (nawerking) worden meegenomen. Dit is relevant omdat in een bepaald jaar toegediende mest-N die in dat jaar niet door het gewas is opgenomen, niet noodzakelijkerwijs verloren hoeft te gaan, maar in latere jaren kan vrijkomen en dan deels alsnog door het gewas kan worden benut of alsnog verloren kan gaan. De pot- en incubatieproeven worden gedaan om specifieke verliezen te beoordelen (o.a. uitspoeling, denitrificatie). Voor zowel de veldproef als de pot- en incubatieproeven is gekozen voor maaigrasland als testgewas.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de opzet en de resultaten van de veldproef beschreven, in hoofdstuk 3 de opzet en de resultaten van de pot- en incubatieproeven. In hoofdstuk 4 vindt een discussie plaats van de resultaten en vervolgens worden de belangrijkste conclusies weergegeven.

2 Veldproef

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de veldproef beschreven. Als testgewas is gekozen voor gemaaid grasland. Omdat dierlijke mest door nawerking meerjarige effecten heeft op de N-benutting en -verliezen is een meerjarenexperiment uitgevoerd om onderscheid te maken tussen de 1^e-jaarseffecten en de effecten na het jaar van toediening.

2.2 Materiaal en methode

2.2.1 Locatie

Het experiment is uitgevoerd op een zandgrond in Bennekom in Nederland in de periode 2018-2021. De bodemeigenschappen zijn weergegeven in Tabel 2.1. Het gehalte aan fosfor en magnesium was relatief hoog. De bemonstering is afzonderlijk uitgevoerd voor het oostelijk en westelijk deel van de proeflocatie. Er werden geen significante verschillen waargenomen tussen de twee delen, behalve voor het fosforgehalte dat hoger was in het westelijke deel. Aangezien de gehalten ook hoog waren in het oostelijke deel, zal dit naar verwachting geen effect hebben gehad op de groei van het gewas. Bovendien was de fosfaatbemesting hoger dan volgens het bemestingsadvies nodig zou zijn (zie ook later in dit hoofdstuk).

Het perceel waarop het proefveld lag, heeft voorafgaand aan het experiment ruim 10 jaar in grasland gelegen. Het graslandbeheer bestond voor aanvang van het experiment uit een mix van beweiden en maaien. Tijdens het experiment werd het gras alleen gemaaid. De graszode bestond hoofdzakelijk uit Engels raaigras, terwijl er her en der wel kweekgras aanwezig was. In een aantal jaren is een bespuiting uitgevoerd tegen onkruiden.

Tabel 2.1 Bodemeigenschappen van het perceelsdeel waarop het veldexperiment is uitgevoerd (bemonstering op 21 maart 2018).

Parameter	Oostelijk deel ¹			Westelijk deel ²		
	0-10 cm	10-30 cm	30-60 cm	0-10 cm	10-30 cm	30-60 cm
Textuur						
Klei (% < 2 µm)	8	4	3	8	3	2
Slib (% 2-50 µm)	7	9	8	6	7	7
Zand (% > 50 µm)	85	88	90	86	90	91
pH	5,6	5,3	5,2	5,8	5,4	5,3
Organische stof (%)	8,4	3,9	2,8	8,6	3,1	2,4
Totaal N (mg/kg)	3,1	1,3	0,8	3,2	1,2	0,9
P-AL (mg P ₂ O ₅ /100 gram)	91	81	42	136	140	82
P-plant beschikbaar (mg/kg)	6,0	2,0	0,4	12,2	5,4	1,9
K-plant beschikbaar (mg/kg)	50	23	21	40	28	28
Mg (mg/kg)	201	124	54	234	119	69
S (mg/kg)	5	2	2	5	2	2

¹ plots 1-28 (herhaling I) and 57-84 (herhaling III), voor situering plots zie Bijlage 1.

² plots 29-56 (herhaling II) and plots 85-112 (herhaling IV), voor situering plots zie Bijlage 1.

2.2.2 Experimentele opzet

In het experiment zijn verschillende soorten kunstmest en dierlijke mest met elkaar vergeleken bij verschillende bemestingsregimes. Tabel 2.2 geeft de gebruikte kunstmest- en dierlijke mestsoorten weer. Bij de kunstmestsoorten zijn kalkammonsalpeter (KAS) en ureum (UREUM) meegenomen. KAS bestaat voor 50% uit ammonium-N en 50% uit nitraat-N, terwijl UREUM voor 100% uit ureum-N bestaat. Na toediening moet de ureum-N eerst worden omgezet in ammonium-N voordat het door het gewas kan worden opgenomen. Onder omstandigheden met risico's voor uitspoeling (bijvoorbeeld vroege toediening in het voorjaar voor de eerste snede of na zware buien in de zomer) zou het gebruik van UREUM mogelijk gunstiger kunnen zijn dan het gebruik van KAS aangezien nitraat-N gevoeliger is voor uitspoeling dan ammonium-N. Aan de UREUM-meststof was een ureaseremmer toegevoegd om kort na toediening vervluchtigingsverliezen te verminderen.

Er zijn drie verschillende soorten dierlijke mest gebruikt: digestaat (na vergisting rundveedrijfmest, DIG), rundveedrijfmest (RDM) en varkensdrijfmest (VDM). De gemiddelde samenstelling van de mestsoorten is weergegeven in Tabel 2.3. Voor de N-voorziening zijn de verhouding NH_4-N/N_{totaal} en de afbreekbaarheid van de organische N van belang. De verhouding NH_4-N/N_{totaal} varieerde gemiddeld over alle toedieningen van 0,51 voor RDM tot 0,57 voor VDM. De afbreekbaarheid van de organische stof en organische N is niet bepaald, maar zal naar verwachting toenemen in de volgorde DIG < RDM < VDM.

Voor de eerste snede waren bij de twee kunstmestsoorten twee toedieningsmomenten gepland: vroege toediening (op het moment dat ook de dierlijke mest is toegediend) en 2-3 weken later. Door omstandigheden is het in 2019 en 2020 niet gelukt om de late toediening te realiseren. Bij de dierlijke mestsoorten is bij de 1^e snede slechts één toedieningstijdstip meegenomen (op het optimale tijdstip volgens de bemestingsadviezen en bodemgesteldheid).

Tabel 2.2 *Vergeleken kunstmest- en dierlijke mestsoorten.*

	Toedieningstijdstip 1 ^e snede	
	Normaal	Laat ¹
<i>Kunstmest</i>		
Kalkammonsalpeter	X	X
Ureum	X	X
<i>Dierlijke mest</i>		
Digestaat (van vergiste rundveedrijfmest)	X	
Rundveedrijfmest	X	
Varkensdrijfmest	X	

¹ alleen uitgevoerd in 2018.

Tabel 2.3 *Samenstelling dierlijke mest (kg per ton, gemiddelde van alle toedieningen in 2018-2020).*

	Droge stof	Organische stof	N _{totaal}	NH ₄ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	NH ₄ -N/N _{totaal}	N/P ₂ O ₅	C/N _{tot}	C/N _{org}
DIG	63,0	45,6	4,11	2,25	1,54	5,61	1,26	0,54	3,15	5,7	12,4
RDM	62,3	47,3	4,20	2,14	1,31	4,40	1,34	0,51	3,22	5,6	11,5
VDM	83,3	65,9	6,01	3,59	2,55	5,06	1,65	0,57	2,59	5,4	13,2

Zowel de kunstmestobjecten (soort x toepassingstijd in 1^e snede) als de dierlijke mestsoorten zijn vergeleken bij vier verschillende bemestingsregimes (Tabel 2.4). Deze bestonden uit geen N-bemesting (controle) en een jaarlijkse bemesting van 300 kg N-totaal per ha gedurende één, twee en drie jaar. Zo kunnen na vier jaar (in 2021) behandelingen worden onderscheiden die 4, 3, 2 of 1 jaar geen N hebben gekregen. Deze contrasten kunnen worden gebruikt om de N-benutting te bepalen in zowel het jaar van toediening als in de jaren erna (zie ook paragraaf 2.2.4).

Tabel 2.4 Geplande jaarlijkse N-totaal bemesting (kg per ha) voor de kunstmest- en de dierlijke mestobjecten.

N-bemestingsregime	2018	2019	2020	2021
Geen (controle)	0	0	0	0
1 jaar (in 2018)	300	0	0	0
2 jaar (in 2018 en 2019)	300	300	0	0
3 jaar (in 2018, 2019 en 2020)	300	300	300	0

Voor de proefopzet is gekozen voor een split-plotschema met de combinaties van soort kunstmeststof en tijdstip van 1^e bemesting en soort dierlijke mestsoort (7 behandelingen, zie Tabel 2.2) als de hoofdfactor en het bemestingsregime (Tabel 2.4) als splijtfactor. Ook het bemestingsregime "Geen" (controle) is bij alle combinaties van tijdstip en mestsoort aangelegd. Er waren dus in totaal zeven identieke controle-objecten.

De plotgrootte bedroeg 3 x 10 m waarvan 1,5 x 10 m werd gebruikt voor de oogst.

De geplande jaarlijkse bemesting van 300 kg N per ha werd verdeeld over de eerste drie sneden (130 + 100 + 70 kg N per ha). De tijdstippen staan per jaar weergegeven in Bijlage 2. In tabel 2.5 is de gerealiseerde N-bemesting weergegeven. Voor dierlijke mest was de dosering gebaseerd op de vooraf bepaalde mestsamenstelling. De bemonstering vond plaats terwijl de mest in opslag was. Tijdens de toediening zijn opnieuw monsters genomen en geanalyseerd om de gerealiseerde N-aanvoer vast te stellen (Tabel 2.5). Wanneer de gerealiseerde mest-N-giften voor de 1^e snede afweken van de streefwaarde van 130 kg N per ha, is voor de 2^e snede gecorrigeerd (streefwaarde 1^e en 2^e snede 230 kg N per ha). Hetzelfde is gedaan voor de 3^e snede. Dit resulteerde voor de dierlijke mestsoorten in een totale jaarlijkse N-aanvoer die ongeveer vergelijkbaar was met die van de kunstmeststoffen met uitzondering van de VDM toegediend in 2020, waarbij de N-aanvoer in 3^e snede hoger was dan gepland.

Tabel 2.5 Gerealiseerde N-bemesting (kg N per ha per snede) voor de kunstmest- en de dierlijke mestsoorten in 2018-2020.

	Snedes	Jaar van toediening		
		2018	2019	2020
Kunstmest	1	130	130	130
	2	100	100	100
	3	70	70	70
	<i>Totaal</i>	<i>300</i>	<i>300</i>	<i>300</i>
<i>Dierlijke mest</i>				
Digestaat	1	169	116	133
	2	85	102	73
	3	45	97	104
	<i>Totaal</i>	<i>299</i>	<i>315</i>	<i>310</i>
Rundveedrijfmest	1	169	130	129
	2	69	90	89
	3	48	83	90
	<i>Totaal</i>	<i>286</i>	<i>303</i>	<i>308</i>
Varkendrijfmest	1	149	123	106
	2	89	86	128
	3	62	110	148
	<i>Totaal</i>	<i>300</i>	<i>319</i>	<i>382</i>

Bemesting met P₂O₅-, K₂O- en MgO-kunstmeststoffen op controle veldjes (geen kunstmest- en dierlijke mest-N) zijn uitgevoerd volgens adviesniveaus (www.bemestingsadvies.nl). Op de veldjes, waarop dierlijke mest is toegediend, zijn de aanvullende kunstmestgiften aangepast op basis van de verwachte aanvoer met de dierlijke mest (Tabel 2.6).

Tabel 2.6 Gerealiseerde jaarlijkse P₂O₅-, K₂O- en MgO-bemesting (kg per ha) voor de controle objecten (objecten zonder kunstmest- en dierlijke mest-N) en voor de objecten met kunstmest- en dierlijke mest-N-bemesting in 2018-2021.

		Controles	Kunstmest	DIG	RDM	VDM
P ₂ O ₅	Kunstmest	110	110			
	Dierlijke mest			91-177	82-110	113-173
	<i>Totaal</i>	<i>110</i>	<i>110</i>	<i>91-177</i>	<i>82-110</i>	<i>113-173</i>
K ₂ O	Kunstmest	600	600	100	100	200
	Dierlijke mest			365-513	272-345	215-339
	<i>Totaal</i>	<i>600</i>	<i>600</i>	<i>465-613</i>	<i>372-445</i>	<i>416-539</i>
MgO	Kunstmest	50	50			
	Dierlijke mest			98-115	80-103	52-99
	<i>Totaal</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>98-115</i>	<i>80-103</i>	<i>52-99</i>

Het proefveld is alleen op 2 juni 2020 berekend met 25 mm.

2.2.3 Metingen

Samenstelling dierlijke mest

Bij alle momenten waarop dierlijke mest is toegediend, zijn monsters genomen van de toegediende dierlijke mest en geanalyseerd op gehalte aan droge stof, organische stof, totaal N, NH₄-N, P₂O₅, K₂O en MgO.

Gewas

De grasoogst werd gedaan met een Haldrup-oogster. Per snedeoogst is het totale versgewicht bepaald en is een monster van 1-2 kg genomen voor bepaling van het droge stofgehalte en het N-, P- en K-gehalte in de droge stof. Het gras werd vier keer per jaar gemaaid (voor de exacte tijdstippen per maaibeurt per jaar zie Bijlage 2). De maaihoogte bedroeg circa 5 cm. Voor alle sneden werden alle objecten tegelijkertijd geoogst.

Minerale bodem-N

Jaarlijks werd de hoeveelheid minerale bodem-N gemeten in het voorjaar (vóór de eerste bemesting) en in het najaar (direct na de laatste snede). Er werd bemonsterd in de lagen 0-30 en 30-60 cm -mv.

Nitraat in het grondwater

Bemonsteringsprocedure

In de periode tussen 16 januari 2019 en 9 maart 2022 is het grondwater twaalf keer bemonsterd. In de winters 2018-2019 en 2019-2020 betrof het drie bemonsteringen, in de winter 2020-2021 4 bemonsteringen en in de winter 2021-2022 2 bemonsteringen. Voor de nitraatmonitoring is de in Nederland gebruikelijke bemonsteringsmethode gebruikt (De Goffau et al, 2012) met als uitzondering dat er een gat is geboord met daarin een permanente pvc-buis gedurende de gehele onderzoeksperiode, terwijl in Nederland de gangbare procedure is om elk jaar één monster te nemen en een jaar later een nieuw gat te boren.

Op 12 juni 2018 is op elk veldje met de hand een boorgat geboord met een Edelmanboor tot 1,5 m onder het maaiveld. Elk boorgat bevond zich aan de rand van het veldje om schade door bemestings- en oogstmachines te voorkomen. Aangenomen werd dat de richting van de grondwaterstroming onder elk veldje richting het boorgat was. De metingen van de grondwaterstand lieten zien dat dit ook het geval was. Per boorgat is een kraag aangebracht om het gat te beschermen tegen het binnendringen van losse grond, ook tijdens het boren. In elk gat werd een pvc-buis (Ø 30 mm) aangebracht met een lengte van 1,5 m, waarbij de onderste meter was geperforeerd (sleufmaat 0,3 mm). Elke pvc-buis werd geïnstalleerd met 1 meter polypropyleen filtergaas. De pvc-buizen in de boorgaten werden aan de bovenkant beschermd met een deksel.

Op de locatie van het proefveld varieert de grondwaterstand van 0 tot 1,8 m onder het maaiveld. Er is geen sprake geweest van oppervlakkige afstroming. De diepte van de 1,5 m per put is gekozen om in de zomerperiode geen grondwater in de putten te hebben en in de winterperiode het uitgespoelde grondwater te kunnen bemonsteren. Hierdoor is er slechts een beperkte invloed van de horizontale grondwaterstroming tussen de putten van de verschillende veldjes, aangezien er in de zomerperiode per definitie geen horizontale grondwaterstroming is. In Bijlage 3 wordt de berekening weergegeven waaruit blijkt dat enige onderling beïnvloeding van aangrenzende veldjes niet uit te sluiten is geweest.

Voorafgaand aan elke bemonstering van het grondwater is met behulp van een peillood de grondwaterstand bepaald. Het grondwater is vervolgens bemonsterd en binnen 2 dagen geanalyseerd op NO₃+NO₂, NH₄, opgeloste organische koolstof (DOC) en opgeloste organische N (DON). Voorafgaand aan de bemonstering van het grondwater werd minimaal 1 liter grondwater opgepompt om de pvc-buis door te spoelen. De bemonstering vond plaats bij herstel van de grondwaterstand na minimaal een uur.

Berekening van de uitgespoelde nitraatvracht

Op basis van de gemeten nitraatgehalten in het grondwater en het gemodelleerde watertransport (zie hieronder) kan de uitgespoelde nitraatvracht worden berekend.

De grondwaterstand en het watertransport in de veldproef is gesimuleerd met het model SWAP (Kroes et al., 2017) voor de periode 2016 tot 2022 voor twee varianten: een variant met grasland (zoals in de proef) en een hypothetische variant met braak als referentie. Informatie met betrekking tot bodemtextuur, diepte en organische stofgehalte voor elke bodemhorizont zijn verkregen uit de *Boorstaat* database. Bodem-hydraulische parameters voor elke horizont zijn berekend met de pedotransferfuncties van Wösten et al. (2001). Dagelijkse weergegevens van KNMI-station Deelen (op 16 km het meest nabijgelegen KNMI-weerstation voor de veldproeflocatie) zijn gebruikt (<https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/daggegevens>). Voor neerslag is gebruik gemaakt van gegevens van een weerstation in

Wageningen (via KNMI). Het SWAP model is gekalibreerd met de grondwatermetingen op het proefveld die zijn uitgevoerd van 2018 tot 2022. De metingen werden gedaan met een Cera-diver op 2 m -mv in een apart daarvoor geplaatste buis. In het laatste meetjaar zijn ook de grondwaterstand op het laagste punt in het veld gemeten met een tweede Cera-diver in een extra buis. Op één dag, 2 juni 2020, is het veld beregend met 25 mm water. In Tabel 2.7 is het gemodelleerde jaarlijkse verticale watertransport weergegeven.

Tabel 2.7 Berekende watertransport (SWAP) voor elke periode van een jaar.

Jaar	Start datum	Eind datum	Watertransport (mm)
2018-2019	1-04-2018	1-04-2019	138
2019-2020	1-04-2019	1-04-2020	263
2020-2021	1-04-2020	1-04-2021	145
2021-2022	1-04-2021	1-04-2022	294

De uitgespoelde nitraatvrucht kan op verschillende manieren worden berekend (De Vos en Assink, 2004), waarbij o.a. de diepte een rol speelt. In deze studie is deze berekend op een diepte van 1,5 m -mv, dat is de onderzijde van boorgaten. De jaarlijkse nitraatuitspoeling is cumulatief berekend op basis van de geïnterpoleerde dagelijkse nitraatconcentraties en het gemodelleerde dagelijkse watertransport. Per jaar, van 1 april tot 1 april, is de nitraat-N-uitspoeling (N flux in kg N per ha per dag) naar het grondwater berekend: $N \text{ flux per jaar} = \sum_i ([NO_3] \times q \times 0,226)$, hierin is $[NO_3]$ de geïnterpoleerde nitraatconcentratie (mg/liter), en q het gemodelleerde watertransport per dag (m^3 per ha per dag), en een conversie factor voor NO_3 naar N ($14/62=0,226$).

De nitraatconcentraties per dag zijn geïnterpoleerd op basis van de gemeten nitraatconcentraties. Voor de periode van 1 april 2018 en de eerste meting in november 2018, is de eerste nitraatmeting gebruikt, en voor de periode tussen de laatste meting op 9 maart 2022 en 1 april 2022, is de laatste nitraatmeting gebruikt. Deze keuzes hebben bijna geen invloed op de berekende nitraatuitspoeling omdat het watertransport in die periodes heel laag was.

N-mineralisatie van grond aan het einde van het veldexperiment

Op 18 maart 2022 zijn van een aantal objecten grondmonsters genomen van de laag 0-20 cm -mv voor een incubatie-experiment. Er zijn monsters genomen van de volgende vijf objecten: de onbemeste controle (in geen enkel jaar bemest), KAS 3 jaar bemest, RDM 3 jaar bemest, DIG 3 jaar bemest en VDM 3 jaar bemest. Voorafgaand aan het experiment zijn het organische stofgehalte (gloeiverliesmethode) en het vochtgehalte (via drogen) bepaald. Uit elk grondmonster van 5 kg zijn 6 audioteen(plastic) zakjes gevuld met 200 gram verse grond. De 6 zakjes zijn tijdens de incubatie na 0, 20, 40, 60, 80 en 100 dagen bemonsterd en geanalyseerd op mineraal stikstof (N_{min}) volgens ISO 14256 door CBLB-WUR. Aan elke 200 gram grondmonster is 0,5 tot 5 ml water toegevoegd om en vochtgehalte te bereiken van 65% van de vloeigrens op basis van het gemeten vochtgehalte van de grondmonsters, en gemeten vloeigrenzen.

2.2.4 Berekening N-benutting en -werking

Om het effect van type meststof op de N-benutting vast te stellen zijn de apparent N recovery (ANR) en apparent N efficiency (ANE) berekend:

$$ANR = (N\text{-opname bemest} - N\text{-opname onbemest})/N\text{-gift}$$

$$ANE = (\text{drogestofopbrengst bemest} - \text{drogestofopbrengst onbemest})/N\text{-gift}$$

Op basis van de berekende ANR en ANE van de dierlijke mest is de N-werkingscoëfficiënt berekend (NWC). De NWC van de dierlijke mest is gedefinieerd als het deel van mest-N dat eenzelfde effect heeft op de opbrengst en N-opname als de kunstmest-N bij eenzelfde N-gift en is als volgt berekend:

$$NWC_{ANR} = ANR, \text{ dierlijke mest-N}/ANR, \text{ kunstmest-N}$$

$$NWC_{ANE} = ANE, \text{ dierlijke mest-N}/ANE, \text{ kunstmest-N}$$

Zoals eerder aangegeven biedt de proefopzet de mogelijkheid om meerjarige N-effecten van de kunstmest- en dierlijke mestsoorten te bepalen. Voor de in 2018 toegediende kunstmest en dierlijke mest-N kan het 1^e, 2^e, 3^e en 4^e-jaarseffect worden bepaald, voor de in 2019 toegediende N het 1^e, 2^e en 3^e-jaarseffect worden bepaald en voor de toegediende N in 2020 kan het 1^e en 2^e-jaarseffect worden bepaald (Tabel 2.8).

Tabel 2.8 Meerjarige effecten in relatie tot het jaar van toediening.

Jaar van toediening	Jaar			
	2018	2019	2020	2021
2018	1 ^e jaar	2 ^e jaar	3 ^e jaar	4 ^e jaar
2019		1 ^e jaar	2 ^e jaar	3 ^e jaar
2020			1 ^e jaar	2 ^e jaar

Hieronder is als voorbeeld de berekening weergegeven voor de ANR-waarden in de verschillende jaren na toediening van de kunstmest- en dierlijke mestsoorten (voor de verschillende controles zie Tabel 2.9):

- 2018
 - 1^e jaars ANR = (N-opname bemest 2018 minus N-opname controle 1)/N-gift 2018
- 2019
 - 1^e jaars ANR = (N-opname bemest 2019 minus N-opname controle 2)/N-gift 2019
 - 2^e jaars ANR = (N-opname controle 2 minus N-opname controle 1)/N-gift 2018
- 2020
 - 1^e jaars ANR = (N-opname bemest 2020 minus N-opname controle 3)/N-gift 2020
 - 2^e jaars ANR = (N-opname controle 3 minus N-opname controle 2)/N-gift 2019
 - 3^e jaars ANR = (N-opname controle 2 minus N-opname controle 1)/N-gift 2018
- 2021
 - 2^e jaars ANR = (N-opname controle 4 minus N-opname controle 3)/N-gift 2020
 - 3^e jaars ANR = (N-opname controle 3 minus N-opname controle 2)/N-gift 2019
 - 4^e jaars ANR = (N-opname controle 2 minus N-opname controle 1)/N-gift 2018

Tabel 2.9 De verschillende controlebehandelingen gebruikt bij de bepaling van de ANR en ANE in de jaren nadat de bemesting is gestopt.

2018	2019	2020	2021
Controle 1	Controle 1	Controle 1	Controle 1
Bemest	Controle 2	Controle 2	Controle 2
Bemest	Bemest	Controle 3	Controle 3
Bemest	Bemest	Bemest	Controle 4

2.2.5 Statistische analyse

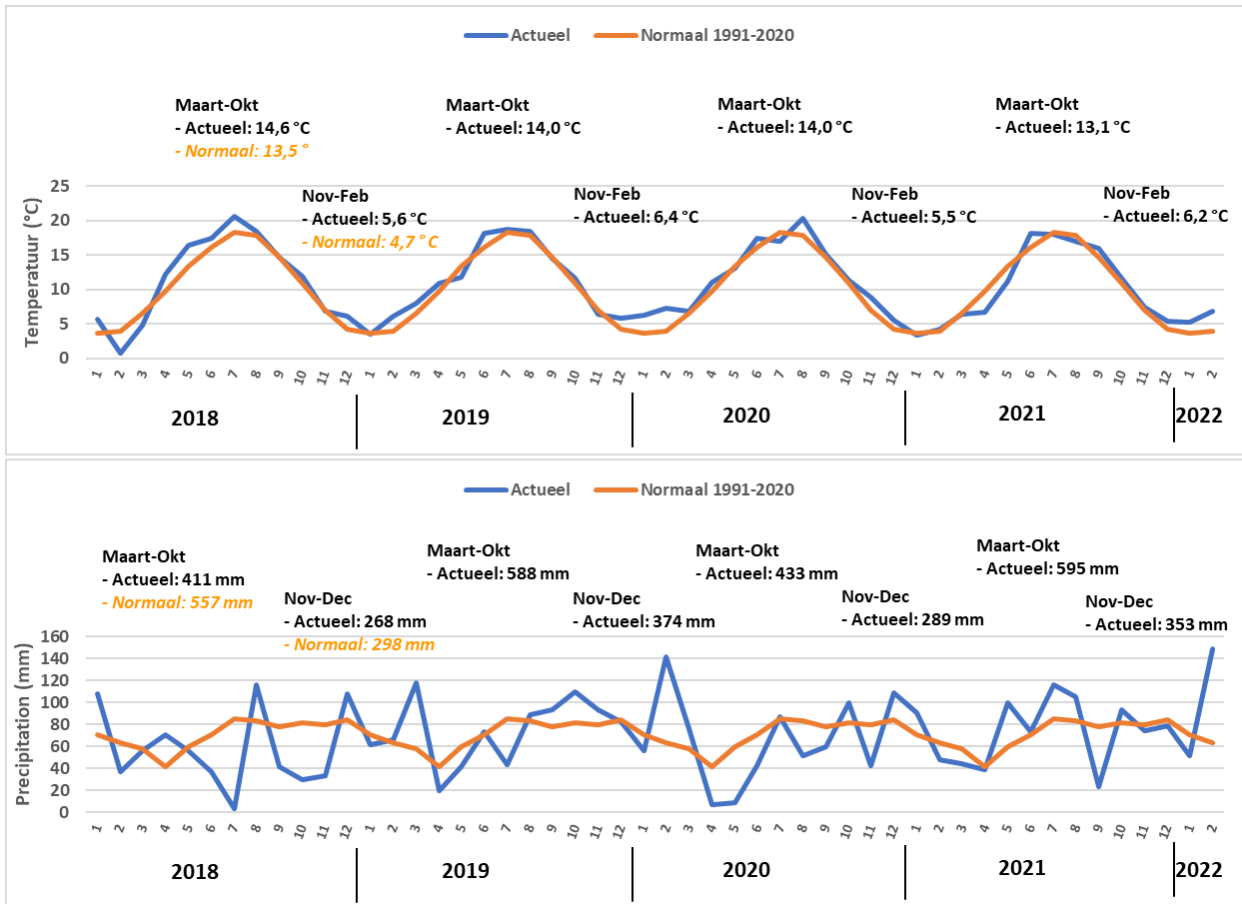
De statistische analyse is het uitgevoerd met het GENSTAT-pakket (22nd edition, VSNI). De proefopzet betrof een split-plot-design met meststof als hoofdfactor en bemestingsregime als spijlfactor. Voor de onderzochte parameters is een variantieanalyse (ANOVA) uitgevoerd. Omdat het onderzoek tot doel had na te gaan of er verschil was tussen meststoffen, is in het rapport het resultaat van de toetsing op verschillen tussen meststoffen weergegeven. Aanvullend is per parameter aangegeven of er gemiddeld over de meststoffen sprake was van een verschil met de controle. Dit is gedaan per bemestingsregime.

2.2.6 Weersomstandigheden

In Figuur 2.1A is de gemiddelde dagtemperatuur en de hoeveelheid neerslag per maand weergegeven voor de proefperiode. Daarnaast zijn de gemiddelde waarden voor het groeiseizoen (maart-oktober) en de winterperiode (nov-feb) weergegeven.

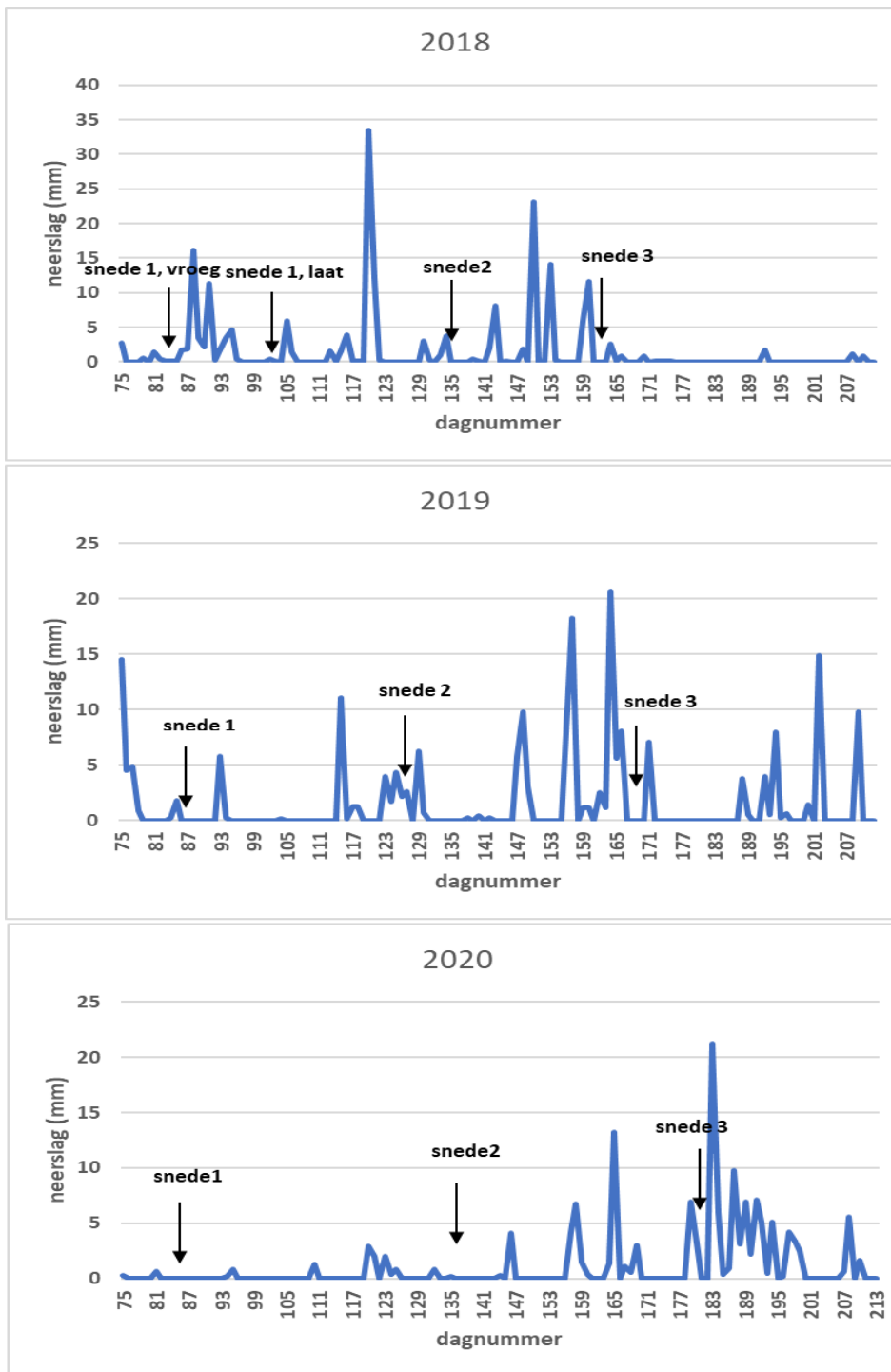
In drie van de vier groeiseizoenen was de gemiddelde dagtemperatuur hoger dan het 30-jarig gemiddelde (1991-2020), vooral in 2018. De gemiddelde dagtemperatuur in het groeiseizoen van 2021 was lager dan normaal. De gemiddelde temperaturen in de vier winterperiodes waren altijd hoger dan het 30-jarig gemiddelde.

De groeiseizoenen van 2018 en 2020 waren droog, terwijl de groeiseizoenen van 2019 en 2021 iets natter waren dan normaal. De winterperiode 2018-2019 was droger dan normaal, terwijl de winterperiodes 2019-2020 en 2021-2022 iets natter waren dan normaal.



Figuur 2.1A Gemiddelde dag temperatuur (°C) en hoeveelheid neerslag (mm) per maand in de proefperiode.

In Figuur 2.1B is de neerslagverdeling in de bemestingsperiode weergegeven. Alleen vlak na de eerste bemesting in 2018 en vlak na de bemesting van de derde snede was sprake van relatief intensieve regenval. In de figuur is niet de berekening opgenomen van 25 mm op 2 juni 2020 (dagnummer 153).



Figuur 2.1B Verdeling neerslag (mm/dag) in de periode van bemesten in 2018, 2019 en 2020, de pijltjes geven het moment van bemesten aan bij respectievelijk de eerste, tweede en derde snede.

2.3 Resultaten

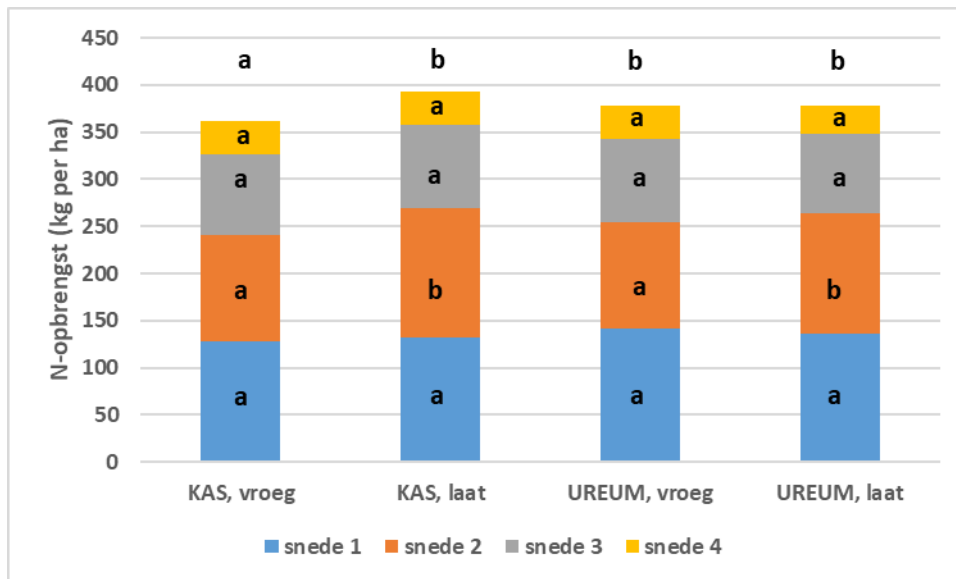
Wat betreft de gewasresultaten richt de bespreking zich op de N-opname van het gras en de gewasbenutting (ANR en ANE). De drogestofopbrengst is weergegeven in Bijlage 4. De bespreking beperkt zich verder tot de jaar-N-opname. Indien relevant zijn ook de effecten per snede weergegeven. Voor de overige situaties wordt voor de N-opname per snede verwezen naar Bijlage 5.

2.3.1 N-opbrengst gras

Toedieningstijdstip kunstmest 1^e snede in 2018

Alleen in 2018 is een verschil in tijdstip van toediening van de kunstmestgift bij de eerste snede gerealiseerd. De vroege toediening werd uitgevoerd op 23 maart en de late toediening op 13 april. Het effect op de N-opbrengst van het gras is weergegeven in Figuur 2.2.

Voor KAS was de totale N-opbrengst (som van 4 sneden) bij het vroege tijdstip significant lager dan bij het late tijdstip, terwijl voor UREUM geen significante verschillen in N-opbrengst tussen de toedieningstijdstippen werden waargenomen. Het verschil in N-opbrengst bij de vroege toediening werd voornamelijk veroorzaakt door een verschil in N-opbrengst in de 2^e snede. Dit effect in de 2^e snede was significant voor beide meststoffen, maar voor de totale N-opbrengst was dit alleen het geval voor KAS.



Figuur 2.2 N-opbrengst (kg per ha) van het gras in relatie tot kunstmestsoort (KAS en UREUM) en toedieningstijdstip bij de 1^e snede in 2018 (vroeg en laat); verschillende letters duiden op significante verschillen ($P < 0,05$), letters *in* de staven betreffen de verschillen in de afzonderlijke sneden, terwijl de letters *boven* de staven de verschillen in de totale N-opbrengst betreffen (som van 4 sneden).

N-opbrengst bij kunstmest en dierlijke mest

In Tabel 2.10 zijn de totale jaarlijkse N-opbrengsten weergegeven voor de gehele proefperiode. Voor de kunstmeststoffen zijn de gegevens van de toedieningstijdstippen gemiddeld, omdat alleen in 2018 een verschil in toedieningstijdstip werd gerealiseerd. Zoals eerder aangegeven is bij de weergave van de statistische analyse ervoor gekozen om de toetsing van de verschillen tussen de meststoffen weer te geven, omdat dat het doel is van het onderzoek. Aanvullend is in de laatste kolom aangegeven of het gemiddelde effect van bemesting verschilde van de controle (cursief gedrukte kolom "Gemiddeld").

Bemesting had in het jaar van toediening (vetgedrukte regels) een sterk effect op de N-opname. In het algemeen was in de jaren dat er is bemest (2018, 2019 en 2020) bij de kunstmeststoffen de N-opbrengst significant hoger dan bij de dierlijke mestsoorten DIG en RDM (regels "Bemest" in Tabel 2.10). Voor de mestsoort VDM was het verschil in N-opbrengst met de kunstmestobjecten kleiner en alleen significant in 2018.

In 2018 en 2019 werden geen significante verschillen in N-opbrengst waargenomen tussen KAS en UREUM, terwijl KAS in 2020 een significant hogere N-opbrengst gaf dan UREUM. De lagere N-opbrengst bij UREUM in 2020 was vooral een gevolg van een lagere N-opbrengst in de 3^e en 4^e snede (Figuur 2.3). Bij de drogestofopbrengst was het verschil tussen de beide meststoffen kleiner en ook niet significant (Figuur 2.3).

Wat betreft de dierlijke mestsoorten, was bij VDM de N-opbrengst hoger dan bij DIG en CS. Benadrukt moet worden dat de N-aanvoer enigszins verschilde tussen de mestsoorten en dat verschillen in N-benutting

daarom beter gebaseerd kunnen worden op verschillen in ANR en ANE (zie paragraaf 2.3.2). Met name in 2020 was bij VDM de N-aanvoer aanzienlijk hoger dan de geplande 300 kg per ha.

Ook in de jaren nadat de bemesting is gestopt (blauwe, groene en paarse regels in Tabel 2.10) was er een verschil in N-opbrengst tussen de kunstmest- en dierlijke mestobjecten. Dit was vooral het geval in het eerste jaar nadat de bemesting was gestopt (blauwe regels in Tabel 2.10). In de jaren daarna (groen en paarse regels) was het verschil tussen de objecten met kunstmest en dierlijke mest minder duidelijk.

Tabel 2.10 Jaarlijkse N-opbrengst (kg per ha) in relatie tot kunstmest- en dierlijke mestsoort en bemestingshistorie; verschillende letters binnen een rij (bemestingshistorie) duiden op significante verschillen tussen meststoffen ($P < 0,05$); de vetgedrukte regels betreffen de objecten die in het betreffende jaar zijn bemest; de blauwe, groene en paarse regels betreffen objecten die in het betreffende jaar respectievelijk voor eerste, tweede en derde jaar niet meer zijn bemest.

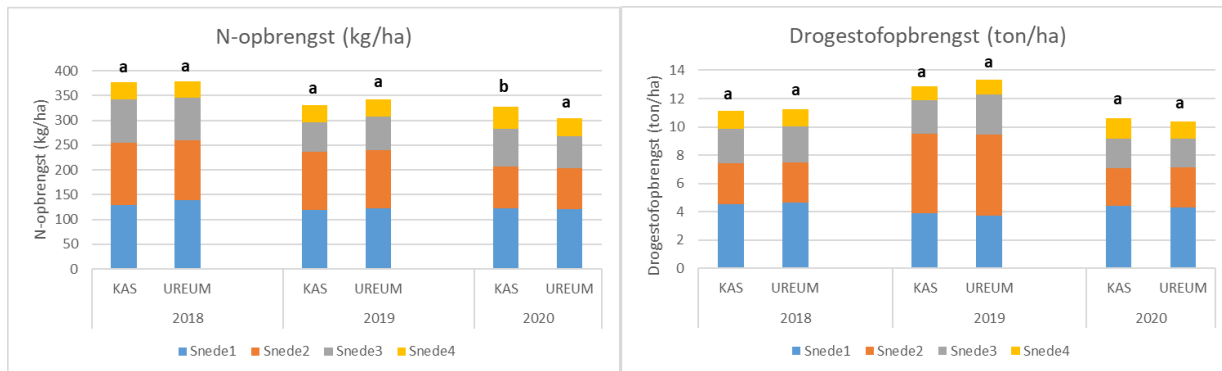
Jaar	Bemestingshistorie	Kunstmest - dierlijke mestsoort					Gemiddeld ¹
		KAS	UREUM	DIG	RDM	VDM	
2018	Controle	138	144	153	144	147	145
	Bemest in 2018	377 c	378 c	270 a	251 a	303 b	316*
2019	Controle	104	99	104	93	96	99
	Bemest in 2018 en 2019	331 c	343 c	293 ab	276 a	321 bc	313*
	Bemest in 2018 ²	100 a	122 a	118 a	120 a	125 a	117*
2020	Controle	80	84	88	82	79	83
	Bemest in 2018, 2019 en 2020	327 c	304 b	224 a	226 a	322 bc	281*
	Bemest in 2018 en 2019 ²	79 a	89 ab	123 d	98 bc	112 cd	100*
	Bemest in 2018 ³	82 a	85 a	88 a	93 a	85 a	87 ns
2021	Controle	139	164	147	130	142	144
	Bemest in 2018, 2019 en 2020 ²	147 a	145 a	173 b	181 b	195 b	168*
	Bemest in 2018 en 2019 ³	130 a	157 b	166 b	146 ab	152 a	150 ns
	Bemest in 2018 ⁴	139 a	165 b	138 a	142 b	179	153 ns

¹ */ns = wel/niet significant verschillend van de controle ($P < 0,05$).

² eerste jaar onbemest.

³ tweede jaar onbemest.

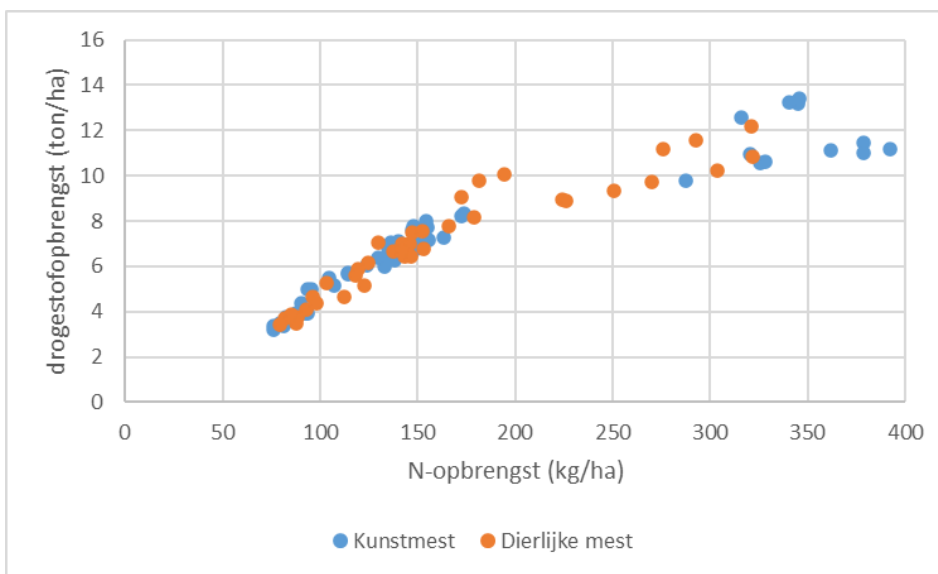
⁴ derde jaar onbemest.



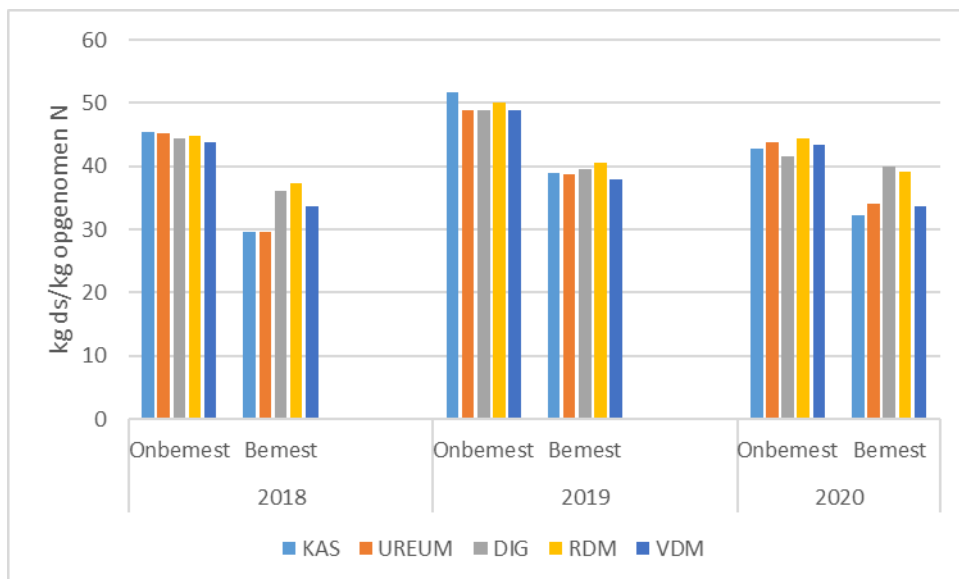
Figuur 2.3 Jaarlijkse N-opbrengst (links) en drogestofopbrengst (rechts) van het gras verdeeld per snede bij de kunstmeststoffen KAS en UREUM in de jaren dat er is bemest (2018-2020); verschillende letters duiden op significante verschillen bij de jaaropbrengst ($P < 0,05$).

N-opbrengst en drogestofproductie

Er was sprake van een duidelijke relatie tussen de N-opbrengst en de drogestofopbrengst van het gras (Figuur 2.4). In Figuur 2.5 is de hoeveelheid geproduceerde drogestof per kg opgenomen N weergegeven. Op de onbemeste velden wordt per kg opgenomen N meer drogestof geproduceerd. Verder valt op dat in 2018 en 2020 bij dierlijke mestobjecten de drogestofproductie per kg opgenomen N hoger was dan bij de kunstmestobjecten. Dit werd in 2019 niet waargenomen.



Figuur 2.4 Relatie tussen de N-opbrengst en de drogestofopbrengst in de periode 2019-2021.



Figuur 2.5 De hoeveelheid geproduceerde drogestof per kg opgenomen N bij de onbemeste en bemeste objecten bij zowel de kunstmest- als de dierlijke mestsoorten in 2018, 2019 en 2020.

2.3.2 ANR en ANE

In Tabel 2.11 en 2.12 zijn de ANR- en ANE-waarden weergegeven voor de kunstmest- en dierlijke mestsoorten. In Figuur 2.6 zijn samenvattend voor de ANR de resultaten gemiddeld over de toedieningsjaren weergegeven.

In het jaar van toediening (eerstejaars effect) waren de ANR en ANE voor de beide kunstmestsoorten significant hoger dan voor de dierlijke mestsoorten. Gemiddeld over de jaren zijn er geen significante verschillen gevonden tussen de kunstmestsoorten. In de afzonderlijke jaren was dit wel het geval. In 2020 waren de ANR en ANE van UREUM significant lager waren dan van KAS. In 2018 en 2019 waren er geen verschillen tussen de beide kunstmestsoorten. Voor 2018 gold dit voor het gemiddelde van de twee toedieningstijdstippen in de eerste snede. Voor de afzonderlijke toedieningstijdstippen bedroeg de ANR op jaarbasis voor KAS,vroeg, KAS,laat, UREUM,vroeg en UREUM,laat, respectievelijk, 0,76, 0,83, 0,76 en 0,80. Bij de vroege toediening was de ANR bij KAS significant lager dan bij de late toediening, bij UREUM was het verschil in ANR tussen de vroege en late toediening niet significant.

Wat betreft de dierlijke mestsoorten, waren met uitzondering van het jaar 2019, de ANR en ANE bij VDM hoger dan bij DIG en RDM. Tussen DIG en RDM zijn geen significante verschillen gevonden.

In de tabellen 2.11 en 2.12 zijn ook de cumulatieve ANR- en ANE-waarden weergegeven inclusief de nawerking van de in de voorgaande jaren toegediende N-bemesting. In Figuur 2.6 is dat alleen gedaan voor de ANR.

Hieruit blijkt dat er bij de kunstmestsoorten geen sprake was van cumulatieve effecten. Voor de dierlijke mestsoorten was dat wel het geval. Bij de toediening in 2018, 2019 en 2020 kon zowel het eerstejaars- als het tweedejaarseffect worden uitgerekend. Gemiddeld over deze drie toedieningsjaren (blok 2018-2020 in Tabel 2.11 en 2.12, linker deel Figuur 2.6) was de cumulatieve tweedejaars ANR 0,06-0,10 hoger dan de eerstejaars ANR. Bij de toediening in 2018 en 2019 kon zowel het eerstejaars, tweedejaars als derdejaars effect worden berekend. Gemiddeld over deze twee toedieningen (blok 2018-2019 in Tabel 2.11 en 2.12, rechterdeel Figuur 2.6) was de cumulatieve tweedejaars en derdejaars ANR, respectievelijk, 0,05-0,09 en 0,08-0,13 hoger dan de eerstejaars ANR. Qua beeld waren de effecten bij de ANE grotendeels vergelijkbaar met die van de ANR.

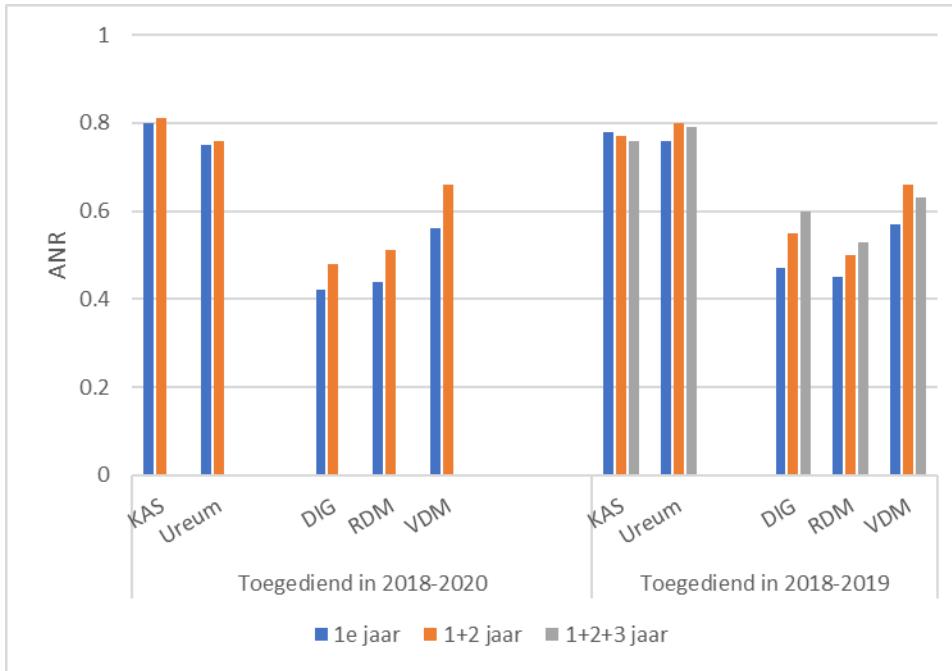
In Figuur 2.7 is de tweede en derdejaars ANR weergegeven (dus niet cumulatief zoals in Figuur 2.6 en Tabel 2.11 en 2.12) gemiddeld over de toedieningsjaren 2018-2020 en 2018-2019. Alleen bij de tweedejaars ANR was er sprake van een significant verschil tussen de kunstmestsoorten enerzijds en de dierlijke mestsoorten anderzijds (in de toedieningsjaren 2018-2019 alleen tussen KAS en VDM). Er zijn geen duidelijke verschillen waargenomen in tweede en derdejaars ANR tussen de drie dierlijke mestsoorten.

Tabel 2.11 ANR (zowel 1^e jaar als cumulatief over 2, 3 en 4 jaar) in relatie tot kunstmest- en dierlijke mestsoort en toedieningsjaar; verschillende letters binnen een kolom en jaar/periode van jaren duiden op significante verschillen.

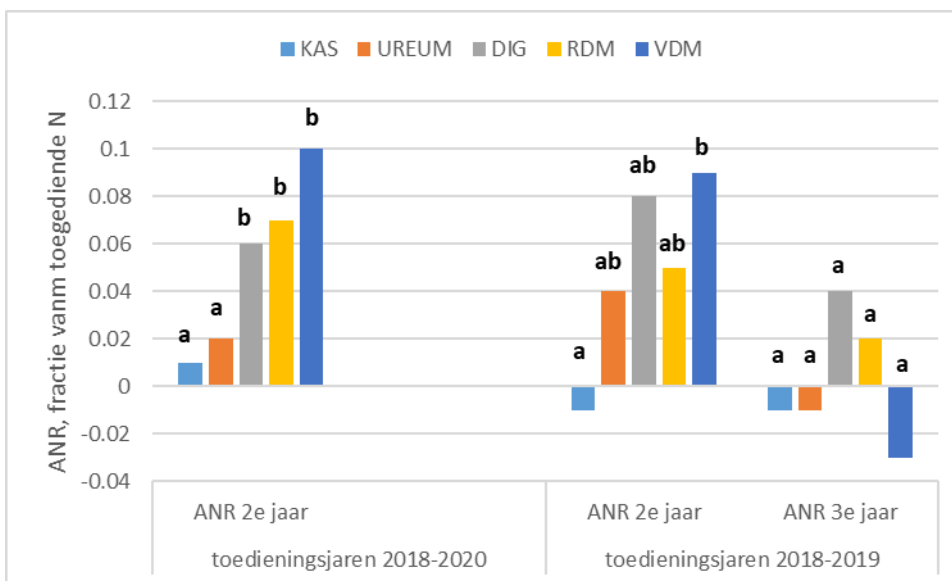
Toedienings- jaar	Kunstmest, dierlijke mest	ANR (fractie)							
		1e jaar		1+2 jaar		1+2+3 jaar		1+2+3+4 jaar	
2018	KAS	0,80	c	0,79	c	0,79	cd	0,79	c
	UREUM	0,78	c	0,86	c	0,86	d	0,86	c
	DIG	0,39	a	0,44	a	0,44	a	0,41	a
	RDM	0,38	a	0,47	ab	0,50	ab	0,55	ab
	VDM	0,52	b	0,62	b	0,64	bc	0,76	bc
2019	KAS	0,77	b	0,76	b	0,73	b		
	UREUM	0,74	b	0,75	b	0,72	b		
	DIG	0,55	a	0,67	b	0,76	b		
	RDM	0,52	a	0,53	a	0,55	a		
	VDM	0,61	a	0,70	b	0,62	ab		
2020	KAS	0,83	d	0,89	c				
	UREUM	0,72	c	0,68	b				
	DIG	0,33	a	0,35	a				
	RDM	0,42	a	0,53	b				
	VDM	0,55	b	0,66	b				
2018-2020	KAS	0,80	c	0,81	c				
	UREUM	0,75	c	0,76	c				
	DIG	0,42	a	0,48	a				
	RDM	0,44	a	0,51	a				
	VDM	0,56	b	0,66	b				
2018-2019	KAS	0,78	c	0,77	c	0,76	c		
	UREUM	0,76	c	0,80	c	0,79	c		
	DIG	0,47	a	0,55	a	0,60	c		
	RDM	0,45	a	0,50	a	0,53	b		
	VDM	0,57	b	0,66	b	0,63	c		

Tabel 2.12 ANE (zowel 1^e jaar als cumulatief over 2, 3 en 4 jaar) in relatie tot kunstmest- en dierlijke mestsoort en toedieningsjaar; verschillende letters binnen een kolom en jaar/periode van jaren duiden op significante verschillen.

Toedienings- jaar	Kunstmest, dierlijke mest	ANE (kg ds per kg N)							
		1e jaar		1+2 jaar		1+2+3 jaar		1+2+3+4 jaar	
2018	KAS	16,34	c	16,06	abc	16,15	ab	16,75	b
	UREUM	15,75	c	19,95	c	20,54	b	21,73	b
	DIG	9,85	a	11,02	a	9,96	a	7,17	a
	RDM	10,16	a	14,08	ab	15,43	ab	15,40	ab
	VDM	12,70	b	17,72	bc	19,12	b	24,26	b
2019	KAS	25,46	b	24,97	b	22,44	a		
	UREUM	24,26	b	24,25	b	21,15	a		
	DIG	19,05	a	24,42	b	28,02	b		
	RDM	17,50	a	18,41	a	18,38	a		
	VDM	18,82	a	21,42	ab	19,48	a		
2020	KAS	24,17	d	28,95	c				
	UREUM	21,78	c	23,12	b				
	DIG	12,29	a	16,44	a				
	RDM	14,66	ab	23,64	bc				
	VDM	16,19	b	22,73	ab				
2018-2020	KAS	21,99	b	23,33	c				
	UREUM	20,60	b	22,44	c				
	DIG	13,73	a	17,29	a				
	RDM	14,11	a	18,71	a				
	VDM	15,90	a	20,62	b				
2018-2019	KAS	20,90	c	20,52	c	19,29	b		
	UREUM	20,01	c	22,10	c	20,84	b		
	DIG	14,45	a	17,72	a	18,99	b		
	RDM	13,83	a	16,25	a	16,91	a		
	VDM	15,76	b	19,57	b	19,30	b		



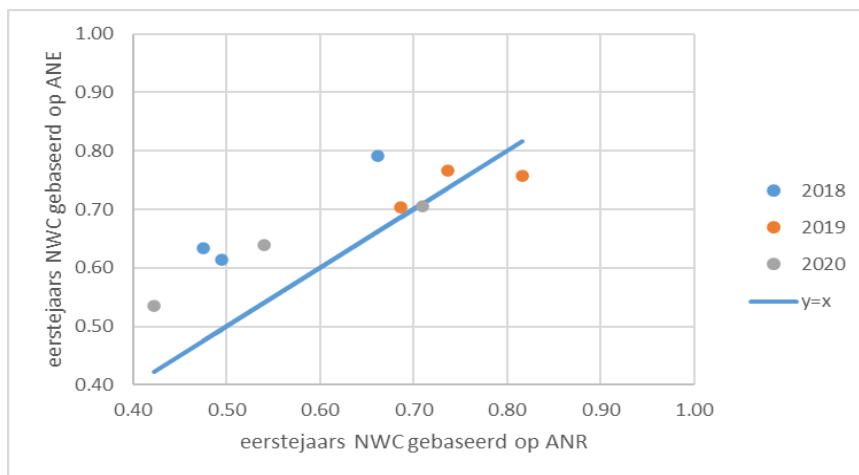
Figuur 2.6 Cumulatieve apparent-N-recovery (ANR) van de kunstmest- en dierlijke mestobjecten in het jaar van toediening (1^e jaar), in het jaar van toediening en het daaropvolgende jaar nadat de bemesting is gestopt (1+2 jaar) en in het jaar van toediening en de twee daaropvolgende jaren nadat de bemesting is gestopt (1+2+3 jaar); voor statistische verschillen wordt verwezen naar Tabel 2.11 en 2.12.



Figuur 2.7 Tweede en derdejaars apparent N-recovery (ANR) van de kunstmest- en dierlijke mestobjecten gemiddeld over de toedieningsjaren 2018-2020 en gemiddeld over de toedieningsjaren 2018-2020.

2.3.3 N-werkingscoëfficiënt

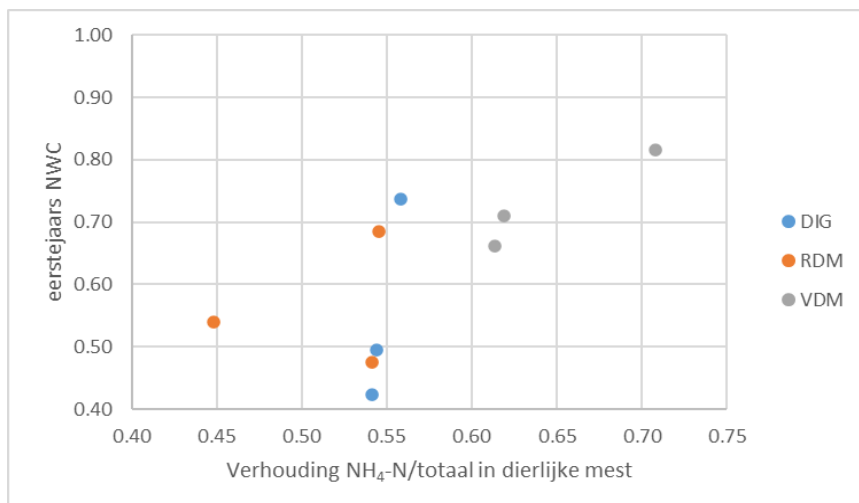
In Tabel 2.13 is de N-werkingscoëfficiënt (NWC) van de verschillende dierlijke mestsoorten weergegeven gebaseerd op verschillen in ANR en op verschillen in ANE. De NWC betreft een gemiddelde van de NWC's gebaseerd op vergelijking met KAS en die gebaseerd op vergelijking met UREUM. Met name in 2018 en 2020 waren de NWC-waarden gebaseerd op de ANR lager dan die gebaseerd op de ANE (Figuur 2.8). In de verdere bespreking ligt de nadruk op de op de ANR gebaseerde NWC-waarden (zie verder hierover in discussie).



Figuur 2.8 Relatie tussen de eerstejaars NWC gebaseerd op verschillen in ANR en de eerstejaars NWC gebaseerd op verschillen in ANE.

De eerstejaars NWC was voor VDM hoger dan voor DIG en RDM. Gemiddeld over de toedieningsjaren 2018 t/m 2020 bedroeg deze voor DIG, RDM en VDM, respectievelijk, 0,55, 0,57 en 0,73. Hierbij was er sprake van een verband met het aandeel $\text{NH}_4\text{-N}$ in de totale N van dierlijke mest (Figuur 2.9). Indien ook de nawerking in het jaar na toediening werd meegenomen (jaar 1+2) steeg de NWC naar, respectievelijk 0,62, 0,65 en 0,84.

Gemiddeld over de toedieningsjaren 2018 t/m 2019 kon de eerste, tweede en derdejaars NWC worden vergeleken. De eerstejaars NWC voor DIG, RDM en VDM bedroeg, respectievelijk, 0,62, 0,58 en 0,74. De cumulatieve NWC-waarden voor jaar 1+2 waren 0,71, 0,64 en 0,84 en voor jaar 1+2+3 0,79, 0,68 en 0,81.



Figuur 2.9 Relatie tussen verhouding $\text{NH}_4\text{-N}$ /totaal N in dierlijke mest en de hoogte van de eerstejaars NWC (gebaseerd op verschillen in ANR tussen dierlijke mest en kunstmest).

Tabel 2.13 N-werkingscoëfficiënt (zowel 1^e jaar als cumulatief over 2, 3 en 4 jaar) van de dierlijke mestsoorten gebaseerd op de verschillen in ANR en ANE tussen kunstmest en dierlijke mest (weergegeven waarden betreft een gemiddelde van de twee kunstmestsoorten).

	Toedieningsjaar	Dierlijke mest	N-werkingscoëfficiënt (fractie)				
			1e jaar	1+2 jaar	1+2+3 jaar	1+2+3+4 jaar	
o.b.v. ANR	2018	DIG	0,49	0,53	0,53	0,49	
		RDM	0,47	0,57	0,61	0,66	
		VDM	0,66	0,75	0,77	0,92	
	2019	DIG	0,74	0,88	1,04		
		RDM	0,69	0,71	0,75		
		VDM	0,82	0,93	0,85		
	2020	DIG	0,42	0,44			
		RDM	0,54	0,68			
		VDM	0,71	0,84			
	2018-2020	DIG	0,55	0,62			
		RDM	0,57	0,65			
		VDM	0,73	0,84			
	2018-2019	DIG	0,62	0,71	0,79		
		RDM	0,58	0,64	0,68		
		VDM	0,74	0,84	0,81		
	o.b.v. ANE	2018	DIG	0,61	0,61	0,54	0,37
			RDM	0,63	0,78	0,84	0,80
			VDM	0,79	0,98	1,04	1,26
2019		DIG	0,77	0,99	1,29		
		RDM	0,70	0,75	0,84		
		VDM	0,76	0,87	0,89		
2020		DIG	0,53	0,63			
		RDM	0,64	0,91			
		VDM	0,70	0,87			
2018-2020		DIG	0,64	0,75			
		RDM	0,66	0,81			
		VDM	0,75	0,91			
2018-2019		DIG	0,69	0,80	0,91		
		RDM	0,67	0,77	0,84		
		VDM	0,77	0,93	0,97		

2.3.4 Minerale bodem-N

In Tabel 2.14 is de hoeveelheid minerale bodem-N in het voorjaar weergegeven in 2019 en 2020. In het voorjaar van 2020 en 2021 is geen bepaling gedaan. De waarden per afzonderlijk object staan in Bijlage 6.

In het algemeen waren de hoeveelheden minerale bodem-N relatief laag. In beide jaren was er gemiddeld over de meststoffen geen verschil tussen de controle en de objecten die in de jaren daarvoor waren bemest. Ook tussen de meststoffen werden geen duidelijke consistente verschillen gevonden. In het voorjaar van 2020 was de hoeveelheid minerale bodem-N lager dan in het voorjaar van 2019. In het voorjaar van 2020 was er wel het beeld dat in vergelijking met de objecten die alleen in 2018 waren bemest de hoeveelheid minerale bodem-N wat hoger was bij de objecten die zowel in 2018 als 2019 waren bemest. Dit effect was echter niet significant.

Tabel 2.14 Hoeveelheid minerale bodem-N in het voorjaar (kg/ha, 0-60 cm -mv) in 2018 en 2019 in relatie tot de bemesting in de jaren ervoor; verschillende letters binnen een rij (bemestingshistorie) duiden op significante verschillen tussen meststoffen ($P < 0,05$); de vetgedrukte regels betreffen de objecten die in het voorgaande jaar zijn bemest; de blauwe regel betreft het object dat in het voorgaande jaar niet meer is bemest.

Jaar	Bemestingshistorie	Kunstmest- dierlijke mestsoort					Gemiddeld ¹
		KAS	UREUM	DIG	RDM	VDM	
2019	Controle	24	25	23	20	20	22
	Bemest in 2018	17 a	21 b	27 c	21 ab	23 bc	22 ns
2020	Controle	7	9	9	8	6	8
	Bemest in 2018 + 2019	8 a	8 a	10 a	8 a	6 a	8 ns
	Bemest in 2018 ²	7 a	10 a	11 a	11 a	10 a	10 ns

¹ ns = niet significant verschillend van de controle ($P < 0,05$).

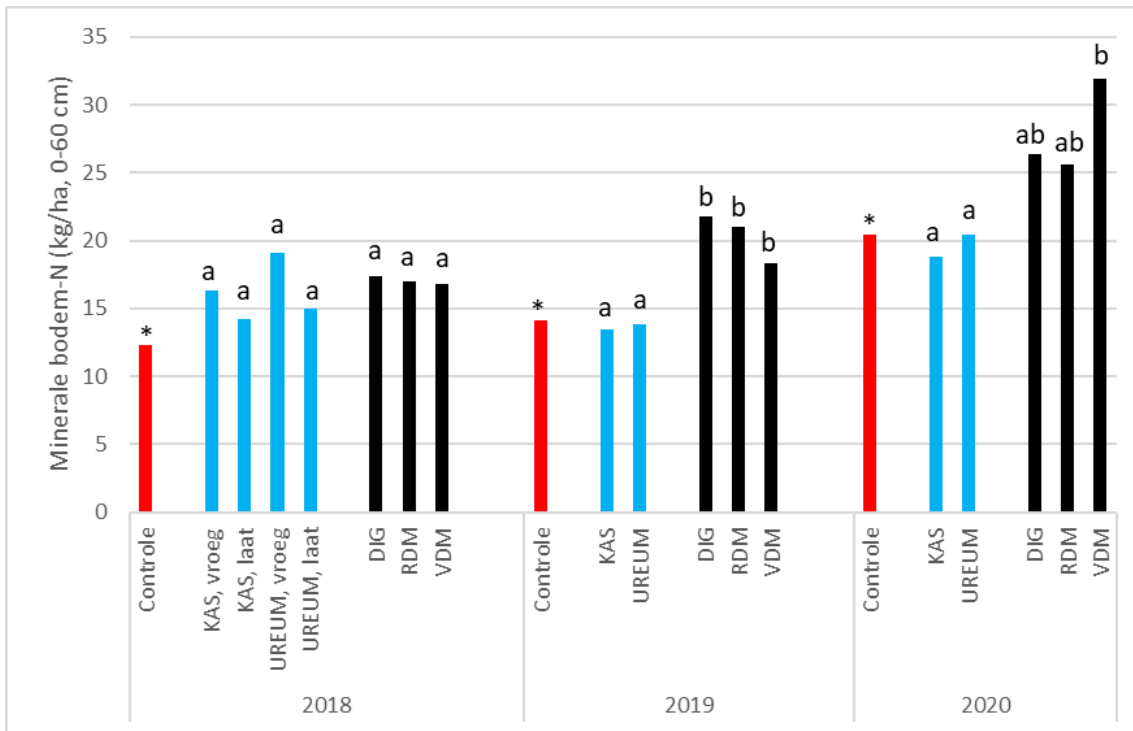
² één jaar onbemest.

In Figuur 2.10 is de hoeveelheid minerale bodem-N in het najaar in de laag 0-60 cm -mv weergegeven voor de controle en de bemeste objecten (weergegeven voor de jaren dat de bemesting is uitgevoerd). In Bijlage 7 zijn de meetwaarden voor alle objecten weergegeven.

In het algemeen was in alle jaren op de bemeste objecten (gemiddeld over alle meststoffen) de gemiddelde hoeveelheid minerale bodem-N hoger dan bij de controle. In 2018 waren er geen significante verschillen tussen de kunstmest- en dierlijke mestobjecten. In 2019 werd bij de dierlijke mestobjecten een hogere hoeveelheid minerale bodem-N gevonden dan bij de kunstmestobjecten. In 2021 werd dit enkel waargenomen voor het object met VDM.

Het verschil in toedieningstijdstip bij de kunstmest in 2018 heeft niet geleid tot significante verschillen in minerale bodem-N.

Er zijn geen significante verschillen in minerale bodem-N tussen de kunstmest- en dierlijke mestobjecten waargenomen in het 1^e, 2^e en 3^e jaar nadat de bemesting was gestopt (gegevens niet weergegeven).



Figuur 2.10 Minerale bodem-N (0-60 cm -mv) in het najaar (bemonstering na de laatste snede) in 2018, 2019 en 2020 in het controle-object en de bemeste objecten in het betreffende jaar; verschillende letters duiden op significante verschillen tussen meststoffen ($P < 0,05$); */ns bij controlebalk duidt op wel/geen significant verschil tussen controle en bemest (gemiddelde van kunstmest en dierlijke mest).

2.3.5 Nitraatuitspoeling

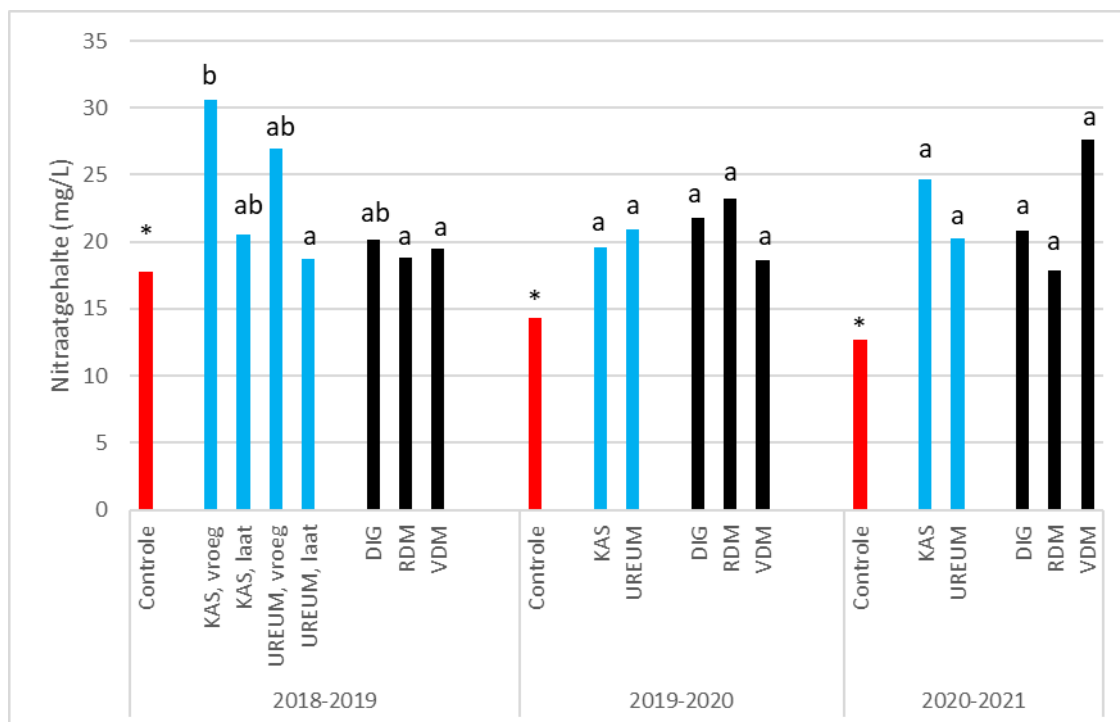
Gemeten nitraatconcentraties

In Figuur 2.11 is de gemiddelde nitraatconcentratie in het grondwater in de winterperiode weergegeven. De weergave beperkt zich tot de objecten die in het voorafgaande groeiseizoen zijn bemest (behalve de controle). In Bijlage 7 zijn de meetwaarden voor alle objecten op alle afzonderlijke meetmomenten per winter weergegeven. Bij de kunstmest is voor de winter 2018-2019 het nitraatgehalte voor zowel de vroeg als late toediening (in de eerste snede) weergegeven, in latere jaren was er geen verschil in toedieningstijdstip.

In het algemeen was in alle jaren op de bemeste objecten (gemiddeld over alle meststoffen) de gemiddelde nitraatconcentratie significant hoger dan bij de controle. Gemiddeld over de jaren was er geen duidelijk verschil in de gemiddelde nitraatconcentratie in de winter tussen de kunstmest- en dierlijke mestobjecten (Figuur 2.11). De wat hogere nitraatconcentratie bij het VDM-object in de winter 2020-2021 is weliswaar niet significant, maar kan veroorzaakt zijn door de hogere N-dosering dan gepland. In 2018 is bij de bemesting van de eerste grassnede de kunstmest (zowel KAS als UREUM) vroeg en laat toegediend. Zowel bij KAS als UREUM was bij de vroeg toegediende kunstmest het nitraatgehalte hoger dan bij de laat toegediende kunstmest, maar dit effect was niet significant. Bij de vroeg toegediende KAS was het nitraatgehalte significant hoger dan bij de dierlijke mestsoorten RDM en VDM, bij de vroeg toegediende UREUM was er geen sprake van significante verschillen met de dierlijke mestsoorten.

In Figuur 2.11 is het *gemiddelde* nitraatconcentratie in de winter weergegeven. Ook als gekeken wordt naar de afzonderlijke meetmomenten is er geen sprake van consistente verschillen in uitspoeling tussen kunstmest en dierlijke mest (zie Bijlage 8).

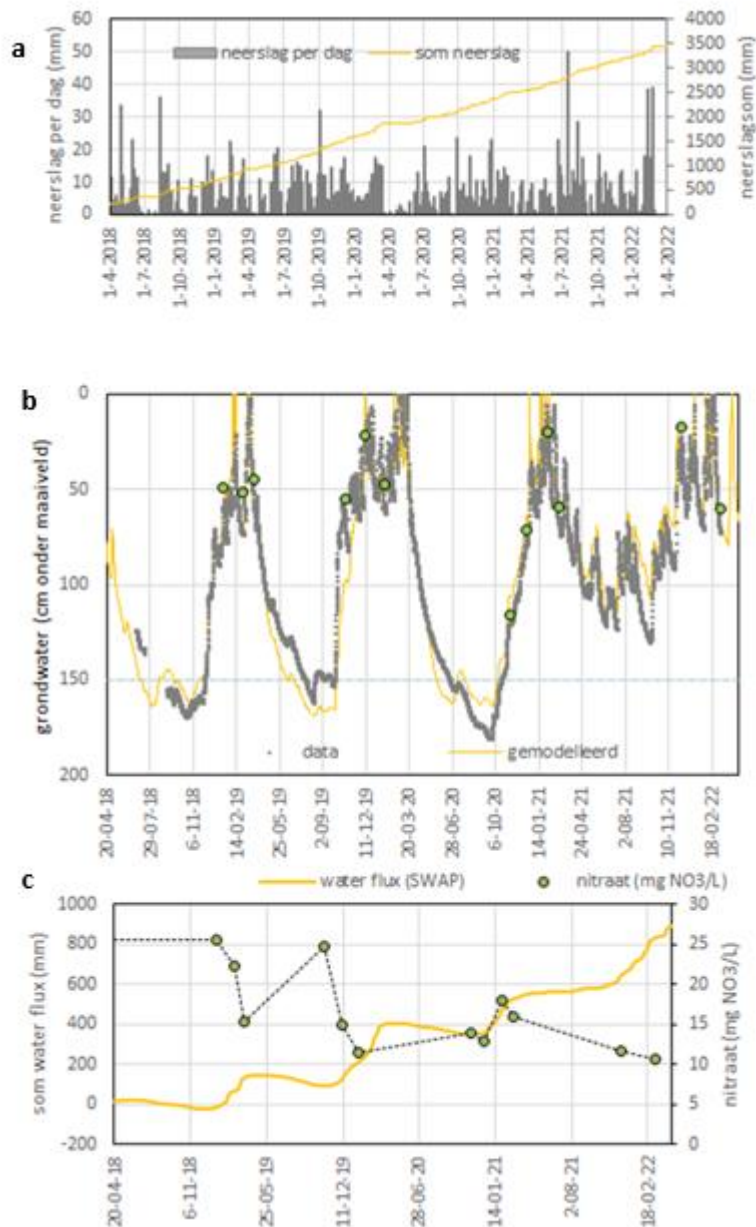
Er zijn in het algemeen geen significante verschillen in nitraatconcentratie tussen de kunstmest- en dierlijke mestobjecten waargenomen in het 1^e, 2^e en 3^e jaar nadat de bemesting was gestopt (gegevens niet weergegeven, zie Bijlage 8).



Figuur 2.11 Gemiddelde nitraatgehalte (mg/L) in het bovenste grondwater in de winters 2018-2019, 2019-2020 en 2020-2021 bij het controle object en de objecten die in het groeiseizoen ervoor zijn bemest; verschillende letters duiden op significante verschillen ($P < 0,05$); de * bij de controlebalk duidt op een significant verschil met de bemeste objecten (gemiddeld over de meststoffen).

Ruimtelijke variatie nitraatgehalten binnen het proefveld

In de winters van 2018-2019, 2019-2020 en 2021-2022 bereikten de grondwaterstanden gedurende een aantal dagen het maaiveld (< 5 cm onder het maaiveld) (Figuur 2.12). Dit gebeurde gedurende 4 dagen vanaf 14 januari 2019, gedurende 15 dagen in de periode van 23 februari tot en met 14 maart 2020 en gedurende 3 dagen in de periode tussen 6 en 23 februari 2022. De hoge grondwaterstand veroorzaakte een duidelijke ruimtelijke verdeling van de nitraatconcentraties waarschijnlijk als gevolg van denitrificatie. De gemiddelde nitraatconcentratie van het grondwater onder de veldjes van herhaling 4 (85-112) op 10 dec 2019 (T5), 21 jan 2020 (T6), 9 dec 2021 (T11) en 9 maart 2022 (T12) was, respectievelijk, 3, 3, 1 en 1 mg/l, terwijl de gemiddelde nitraatconcentratie onder de veldjes van herhaling 1 t/m 3, respectievelijk, 19, 14, 15 en 14 mg/l bedroeg. Deze grote verschillen zijn waarschijnlijk veroorzaakt door verschillen in denitrificatie in het veld. Indien de gemiddelde nitraatconcentraties werden gebaseerd op alleen de herhalingen 1 t/m 3 gaf dit echter een vergelijkbaar beeld zoals gepresenteerd in Figuur 2.11.



Figuur 2.12 (a) dagelijkse en cumulatieve neerslag (b) gemeten en berekende grondwaterstand grondwaterlevel ten opzichte van het maaiveld (SWAP), (c) cumulatieve grondwater flux (SWAP) en gemiddelde gemeten nitraatconcentraties (inclusief interpolatie).

Uitgespoelde nitraat-N-vrachten

Op basis van de neerslaggegevens (Fig. 2.12a) en bodemkarakteristieken zijn de grondwaterstandniveaus en de waterflux gemodelleerd met het hydrologische model SWAP (Fig 2.12b/c). Neerwaartse fluxen werden vooral berekend in de winterperiode.

Met behulp van de gemeten nitraatconcentraties en de gemodelleerde waterflux is vervolgens de nitraatvrucht berekend (Tabel 2.15). In de winter direct na het groeiseizoen dat er is bemest (vet gedrukte blokken in Tabel 2.15) zijn geen verschillen gevonden tussen in uitgespoelde nitraatvrucht tussen kunstmest en dierlijke mest. Ook was het verschil tussen de bemeste objecten en de controle niet altijd significant. Ook na het stoppen van de bemesting (niet-vetgedrukte blokken in Tabel 2.15) was er vrijwel nooit sprake van significante verschillen in nitraatvrucht.

Tabel 2.15 De nitraat-N-vracht per jaar (1 April – 1 April, kg N per ha per jaar) in relatie tot kunstmest- en dierlijke mestsoort en bemestingshistorie; verschillende letters binnen een rij (bemestingshistorie) duiden op significante verschillen tussen meststoffen ($P < 0,05$); de vetgedrukte regels betreffen de objecten die in het betreffende jaar zijn bemest; de blauwe, groene en paarse regels betreffen objecten die in het betreffende jaar respectievelijk voor eerste, tweede en derde jaar niet meer zijn bemest.

Winter	Bemestingshistorie	Kunstmest- dierlijke mestsoort					Gemiddeld ¹
		KAS	UREUM	DIG	RDM	VDM	
2018-2019	Controle	5,2	5,8	5,1	3,5	5,8	5,2
	Bemest in 2018	7,7 a	6,8 a	5,5 a	5,8 a	5,7 a	6,3 *
2019-2020	Controle	6,6	7,1	4,0	4,5	5,2	5,9
	Bemest in 2018 + 2019	6,9 a	8,2 a	10,1 a	9,9 a	6,1 a	8,2 *
	1 jaar onbemest	5,3 a	7,1 a	5,1 a	2,4 a	4,4 a	4,9 ns
2020-2021	Controle	6,3	4,7	3,9	2,9	4,2	4,4
	Bemest in 2018 + 2019 + 2020	10,1 a	8,4 a	6,1 a	6,4 a	11,9 a	8,6 *
	1 jaar onbemest	4,9 a	5,0 a	3,3 a	5,2 a	3,7 a	4,4 ns
	2 jaar onbemest	4,3 a	4,6 a	5,5 a	3,4 a	4,6 a	4,5 ns
2021-2022	Controle	8,7	8,0	5,3	4,1	8,9	7,0
	1 jaar onbemest	9,1 a	9,1 a	8,0 a	6,5 a	11,2 a	8,8 ns
	2 jaar onbemest	8,0 a	8,9 a	6,7 a	5,5 a	9,6 a	7,7 ns
	3 jaar onbemest	6,3 a	10,6 b	8,3 ab	3,0 a	7,2 ab	7,1 ns

¹ */ns = wel/niet significant verschillend van de controle.

Ook bij de cumulatieve nitraatvrachten werden geen duidelijke verschillen gevonden tussen kunstmest en dierlijke mest (Tabel 2.16).

Tabel 2.16 De gecumuleerde nitraat-N-vracht over twee jaar (gemiddelde van de toedieningen in 2018, 2019 en 2020) en de gecumuleerde nitraatvracht over drie jaar (gemiddelde van de toedieningen in 2018 en 2019); verschillende letters duiden op significante verschillen.

Periode	Bemestingshistorie	Kunstmest- dierlijke mestsoort					Gemiddeld ¹
		KAS	UREUM	DIG	RDM	VDM	
2 jaar ²	Controle	13,2	12,5	8,7	7,5	11,2	10,6
	Bemest	14,7 a	14,9 a	12,7 a	12,0 a	14,3 a	13,7 *
3 jaar ³	Controle	19,8	18,7	13,1	11,2	16,8	15,9
	Bemest	18,6 a	20,3 a	18,0 a	16,1 a	17,1 a	18,0 ns

¹ */ns = wel/niet significant verschillend van de controle.

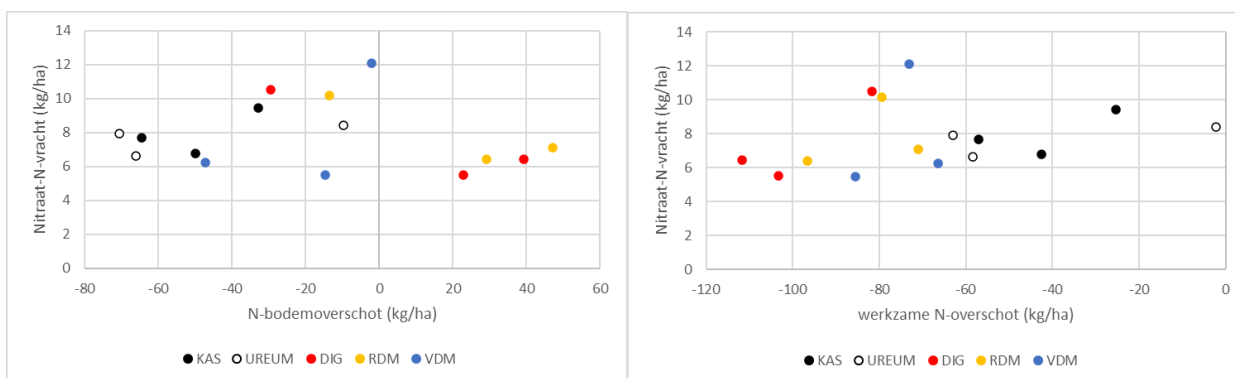
² cumulatief over winter na bemestingsjaar en de opvolgende winter waarbij in het voorgaand groeiseizoen de bemesting is gestopt.

³ cumulatief over winter na bemestingsjaar en de twee opvolgende winters waarbij bemesting in het voorgaand groeiseizoen is gestopt.

Relatie N-overschot en nitraatuitspoeling

In Figuur 2.13 is de relatie tussen het N-overschot en de berekende uitgespoelde nitraat-N-vracht weergegeven voor de bemeste objecten (in het jaar van bemesting). Bij het N-overschot is onderscheid gemaakt tussen het N-bodemoverschot en het werkzame N-overschot. De eerste is berekend als het verschil tussen de totale N-aanvoer via meststoffen en depositie enerzijds en de afvoer met het geoogste gras en de NH₃-N-emissie anderzijds. Bij het werkzame N-overschot is alleen is aan de aanvoerkant alleen de werkzame N uit meststoffen (kunstmest 100% en dierlijke mest conform Tabel 2.13) en de depositie ingerekend en aan de afvoerkant alleen de afvoer met geoogst gras.

In het algemeen waren de overschotten laag en vaak negatief en was er ook geen duidelijke relatie met de uitgespoelde nitraat-N-vracht.



Figuur 2.13 Relatie tussen het N-bodemoverschot en werkzame N-overschot en de berekende nitraat-N-vracht naar het grondwater bij de bemeste objecten in 2018, 2019 en 2020.

2.3.6 Uitspoeling organische stikstof

Naast de meting van het nitraatgehalte (NO₃) is ook het ammoniumgehalte (NH₄) en totaal N-gehalte bepaald in het bovenste grondwater. Het verschil tussen totaal N en NO₃-N+NH₄-N is het opgeloste organisch stikstof (DON). Het gemiddelde DON-gehalte in de 1^e, 3^e en 4^e winter was 3, 3 en 8 mg N/L, respectievelijk. Dat betekent dat er altijd enig verlies van stikstof is in dit perceel, ook als er weinig nitraatuitspoeling is.

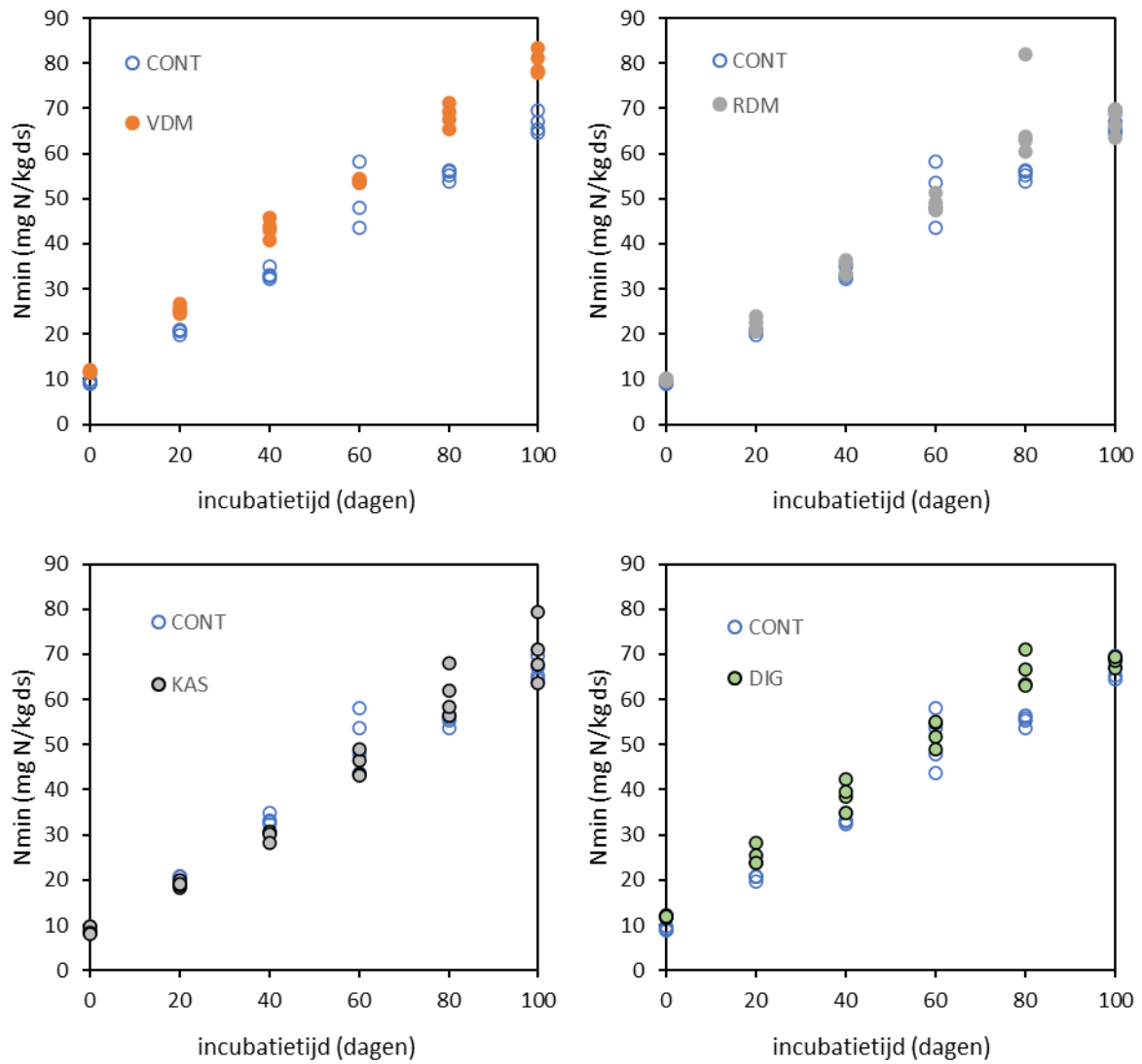
2.3.7 Stikstofmineralisatie van bodem op het einde van het veldexperiment

Aan het einde van het veldexperiment zijn van een aantal objecten grondmonsters genomen en is de N-mineralisatie bepaald in een incubatie-experiment. Daarbij is ook het organische stofgehalte bepaald van de grondmonsters op het einde van de incubatieproef.

Het organische stofgehalte van het controle object (4 jaar lang onbemest) was 5,48% terwijl het organische stofgehalte bij de objecten die 3 jaar lang bemest zijn met digestaat (DIG), rundveedrijfmest (RDM) en varkensmest (VDM) ongeveer 6,0% bedroeg (Tabel 2.17). Omdat de verschillen in organische stoftoevoer niet dergelijke verschillen kunnen geven na drie jaren, zijn de waargenomen verschillen mogelijk mede veroorzaakt door heterogeniteit binnen het proefveld.

Tabel 2.17 Organische stofgehalte (OS in % van droge grond, 0-20 cm -mv) na 100 dagen incubatie (tussen haakjes standaarddeviatie; n=4) van grond uit de onbemeste controle (CONT) en van de objecten drie jaar bemest met KAS, DIG, RDM en VDM; verschillende letters duiden op significante verschillen (op basis van ANOVA bonferoni test).

Object	CONT	KAS	DIG	RDM	VDM
OS%	5,48 (0,04) a	5,79 (0,06) b	5,88 (0,05) bc	5,95 (0,05) cd	6,00 (0,03) d



Figuur 2.14 N-mineralisatie tijdens incubatie (bij 20 °C) van grond uit de onbemeste controle (CONT) en van de objecten drie jaar bemest met KAS, DIG, RDM en VDM.

De grondmonsters bevatten circa 10 mg minerale N/kg ds (N_{\min}) bij aanvang van de incubatieproef en circa 80 mg N_{\min} /kg ds na 100 dagen (Figuur 2.14). De mineralisatie bedroeg dus circa 70 mg N_{\min} /kg ds in 100 dagen incubatie. De N_{\min} nam lineair toe als functie van de incubatietijd: voor alle 5 objecten was $r^2 > 0,94$. De objecten die DIG en VDM ontvingen hadden een significant hogere mineralisatie gedurende de incubatieperiode dan de controle en de objecten die met KAS waren bemest.

Tabel 2.16 Gemiddelde stikstofmineralisatie (N_{min} in mg N/kg) in het incubatie-experiment gedurende 100 dagen bij 20°C ($n=4$) van grond uit de onbemeste controle (CONT) en van de objecten drie jaar bemest met KAS, DIG, RDM en VDM; verschillende letters duiden op significante verschillen¹; onderaan in de tabel staan de resultaten van de lineaire regressie (tussen haakjes de standaarddeviatie).

Tijd (dagen)	Controle		Meststof			gemiddelde
	CONT	KAS	DIG	RDM	VDM	
0	9	9	12	10	12	10 ^a
20	21	19	25	22	26	23 ^b
40	33	30	39	35	43	36 ^c
60	51	45	53	49	54	50 ^d
80	55	61	66	67	68	64 ^e
100	67	70	68	67	80	71 ^f
gemiddelde	39 ^a	39 ^a	44 ^b	42 ^{ab}	47 ^c	
intercept	10,1 (1,4)	6,9 (1,4)	14 (1,4)	10,5 (2)	12,8 (0,8)	
helling	0,58 (0,02)	0,64 (0,02)	0,6 (0,02)	0,62 (0,03)	0,69 (0,01)	
r ²	0,96	0,97	0,97	0,94	0,99	

¹ ANOVA: tijd, meststof en tijd*meststof: $P < 0,001$; LSD tijd = 4,0, LSD meststof = 1,8 en LSD tijd*meststof = 4,4

3 Pot- en incubatieproeven

3.1 Inleiding

Naast de veldproef zijn proeven uitgevoerd om meer inzicht in de verschillende N-verliesprocessen die optreden bij de N-bemesting van grasland met kunstmest en dierlijke mestproducten. De proeven bestonden uit een potproef met gras en twee incubatiestudies om de N-mineralisatie en de potentiële denitrificatie van grond bemest met verschillende mestproducten te bepalen.

3.2 Materialen en Methoden

3.2.1 Potproef

Om het effect van de toediening van verschillende meststoffen op opbrengst, N-opname en het risico op uitspoeling en denitrificatie te onderzoeken is een potproef van 190 dagen uitgevoerd met gras als testgewas. Het experiment is gedaan in de Nergena-kassen op de campus van Wageningen University & Research in de winter van 2020-2021. Het experiment is opgezet als een volledig gewarde blokkenproef in vier herhalingen, met mestsoort en bodemtype als proeffactoren.

Voor de start van het experiment zijn bodemkolommen met drie bodemtypen verzameld. Van twee locaties rondom Wageningen (51,994°N; 5,670°O en 51,989°N; 5,662°O) zijn intacte kolommen van respectievelijk een grasland- en een bouwlandbodem (beide zandgrond; de bouwlandbodem was afkomstig van maisland) gestoken door een PVC cilinder (lengte 38 cm; diameter 20 cm) de grond in te duwen en uit te graven. Dit resulteerde in een bodemkolom van ca. 35 cm per PVC-buis. Op de bouwlandbodem werd het seizoen ervoor mais geteeld. Voor de graslandbodem is eerst de bovengrondse biomassa en de zode verwijderd, voordat de kolommen gestoken werden. De onderkant van de cilinders is vervolgens afgedekt met een geperforeerd deksel om de bodem in de cilinder te houden, maar uitspoeling van bodemvocht toe te laten. Voor het derde bodemtype is gebruik gemaakt van een ondergrond (30-60 cm -mv) die verzameld is op ongeveer dezelfde locatie als de graslandbodem (51,994°N; 5,670°O). De grond is gedroogd en gezeefd (5 mm) voordat deze in de PVC kolommen geplaatst werd. Ook van deze kolommen is de onderkant afgedekt met een geperforeerd deksel. De kolommen zijn met de hand gevuld, omdat het onmogelijk was om ongestoorde kolommen te steken van de ondergrond. Deze ondergrond is meegenomen in het experiment om ook een situatie met een laag koolstofgehalte in de bodem te simuleren.

Voorafgaand aan het experiment zijn de drie gronden bemonsterd en geanalyseerd op fysische en chemische eigenschappen. Een monster van elke grond is daarvoor gedroogd bij 40°C, gezeefd (2 mm) en opgestuurd naar Eurofins Agro in Wageningen. De methodiek voor de analyses is te vinden in Bijlage 8. Een samenvatting van de bodemeigenschappen voor de drie behandelingen is weergegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Overzicht van de fysisch-chemische eigenschappen van de drie bodems gebruikt in de potproef.

Parameter	Grasland Bovengrond	Bouwland Bovengrond	Grasland Ondergrond
Textuur			
Klei (% < 2 µm)	< 1	< 1	2
Silt (% 2-50 µm)	6	12	10
Zand (% > 50 µm)	92	85	87
Organisch stofgehalte (%) ¹	2,5	2,9	0,7
pH	4,9	5,1	6,2
Totaal N (mg/kg)	720	940	< 200
Ammonium-N (mg/kg)	12,4	12,4	7,8
Nitraat-N (mg/kg)	8,6	18,1	< 3,1
Beschikbaar PO ₄ (mg/kg)	0,4	1,2	0,4
P-AL (mg P ₂ O ₅ /100 gram)	14	49	5

¹ het C-gehalte is niet gemeten

Om een zode te vormen werd vier weken voor aanvang van het experiment 1 g Engels raaigras (*Lolium perenne* L.) in elke pot gezaaid. De potten werden bemest met 95 kg P₂O₅ per ha, 90 kg K₂O per ha, 15 kg S per ha, 50 kg MgO per ha en 30 kg CaO per ha, evenals met een oplossing van Fe-EDTA en sporenelementen. De doseringen zijn gebaseerd op het bemestingsadvies voor grasland (www.bemestingsadvies.nl). Twee dagen voor de start van het experiment werd de ontstane graszode geknipt op 5 cm boven het bodemoppervlak en werd de biomassa verwijderd.

Bij de start van het experiment op 30 oktober 2020 werden de potten bemest met 100 kg N totaal per ha van de verschillende minerale en organische meststoffen. De behandelingen bestonden uit een onbemeste controle, kalkammonsalpeter (KAS), ammoniumsulfaat (AS), rundveedrijfmest (drijfm), digestaat (digest) geproduceerd d.m.v. anaerobe vergisting van de rundveedrijfmest, vloeibare (D-dun) en vaste (D-dik) fracties als gevolg van een scheiding van het digestaat, en vaste stalmest (vast).

De vier dunne mestproducten (drijfm, digest, D-dun en D-dik) werden op 23 september 2020 verzameld en bemonsterd op een gangbaar melkveebedrijf in de Betuwe (Gelderland, Nederland) en de vaste stalmest (vast) werd verkregen van een biologisch melkveebedrijf in de Gelderse Vallei (Gelderland, Nederland). Het gangbare bedrijf heeft een monovergister met alleen rundveedrijfmest (drijfmest) als ingaande stroom. Het bedrijf scheidt daarna het digestaat in een vloeibare (D-dun) en een vaste fractie (D-dik). De monsters van de diverse mestproducten werden na bemonstering direct naar Eurofins Agro (Wageningen) gestuurd ter analyse voor droge stof, organische stof, totaal N, ammoniakaal N (NH₃-N), P, Mg, K, en Na, volgens de standaardmethoden van Eurofins Agro (testlaboratoriumnummer L122 op www.rva.nl). Alle methoden zijn geaccrediteerd, behalve die voor K. Het verschil tussen totaal N en NH₃-N wordt beschouwd als organische N (Norg). Na verzameling werden de mestmonsters bewaard bij 4°C tot de start van de experimenten. De belangrijkste relevante eigenschappen van de organische meststoffen zijn samengevat in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Overzicht van de chemische samenstelling van de organische mestproducten gebruikt in de potproef.*

Parameter	Rundveedrijfmest (drijfm)	Digestaat (digest)	Vloeibare fractie (D-dun)	Vaste fractie (D-dik)	Vaste stalmest (vast)
Droge stof (g DS/kg)	104	83	53	325	335
Organische stof (g OS/kg)	84	60	36	258	222
Totaal N (g N/kg)	4,69	4,33	3,72	8,47	10,5
C/N verhouding	8	6	4	14	10
Ammoniaktaal N (g N/kg)	1,4	1,6	1,7	2,4	1,5
Totaal P (g P/kg)	0,86	0,83	0,64	3,48	2,86
Totaal K (g K/kg)	2,9	3,1	2,8	3,1	20,9
Totaal Mg (g Mg/kg)	1,4	1,3	1,0	3,9	2,9
Totaal Na (g Na/kg)	1,3	1,2	1,2	1,1	4,0

Om de toediening van kunstmest en mestproducten in de praktijk zo goed mogelijk te benaderen, werden KAS, de vaste fractie van digestaat en de vaste stalmest oppervlakkig toegediend, terwijl voor ammoniumsulfaat (als oplossing), drijfmest, digestaat en de vloeibare fractie van digestaat injectie in de bodem (zodebemester) werd gesimuleerd. Om injectie na te bootsen werd met een mes een 5 cm diepe sleuf gesneden over het hele midden van het bodemoppervlak. Vervolgens werden de corresponderende meststoffen in de ontstane gleuf gegoten. Waar nodig werd de gleuf verbreed door het mes zijdelings te bewegen, zodat het mestproduct volledig in de bodem kon infiltreren.

Voorafgaand aan het experiment werd de veldcapaciteit per pot bepaald door de grond te verzadigen met water, totdat er water uit de geperforeerde doppen uit de onderkant van de pot lekte, en de potten vervolgens na 48 uur te wegen. Gedurende het hele experiment werd het vochtgehalte op 90% van de veldcapaciteit gehouden door het vochtgehalte twee keer per week gravimetrisch aan te passen.

Het experiment was verdeeld in twee meetcycli van elk 42 dagen, waarbij een minimumtemperatuur van 12°C en gemiddelde temperatuur van ca. 15°C gehanteerd werd. Tussen deze twee meetcycli is een rustperiode van 103 dagen ingesteld om de inactieve periode gedurende de wintermaanden te simuleren (Tabel 3.3). Tijdens deze periode werd de temperatuurcontrole en de verlichting in de kas uitgeschakeld. De eerste meetcyclus liep van 30 oktober tot 10 december. Hierna werd het experiment in een rustfase gebracht tot eind maart, wanneer een tweede meetcyclus werd opgestart. Voor beide meetcycli is de bovengrondse biomassa van het gras bepaald alsook de uitstoot van lachgas (N₂O) na bemesting. Aan het begin van de tweede cyclus werden de potten opnieuw bemest met 100 kg N/ha, volgens de hierboven beschreven procedure. Aan het begin (24 maart) en tegen het einde (23 april) van de tweede meetcyclus is de uitspoeling van N en P gemeten. Tijdens de eerste uitspoelingsmetingen verloren vijf potten met graslandondergrond hun dop en werden deze objecten onbruikbaar voor verdere analyses. De rest van het experiment is daarom uitgevoerd zonder deze vijf potten.

Tabel 3.3 Tijdslijn van de potproef met overzicht van de belangrijkste acties.

Datum	Activiteit
<i>Eerste meetcyclus</i>	
30 oktober 2020	Bemesting en start van het experiment
31 oktober 2020	Start eerste serie N ₂ O-metingen
16 november 2020	Eerste grasoogst
7 december 2020	Tweede grasoogst
10 december 2020	Eind eerste serie N ₂ O-metingen
<i>Tweede meetcyclus</i>	
24 maart 2021	Eerste uitspoelingsmetingen
30 maart 2021	Derde grasoogst
6 april 2021	Bemesting
7 april 2021	Start tweede serie N ₂ O-metingen
23 april 2021	Tweede uitspoelingsmetingen
3 mei 2021	Eind tweede serie N ₂ O-metingen
4 mei 2021	Vierde grasoogst + bodem- en wortelbemonstering voor verdere analyse

Bodem- en gewasanalyse

De bovengrondse biomassa van het gras werd 17, 38, 151 en 186 dagen na de start van het experiment geoogst. Het gras werd op 5 cm boven het bodemoppervlak afgeknipt om verzekerd te zijn van een goede hergroei van het gewas. Per pot werd het verse gewicht van de biomassa onmiddellijk na het afsnijden bepaald en het drooggewicht werd bepaald na minstens 24 uur drogen bij 70°C. De monsters werden vervolgens gemalen en een samengesteld mengmonster van de vier oogsten werd opgestuurd naar het Laboratorium voor Bodemchemie (CBLB) van Wageningen University voor analyses op totaal N- en P-gehalte met behulp van destructie met een mengsel van H₂SO₄, salicylzuur, H₂O₂ en selenium als katalysator (Novozamsky et al., 1983).

Aan het einde van het experiment werden monsters genomen voor wortel- en bodemanalyses. Per pot werden twee bodemkernen gestoken door de gehele lengte van de potten, met een boor met een diameter van 26 mm om de wortelbiomassa te schatten. Eén kern werd in het midden van de pot genomen, een andere ongeveer 1 cm van de rand van de pot. Uit deze kernen werden de wortels verzameld, gewassen en gedroogd bij 70°C voor minstens 24 uur. De stoppels werden hierbij verwijderd door de gestoken monsters af te knippen aan het bodemoppervlak. De wortelmonsters werden vervolgens vermalen en geanalyseerd op totaal N- en P-gehalte volgens de hierboven beschreven methode. De bodemmonsters voor metingen van beschikbare N werden genomen door in elke pot drie keer de gehele lengte te bemonsteren met een gutsboor met een diameter van 10 mm. Deze monsters werden gemengd, voor minstens 24 uur gedroogd bij 40°C, gezeefd en opgestuurd naar het CBLB. Daar werden de bodemmonsters geëxtraheerd met een 0,01 M CaCl₂-oplossing (Houba et al., 2000), waarna het supernatant werd geanalyseerd op N-NH₄, N-(NO₂+NO₃), Nts, P-PO₄ en DOC met behulp van Segmented Flow Analysis.

Verzameling en analyse van uitspoelingswater

Uitspoelingsmonsters zijn vlak voor het begin (24 maart) en vlak voor het einde (23 april) van de tweede cyclus verzameld. Daartoe werden de potten gedurende twee dagen in emmers van 15 liter geplaatst, waarin hevige regenbuien werden gesimuleerd. Tijdens de eerste verzameling werd in totaal 940 ml (30 mm) toegevoegd en tijdens de tweede verzameling 1200 ml (38 mm). Het opgevangen vocht in de emmer werd aan het eind van de tweedaagse periode verzameld, gefilterd om bodemdeeltjes te verwijderen, en geanalyseerd op N-NH₄, N-(NO₂+NO₃), Nts, P-PO₄ en DOC met behulp van Segmented Flow Analysis door het CBLB. Daarnaast werden pH en EC gemeten met elektrodes.

Lachgasmetingen

Tijdens beide meetcycli is met regelmaat de N₂O-emissie (als indicatie van denitrificatie) uit de potten gemeten (gemiddeld drie dagen per week), met behulp van een statische kamer methode. De potten werden daartoe afgedekt met fluxkamers (4 L, polypropyleen) waarin na een incubatieperiode van 15 minuten de toename in N₂O-concentratie bepaald werd met een INNOVA 1512 fotoakoestische gasanalyser (LumaSense

Technologies). Bij de metingen werden vocht- en natronkalkfilters gebruikt om interferentie van respectievelijk waterdamp en CO₂ te minimaliseren. Voor het berekenen van de emissies is aangenomen dat de N₂O-concentratie in de fluxkamers lineair toeneemt tijdens de incubatieperiode. Deze aanname is regelmatig geverifieerd door een object met een hoge N₂O-concentratie gedurende 15 minuten continu te meten. Cumulatieve fluxen zijn berekend voor de twee meetcycli van het experiment d.m.v. lineaire interpolatie tussen de meetpunten. Uit de cumulatieve emissies zijn opbrengst-geschaalde N₂O-emissies (Van Groenigen et al., 2010) berekend als de hoeveelheid uitgestoten N₂O-N per totale N-opname van het gras.

Statistische analyse

De gehele statistische analyse is uitgevoerd in R, versie 4.2.1 (R Core Team, 2023). Het effect van bemestingstype op de responsvariabelen N₂O-emissies, grasopbrengst en N-uitspoeling is getest per grondsoort met behulp van lineair mixed-effects modellen en ANOVA. Hierbij zijn herkomst grond en mestsoort als proeffactoren meegenomen. Een gedetailleerde beschrijving van de statistiek is te vinden in Bijlage 8.

3.2.2 Stikstofmineralisatie van organische meststoffen

Voor de vijf organische meststoffen is de stikstofmineralisatie bepaald in een incubatie-experiment. De kunstmesten zijn hierbij niet meegenomen, omdat ze geen organische N bevatten. Het experiment is gedaan met één bodem en begon op 23 juni 2021. De gebruikte methode was vergelijkbaar met die van Egene et al. (2021) en Lazicki et al. (2020). De gebruikte grond (bovenste 25 cm) is een zandgrond (3,1% organische stof, 2% klei, <0,2% kalk) van een akkerbouwveld op het bedrijf van Wageningen Universiteit (51,993°N; 5.655°O) die op 7 februari 2018 is bemonsterd voor analyses en voor gebruik in laboratoriumexperimenten. De grond werd gedroogd en gezeefd voor conservering, wat resulteerde in een vochtgehalte van 9,4% voor het experiment. Het mineralisatie-experiment werd uitgevoerd met één stikstofbemesting voor de vijf meststoffen: 100 g N/kg droge grond, allemaal bij hetzelfde vochtgehalte. In elke audiotheenzak werd 200 gram droge grond, water en meststoffen gemengd om een gravimetrisch vochtgehalte van 14% (60% van de veldcapaciteit) voor alle monsters te verkrijgen. De vijf meststoffen werden in vijfvoud bemonsterd, na een incubatie van 7, 14, 40, 70 en 100 dagen. Bij elk bemonsteringstijdstip werden twee onbemeste controles meegenomen, wat resulteerde in een totaal van 175 zakken, die werden geanalyseerd op minerale stikstof (N_{min}) volgens ISO-methode 14256 in het laboratorium van CBLB.

3.2.3 Potentiële denitrificatie

Aan het einde van de potproef is de potentiële denitrificatiecapaciteit in de bovengrond in de potten bepaald. Op 4 mei 2021 werden bodemmonsters van de 0-10 cm laag van alle potten genomen met een kleine boor (10 mm diameter). De zode en eventuele wortels werden uit deze monsters verwijderd en ze werden tot verdere analyse bij 4°C bewaard. De potentiële denitrificatie werd bepaald met de acetyleeninhibitie methode (Bijay-Singh et al., 1988; Velthof et al., 2001). Kort samengevat werd 50 g grond in een fles geïncubeerd, waarna een KNO₃-oplossing werd toegevoegd. De flessen werden gespoeld met N₂-gas om alle zuurstof uit de fles te verwijderen en vervolgens werd 2% acetyleen toegevoegd om de omzetting van N₂O naar N₂ te remmen. De N₂O-productie werd gemeten na 24 en 48 uur als maat voor het denitrificatiepotentieel van de bodem.

3.3 Resultaten

3.3.1 Lachgasemissies

In Figuur 3.1 is per meetcyclus de cumulatieve lachgasemissie weergegeven. Voor het verloop van de lachgasemissie in de tijd binnen een meetcyclus wordt verwezen naar Bijlage 9 (Figuur B9.1). Hieruit blijkt dat de hoogste N₂O-emissies werden gemeten in de eerste 15 dagen van het experiment in beide meetcycli (Fig. 3.1). De piekemissies waren op dag 10 in de eerste cyclus en op dag 8 in de tweede cyclus, hoewel de piek minder uitgesproken was in de tweede cyclus. De emissies in de 1^e cyclus waren minstens een factor 2 hoger dan in de 2^e meetcyclus, maar vaak was het verschil groter.

Voor bemesting met KAS, de vaste fractie van digestaat (D-dik) en de vaste mest waren in beide meetcycli de cumulatieve N₂O-emissies niet hoger dan die van de controle (Figuur 3.1). Dat gold ook voor ammoniumsulfaat in de 1^e meetcyclus, maar in de 2^e meetcyclus waren op de grasland- en bouwlandbovengrond de cumulatieve N₂O-emissies van ammoniumsulfaat significant hoger dan die van de controle (Fig. 3.1d en e). De lachgasemissies uit drijfmest waren in de eerste meetcyclus het hoogst, variërend van 300 (in de graslandbovengrond) tot 800 g N₂O-N/ha in de bouwlandbovengrond en de graslandondergrond. In de graslandbovengrond was in de eerste meetcyclus ook de emissie bij digestaat hoger dan die in de controle en bij KAS. In de tweede meetcyclus werden de hoogste emissies waargenomen bij de dunne fractie.

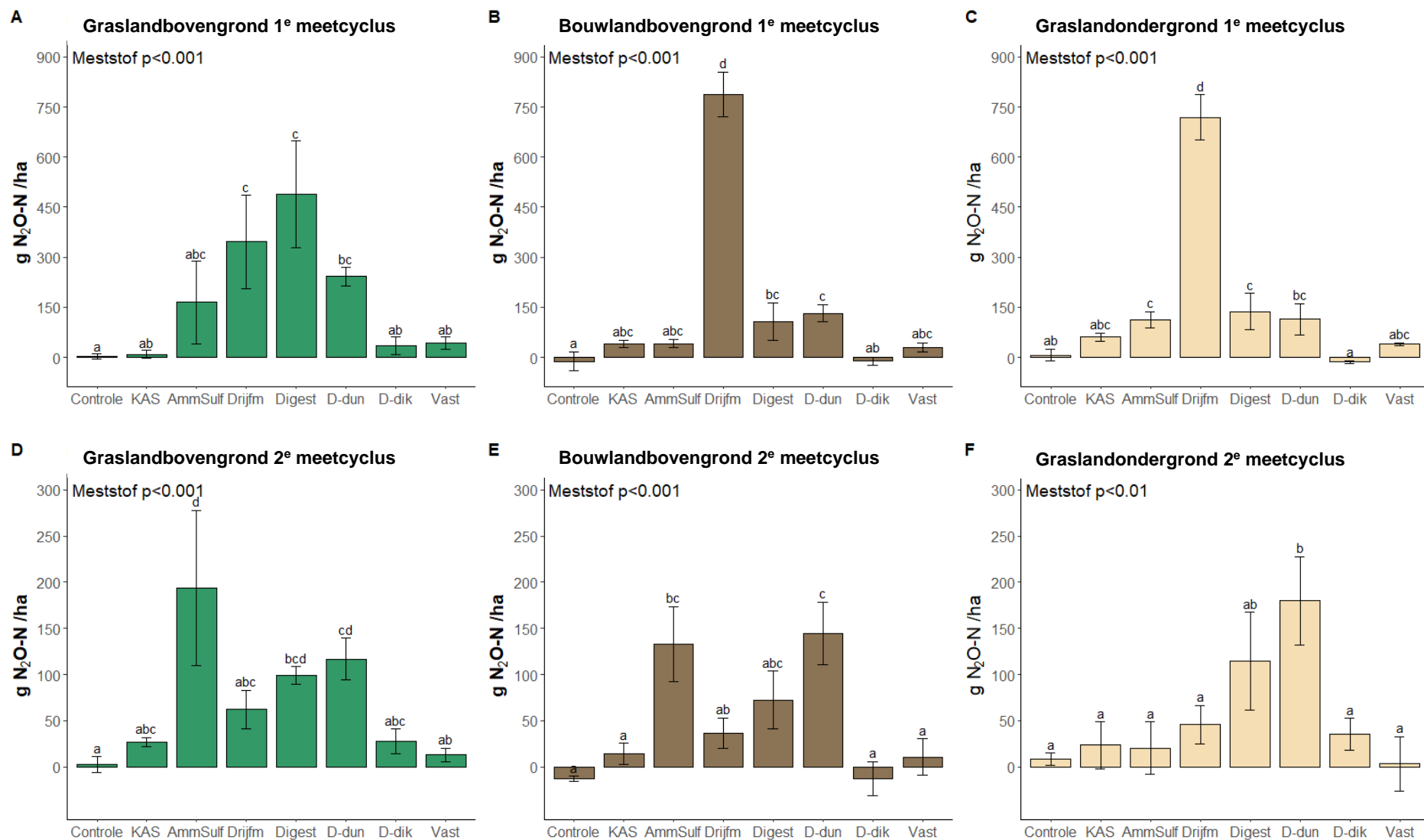
De lachgasemissie kan ook worden uitgedrukt per eenheid gewasopbrengst of per eenheid gewas-N-opname (Figuur 3.2 t/m 3.4), hierna opbrengstgeschaalde emissie genoemd. Dit is een manier om de effectiviteit van een meststof m.b.t. gewasproductie of N-opname mee te wegen bij de lachgasemissies. Hierdoor wordt er gecorrigeerd voor veranderingen in opbrengst en N-opname ten gevolge van managementkeuzes. De opbrengst-geschaalde N₂O-emissies in deze potproef varieerden tussen (net onder) nul en 34 g N₂O-N per kg gras-N-opbrengst. Bij gebruik van drijfmest waren de emissies altijd het hoogst (Fig. 3.3e, 3.4e en 3.5e). De hoogste emissies en de grootste verschillen tussen de behandelingen werden waargenomen in de eerste meetcyclus. Op de graslandbovengrond werden er, naast drijfmest, ook bij digestaat significant hogere emissies waargenomen dan bij de controle, terwijl op bouwlandbovengrond en de graslandondergrond de emissies bij de andere meststoffen dan drijfmest niet hoger waren dan bij de controle. In de 2^e meetcyclus waren de emissies veel lager en was er meer variatie in de data hetgeen resulteerde in weinig significante verschillen tussen de meststoffen op bouwlandbovengrond en graslandondergrond. Op graslandbovengrond werd alleen bij ammoniumsulfaat een hogere emissie gevonden ten opzichte van de controle.

3.3.2 Grasopbrengst en N-opname

De drogestof- en N-opbrengst van het gras waren altijd het laagst in de controlebehandeling en altijd het hoogst na bemesting met KAS en ammoniumsulfaat (Fig. 3.2a/b, 3.3a/b en 3.4a/b). Van de organische meststoffen gaven de vaste mest en de vaste fractie van het digestaat de laagste drogestof- en N-opbrengst, hoewel de verschillen met de dunne mestproducten niet altijd significant waren. Voor de wortelbiomassa aan het einde van het experiment waren vergelijkbare trends te zien (Fig. 3.2b, 3.3b en 3.4b), hoewel er geen verschillen waren tussen de organische meststoffen. De drogestof- en N-opbrengst van het gras waren het hoogst op de graslandbovengrond en het laagst op de graslandondergrond.

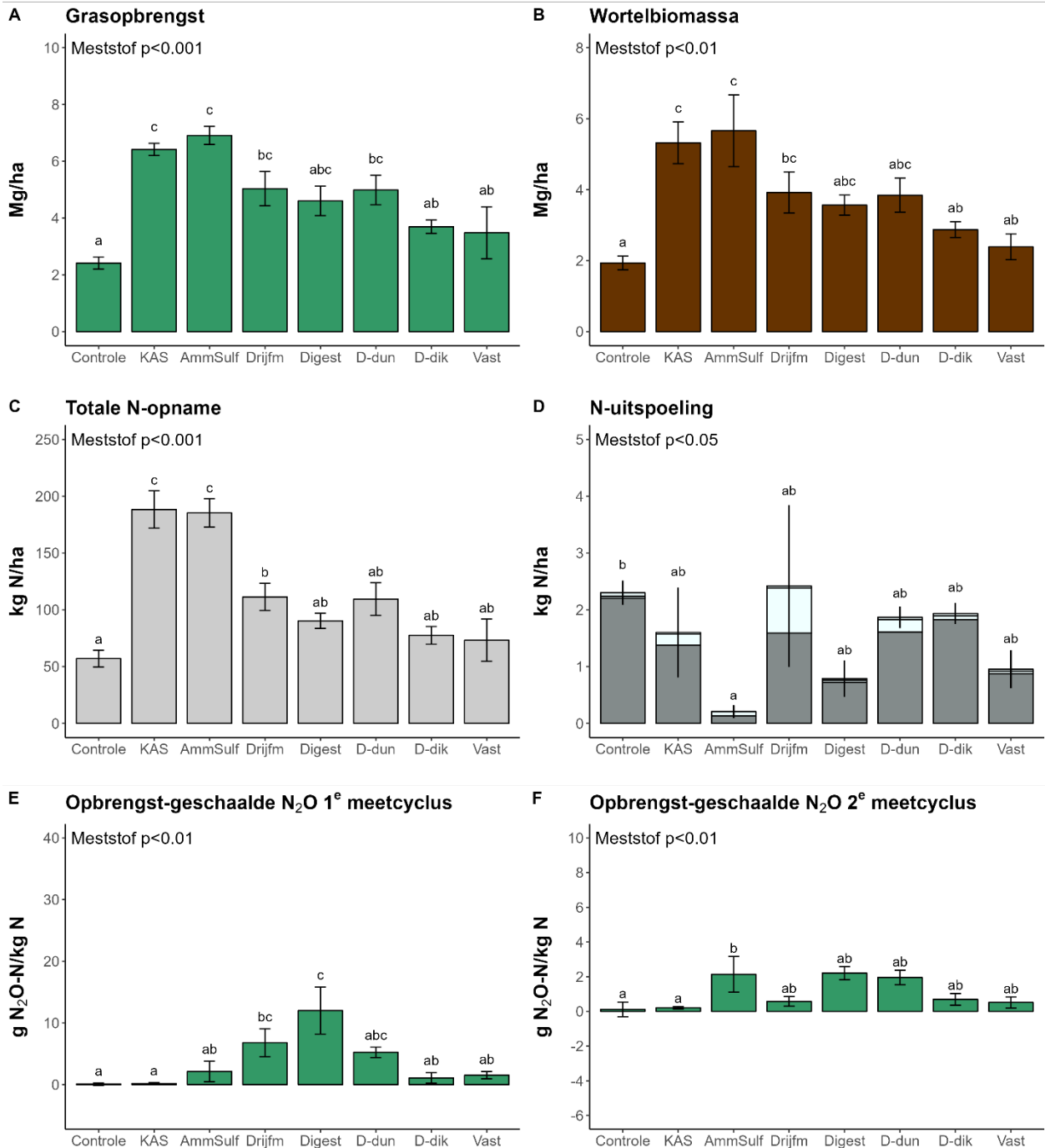
3.3.3 Stikstofuitspoeling

De uitspoeling uit de kolommen gedurende de potproef was gering, bijna overal lager dan 4 kg N per ha (Figuur 3.2d, 3.3d en 3.4d). Het grootste deel van de uitgespoelde stikstof was aanwezig in organische vorm, vooral in de graslandondergrond. Dit is opmerkelijk, omdat deze grond vrijwel geen organische stof bevatte (zie Tabel 3.1). Bezien over alle drie de bodems was er weliswaar af en toe sprake van significante verschillen in uitspoeling tussen de objecten (bij graslandbovengrond en de graslandondergrond), maar er was geen duidelijk patroon zichtbaar. Bovendien was in geen van de bodems de hoeveelheid uitgespoelde N bij de bemeste objecten hoger dan bij de controle. Er vond geen vrijwel geen nitraatuitspoeling plaats.



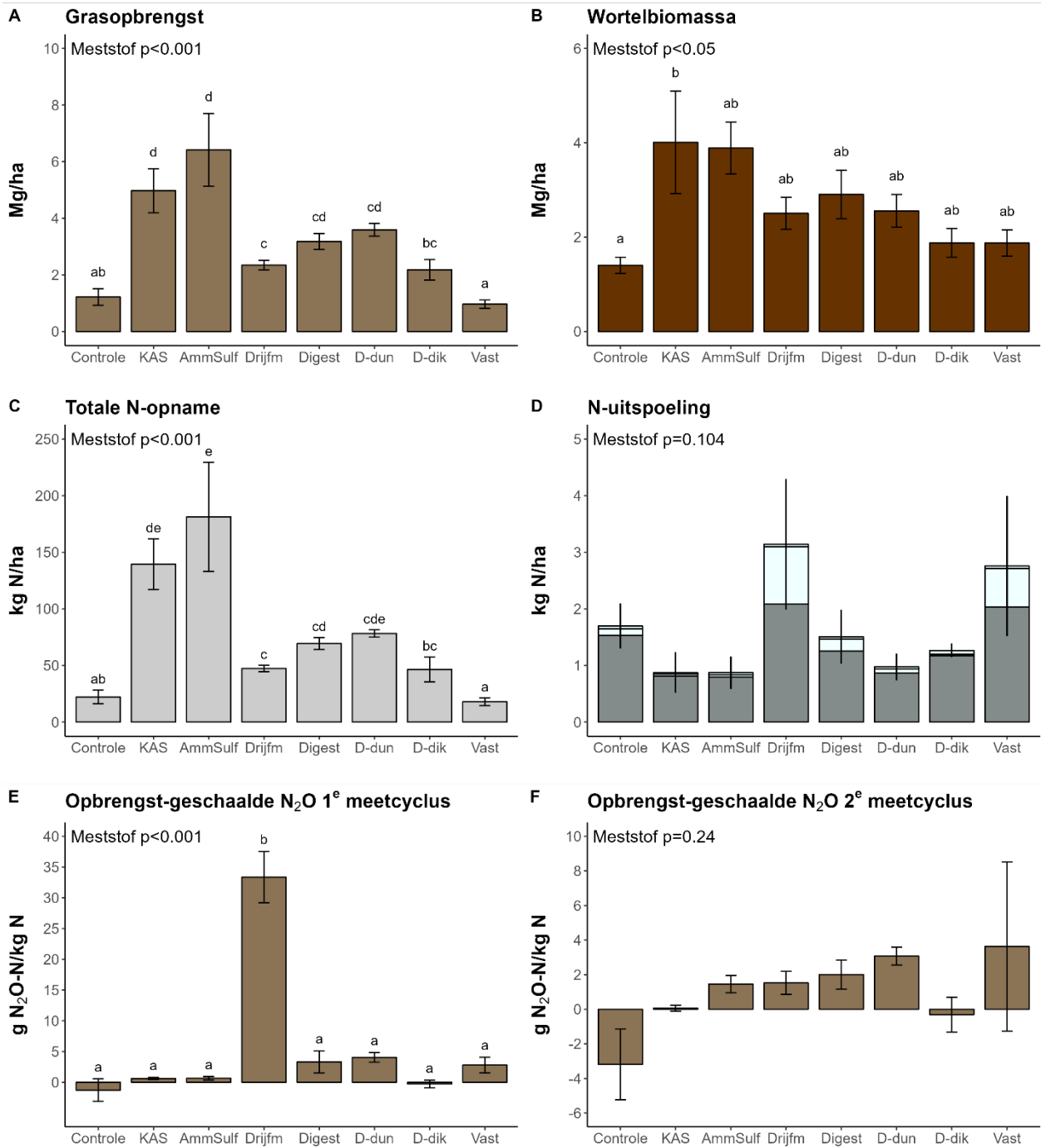
Figuur 3.1 Cumulatieve N₂O-emissies gemeten over 40 dagen in de 1^e cyclus en 27 dagen in de 2^e cyclus voor de drie bodemsoorten; graslandbovengrond, bouwlandbovengrond en graslandondergrond. Foutenbalken geven de standaardfout weer (n=4 voor Controle, AmmSulf, Digest, D-dun, D-dik, Vast; n=6 voor KAS, Drijfm). Balken met dezelfde letters zijn niet significant verschillend (p<0.05). N.B. Let op de verschillen in schaal voor de Y-assen voor de eerste en tweede meetperiode.

Graslandbovengrond



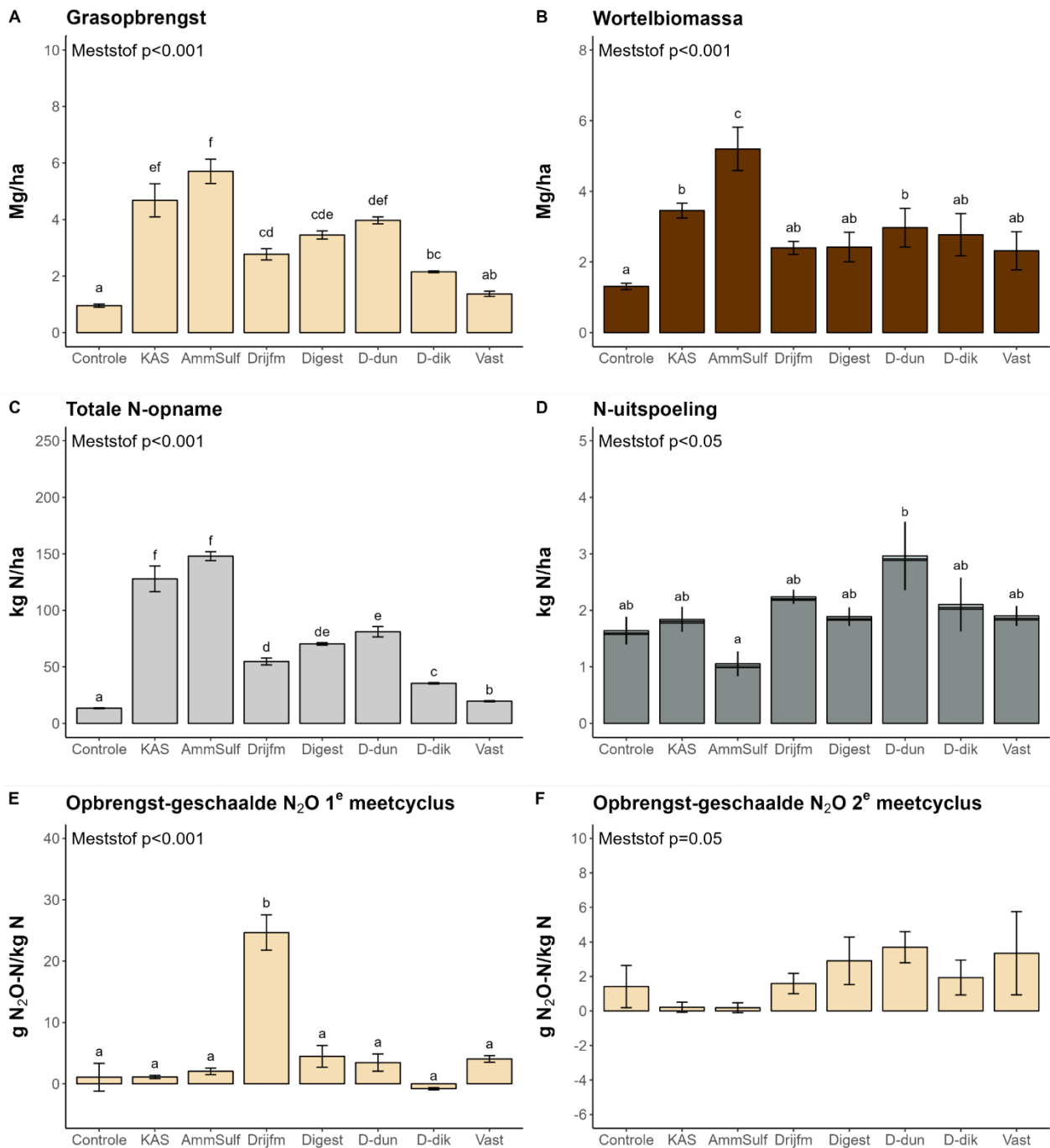
Figuur 3.2 De grasopbrengst, wortelbiomassa, N-opname, N-uitspoeling en opbrengst-geschaalde N_2O -emissie tijdens de 1^e en 2^e meetcyclus op de graslandbovengrond. Foutenbalken geven standaardfouten aan ($n=4$ en $n=6$ voor KAS en drijfmest). Binnen een figuur zijn balken met eenzelfde letter niet significant verschillend ($P < 0,05$, $n=4$). In paneel D is N-uitspoeling opgedeeld in organisch N (grijs), nitraat-N (lichtblauw), en ammonium-N (wit).

Bouwlandbovengrond



Figuur 3.3 De grasopbrengst, wortelbiomassa, N-opname, N-uitspoeling en opbrengst-geschaalde N_2O -emissie tijdens de 1^e en 2^e meetcyclus op de bouwlandbovengrond. Foutenbalken geven standaardfouten aan ($n=4$ en $n=6$ voor CAN en Slurry). Binnen een figuur zijn balken met eenzelfde letter niet significant verschillend ($P < 0,05$, $n=4$). In paneel D is N-uitspoeling opgedeeld in organisch N (grijs), nitraat-N (lichtblauw), en ammonium-N (wit).

Graslandondergrond



Figuur 3.4 De grasopbrengst, wortelbiomassa, N-opname, N-uitspoeling en opbrengst-geschaalde N_2O -emissie tijdens de 1^e en 2^e meetcyclus op de graslandondergrond. Foutenbalken geven standaardfouten aan ($n=4$ en $n=6$ voor CAN en Slurry). Binnen een figuur zijn balken met eenzelfde letter niet significant verschillend ($P < 0,05$, $n=4$). In paneel D is N-uitspoeling opgedeeld in organisch N (grijs), nitraat-N (lichtblauw), en ammonium-N (wit).

3.3.4 Potentiële denitrificatie

De potentiële denitrificatiecapaciteit van de bodems, gemeten aan het eind van het experiment, varieerde tussen 20 en 900 $\mu\text{g/kg}$ droge grond/dag (Bijlage 9, Figuur B9.2). De potentiële denitrificatie was het hoogst op de graslandbovengrond en het laagst op de graslandondergrond. Significante verschillen tussen meststoffen in effect op de potentiële denitrificatie werden alleen gevonden voor de graslandondergrond. Bij digestaat en de vloeibare fractie van digestaat werd een significant hoger denitrificatieniveau gevonden dan

bij de onbemeste controle en de behandelingen die bemest waren met kunstmest, de dikke fractie van digestaat en vaste stalrest. Dit effect werd echter niet waargenomen bij de andere twee gronden.

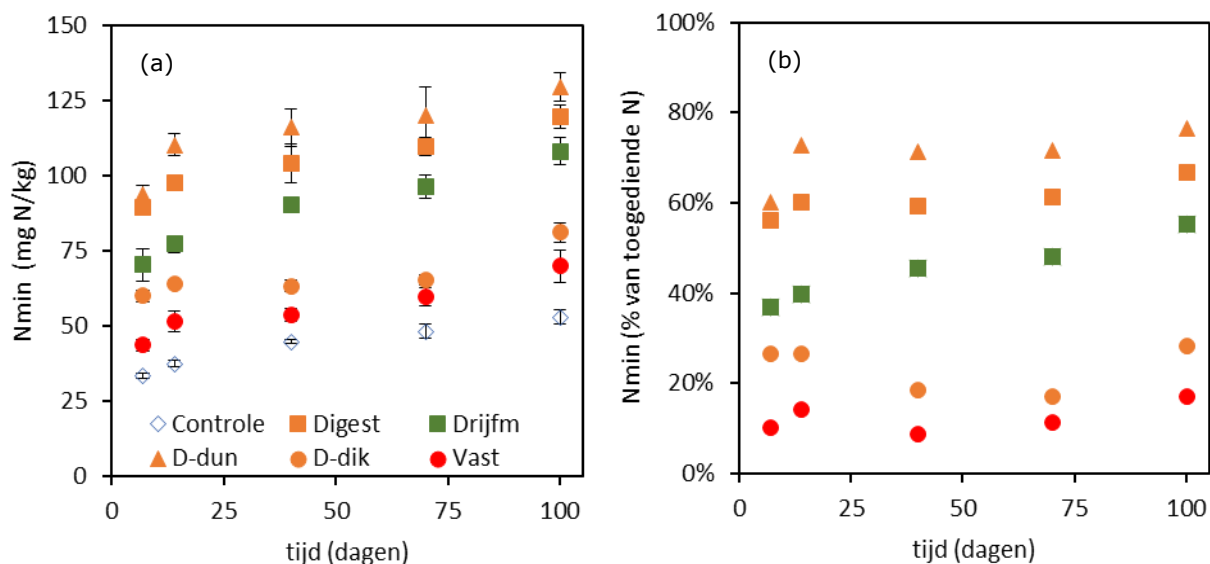
3.3.5 Bodemeigenschappen

Er waren vrijwel geen significante verschillen in het minerale of organische N-gehalte in de bodem aan het einde van de potproef (Bijlage 9, Tabel B9.1 t/m B9.4)). Hoewel er enkele significante verschillen waren tussen behandelingen voor oplosbaar organisch N en C in de graslandbodem, waarbij in de potten bemest met KAS relatief hoge concentraties te vinden waren, waren deze verschillen niet groot, noch consistent over de verschillende bodemsoorten. Wel is op te merken dat zowel de concentraties van NH_4 als die van oplosbaar organisch N aanzienlijk hoger waren dan die van NO_3 , waarvan nog weinig aanwezig was in de bodem. Dit is in overeenstemming met de lage gehalten van minerale N in het uitspoelingswater.

3.3.6 Stikstofmineralisatie van meststoffen

Van de vijf dierlijke meststoffen die zijn gebruikt in de potproef (Tabel 3.2) is de N-mineralisatie bepaald gedurende 100 dagen bij 20°C. De tijd tussen de bemonstering van de meststoffen en de start van het incubatie-experiment was negen maanden. In die tijd zijn de monsters in de koeling opgeslagen geweest (4°C). Het is onbekend in welke mate organische N mineraliseert tijdens de opslag bij 4°C.

Figuur 3.5 geeft de resultaten van de incubatieproef weer. Links is de hoeveelheid gemeten minerale N in de grondmonsters weergegeven voor de dierlijke meststoffen en die in de onbemeste grond (Controle), rechts is het percentage totale stikstof uit de meststoffen dat teruggevonden wordt als minerale N weergegeven, gecorrigeerd voor de hoeveelheid minerale N in de controle. Bij het percentage N teruggevonden als minerale N zijn er bij aanvang van het experiment grote niveauverschillen die de verschillen in aandeel NH_4 -N in de totale N bij de mestsoorten reflecteren (Tabel 3.4). In de incubatieperiode nam alleen bij drijfmest het aandeel minerale N toe. Bij het digestaat en de dunne fractie was dit alleen bij aanvang in de eerste 10 dagen het geval, terwijl bij de vaste fractie en de vaste mest er vrijwel helemaal geen toename was van het aandeel Nmin. Dat suggereert dat er bij de vaste producten geen mineralisatie heeft plaatsgevonden tijdens de opslag van de mestmonsters bij 4°C en tijdens de incubatieperiode van 100 dagen bij 20°C. Voor de andere drie dierlijke meststoffen is het percentage N dat teruggevonden wordt na 100 dagen incubatie groter dan het % N- NH_4 volgens de samenstelling: +25% voor rundveedrijfmest, +30% voor digestaat, en +30% voor de vloeibare fractie van digestaat van rundveedrijfmest (Tabel 3.4). Dat kan veroorzaakt zijn door mineralisatie tijdens de opslag (bij 4°C) en mineralisatie tijdens de incubatie bij 20°C.



Figuur 3.5 Links (a) stikstofmineralisatie van vijf dierlijke meststoffen ($n=5$) in grond bij 20 °C in vergelijking tot een niet-bemeste controle ($n=2$), en rechts (b) percentage van toegediende hoeveelheid N teruggevonden als minerale N (correctie voor minerale N in de onbemeste controle) voor: rundveedrijfmest (Drijfm), digestaat van rundveedrijfmest (Digest), vloeibare fractie van digestaat van rundveedrijfmest (D-dun), vaste fractie van digestaat van rundveedrijfmest (D-dik), en vaste rundveemest (Vast). De totale stikstofgift via meststoffen was 100 mg N kg⁻¹ grond voor alle vijf meststoffen.

Tabel 3.4 Mineralisatie van dierlijke meststoffen na 100 dagen incubatie in grond bij 20°C in relatie tot het stikstofgehalte in de meststoffen.

Meststof	code	N toegevoegd (mg N kg ⁻¹ grond)	%N-NH ₄	%N org	Minerale N (% van totaal toegevoegd N) ¹	
					Na 7 dagen	Na 100 dagen
Rundveedrijfmest (RDM)	Drijfm	100	30	70	37	55
Digestaat van RDM	Digest	100	37	62	56	67
Vloeibare fractie van digestaat van RDM	D-dun	100	46	54	60	76
Vaste fractie van digestaat van RDM	D-dik	100	28	72	27	28
Vaste rundveemest	Vast	100	14	86	10	17

¹Gecorrigeerd voor minerale N in de controlebehandeling

4 Discussie en conclusies

4.1 Discussie

Om verschillen in N-benutting en N-uitspoeling tussen dierlijke mest en kunstmest op maaigrasland te onderzoeken zijn veld-, pot- en incubatieproeven uitgevoerd. Doordat er is uitgegaan van een gelijke totale N-aanvoer bij zowel de kunstmeststoffen als de dierlijke mestsoorten is een directe vergelijking tussen kunstmest en dierlijke mest mogelijk. Anderzijds is de werkzame N-aanvoer bij een gelijke N-totaalaanvoer bij kunstmest doorgaans wel hoger dan bij dierlijke mest.

Gewas-N-benutting

Zowel uit de veldproef als uit de potproef bleek dat de N-benutting (ANR) door het gras bij gebruik van kunstmest significant hoger was dan die bij gebruik van dierlijke mest. Dit is een algemeen beeld dat uit verschillende onderzoeken naar voren komt (o.a. Webb et al., 2013; Kayser et al., 2015). Uit de veldproef bleek dat in tegenstelling tot kunstmest-N, de benutting van dierlijke mest-N toenam, indien ook de jaren na de toediening in beschouwing werden genomen. Dit is waarschijnlijk een gevolg van de nawerking van de organische N in de dierlijke mest die in de jaren ervoor is toegediend. Diverse binnenlandse en buitenlandse meerjarige experimenten laten een vergelijkbaar beeld zien (Schröder et al., 2007b; Sörensen, 2004; Müller et al., 2011). Dit geeft aan dat bij een vergelijking tussen kunstmest-N en dierlijke mest-N nawerking moet worden meegenomen en alleen via lange termijnproeven goed kan worden vastgesteld (Oenema et al., 2003).

Ook de incubatieproef waarin de N-mineralisatie is gemeten in de grond van de veldproef liet zien dat nawerking van dierlijke mest een rol speelde. Bij twee van de drie mestsoorten (DIG en VDM) was de mineralisatie van de grond die bemest waren met deze dierlijke mestsoorten hoger dan die van de grond bemest met KAS. Bij RDM werd dit echter niet waargenomen.

De resultaten laten zien dat de N-benutting en de N-werkingscoëfficiënt van VDM hoger zijn dan die van RDM en DIG. Bij de eerstejaars werking was er een relatie met de $\text{NH}_4\text{-N/Ntotaal}$ -verhouding in de dierlijke mest. Deze was voor VDM in het algemeen wat hoger dan die in de RDM en DIG. Ook een hogere mineralisatiesnelheid van de organische N in VDM, zoals gehanteerd in het bemestingsadvies (www.bemestingsadvies.nl), kan een rol hebben gespeeld. In Tabel 4.1 is de gemeten eerstejaars N-werkingscoëfficiënt in de veldproef vergeleken met de berekende waarde volgens de kengetallen uit het bemestingsadvies. Bij de laatste wordt de totale werkingscoëfficiënt berekend op basis van de werking van het $\text{NH}_3\text{-N}$ -deel in de mest (gemiddelde werking van 83% bij zodebemesting) en de werking van de organische N in de mest (werking van 10-15% bij DIG, 15-20% bij RDM en 45-50% bij VDM). De gemeten en berekende waarden waren van dezelfde grootte orde en ook bij de berekende waarden is de N-werkingscoëfficiënt van VDM hoger dan die van DIG en RDM. De gevonden eerstejaars werkingscoëfficiënten NWC-waarden komen voor DIG en RDM redelijk overeen met waarden gevonden door Schröder et al. (2007b), Schröder et al. (2010) en Schils & Kok (2003). De resultaten zijn ook in lijn met een vergelijkbare vier jaar durende veldproef op zandgrond in Duitsland (Nedersaksen), waarin dierlijke mest is vergeleken met kunstmest op grasland, en een N-werkingscoëfficiënt van 55 tot 79% voor dierlijke mesten is vastgesteld (Kayser et al. 2015).

Tabel 4.1 Gemeten (resultaten veldproef) en berekende eerstejaars N-werkingscoëfficiënt van de drie dierlijke mestsoorten (gemiddelde van de jaren 2018 t/m 2020); de berekende werkingscoëfficiënt is conform de rekenregels in het bemestingsadvies (www.bemestingsadvies.nl).

Dierlijke mestsoort	Eerstejaars N-werkingscoëfficiënt	
	Gemeten	Berekend
DIG	0,55	0,50
RDM	0,57	0,51
VDM	0,73	0,72

Bij de gemeten werkingscoëfficiënten in de veldproef moeten wel de volgende kanttekeningen worden gemaakt.

- De N-werkingscoëfficiënt is berekend als quotiënt van de gemeten ANR en ANE van de dierlijke mest en de gemeten ANR en ANE van de kunstmest (gemiddelde van KAS en UREUM), beide bepaald bij een N-gift van 300 kg N per ha. Omdat de werkzame N-gift bij dierlijke mest lager is dan die bij kunstmest, bevinden de meetpunten bij dierlijke mest zich op een lager deel van de responscurve. Bij een niet-rechthoekig verband tussen de N-bemesting en de drogestof- en N-opbrengst zal de ANR en ANE afnemen bij een toenemende werkzame N-gift. Hierdoor wordt de uit de ANR en ANE afgeleide N-werkingscoëfficiënt mogelijk wat overschat. Dit aspect wordt ook genoemd door Westerik et al. (2023). Zij vonden in een pottenproef met wintertarwe dat de afgeleide N-werkingscoëfficiënt op basis van een gelijke N-gift van diverse organische producten gemiddeld 7% hoger was dan de afgeleide werkingscoëfficiënt op basis van gelijke N-opname. Het genoemde effect zal bij de ANE sterker spelen dan bij de ANR, omdat bij gras de respons van de N-opbrengst doorgaans eerder rechtlijniger is dan de respons van de drogestofopbrengst. Omdat in de veldproef maar één bemestingsniveau was opgenomen, kan niet worden nagegaan of er al dan niet sprake was van een rechtlijnig verband tot aan het niveau van 300 kg werkzame N per ha.
- Bij de VDM was in het jaar 2020 de N-gift duidelijk hoger dan de geplande 300 kg N per ha (Tabel 2.5). Hierdoor is de werkingscoëfficiënt mogelijk enigszins onderschat, omdat de ANR doorgaans afneemt bij hogere N-giften (zie ook punt hierboven).
- Zoals hierboven aangegeven is de werkingscoëfficiënt berekend als quotiënt van de gemeten ANR/ANE van de dierlijke mest en de gemeten ANR/ANE van de kunstmest. In 2018 was de voorgeschiedenis van zowel de kunstmest- als de dierlijke mestobjecten identiek, terwijl dat in 2019 en 2020 niet meer het geval was. In die jaren waren de kunstmestobjecten ook het jaar ervoor met kunstmest bemest, terwijl de dierlijke mestobjecten met dierlijke mest waren bemest. Dit is inherent aan de proefopzet, maar mogelijk wordt werkingscoëfficiënt van de dierlijke mesten hierdoor enigszins overschat.

In 2018 en 2020 was de N-werkingscoëfficiënt afgeleid op basis van de verschillen in ANE tussen dierlijke mest en kunstmest hoger dan die afgeleid op basis van de verschillen in ANR. Dit kan duiden op negatieve niet-N-effecten, bijvoorbeeld door schade bij de mesttoediening. Het verschil trad vooral op in de droge jaren 2018 en 2020 en mogelijk zijn dan de risico's op schade groter (o.a. verbranding), anderzijds is er in natte jaren meer risico van schade door insporing.

Ook als rekening wordt gehouden met de nawerking is de N-terugwinning van dierlijke mest-N lager dan die van kunstmest-N. Dit zal mede veroorzaakt zijn door een hogere emissie van $\text{NH}_3\text{-N}$ in de dierlijke mest t.o.v. de $\text{NH}_3\text{-N}$ aanwezig in kunstmest. Daarnaast zal meespelen dat de beperkte duur van de experimentele periode het alleen mogelijk maakte om de nawerking in de eerste 2-4 jaar na de toediening te meten. Uit modelberekeningen blijkt dat de nawerking een veel langere periode beslaat (Schröder et al., 2007b) dan de duur van ons experiment. De lagere N-terugwinning bij dierlijke mest t.o.v. kunstmest-N kan daarom ook deels een gevolg zijn van een onvolledige meting van de nawerking van de dierlijke mestsoorten. Indien uitgegaan wordt van een $\text{NH}_3\text{-N}$ -aandeel in de totale N van circa 50% in rundveedrijfmest, een gemiddelde NH_3 -emissie van 17% en dat 75% van de gemineraliseerde N vrijkomt in de periode dat het gras actief N opneemt (Schröder et al., 2007a), zal op termijn in een evenwichtssituatie de werkingscoëfficiënt stijgen naar circa 80%. Uitgaande van een $\text{NH}_3\text{-N}$ -aandeel van circa 50% in rundveedrijfmest, zou dit betekenen dat van het niet werkzame deel van de N in de mest (20%) circa 10% een gevolg zou kunnen zijn van verliezen door uitspoeling en denitrificatie.

N-verliezen

Zowel in de veldproef als in de potproef zijn in het algemeen geen duidelijke verschillen in nitraatuitspoeling gevonden tussen kunstmest en dierlijke mest. Bij de veldproef was alleen bij de vroeg toegediende KAS in 2018 het nitraatgehalte in het bovenste grondwater significant hoger dan bij de dierlijke mestsoorten RDM en VDM. Bij UREUM was er bij de vroege toediening geen verschil met de dierlijke mestsoorten en ook in de andere jaren was er geen verschil in nitraatgehalte tussen kunstmest en dierlijke mest. Ondanks de hogere werkzame N-aanvoer bij kunstmest heeft dit niet geleid tot meer uitspoeling.

In de veldproef werd in twee van de drie jaar dat er is bemest bij de dierlijke mestobjecten wel een hogere hoeveelheid minerale bodem-N in het najaar gevonden in vergelijking met de kunstmestobjecten, maar dit resulteerde in die jaren niet in hogere nitraatconcentraties. De verschillen in hoeveelheid minerale bodem-N waren echter relatief klein en een deel ervan kan in de late herfst- en winterperiode mogelijk nog door het

gras zijn opgenomen. De winters waren alle warmer dan normaal met weinig tot geen langdurige vorstperiodes, waardoor het gras relatief vitaal bleef. Relatief lage hoeveelheden minerale bodem-N in de herfst bij maaigrasland werd ook gevonden door Ten Berge et al. (2002), waarbij pas vanaf een bemestingsniveau van boven 300-440 kg werkzame N per ha de minerale bodem-N steeg.

Eén van de factoren die een rol kan spelen bij verschillen in uitspoeling tussen kunstmest en dierlijke mest is het neerslagpatroon vlak na de bemesting. Met name bij forse hoeveelheden neerslag na de bemesting zou dit kunnen leiden tot meer uitspoeling van de kunstmest-N die in geval van KAS deels in de vorm van het makkelijk uitspoelbare nitraat aanwezig was. Eerdere berekeningen hebben laten zien dat de kans op dit soort situaties (30-40 mm in korte tijd vlak na de bemesting) niet groot is (CDM, 2017). In onze veldproef waren er twee momenten dat er binnen 10 dagen na de bemesting relatief veel neerslag viel (35-50 mm): na de vroege bemesting van de eerste snede in 2018 en na de bemesting van de derde snede in 2020 (Figuur 2.1B). Het wat hogere nitraatgehalte en de lagere ANR bij de vroege bemesting met KAS in 2018 zou kunnen samenhangen met de neerslag na de eerste bemesting. In 2020 was er echter geen verschil in nitraatgehalte tussen KAS en dierlijke mest. In geval van tussentijdse uitspoeling zou mogen worden verwacht dat de ureummeststof met ureaseremmer dan minder uitspoeling zou moeten geven dan KAS. Bij de vroege toediening in 2018 was het nitraatgehalte bij de bemesting met UREUM wel wat lager dan dat bij KAS, maar het verschil was niet significant. In 2020 was er geen verschil in gemeten nitraatgehalte tussen KAS en UREUM. Opvallend hierbij was dat de N-benutting van UREUM in 2020 lager was dan van KAS en dat dat effect optrad in de derde en vierde snede, nadat er na de bemesting van de derde snede relatief veel neerslag is gevallen (Figuur 2.1B). Verwacht zou worden dat onder die omstandigheden de UREUM beter zou presteren dan KAS. Mogelijk dat ammoniakemissie uit de UREUM een rol heeft gespeeld bij de lagere benutting, hoewel de meststof wel een ureaseremmer bevatte.

Het object met de vroeg toegediende KAS in 2018 was de enige situatie dat het nitraatgehalte bij kunstmest significant hoger was dan bij dierlijke mest. Hierbij moet worden benadrukt dat het bemestingsadvies aangeeft bij de eerste snede bij kunstmest uit te gaan van meststoffen met 75-100% ammonium en in dat geval geen KAS te gebruiken. Tenslotte moet in het achterhoofd worden gehouden dat wat betreft de verschillen uitspoelingsgevoeligheid tussen ammonium en nitraat, bij N-bemestingen in het late voorjaar en zomer door de hogere bodemtemperaturen de ammonium-N in de mest en UREUM relatief snel wordt omgezet in nitraat-N.

Zoals hierboven ook al aangegeven is de voorgeschiedenis van de kunstmestobjecten bij de bemesting in 2019 en 2020 anders dan bij dierlijke mestobjecten. Bij de kunstmestobjecten was bij de toediening in 2019 ook in 2018 al alleen met kunstmest bemest en bij de toediening in 2020 was er ook in 2018 en 2019 alleen met kunstmest bemest. Bij de dierlijke mest is er tot aan het stoppen van de bemesting altijd ook de voorgaande jaren dierlijke mest toegediend. Dit verschil in dierlijke mesthistorie kan ook deels de gevonden verschillen in minerale bodem-N in de herfst hebben veroorzaakt, namelijk meer minerale bodem-N bij de objecten met dierlijke mest. Het feit dat het verschil waargenomen werd in het tweede en derde jaar (2019 en 2020) en niet in het eerste jaar met gelijke bemestingshistorie (2018) kan hiervoor een aanwijzing zijn.

Bij de nitraatmetingen in de veldproef moeten de volgende kanttekeningen worden gemaakt. Zoals eerder aangegeven waren de veldjes smal (3 m) en lieten modelberekeningen zien dat niet kan worden uitgesloten dat er onderlinge beïnvloeding via laterale grondwaterstroming kan hebben plaatsgevonden met name bij de metingen in het voorjaar. Verder waren de gemeten nitraatconcentraties relatief laag (10-30 mg per liter), waardoor het vanwege de variatie lastiger is om eventuele verschillen in nitraatuitspoeling aan te tonen.

Het gebruik van dierlijke mest in plaats van kunstmest kan ook van invloed zijn op de verliezen als gevolg van denitrificatie. De laatste kunnen voor dierlijke mest mogelijk hoger zijn vanwege het extra aanbod van afbreekbare organische stof in de mest. Als indicator hiervoor is in de potproef de lachgasemissie gemeten. Hieruit bleek dat er met name bij drijfmest bij een aantal geteste grondsoorten de emissie hoger was dan bij KAS-kunstmest. Het verschil in N₂O-N-emissie tussen de drijfmest en KAS bedroeg in de potproef maximaal 0,7% van de toegediende N. Bij een verhouding N₂O en N₂ van 1:5 en 1:10 zou dit een gasvormig verlies (N₂O+N₂) van maximaal globaal 4-8% van de toegediende N betekenen.

Uit de metingen van de potentiële denitrificatie in grond uit de bovengrond van grasland en bouwland kwamen echter geen duidelijke verschillen tussen grond van objecten bemest met kunstmest en grond van objecten bemest met dierlijke mest naar voren. Alleen bij ondergrond van grasland (met weinig organische stof) werd bij objecten bemest met digestaat en de vloeibare fractie van het digestaat (maar niet voor de drijfmest) een hogere potentiële denitrificatie gevonden dan voor grond uit objecten bemest met kunstmest.

Bij de kunstmest ammoniumsulfaat werd een aantal keren ook een hogere lachgasemissie waargenomen. Mogelijk dat nitrificatie van ammonium, waarbij ook lachgas vrijkomt, hierbij een rol kan hebben gespeeld.

De resultaten van ons onderzoek zijn in lijn met eerder onderzoek van Schröder et al. (2010), waarin op maaigrasland een N-bemesting met alleen kunstmest vergeleken is met een N-bemesting met verschillende combinaties van dierlijke mest en kunstmest bij een vergelijkbare aanvoer van werkzame N van 300-340 kg N per ha. Er werden geen duidelijke verschillen in nitraatuitspoeling waargenomen. In onze proef was de hoeveelheid werkzame N bij de kunstmestobjecten hoger dan bij de dierlijke mestobjecten. Zoals aangegeven leidde dit in het algemeen niet tot meer uitspoeling. Blijkbaar is het gewas goed in staat geweest de grotere hoeveelheid werkzame N op te nemen.

In recente experimenten met gemaaid grasland vergeleek De Boer et al. (2022) een 100% KAS-bemesting met een combinatie van rundveedrijfmest en KAS, beide met een jaarlijkse hoeveelheid van circa 320 kg werkzame N per ha. In twee van de drie experimenten was de gemeten nitraatconcentratie in het bovenste grondwater in de winterperiode onder het KAS-object significant hoger dan onder de objecten met de gecombineerde dierlijke mest-KAS-bemesting. Hierbij verschilde bij één van deze twee experimenten het nitraatgehalte bij de controle niet met die van het object bemest met een combinatie van dierlijke mest en kunstmest. Verder was in het onderzoek van De Boer et al. (2022) de drogestofproductie en de N-opname bij de KAS-behandeling vergelijkbaar of hoger dan bij de behandeling met een combinatie van dierlijke mest en kunstmest. Indien het hogere uitspoelingsrisico van nitraathoudende kunstmest-N gedurende het groeiseizoen een rol zou hebben gespeeld, dan zou juist een lagere productie en N-opname bij de variant met alleen kunstmest zijn verwacht. Mogelijk heeft ook de hogere ammoniakemissie en/of hogere denitrificatie bij de combinatie van dierlijke mest en KAS een rol gespeeld bij de gevonden verschillen in nitraatgehalte. Een verschil tussen beide proeven is dat in onze veldproef de bemesting al is gestopt na de derde snede. Dat betekent dat de laatste bemesting in de laatste twee decades van juni heeft plaats gevonden, terwijl in het onderzoek van De Boer et al. (2022) er tot en met de vierde snede dierlijke mest is toegediend en bij kunstmest soms tot en met de vijfde snede. In de praktijk zal vaak ook wel na de derde snede worden bemest. Anderzijds zal er door de afschaffing van de derogatie minder dierlijke mest op grasland worden toegediend en zal deze naar verwachting vooral in de eerste twee sneden worden toegediend.

Bij het onderzoek van zowel Schröder et al. (2010) als De Boer et al. (2022) kon slechts zeer beperkt rekening worden gehouden met de langetermijneffecten van toegepaste mest-N, omdat de proefduur 1-2 jaar bedroeg. Ook in onze proef was de periode waarover de nawerking kon worden meegenomen echter relatief kort (maximaal 4 jaar).

Zoals reeds genoemd in de inleiding worden in de literatuur wisselende effecten genoemd wat betreft de N-uitspoeling bij gebruik van dierlijke mest en kunstmest. Diverse factoren kunnen hierop van invloed zijn, zoals weersomstandigheden, grondsoort, hydrologische omstandigheden en het gewasmanagement. Omdat maaigrasland efficiënt beschikbare N opneemt (relatief hoge opname-efficiëntie en lang groeiseizoen) en gedurende de winter als vanggewas fungeert, is de verwachting dat de verschillen in uitspoelingsverliezen tussen dierlijke mest-N en kunstmest-N niet groot zullen zijn.

4.2 Conclusies

Uit de resultaten blijkt dat in het jaar van toediening de N-benutting (ANR) van kunstmest-N hoger is dan die van dierlijke mest-N. Dit was het geval in zowel de veld- als de potproef. In de veldproef is voor dierlijke mest-N in latere jaren een nawerking waargenomen, maar ook wanneer deze nawerking wordt meegenomen, is de totale N-benutting lager voor dierlijke mest-N dan voor kunstmest-N. Binnen de dierlijke mestsoorten was in het algemeen de N-benutting van VDM hoger dan die van RDM en DIG.

In twee van de drie jaar was in het jaar van toediening de hoeveelheid minerale bodem-N in het najaar bij de objecten met dierlijke mest hoger dan bij de kunstmestobjecten. In de jaren nadat de bemesting was gestopt, zijn er geen verschillen waargenomen tussen kunstmest- en de dierlijke mestobjecten.

Bij de nitraatconcentratie in het grondwater zijn er gemiddeld geen duidelijke verschillen waargenomen tussen de kunstmest- en dierlijke mestobjecten, noch in het jaar van toediening, noch in de jaren nadat de bemesting is gestopt. Alleen bij de vroeg toegediende KAS in 2018 was het nitraatgehalte in het bovenste

grondwater significant hoger dan bij de dierlijke mestsoorten RDM en VDM. Ook in de pottenproef werden geen duidelijke verschillen in uitspoeling tussen kunstmest-N en dierlijke mest-N waargenomen.

Bij de lachgasemissies (gemeten in de pottenproef) werden vooral bij dunne mestproducten (vooral drijfmest) hogere emissies gevonden dan bij de veel gebruikte kunstmest KAS en de onbemeste controle. Bij de vaste mestproducten werden geen verschillen in lachgasemissies waargenomen met de controle.

Bij één van de drie geteste bodems in de pottenproef (graslandondergrond) was de potentieële denitrificatie bij digestaat en dunne fractie (maar net bij rundveedrijfmest) hoger dan bij de controle en de kunstmeststoffen. De mineralisatie incubatieproef liet zien dat er alleen bij de vloeibare mestproducten sprake was van een toename van de minerale N, bij de vaste producten was dit niet het geval.

Referenties

- Bijay-Sing, J.C., Ryden, J.C., & Whitehead, D.C., 1988. Some relationships between denitrification potential and fractions of organic carbon in air-dried and field-moist soils. *Soil Biology and Biochemistry* 20, 737-741.
- CDM, 2017. Advies "Nitraatverliezen op grasland en maisland bij gebruik van kunstmest en runderdrijfmest".
- De Goffau, A., G.J. Doornewaard & B. Fraters, 2012. Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid. Resultaten 2007 en 2008. RIVM Rapport 680717031/2012.
- De Vos, J. A., and F. B. T. Assinck, 2004. *Nitraatuitspoeling Vredepeel 2002-2003*. Telen met Toekomst, No. OV0406. Plant Research International.
- De Boer, H.C., 2017. Nitrate leaching from liquid cattle manure compared to synthetic fertilizer applied to grassland or silage maize in the Netherlands. Wageningen Livestock Research, report 1055, 28 pp.
- De Boer, H.C, M. van Mullekom, J. van Doorn, A.J.P. Smolders, 2022. Nitraatuitspoeling uit gemaaid grasland op uitspoelingsgevoelige zandgrond: Effecten van strooien van zeoliet en vervanging van kunstmest KAS door rundveedrijfmest. Wageningen Livestock Research, rapport 1394, 52 pp.
- Edmeades D.C., 2003. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66: 165-180.
- Egene, C. E., Sigurnjak, I., Regelink, I. C., Schoumans, O. F., Adani, F., Michels, E. & Meers, E. (2021). Solid fraction of separated digestate as soil improver: implications for soil fertility and carbon sequestration. *Journal of Soils and Sediments*, 21(2), 678-688.
- Haan, J.J., M. Wesselink, W. van Dijk, H.A.G. Verstegen, W.C.A van Geel, W. van de Berg. 2017. Bodemkwaliteit op zand. Resultaten van het effect van organisch stofbeheer op bodemkwaliteit en ecosysteemdiensten in de gangbare bedrijfssytemen in de periode 2011-2016. Wageningen Research. Rapport WPR-754.
- Hijbeek, R., M.K. van Ittersum, H.F.M. ten Berge, G. Gort, H. Spiegel & A.P. Whitmore, 2017. Do organic inputs matter – a meta-analysis of additional yield effects for arable crops in Europe. *Plant & Soil* 411:293-303.
- Jarvis S.C., Sherwood J., & Steenvoorden J.H.A.M., 1987. Nitrogen losses from animal manures: from grazed pastures and from applied slurry. In: Van der Meer HG, Unwin RJ, Van Dijk TA, Ennik GC (eds) *Animal manure on grassland and fodder crops. Fertilizer or waste?* Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, the Netherlands, pp. 196-212.
- Kayser, M., Breitsameter, L., Benke, M., & Isselstein, J., 2015. Nitrate leaching is not controlled by the slurry application technique in productive grassland on organic-sandy soil. *Agronomy for sustainable development*, 35, 213-223.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I. and Van Walsum, P.E.V., 2017. *SWAP version 4* (No. 2780). Wageningen Environmental Research.
- Lazicki, P., Geisseler, D., & Lloyd, M., 2020. Nitrogen mineralization from organic amendments is variable but predictable. *Journal Environ. Quality* 49 (2) 483-495.
- Müller, Christoph, Ronald J. Laughlin, Peter Christie & Catherine J. Watson, 2011. Effects of repeated fertilizer and cattle slurry applications over 38 years on N dynamics in a temperate grassland soi. *Soil Biology & Biochemistry* 43, 1362-1371.
- Novozamsky, I., Houba, V.J.G., Van Eck, R., & Van Vark, W., 1983. A novel digestion technique for multi-element plant analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 14(3), 239-248.
- O'Callaghan J.R. & T.H. Flowers, 1981. Nutrient uptake from pig slurry by a grass crop. In: Brogan JC (ed) *Nitrogen losses and surface run-off from landspreading of manures*. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, the Hague/Boston/London, pp. 167-177.
- Oenema, Oene, Hans Kros, and Wim de Vries. "Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies." *European Journal of Agronomy* 20.1-2 (2003): 3-16.
- R Core Team, 2023. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [b](https://www.R-project.org/).

-
- Schils, R.L.M. & Kok, I., 2003. Effects of cattle slurry manure management on grass yield. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 51,41–65.
- Schils, R.L.M., J.J. Schröder & G.L. Velthof, 2010. Fertilizer replacement value: linking organic residues to mineral fertilizers. In *Biorefinery of inorganics* (Ed E. Meers, G.L. Velthof, E. Michels, R. Rietra): recovering mineral nutrients from biomass and organic waste,191-214.
- Schröder, J.J., H.F.M. Aarts, J.C. van Middelkoop, R.L.M. Schils, G.L. Velthof, B. Fraters & W.J. Willems, 2007a. Permissible manure and fertilizer use in dairy farming systems on sandy soils in The Netherlands to comply with the Nitrates Directive target. *European Journal of Agronomy* 27, 102-114.
- Schröder, J.J., Uenk, D. & Hilhorst, G.J., 2007b. Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland. *Plant and Soil*, 299,83–99.
- Schröder, J.J., F.B.T. Assinck, D. Uenk & G.L. Velthof, 2010. Nitrate leaching from cut grassland as affected by the substitution of slurry with nitrogen mineral fertilizer on two soil types. *Grass and Forage Science* 65, Issue 1, 49-57.
- Sörensen, P., 2004. Immobilisation, re-mineralization and residual effects in subsequent crops of dairy cattle slurry nitrogen compared to mineral fertilizer nitrogen. *Plant and Soil* 267, 285-296.
- Ten Berge, HFM, van der Meer HG, Carlier L, Baan Hofman T & Neeteson JJ (2002). Limits to nitrogen use on grassland. *Environmental Pollution* 118, 225–238
- Van Bruggen, C., A. Bannink, A. Bleeker, D.W. Bussink, H.J.C. van Dooren, C.M. Groenestein, J.F.M. Huijsmans, J. Kros, L.A. Lagerwerf, K. Oltmer, M.B.H. Ros, M.W. van Schijndel, L. Schulte-Uebbing, G.L. Velthof en T. van der Zee, 2023. Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2021. Wageningen, The Statutory Research Tasks Unit for Nature and the Environment (WOT Natuur & Milieu), WOT-technical report 242.
- Van Groenigen, J.W, Velthof, G.L., Oenema, O., Van Groenigen, K.J., & Van Kessel, C., 2010. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. *European Journal of Soil Science*, 61(6): 903-913, DOI: 10.1111/j.1365-2389.2009.01217.x.
- Velthof, G.L., Oenema, O., & Nelemans, J.A., 2001. Vergelijking van indicatoren voor stikstof mineralisatie in bouwland. *Meststoffen 2000*, 45-52.
- Velthof, G.J. & R.M.J.J. Rietra, 2018. Nitrous oxide emission from agricultural soils. WEnR report 2921, Wageningen UR, Wageningen, 57 pp.
- Webb, J., P. Sörensen, G. Velthof, B. Amon, M. Pinto, L. Rodhe, E. Salomon, N. Hutchings, P. Burczyk & J. Reid, 2013. An assessment of the variation of manure nitrogen efficiency throughout Europe and an appraisal of means to increase manure-N efficiency. *Advances in Agronomy*, 119: 371-442.
- Westerik, D., E. Hoffland & R. Hijbeek, 2023. Nitrogen fertiliser replacement values of organic amendments: determination and prediction. *Nutr Cycl in Agroecosyst*. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10316-7>.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte, 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 153.
- Zaman, M., M.L. Nguyen, M. Šimek, S. Nawaz, M.J. Khan, M.N. Babar & S. Zaman, 2012. Emissions of Nitrous Oxide (N₂O) and Di-Nitrogen (N₂) from the Agricultural Landscapes, Sources, Sinks, and Factors Affecting N₂O and N₂ Ratios. In: Guoxiang Liu (Ed.) *Greenhouse Gases – Emission, Measurement and Management*. INTECH, <http://www.intechopen.com/books/greenhousegases>, pp. 3-24.

Websites

www.bemestingsadvies.nl, geraadpleegd in maart 2024

www.knmi.nl, geraadpleegd in mei 2022

Bijlage 1 Proefveldschema veldexperiment

MESTSOORTEN EN UITSPOELING 2018-2021

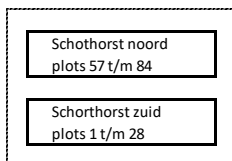
locatie: Bennekom

Contact: W. de Visser 0317-480553

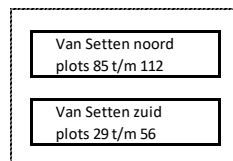
UREv ureum, vroeg
 UREn ureum, normaal tijdstip
 KASv KAS, vroeg
 KASn KAS, normaal tijdstip
 DIG digestaat
 VDM varkensdrijfmest
 RDM runderdrijfmest

0j geen mest vanaf 2018
 1j geen mest vanaf 2019
 2j geen mest vanaf 2020
 3j geen mest vanaf 2021

Perceel Schothorst



Perceel Van Setten



Perceel Schothorst

zuid		noord	
1	UREv 0j	57	KASv 3j
2	UREv 2j	58	KASv 0j
3	UREv 3j	59	KASv 2j
4	UREv 1j	60	KASv 1j
5	VDM 1j	61	DIG 3j
6	VDM 3j	62	DIG 2j
7	VDM 0j	63	DIG 1j
8	VDM 2j	64	DIG 0j
9	UREn 0j	65	UREn 1j
10	UREn 2j	66	UREn 3j
11	UREn 3j	67	UREn 0j
12	UREn 1j	68	UREn 2j
13	KASn 2j	69	RDM 1j
14	KASn 0j	70	RDM 2j
15	KASn 1j	71	RDM 0j
16	KASn 3j	72	RDM 3j
17	DIG 3j	73	UREv 0j
18	DIG 1j	74	UREv 3j
19	DIG 0j	75	UREv 2j
20	DIG 2j	76	UREv 1j
21	RDM 0j	77	VDM 1j
22	RDM 1j	78	VDM 3j
23	RDM 3j	79	VDM 2j
24	RDM 2j	80	VDM 0j
25	KASv 3j	81	KASn 1j
26	KASv 1j	82	KASn 2j
27	KASv 2j	83	KASn 3j
28	KASv 0j	84	KASn 0j

Perceel Van Setten

zuid		noord	
29	KASn 1j	85	DIG 0j
30	KASn 2j	86	DIG 2j
31	KASn 0j	87	DIG 1j
32	KASn 3j	88	DIG 3j
33	UREv 1j	89	KASv 2j
34	UREv 0j	90	KASv 1j
35	UREv 3j	91	KASv 3j
36	UREv 2j	92	KASv 0j
37	DIG 0j	93	KASn 2j
38	DIG 3j	94	KASn 1j
39	DIG 2j	95	KASn 3j
40	DIG 1j	96	KASn 0j
41	UREn 1j	97	RDM 0j
42	UREn 2j	98	RDM 1j
43	UREn 0j	99	RDM 2j
44	UREn 3j	100	RDM 3j
45	VDM 3j	101	VDM 1j
46	VDM 0j	102	VDM 0j
47	VDM 2j	103	VDM 2j
48	VDM 1j	104	VDM 3j
49	KASv 3j	105	UREv 2j
50	KASv 2j	106	UREv 1j
51	KASv 1j	107	UREv 3j
52	KASv 0j	108	UREv 0j
53	RDM 0j	109	UREn 3j
54	RDM 2j	110	UREn 0j
55	RDM 1j	111	UREn 1j
56	RDM 3j	112	UREn 2j

Bijlage 2 Tijdstippen bemesting en oogst van het gras

Jaar	Snedes	Tijdstip bemesting		Tijdstip grasoogst
		Kunstmest	Dierlijke mest	
2018	1	23 maart en 13 april	26 maart	7 mei
	2	14 mei	16 mei	5 juni
	3	11 juni	12 juni	14 augustus
	4			11 september
	5			2 november
2019	1	27 maart	28 maart	30 april
	2	8 mei	6 mei	17 juni
	3	19 juni	19 juni	27 augustus
	4			28 oktober
2020	1	27 maart	25 maart	12 mei
	2	15 mei	15 mei	26 juni
	3	29 juni	29 juni	29 juli
	4			13 oktober
2021	1			7 juni
	2			21 juli
	3			17 september

Bijlage 3 Berekening optreden horizontaal transport van grondwater

De veldjes van de veldproef hadden een lengte van 10 meter en een breedte van 3 meter, met de lange zijden naast elkaar (zie Bijlage 1). Voor de nitraatbemonstering is op elk veldje een boorgat gemaakt in het midden van de korte zijde net binnen het veldje, stroomafwaarts van de plot. De afstand tussen de boorgaten was slechts 3 meter en de afstand van een boorgat tot een ander veldje was dus slechts 1,5 meter. Er was geen braakliggende strook tussen de veldjes. Afhankelijk van de horizontale grondwaterstroming op de diepte van het boorgat (<1,5 m) is het mogelijk dat het grondwater wordt beïnvloed door dat van een aangrenzend veldje.

Vanwege de aanwezigheid van een drainerende sloot ten noorden en ten zuiden van het veld, werd aangenomen dat de horizontale flux in het veld laag was aangezien de horizontale stroming per definitie nul is op de waterscheiding. Van deze locatie zijn geen laterale grondwatersnelheden bekend. De snelheid is afhankelijk van het hoogterelief in het grondwater, de doorlatendheid (K), de porositeit (θ) en is afhankelijk van de meest doorlatende lagen (Van Beek et al., 2007). Op basis van de Wet van Darcy kan de horizontale grondwatersnelheid (V in m per dag) worden geschat met K , de helling (dh/dl) en de porositeit (-): $V = K \theta^{-1} dh/dl$. Uitgaande van een horizontale hydraulische geleidbaarheid (K) van 3 m per dag (Van Beek et al., 2007) en een porositeit van 0,38 (-). De ligging van de percelen ten opzichte van de sloten en ten opzichte van de waterscheiding zijn bepaald met behulp van een waterpas en een lengtemeting.

Het veld had de laagste grondwaterstand in het noordwesten (RD 172969 446653 11,07 m boven NAP), en de hoogste grondwaterstand in het zuidoosten (RD 173147 446649; 11,54 m boven NAP). Op basis van continue grondwaterstandmetingen met behulp van de divers werd een verschil van 40 cm in grondwaterstand over 180 m vastgesteld. Het gemiddelde grondwaterhoogteverschil tussen de noord- en zuidboorgaten was 5 cm over een afstand van 28 meter, terwijl het gemiddelde grondwaterverschil tussen het westen en oosten 35 cm bedroeg over een afstand van 170 m. Uit deze gegevens werd een horizontale stroming van oost naar west berekend vanuit de helling (dh/dl) van het grondwater is $0,35 \text{ m} / 170 \text{ m} = 0,0020$. Tussen oost en west en voor zuid naar noord wordt een horizontale grondwatersnelheid van $3 / 0,3 \times 0,0020$ ofwel 2 cm per dag berekend (helling: $0,03 \text{ m} / 28 \text{ m} = 0,018$). Voor een periode van 100 dagen, ongeveer de periode dat er grondwater op bemonsteringshoogte staat, tussen december en maart, is dat 2 meter. Aangezien de afstand tussen het boorgat en het aangrenzende perceel 1,5 m bedraagt, wordt het grondwatermonster in maart enigszins beïnvloed door het aangrenzende perceel.

Bijlage 4 Drogestofopbrengst gras (kg per ha)

Jaar	Kunstmest/dierlijke mestsoort	Jaar van bemesting	Drogestofopbrengst (kg per ha)				
			1 st -snede	2 ^e -snede	3 ^e -snede	4 ^e -snede	Totaal
2018	Controle ¹	Geen	2,48	1,49	1,72	0,76	6,46
	KAS, vroeg	2018	4,88	2,55	2,39	1,28	11,10
	KAS, laat	2018	4,16	3,24	2,50	1,30	11,20
	UREUM, vroeg	2018	5,00	2,64	2,48	1,32	11,44
	UREUM, laat	2018	4,24	3,14	2,56	1,09	11,03
	DIG	2018	4,15	2,17	2,30	1,12	9,74
	RDM	2018	4,08	2,05	2,17	1,06	9,35
	VDM	2018	4,67	2,19	2,35	1,03	10,24
2019	Controle ¹	Geen	1,10	2,11	1,17	0,60	4,97
	KAS	2018	1,29	2,37	1,11	0,46	5,23
	UREUM	2018	1,33	2,89	1,29	0,51	6,03
	DIG	2018	1,36	2,43	1,22	0,58	5,59
	RDM	2018	1,57	2,24	1,39	0,67	5,87
	VDM	2018	1,69	2,56	1,38	0,53	6,16
	KAS	2018, 2019	3,87	5,62	2,39	0,99	12,86
	UREUM	2018, 2019	3,74	5,70	2,83	1,04	13,31
	DIG	2018, 2019	2,87	5,20	2,28	1,24	11,59
	RDM	2018, 2019	2,72	4,55	2,40	1,49	11,17
	VDM	2018, 2019	2,85	5,30	2,68	1,33	12,16
2020	Controle ¹	Geen	1,54	0,74	0,55	0,76	3,59
	KAS	2018	1,46	0,71	0,51	0,80	3,48
	UREUM	2018	1,64	0,82	0,54	0,83	3,83
	DIG	2018	1,34	0,81	0,59	0,73	3,47
	RDM	2018	1,77	0,82	0,68	0,81	4,08
	VDM	2018	1,80	0,77	0,50	0,78	3,85
	KAS	2018, 2019	1,48	0,67	0,53	0,66	3,33
	UREUM	2018, 2019	1,67	0,89	0,53	0,72	3,82
	DIG	2018, 2019	2,39	1,04	0,73	0,99	5,16
	RDM	2018, 2019	2,19	0,86	0,59	0,72	4,36
	VDM	2018, 2019	2,32	0,98	0,60	0,78	4,68
	KAS	2018, 2019, 2020	4,43	2,62	2,13	1,39	10,58
	UREUM	2018, 2019, 2020	4,28	2,83	2,07	1,17	10,36
	DIG	2018, 2019, 2020	3,92	1,88	1,84	1,32	8,97
	RDM	2018, 2019, 2020	3,68	1,90	1,82	1,47	8,87
	VDM	2018, 2019, 2020	4,06	2,95	1,99	1,85	10,86

Jaar	Kunstmest/dierlijke mestsoort	Jaar van bemesting	Drogestofopbrengst (kg per ha)				
			1 st -snede	2 ^e -snede	3 ^e -snede	4 ^e -snede	Totaal
2021	Controle ¹	Geen	3,14	2,00	2,04		7,18
	KAS	2018	3,17	1,84	2,03		7,04
	UREUM	2018	3,57	2,21	2,26		8,04
	DIG	2018	2,92	1,71	2,02		6,65
	RDM	2018	3,16	1,85	2,01		7,02
	VDM	2018	3,59	2,26	2,32		8,18
	KAS	2018, 2019	2,68	1,69	1,90		6,28
	UREUM	2018, 2019	2,90	2,11	2,11		7,11
	DIG	2018, 2019	3,64	2,06	2,08		7,79
	RDM	2018, 2019	3,18	1,85	1,98		7,01
	VDM	2018, 2019	3,58	1,99	1,99		7,56
	KAS	2018, 2019, 2020	4,00	1,92	1,79		7,71
	UREUM	2018, 2019, 2020	3,56	1,97	1,99		7,51
	DIG	2018, 2019, 2020	4,62	2,16	2,29		9,07
	RDM	2018, 2019, 2020	5,33	2,14	2,30		9,77
	VDM	2018, 2019, 2020	5,46	2,20	2,40		10,06

¹ Gemiddelde van alle controle-objecten (elke meststof had zijn eigen controle).

Bijlage 5 N-opbrengst gras (kg per ha)

Jaar	Kunstmest/dierlijke mestsoort	Jaar van bemesting	N-opbrengst (kg per ha)				
			1 st -snede	2 ^e -snede	3 ^e -snede	4 ^e -snede	Totaal
2018	Controle ¹	No	42	34	48	19	144
	KAS, vroeg	2018	127	113	86	35	362
	KAS, laat	2018	132	136	90	34	392
	UREUM, vroeg	2018	142	112	89	36	379
	UREUM, laat	2018	136	128	84	30	378
	DIG	2018	101	71	68	29	270
	RDM	2018	91	65	66	29	251
	VDM	2018	121	81	74	28	303
2019	Controle ¹	No	22	31	27	20	100
	KAS	2018	27	34	24	16	100
	UREUM	2018	31	47	28	17	122
	DIG	2018	29	40	29	20	118
	RDM	2018	33	31	33	23	120
	VDM	2018	38	38	30	19	125
	KAS	2018, 2019	119	118	59	34	331
	UREUM	2018, 2019	122	118	67	36	343
	DIG	2018, 2019	82	101	65	45	293
	RDM	2018, 2019	74	83	66	53	276
	VDM	2018, 2019	91	106	75	49	321
	2020	Controle ¹	No	30	18	13	22
KAS		2018	29	17	12	23	82
UREUM		2018	30	19	13	23	85
DIG		2018	29	20	14	24	88
RDM		2018	34	19	17	23	93
VDM		2018	33	18	12	22	85
KAS		2018, 2019	30	16	13	19	79
UREUM		2018, 2019	34	21	12	21	89
DIG		2018, 2019	48	25	20	29	123
RDM		2018, 2019	43	20	14	22	98
VDM		2018, 2019	53	23	14	22	112
KAS		2018, 2019, 2020	122	84	76	45	327
UREUM		2018, 2019, 2020	121	83	63	36	304
DIG		2018, 2019, 2020	91	48	47	39	224
RDM		2018, 2019, 2020	84	49	47	47	226
VDM		2018, 2019, 2020	106	87	67	61	322

Jaar	Kunstmest/dierlijke mestsoort	Jaar van bemesting	N-opbrengst (kg per ha)				
			1 st -snede	2 ^e -snede	3 ^e -snede	4 ^e -snede	Totaal
2021	Controle ¹	No	52	44	50		146
	KAS	2018	50	40	49		139
	UREUM	2018	58	49	58		165
	DIG	2018	45	41	51		138
	RDM	2018	51	40	51		142
	VDM	2018	63	53	64		179
	KAS	2018, 2019	45	38	47		130
	UREUM	2018, 2019	52	47	57		157
	DIG	2018, 2019	61	48	57		166
	RDM	2018, 2019	54	41	51		146
	VDM	2018, 2019	51	46	55		152
	KAS	2018, 2019, 2020	62	40	45		147
	UREUM	2018, 2019, 2020	53	42	50		145
	DIG	2018, 2019, 2020	65	49	58		173
	RDM	2018, 2019, 2020	72	47	62		181
	VDM	2018, 2019, 2020	83	48	64		195

¹ Gemiddelde van alle controle-objecten (elke meststof had zijn eigen controle).

Bijlage 6 Minerale bodem-N in het voorjaar (kg per ha)

Year	Kunstmest/dierlijke mest	Jaar van bemesting	Bodemlaag (cm -mv)		
			0-30	30-60	0-60
2019	Controle ¹	Geen	14	9	22
	KAS, vroeg	2018	11	7	18
	KAS, laat	2018	10	6	16
	UREUM, vroeg	2018	14	7	21
	UREUM, laat	2018	12	9	21
	DIG	2018	18	9	27
	RDM	2018	13	8	21
	VDM	2018	14	9	23
2020	Controle ¹	Geen	4	4	8
	KAS	2018	4	4	8
	UREUM	2018	4	5	8
	DIG	2018	5	5	10
	RDM	2018	2	6	8
	VDM	2018	3	3	6
	KAS	2018, 2019	3	4	7
	UREUM	2018, 2019	6	4	10
	DIG	2018, 2019	5	6	11
	RDM	2018, 2019	6	5	11
	VDM	2018, 2019	6	4	10

¹ gemiddelde van alle controle-objecten (elke meststof had zijn eigen controle).

Bijlage 7 Minerale bodem-N in de herfst (kg per ha)

Jaar	Kunstmest/dierlijke mest	Jaar van bemesting	Bodemlaag (cm -mv)			
			0-30	30-60	0-60	
2018	Controle ¹	Geen	9	3	12	
	KAS, vroeg	2018	10	7	17	
	KAS, laat	2018	7	7	14	
	UREUM, vroeg	2018	12	7	19	
	UREUM, laat	2018	9	6	15	
	DIG	2018	9	8	17	
	RDM	2018	9	8	17	
	VDM	2018	11	6	17	
2019	Controle ¹	Geen	8	6	14	
	KAS	2018	7	5	12	
	UREUM	2018	8	5	14	
	DIG	2018	8	7	15	
	RDM	2018	9	5	14	
	VDM	2018	9	5	14	
	KAS	2018, 2019	8	5	14	
	UREUM	2018, 2019	8	6	14	
	DIG	2018, 2019	12	10	22	
	RDM	2018, 2019	14	7	21	
	VDM	2018, 2019	11	8	18	
	2020	Controle ¹	Geen	12	8	20
		KAS	2018	16	6	22
UREUM		2018	13	8	21	
DIG		2018	11	11	22	
RDM		2018	10	8	18	
VDM		2018	12	9	21	
KAS		2018, 2019	11	7	18	
UREUM		2018, 2019	13	9	22	
DIG		2018, 2019	11	9	20	
RDM		2018, 2019	17	7	24	
VDM		2018, 2019	14	8	21	
KAS		2018, 2019, 2020	12	7	19	
UREUM		2018, 2019, 2020	12	9	20	
DIG		2018, 2019, 2020	16	11	26	
RDM		2018, 2019, 2020	16	10	26	
VDM		2018, 2019, 2020	19	13	32	

Jaar	Kunstmest/dierlijke mest	Jaar van bemesting	Bodemlaag (cm -mv)		
			0-30	30-60	0-60
2021	Controle ¹	Geen	20	12	32
	KAS	2018	20	11	30
	UREUM	2018	18	12	29
	DIG	2018	25	13	38
	RDM	2018	17	10	27
	VDM	2018	26	12	38
	KAS	2018, 2019	18	19	28
	UREUM	2018, 2019	27	10	38
	DIG	2018, 2019	23	16	39
	RDM	2018, 2019	25	10	34
	VDM	2018, 2019	26	9	35
	KAS	2018, 2019, 2020	16	9	25
	UREUM	2018, 2019, 2020	17	12	28
	DIG	2018, 2019, 2020	18	13	31
	RDM	2018, 2019, 2020	20	10	30
	VDM	2018, 2019, 2020	24	11	35

¹ gemiddelde van alle controle-objecten (elke meststof had zijn eigen controle).

Bijlage 8 Nitraatconcentratie in het bovenste grondwater (mg/l)

Winter	Kunstmest/dierlijke mest	Jaar van bemesting	Datum bemonstering ¹			
			16/1/2019	18/2/2019	25/3/2019	
2018-2019	Controle ²	Geen	22	17	14	
	KAS, vroeg	2018	36 b	31 a	24 a	
	KAS, laat	2018	23 ab	24 a	14 a	
	UREUM, vroeg	2018	33 ab	28 a	20 a	
	UREUM, laat	2018	21 a	21 a	15 a	
	DIG	2018	29 ab	20 a	11 a	
	RDM	2018	22 ab	23 a	12 a	
	VDM	2018	24 ab	20 a	14 a	
			Datum bemonstering			
			24/10/2019	12/12/2019	21/1/2020	
2019-2020	Controle ²	Geen	21	11	11	
	KAS	2018	18 a	8 ab	10 a	
	UREUM	2018	18 a	14 b	12 a	
	DIG	2018	23 a	12 ab	8 a	
	RDM	2018	15 a	6 a	4 a	
	VDM	2018	15 a	11 ab	7 a	
	KAS	2018, 2019	30 a	17 ab	11 a	
	UREUM	2018, 2019	30 a	18 ab	14 a	
	DIG	2018, 2019	28 a	23 b	14 a	
	RDM	2018, 2019	31 a	22 ab	16 a	
	VDM	2018, 2019	31 a	14 a	11 a	
			Datum bemonstering			
			10/11/2020	16/12/2020	2/2/2021	3/3/2021
2020-2021	Controle ²	Geen	11	9	16	15
	KAS	2018	14 a	12 a	15 a	10 a
	UREUM	2018	11 a	9 a	15 a	16 a
	DIG	2018	17 a	15 a	18 a	14 a
	RDM	2018	12 a	9 a	12 a	6 a
	VDM	2018	8 a	8 a	15 a	13 a
	KAS	2018, 2019	15 a	13 a	16 ab	13 a
	UREUM	2018, 2019	12 a	13 a	15 ab	14 a
	DIG	2018, 2019	21 a	14 a	11 ab	14 a
	RDM	2018, 2019	9 a	9 a	20 b	9 a
	VDM	2018, 2019	8 a	9 a	9 a	17 a

Winter	Kunstmest/dierlijke mest	Jaar van bemesting	Datum bemonstering ¹			
			16/1/2019	18/2/2019	25/3/2019	
	KAS	2018, 2019, 2020	20 a	26 a	30 a	23 a
	UREUM	2018, 2019, 2020	15 a	15 a	26 a	25 a
	DIG	2018, 2019, 2020	26 a	22 a	20 a	15 a
	RDM	2018, 2019, 2020	18 a	15 a	22 a	16 a
	VDM	2018, 2019, 2020	18 a	18 a	36 a	38 a
			Datum bemonstering			
			9/12/2021	9/3/2022		
2021-2022	Controle ²	Geen	11	8		
	KAS	2018	10 ab	9 ab		
	UREUM	2018	14 b	21 b		
	DIG	2018	12 ab	13 ab		
	RDM	2018	5 a	2 a		
	VDM	2018	10 ab	12 ab		
	KAS	2018, 2019	11 a	14 a		
	UREUM	2018, 2019	14 a	13 a		
	DIG	2018, 2019	11 a	5 a		
	RDM	2018, 2019	8 a	9 a		
	VDM	2018, 2019	13 a	16 a		
	KAS	2018, 2019, 2020	15 a	8 a		
	UREUM	2018, 2019, 2020	13 a	12 a		
	DIG	2018, 2019, 2020	13 a	8 a		
	RDM	2018, 2019, 2020	9 a	10 a		
	VDM	2018, 2019, 2020	14 a	15 a		

¹ verschillende letters duiden op significante verschillen tussen meststoffen ($P < 0,05$).

² gemiddelde van alle controle-objecten (elke meststof had zijn eigen controle).

Bijlage 9 Methodiek metingen incubatie-experiment

Methodiek bodemanalyses bij aanvang van het experiment

Voorafgaand aan het experiment zijn de drie gronden bemonsterd en geanalyseerd op fysische en chemische eigenschappen. Een monster van elke grond is daarvoor gedroogd bij 40°C, gezeefd (2 mm) en opgestuurd naar Eurofins Agro in Wageningen. De textuuranalyse is gedaan volgens de pipetmethode en organisch stofgehalte bepaald met de 'loss-on-ignition'-methode (Houba et al, 1997). De bodem-pH is bepaald in een 1:5 (gewicht:volume) suspensie met 1 M KCl. Totaal N is bepaald met de Dumas-methode (FAO, 2021). Beschikbare fracties voor ammonium-N, nitraat-N, en fosfaat-P zijn bepaald in een extractie met 0,01 M CaCl₂ (Houba et al., 2000) en de P-voorraad werd gemeten met een ammoniumlactaat-extractie (Egnér et al., 1960).

Statistische analyse

De gehele statistische analyse is uitgevoerd in R, versie 4.2.1 (R Core Team, 2023). Het effect van bemestingstype op de responsvariabelen N₂O-emissies, grasopbrengst en N-uitspoeling is getest met lineair mixed-effects modellen met de functie *lme* uit het *nlme* pakket (Pinheiro et al., 2023; Pinheiro and Bates, 2000) met 'blok' als random factor. De significantie werd bepaald met ANOVA, m.b.v. de functie *anova* (base) (R Core Team, 2023). Normaliteit en homogeniteit van de variantie werd visueel bepaald. De responsvariabele is log-getransformeerd of getransformeerd door de vierkantswortel te nemen als de modelresiduen niet normaal verdeeld waren. Significante verschillen tussen de bevruchtingstypes zijn bepaald met Tukey's honestly significant difference posthoc-test (HSD) met de functie *emmeans* (Lenth 2023) en *CLD* uit het *multcomp* pakket (Hothorn et al., 2008). Figuren zijn gemaakt met het pakket *ggplot2* (Wickham, 2016) en *cowplot* (Wilke, 2020). Pot 33 (KAS op zandgrond) had extreem hoge N₂O-emissies en pot 103 (vaste mest op Droevendaalgrond) had sterk negatieve opbrengst-geschaalde emissies en waren dus vermoedelijke outliers. Beide potten lagen ver buiten het interkwartielbereik en werden daarom uit de data-analyse gehaald.

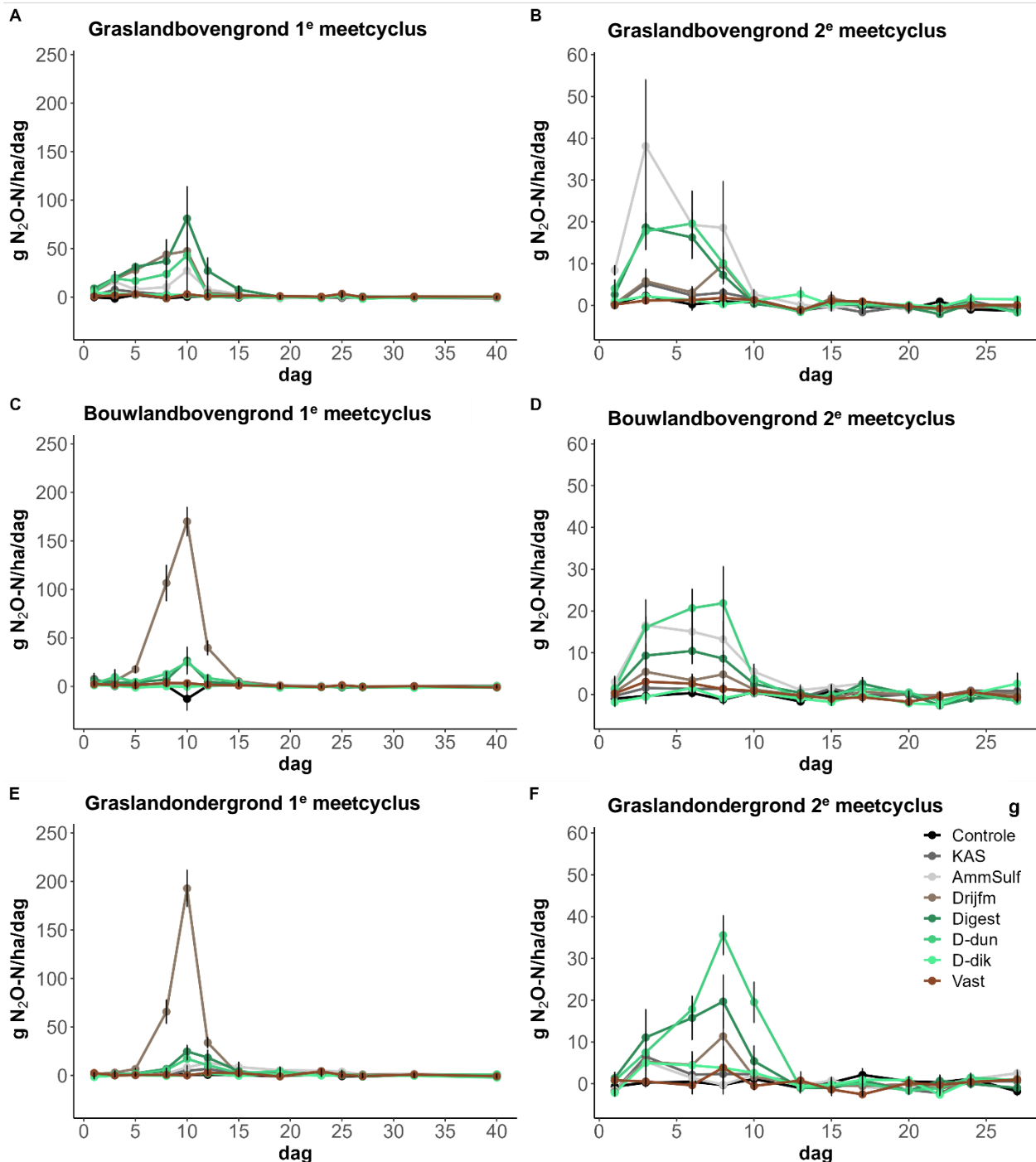
Referenties

- Egnér, H., Riehm, H., & Domingo, W.R., 1960. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung. *K. Lantbrukshögskolans Ann* 26, 199-215.
- FAO, 2021. Standard operating procedure for soil total nitrogen - Dumas dry combustion method. Rome. 14 pp.
- Hothorn, T., Bretz, F., & Westfall, P., 2008. Simultaneous interference in general parametric models. *Biometrical Journal* 50(3), 346-363.
- Houba, V.J.G., Van der Lee, J.J., & Novozamsky, I., 1997. Soil Analysis Procedures, Syllabus Soil and Plant Analysis. Part 5B. Department of Soil Science and Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- Houba, V.J.G., Temminghoff, E.J.M., Gaikhorst, G.A., & Van Vark, W., 2000. Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31:9-10, 1299-1396, DOI: 10.1080/00103620009370514
- Lenth, R., 2023. Emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means. R package version 1.1.8, <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>.
- Pinheiro, J., & Bates, D., 2000. *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. Springer, New York. DOI: 10.1007/b98882.
- Pinheiro, J., Bates, D., & R Core Team, 2023. *Nlme: Linear and nonlinear mixed effects models*. R package version 3.1-163, <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- R Core Team, 2023. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>.
- Wickham, H., 2016. *Ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer-Verlag, New York.

Wilke, C., 2020. Cowplot: Streamlined plot theme and plot annotations for 'ggplot2'. R package version 1.1.1, <https://CRAN.R-project.org/package=cowplot>.

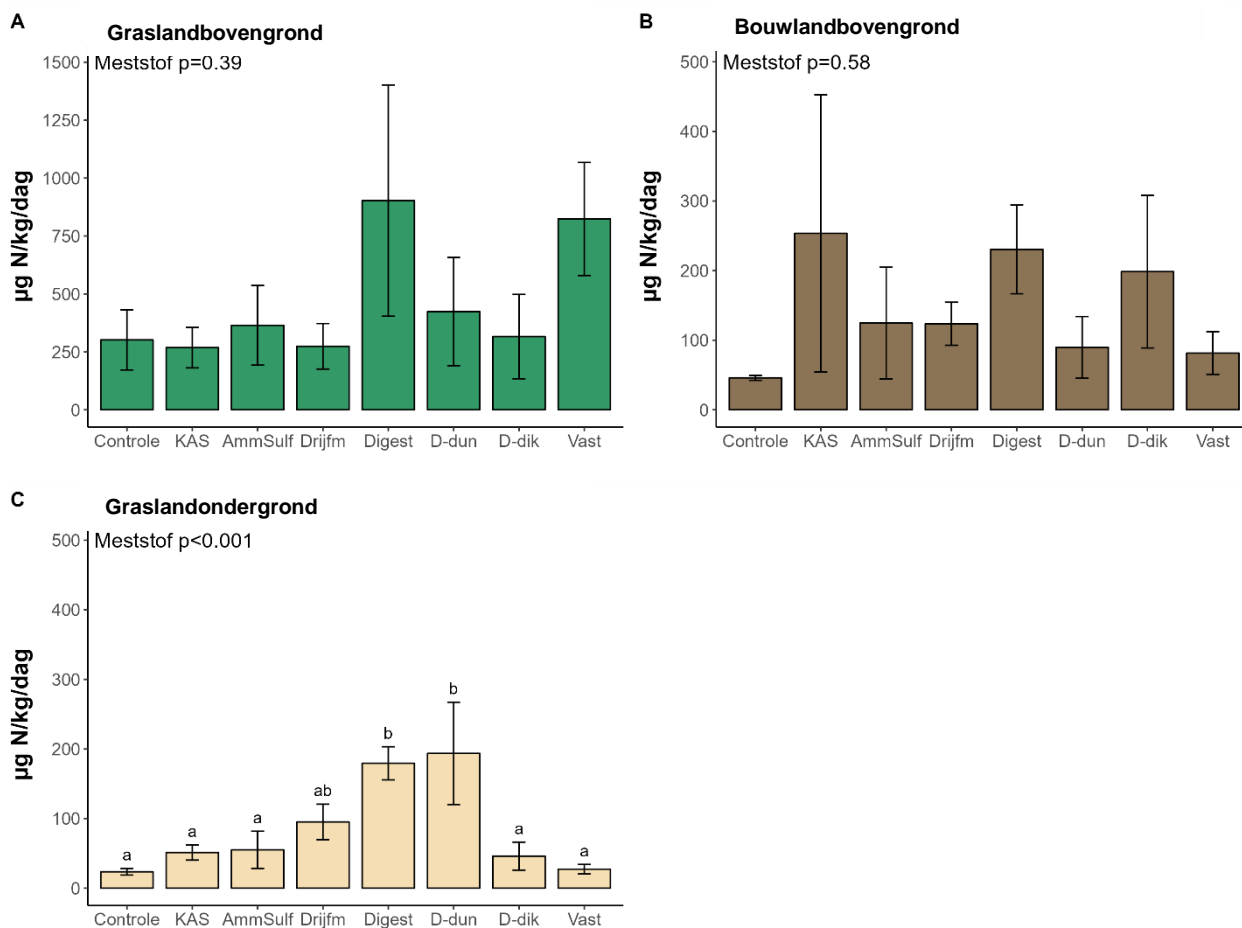
Bijlage 10 Resultaten pot- en incubatieproeven

N₂O-emissies



Figuur B9.1 N₂O-emissies per meettijdstip, gemeten over 40 dagen in de 1^e cyclus en 27 dagen in de 2^e cyclus voor de drie bodemsoorten; graslandbovengrond, bouwlandbovengrond en graslandondergrond. Foutenbalken geven de standaardfout weer (n=4 voor Controle, AmmSulf, Digest, D-dun, D-dik, Vast; n=6 voor KAS, Drijfm). N.B. Let op de verschillen in schaal voor de Y-assen voor de eerste en tweede meetperiode.

Potentiële denitrificatie



Figuur B9.2 De potentiële denitrificatiecapaciteit van de drie gebruikte gronden. Binnen een figuur zijn balken met eenzelfde letter niet significant verschillend ($P < 0,05$, $n=4$).

Tabel B9.1 De totale hoeveelheid uitgespoeld water per pot in maart en april en de gemiddelde concentraties van NO₃, NH₄ en organisch N in het uitspoelingswater (mg/l) van maart en april. De standaardfout is weergegeven tussen haakjes. Onder elke kolom wordt het effect van meststof (ANOVA) aangegeven met * (P<0,05), ** (P<0,01), *** (P<0,001) of n.s. (niet significant). Bij een significant effect zijn resultaten per kolom gevolgd door eenzelfde letter niet significant verschillend (P<0,05, n=4).

Meststof	Uitgespoeld water (ml/pot)			NO ₃ in uitspoeling (mg/l)			NH ₄ in uitspoeling (mg/l)			Opgelost organisch N in uitspoeling (mg/l)		
	Gras.bov. ¹	Bouw.bov. ¹	Gras.ond.	Gras.bov. ¹	Bouw.bov. ¹	Gras.ond.	Gras.bov. ¹	Bouw.bov. ¹	Gras.ond.	Gras.bov. ¹	Bouw.bov. ¹	Gras.ond.
Controle	563 (64) ^b	530 (39)	1540 (105) ^b	0,04 (0,01)	0,14 (0,09)	0,03 (0,00)	0,06 (0,01)	0,05 (0,01)	0,04 (0,01)	1,86 (0,21) ^b	0,74 (0,11)	1,56 (0,24) ^a
KAS	482 (50) ^b	419 (78)	1126 (152) ^{ab}	2,09 (2,01)	0,10 (0,04)	0,04 (0,01)	0,03 (0,01)	0,08 (0,02)	0,05 (0,01)	1,72 (0,31) ^{ab}	0,92 (0,21)	2,44 (0,19) ^{ab}
AmmSulf	252 (60) ^{ab}	346 (108)	921 (68) ^a	1,13 (0,97)	0,18 (0,10)	0,05 (0,00)	0,05 (0,02)	0,17 (0,11)	0,06 (0,01)	0,70 (0,24) ^{ab}	1,27 (0,22)	1,59 (0,41) ^a
Drijfm	218 (75) ^a	426 (30)	1264 (58) ^{ab}	4,17 (3,41)	1,79 (0,75)	0,03 (0,01)	0,37 (0,20)	0,06 (0,01)	0,04 (0,01)	2,25 (0,89) ^b	0,93 (0,18)	2,62 (0,07) ^{ab}
Digest	300 (111) ^{ab}	465 (45)	1252 (35) ^{ab}	0,20 (0,08)	0,62 (0,48)	0,03 (0,01)	0,08 (0,03)	0,07 (0,01)	0,05 (0,01)	1,12 (0,26) ^{ab}	0,94 (0,12)	2,24 (0,27) ^a
D-dun	466 (10) ^{ab}	403 (58)	979 (178) ^{ab}	0,71 (0,42)	0,17 (0,12)	0,04 (0,00)	0,06 (0,01)	0,06 (0,01)	0,07 (0,01)	1,59 (0,20) ^{ab}	0,90 (0,29)	3,80 (0,64) ^b
D-dik	526 (24) ^b	544 (11)	1293 (92) ^{ab}	0,11 (0,04)	0,04 (0,01)	0,04 (0,01)	0,05 (0,01)	0,06 (0,02)	0,06 (0,01)	1,60 (0,26) ^{ab}	0,68 (0,34)	2,31 (0,39) ^{ab}
Vast	304 (95) ^{ab}	527 (66)	1503 (68) ^{ab}	0,08 (0,04)	1,26 (1,21)	0,03 (0,01)	0,06 (0,02)	0,05 (0,01)	0,04 (0,01)	0,56 (0,16) ^a	0,57 (0,08)	1,85 (0,16) ^a
Effect	**	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	**

¹ Wegens minimale gegevens in april voor grasland en bouwland tonen deze kolommen alleen gegevens van maart.

Tabel B9.2 De gemiddelde pH, geleidbaarheid (EC), alsook de concentraties van opgelost organisch koolstof en fosfaat (PO₄-P) in het uitspoelingswater van maart en april. De standaardfout is weergegeven tussen haakjes. Onder elke kolom wordt het effect van meststof (ANOVA) aangegeven met * (P<0,05), ** (P<0,01), *** (P<0,001) of n.s. (niet significant). Bij een significant effect zijn resultaten per kolom gevolgd door eenzelfde letter niet significant verschillend (P<0,05, n=4).

Meststof	Organisch koolstof in uitspoeling (mg/l)			pH van uitspoelingswater			EC van uitspoelingswater (µS/cm)			PO ₄ -P in uitspoeling (mg/l)		
	Gras.bov. ¹	Bouw.bov. ¹	Gras.ond.	Gras.bov. ¹	Bouw.bov. ¹	Gras.ond.	Gras.bov. ¹	Bouw.bov. ¹	Gras.ond.	Gras.bov. ¹	Bouw.bov. ¹	Gras.ond.
Controle	16,2 (1,4) ^b	6,0 (1,2)	22,8 (2,0) ^{ab}	7,40 (0,10)	7,10 (0,10)	7,98 (0,05)	498 (70)	1264 (452)	358 (65)	0,005 (0,001)	0,001 (0,000)	0,005 (0,001)
KAS	16,1 (2,4) ^b	8,5 (1,8)	31,5 (1,9) ^c	7,36 (0,04)	7,07 (0,09)	8,15 (0,07)	400 (66)	1130 (389)	369 (49)	0,003 (0,001)	0,001 (0,000)	0,005 (0,001)
AmmSulf	7,9 (3,0) ^{ab}	13,2 (1,8)	20,4 (3,3) ^a	7,25 (0,06)	7,31 (0,04)	7,93 (0,08)	448 (144)	664 (50)	510 (134)	0,003 (0,001)	0,005 (0,004)	0,007 (0,001)
Drijfm	11,1 (1,8) ^{ab}	10,3 (2,5)	35,2 (1,7) ^{cd}	7,46 (0,07)	7,24 (0,07)	8,07 (0,11)	429 (76)	963 (294)	417 (56)	0,013 (0,008)	0,002 (0,001)	0,008 (0,002)
Digest	10,5 (1,3) ^{ab}	8,4 (1,6)	30,5 (3,5) ^{bc}	7,46 (0,12)	7,20 (0,08)	8,19 (0,01)	372 (123)	797 (134)	371 (14)	0,004 (0,002)	0,002 (0,001)	0,003 (0,001)
D-dun	12,7 (0,5) ^b	11,6 (4,0)	45,7 (1,3) ^d	7,31 (0,03)	7,09 (0,09)	8,19 (0,06)	461 (91)	519 (84)	443 (N/A)	0,005 (0,005)	0,002 (0,001)	0,005 (0,004)
D-dik	13,3 (2,2) ^b	5,1 (1,8)	25,7 (0,5) ^{abc}	7,50 (0,02)	7,01 (0,08)	8,02 (0,07)	466 (114)	2525 (1622)	568 (132)	0,001 (0,001)	0,006 (0,002)	0,003 (0,001)
Vast	4,0 (0,3) ^a	4,6 (1,5)	30,5 (2,3) ^{abc}	7,34 (0,05)	7,24 (0,03)	7,92 (0,08)	633 (201)	1538 (626)	360 (53)	0,027 (0,025)	0,001 (0,000)	0,004 (0,001)
Effect	***	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

¹ Wegens minimale gegevens in april voor grasland en bouwland tonen deze kolommen alleen gegevens van maart.

Tabel B9.3 De hoeveelheden NH_4-N , NO_3-N , mineraal N en oplosbaar organisch N, gemeten in de gronden aan het eind van het experiment. De standaardfout is weergegeven tussen haakjes. Onder elke kolom wordt het effect van meststof (ANOVA) aangegeven met * ($P < 0,05$), ** ($P < 0,01$), *** ($P < 0,001$) of n.s. (niet significant). Bij een significant effect zijn resultaten per kolom gevolgd door eenzelfde letter niet significant verschillend ($P < 0,05$, $n=4$).

Meststof	Bodem NH_4-N (kg/ha)			Bodem NO_3-N (kg/ha)			Bodem N-mineraal (kg/ha)			Bodem oplosbaar organisch N (kg/ha)		
	Gras.bov.	Bouw.bov.	Gras.ond.	Gras.bov.	Bouw.bov.	Gras.ond.	Gras.bov.	Bouw.bov.	Gras.ond.	Gras.bov.	Bouw.bov.	Gras.ond.
Controle	65 (17)	36 (19)	31 (11)	5,4 (2,2)	3,8 (0,9)	4,2 (2,6)	70 (17)	40 (19)	35 (10)	35 (2) ^a	33 (7)	16 (1)
KAS	56 (25)	57 (17)	20 (10)	4,0 (1,9)	2,1 (0,5)	1,4 (0,6)	38 (25)	60 (17)	22 (9)	44 (1) ^b	39 (7)	21 (2)
AmmSulf	35 (14)	61 (27)	35 (19)	3,1 (0,9)	2,8 (1,3)	0,4 (0,2)	39 (15)	63 (26)	35 (20)	43 (4) ^{ab}	34 (4)	20 (1)
Drijfm	39 (14)	66 (20)	26 (10)	2,9 (0,6)	4,6 (1,9)	1,4 (0,5)	42 (13)	71 (26)	28 (11)	43 (3) ^{ab}	35 (3)	20 (2)
Digest	65 (20)	68 (36)	40 (12)	2,2 (0,2)	1,9 (0,2)	1,3 (0,4)	67 (20)	70 (35)	41 (12)	42 (1) ^{ab}	35 (6)	22 (1)
D-dun	27 (6)	46 (25)	28 (15)	2,8 (0,8)	4,6 (2,9)	0,7 (0,2)	30 (6)	51 (28)	29 (15)	42 (1) ^{ab}	40 (2)	21 (0)
D-dik	37 (17)	28 (12)	29 (12)	4,5 (1,7)	3,4 (2,1)	2,0 (0,9)	41 (16)	32 (14)	31 (13)	37 (1) ^{ab}	30 (2)	20 (1)
Vast	38 (16)	19 (3)	30 (12)	7,6 (5,5)	1,2 (0,2)	1,4 (0,5)	46 (16)	20 (4)	32 (12)	41 (1) ^{ab}	25 (3)	16 (2)
Effect	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.

Tabel B9.4 De concentraties PO_4-P en oplosbaar koolstof, gemeten in de gronden aan het eind van het experiment. De standaardfout is weergegeven tussen haakjes. Onder elke kolom wordt het effect van meststof (ANOVA) aangegeven met * ($P < 0,05$), ** ($P < 0,01$), *** ($P < 0,001$) of n.s. (niet significant). Bij een significant effect zijn resultaten per kolom gevolgd door eenzelfde letter niet significant verschillend ($P < 0,05$, $n=4$).

Meststof	Bodem PO_4-P (kg/ha)			Bodem oplosbaar koolstof (g/pot)		
	Gras.bov.	Bouw.bov.	Gras.ond.	Gras.bov.	Bouw.bov.	Gras.ond.
Controle	6,8 (1,1)	1,5 (0,4)	0,9 (0,1) ^{ab}	1,51 (0,15) ^{ab}	1,44 (0,25)	0,72 (0,03)
KAS	10,0 (1,2)	4,2 (1,5)	0,5 (0,1) ^a	2,01 (0,20) ^b	1,90 (0,37)	1,05 (0,11)
AmmSulf	7,8 (2,1)	2,5 (0,4)	0,4 (0,2) ^{ab}	1,89 (0,15) ^{ab}	1,51 (0,16)	0,91 (0,18)
Drijfm	9,3 (1,7)	3,2 (1,3)	0,9 (0,2) ^{ab}	1,82 (0,08) ^{ab}	1,59 (0,08)	0,99 (0,11)
Digest	8,7 (1,3)	2,8 (1,3)	0,8 (0,2) ^{ab}	1,77 (0,11) ^{ab}	1,71 (0,23)	0,85 (0,06)
D-dun	13,3 (2,1)	2,0 (0,5)	0,6 (0,0) ^{ab}	1,72 (0,12) ^{ab}	1,92 (0,13)	0,88 (0,04)
D-dik	8,4 (1,5)	1,3 (0,3)	0,6 (0,0) ^{ab}	1,36 (0,05) ^a	1,40 (0,07)	0,85 (0,19)
Vast	9,4 (0,9)	1,9 (0,4)	1,2 (0,2) ^b	1,68 (0,06) ^{ab}	1,12 (0,18)	0,74 (0,02)
Effect	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	n.s.

Correspondentie adres voor dit rapport:

Postbus 16

6700 AA Wageningen

T 0317 48 07 00

wur.eu/plant-research

Rapport WPR-1336



The mission of Wageningen University & Research is "To explore the potential of nature to improve the quality of life". Under the banner Wageningen University & Research, Wageningen University and the specialised research institutes of the Wageningen Research Foundation have joined forces in contributing to finding solutions to important questions in the domain of healthy food and living environment. With its roughly 30 branches, 7,200 employees (6,400 fte) and 13,200 students, Wageningen University & Research is one of the leading organisations in its domain. The unique Wageningen approach lies in its integrated approach to issues and the collaboration between different disciplines.
