



Niveau en samenstelling van het stikstofverlies uit een melkveestal met roostervloer

H.C. de Boer

Public
Rapport 1437



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Niveau en samenstelling van het stikstofverlies uit een melkveestal met roostervloer

Herman de Boer

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research, en gefinancierd door het Ministerie van LNV en het bedrijfsleven in de PPS 'Mestscheiding in melkveestallen'

Wageningen Livestock Research
Wageningen, juli 2023

Rapport 1437

De Boer, H.C., 2023. *Niveau en samenstelling van het stikstofverlies uit een melkveestal met roostervloer*. Wageningen Livestock Research, Openbaar Rapport 1437.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/633151> of op www.wur.nl/livestock-research (onder Wageningen Livestock Research publicaties).



Dit werk valt onder een Creative Commons Naamsvermelding-Niet Commercieel 4.0 Internationaal-licentie.

© Wageningen Livestock Research, onderdeel van Stichting Wageningen Research, 2023

De gebruiker mag het werk kopiëren, verspreiden en doorgeven en afgeleide werken maken. Materiaal van derden waarvan in het werk gebruik is gemaakt en waarop intellectuele eigendomsrechten berusten, mogen niet zonder voorafgaande toestemming van derden gebruikt worden. De gebruiker dient bij het werk de door de maker of de licentiegever aangegeven naam te vermelden, maar niet zodanig dat de indruk gewekt wordt dat zij daarmee instemmen met het werk van de gebruiker of het gebruik van het werk. De gebruiker mag het werk niet voor commerciële doeleinden gebruiken.

Wageningen Livestock Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen Livestock Research is NEN-EN-ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Op al onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Openbaar Wageningen Livestock Research Rapport 1437

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Materiaal & methoden	8
	2.1 Introductie	8
	2.2 Stalinrichting	8
	2.3 Diermanagement en rantsoen	9
	2.4 Waarnemingen	9
	2.5 Analyses	12
	2.6 Kalibratie en justering	13
	2.7 Berekening mineralenbalansen	14
	2.8 Samenstelling van het stikstofverlies	16
3	Resultaten	17
	3.1 Staltemperatuur	17
	3.2 Ventilatie-debiet	18
	3.3 Rantsoen	18
	3.4 Drinkwater en zaagsel	21
	3.5 Melkproductie en melksamenstelling	22
	3.6 Drijfmestproductie en drijfmestsamenstelling	25
	3.7 Koegewicht	27
	3.8 Mineralenbalansen	27
	3.9 Samenstelling van het stikstofverlies	33
4	Discussie	34
	4.1 Fouten op balansposten	34
	4.2 Balansvarianten	37
	4.3 Correctie van de stikstofbalans	37
	4.4 Niveau en samenstelling van het stikstofverlies	38
	Conclusies	39
	Dankwoord	40
	Literatuur	41



Samenvatting

Stikstofemissie uit de stal geeft stikstofverlies uit de kringloop van het melkveebedrijf. De verloren stikstof (N) moet weer worden aangevuld om de productiviteit op peil te houden, wat leidt tot hogere productiekosten. Daarnaast kan vervluchtigde N neerslaan in gebieden waar externe N-aanvoer ongewenst is. Het is daarom van belang om de N-emissie uit melkveestallen beperkt te houden. Stikstof vervluchtigt uit de melkveestal met roostervloer, de meest gangbare stal, op basis van huidige inzichten grotendeels in de vorm van ammoniak (NH_3) en voor een klein deel in de vorm van stikstofgas (N_2), lachgas (N_2O), en stikstofoxiden (NO_x). Anders dan de emissie van NH_3 en N_2O kan de emissie van N_2 en NO_x uit de stal niet rechtstreeks worden gemeten, maar alleen (als totaal) worden afgeleid van een N massabalans. Dergelijke balansen worden voor melkveestallen zelden opgesteld, maar zijn nodig om een goed beeld te krijgen van het totale niveau van N-verlies uit de melkveestal. In combinatie met gelijktijdige meting van NH_3 - en N_2O -emissie kan ook worden vastgesteld in welke vorm de N verloren gaat, en hoe het verlies mogelijk kan worden verminderd. Binnen de PPS 'Mestscheiding in melkveestallen' zijn voor meerdere stalsystemen N-balansen opgesteld en is tijdens de balansperiode de NH_3 - en N_2O -emissie gemeten. Een van de stallen betrof een referentiestal met roostervloer en drijfmestproductie.

De referentiestal was een experimenteel compartiment in de Milieumeetstal op proeffaciliteit Dairy Campus, met daarin 16 melkgevende koeien jaarrond opgesteld. Het totale N-verlies uit deze stal werd gemeten door het wekelijks opstellen van (cumulatieve) mineralenbalansen voor N, fosfor (P), en kalium (K), over een periode van 52 weken, waarbij het (cumulatieve) N-verlies het verschil was tussen totale aanvoer en totale vastlegging van N. De mineralen werden in de stal voornamelijk aangevoerd met ruwvoer en krachtvoer, en voornamelijk vastgelegd in drijfmest en melk. Het ruwvoer en enkelvoudig krachtvoer, verstrekt als basisrantsoen, werd dagelijks gewogen, gecorrigeerd voor de voerrest, en iedere dinsdag bemonsterd. De verstrekte hoeveelheid brok werd dagelijks vastgelegd en iedere dinsdag bemonsterd. Het volume drijfmest in de kelder onder de stalvloer werd iedere dinsdag gemeten en bemonsterd, en zes keer tijdens de balansperiode werd een deel van de mest verwijderd, gewogen, en bemonsterd. De melkgift van de koeien werd dagelijks gemeten en de samenstelling werd eens per week bepaald in monsters genomen tijdens de melkcontrole. Van de mineralenbalansen werden twee varianten berekend: een variant op basis van nat-chemische analyse van de wekelijks genomen monsters (variant 1), en een variant op basis van aangeleverde kuil- en brokanalyses, waarbij het N-gehalte in het voer en de melk werd afgeleid van het eiwitgehalte gemeten met NIR (variant 2). Bij beide varianten werd de meetfout op de P-balans gebruikt om de meetfout op de N-balans te corrigeren. Met behulp van de dagelijks gemeten NH_3 - en N_2O -emissie werd onderscheiden welk deel van het totale N-verlies bestond uit NH_3 , N_2O , en N_2 (incl. NO_x).

Uit de resultaten blijken grote verschillen tussen de twee balansvarianten in het ongecorrigeerde N-verlies over de balansperiode, maar een relatief klein verschil in gecorrigeerd N-verlies. Bij de beoordeling van het N-verlies zijn de resultaten van de eerste variant gebruikt, vanwege de consistentie in analysemethode en de meer directe meting. Bij de eerste variant was de meetfout op de P-balans en K-balans aan het einde van de balansperiode respectievelijk 4% (P-overschot) en 16% (K-tekort). De grote meetfout op de K-balans was mogelijk het gevolg van het achterblijven van K in de bezinklaag van de mest in de kelder. De meetfout op de K-balans was daardoor niet geschikt om de meetfout op de N-balans te corrigeren en werd niet gebruikt. Het totale N-verlies uit de stal, over de balansperiode van 52 weken en exclusief vier weken leegstand, werd vastgesteld op 16,6% van de N-excretie in deze periode ($137 \text{ kg N koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$), bij een eiwitgehalte in het rantsoen van gemiddeld $157 \text{ g kg}^{-1} \text{ DS}$, een melkproductie van $29,1 \text{ kg koe}^{-1} \text{ dag}^{-1}$, een eiwitgehalte in de melk van 3,67%, en een ureumgetal in de melk van $20,7 \text{ mg } 100^{-1} \text{ g}$. De temperatuur in de stal was gemiddeld $13,9^\circ\text{C}$ en het ventilatiedebiet gemiddeld $17305 \text{ m}^3 \text{ uur}^{-1}$.

Het totale N-verlies van 16,6% was opgebouwd uit 6,6% N- NH_3 ($11,1 \text{ kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$), 0,2% N- N_2O , en 9,7% N- N_2 (incl. enig N- NO_x). Het totale N-verlies was daarmee aanzienlijk groter dan de 9,4% die was aangenomen op basis van eerder onderzoek, vooral als gevolg van een veel groter verlies in de vorm van N_2 (9,7%) dan eerder aangenomen (1%).

Het grotere N₂-verlies in het voorliggende onderzoek kan worden verklaard uit de aanwezigheid van een drijfslag op de mest, waardoor waarschijnlijk het N-verlies door denitrificatie werd gestimuleerd. Regelmatig kort mixen van de mest zou de vorming van een drijfslag kunnen beperken of voorkomen en daarmee mogelijk het N₂-verlies kunnen verlagen. Het geconstateerde grote N₂-verlies in dit onderzoek suggereert dat er in de Nederlandse melkveehouderij sprake is van een onbekend lek in de N-kringloop in (een deel van) de stallen met roostervloer. Wanneer dit lek (deels) kan worden gedicht, kan de bemestende waarde van de drijfmest toenemen en daardoor ook de N-efficiëntie van de melkveehouderij.

1 Inleiding

Stikstofemissie uit de melkveestal geeft stikstofverlies uit de kringloop van het melkveebedrijf. Om de productiviteit op peil te houden moet de verloren stikstof (N) weer worden aangevuld, bijvoorbeeld door de aankoop van kunstmest of voer, wat leidt tot hogere productiekosten. Daarnaast kan de vervluchtigde N neerslaan in gebieden waar externe N-aanvoer ongewenst is. Het is daarom van belang om N-emissie uit melkveestallen beperkt te houden.

Op basis van de huidige inzichten vervluchtigt stikstof uit de melkveestal met roostervloer, de meest gangbare melkveestal, grotendeels in de vorm van ammoniak (NH_3) en voor een klein deel in de vorm van stikstofgas (N_2), lachgas (N_2O), en stikstofoxiden (NO_x). Indicatieve waarden voor de relatieve vervluchtiging van deze N-vormen zijn respectievelijk 8,2%, 1%, 0,1%, en 0,1% van de totale N-excretie, in totaal 9,4%, bij jaarrond opstallen van de koeien (Van Bruggen et al., 2023; gegevens 2021) (Oenema et al., 2000). Anders dan de emissie van NH_3 en N_2O kan de emissie van N_2 en NO_x uit de stal niet rechtstreeks worden gemeten, maar alleen worden afgeleid van een N massabalans voor de stal. Na het opstellen van de massabalans wordt het totale N-verlies berekend en wordt daarop het (gemeten) verlies van NH_3 en N_2O in mindering gebracht. Het resterende verlies is dan een schatting van het verlies van N_2 (incl. enig NO_x).

Stalbalansen met detailmeting van alle aan- en afvoerposten worden voor melkveestallen onder praktijkomstandigheden zelden opgesteld. Ketelaars en Geurink (niet-gepubliceerde studie, resultaten verkort weergegeven in Oenema et al., 2000) berekenden op basis van opgestelde detailbalansen N-verliezen van 9-15% van de N-excretie, en Van der Hoek en Bruins et al. (niet-gepubliceerde studies, resultaten verkort weergegeven in Oenema et al., 2000) berekenden op basis van N/P-verhoudingen N-verliezen van 11-12% van de N in mest. De N-balansen van Ketelaars en Geurink vertegenwoordigden maar een deel van het jaar (maximale lengte van vijf maanden), waardoor bijvoorbeeld de omgevingstemperatuur een relatief grote invloed op het gemeten N-verlies kan hebben gehad. Daarnaast werd de mest dagelijks uit de stal afgevoerd en apart opgeslagen, een situatie die minder representatief is voor de gemiddelde Nederlandse melkveestal met roostervloer en onderkeldering. Bovenstaande informatie is verder ruim 20 jaar oud en mogelijk onvoldoende representatief voor de huidige wijze van voeren en stalmanagement. De vereenvoudigde benadering op basis van N/P-verhoudingen in voer, mest, en melk, zoals gebruikt door Van der Hoek en door Bruins et al., is in de tussentijd vaker toegepast (b.v. Van Bruggen en Geertjes, 2019). Deze methode is echter minder nauwkeurig door het meestal beperkte aantal metingen. Een probleem wat zich verder voordoet, is dat de totale N-verliezen berekend met deze methode vaak hoger zijn dan de N-verliezen op basis van aangenomen emissies van NH_3 , N_2O , N_2 , en NO_x . Dit kan onterecht tot de interpretatie leiden dat de NH_3 -emissie van een stalsysteem hoger is dan eerder aangenomen of gemeten.

Voor een goed beeld van het niveau van totaal N-verlies uit de melkveestal, hoe dit verlies tot stand komt en eventueel kan worden verminderd, is het noodzakelijk om N-balansen in detail en onder praktijkomstandigheden op te stellen, voor de huidig geldende omstandigheden, en bij voorkeur over een volledig kalenderjaar in plaats van een deel van het jaar. Verder is het noodzakelijk om vast te stellen in welke vorm de N verloren gaat.

Binnen de PPS 'Mestscheiding in melkveestallen' zijn voor meerdere stalsystemen N-balansen opgesteld en is tijdens de balansperiode ook de NH_3 - en N_2O -emissie gemeten. Het doel van dit onderzoek was om vast te stellen welke effecten bronscheiding van mest en urine heeft op de totale N-emissie en de vorm van de emissie. Een van deze stallen betrof de referentiestal, een melkveestal met roostervloer en drijfmestproductie. In dit rapport zijn de opzet, uitvoering, en resultaten van het onderzoek aan de referentiestal beschreven.

2 Materiaal & methoden

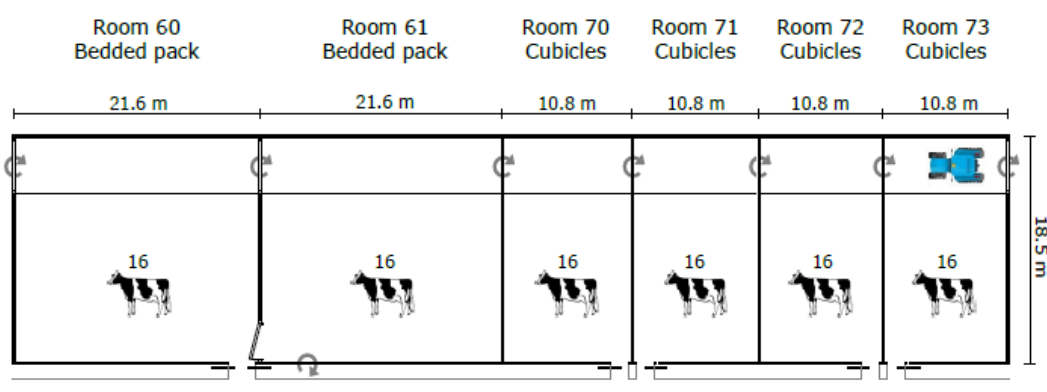
2.1 Introductie

Het totale N-verlies van de referentie melkveestal werd afgeleid van de N-massabalans voor een experimenteel compartiment ('stal') in de Milieumeetstal op proeffaciliteit Dairy Campus (Leeuwarden). In deze stal lag een roostervloer en de geproduceerde drijfmest werd opgeslagen in een kelder onder de vloer. De balans werd wekelijks opgesteld voor 52 weken in de periode van 6 oktober 2020 t/m 4 oktober 2021. Het management van de stal was erop gericht om een reguliere melkveestal met roostervloer zo goed mogelijk te benaderen. Hierna volgt een beschrijving van de stalinrichting, het koemanagement, de uitgevoerde metingen, de gebruikte methoden voor het opstellen van de N-balans, voor het berekenen van het totale N-verlies, en de samenstelling van dit verlies.

2.2 Stal inrichting

Milieumeetstal

De Milieumeetstal op Dairy Campus bestond uit zes individuele stallen, genummerd 60, 61, 70, 71, 72, en 73, waarbij de oorspronkelijke stal 61 (Fig. 1; Winkel et al., 2020) was verbouwd en gesplitst in twee aparte stallen, hernoemd tot 60 en 61. De Milieumeetstal had een puntdak en oriëntatie NNW-ZZO. De zes stallen waren klimaatgescheiden, met betonnen wanden, stalen spanten, en geïsoleerde dakpanelen. De zijmuren waren dicht tot een hoogte van 1,5 m boven de grond en daarboven open tot aan het dak, afsluitbaar met (beweegbare) windgordijnen en voorzien van vogelnetten. De windgordijnen waren tijdens het onderzoek overwegend gesloten, met een opening van 10 cm voor luchtinlaat om kruisventilatie te voorkomen. Bij de voergang waren de stallen gescheiden door (beweegbare) meetgordijnen, die normaliter waren gesloten, behalve op maandagen en bij het voeren. De stallen werden mechanisch geventileerd door twee ventilatoren per stal, bij een lichte onderdruk en met een doeldebiet van $16000 \text{ m}^3 \text{ uur}^{-1}$. Bovenstaande en uitgebreidere informatie is te vinden in Winkel et al. (2020).

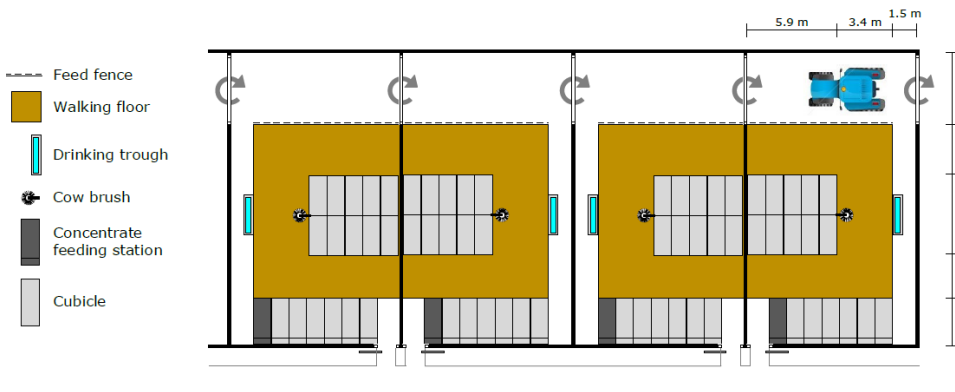


Figuur 1 Plattegrond van de (oorspronkelijke) indeling van de individuele compartimenten in de Milieumeetstal op proeffaciliteit Dairy Campus (Bron: Winkel et al., 2020).

Stal 72

Het onderzoek aan de referentiestal met roostervloer werd uitgevoerd in stal 72. Het oppervlak voor de dieren was 118 m^2 , waarvan 72 m^2 roostervloer en 46 m^2 ligboxen, met voor ieder dier een ligbox van 1,15 m breed en 2,5 m lang.

Bij de achterste rij ligboxen was een krachtvoerbox geïnstalleerd, op de buitenste rand van de middelste twee rijen ligboxen een koeborstel, en daartegenover, op het zijpad buiten de scheidingswand, een waterbak (Fig. 2). De roostervloer in de stal bestond uit betonnen roosters van 14 cm dik, met iedere 16 cm een gleuf van 3,5 cm breed. Het oppervlak van de mestkelder onder de vloer was netto 135 m², en de afstand van de keldervloer tot onderkant van de roosters was 134 cm.



Figuur 2 Plattegrond van de indeling van de oorspronkelijke vier stallen met roostervloer (stal 70, 71, 72, en 73, van links naar rechts) in de Milieumeetstal op proeffaciliteit Dairy Campus (Bron: Winkel et al., 2020).

2.3 Diermanagement en rantsoen

Diermanagement

Tijdens de balansperiode waren in de stal 16 melkgevende koeien (Holstein-Friesian) aanwezig. De gemiddelde oppervlakte per koe was 7,4 m², bestaande uit 4,5 m² roostervloer en 2,9 m² ligbox. De koeien werden dagelijks gemolken tussen 5 en 7 uur en 15 en 17 uur en verlieten daarvoor de stal voor een periode van drie kwartier per keer, in totaal 1,5 uur per dag. Ten behoeve van ander emissieonderzoek verlieten de koeien tijdens de balansperiode in 2021 vier keer de stal voor een periode van een week: vanaf 22 februari t/m 28 februari, vanaf 29 maart t/m 4 april, vanaf 31 mei t/m 6 juni, en vanaf 9 augustus t/m 15 augustus. De koeien verlieten de stal op maandagochtend bij het melken (rond 5 uur) en kwamen de volgende maandagochtend na het melken weer terug (tussen 6 en 7 uur).

Rantsoen

Het voer bestond uit een basisrantsoen aangevuld met brok. Het basisrantsoen bestond uit graskuil en snijmaïskuil aangevuld met soja- en gerstemeel, een mineralenmix, en water, en werd gemengd verstrekt als een 'Partial Mixed Ration' (PMR). De brokgift bestond uit een basislokgift via de krachtvoerautomaat in de melkstal en werd aangevuld met een koe-specifieke gift via de krachtvoerautomaat in stal 72. Het PMR werd s'ochtends verstrekt tussen 5 en 6 uur, en aangeschoven tussen 15 en 17 uur en 20 en 22 uur.

2.4 Waarnemingen

Waarnemingen bestonden uit het meten van de hoeveelheid en samenstelling van het verstrekte PMR, de verstrekte brok, het opgenomen drinkwater, het gebruikte zaagsel, de geproduceerde melk, en de geproduceerde drijfmest. Verder werd de frequentie van urine- en fecesexcretie rond het melken gemeten, het koegewicht, de NH₃ en N₂O-emissie uit de stal, het ventilatiedebiet van de stal, en de staltemperatuur.

Partial mixed ration

Bij het voeren van het PMR werd de voermengwagen (Triotrac 2-2400, Trioliet, Oldenzaal) gevuld vanuit de kuilen, uit de silo's met sojameel en gerstemeel, en uit een aanvoerleiding voor het water. Bij iedere vulling werd de lading gewogen met de weeginstallatie in de voermengwagen en werd de toename in gewicht geregistreerd.

Na het vullen werd de inhoud continu gemengd en werden alle meetstallen in de Milieustal in één ronde achter elkaar gevoerd, beginnend bij stal 60 (Fig. 1). Per stal werd na het uitdraaien de lading gewogen en de afname in gewicht geregistreerd. Op basis van de geladen hoeveelheid van iedere PMR-component en de uitgedraaide hoeveelheid PMR per stal werd berekend hoeveel van iedere PMR-component per stal was uitgedraaid. De uitgedraaide PMR werd iedere dinsdagochtend bemonsterd door het nemen van een plukmonster over de 9 meter breedte van het voerhek. Plukmonsters werden na verzameling ingevroren (-18°C) tot het moment van analyse. De overblijvende hoeveelheden PMR (restvoer) van iedere maandag en donderdag werden respectievelijk iedere dinsdag- en vrijdagochtend gewogen. De eerste 14 dagen werd deze restvoerbepaling dagelijks uitgevoerd. Na afloop van de balansperiode werd aanvullend enkele keren het DS-gehalte van het vers gevoerde PMR en het overblijvende restvoer bepaald, om eventuele veranderingen als gevolg van uitdroging vast te stellen. Het PMR werd gedurende een maand (mei 2023) iedere dinsdagochtend meteen na het uitdraaien bemonsterd door het nemen van een plukmonster, bestaande uit tenminste 10 plukken verdeeld over de 9 meter breedte van het voerhek. De volgende dag werd bij het verzamelen van het restvoer eveneens een plukmonster genomen. De plukmonsters werden gekoeld bewaard (4°C) en daarna gedroogd (70 °C, 48 uur) ter bepaling van het DS-gehalte.

Naast bemonstering van het uitgedraaide PMR waren de gevoerde gras- en snijmaïskuilen eerder ook apart bemonsterd en geanalyseerd door Eurofins Agro (Wageningen), en de geleverde partijen sojameel (silo 38) en gerstmeel (silo 39) door Agrifirm (Apeldoorn).

Brok

De verstrekte brok werd dagelijks per koe geregistreerd voor zowel de krachtvoerautomaat in de melkstal (AutoRotor PerFormer Plus, GEA, Düsseldorf, Duitsland) als de krachtvoerautomaat in stal 72 (L'Port Universeel 004-030-000, Hanskamp, Doetinchem). Brok werd iedere dinsdagochtend bemonsterd uit de krachtvoerautomaat van stal 72 en monsters werden ingevroren (-18°C) tot het moment van analyse. De geleverde partijen brok (silo 71) waren eerder ook bemonsterd en geanalyseerd door de leverancier (Agrifirm).

Drinkwater

Het drinkwatergebruik (bronwater) door de koeien werd geregistreerd via de watermeter in stal 72, geplaatst in de aanvoerleiding van de waterbak. De watermeter werd iedere dinsdag afgelezen en de stand geregistreerd. Het drinkwater werd iedere dinsdag bemonsterd uit de aanvoerleiding van de waterbak in stal 70 en monsters werden ingevroren (-18°C) tot het moment van analyse. Tijdens het melken (buiten de stal) hadden de koeien geen toegang tot drinkwater.

Zaagsel

De hoeveelheid zaagsel (Allspan PlusMed, Allspan, Karlsruhe, Duitsland) die in de ligboxen werd gestrooid werd dagelijks geregistreerd en enkele keren tijdens de balansperiode werd een monster genomen en ingevroren (-18°C) tot het moment van analyse.

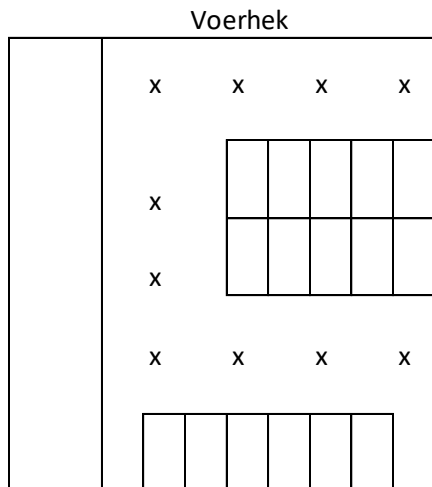
Melk

De melkgift van de koeien werd per koe per dag gemeten met een elektronische doorstroommeter (Dematron 70, GEA). Bij de wekelijkse melkcontrole werd iedere dinsdagmiddag en woensdagochtend van iedere koe een monster genomen van de melkgift en geanalyseerd op gehalte eiwit, vet, lactose, en ureum (Qlip, Zutphen). Daarnaast werd iedere dinsdagmiddag en woensdagochtend het restant van de individuele monsters per tijdstip gemengd voor alle koeien van meetstallen 60, 61, 70, en 72, werd het mengsel bemonsterd, de verzamelmonsters gekoeld bewaard (4°C), en tenslotte samengevoegd tot een nieuw verzamelmonster dat werd ingevroren (-18°C) tot het moment van analyse.

Drijfmest

Het mestpeil in de kelder van stal 72 werd iedere dinsdagochtend gemeten met een peilbuis met mm-schaalverdeling, op 10 verschillende posities regelmatig verdeeld over het roostervloeroppervlak (Fig. 3), en de meetresultaten werden gemiddeld. De drijfmest werd op vergelijkbare posities bemonsterd met een multisampler (lengte 1,8 m, ø 30 mm; Eijkelkamp, Giesbeek), waarbij de 10 deelmonsters werden gemengd tot een verzamelmonster dat werd ingevroren (-18°C) tot het moment van analyse. De multisampler bestond uit een holle buis, die bij monsternamen door de drijfmestlaag in de kelder werd geduwd en vervolgens van onderen werd afgesloten, waardoor de mest in de buis een doorsnede van de hele laag vertegenwoordigde.

Vanaf 2 maart 2021 werd, voorafgaande aan het invriezen, de volumetrische dichtheid van de drijfmest bepaald door het verzamelmonster over te gieten in een maatkan (1000 ml), de inhoud te wegen, het volume af te lezen, en vervolgens de dichtheid te berekenen. De mest werd bij de wekelijkse peilmeting en bemonstering normaliter niet gemixt, om een effect van mixen op de meting van de NH₃-emissie te voorkomen.



Figuur 3 *Schets van de indeling van stal 72 in de Milieumeetstal op Dairy Campus, met de meet- en bemonsteringspunten voor drijfmest indicatief weergegeven met 'x'.*

Om te voorkomen dat de mestkelder te vol zou worden werd op verschillende tijdstippen met een vrachtwagen een hoeveelheid mest uit de kelder gepompt, gewogen, en bemonsterd. Voorafgaande aan het wegpompen werd de mest 1 tot 2 dagen gemixt met het aanwezige Smart Slurry Aeration System (SSAS) van DSD Stalnricting (Drachten), om de mest zo homogeen mogelijk te krijgen. Met dit systeem werd de mest niet continu gemixt, maar een beperkt deel van de tijd, en vooral verticaal. Wanneer het systeem in werking was, werd ca. 9 minuten per uur gemixt.

Frequentie van de excretie van urine en feces

De frequentie van de excretie van urine en feces door de koeien werd gemeten rondom het tijdstip van melken, om inzicht te krijgen in de relatieve hoeveelheid en verhouding van uitgescheiden urine en feces buiten de stal vergeleken met in de stal. Bij drie stalbezoeken werd gedurende een langere periode vastgelegd op welke tijdstippen de koeien feces of urine uitscheidde. De periode bestond uit twee tot drie uur voordat de koeien in de middag de stal verlieten om te worden gemolken, en twee tot drie uur nadat de koeien terug waren in de stal.

Koegewicht

De koeien werden dagelijks na het melken gewogen op de doorloopweegbrug (Taxatron 5000; GEA). De twee wegingen per dag werden per koe gemiddeld en vervolgens per dag over de 16 koeien in de stal.

NH₃- en N₂O-emissie

De NH₃- en N₂O-emissie uit stal 72 werd tijdens de balansperiode gemeten met een Picarro G2508 gas concentration analyzer (Picarro Inc., Santa Clara CA, USA). Per uur werd per ventilator 5 minuten lucht aangezogen en gemeten. De data van de laatste vier minuten werd per uur gemiddeld over de twee ventilatoren en de uurgemiddelden werden gemiddeld per dag. Voor de berekening van de hoeveelheden emissies werd het gelijktijdig gemeten ventilatiedebiet gebruikt, berekend op basis van de kalibratielijn van januari 2022. Meer informatie over de methode en de (vaste) meetopstelling in de Milieustal is gegeven door Winkel et al. (2020).

Staltemperatuur en ventilatiedebiet

De temperatuur in de stal en het ventilatiedebiet werden ieder uur gemeten, de temperatuur met een sensor van Vaisala (Helsinki, Finland) en het ventilatiedebiet met meetwaaiers (Fancom, Panningen) geplaatst in de twee ventilatoren (Fancom 1680 M; Ø 80 cm).

2.5 Analyses

Nat-chemische analyses

De wekelijkse monsters van het PMR, brok, drinkwater, en melk werden door ALNN (Ferwert) nat-chemisch geanalyseerd op N-Kjeldahl, P-totaal, en K-totaal, en de PMR- en brokmonsters ook op gehalte drogestof. N-Kjeldahl werd gemeten met CFA (Technicon Traacs 800) en P- en K-totaal met ICP-OES (Thermo ICAP 7600 Duo, Thermo Fisher Scientific, Waltham MA, USA) na destructie van de monsters met zwavelzuur en waterstofperoxide (cf. NEN 7433). Voorafgaande aan destructie werden de brokmonsters gemalen (1 mm) en werden de PMR-monsters gedroogd (70°C, 15 uur) en gemalen (1 mm). De meting van N-totaal werd uitgevoerd cf. NEN 7434 en de meting van P- en K-totaal cf. NEN 7435 ICP-OES.

In de door Eurofins Agro genomen kuilmonsters werd door Eurofins Agro het gehalte P- en K-totaal nat-chemisch geanalyseerd volgens SPZ2, een methode gelijkwaardig aan NEN 6966:2005 ICP-AES.

In de door Agrifirm aangeleverde samenstellingen van enkelvoudig krachtvoer en brok werd het gehalte P- en K-totaal door NutriControl (Veghel) nat-chemisch geanalyseerd met ICP-OES volgens eigen methode (ANAL-10040).

De drijfmest- en zaagselmonsters werden door het Chemisch-Biologisch Laboratorium Bodem (CBLB, Wageningen) nat-chemisch geanalyseerd, de drijfmestmonsters op pH, EC, drogestof, as, N-totaal, P-totaal, K-totaal, N-NH₄, C-totaal, en C-organisch, en de zaagselmonsters op drogestof, N-totaal, P-totaal, en K-totaal. Bij drijfmest werden de pH en EC in het verse materiaal gemeten met standaard elektroden; N-totaal en P-totaal met SFA (SAN++, Skalar, Breda) (na destructie van de verse mest met zwavelzuur en salicylzuur, en de toevoeging van selenium en waterstofperoxide, bij een temperatuur van 100°C); K-totaal met ICP-AES (Thermo iCAP 6500 DUO, Thermo Fisher Scientific) (na de hiervoor beschreven destructie); en N-NH₄ met SFA (na extractie met 1 M KCl). Het drogestofgehalte werd bepaald door 24 uur drogen bij 105°C en het organische stofgehalte door gedroogde mest (70°C) drie uur te gloeien bij 550°C. Gehalten C-totaal en C-organisch werden gemeten met een CN analyzer (FlashSmart, Thermo Fisher Scientific) na het malen van gedroogde mest (70°C) op 50 µm. Voorafgaande aan de bepaling van C-organisch werd het gemalen materiaal gefumigeerd met zoutzuur (HCl) om carbonaten te verwijderen (Walthert et al., 2010). De monsters stonden na inzetten een nacht over en werden de volgende dag, na opnieuw drogen (60°C, tenminste vier uur), gemeten met de CN analyzer.

Infrarood spectrometrie

Naast de wekelijkse bemonstering en nat-chemische analyse van de PMR-, brok-, en melkmonsters, werden de (componenten van) deze producten ook op partijbasis bemonsterd en daarna geanalyseerd met infrarood spectrometrie (NIR). In de door Eurofins Agro genomen kuilmonsters werd door Eurofins Agro het gehalte ruw eiwit, NH₃, en NO₃ bepaald met NIR volgens een eigen, geaccrediteerde methode (ISO/IEC 17025:2017, registratienr. L122), na drogen (60°C) en malen (1 mm) van de monsters. Voor de referentiemethoden, waarop de NIR-modellen zijn gebaseerd, werd N-NH₃ (in zowel het verse als gedroogde en gemalen monster) en NO₃-N (in het verse monster) bepaald met een eigen methode, en N in ruw eiwit met N-Kjeldahl (NEN-ISO-5983-2). Het N-totaalgehalte werd bij de methode van Eurofins Agro berekend door N in het ammoniak-vrije ruw eiwit (N in ruw eiwit - N-NH₃ in het luchtdroge monster) en N-NH₃ en NO₃-N in het verse monster (omgerekend naar DS) bij elkaar op te tellen.

In de door Agrifirm aangeleverde samenstellingen van enkelvoudig krachtvoer en brok werd het ruw eiwitgehalte door Agrifirm bepaald met NIR-meting (FOSS, Denemarken) in ongemalen materiaal, bij kamertemperatuur. De gebruikte ijklijnen waren afkomstig van NutriControl en werden door NutriControl gemaakt en onderhouden met een eigen methode, gebaseerd op NEN-ISO 12099:2017. De onderliggende referentiedata voor deze ijklijnen was een geaccrediteerde analysemethode van NutriControl voor ruw eiwit (ANAL-10005, gelijkwaardig aan NEN-EN-ISO 8968-1).

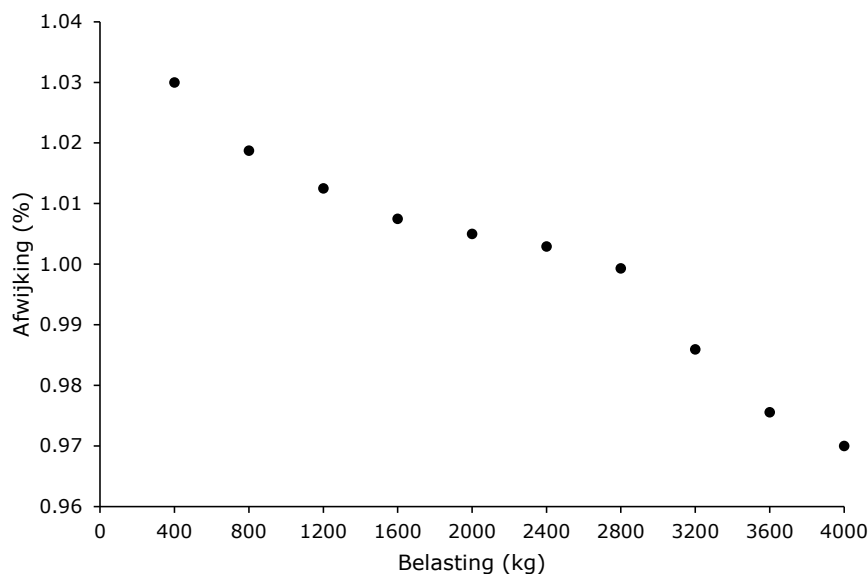
In de individuele monsters van de melkcontroles werd het gehalte eiwit, vet, lactose, en ureum door Qlip met NIR gemeten volgens standaard ISO 9622|IDF 141, en regelmatig gekalibreerd met referentiemethodes

voor de bepaling van vet (ISO 1211|IDF 1), eiwit, (ISO 8968-1|IDF 20-1), lactose (ISO 22662|IDF 198), en ureum (ISO 14637|IDF 195).

2.6 Kalibratie en justering

Tijdens of na de balansperiode werden kalibraties uitgevoerd aan de weeginstallatie van de voermengwagen, aan de krachtvoerautomaten in de melkstal en stal 72, aan de melkmeters in de melkstal, en aan de meetwaaiers ter bepaling van het ventilatiedebiet in stal 72. De weeginstallatie van de voermengwagen en de krachtvoerautomaten werden aanvullend ook gejusteerd.

De weeginstallatie van de voermengwagen werd gekalibreerd op 19 januari 2021 door Kalibra International (Delft), bij een omgevingstemperatuur van 7°C. Het niet-automatisch weegwerktuig werd onderzocht door vergelijking van de geïndiceerde waarde met de massa, aangebracht door belasting met standaard massastukken van 400 kg, eerst steeds met 400 kg toenemend tot 4000 kg, en daarna steeds met 400 kg afnemend tot 0. De meetmethode was gebaseerd op de instructies uit de norm EN 45501. Bij neergaande belasting, de situatie die optreedt bij het voeren, was er een onderschatting van het door de voermengwagen afgegeven gewicht in het traject van 4000 tot 2800 kg, en een overschatting van het afgegeven gewicht in het traject van 2400 tot 0 kg (Fig. 4). Ongeveer een maand na de kalibratie werd de weeginstallatie tijdens regulier onderhoud gejusteerd door Kuperus Oudehorne (Oudehorne).



Figuur 4 Afwijking van de weergegeven waarde door de weeginstallatie van de voermengwagen bij neergaande belasting tijdens kalibratie, afnemend van 4000 tot 0 kg in stappen van 400 kg.

De melkmeters in de melkstal werden op 4 november 2021, een maand na het aflopen van de balansperiode, gekalibreerd door Henk de Boer Melktechniek (Jellum). Eerst werd de installatie voorgespoeld met 0,5% Circotop MBX in water. Daarna werd per melkmeter 10,0 kg testvloeistof opgezogen. De testvloeistof bestond uit water met een temperatuur van 12°C of 25°C met 70 cc Circotop MBX per 10 kg water. Uit de kalibratie bleek de fout op de melkmeters (n = 40) te variëren van -1,0 tot +2,5% (gemiddeld +0,6%).

De nauwkeurigheid van afgifte door de krachtvoerautomaten werd eens per maand gecontroleerd door een ingestelde hoeveelheid af te draaien en te wegen, en de afgifte werd eventueel gejusteerd door bij een groter dan toegestane afwijking de ingevoerde hoeveelheid bij te stellen. Omdat de afgegeven hoeveelheid brok gebaseerd was op het aantal vijzelomwentelingen, en er tijdens de balansperiode steeds hetzelfde type brok werd gevoerd, waren afwijkingen op de afgegeven hoeveelheid minimaal (niet geregistreerd).

De meetwaaiers voor meting van het ventilatiedebiet waren bij start van de balansperiode voor het laatst gekalibreerd in 2016, na de installatie van het toen nieuwe materiaal, en waren opnieuw gekalibreerd in januari 2022, vier maanden na afloop van de balansperiode. Voor de omrekening van de gemeten pulse frequenties (Hz) naar debiet is de kalibratielijns van januari 2022 gebruikt. Daardoor was het debiet gemiddeld 11% hoger vergeleken met gebruik van de kalibratielijns uit 2016.

2.7 Berekening mineralenbalansen

Principe

Het cumulatieve N-verlies uit de stal tijdens de balansperiode werd afgeleid van een cumulatieve N-massabalans, wekelijks opgesteld voor 52 weken in de periode vanaf 6 oktober 2020 t/m 4 oktober 2021. Een balansweek liep vanaf dinsdag (0:01) t/m de volgende maandag (23:59). Stikstof kan uit de stal alleen verloren gaan door vervluchtiging, en het N-verlies is daarmee het verschil tussen N aanvoer in de stal (vooral met voer) en de N die wordt vastgelegd (vooral in mest en melk). De massabalansen voor de drie mineralen (M_{balans}) werden berekend als:

$$M_{\text{balans}} = M_{\text{drinkwater}} + M_{\text{zaagsel}} + M_{\text{voer}} - M_{\text{drijfmest}} - M_{\text{melk}} - M_{\text{dieren}}$$

Fosfor en K vervluchtigen niet, en alle aanvoer van deze mineralen moet daarom in principe worden teruggevonden in mest, melk, en dieren. Een overschot of tekort op de balansen van deze twee mineralen is indicatief voor de algemene meetfout op de balansberekening en kan worden gebruikt om de N-balans hiervoor te corrigeren. In het voorliggende onderzoek kon een aanzienlijk deel van de K-aanvoer niet worden teruggevonden in de K-afvoer, waardoor de meetfout op de K-balans niet kon worden gebruikt voor correctie van de N-balans (zie paragraaf 4.3). Daarom is voor deze correctie alleen de meetfout op de P-balans gebruikt. Een correctie voor de meetfout kan zowel worden toegepast op de aangevoerde als vastgelegde hoeveelheid mineralen. Omdat in dit onderzoek de grootste meetfout waarschijnlijk werd gerealiseerd op de meting van de in drijfmest vastgelegde hoeveelheden mineralen, is de correctie alleen op de vastlegging in drijfmest toegepast. De hoeveelheid in drijfmest vastgelegde N werd daarbij gecorrigeerd als: $1 - (P\text{-verlies (kg)} / P\text{-excretie (kg)}) * \text{in drijfmest vastgelegde N (kg)}$. De P-excretie werd berekend als: $P_{\text{voer}} - P_{\text{melk}} - P_{\text{dieren}}$. Het N-verlies werd uitgedrukt als percentage van de N-excretie, berekend als: $N_{\text{voer}} - N_{\text{melk}} - N_{\text{dieren}}$.

Het gecorrigeerde N-verlies voor de hele balansperiode werd berekend met en zonder de vier weken dat de koeien niet in de stal aanwezig waren (leegstand). Bij de laatste variant werden de veranderingen per balanspost tijdens deze balansweken in mindering gebracht op het totaal over de hele balansperiode. De afzonderlijke balansposten werden als volgt berekend.

Mineralen in drinkwater en zaagsel

De hoeveelheden mineralen die in de stal werden aangevoerd met drinkwater werden per week berekend als: afgegeven volume drinkwater (l) * minerale gehalten (mg l⁻¹) in watermonsters. De hoeveelheden mineralen in zaagsel werden per week berekend als: gebruikte hoeveelheid zaagsel (kg) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in zaagsel. Bij drinkwater waren de gebruikte minerale gehalten per balansweek het gemiddelde van de gehalten in het monster genomen aan het begin van de betreffende balansweek en aan het begin van de volgende balansweek. Bij zaagsel waren de gebruikte gehalten de gemiddelden van drie zaagselmonsters, verzameld in respectievelijk de eerste balansweek en na vier en acht maanden.

Mineralen in voer

De hoeveelheid mineralen aangevoerd met ruwvoer, enkelvoudig krachtvoer, en mineralenmix werd op twee manieren berekend. Bij de eerste variant werden de hoeveelheden (kg) per week berekend als: gevoerde hoeveelheid PMR (kg) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in PMR-monsters. Bij de tweede variant werden per dag de hoeveelheden mineralen voor iedere PMR-component berekend als: gevoerde hoeveelheid PMR-component * minerale gehalten in PMR-component, en werden de hoeveelheden vervolgens gesommeerd. De gevoerde hoeveelheden van de PMR-componenten werden berekend als: totale hoeveelheid PMR-component geladen in de voermengwagen * (hoeveelheid PMR gevoerd in stal 72 / totale hoeveelheid PMR in voermengwagen). Bij beide varianten werd de bruto gevoerde hoeveelheden PMR gecorrigeerd voor het percentage restvoer. Bij de eerste variant waren de gebruikte minerale gehalten het gemiddelde van de gehalten in het monster genomen aan het begin van de betreffende balansweek en aan het begin van de volgende balansweek. Bij de tweede variant waren de minerale gehalten afkomstig van bemonstering en analyse op het niveau van gehele kuilen of geleverde partijen (enkelvoudig krachtvoer, mineralenmix). Bij de eerste variant was het gehalte nitraat in de PMR-monsters niet gemeten; hiervoor werd gecorrigeerd door de berekende hoeveelheid N-totaal (ex. N-NO₃) per week te vermenigvuldigen met een wekelijkse factor. Deze factor werd met de data van de tweede variant per week berekend als: (hoeveelheid N-NO₃ (kg) / N-Kjeldahl (kg)) + 1.

De hoeveelheid met brok aangevoerde mineralen werd per week op twee manieren berekend. Bij de eerste variant werden de hoeveelheden (kg) berekend als: verstrekte hoeveelheid brok (kg) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in brokmonsters. De gebruikte minerale gehalten per balansweek waren het gemiddelde van de gehalten in het monster genomen aan het begin van de betreffende balansweek en aan het begin van de volgende balansweek. Analysewaarden met een afwijking van meer dan 10% van de vorige meting werden bij de middeling niet meegenomen, tenzij er duidelijk sprake was van een trendbreuk (verandering in de samenstelling van de brok). De aanname hierbij was dat een afwijking van meer dan 10% eerder het gevolg was van een toevallige fout bij de analyse dan van een werkelijke verandering van gehalte. Bij de tweede variant werden de wekelijks verstrekte hoeveelheden vermenigvuldigd met de gemiddelde minerale gehalten van de partij die ca 2,5 week geleden was geleverd. De doorlooptijd van 2,5 week werd geschat op basis van een aangenomen gemiddelde vulling van de silo met vijf ton (maximale vulling tien ton) en de wekelijkse levering van meestal 2 ton.

Mineralen in drijfmest

Het volume (m³) drijfmest in de kelder werd berekend als: mestpeil (m) * oppervlakte keldervloer (m²). De volumaire dichtheid van gemixte mestmonsters is normaliter 1,00 kg l⁻¹, maar kan in de mestlaag in de kelder lager zijn dan 1,00 als gevolg van gasproductie in de mest. Op de tijdstippen dat de kelder was gemixt, was dit gas grotendeels ontweken en was de volumaire dichtheid weer rond 1,00 kg l⁻¹. De massa drijfmest in de kelder werd daardoor het meest nauwkeurig gemeten als de mest kort daarvoor was gemixt. Het gemeten mestvolume in de kelder gaf een onderschatting van de totale mestproductie, omdat de koeien dagelijks ca. 1,5 uur (6% van de tijd) buiten de stal waren om te worden gemolken. Op basis van de frequentiemetingen van de excretie van urine en feces voor en na het melken werd geschat hoeveel urine, feces, en drijfmest er relatief buiten de stal werd uitgescheiden, en de drijfmestmestproductie werd vervolgens voor ieder balanstijdstip met dit percentage vermeerderd.

De hoeveelheid vastgelegde mineralen (kg) in drijfmest in de kelder werd per week berekend als: hoeveelheid in de kelder aanwezige drijfmest (l) * dichtheid van het drijfmestmonster (kg l⁻¹) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in drijfmestmonsters. De gebruikte minerale gehalten per balansweek waren het gemiddelde van de gehalten in het monster genomen aan het begin van de betreffende balansweek en aan het begin van de volgende balansweek. Analysewaarden die meer dan 10% afweken van de vorige meting werden bij middeling niet meegenomen, tenzij er sprake was van een trendbreuk of wanneer de afwijking optrad na het gedeeltelijk legen van de kelder. De hoeveelheid verwijderde mineralen (kg) bij het verwijderen van een partij mest uit de kelder werd berekend als: verwijderde mest (kg) * minerale gehalten in het genomen drijfmestmonster (g kg⁻¹). Op twee van de zes tijdstippen waarop drijfmest uit de kelder werd verwijderd, werd deze niet door de vrachtwagen bemonsterd. De hoeveelheid verwijderde mineralen werd voor deze tijdstippen berekend op basis van het mestpeil en de mestsamenstelling gemeten kort voor en kort na het verwijderen.

De totale cumulatieve hoeveelheid in mest vastgelegde mineralen (kg) werd per week berekend door het optellen van de hoeveelheid mineralen in de kelder en de hoeveelheid eerder uit de kelder verwijderde mineralen, en het totaal te vermenigvuldigen met een factor voor de drijfmestproductie buiten de stal.

Mineralen in melk

De hoeveelheid in melk vastgelegde mineralen werd per week op twee manieren berekend. Bij de eerste variant werd de hoeveelheid mineralen (kg) berekend als: geproduceerde melk (kg) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in wekelijks genomen (verzamel)melkmonsters. Bij de tweede variant werd alleen de vastgelegde hoeveelheid N anders berekend, als: geproduceerde melk (kg) * gewogen N-gehalte in de melk (g kg⁻¹) tijdens de wekelijkse melkcontrole. Het N-gehalte in de melk bestond uit N in melkeiwit en in melkureum. Het (gewogen) N-gehalte uit melkeiwit werd per wekelijkse melkcontrole berekend door de melkgift per koe (som van ochtend- en avondmelking) te vermenigvuldigen met het gewogen eiwitgehalte in de twee genomen melkmonsters, de tijdens de melkcontrole geproduceerde hoeveelheden melk en eiwit van alle koeien in stal 72 te sommeren, de gesommeerde eiwitproductie te delen door de gesommeerde melkproductie, en vervolgens het berekende eiwitgehalte te vermenigvuldigen met het N-gehalte in melkeiwit (15,7%) (Jones, 1931). Het gewogen N-gehalte uit melkureum werd op dezelfde manier berekend als voor het eiwit, behalve dat het ureumgehalte werd vermenigvuldigd met het N-gehalte in ureum (46,6%). Bij de tweede variant werden de hoeveelheden P en K op dezelfde manier berekend als bij de eerste variant, omdat bij de melkcontrole P en K niet werden gemeten.

Bij beide varianten waren de gebruikte minerale gehalten het gemiddelde van de gehalten in het monster van de melkcontrole tijdens de betreffende balansweek en de volgende balansweek. Bij beide varianten werden analysewaarden van P- en K-gehalte die meer dan 10% afweken van de vorige meting bij de middeling niet meegenomen, en bij de eerste variant werd dit ook voor het N-gehalte gedaan. Naast het gewogen eiwitgehalte werden voor iedere melkcontrole ook het gewogen vetgehalte en lactosegehalte op dezelfde manier berekend.

Mineralen in dieren

Vastlegging (of mobilisatie) van mineralen in de kudde werd per week berekend als: (verandering in) totaal diergewicht (kg) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in lichaamsweefsel. De gebruikte minerale gehalten voor N, P, en K waren respectievelijk 22,5, 7,4, en 2,0 g kg⁻¹ (CBS, 2022).

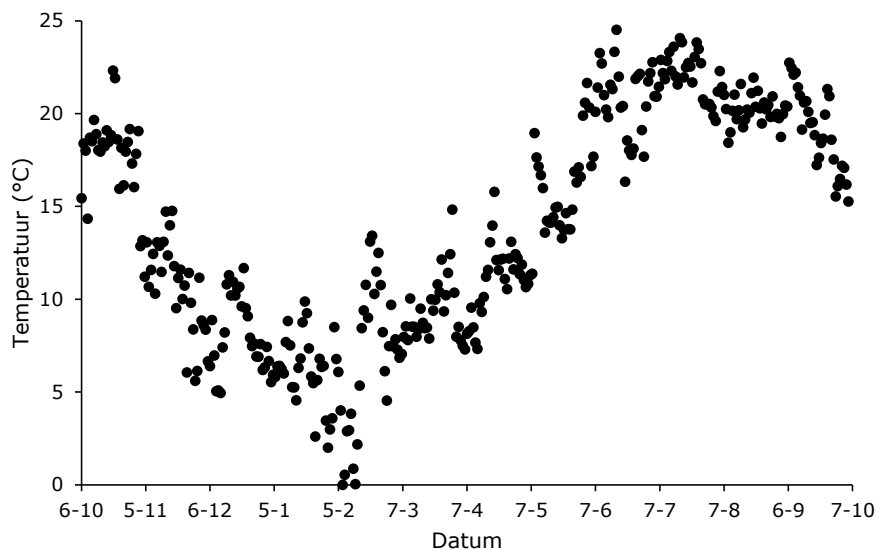
2.8 Samenstelling van het stikstofverlies

De samenstelling van het totale N-verlies over de hele balansperiode werd vastgesteld door de NH₃- en N₂O-emissie te meten en deze verliezen op het totale N-verlies in mindering te brengen. De restpost bestond dan uit N₂ en NO_x. De dagelijkse NH₃- en N₂O-emissies werden over de balansperiode gemiddeld, waarbij de gegevens voor periodes met missende meetdagen en periodes met leegstand niet werden meegenomen. Periodes met missende meetdagen waren 6 oktober t/m 2 november 2020 en 27 april t/m 17 mei 2021. Om N-verliezen op basis van emissiemetingen en N-verlies op basis van de N-balans op elkaar te laten aansluiten, werden de gegevens van de N-balans ook gecorrigeerd voor de periodes met missende meetdagen en de periodes met leegstand. Deze correctie werd uitgevoerd door de veranderingen van balansposten tijdens deze periodes in mindering te brengen op het totaal van de balansposten over de hele balansperiode. Deze afgestemde balansperiode duurde 287 dagen. De relatieve N-emissie per N-vorm (%) werd berekend door de hoeveelheid N-emissie per N-vorm (kg) uit te drukken als percentage van de N-excretie (kg) in de afgestemde balansperiode. Vervolgens werden de percentages per N-vorm uitgedrukt als aandeel van het totale percentage N-verlies. Tenslotte werden deze aandelen vermenigvuldigd met het totale percentage N-verlies over de balansperiode inclusief de periodes met missende emissiegegevens, maar gecorrigeerd voor de vier weken leegstand. Deze periode duurde 336 dagen.

3 Resultaten

3.1 Staltemperatuur

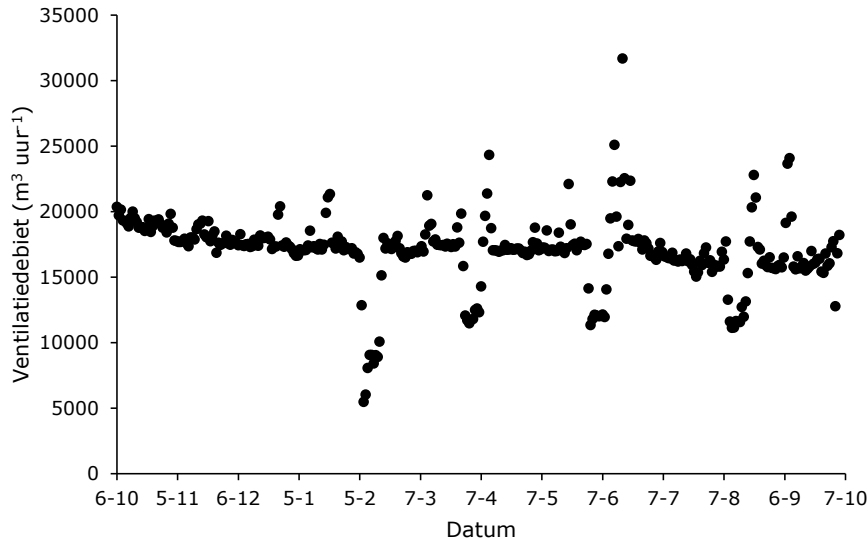
De dagelijks gemiddelde temperatuur in stal 72 varieerde in de balansperiode van 0,0 tot 24,5 °C, was inclusief de vier weken leegstand gemiddeld 14,0°C, en zonder de vier weken leegstand gemiddeld 13,9° C (Fig. 5). De temperatuur daalde na start van de balansperiode tot een laagste punt begin februari, nam daarna toe tot een piek in juni/juli, en nam daarna weer af tot aan het einde van de balansperiode.



Figuur 5 *Dagelijks gemiddelde temperatuur in stal 72 tijdens de balansperiode.*

3.2 Ventilatie-debiet

Het dagelijks gemiddelde ventilatie-debiet van stal 72 varieerde tijdens de balansperiode van 5485 tot 31696 m³ uur⁻¹, was inclusief de vier weken leegstand gemiddeld 17004 m³ uur⁻¹, en was zonder de vier weken leegstand gemiddeld 17305 m³ uur⁻¹ (Fig. 6). Over de balansperiode vertoonde het debiet een licht dalende trend. Tijdens vier periodes van 1-2 weken was het debiet tijdelijk lager ingesteld ten behoeve van ander onderzoek en rond deze momenten waren er relatief grote fluctuaties in debiet.

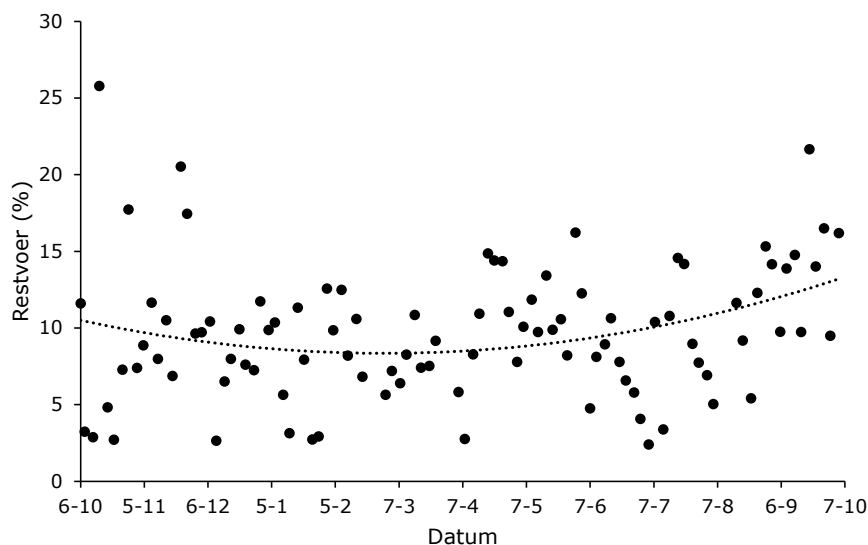


Figuur 6 Dagelijks gemiddelde ventilatie-debiet van stal 72 tijdens de balansperiode.

3.3 Rantsoen

Partial mixed ration

Het percentage restvoer in stal 72 (op maandag en donderdag) varieerde tijdens de balansperiode van 2,4% tot 25,8%, en was gemiddeld 9,7% (Fig. 7). Er was een tweedegraads polynome relatie tussen percentage restvoer en dagnr. ($P = 0,02$) met een verklaarde variantie van 7%.



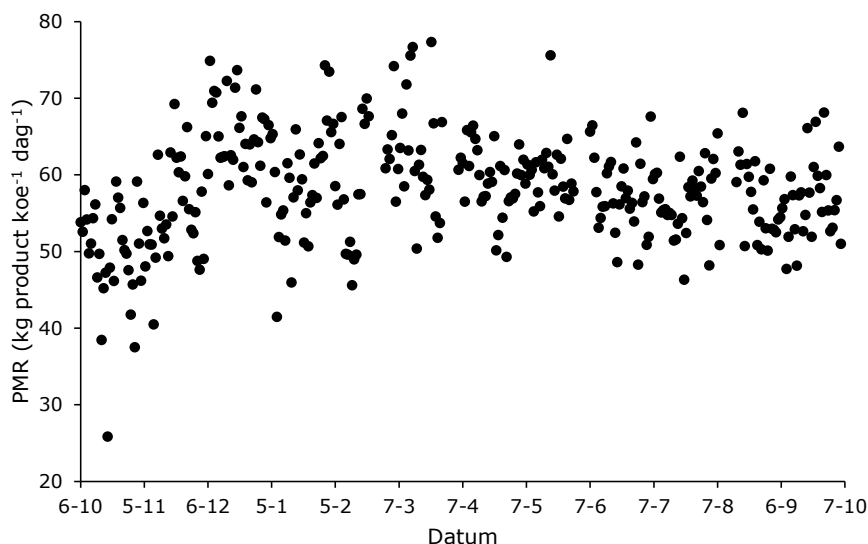
Figuur 7 Percentage restvoer van het PMR gevoerd op maandag en donderdag in stal 72 tijdens de balansperiode.

Het dagelijkse restvoer was niet gecorreleerd met de dagelijkse gevoerde hoeveelheid PMR, dagelijkse staltemperatuur, dagelijkse melkproductie, het dagelijkse koegewicht, of het dagelijkse ventilatie-debiet ($P > 0,05$). Omdat het percentage verklaarde variantie van de relatie tussen percentage restvoer en dagnr. erg laag was, en de relatie daardoor weinig praktische betekenis had, werd deze niet gebruikt. In plaats daarvan werd voor iedere balansweek een gemiddelde toegepast, voor de eerste twee weken het gemiddelde van de zeven restvoermetingen per week, en vanaf de tweede week het gemiddelde van drie metingen (maandag, donderdag, maandag), waarbij de eerste maandag de laatste dag van de vorige balansweek was.

Op basis van de kalibratie van 19 januari 2021 werd vastgesteld dat bij het gemiddelde belastingniveau van de voermengwagen bij het uitdraaien van het PMR bij stal 72 (1381 kg) de uitgedraaide hoeveelheid met 1% werd overschat. De geregistreerde hoeveelheden uitgedraaide PMR werden hiervoor niet gecorrigeerd.

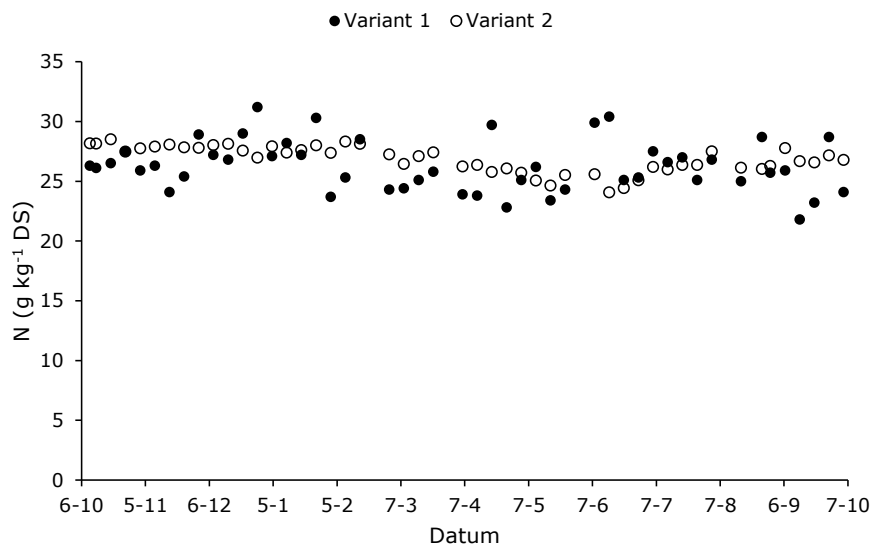
Uit de bepaling van de DS-gehalten van het PMR en restvoer bleek dat het gemiddelde DS-gehalte van het restvoer (33,5%) niet afweek van het gemiddelde DS-gehalte van het vers gevoerde PMR (33,3%) (restvoervercentage 11,2%; $n = 4$ metingen). Bij de balansberekeningen werd daarom niet gecorrigeerd voor een verandering van DS-gehalte.

De bruto (excl. correcties) dagelijks gevoerde hoeveelheid PMR in stal 72 varieerde tijdens de balansperiode van 25,9 tot 77,3 kg product koe⁻¹ dag⁻¹, gemiddeld 58,1 kg (Fig. 8). De bruto dagelijks met PMR gevoerde hoeveelheid DS varieerde, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag (variant 1), van 12,9 tot 26,5 kg koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 19,4 kg. De netto dagelijks gevoerde hoeveelheid PMR en DS, gecorrigeerd voor een voerrest van gemiddeld 9,7%, was respectievelijk 52,5 kg product en 17,5 kg DS per koe. Het aandeel graskuil in het ruwvoerdeel van het PMR (graskuil en snijmaïskuil), op basis van de dagelijkse samenstelling van het PMR (variant 2), varieerde op DS-basis van 61% tot 75%, en was gemiddeld 68%.



Figuur 8 Dagelijkse bruto gevoerde hoeveelheid PMR in stal 72 tijdens de balansperiode.

Bij vergelijking van de samenstelling van het PMR tussen variant 1 en variant 2, voor de dag van de wekelijks genomen plukmonsters bij variant 1, bleek dat het N-gehalte (ex. nitraat) in de DS bij variant 2 gemiddeld 2% hoger was dan bij variant 1 (Fig. 9). Het P- en K-gehalte waren respectievelijk gemiddeld 1% hoger en 6% lager.

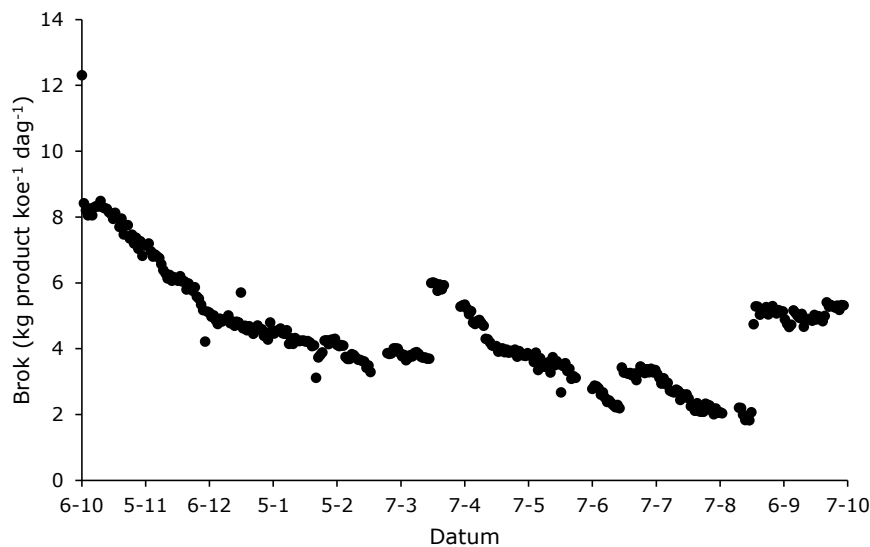


Figuur 9 Stikstofgehalte (ex. nitraat) in het PMR gevoerd in stal 72 bij twee combinaties van monsternamen en analyse, variant 1 en variant 2, voor de dag van de wekelijks genomen plukmonsters bij variant 1.

Het ruw eiwitgehalte van het PMR ($N\text{-Kjeldahl} \times 6,25$) varieerde, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag (variant 1), van 136 tot 195 g RE kg⁻¹ DS, en was gemiddeld 164 g RE kg⁻¹ DS. Met het PMR werd, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag, bruto gemiddeld 3,19 kg RE dier⁻¹ dag⁻¹ verstrekt.

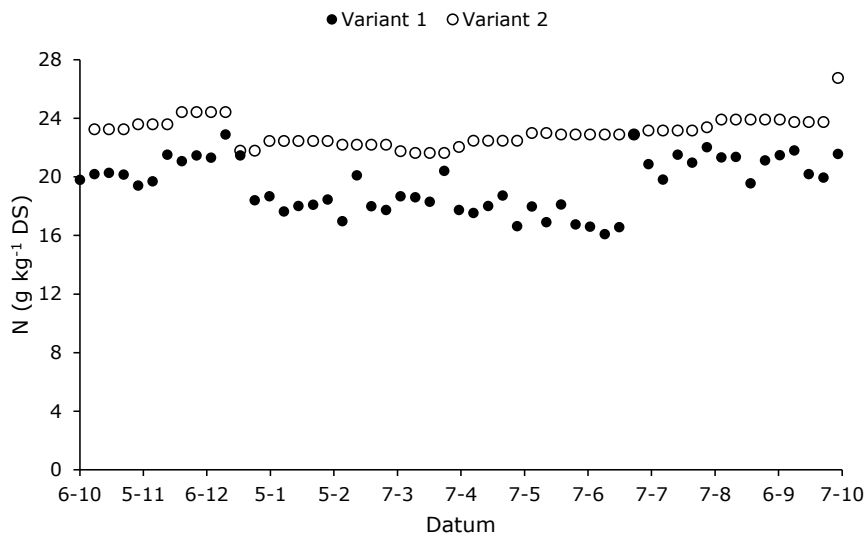
Brok

De dagelijks verstrekte hoeveelheid brok aan de koeien van stal 72 varieerde van 1,8 tot 12,3 kg product koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 4,5 kg (Fig. 10). De hoeveelheid verstrekte brok nam in de balansperiode aanzienlijk af, maar werd enkele keren tussendoor, bij koewisselingen, tijdelijk verhoogd.



Figuur 10 Dagelijks verstrekte brok aan de koeien in stal 72 tijdens de balansperiode.

Bij vergelijking van de samenstelling van de brok op basis van de twee verschillende combinaties van monsternamen en analyse, variant 1 en variant 2, op de dag van de wekelijks genomen monsters bij variant 1, bleek dat het N-gehalte in de DS bij variant 2 gemiddeld 18% hoger was vergeleken met variant 1 (Fig. 11), en het P- en K-gehalte respectievelijk gemiddeld 2% hoger en 2% lager.



Figuur 11 Stikstofgehalte in brok verstrekt in stal 72 bij twee combinaties van monsternamen en analyse, variant 1 en variant 2, voor de dag van de wekelijks genomen monsters bij variant 1.

Het ruw eiwitgehalte (N-Kjeldahl * 6,25) van de verstrekte brok varieerde in de wekelijks genomen monsters (variant 1) van 101 tot 143 g kg⁻¹ DS, en was gemiddeld 122 g RE kg⁻¹ DS. Met brok werd, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag, gemiddeld 0,51 kg RE dier⁻¹ dag⁻¹ verstrekt.

Hele rantsoen

Met het hele rantsoen (PMR en brok) werd, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag (variant 1), bruto 16,6 tot 31,8 kg DS dier⁻¹ dag⁻¹ gevoerd, gemiddeld 23,5 kg, en bruto 2,73 tot 4,88 kg RE dier⁻¹ dag⁻¹, gemiddeld 3,70 kg. Van de bruto eiwitgift werd 86% verstrekt met PMR en 14% met brok. Het (gewogen) eiwitgehalte van het hele bruto rantsoen (PMR en brok) varieerde, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag, van 136 tot 182 g RE kg⁻¹ DS, en was over de balansperiode gemiddeld 157 g RE kg⁻¹ DS.

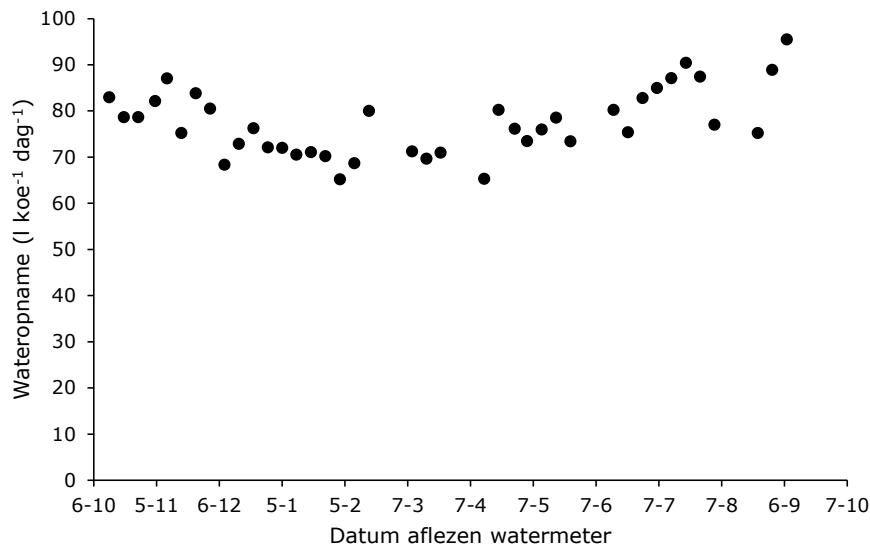
3.4 Drinkwater en zaagsel

Drinkwater

De wateropname uit de waterbak (inclusief morsen) in stal 72 varieerde tijdens de balansperiode van 65 tot 96 l koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 78 l koe⁻¹ dag⁻¹ (Fig. 12). De NPK-gehalten van het drinkwater waren erg laag en varieerden voor N-totaal van 9 tot 45 mg l⁻¹ product. Het P- en K-gehalte was bijna altijd lager dan de detectiegrens van 1 mg l⁻¹.

Zaagsel

Tijdens de balansperiode werd dagelijks een half pak zaagsel (ca. 8,6 kg product) in de ligboxen gestrooid. De NPK-gehalten in zaagsel waren erg laag en gemiddeld (n = 3) respectievelijk 581 mg N, 107 mg P, en 504 mg K kg⁻¹ product.

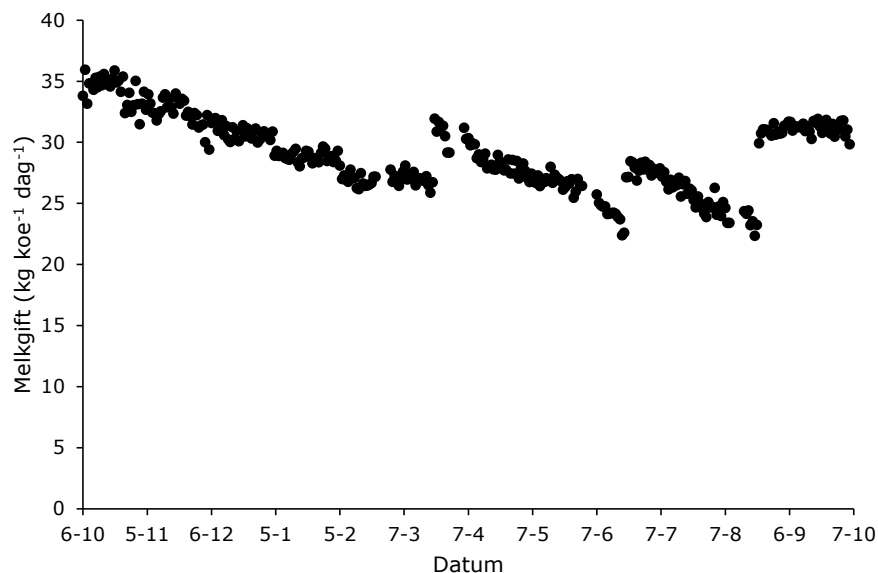


Figuur 12 *Dagelijkse wateropname (inclusief morsen) door de koeien in stal 72 tijdens de balansperiode, gemiddeld per balansweek.*

3.5 Melkproductie en melksamenstelling

Melkgift

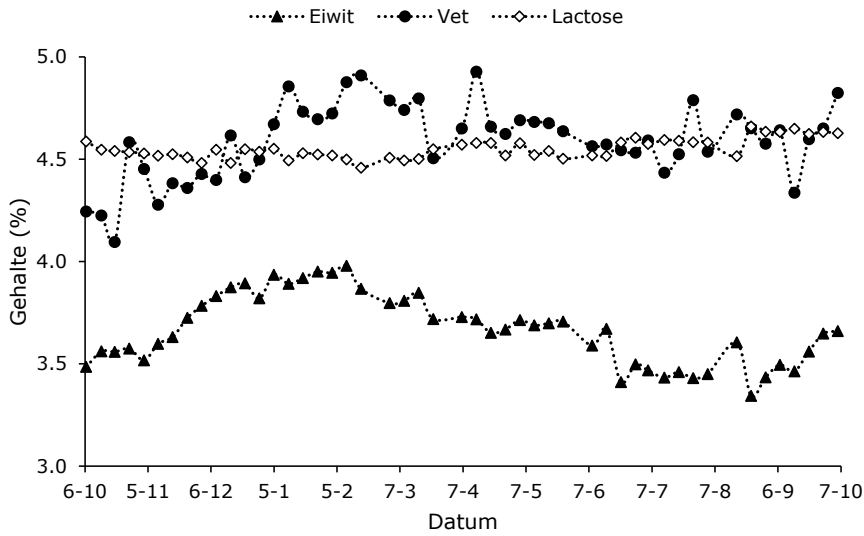
De melkgift van de koeien varieerde van 22,4 tot 36,0 kg koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 29,1 kg (Fig. 13). De melkgift vertoonde een dalende trend tijdens een groot deel van de balansperiode, tot eind augustus, en lag daarna op een hoger en stabiel niveau tot aan het einde van de balansperiode. De tussentijdse toenames waren het gevolg van de koewisselingen.



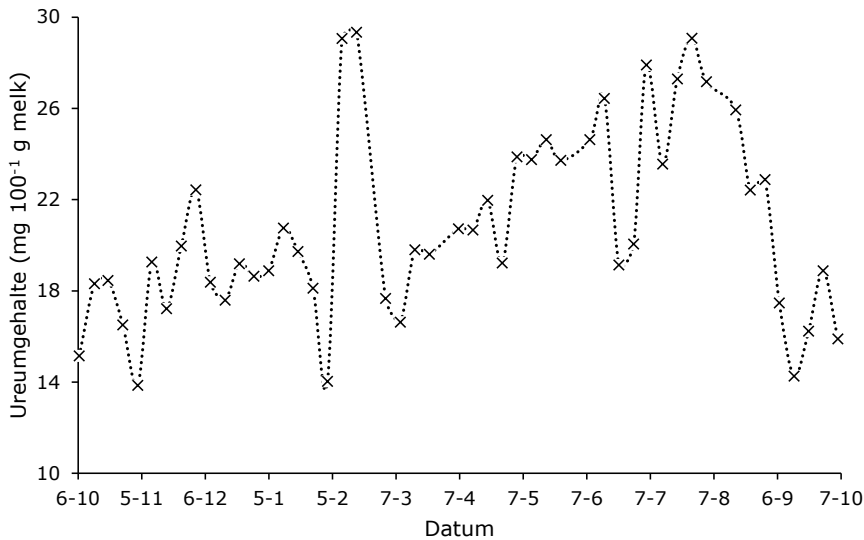
Figuur 13 *Dagelijkse melkgift van de koeien in stal 72 tijdens de balansperiode.*

Melksamenstelling

Het eiwitgehalte van de melk, gemeten met NIR, varieerde van 3,34% tot 3,98%, en was gemiddeld 3,66% (Fig. 14). Het vetgehalte varieerde van 4,10% tot 4,93%, en was gemiddeld 4,59%. Het lactosegehalte varieerde van 4,46% tot 4,66%, en was gemiddeld 4,55%. Het ureumgehalte varieerde van 13,9 tot 29,3 mg 100⁻¹ ml, en was gemiddeld 20,7 mg (Fig. 15).

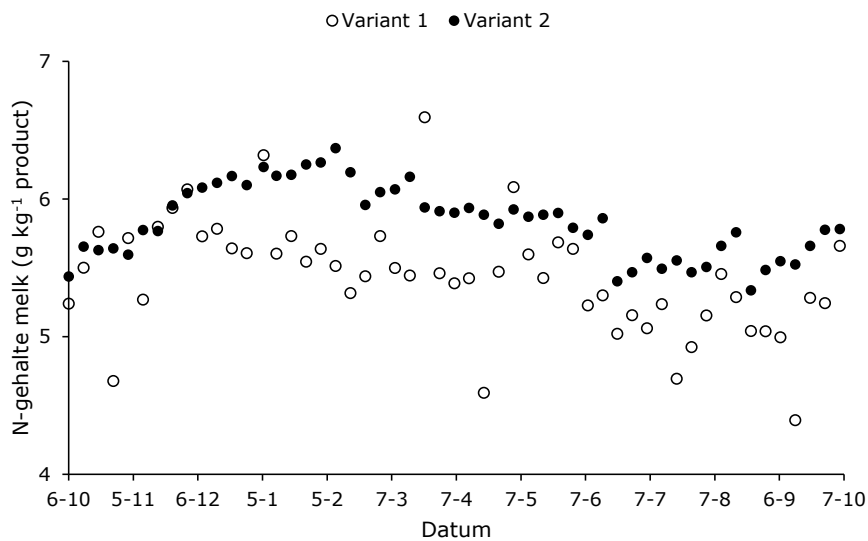


Figuur 14 Eiwit-, vet-, en lactosegehalte in de melk van de koeien in stal 72 tijdens de balansperiode, gewogen gemiddelden van de wekelijkse melkcontroles.



Figuur 15 Ureumgehalte in de melk van de koeien in stal 72 tijdens de balansperiode, gewogen gemiddelden van de wekelijkse melkcontroles.

Het N-gehalte in de melk (in eiwit en ureum) was bij variant 1 gemiddeld 7% lager dan bij variant 2 (Fig. 16), en het berekende eiwitgehalte (excl. ureum) was ook 7% lager. Gecorrigeerd hiervoor was het gemiddelde eiwitgehalte in de melk 3,40% bij variant 1 vergeleken met 3,66% bij variant 2 (zie boven). Bij bovenstaande vergelijking is het N-gehalte van de verzamelmonsters (stallen 60, 61, 70, en 72) vergeleken met het gewogen N-gehalte op basis van gemeten eiwitgehalte per koe in deze vier stallen tijdens dezelfde melkcontrole.

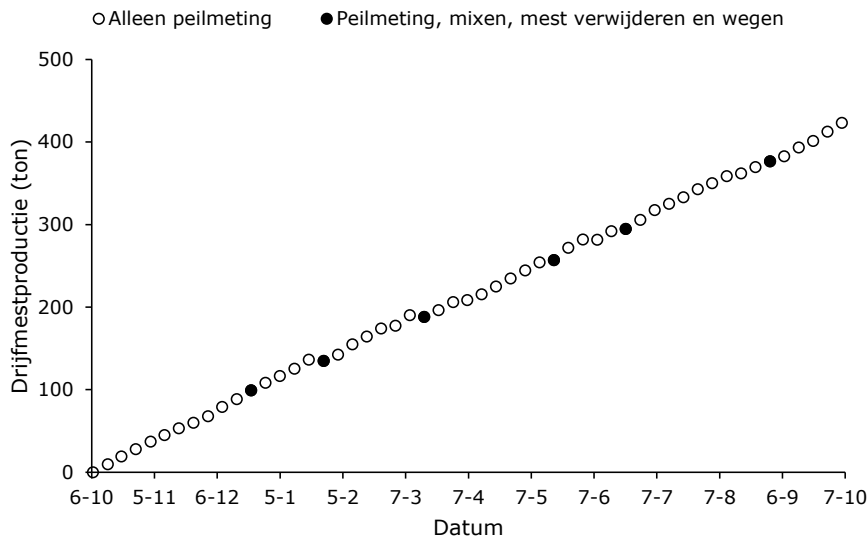


Figuur 16 Stikstofgehalte in de melk van de koeien tijdens de balansperiode, bij twee combinaties van monsternamen en analyse, variant 1 en variant 2, voor de tijdstippen van de wekelijkse melkcontrole.

3.6 Drijfmestproductie en drijfmestsamenstelling

Drijfmestproductie in de stal

Het mestpeil in de kelder, gemiddeld over de 53 peilmetingen tijdens de balansperiode, was 74 cm. Daarmee was de kelder gemiddeld voor 55% gevuld (= 74 / 134 cm). De op basis van de peilmeting berekende massa drijfmest in de kelder nam in de periodes tussen legingen regelmatig toe (Fig. 17).



Figuur 17 Toename van de hoeveelheid geproduceerde drijfmest in stal 72 tijdens de balansperiode, cumulatief weergegeven inclusief verwijderde hoeveelheden.

Op de tijdstippen dat de mest in de kelder werd gemixt en de kelder gedeeltelijk werd geleegd, was er enkele keren een onderbreking van de trend, met geen of een lager dan gebruikelijke toename vergeleken met de vorige meting. De oorzaak hiervan was een overschatting van de volumaire dichtheid van de mestlaag in de kelder op de tijdstippen zonder mixen, als gevolg van gasvorming in de mest. Bij mixen werd het gas grotendeels uit de mest gemixt, waardoor de dichtheid toenam richting de gemiddelde waarde van 0,99 kg l⁻¹ (± 0,01) (Tabel 1). Drijfmest werd uit de kelder gepompt op 21 december (36,9 ton), 26 januari (84,8 ton), 15 maart (60,4 ton), 18 mei (25,0 ton), 21 juni (67,3 ton), en 25 augustus (69,7 ton), in totaal 344 ton, of 91% van de drijfmestproductie in de stal in de periode van 6 oktober 2020 t/m 31 augustus 2021.

De drijfmestproductie per koe per dag, gecorrigeerd voor leegstand, varieerde tussen de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen van 63 kg (van 22 december 2020 t/m 26 januari 2021) tot 85 kg (van 18 mei tot 22 juni 2021), en was gemiddeld 78 kg over de periode van 6 oktober 2020 t/m 31 augustus 2021. De mestproductie in de stal was licht overschat als gevolg van het morsen van water door de koeien bij het drinken. Dit water kwam rechtstreeks in de kelder maar was niet uitgescheiden met urine of feces. Er kwam geen regenwater van het dak of erf in de kelder van stal 72.

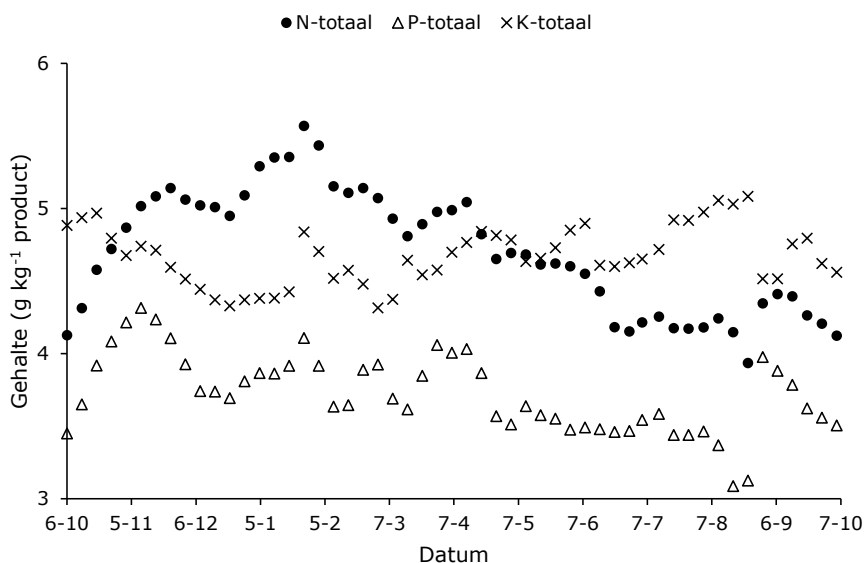
Drijfmestproductie buiten de stal

De koeien waren ten behoeve van het melken dagelijks ca 1,5 uur of 6% van de tijd buiten de stal. Uit de frequentiemetingen bleek dat in het uur voor het verlaten van de stal de frequentie van urine- of fecesuitscheiding van de 16 koeien (respectievelijk 7,4 en 13,0 keer per uur) niet hoger was dan in het uur daarvoor (respectievelijk 9,2 en 14,0 keer per uur). Hieruit werd geconcludeerd dat de koeien bij het verlaten van de stal niet relatief meer urine of feces uitscheidden (en daardoor mogelijk minder buiten de stal). In het uur na terugkeer in de stal was het aantal urinaties 43% lager dan in het uur voor het verlaten van de stal, en het aantal fecesuitscheidingen 52% lager (n = 3). In de twee uur daarna bleef de frequentie van uitscheiding aanzienlijk lager dan voor het melken.

Op basis van de aanname dat op de helft van de tijd buiten de stal de frequentie van uitscheiding van voor het melken van toepassing was, en op de andere helft van de tijd de frequentie van na het melken, werd geschat dat de totale drijfmestproductie (in de stal + buiten de stal) niet 6% hoger was dan in de stal, maar $(6 * 0,4 * 0,79 + 6 * 0,6 * 0,74) = 4,6\%$ hoger, bij aanname dat 40% van het drijfmestgewicht met urine werd uitgescheiden en 60% met feces (De Boer, 2023a). Inclusief de productie buiten de stal was de totale drijfmestproductie 82 kg per koe per dag, in de periode van 6 oktober 2020 t/m 31 augustus 2021 en gecorrigeerd voor de vier weken leegstand.

Drijfmestsamenstelling in de stal

Het verloop van de N-, P-, en K-gehalten in drijfmest in de kelder vertoonde tijdens de balansperiode kortetermijn trends, waarbij gehalten toenamen, afnamen of relatief stabiel bleven (Fig. 18). Een negatieve trend in een gehalte kan wijzen op dalende aanvoer van het betreffende mineraal met het voer, maar ook op ontmenging van de drijfmest in de kelder. Een overzicht van de variatie in gehalten en overige eigenschappen van de drijfmest in de kelder is gegeven in Tabel 1.



Figuur 18 Verloop van de gehalten N-, P-, en K-totaal in drijfmest in de kelder van stal 72 tijdens de balansperiode. Het P-gehalte is omwille van de weergave vermenigvuldigd met factor 5.

Tabel 1 Eigenschappen van drijfmest in de kelder van stal 72 tijdens de balansperiode.

Eigenschap	Eenheid	Parameter					n =
		Gemiddelde	SD ¹⁾	Mediaan	Min.	Max.	
Dichtheid	kg l ⁻¹	0,99	0,01	0,99	0,97	1,01	31
pH	-	7,2	0,1	7,1	6,9	7,4	27
EC	mS cm ⁻¹	17,9	2,4	18,5	10,3	21,6	27
DS	g kg ⁻¹ vers	108	6	108	92	121	40
OS	% van DS	79	1	80	77	81	18
N-totaal	g kg ⁻¹ vers	4,69	0,43	4,73	3,89	5,57	53
P-totaal	g kg ⁻¹ vers	0,74	0,06	0,74	0,62	0,88	53
K-totaal	g kg ⁻¹ vers	4,64	0,26	4,64	4,15	5,18	53
N-NH ₄	g kg ⁻¹ vers	1,75	0,13	1,75	1,52	2,01	27
N-NH ₄	% van N-totaal	38	3	38	31	45	27
C-totaal	g kg ⁻¹ vers	44	3	44	37	49	27
C-organisch	% van C-totaal	93	3	92	88	97	13

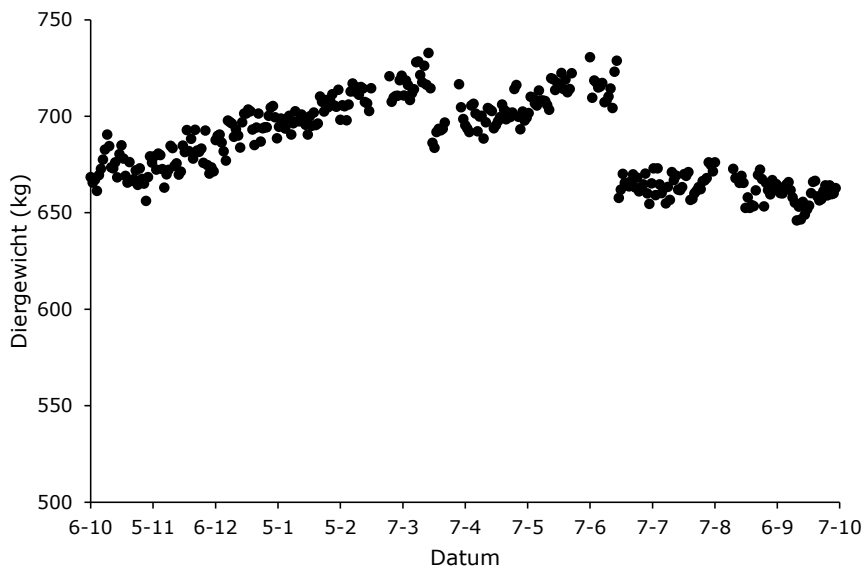
¹⁾ Standaardafwijking

Drijfmestsamenstelling buiten de stal

Bij rundvee wordt met urine ca. 50% van de N en 0% van de P uitgescheiden, en met feces ca. 50% van de N en 100% van de P (De Boer, 2023a). Bij aanname dat voor de helft van de tijd buiten de stal de frequentie van excretie van voor het melken van toepassing was, en voor de andere helft van de tijd de frequentie van na het melken, werd geschat dat de totale P-uitscheiding (in de stal + buiten de stal) 4,4% hoger was dan alleen in de stal, iets lager dan de extra N-uitscheiding van 4,6%. Met deze kleine verschuiving in N/P-verhouding is geen rekening gehouden bij de balansberekeningen.

3.7 Koegewicht

Het dagelijks gemiddelde gewicht van de koeien varieerde tijdens de balansperiode van 646 tot 733 kg, en was gemiddeld 687 kg (Fig. 19). De twee abrupte dalingen zijn het gevolg van de vervanging van een deel van de koeien op 22 maart (9 koeien) en 21 juni (9 koeien). Bij de vervanging op 23 augustus (9 koeien) is een dergelijke daling niet zichtbaar.



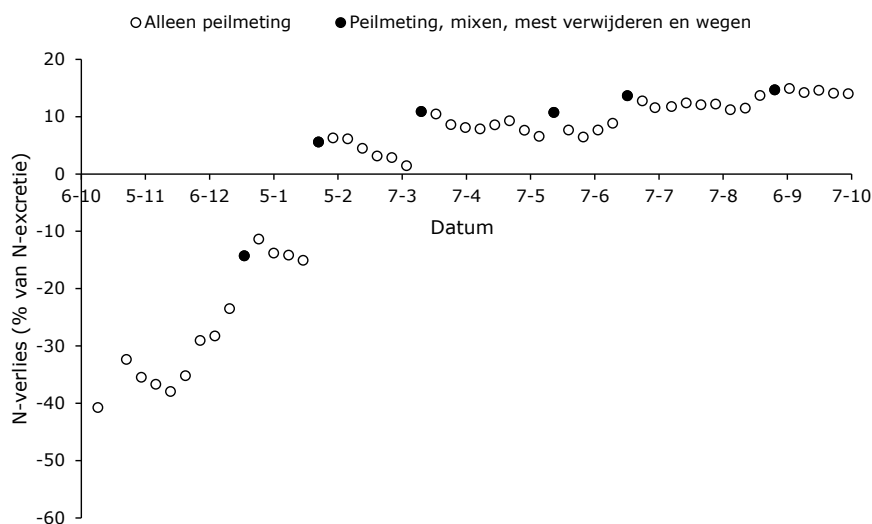
Figuur 19 *Dagelijks gemiddelde gewicht van de koeien in stal 72 tijdens de balansperiode.*

Het gewicht van de kudde in stal 72 nam vanaf 6 oktober 2020 t/m 21 maart 2021 (eerste vervanging) toe met 736 kg (+7%), nam vanaf 22 maart t/m 20 juni (tweede vervanging) toe met 681 kg (+6%), nam vanaf 21 juni t/m 22 augustus af met 83 kg (-1%), en nam vanaf 23 augustus t/m 4 oktober toe met 34 kg (+0%).

3.8 Mineralenbalansen

Stikstofbalans, eerste variant zonder correctie voor de meetfout

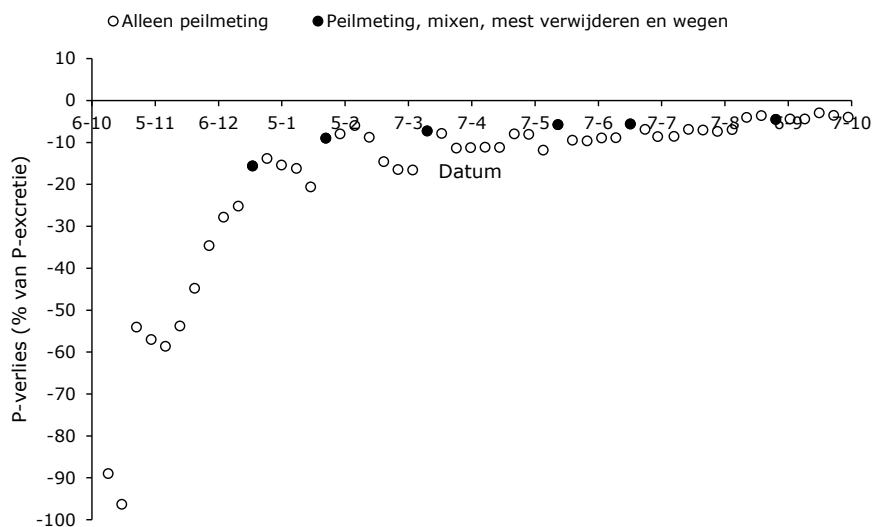
Bij de eerste variant van de N-balans, op basis van nat-chemische analyse van eens per week genomen monsters, varieerde het N-verlies, als percentage van de N-excretie en zonder correctie voor de meetfout, van -60% op 20 oktober 2020 tot 14-15% vanaf 31 augustus 2021 (Fig. 20). Aan het einde van de balansperiode was het ongecorrigeerde N-verlies 14%. Het ongecorrigeerde N-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, de meest betrouwbare metingen, nam toe van een verlies van -14% op 22 december 2020 tot 15% op 31 augustus 2021, het laatste tijdstip met dit type meting. Na mixen, mest verwijderen en wegen was er op de volgende tijdstippen meestal een (ogenschijnlijke) daling van het N-verlies. Deze daling werd veroorzaakt door het uitzetten van de drijfmest in de kelder, waardoor de hoeveelheid in mest vastgelegde N werd overschat en het N-verlies onderschat. Na de meting op 31 augustus leek dit effect beperkt.



Figuur 20 Verandering van het N-verlies uit stal 72 tijdens de balansperiode bij de eerste variant van de N-balans, zonder correctie voor de meetfout.

Fosforbalans, eerste variant zonder correctie voor de meetfout

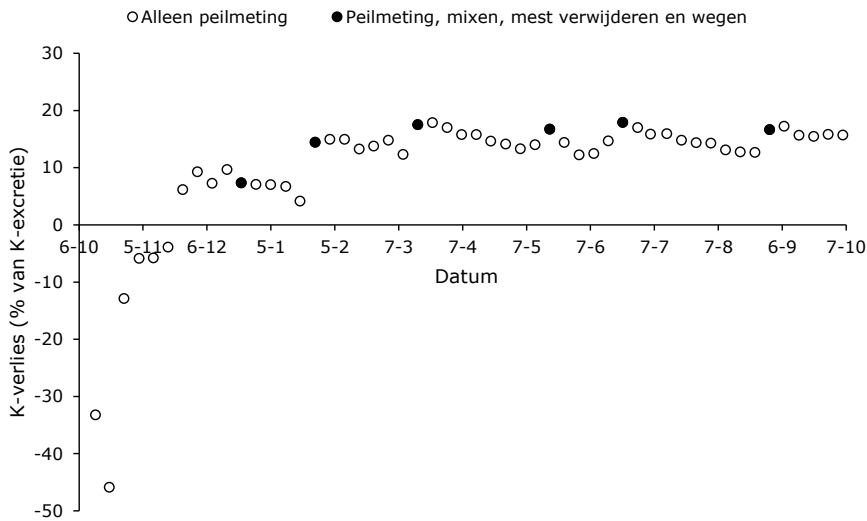
Bij de eerste variant van de P-balans varieerde het P-`verlies' (meetfout), als percentage van de P-excretie, van -89% op 13 oktober 2020 tot -4% vanaf 17 augustus 2021 (Fig. 21). Aan het einde van de balansperiode was het P-verlies -4%. Het P-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, varieerde van -16% op 22 december 2020 tot -4% op 31 augustus 2021, het laatste tijdstip met dit type meting.



Figuur 21 Verandering van het P-`verlies' uit stal 72 (meetfout) tijdens de balansperiode bij de eerste variant van de P-balans.

Kaliumbalans, eerste variant zonder correctie voor de meetfout

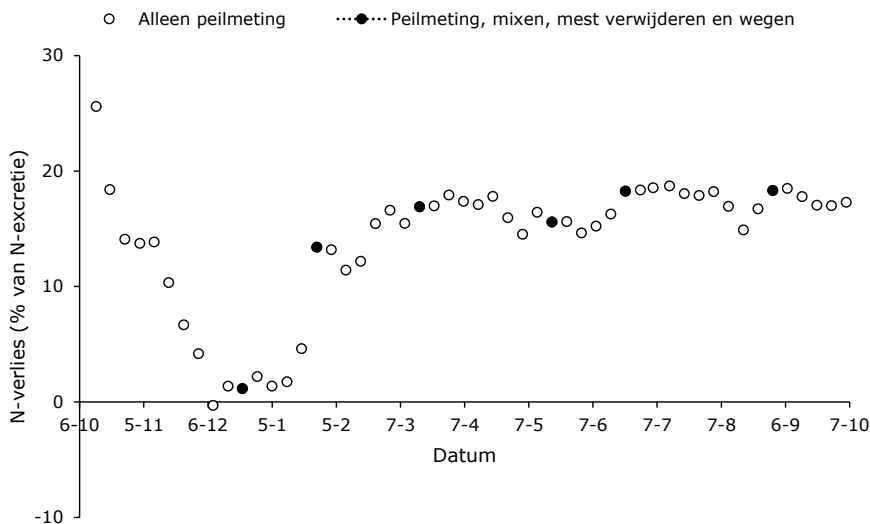
Bij de eerste variant van de K-balans varieerde het K-'verlies' (meetfout) als percentage van de K-excretie, van -46% op 20 oktober 2020 tot 18% op 22 juni 2021 (Fig. 22). Aan het einde van de balansperiode was het K-verlies 16%. Het K-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, lag vanaf 16 maart op een niveau van 17-18%.



Figuur 22 Verandering van het K-'verlies' uit stal 72 (meetfout) tijdens de balansperiode bij de eerste variant van de K-balans.

Stikstofbalans, eerste variant gecorrigeerd voor de meetfout

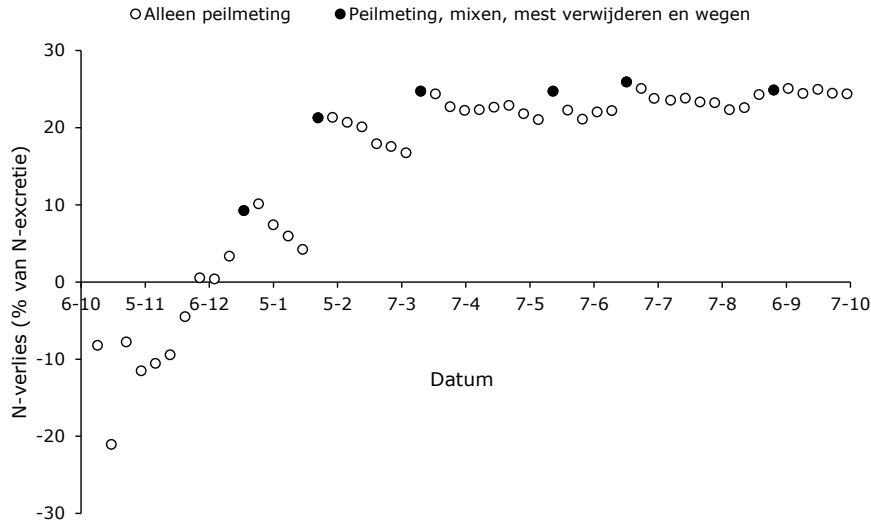
Na correctie van de eerste variant van de N-balans, op basis van de meetfout op de P-balans, varieerde het N-verlies, als percentage van de N-excretie, van 0% op 8 december 2020 tot 26% op 13 oktober 2020, en was deze aan het einde van de balansperiode 17% (17,3%) (Fig. 23). Na uitsluiting van de vier weken leegstand was het gecorrigeerde N-verlies aan het einde van de balansperiode 16,6% van de N-excretie. Het gecorrigeerde N-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, nam toe van een verlies van 1% op 22 december 2020 tot 18% op 31 augustus 2021, het laatste tijdstip met dit type meting.



Figuur 23 Verandering van het N-verlies uit stal 72 tijdens de balansperiode bij de eerste variant van de N-balans, na correctie op basis van de meetfout op de P-balans.

Stikstofbalans, tweede variant zonder correctie voor de meetfout

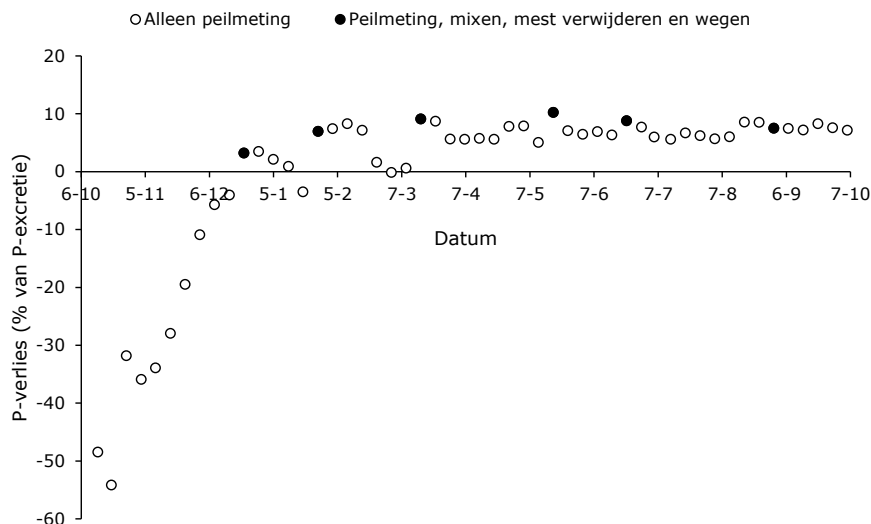
Bij de tweede variant van de N-balans, gebaseerd op partijanalyse van PMR en brok en NIR-meting van het eiwitgehalte van PMR, brok, en melkmonsters, varieerde het N-verlies, als percentage van de N-excretie en zonder correctie voor de meetfout, van -21% op 20 oktober 2020 tot 26% op 22 juni 2021, en was deze aan het einde van de balansperiode 24% (Fig. 24). Het N-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, nam toe van een verlies van 9% op 22 december 2020 tot 26% op 22 juni 2021, en was 25% op 31 augustus 2021, het laatste tijdstip met dit type meting.



Figuur 24 Verandering van het N-verlies uit stal 72 tijdens de balansperiode bij de tweede variant van de N-balans, zonder correctie voor de meetfout.

Fosforbalans, tweede variant zonder correctie voor de meetfout

Bij de tweede variant van de P-balans varieerde het P-*'verlies'*, als percentage van de P-excretie en zonder correctie voor de meetfout, van -54% op 20 oktober 2020 tot 10% op 18 mei 2021 (Fig. 25). Aan het einde van de balansperiode was het P-verlies 7%.

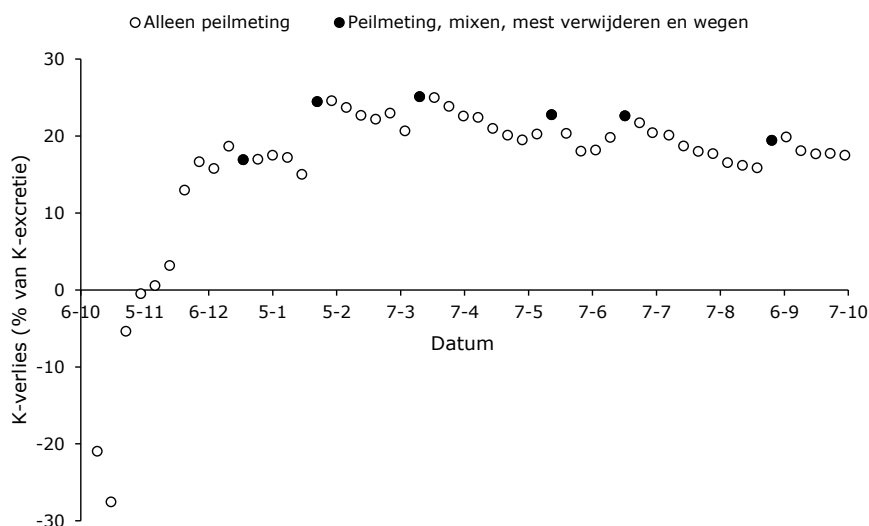


Figuur 25 Verandering van het P-*'verlies'* uit stal 72 (meetfout) tijdens de balansperiode bij de tweede variant van de P-balans.

Bij de tweede variant van de P-balans was er daarmee gedurende het grootste deel van de balansperiode geen P-overschot, zoals bij de eerste variant (Fig. 21), maar een P-tekort. Het P-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, varieerde van 3% op 22 december 2020 tot 10% op 18 mei 2021, en was 8% op 31 augustus 2021, het laatste tijdstip met dit type meting.

Kaliumbalans, tweede variant zonder correctie voor de meetfout

Bij de tweede variant van de K-balans varieerde het K-*'verlies'*, als percentage van de K-excretie en zonder correctie voor de meetfout, van -28% op 20 oktober 2020 tot 25% op 16 maart 2021 (Fig. 26). Aan het einde van de balansperiode was het K-verlies 18%. Het K-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, varieerde van 17% op 22 december 2020 tot 25% op 16 maart 2021, en was 19% op 31 augustus 2021, het laatste tijdstip met dit type meting.

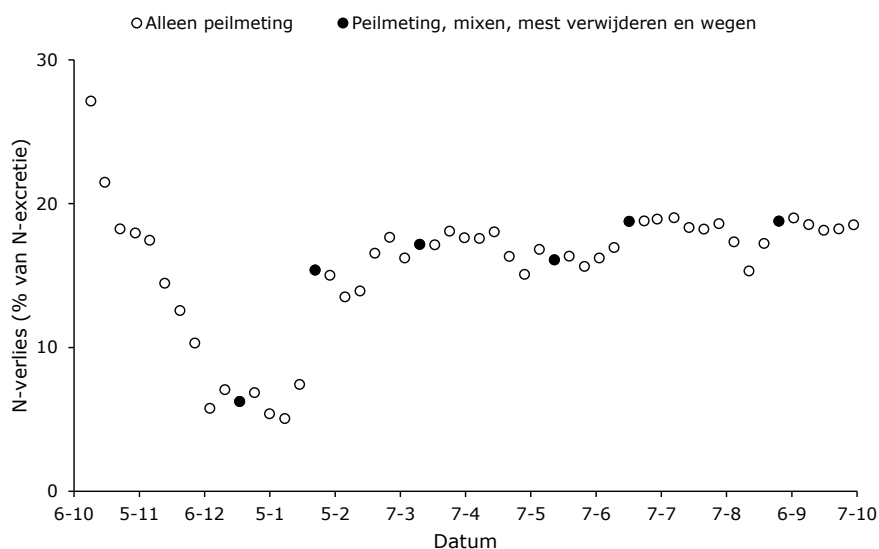


Figuur 26 Verandering van het K-*'verlies'* uit stal 72 (meetfout) tijdens de balansperiode bij de tweede variant van de K-balans.

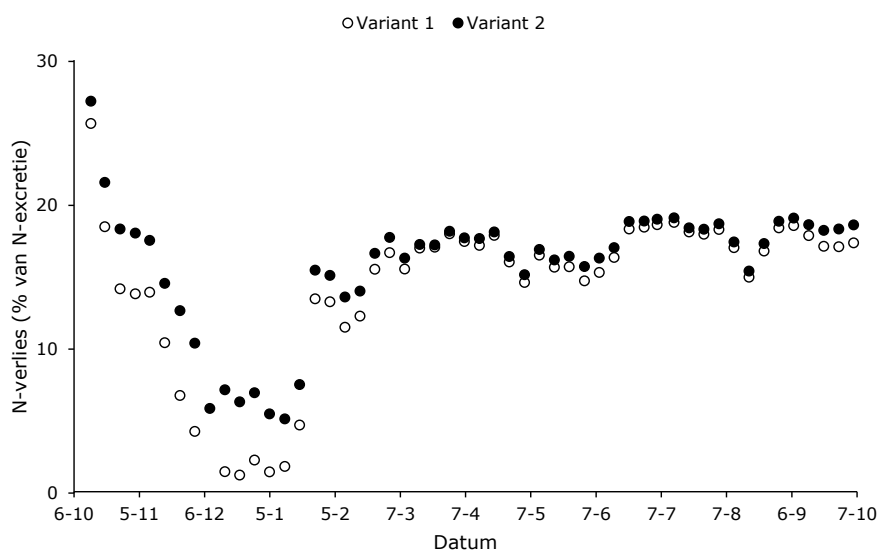
Stikstofbalans, tweede variant met correctie voor de meetfout

Na correctie van de tweede variant van de N-balans, op basis van de meetfout op de bijbehorende P-balans, varieerde het N-verlies, als percentage van de N-excretie, van 5% op 12 januari 2021 tot 27% op 13 oktober 2020 (Fig. 27). Aan het einde van de balansperiode was het gecorrigeerde N-verlies 19% (18,5%), 1,2 procentpunt hoger dan het gecorrigeerde N-verlies voor de eerste versie van de balans (bij vergelijking zonder afronding). Het gecorrigeerde N-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, nam toe van een verlies van 6% op 22 december 2020 tot 19% op 31 augustus 2021, het laatste tijdstip met dit type meting. Hiermee was op 31 augustus het gecorrigeerde N-verlies van de tweede variant 0,5 procentpunt hoger vergeleken met de eerste variant.

Uit een vergelijking van het gecorrigeerde N-verlies van de twee varianten blijkt dat de veranderingen in het verlies bij beide varianten grotendeels vergelijkbaar waren, en dat bij de tweede variant het niveau van N-verlies hoger was in de eerste vier tot vijf maanden van de balansperiode (Fig. 28).



Figuur 27 Verandering van het N-verlies uit stal 72 tijdens de balansperiode bij de tweede variant van de N-balans, na correctie op basis van de meetfout op de P-balans.



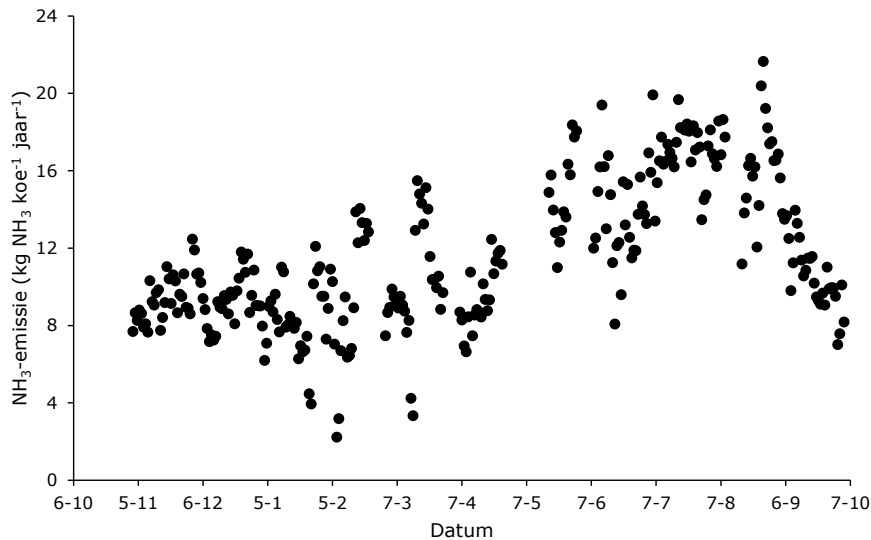
Figuur 28 Verandering van het N-verlies uit stal 72 tijdens de balansperiode voor zowel de eerste als tweede variant van de N-balans, gecorrigeerd voor de meetfout op de bijbehorende P-balans.

Bijdrage van de aan- en afvoerposten aan de gecorrigeerde mineralenbalansen

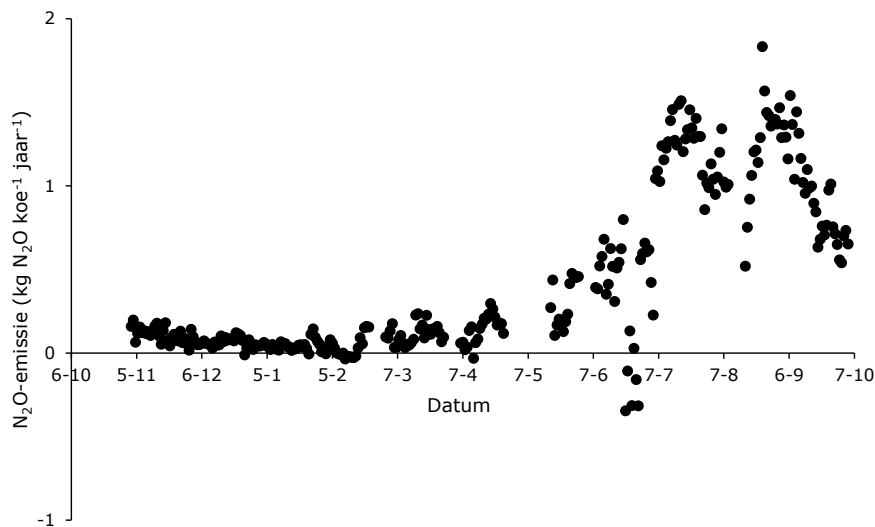
Bij de eerste variant van de balans werd, na correctie voor de meetfout, over de hele balansperiode 85,2% van de N aangevoerd met het PMR, 14,3% met brok, 0,4% met drinkwater, en 0,1% met zaagsel. Van de aangevoerde N werd 57,8% vastgelegd in drijfmest, 29,0% in melk, 1,1% in dieren, en ging 12,1% verloren. Bij P werd 78,4% aangevoerd met PMR, 21,4% met brok, 0,08% met zaagsel, en 0,05% met drinkwater. Van de aangevoerde P werd 62,8% vastgelegd in drijfmest, 34,7% in melk, en 2,5% in dieren. Bij K werd 92,3% aangevoerd met PMR, 7,6% met brok, 0,06% met zaagsel, en 0,01% met drinkwater. Van de aangevoerde K werd 90,0% vastgelegd in drijfmest, 9,9% in melk, en 0,1% in dieren.

3.9 Samenstelling van het stikstofverlies

De samenstelling van het N-verlies werd alleen berekend voor de gecorrigeerde N-balans bij variant 1. De dagelijkse hoeveelheid NH_3 -emissie tijdens de afgestemde balansperiode (287 dagen), uitgedrukt op jaarbasis, varieerde van 2,2 tot 21,7 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$, en was gemiddeld 11,6 kg (Fig. 29). De gemiddelde NH_3 -emissie over deze periode veranderde niet bij uitsluiting van de 2 x 3 uur rondom het melken (11,7 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$), de maandagen (waarop vaak de gordijnen een deel van de dag openstonden) (11,7 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$), of bij uitsluiting van de dagen waarop de mest werd gemixt (11,7 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$). De dagelijkse N_2O -emissie varieerde van -0,35 tot 1,83 $\text{kg N}_2\text{O} \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$, was gemiddeld 0,42 kg , en veranderde niet bij uitsluiting van de dagen waarop de mest werd gemixt (Fig. 30).



Figuur 29 Dagelijks gemeten NH_3 -emissie in stal 72 tijdens de balansperiode, uitgedrukt op jaarbasis.



Figuur 30 Dagelijks gemeten N_2O -emissie in stal 72 tijdens de balansperiode, uitgedrukt op jaarbasis.

De hoeveelheden N-emissie per N-vorm waren voor N-totaal, NH_3 , N_2O , en $\text{N}_2 + \text{NO}_x$ respectievelijk gemiddeld 23,7, 9,5, 0,27, en 13,9 $\text{kg N kg koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$, in de afgestemde balansperiode van 287 dagen. De relatieve N-emissies waren respectievelijk 17,1%, 6,9%, 0,2%, en 10,1% van de N-excretie (138 $\text{kg koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$). De aandelen van de N-vormen in de totale N-emissie waren voor NH_3 , N_2O , en $\text{N}_2 + \text{NO}_x$ respectievelijk 40,1%, 1,1%, en 58,7%. Bij toepassing van deze aandelen op de totale hoeveelheid N-emissie van de balansperiode zonder de vier weken leegstand (336 dagen) waren de relatieve N-emissies voor NH_3 , N_2O , en $\text{N}_2 + \text{NO}_x$ respectievelijk 6,6%, 0,2%, en 9,7% van de N-excretie (137 $\text{kg koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$).

4 Discussie

4.1 Fouten op balansposten

Partial mixed ration

Bij de gemeten aanvoer van mineralen met het PMR kan er een fout zitten op de gewichtsbepaling van de dagelijks uitgedraaide hoeveelheid, de menging in de voermengwagen, het percentage restvoer en de samenstelling van het restvoer, de bemonstering van kuilen of de wekelijkse plukbemonstering, en op de laboratoriumanalyses.

Bij het uitgedraaide gewicht van het PMR door de voermengwagen is niet gecorrigeerd voor de overschatting van 1% op basis van de kalibratie op 19 januari 2021. Deze afwijking is relatief erg laag, de weeginstallatie werd ongeveer een maand na kalibratie (vijf maanden na start van de balansperiode) gejusteerd, en onduidelijk is hoelang de afwijking sinds de start van de balansperiode van toepassing was. Correctie voor deze overschatting had het ongecorrigeerde N-verlies met ca. 1% verlaagd, maar zou geen effect hebben gehad op het gecorrigeerde N-verlies, omdat de relatieve afwijking voor de N- en P-balans even groot zou zijn geweest. Het PMR werd continu gemengd, vanaf het laden tot aan het einde van het uitdraaien. Daarmee is het PMR op de meeste dagen goed gemengd geweest, en eventuele afwijkingen zullen, vanwege het cumulatieve karakter van de balans, na enige weken zijn uitgemiddeld.

Het dagelijkse percentage restvoer was erg variabel, en er konden geen (betekenisvolle) relaties worden gelegd met dagnr., melkproductie, etc. Omdat uit de gegevens bleek dat er wel periodes met een hoger en lager percentage restvoer waren, is ervoor gekozen om per balansweek het gemiddelde van de drie dichtstbijzijnde metingen te gebruiken. Hierdoor werd de random variatie aanzienlijk minder en werd er rekening gehouden met eventuele veranderingen in het percentage restvoer in de tijd, terwijl de drie metingen nog steeds voldoende representatief waren voor de betreffende balansweek.

De samenstelling van het restvoer kan veranderen als gevolg van uitdroging en selectie door de koeien. Door uitdrogen van het PMR in de periode tussen twee voermomenten kan het DS-gehalte in restvoer hoger zijn dan in het oorspronkelijke PMR. Wanneer hier geen rekening mee wordt gehouden, dan wordt de hoeveelheid opgenomen voer en mineralen overschat, en daardoor ook het ongecorrigeerde N-verlies. Er zou echter geen effect zijn op het gecorrigeerde N-verlies, omdat de relatieve onderschatting voor N en P vergelijkbaar zou zijn. Het DS-gehalte van het restvoer bleek echter niet af te wijken van het DS-gehalte van het vers gevoerde PMR en correctie van het percentage restvoer was daarom niet nodig. Selectie uit het voer door de koeien kan ertoe leiden dat het aandeel van een bepaalde PMR-component in het restvoer hoger is dan in het oorspronkelijk gevoerde PMR, waardoor verhoudingen tussen mineralen kunnen veranderen. Dit heeft niet alleen effect op het ongecorrigeerde N-verlies maar ook op het gecorrigeerde N-verlies. Het PMR in de Milieustal werd, om selectie te voorkomen, gemengd met water tot een DS-gehalte van ruim 30%. Hierdoor waren de afzonderlijke componenten vrijwel niet te selecteren, zoals ook bleek bij enkele controles in de stal. Bij de berekening van de aanvoer van mineralen met het PMR is daarom geen rekening gehouden met selectie door de koeien.

Bij meting van de aanvoer van mineralen met het PMR werd de grootste fout waarschijnlijk gemaakt bij de bemonstering. Bij gebruik van de analyses van de wekelijkse plukmonsters, bij de eerste balansvariant, was er niet alleen een fout op de monsternamen, maar kon de samenstelling van het PMR op de dag van bemonstering ook afwijken van de samenstelling op de andere dagen van de week, vooral als er tussendoor van kuil werd gewisseld. Als gevolg hiervan kan bij de eerste balansvariant de fout op de berekening van de aanvoer van mineralen met het PMR in de eerste weken van de balansperiode relatief groot zijn geweest, maar is deze daarna, vanwege het cumulatieve karakter van de balans, uitgemiddeld. Een groot voordeel van het gebruik van de analyses van partijbemonstering (kuilen en enkelvoudig krachtvoer) bij de tweede variant is dat er rekening kan worden gehouden met dagelijkse verschillen in de PMR-samenstelling, en dat kuilwisselingen direct worden verwerkt. Een nadeel van deze benadering is een relatief grote afhankelijkheid van de representativiteit van de eerder uitgevoerde kuilbemonstering. Daarnaast kan er ook relatief veel tijd verstrijken tussen het moment van bemonstering en analyse en het moment van voeren, en kunnen eventuele veranderingen in samenstelling in deze periode niet worden meegenomen.

De fout op de representativiteit van kuilbemonstering zal in de loop van de tijd kleiner worden naarmate er meer van de kuil is gevoerd.

De analyse op mineralen is voor de kuilmonsters en de plukmonsters uitgevoerd door verschillende laboratoria, met verschillende methoden. Bij vergelijking van de samenstelling van het PMR tussen beide balansvarianten, voor de datums van de wekelijkse bemonstering, bleken de verschillen in het gemiddelde N- en P-gehalte klein te zijn, en binnen de afwijking die tussen laboratoria mogen worden verwacht. Het K-gehalte was bij variant 2 wel hoger (+6%) dan bij variant 1. Ondanks dat de N- en P-gehalten in de drogestof voor de varianten vergelijkbaar waren, werd er bij de tweede variant aanzienlijk meer N (+11%) en P (+9%) aangevoerd dan bij de eerste variant. De belangrijkste reden hiervoor was een hoger gemeten DS-gehalte (+10%) in het PMR bij de tweede variant.

Brok

Bij de gemeten aanvoer van mineralen met brok kan er een fout zitten op hoeveelheid afgegeven brok, op de representativiteit van de wekelijkse bemonstering of de inschatting van de doorlooptijd van de brok in de silo, en op de laboratoriumanalyses.

Uit de maandelijkse kalibratie van de krachtvoerautomaten bleek dat de afgegeven hoeveelheid weinig afwijking vertoonde. Omdat bij een afwijking ook gejusteerd werd, was de fout op de brokafgifte klein.

Het wekelijks genomen brokmonster was waarschijnlijk voldoende representatief voor de samenstelling van de brok die in de bijbehorende balansweek werd gevoerd, en representatiever dan de bij de tweede variant gebruikte samenstelling op basis van de geschatte doorlooptijd. De wekelijkse broklevering werd boven in de silo geblazen, bovenop de al aanwezige brok. Theoretisch wordt eerst de oude brok van onderaf opgevoerd, en daarna de nieuwe partij, maar aan de randen van de silo kan de doorlooptijd van de brok anders zijn dan in het midden. Opvolging van partijen zal waarschijnlijk maar een klein effect hebben gehad op de aanvoer van mineralen met brok, omdat de veranderingen in broksamenstelling relatief klein waren, en de brok een klein deel van het gevoerde rantsoen uitmaakte (14% van gevoerde N en 21% van gevoerde P). Eventuele afwijkingen zullen, vanwege het cumulatieve karakter van de balans, na enkele weken zijn uitgemiddeld.

De analyse van de brok werd uitgevoerd door twee verschillende laboratoria, met verschillende methoden. Bij vergelijking van de samenstelling van de brok tussen beide methoden, voor de datums van de wekelijkse bemonstering, bleek het gemiddelde N-gehalte in de DS bij variant 2 aanzienlijk hoger (+18%) te zijn dan bij variant 1, terwijl verschillen in P-gehalte (+2%) en K-gehalte (-2%) klein waren en in de orde van grootte van verschillen die tussen laboratoria mogen worden verwacht.

Melk

Bij de gemeten vastlegging van mineralen in melk kan er een fout zitten op het gemeten gewicht van de melk, op de representativiteit van de wekelijks genomen monsters, en op de laboratoriumanalyses.

Bij de kalibratie bleek de fout op de melkmeters verwaarloosbaar klein, en ook gezien het grote aantal metingen op detailniveau was de fout op de hoeveelheden geproduceerde melk verwaarloosbaar.

De wekelijks genomen verzamelmonsters van de melk waren afkomstig van 4 x 16 koeien (uit stallen 60, 61, 70, en 72), terwijl bij de wekelijkse melkcontrole het N-gehalte werd berekend en gewogen op basis van het individueel gemeten eiwit- en ureumgehalte in de avond- en ochtendmelking van de 16 koeien in stal 72. Hoewel de koeien in de vier stallen hetzelfde rantsoen kregen, en ook voor het overige vergelijkbaar werden behandeld, kan het N-gehalte van de wekelijkse verzamelmonsters minder representatief zijn geweest voor stal 72 dan het gewogen N-gehalte op basis van de melkcontroles van alleen de koeien in stal 72, vooral in de eerste weken van de balansperiode. Het P- en K-gehalte, alleen bepaald in de verzamelmonsters, kan om dezelfde reden in de eerste weken ook minder representatief zijn geweest.

De analyse van het N-gehalte in de melk werd uitgevoerd door twee verschillende laboratoria, met verschillende methoden. Bij vergelijking van het N-gehalte van de melk tussen beide methoden, voor de datums van de wekelijkse bemonstering en met dezelfde vergelijkingsbasis (vergelijking van de samenstelling van de verzamelmonsters van de melk uit de vier stallen met het berekende gewogen N-gehalte voor de melk uit de vier stallen), bleek het N-gehalte bij variant 2 hoger te zijn (+7%) dan bij variant 1.

Drijfmest

Bij de gemeten vastlegging van mineralen in drijfmest kan er een fout zitten op de wekelijkse peilmeting (en het daarmee berekende mestvolume), op de relatie tussen volume en gewicht van de drijfmest in de kelder, op de weging van afgevoerde drijfmest, op de schatting van de hoeveelheid drijfmest die buiten de stal wordt uitgescheiden en op de N/P verhouding van deze drijfmest, op de representativiteit van de wekelijkse bemonstering van de drijfmest, en op de analyse van deze monsters.

Bij de wekelijkse peilmeting kon de hoogte van de drijfmest in de kelder, afhankelijk van de meetpositie, tot 20 cm (27 m³) variëren, afhankelijk van de verdeling van de mest in de kelder en gasvorming in de mest. Het peil kon hoger zijn op een plek waar relatief veel feces ophoopte en de mest plaatselijk dikker was. Het peil kon daarnaast ook per mestgang verschillen. Kort na een gedeeltelijke leging van de kelder was het peil in de voorste mestgang (achter het voerhek) duidelijk hoger dan in de rest van de mestgangen, vanwege dikkere mest in de voorste mestgang. De plaatselijke verschillen in mestpeil zijn voldoende ondervangen door het mestpeil op tien verschillende posities te meten en vervolgens te middelen. Bij een herhaling van de peilmeting op 18 mei, waarbij de wekelijkse meting vier keer achter elkaar werd uitgevoerd (meting 1 op tien posities, meting 2 op tien posities, etc.), was de variatiecoëfficiënt 0,5% bij een peil van gemiddeld 72,9 cm en max. 13 cm verschil tussen de posities. De wekelijkse peilmeting werd in de eerste vier maanden van de balansperiode door drie verschillende personen uitgevoerd, waardoor in deze periode de fout op de peilmeting hoger kan zijn geweest. Vanaf 26 januari 2021 werd de peilmeting in vrijwel alle gevallen door dezelfde persoon uitgevoerd.

Mest in de kelder kan uitzetten door gasvorming als gevolg van omzettingen van de organische stof door micro-organismen, en de volumaire dichtheid van de mest kan daardoor in de kelder kleiner zijn dan de gangbare waarde voor gemixte mest van ca. 1,00 kg l⁻¹. Uit diverse metingen (hier niet gerapporteerd) blijkt dat het volume van de mest hierdoor meer dan 10% hoger kan zijn dan verwacht. Dit leidt op de ongecorrigeerde balansen tot een overschatting van de geproduceerde massa drijfmest, van de hoeveelheid vastgelegde mineralen in drijfmest, en van het N-verlies. Als gevolg van mixen ontsnapt het meeste gas uit de mest en benadert de dichtheid weer de gebruikelijke waarde van 1,00 kg l⁻¹. Daardoor zijn de ongecorrigeerde balansen het meest betrouwbaar voor de tijdstippen waarop de mest werd gemixt, ook in combinatie met het verwijderen en wegen van een deel van de mest. In de periode van 20 juni tot 7 september 2021 werd het mixsysteem eens per week kort aangezet, om het (meeste) gas uit de mest te mixen en de fout op de massabepaling te verkleinen. Uit de resultaten blijkt dat in deze periode het ongecorrigeerde N-verlies op het moment van mixen en mestafvoer goed in lijn lag met de N-verliezen op basis van alleen de peilmetingen op omliggende tijdstippen (Fig. 20). Hoewel gasvorming in de mest een overschatting van de hoeveelheid mineralen in de mest kon geven op de tijdstippen waarop alleen het volume werd gemeten, heeft deze overschatting geen consequenties gehad voor het gecorrigeerde N-verlies, omdat de hoeveelheid N en P in drijfmest relatief evenveel overschat werden, en daardoor de overschatting op de N-balans via de overschatting op de P-balans werd gecorrigeerd.

Bij de bemonstering van de laag drijfmest in de kelder is de vraag of deze voldoende representatief was, ook omdat de mest zelden werd gemixt. Afwijkingen kunnen ontstaan wanneer de drijfmestlaag op de mest, of de bezinklaag onderin de kelder, niet in de juiste verhoudingen in het genomen monster aanwezig zijn. Dit risico werd deels verkleind door bemonstering met een multisampler, waarbij in theorie een representatief monster van de hele laag drijfmest wordt genomen. Het is echter nog steeds mogelijk dat de drijfslag en/of bezinklaag meer of minder werd vertegenwoordigd. Dit risico zal het grootst zijn geweest aan het begin van de balansperiode, en in de loop van de tijd zijn uitgemiddeld vanwege het cumulatieve karakter van de balansen, en ook vanwege het feit dat bij het voortschrijden van de balansperiode een steeds groter deel van de drijfmest was gemixt, bemonsterd en gewogen met de vrachtwagen.

De berekende balansen en het N-verlies zijn het meest betrouwbaar op de tijdstippen dat de mest niet alleen gedeeltelijk werd gemixt, maar er ook een partij mest uit de kelder werd afgevoerd, gewogen, en bemonsterd. De representativiteit van bemonstering was bij de bemonstering door de vrachtwagen waarschijnlijk groter dan bij bemonstering van de kelder. De weggepompte mest werd bemonsterd na mixen en verpompen, en bij de bemonstering werd een standaard protocol gevolgd (LNV, 2005), waarbij er, verdeeld over de opgezogen hoeveelheid per vracht, zes deelmonsters werden genomen met een totaal volume van tenminste 650 ml (Groenestein et al., 2008). De fout op de massabepaling van afgevoerde mest was klein, omdat de weggepompte drijfmest aan boord van de vrachtwagen werd gewogen met weegapparatuur die wettelijk niet meer dan 2% mag afwijken en daarvoor regelmatig werd geijkt (Groenestein et al., 2008).

De schatting van de hoeveelheid mest die tijdens het melken buiten de stal werd uitgescheiden, en de geschatte verschuiving van de verhouding tussen urine en feces, en daarmee van de N/P-verhouding van de mest, kan bijgedragen hebben aan de fout op de vastlegging van hoeveelheden mineralen in mest. Uit de frequentiemetingen voor en na het melken bleek dat in de drie uur na het melken er duidelijk minder urine en feces werd uitgescheiden vergeleken met de drie uur voor het melken. Hiervoor is gecorrigeerd bij berekening van de hoeveelheid mest, N, en P die buiten de stal werd uitgescheiden. Als de hoeveelheid buiten de stal uitgescheiden drijfmest verkeerd is geschat, dan heeft dit wel effect op het ongecorrigeerde N-verlies maar niet op het gecorrigeerde N-verlies, omdat de relatieve afwijking voor de N- en P-balans even groot was. Wanneer de excretie van feces relatief wat meer of minder zou zijn afgenomen dan de excretie van urine, dan zou het gecorrigeerde N-verlies zijn overschat of onderschat, gezien de bijbehorende verschuiving in N/P-verhouding van de drijfmest. Op basis van de gedane waarnemingen wordt geconcludeerd dat dit risico klein is.

De analyse van de drijfmest werd alleen nat-chemisch uitgevoerd, waarbij per analyseronde er een blanco en een monster met bekende samenstelling werden mee-geanalyseerd, en analyses werden herhaald wanneer de afwijking groter was dan vastgestelde limieten. Deze procedure laat onverlet dat de uitslagen van individuele monsters soms aanzienlijk konden afwijken.

4.2 Balansvarianten

Bij het beoordelen van de twee balansvarianten is een afweging gemaakt welke variant het meest betrouwbaar is voor het vaststellen van het gerealiseerde N-verlies. Bij de eerste variant, met wekelijkse bemonstering en nat-chemische analyse, werden N- en P-gehalten van de monsters bij het PMR, de brok, de drijfmest, en de melk, met dezelfde methoden voorbehandeld en gemeten, waardoor de systematische fout op de analyse van N en P grotendeels vergelijkbaar was. Bij de tweede variant werd het N-gehalte in het PMR, brok, en melk afgeleid van meting van het ruw eiwitgehalte met NIR, en werden P en K met een andere methode bepaald. Hierdoor kan de systematische fout op deze analyses al deels verschillend zijn. Bij nat-chemische analyse worden gehalten in het materiaal direct gemeten, terwijl bij NIR-meting en berekening van het N-gehalte er sprake is van afgeleide informatie. Bij een keuze tussen directe meting of afgeleide meting heeft de directe meting de voorkeur. Vanwege de consistentie in analysemethode en de meer directe meting zijn bij de beoordeling van het N-verlies de resultaten van de eerste variant gebruikt. Een zwak punt van de eerste variant is dat de wekelijkse monsternamen minder representatief was voor de andere dagen van de week, wat zeker in het begin van de balansperiode relatief grote afwijkingen kan hebben gegeven.

De daling van het gecorrigeerde N-verlies aan het begin van de balansperiode, tot een waarde van 0, geeft aan dat er in deze periode mogelijk sprake was van een onderschatting van het N-verlies. Bij de tweede variant komen zowel de daling van het gecorrigeerde N-verlies alsook het laagste niveau realistischer over, en zijn de data uit de eerste helft van de balansperiode daardoor mogelijk bruikbaar voor eventuele verdere analyse. Hoewel er zonder correctie voor de meetfout duidelijke verschillen waren in N-verlies tussen de twee balansvarianten, verschilden na correctie het N-verlies over de hele balansperiode bij de tweede variant relatief weinig (1,2 procentpunt) van de eerste variant, en volgde het N-verlies bij beide varianten hetzelfde patroon in de tijd (Fig. 28).

4.3 Correctie van de stikstofbalans

Voor de correctie van de fout op de N-balans werd alleen de fout op de P-balans gebruikt, en niet de fout op de K-balans. De fout op de balans aan het einde van de balansperiode stabiliseerde op -4% bij de P-balans, maar op +16% voor de K-balans. Een afwijking van 16% werd als te groot beoordeeld om voor correctie van de fout te gebruiken. Een verklaring voor het ontbreken van 16% van de aangevoerde K is het achterblijven van K in de bezinklaag van de mestkelder. Het K-gehalte van afgevoerde mest was tijdens de balansperiode gemiddeld 7% lager dan het K-gehalte op basis van kelderbemonstering rond het moment van de afvoer. Hiermee wordt ongeveer 40% van de 'verdwenen' K verklaard.

Een groot deel van de rest van de 'verdwenen' K was mogelijk aanwezig in de bezinklaag van de twee middelste mestgangen en van de achterste mestgang, onder de (dichte) ligboxen (Fig. 2), die onbereikbaar waren voor directe bemonstering, waardoor de mest en bezinklaag in deze gangen mogelijk ondervertegenwoordigd waren in de wekelijks genomen mestmonsters.

Uit lineaire regressie bleek dat de variantie van het N-gehalte in de wekelijks genomen drijfmestmonsters beter werd verklaard door het P-gehalte ($P < 0,001$; $R^2_{\text{adj.}} = 46\%$) dan door het K-gehalte ($P < 0,001$; $R^2_{\text{adj.}} = 20\%$). Bij gebruik van alleen het organische N-gehalte (N-totaal – $\text{NH}_4\text{-N}$) verklaarde het P-gehalte nog weer meer variantie ($R^2_{\text{adj.}} = 72\%$) dan het K-gehalte ($R^2_{\text{adj.}} = 23\%$). Bij aanname dat de grootste fout op de N-balans werd gerealiseerd bij het meten van de hoeveelheid mineralen in drijfmest, betekent de betere relatie tussen N- en P-gehalte in drijfmest dat de fout op de N-balans beter vertegenwoordigd werd door de fout op de P-balans dan door de fout op de K-balans.

4.4 Niveau en samenstelling van het stikstofverlies

Het totale N-verlies over de balansperiode was 16,6% van de N-excretie, voor de gecorrigeerde N-balans van variant 1 met uitsluiting van de vier weken leegstand. Daarmee was het gemeten totale N-verlies hoger dan de eerder berekende waarde van 9,4% op basis van Van Bruggen et al. (2023) en Oenema et al. (2000), de door Ketelaars en Geurink gemeten range van 9-15%, en de door Van der Hoek en door Bruins et al. berekende waarde van 11-12% van de N-excretie. Vergelijking van het totale N-verlies op basis van de N-balans met de parallel gemeten NH_3 - en N_2O -emissies, voor de aangepaste balansperiode (excl. vier weken leegstand), laat zien dat 9,9% van de N-excretie verloren ging door denitrificatie, als N-N_2 en NO_x (9,7%) en als $\text{N-N}_2\text{O}$ (0,2%) (paragraaf 3.9). Deze verliezen zijn aanzienlijk hoger dan de door Oenema et al. (2000) geschatte verliezen voor N-N_2 en $\text{N-N}_2\text{O}$ van respectievelijk 1% en 0,1% van mest-N. Daarnaast was de $\text{N-N}_2\text{O} / \text{N-N}_2$ -verhouding in het voorliggende onderzoek ($0,27 / 13,9 = 0,019$) aanzienlijk lager dan de door Oenema et al. (2000) geschatte waarde van 0,1.

Het grotere N-verlies als gevolg van denitrificatie kan worden verklaard door de aanwezigheid van een drijfslaag op de mest in de kelder. Het afwisselend verdrogen en vernatten van deze laag kan een afwisseling van zuurstofrijke en zuurstofarme condities stimuleren, en daarmee de nitrificatie – denitrificatiecyclus en N-verlies door denitrificatie. In de toplaag van de mest was ruim voldoende minerale N en snel afbreekbare organische stof aanwezig om de gemeten hoeveelheden denitrificatie te kunnen veroorzaken. De door Oenema et al. (2000) geschatte lage verliezen waren (deels) gebaseerd op kleinschalige proeven waarin de mest iedere week werd geroerd, waardoor er geen drijfslaag kon ontstaan en het denitrificatieverlies beperkt bleef. Een recente opslagproef, waarin vers verzamelde rundveedrijfmest vier maanden werd opgeslagen in afgesloten emmers (regelmatig ontluucht) en wekelijks werd geroerd, bevestigt dat onder dergelijke omstandigheden geen N-verlies van betekenis optreedt (De Boer, 2023b).

Wanneer de drijfslaag inderdaad verantwoordelijk was voor het hogere N-verlies door denitrificatie, dan kan dit verlies waarschijnlijk eenvoudig worden beperkt door de mest regelmatig (wekelijks?) kort te mixen en daarmee de vorming van een drijfslaag te voorkomen. Omdat het voorkomen van een drijfslaag ook de NH_3 -emissie vanuit de toplaag van de mest kan verlagen, hoeft een tijdelijke stimulering van de NH_3 -emissie als gevolg van kort mixen niet te leiden tot een netto toename van de NH_3 -emissie (Van Dooren et al., 2022). In het voorliggende onderzoek had uitsluiting van de dagen waarop met het DSD-systeem werd gemixt geen effect op het gemiddelde verlies van NH_3 of N_2O . Hieruit kan worden geconcludeerd dat als gevolg van het tijdelijke luchtmixen het N-verlies door NH_3 -vervluchtiging of denitrificatie niet toenam.

Het aanzienlijk hogere N_2 -verlies uit de stal met roostervloer in deze studie suggereert dat er in de Nederlandse melkveehouderij sprake is van een tot dusver onbekend N-lek in de kringloop, namelijk een relatief groot N-verlies via denitrificatie uit (een deel van) de stallen met roostervloer, de stallen waarin de mest in de kelder weinig wordt gemixt. Dichten van dit N-lek betekent dat de bemestende waarde van de drijfmest kan toenemen, omdat dan minder ammonium-N verloren zal gaan door denitrificatie. Als het mogelijk is om het denitrificatieverlies door mixen bijvoorbeeld te halveren, dan zal het gehalte minerale N in de drijfmest met ca. 10% kunnen toenemen. Hierdoor kan ook de N-efficiëntie van de melkveehouderij worden verhoogd.

Conclusies

- Het totale N-verlies uit de gemeten stal met roostervloer, over een periode van 52 weken excl. vier weken leegstand, en gecorrigeerd op basis van de meetfout op de P-balans, werd vastgesteld op 16,6% van de N-excretie (137 kg N koe⁻¹ jaar⁻¹);
- Het totale N-verlies was opgebouwd uit 6,6% N-NH₃, 0,2% N-N₂O, en 9,7% N-N₂ (incl. enig N-NO_x);
- Het totale N-verlies was aanzienlijk groter dan de aangenomen 9,4%, vooral door een aanzienlijk groter N₂-verlies (9,7%) dan eerder aangenomen (1%). Het grotere N₂-verlies kan worden verklaard uit de aanwezigheid van een drijfslag op de mest, waardoor waarschijnlijk het N-verlies door denitrificatie werd gestimuleerd;
- Het aanzienlijk grotere N₂-verlies door denitrificatie in dit onderzoek suggereert dat er in de Nederlandse melkveehouderij sprake is van een tot dusver onbekend lek in de N-kringloop, in (een deel van) de stallen met roostervloer. Wanneer dit lek (deels) kan worden gedicht, neemt de bemestende waarde van de drijfmest toe en kan daardoor ook de N-efficiëntie van de melkveehouderij toenemen.

Dankwoord

Ik dank Paul Galama (projectleider PPS 'Mestscheiding in Melkveestallen') voor het mogelijk maken van dit onderzoek en de ondersteuning; de staf van proeffaciliteit Dairy Campus (Wageningen Livestock Research) voor de uitgevoerde metingen, bemonsteringen, facilitaire ondersteuning, en het datamanagement; Klaas Blanken en Henk Schilder (beiden Wageningen Livestock Research) voor het uitvoeren van de wekelijkse peilmetingen, mestbemonstering, en andere ondersteuning; Carsten Schep en Hendrik Jan van Dooren (beiden Wageningen Livestock Research) voor het aanleveren van de gegevens van NH₃- en N₂O-emissie, temperatuur, en ventilatiedebiet; en Wouter Spek, Paul Galama, en Roselinde Goselink (allen Wageningen Livestock Research) voor de review van een conceptversie van dit rapport. Het onderzoek werd gefinancierd uit de PPS 'Mestscheiding in melkveestallen' (projectnr. TKI AF 18036).

Literatuur

- CBS (2022) Dierlijke mest en mineralen 2021. Centraal Bureau voor de Statistiek, Den Haag.
- De Boer HC (2020) Afbreeksnelheid van organische stof uit runderdrijfmest: effecten van dosering, zoutgehalte en herkomst mest en grond. Rapport 1231, Wageningen Livestock Research, Wageningen
- De Boer HC (2023a) Mineralisatie van koolstof uit urine, feces, en drijfmest van melkkoeien na mengen met zandgrond. Rapport 1415, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- De Boer HC (2023b) Mineralisatie van koolstof uit rundveedrijfmest met toenemende ouderdom na mengen met zandgrond. Rapport 1430, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- De Boer HC, Timmerman M, Verdoes N, Schilder H (2018) Afbraak van organische stof uit (bewerkte) rundermest na toediening aan een zandgrond. Rapport 1095, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- Galama PJ, De Boer HC, Van Dooren HJC, Ouweltjes W, Driehuis F (2015) Sustainability aspects of ten bedded pack dairy barns in The Netherlands. Report 873, Wageningen UR Livestock Research, Wageningen.
- Groenestein CM, Van Bruggen C, Hoeksma P, Jongbloed AW, Velthof GL (2008) Nadere beschouwing van stalbalansen en gasvormige stikstofverliezen uit de intensieve veehouderij. WOt-rapport 60, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Wageningen.
- Houba VJG, Van der Lee JJ, Novozamsky I (1997) Soil and plant analysis. Part 1: Soil analysis procedures, Department of Soil Quality, Wageningen University.
- Jones DB (1931) Factors for converting percentages of nitrogen in foods and feeds into percentages of proteins. Circular No. 183, United States Department of Agriculture, Washington D.C., USA.
- LNV (2005). Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet. Staatscourant 21 november 2005, nr. 226/pag. 6
- Oenema O, Velthof GL (1993) Denitrification in nitric-acid-treated cattle slurry during storage. Netherlands Journal of Agricultural Science 41: 63-80.
- Oenema O, Velthof GL, Verdoes N, Groot-Koerkamp PWG, Monteny GJ, Bannink A, Van der Meer HG, en Van der Hoek KW (2000). Forfaitaire waarden voor gasvormige stikstofverliezen uit stallen en mestopslagen. Alterra-rapport 107, gewijzigde druk. Alterra, Wageningen UR, Wageningen.
- Van Bruggen C, Geertjes K (2019) Stikstofverlies uit opgeslagen mest - Stikstofverlies berekend uit het verschil in verhouding tussen stikstof en fosfaat bij excretie en bij mestafvoer. Paper Centraal Bureau voor de Statistiek, Den Haag.
- Van Bruggen C, Bannink A, Bleeker A, Bussink DW, Van Dooren HJC, Groenestein CM, Huijsmans JFM, Kros J, Lagerwerf LA, Oltmer K, Ros MBH, Van Schijndel MW, Schulte-Uebbing L, Velthof GL, Van der Zee TC (2023) Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2021. WOt-technical report 242, Wageningen, Nederland.
- Van der Haven MC, De Koning CJAM, Wemmenhove H, Westerbeek R (1996). Handboek Melkwinning Augustus 1996, Praktijkonderzoek Rundvee, Schapen en Paarden (PR), Lelystad.
- Van Dooren HJC, Bokma S, Ogink NWM (2022) Effect van frequent mixen van drijfmest op de ammoniakemissie bij melkvee. Onderzoek op Dairy Campus. Rapport 1170, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- Walthert L, Graf U, Kammer A, Luster J, Pezzotta D, Zimmermann S, Hagedorn F (2010) Determination of organic and inorganic carbon, $\delta^{13}\text{C}$, and nitrogen in soils containing carbonates after acid fumigation with HCl. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 173:207-216.
- Winkel A, Bokma S, Hol JMG, Blanken K (2020) Ammonia emission of the MeadowFloor CL for dairy barns - A case-control study in the Environmental Research Barn of Dairy Campus. Report 1275, Wageningen Livestock Research, Wageningen.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen Livestock Research
Postbus 338
6700 AH Wageningen
T 0317 48 39 53
E info.livestockresearch@wur.nl
www.wur.nl/livestock-research

Wageningen Livestock Research ontwikkelt kennis voor een zorgvuldige en renderende veehouderij, vertaalt deze naar praktijkgerichte oplossingen en innovaties, en zorgt voor doorstroming van deze kennis. Onze wetenschappelijke kennis op het gebied van veehouderijsystemen en van voeding, genetica, welzijn en milieu-impact van landbouwhuisdieren integreren we, samen met onze klanten, tot veehouderijconcepten voor de 21e eeuw.

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

