



Niveau en samenstelling van het stikstofverlies uit een melkveestal met roostervloer en een koetoilet

H.C. de Boer

Openbaar
Rapport 1448



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Niveau en samenstelling van het stikstofverlies uit een melkveestal met roostervloer en een koetoilet

Herman de Boer

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

Wageningen Livestock Research
Wageningen, november 2023

Rapport 1448

De Boer, H.C., 2023. *Niveau en samenstelling van het stikstofverlies uit een melkveestal met roostervloer en een koetoilet*. Wageningen Livestock Research, Openbaar Rapport 1448.

Foto voorkant: Hanskamp Agrotech (Doetinchem)

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/640152> 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 1448

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Materiaal & methoden	8
	2.1 Introductie	8
	2.2 Stalinrichting	8
	2.3 Diermanagement en rantsoen	10
	2.4 Waarnemingen	10
	2.5 Analyses	13
	2.6 Kalibratie en justering	14
	2.7 Regressieanalyse	15
	2.8 Berekening mineralenbalansen	15
	2.9 Correctie van de balansperiode en het stikstofverlies	17
	2.10 Samenstelling van het stikstofverlies	17
	2.11 Opgevangen urine en ammoniakemissie	19
3	Resultaten	20
	3.1 Staltemperatuur	20
	3.2 Ventilatie-debiet	20
	3.3 Rantsoen	21
	3.4 Drinkwater en zaagsel	24
	3.5 Melkproductie en melksamenstelling	24
	3.6 Hoeveelheid en samenstelling opgevangen urine	26
	3.7 Scheiding van mineralen met urineopvang	28
	3.8 Drijfmestproductie en drijfmestsamenstelling	29
	3.9 Koegewicht	31
	3.10 Mineralenbalansen	32
	3.11 Samenstelling van het stikstofverlies	34
4	Discussie	37
	4.1 Fouten op balansposten	37
	4.2 Correctie van de stikstofbalans	37
	4.3 Stikstofemissie tijdens urine-opslag	38
	4.4 Effect van hoeveelheid opgevangen urine op stikstofemissie	38
	4.5 Effect van mixen van drijfmest in de kelder	39
	Conclusies	40
	Dankwoord	41
	Literatuur	42



Samenvatting

Stikstof (N) in urine is voor het overgrote deel verantwoordelijk voor gasvormig N-verlies uit de melkveestal en vanaf het land. Stikstofverlies uit de melkveehouderij kan daarom worden verminderd door de urine na uitscheiding in de stal zo snel mogelijk op te vangen (bronscheiding), op te slaan onder emissiearme omstandigheden, en bij uitrijden op het land een emissiearme techniek te gebruiken. Urine heeft een andere samenstelling dan drijfmest en kan daardoor op en buiten het melkveebedrijf specifiekere worden ingezet dan drijfmest. Urine kan worden opgevangen met meerdere methoden die verschillen in opgevangen hoeveelheid en de mate waarin de urine wordt verontreinigd met feces. Zuivere urine kan worden opgevangen met een koetoilet, bijvoorbeeld het Hanskamp CowToilet (Hanskamp, Doetinchem), waarbij de koe door het CowToilet wordt gestimuleerd om te plassen, en de uitgescheiden urine wordt opgevangen en weggepompt naar een opslag. Hoewel het CowToilet maar een deel van de uitgescheiden urine opvangt, kan deze opvang wel de emissie van ammoniak (NH_3) uit de stal aanzienlijk reduceren.

De effectiviteit van het CowToilet is tot dusver niet wetenschappelijk onderzocht. Belangrijke vragen zijn hoeveel urine er onder praktijkomstandigheden wordt opgevangen, hoeveel de NH_3 -emissie kan worden gereduceerd, en wat de samenstelling van de opgevangen urine en de drijfmest is. Naast het effect op de NH_3 -emissie is ook van belang om vast te stellen welk effect de opvang heeft op andere N-emissies uit de stal, in de vorm van lachgas (N_2O) en stikstofgas (N_2). In de PPS 'Mestscheiding in melkveestallen' is onderzoek gedaan naar de effectiviteit van enkele bronscheidingssystemen, waaronder het CowToilet. Het doel van het onderzoek aan het CowToilet was het vaststellen van het effect van urine-opvang op het totale N-verlies uit de stal, de samenstelling van dit verlies (NH_3 , N_2O , N_2), de samenstelling van de opgevangen urine en de drijfmest, en de scheiding van N, P, en K.

De effectiviteit van het CowToilet werd onderzocht in de Milieumeetstal op proeflocatie Dairy Campus, in een stal met roostervloer waarin 16 melkgevendende koeien jaarrond waren opgesteld. De resultaten van de stal met het CowToilet werden ook vergeleken met een vrijwel identieke stal zonder CowToilet (referentiestal). Het totale N-verlies uit beide stallen 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 stallen voornamelijk aangevoerd met ruwvoer en krachtvoer, en voornamelijk vastgelegd in (urine), drijfmest en melk. Het ruwvoer en enkelvoudig krachtvoer, gemengd 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. De hoeveelheid opgevangen urine werd iedere dinsdag en vrijdag bepaald en iedere dinsdag bemonsterd. Het volume drijfmest in de kelder onder de roostervloer werd iedere dinsdag gemeten en bemonsterd, en vijf keer tijdens de balansperiode werd een deel van de mest verwijderd, gewogen, en bemonsterd. Tijdens de balansperiode werd de drijfmest in de kelder vrijwel niet gemixt. De melkgift van de koeien werd dagelijks gemeten en de melksamenstelling werd eens per week bepaald in monsters genomen tijdens de melkcontrole. Bij berekening van de mineralenbalansen 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 (restpost) N_2 (incl. NO_x).

Uit de resultaten blijkt dat met het CowToilet tijdens de balansperiode 3,1 tot 14,5 l urine $\text{coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$ werd opgevangen, gemiddeld 10,1 liter en naar schatting 35% van de uitgescheiden urine, met daarin respectievelijk 16%, 0,3%, en 27% van de door de koe uitgescheiden N, P, en K. De opgevangen urine had gemiddeld een pH van 8,9, een EC van 51 mS cm^{-1} , en bevatte 5,6 g N, 14 mg P, en 10,9 g K per kg. Van de N in de opgevangen urine was (op het moment van analyse) gemiddeld 61% aanwezig als $\text{NH}_4\text{-N}$, 29% als nog niet omgezet ureum, en 10% als organische N. Als gevolg van de urine-opvang had de drijfmest in de kelder van de stal met het CowToilet een iets lagere pH (-2%), een lagere EC (-10%), een hoger gehalte DS (+4%), een lager gehalte N (-3%), een hoger gehalte P (+9%), een lager gehalte K (-16%), en een lager gehalte $\text{NH}_4\text{-N}$ (-19%), vergeleken met de referentiestal.

Het totale N-verlies uit de stal met het CowToilet over de balansperiode van 52 weken, zonder de week leegstand, werd vastgesteld op 9,2% van de N-excretie in deze periode (135 kg N koe⁻¹ jaar⁻¹), bij een eiwitgehalte in het rantsoen van gemiddeld 157 g kg⁻¹ DS, een melkproductie van 28,9 kg koe⁻¹ dag⁻¹, een eiwitgehalte in de melk van 3,64%, en een ureumgetal in de melk van 22,2 mg 100⁻¹ g. De temperatuur in de stal was gemiddeld 13,7 °C en het ventilatiedebiet gemiddeld 17305 m³ uur⁻¹. Het totale N-verlies van 9,2% was opgebouwd uit 4,1% N-NH₃ (6,8 kg NH₃ koe⁻¹ jaar⁻¹), 0,14% N-N₂O, en 4,9% N-N₂ (incl. enig N-NO_x).

Bij vergelijking van het N-verlies per N-vorm tussen de stal met het CowToilet en de referentiestal, na correctie van de gegevens van beide stallen voor perioden met missende emissiegegevens en weken leegstand in beide stallen (periode van 287 dagen), en correctie van de resultaten van de referentiestal voor een hoger ventilatiedebiet (+7%), een lager ureumgetal in de melk (-6%), en een hogere temperatuur (-3%), vergeleken met de stal met het CowToilet, waren voor de stal met het CowToilet de relatieve N-emissies van N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ (+ NO_x) respectievelijk 41%, 39%, 18%, en 43% lager.

Bij deze emissiereducties was de emissie uit (langere) opslag van de opgevangen urine bij de stal met het CowToilet niet meegenomen, terwijl deze urine bij de referentiestal wel bijdroeg aan de emissie. Wordt, voor een zuivere vergelijking, deze emissie wel meegenomen, dan is de N-emissiereductie van het CowToilet lager dan nu uit het onderzoek blijkt, en wordt bij keuze voor een emissiearme opslagvariant geschat op 38% voor de totale N-emissie en 33% voor de NH₃-emissie. De reducties voor N₂O en N₂ (+ NO_x) veranderen waarschijnlijk nauwelijks.

Inclusief de schatting voor emissie tijdens urine-opslag was de emissiereductie voor de totale N-emissie (38%) wat groter en voor de NH₃-emissie (33%) wat kleiner dan het geschatte aandeel opgevangen urine (35%). Door verbeteringen aan het CowToilet kan er mogelijk in de toekomst meer urine worden opgevangen, waardoor de emissies verder gereduceerd kunnen worden. Bij regelmatig mixen van drijfmest in de kelder kan de reductie van de N₂-emissie door het CowToilet mogelijk aanzienlijk kleiner zijn dan nu gemeten, omdat het N₂-verlies door denitrificatie dan aanzienlijk kan afnemen. Geconstateerd wordt dat door opvang van een deel van de urine met het CowToilet de N-emissie uit de melkveestal met roostervloer aanzienlijk verlaagd kan worden.

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 N die vervluchtigt als ammoniak (NH_3) neerslaan in gebieden waar externe N-aanvoer ongewenst is. Het is daarom van belang om N-emissie uit melkveestallen beperkt te houden.

De som van de door de koe uitgescheiden hoeveelheid urine en feces bestaat op gewichtsbasis voor ca. 40% uit urine en voor 60% uit feces. De met urine uitgescheiden ureum is verantwoordelijk voor het overgrote deel van het gevormde ammonium (NH_4) dat kan vervluchtigen als NH_3 . Hierdoor is vooral de urine verantwoordelijk voor NH_3 -emissie uit de stal en vanaf het land (bij beweiding of na het uitrijden van mest). Stikstofverlies uit de melkveestal kan worden verminderd door de urine na uitscheiding zo snel mogelijk op te vangen (bronscheiding), op te slaan onder emissiearme omstandigheden, en een emissiearme techniek te gebruiken bij uitrijden op het land.

Bronscheiding door urine-opvang geeft ook een scheiding van mineralen. Zuivere rundvee-urine bevat, naast het overgrote deel van de minerale N, ook het overgrote deel van andere goed oplosbare nutriënten zoals kali en natrium, maar het bevat geen fosfaat. Door de andere samenstelling vergeleken met drijfmest kan de urine specifiekere worden ingezet dan drijfmest, bijvoorbeeld bij de afvoer van mineralen van het bedrijf of bij de bemesting van gewassen. Wanneer in de stal een deel van de urine wordt opgevangen en er daardoor nog steeds drijfmest wordt geproduceerd, zal ook de samenstelling van deze drijfmest veranderen.

Bronscheiding van urine kan worden uitgevoerd met meerdere methoden, die verschillen in opgevangen hoeveelheid en de mate waarin de urine wordt verontreinigd met feces. Zuivere urine kan worden opgevangen met een koetoilet, bijvoorbeeld het Hanskamp CowToilet (Hanskamp, Doetinchem), waarbij de koe door het CowToilet wordt gestimuleerd om te plassen, en de uitgescheiden urine wordt opgevangen en weggepompt naar een opslag. Hoewel het CowToilet maar een deel van de uitgescheiden urine opvangt, kan deze opvang wel de emissie van NH_3 uit de stal aanzienlijk reduceren.

De effectiviteit van het CowToilet is tot dusver niet wetenschappelijk onderzocht. Belangrijke vragen zijn hoeveel urine er onder praktijkomstandigheden wordt opgevangen, hoeveel de NH_3 -emissie wordt gereduceerd, en wat de samenstelling van de opgevangen urine en de drijfmest is. Naast het effect op de NH_3 -emissie is ook van belang om vast te stellen welk effect de opvang heeft op andere N-emissies uit de stal, in de vorm van lachgas (N_2O) en stikstofgas (N_2).

In de PPS 'Mestscheiding in melkveestallen' is onderzoek gedaan naar de effectiviteit van enkele bronscheidingssystemen, waaronder het CowToilet. Het doel van het onderzoek aan het CowToilet was het vaststellen van het effect van urine-opvang op het totale N-verlies uit de stal, de samenstelling van dit verlies (NH_3 , N_2O , N_2), de samenstelling van de opgevangen urine en de drijfmest, en de scheiding van N, P, en K. De opzet, uitvoering, en resultaten van dit onderzoek zijn beschreven in het voorliggende rapport.

2 Materiaal & methoden

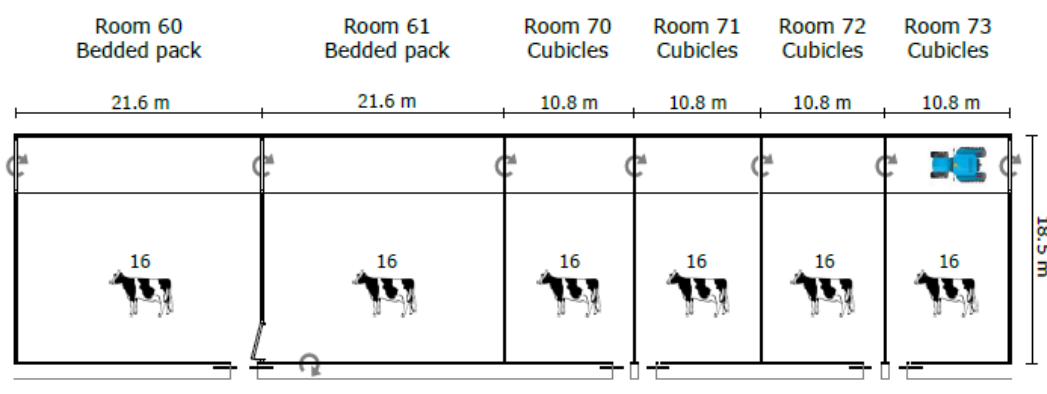
2.1 Introductie

Het totale N-verlies van een melkveestal met CowToilet werd afgeleid van de N-massabalans voor een experimenteel compartiment ('stal') met CowToilet 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 voor de stal met het CowToilet een beschrijving van de stalinrichting, het koemanagement, de uitgevoerde metingen, en de gebruikte methoden voor het opstellen van de N-balans, het berekenen van het totale N-verlies, de samenstelling van dit verlies, en hoe de resultaten van de stal met het CowToilet zijn vergeleken met de resultaten van een vrijwel identieke stal zonder CowToilet (referentiestal), voor dezelfde periode (De Boer 2023b).

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) was verbouwd en gesplitst in twee aparte stallen, hernoemd tot stal 60 en stal 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 bij het voeren en (deels) op maandagen. 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).

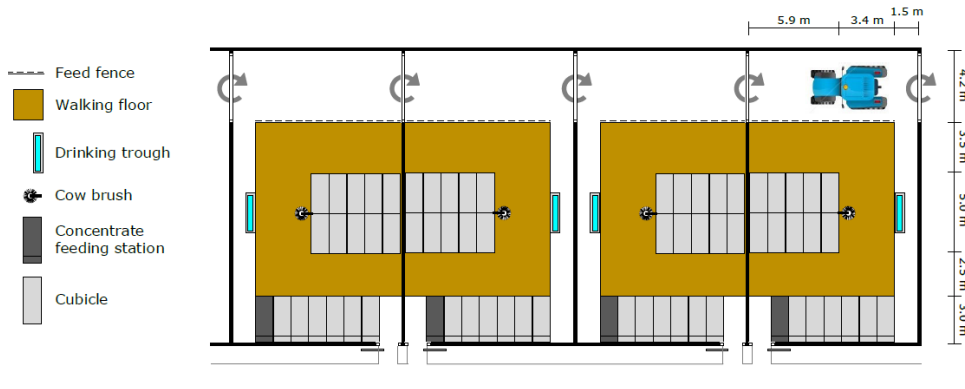


Figuur 1 Plattegrond van de (oorspronkelijke) indeling van de individuele compartimenten in de Milieumeetstal op proeffaciliteit Dairy Campus (Bron: Winkel et al., 2020).

Stal 70 en 72

Het onderzoek aan de stal met roostervloer en CowToilet werd uitgevoerd in stal 70 en als referentie werd stal 72 gebruikt. Het vloeroppervlak voor de dieren in beide stallen 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. In de achterste rij

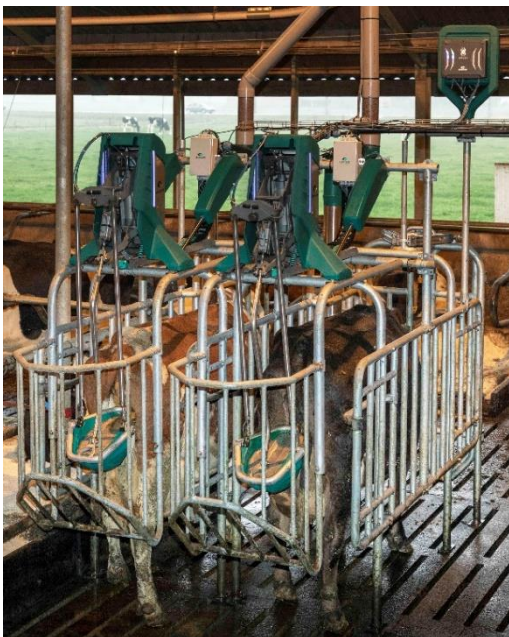
ligboxen was een krachtvoerstation geïnstalleerd, op de buitenste rand van de middelste twee rijen ligboxen een koeborstel, en daartegenover, op het zijpad buiten de scheidingswand, een waterbak (Fig. 2). Ten behoeve van het onderzoek was in stal 70 de reguliere krachtvoerstation buiten werking gesteld, en was tegenover de waterbak, naast de voorste rij ligboxen, een CowToilet geïnstalleerd. De roostervloer in beide stallen 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 (CowToilet), 71, 72 (referentie), en 73, van links naar rechts) in de Milieumeetstal op proeffaciliteit Dairy Campus (Bron: Winkel et al., 2020).

CowToilet

Het Hanskamp CowToilet (Fig. 3) bestond uit een doorloopvoerstation (FeedStation Walk-Through, Hanskamp) uitgerust met een voerdosator (PipeFeeder, Hanskamp) en een voercomputer (Spider, Hanskamp), waarbij op het voerstation een CowToilet-unit was gemonteerd. Het voerstation was van voren en achteren afsluitbaar met hydraulische hekjes, vooraan met twee hekjes die naar buiten draaiden (T'port, Hanskamp) en van achteren met een hek dat naar boven draaide (L'port, Hanskamp). Wanneer een koe in het voerstation liep, was deze aan de voorkant gesloten. Als de koe in het voerstation was, en het achterste hek was gesloten, kwam de beweegbare urine-opvangbak naar beneden en werd aan de achterkant van de koe de urineerreflex gestimuleerd door een wrijvende beweging. Uitgescheiden urine werd opgevangen in de opvangbak en meteen weggepompt naar een opslag.



Figuur 3 Boven- en achterkant van het doorloopvoerstation met CowToilet. Linksvoor in het voerstation wordt de brok verstrekt. Foto Hanskamp Agrotech.

De urine-opslag bestond uit een plastic IBC (1000 l) die van boven was afgesloten met een draaidop waardoor de aanvoerslang van het CowToilet liep. De opslag stond van 6 tot 19 oktober 2020 in stal 70 vooraan het zijpad, van 20 oktober 2020 tot 2 februari 2021 buiten de Milieumeetstal aan de oostelijke zijkant, en van 3 februari tot 5 oktober 2021 naast het uitlooppad van nieuwe stal 60 (Fig. 1).

Mestrobot

Tijdens de balansperiode werd een mestrobot geïnstalleerd (Discovery, Lely, Maassluis) en vier maanden gebruikt om het effect van het schoonhouden van de roostervloer en het sproeien van water op de NH₃-emissie vast te stellen. De mestrobot maakte de vloer alleen schoon tussen 12 maart en 26 april 2021, en sproeide aanvullend met water vanaf 26 april t/m 12 juli 2021. Tussen 26 maart en 1 mei waren er problemen met de wateraansluiting van de robot en was er een aanzienlijke waterlekage. Op 1 mei werd de wateraansluiting gerepareerd.

2.3 Diermanagement en rantsoen

Diermanagement

Tijdens de balansperiode waren in de stal 16 melkgevende koeien (Holstein-Friesian) aanwezig. De gemiddelde vloeroppervlakte 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 onderzoek verlieten de koeien tijdens de balansperiode stal 70 voor een periode van een week, vanaf 22 februari t/m 28 februari 2021. 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). Het PMR werd s'ochtends verstrekt tussen 5 en 6 uur, en aangeschoven tussen 15 en 17 uur en 20 en 22 uur. De brokgift werd verstrekt in het doorloopvoerstation met het CowToilet en bestond uit een basislokgift aangevuld met een koe-specifieke gift.

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, de opgevangen urine, en de geproduceerde drijfmest. Ook gemeten werden de frequentie van urine- en fecesexcretie rond het melken, het koegewicht, de temperatuur en het ventilatiedebiet van de stal, en de NH₃- en N₂O-emissie uit de stal.

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 gerstmeel, 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 in onderzoek zijnde stallen in de Milieustal in één ronde achter elkaar gevoerd, beginnend bij stal 60 (Fig. 1). Per stal werd na het uitdraaien de lading opnieuw 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 negen 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 gehalte drogestof (DS), N, P, en K van het vers

gevoerde PMR en het overblijvende restvoer bepaald, om eventuele veranderingen als gevolg van uitdroging of selectie door de koeien vast te stellen. Het PMR werd hiervoor eveneens gedurende een maand iedere dinsdagochtend meteen na het uitdraaien bemonsterd door het nemen van een plukmonster 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), gedroogd (70 °C, 48 uur) ter bepaling van het DS-gehalte, en daarna droog bewaard tot het moment van analyse.

Naast bemonstering van het uitgedraaide PMR waren de gevoerde gras- en snijmaïskuilen eerder ook apart bemonsterd en geanalyseerd door Eurofins Agro (Wageningen).

Brok

De verstrekte brok werd dagelijks per koe geregistreerd door het CowToilet. Brok werd iedere dinsdagochtend bemonsterd uit het voerstation van stal 72 en monsters werden ingevroren (-18 °C) tot het moment van analyse.

Drinkwater

Het drinkwatergebruik (bronwater) door de koeien werd geregistreerd via de watermeter in stal 70, geplaatst in de aanvoerleiding van de waterbak. Het watergebruik van de mestrobot, tussen 28 april en 12 juli 2021, werd geregistreerd met een aparte watermeter geplaatst in de aanvoerleiding van de mestrobot. Beide watermeters werden iedere dinsdag afgelezen en de standen werden geregistreerd. Het drinkwater werd iedere dinsdagochtend 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

In de melkstal (AutoRotor PerFormer Plus, GEA, Düsseldorf, Duitsland) werd de melkgift per koe per dag gemeten met een elektronische doorstroommeter (Dematron 70, GEA). Bij de wekelijkse melkcontrole werd iedere dinsdagmiddag en woensdagochtend een monster genomen van de melkgift van iedere koe en geanalyseerd op gehalte eiwit, vet, lactose, en ureum (Qlip, Zutphen). Daarnaast werd iedere dinsdagmiddag het restant van de individuele monsters van alle koeien van meetstallen 60, 61, 70, en 72 bij elkaar gedaan, gemengd, bemonsterd, en werd het verzamelmonster gekoeld bewaard (4 °C). Woensdagochtend werd deze procedure herhaald, en daarna werden beide verzamelmonsters samengevoegd tot een nieuw monster dat werd ingevroren (-18 °C) tot het moment van analyse.

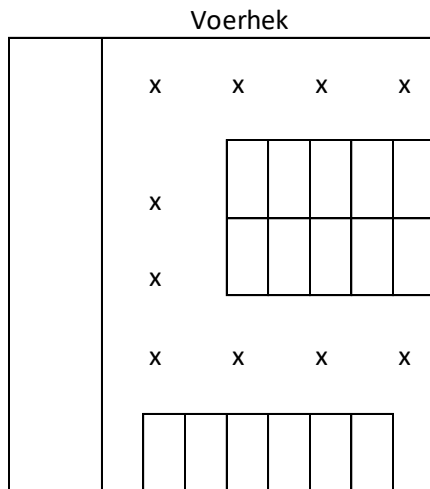
Urine

Het opvangvat voor de urine werd iedere dinsdag en vrijdag geleegd, waarbij de hoeveelheid opgevangen urine werd afgelezen van een schaalverdeling op de zijkant van de het opvangvat en werd geregistreerd. Voorafgaande aan de leging op dinsdag werd de urine in het opvangvat goed gemengd, werd met een multisampler (lengte 1,8 m, ø 30 mm; Eijkelkamp, Giesbeek) een hoeveelheid van tenminste 1,5 liter verzameld, en werd hiervan na opnieuw mengen een monster genomen dat werd ingevroren (-18 °C) tot het moment van analyse. Vanaf 2 maart 2021 werd, voorafgaande aan het invriezen, de volumetrische dichtheid van de urine bepaald door het monster over te gieten in een maatkan (1000 ml), de inhoud te wegen, het volume af te lezen, en vervolgens de dichtheid te berekenen.

Drijfmest

Bij start van de balansperiode werd de mestkelder zoveel mogelijk geleegd, tot een peil van 31 cm (42 m³). Het mestpeil werd iedere dinsdagochtend gemeten met een peilbuis met mm-schaalverdeling, op 10 verschillende posities regelmatig verdeeld over het roostervloeroppervlak (Fig. 4), en de meetresultaten werden gemiddeld. De drijfmest werd op vergelijkbare posities bemonsterd met de multisampler, 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. De volumetrische dichtheid van de genomen monsters werd vanaf 2 maart 2021 bepaald door deze 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 4 *Schets van de indeling van stal 70 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.

Frequentie van de excretie van urine en feces

Rondom het tijdstip van melken werd de frequentie van de excretie van urine en feces door de koeien gemeten, 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 urine of feces 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.

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 (Fancam, Panningen) geplaatst in de twee ventilatoren (Fancam 1680 M; Ø 80 cm).

NH₃- en N₂O-emissie

De NH₃- en N₂O-emissie uit de stal werd tijdens de balansperiode o.a. gemeten met een Picarro G2508 gas concentration analyzer (Picarro Inc., Santa Clara CA, USA). Per uur werd per ventilator vijf minuten lucht aangezogen en gemeten. De gegevens van de laatste vier minuten werd per uur gemiddeld over de twee ventilatoren en de uurgemiddelden werden per dag gemiddeld. Voor de berekening van de hoeveelheden emissies werd het gelijktijdig gemeten ventilatiedebiet gebruikt, berekend op basis van de kalibratielijn van 11 januari 2022. Hoeveelheden werden berekend als het verschil tussen de concentratie in de stal en buiten

de stal, vermenigvuldigd met het ventilatiedebiet (= afgezogen hoeveelheid lucht). Meer informatie over de meetmethode en de (vaste) meetopstelling in de Milieustal is gegeven door Winkel et al. (2020).

2.5 Analyses

Nat-chemische analyses

De (wekelijks genomen) 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 DS. N-Kjeldahl werd gemeten met SFA (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 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.

De urine-, drijfmest- en zaagselmonsters werden door het Chemisch-Biologisch Laboratorium Bodem (CBLB, Wageningen) nat-chemisch geanalyseerd, de urine- en drijfmestmonsters op pH, EC (elektrische geleidbaarheid), DS, as, N-totaal, P-totaal, K-totaal, N-NH₄, C-totaal, en C-organisch, en de zaagselmonsters op DS, N-totaal, P-totaal, en K-totaal. Bij urine en 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 vers materiaal 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 het gedroogde materiaal (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 gedroogd materiaal (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.

Ten behoeve van de analyse van de opgevangen urine op gehalte organische N werd op vier datums een extra monster genomen, op 27 juli, 3 augustus, 7 september, en 5 oktober 2021. Deze vier monsters werden verontreinigd met enkele druppels drijfmest, een aantal weken afgesloten bewaard bij kamertemperatuur en in de tussentijd regelmatig geschud, en daarna geanalyseerd op N-totaal en N-NH₄. De verontreiniging met drijfmest werd toegevoegd om in de urine nog aanwezige ureum volledig om te laten zetten naar NH₄ en vervolgens het gehalte organische N in de urine te kunnen berekenen als: N-totaal - N-NH₄.

Infrarood spectrometrie

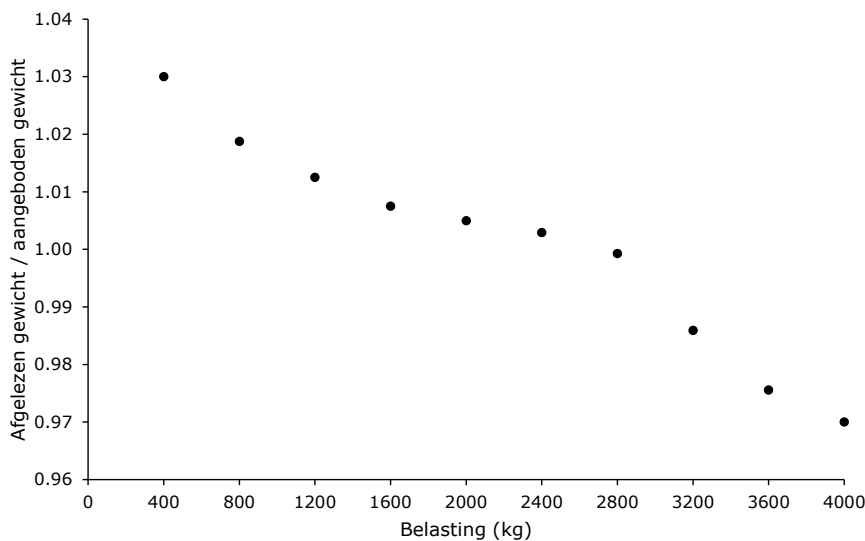
Naast de wekelijkse bemonstering en vervolgens nat-chemische analyse werd het PMR en de melk ook geanalyseerd met infrarood spectrometrie (NIR), bij het PMR door analyse van de componenten op partijbasis. In de door Eurofins Agro genomen kuilmonsters werd door Eurofins Agro het gehalte ruw eiwit, NH₃, 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 NH₃-vrije ruw eiwit (N in ruw eiwit - N-NH₃ in het luchtdroge monster), N-NH₃ in het verse monster, en NO₃-N in het verse monster (omgerekend naar DS) bij elkaar op te tellen.

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 brokafgifte door de Pipefeeder, aan de melkmeters in de melkstal, en aan de meetwaaiers ter bepaling van het ventilatiedebiet in stal 70. De weeginstallatie van de voermengwagen en de brokafgifte door Pipefeeder werden, indien nodig, 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. 5). Ongeveer een maand na de kalibratie werd de weeginstallatie tijdens regulier onderhoud gejusteerd door Kuperus Oudehorne (Oudehorne).



Figuur 5 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 brokafgifte door de Pipefeeder werd eens per maand gecontroleerd door een ingestelde hoeveelheid af te draaien en te wegen, en de afgifte eventueel te justeren 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 puls-frequenties (Hz) naar debiet is de kalibratielijns van 11 januari 2022 gebruikt.

2.7 Regressieanalyse

Er werd regressieanalyse toegepast om relaties vast te stellen tussen percentage restvoer (PMR) en dagnr., de hoeveelheid opgevangen urine en dagnr., de NH₃-emissie en staltemperatuur en/of ureumgetal, en de N₂O-emissie en staltemperatuur en/of ureumgetal. In alle gevallen werd gebruik gemaakt van statistisch pakket Genstat (19^e editie, VSNI, Hemel Hempstead, UK). Bij toepassing van enkelvoudige regressie (restvoer en opgevangen urine) werd gebruik gemaakt van de procedure voor polynome regressie. Het eerst getoetste model was: $Y = a + bx + cx^2$, met Y het percentage restvoer of hoeveelheid opgevangen urine, x het dagnr., a de constante, b de lineaire coëfficiënt, en c de kwadratische coëfficiënt. Wanneer de kwadratische coëfficiënt niet significant was ($P > 0,05$) werd de lineaire variant van het model getoetst. Bij toepassing van meervoudige regressie (NH₃- en N₂O-emissie) werd eerst de relatie tussen emissie en alleen staltemperatuur getoetst, en werd ureumgetal alleen aan het model met staltemperatuur toegevoegd als hierdoor significant meer variantie werd verklaard.

2.8 Berekening mineralenbalansen

Principe

Het cumulatieve N-verlies uit de stal werd afgeleid van een cumulatieve N-massabalans, wekelijks opgesteld voor 52 weken in de periode vanaf 6 oktober 2020 t/m 4 oktober 2021. Cumulatieve balansen werden niet alleen opgesteld voor N, maar ook voor P en K. 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 werd daarom afgeleid als het verschil tussen N aanvoer in de stal (vooral met voer) en N die wordt vastgelegd (vooral in drijfmest, urine, en melk).

De massabalansen voor de drie mineralen (M_{balans}) werden berekend als:

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

Fosfor en K vervluchtigen niet, en alle aanvoer van deze mineralen moet daarom worden teruggevonden in drijfmest, urine, 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 voor deze fout te corrigeren. In het balansonderzoek aan referentiestal 72 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 (De Boer, 2023b). Daarom is ook in het balansonderzoek aan stal 70 alleen de meetfout op de P-balans gebruikt voor de correctie. Een correctie voor de meetfout kan zowel worden toegepast op de aangevoerde als op de vastgelegde hoeveelheid mineralen. Omdat in dit onderzoek de grootste fout waarschijnlijk werd gerealiseerd op meting van de in drijfmest vastgelegde hoeveelheden mineralen, is de correctie alleen op de vastlegging in drijfmest (en opgevangen urine) toegepast. De hoeveelheid in drijfmest en opgevangen urine vastgelegde N werd daarbij gecorrigeerd als: $1 - (P\text{-overschot/tekort (kg)} / P\text{-excretie (kg)}) * \text{in drijfmest} + \text{urine vastgelegde N (kg)}$. 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: $N_{\text{voer}} - N_{\text{melk}} - N_{\text{dieren}}$. 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 balansweek berekend als: afgegeven volume drinkwater (l) * minerale gehalten (mg l⁻¹) in watermonsters. De hoeveelheden mineralen in zaagsel werden per balansweek berekend als: gebruikte hoeveelheid zaagsel (kg) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in zaagselmonsters. 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, na vier maanden, en na acht maanden.

Mineralen in voer

De hoeveelheid mineralen aangevoerd met ruwvoer, enkelvoudig krachtvoer, en lactatie-mineralenmix werd op twee manieren berekend. Bij de eerste variant werden de hoeveelheden mineralen (kg) per balansweek berekend als: gevoerde hoeveelheid PMR (kg) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in PMR-monsters. Bij de tweede variant werden per dag de hoeveelheden N-Kjeldahl en N-NO₃ voor iedere PMR-component berekend als: gevoerde hoeveelheid PMR-component * 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 gehalten afkomstig van bemonstering en analyse op het niveau van gehele kuilen of geleverde partijen (enkelvoudig krachtvoer, lactatie-mineralenmix). Bij de eerste variant was het gehalte nitraat in de PMR-monsters niet gemeten en werd hiervoor gecorrigeerd door de berekende hoeveelheid N-Kjeldahl per balansweek te vermenigvuldigen met een wekelijkse factor. Deze factor werd met de gegevens van de tweede variant per balansweek berekend als: (N-NO₃ (kg) / N-Kjeldahl (kg)) + 1.

De hoeveelheid met brok aangevoerde mineralen werd per balansweek 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.

Mineralen in urine en drijfmest

De hoeveelheid in urine vastgelegde mineralen werd per balansweek berekend als: hoeveelheid opgevangen urine (volume) * dichtheid van urinemonsters (kg l⁻¹) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in urinemonsters. 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.

Het volume (m³) drijfmest in de kelder werd berekend als: mestpeil (m) * oppervlakte keldervloer (m²). De volumaire dichtheid van gemixte mestmonsters is normaliter rond 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, ook na mixen, een onderschatting van de totale hoeveelheid uitgescheiden urine en feces, 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 (paragraaf 2.4) werd geschat hoeveel urine, feces, en drijfmest er relatief buiten de stal werd uitgescheiden.

De hoeveelheid vastgelegde mineralen (kg) in drijfmest in de kelder werd per balansweek berekend als: hoeveelheid in de kelder aanwezige drijfmest (l) * dichtheid van het drijfmestmonster (kg l⁻¹) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in drijfmestmonsters. De per balansweek gebruikte minerale gehalten 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 één van de vijf tijdstippen (25 augustus 2021) werd de verwijderde mest wel gewogen maar niet door de vrachtwagen bemonsterd. De hoeveelheid verwijderde mineralen werd voor dit tijdstip berekend op basis van de verwijderde hoeveelheid, de hoeveelheid overblijvende mest in de kelder, en de mestsamenstelling kort voor en kort na het verwijderen.

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

Mineralen in melk en melksamenstelling

De hoeveelheid in melk vastgelegde mineralen werd per balansweek berekend als: geproduceerde melk (kg) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in (verzamel)monsters van de wekelijkse melkcontroles. De gebruikte minerale gehalten waren het gemiddelde van de gehalten in het verzamelmonster van de melkcontrole tijdens de betreffende balansweek en de volgende balansweek. Analysewaarden die meer dan 10% afweken van de vorige meting werden bij deze middeling niet meegenomen. Het (gewogen) eiwitgehalte in de melk van stal 70 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 70 te sommeren, en de gesommeerde eiwitproductie te delen door de gesommeerde melkproductie. Het gewogen vetgehalte, lactosegehalte, en ureumgetal werden op dezelfde manier berekend.

Mineralen in dieren

De hoeveelheid mineralen vastgelegd in de 16 koeien in stal 70 werd per balansweek berekend als: totaal diergewicht (kg) op dinsdag * minerale gehalten (g kg⁻¹) in lichaamsweefsel. Vervolgens werd voor iedere balansweek de verandering in cumulatief vastgelegde mineralen berekend, waarbij de verandering tijdens de week dat de koeien uit de stal waren, en de weken met koewisselingen, buiten beschouwing werden gelaten. De gebruikte minerale gehalten voor N, P, en K in lichaamsweefsel waren respectievelijk 22,5, 7,4, en 2,0 g kg⁻¹ (CBS, 2022).

2.9 Correctie van de balansperiode en het stikstofverlies

Het N-verlies werd berekend voor meerdere varianten van de balansperiode, waarbij de balansperiode werd gecorrigeerd voor perioden met missende emissiegegevens of leegstand. Bij de correctie werd het gemeten of geschatte N-verlies in de betreffende periode in mindering gebracht op het N-verlies over de hele balansperiode. Het geschatte N-verlies werd berekend als: aantal dagen van de periode * gemiddeld dagelijks N-verlies tijdens de hele balansperiode. De schatting werd als alternatief toegepast omdat er een aanzienlijke toevallige fout aanwezig kan zijn op de wekelijkse verandering in gemeten N-verlies, waardoor deze fout een dominant en niet-representatief effect kan hebben op het resultaat van een correctie. Deze fout kan worden verkleind door gebruik van een geschat N-verlies.

Bij een week leegstand werd de schatting van het N-verlies verder verfijnd door er rekening mee te houden dat in een week leegstand de emissies aanzienlijk lager kunnen zijn dan gemiddeld. Bij deze verfijning werd de gemeten gemiddelde NH₃- en N₂O-emissie in een week leegstand uitgedrukt als percentage van de gemiddelde NH₃- en N₂O-emissie in de week voorafgaande aan de leegstand. Aangenomen werd dat de relatieve verandering in N₂-emissie gelijk was aan de relatieve verandering in N₂O-emissie. De percentages werden vervolgens per N-vorm vermenigvuldigt met hun relatieve aandeel in de totale N-emissie tijdens de hele balansperiode, en tenslotte met de oorspronkelijk geschatte hoeveelheid totaal N-verlies voor de week. Als voorbeeld: bij een relatieve emissie van NH₃ en N₂O tijdens een week leegstand van respectievelijk 40% en 80% vergeleken met de voorgaande week, een relatief aandeel van de NH₃- en (N₂ + N₂O)-emissie in de totale N-emissie van respectievelijk 45% en 55%, en een oorspronkelijk geschatte hoeveelheid totaal N-verlies in de week leegstand van 3,0 kg N, was de verfijnde schatting van het N-verlies $(0,40 * 0,45 + 0,80 * 0,55) * 3,0 = 1,86$ kg N.

2.10 Samenstelling van het stikstofverlies

Samenstelling van het stikstofverlies uit de stal met het CowToilet

De samenstelling van het totale N-verlies uit stal 70 werd vastgesteld door de NH₃- en N₂O-emissie te meten en deze N-verliezen op het totale N-verlies, gemeten met de N-balans, in mindering te brengen.

De restpost bestaat dan vooral uit N₂ en een kleine hoeveelheid NO_x. Voor deze berekening werden de dagelijkse NH₃- en N₂O-emissiewaarden over de hele balansperiode gemiddeld, waarbij de dagelijkse emissiewaarden in de week leegstand werden verwijderd. Er waren daarnaast twee perioden met missende gegevens, 6 oktober t/m 2 november 2020 en 27 april t/m 17 mei 2021, waarbij aanvullend een aantal dagelijkse emissiewaarden werden verwijderd om deze perioden aan te passen naar hele balansweken. Het totale N-verlies over de hele balansperiode, berekend met de N-balans, werd ook gecorrigeerd voor de perioden met missende emissiegegevens en de week leegstand (paragraaf 2.9). De op de bovenstaande manier gecorrigeerde en afgestemde balansperiode duurde 308 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 deze 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 perioden met missende emissiegegevens, maar gecorrigeerd voor de week leegstand. Deze periode duurde 357 dagen.

Reductie van het stikstofverlies uit de stal met het CowToilet vergeleken met de referentiestal

Bij vergelijking van de N-verliezen per N-vorm van stal 70 met stal 72 dienen de emissiegegevens en de balansgegevens voor beide stallen dezelfde periode te vertegenwoordigen. Dit werd gerealiseerd door bij beide stallen de emissiegegevens en N-balans te corrigeren voor de perioden met missende emissiegegevens en de perioden met leegstand in *beide* stallen. De balanscorrectie werd voor de perioden met missende emissiegegevens voor beide stallen uitgevoerd op basis van het geschatte N-verlies in deze perioden (paragraaf 2.9). De balanscorrectie werd voor de week leegstand in stal 70 en de vier weken leegstand in stal 72 uitgevoerd met de verfijnde schatting van het N-verlies, dus inclusief een correctie voor de mogelijk afwijkende emissie in deze weken. Voor de correctie van de laatste drie weken leegstand van stal 72 werd bij stal 70 gebruik gemaakt van het geschatte totale N-verlies zonder verfijning, omdat in deze drie weken de koeien in stal 70 gewoon op stal stonden. De op de voorgaande manier gecorrigeerde en afgestemde balansperiode duurde voor beide stallen 287 dagen.

Na bovenstaande afstemming van de balansperioden van beide stallen werden aanvullend nog correcties uitgevoerd voor verschillen tussen beide stallen in gemiddeld stalventilatie-debiet, ureumgetal van de melk, en staltemperatuur. Voor een verschil in ventilatie-debiet moet gecorrigeerd worden, omdat bij een hoger of lager ventilatie-debiet respectievelijk meer of minder NH₃ of N₂O met de afgezogen lucht wordt afgevoerd. De correctie werd uitgevoerd op basis van de aanname van een lineaire relatie, ofwel wanneer het ventilatie-debiet van een stal 5% lager is, wordt de via ventilatie afgevoerde hoeveelheid NH₃ of N₂O met 5% verlaagd. Een hoger ureumgetal in de melk van b.v. stal 70 vergeleken met stal 72 kan betekenen dat er in stal 70 meer ureum met de urine werd uitgescheiden, en de NH₃-emissie zonder behandelingseffect al hoger was dan in stal 72. Voor een correcte vergelijkingsbasis moet de NH₃-emissie van stal 72 in dat geval nog in verhouding worden aangepast (verhoogd). Een lagere temperatuur in b.v. stal 70 vergeleken met stal 72 betekent dat in stal 70 het niveau van NH₃-emissie zonder behandelingseffect al lager was dan in stal 72. Ook hiervoor moet de NH₃-emissie van stal 72 nog in verhouding worden aangepast (verlaagd). De correctie voor verschil in ureumgetal en temperatuur werd uitgevoerd na toepassing van meervoudige lineaire regressie op de NH₃-emissie, de temperatuur, en het ureumgetal op de dagen van de melkcontrole (dinsdag en woensdag) in stal 72, waarbij per balansweek de gegevens van de twee dagen werden gemiddeld. De regressie werd uitgevoerd op basis van de aanname van een lineaire relatie van NH₃-emissie met temperatuur of ureumgetal, en vervolgens werd vastgesteld of toevoeging van ureumgetal aan het model met alleen temperatuur leidde tot significant ($P < 0,05$) meer verklaarde variantie. Met de gefitte relatie werd vervolgens de gemeten hoeveelheid NH₃, gemiddeld over de periode van 287 dagen en eerder al aangepast voor een verschil in gemiddeld ventilatie-debiet (zie boven), voor stal 72 ook nog gecorrigeerd voor een verschil in gemiddelde temperatuur en gemiddeld ureumgetal vergeleken met stal 70. Bovenstaande meervoudige lineaire regressie werd ook uitgevoerd voor de N₂O-emissie, waarbij werd aangenomen dat de relatie tussen N₂O-emissie en temperatuur en/of ureumgetal ook representatief was voor de relatie tussen N₂-emissie en temperatuur en/of ureumgetal, en een relatieve aanpassing in N₂O-emissie ook kon worden toegepast op de N₂-emissie. Vervolgens werd de gemiddelde totale hoeveelheid N-verlies voor stal 72 opnieuw berekend door de aangepaste hoeveelheden N-emissie met NH₃, N₂O, en N₂ bij elkaar op te tellen.

Tot slot werden de hoeveelheden N-emissie per N-vorm voor stal 72 opnieuw uitgedrukt als percentage van de N-excretie, en werden de relatieve N-emissies per N-vorm voor stal 70 uitgedrukt als percentage van de gecorrigeerde relatieve N-emissies per N-vorm voor stal 72.

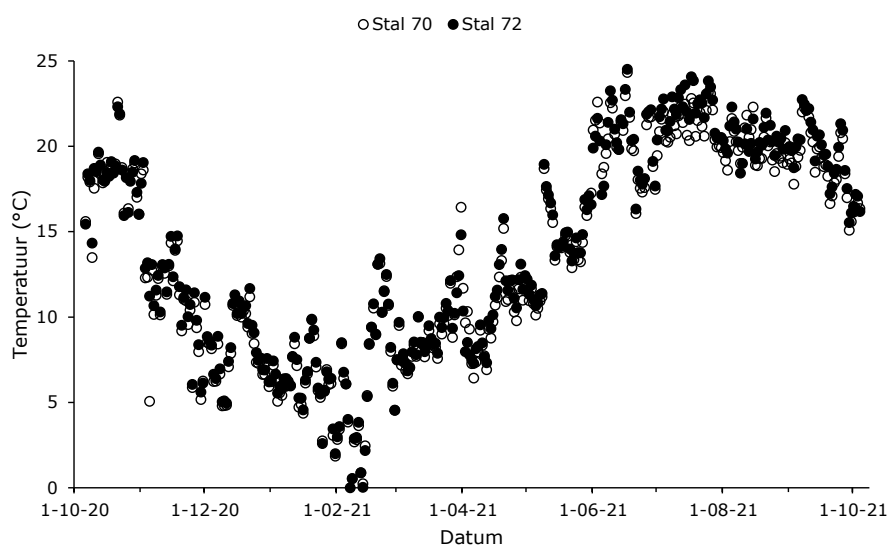
2.11 Opgevangen urine en ammoniakemissie

De hoeveelheid uitgescheiden urine werd geschat met behulp van verschillen in gemeten EC tussen de in stal 70 opgevangen urine en de in (nieuwe) stal 60 geproduceerde dunne en dikke fractie. De EC is een directe afgeleide van het zoutgehalte van een vloeistof, en het overgrote deel van door de koe uitgescheiden zouten wordt uitgescheiden met de urine. De zoutuitscheiding van de koeien in urine en feces kan daarom worden gebruikt om de urineproductie te schatten, mits de interactie tussen urine en feces beperkt blijft, aangezien interactie de EC kan beïnvloeden. In stal 60 was de vervuiling van de dunne fractie met feces gering, en de verzamelde feces werd een dag na uitscheiding bemonsterd. Hierdoor is de beïnvloeding van de EC van beide fracties beperkt gebleven, en zijn de gemeten EC's bruikbaar voor de navolgende schatting van urineproductie. In stal 60, een stal die een vergelijkbaar management had als stal 70 en 72, lagen op de roostervloer rubberen tegels met daaroverheen filterdoek. Hierdoor liep door de koeien uitgescheiden urine in de kelder onder de vloer, en bleef de feces op de tegels liggen. De dunne fractie in de kelder bevatte naast uitgescheiden urine ook water wat de koeien morsten bij het drinken, en de dikke fractie op de vloer bevatte een deel van de uitgescheiden urine. Evenals in stal 70 en 72 werd in stal 60 iedere dinsdag het peil in de mestkelder gemeten en werd de inhoud bemonsterd. De hoeveelheid dikke fractie op de tegels werd iedere 1,5 tot 2 uur afgeschoven, opgeslagen, dagelijks gewogen, en iedere dinsdag bemonsterd. Bij schatting van de totale hoeveelheid uitgescheiden urine werd eerst geschat hoeveel van de uitgescheiden urine in de kelder kwam. Deze hoeveelheid werd geschat als: $(\text{geproduceerde dunne fractie (kg)} * EC_{\text{dunne fractie}}) / EC_{\text{opgevangen urine}}$, met de aanname dat de bijdrage van het gemorste water aan de EC verwaarloosbaar was, en dat de (lichte) vervuiling met feces een verwaarloosbaar effect op de EC van de dunne fractie had. De hoeveelheid gemorst water in de kelder werd vervolgens berekend als: $\text{dunne fractie (kg)} - \text{in de kelder opgevangen urine (kg)}$. De hoeveelheid urine in de afgeschoven dikke fractie werd vervolgens geschat met behulp van de formule: $(\text{urine in dikke fractie (kg)} * EC_{\text{opgevangen urine}} + \text{verse feces (kg)} * EC_{\text{verse feces}}) = \text{dikke fractie (kg)} * EC_{\text{dikke fractie}}$, en de formule: $\text{urine in dikke fractie (kg)} + \text{verse feces (kg)} = \text{dikke fractie (kg)}$. De EC van verse feces werd niet gemeten, maar is laag, en werd op basis van Chen et al. (2008) geschat op gemiddeld $3,1 \text{ mS cm}^{-1}$. Door de hoeveelheid urine in dikke fractie te variëren totdat de eerste formule kloppend was, werd vastgesteld hoeveel van de dikke fractie uit urine bestond, en hoeveel uit verse feces. Vervolgens werd de hoeveelheid urine in de kelder en in de dikke fractie bij elkaar opgeteld voor de totale hoeveelheid uitgescheiden urine, en werd deze omgerekend van kg naar liter door gebruik van de gemiddelde (gemeten) dichtheid van opgevangen urine. De berekeningen werden uitgevoerd voor de periode vanaf 1 december 2020 t/m 14 september 2021, omdat in de periode voor 1 december de meting van de dunne fractie in stal 60 niet betrouwbaar was, en daarnaast de metingen in stal 60 per 14 september stopten. Met behulp van de geschatte hoeveelheid uitgescheiden urine en de hoeveelheid opgevangen urine werd geschat welk percentage van de uitgescheiden urine door het CowToilet werd opgevangen. Het percentage opgevangen urine werd vervolgens vergeleken met de gemiddelde relatieve reductie van de N-emissies in stal 70 vergeleken met stal 72. De bovenstaande berekeningen van de hoeveelheid uitgescheiden urine betreffen voorlopige berekeningen, om een uitspraak te kunnen doen over de effectiviteit van het CowToilet. De definitieve resultaten van het onderzoek in stal 60 worden later gerapporteerd (De Boer, 2023c).

3 Resultaten

3.1 Staltemperatuur

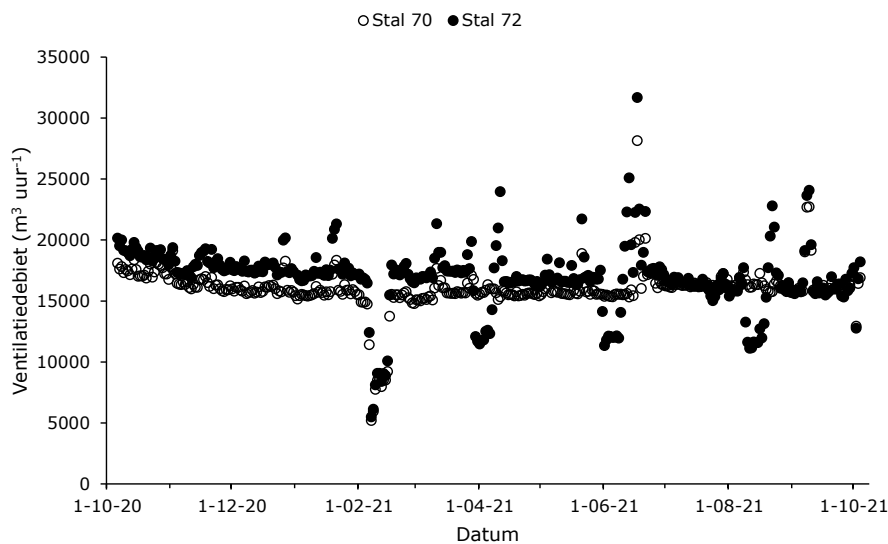
De dagelijks gemiddelde temperatuur in stal 70 varieerde in de balansperiode van -0,2 tot 24,3 °C en was inclusief de week leegstand gemiddeld 13,7 °C en zonder de week leegstand gemiddeld 13,8 °C (Fig. 6). Op hoofdlijn daalde de temperatuur na start van de balansperiode tot een laagste punt begin februari, nam daarna toe tot een piek in juni/juli, en nam daarna weer af tot aan het einde van de balansperiode. Bij vergelijking van stal 70 met 72, waarbij perioden met missende gegevens en weken leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was de gemiddelde temperatuur voor stal 70 en 72 respectievelijk 13,1 en 13,5 °C, en daarmee 3% hoger bij stal 72 vergeleken met stal 70.



Figuur 6 *Dagelijks gemiddelde temperatuur in stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode.*

3.2 Ventilatie-debiet

Het dagelijks gemiddelde ventilatie-debiet van stal 70 varieerde tijdens de balansperiode van 5200 tot 28160 m³ uur⁻¹, was inclusief de week leegstand gemiddeld 16014 m³ uur⁻¹, en was zonder de week leegstand gemiddeld 16030 m³ uur⁻¹ (Fig. 7). Over de balansperiode vertoonde het debiet een licht dalende trend. Tijdens vier perioden van 1-2 weken was het debiet tijdelijk lager ingesteld ten behoeve van ander onderzoek en rond deze momenten waren er relatief grote fluctuaties. Bij vergelijking van stal 70 met 72, waarbij perioden met missende gegevens en weken leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was het gemiddelde ventilatie-debiet voor stal 70 en 72 respectievelijk 15904 en 17064 m³ uur⁻¹, en daarmee 7% hoger bij stal 72 vergeleken met stal 70.

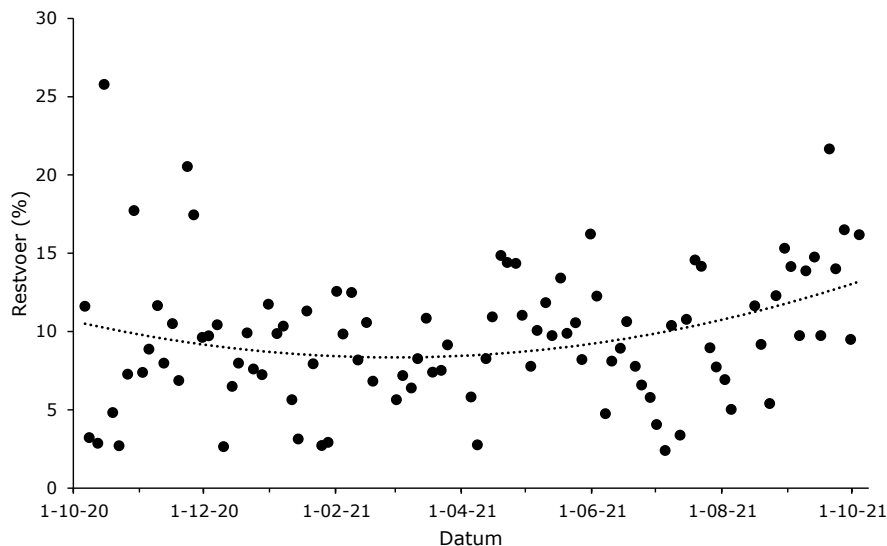


Figuur 7 Dagelijks gemiddelde ventilatiedebiet van stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode.

3.3 Rantsoen

Partial mixed ration

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



Figuur 8 Percentage restvoer van het PMR gevoerd op maandag en donderdag in stal 72 tijdens de balansperiode.

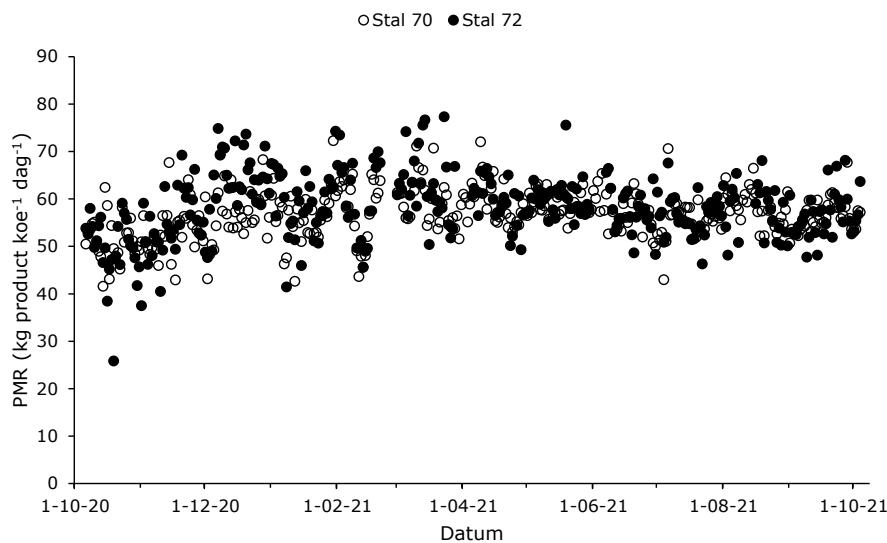
Het dagelijkse restvoer in stal 72 was niet gecorreleerd met de dagelijkse gevoerde hoeveelheid PMR, dagelijkse staltemperatuur, dagelijkse melkproductie, het dagelijkse koegewicht, of het dagelijkse ventilatiedebiet ($P > 0,05$). Omdat het percentage verklaarde variantie van restvoer door dagnr. erg 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 70 (3142 kg), de uitgedraaide hoeveelheid bij het registreren met 1% werd onderschat. De geregistreerde hoeveelheden werden hiervoor niet gecorrigeerd.

Het gewogen gemiddelde DS-gehalte van het restvoer (33,5%) week niet af van het gewogen gemiddelde DS-gehalte van het vers gevoerde PMR (33,3%) (restvoerpercentage 11,2%, $n = 4$ metingen). Bij de balansberekeningen werd daarom niet gecorrigeerd voor een verandering van DS-gehalte. Het gewogen N-, P-, en K-gehalte van het restvoer ($n = 4$) was respectievelijk 1%, 3%, en 3% lager dan van het PMR, en op basis hiervan zou de aangevoerde hoeveelheid N, P, en K eventueel met respectievelijk 0,2%, 0,4%, en 0,3% verhoogd kunnen worden. Deze mogelijke afwijkingen waren erg klein en ruim binnen de foutmarge, en daarom is hiervoor bij de balansberekeningen niet gecorrigeerd. Op basis van bovenstaande resultaten kan geconstateerd worden dat er geen uitdroging van het PMR of selectie van betekenis had plaatsgevonden.

De bruto (excl. correcties) dagelijks gevoerde hoeveelheid PMR in stal 70 varieerde tijdens de balansperiode van 41,6 tot 72,3 kg product koe⁻¹ dag⁻¹, gemiddeld 56,8 kg (Fig. 9). De bruto dagelijks met PMR gevoerde hoeveelheid DS varieerde, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag (variant 1), van 13,6 tot 23,5 kg DS koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 18,9 kg. De netto dagelijks gevoerde hoeveelheid PMR, gecorrigeerd voor een voerrest van gemiddeld 9,7%, was respectievelijk gemiddeld 51,3 kg product of 17,1 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%.

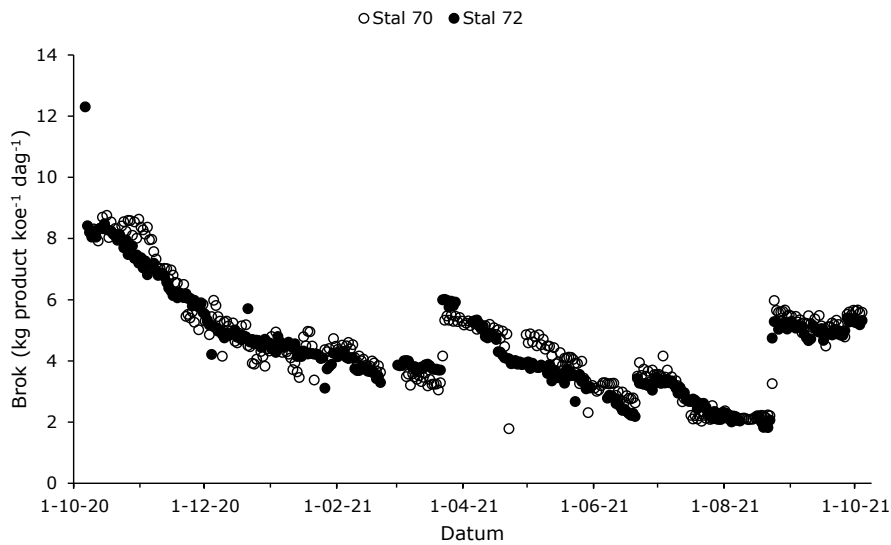


Figuur 9 Dagelijkse bruto gevoerde hoeveelheid PMR in stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode.

Het ruw eiwitgehalte van het PMR (N-Kjeldahl * 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 (op dinsdag gevoerde hoeveelheid PMR * RE-gehalte PMR), bruto gemiddeld 3,12 kg RE dier⁻¹ dag⁻¹ verstrekt.

Brok

De dagelijks verstrekte hoeveelheid brok aan de koeien van stal 70 varieerde van 1,8 tot 8,8 kg product koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 4,6 kg (Fig. 10). De hoeveelheid verstrekte brok nam in de balansperiode aanzienlijk af, maar werd enkele keren tussendoor, bij koewisselingen, tijdelijk verhoogd.

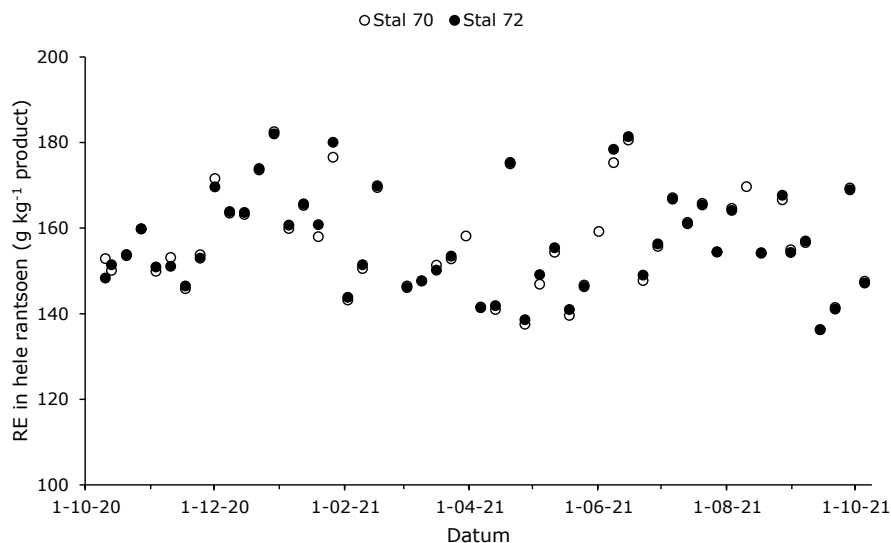


Figuur 10 Dagelijks verstrekte brok aan de koeien in stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode.

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 (op dinsdag verstrekte hoeveelheid brok * RE-gehalte in brok), gemiddeld 0,51 kg RE dier⁻¹ dag⁻¹ verstrekt. Bij vergelijking van stal 70 met 72, waarbij perioden met missende gegevens en weken leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was de gemiddelde brokgift voor stal 70 en 72 respectievelijk 4,3 en 4,2 kg dier⁻¹ dag⁻¹.

Hele rantsoen

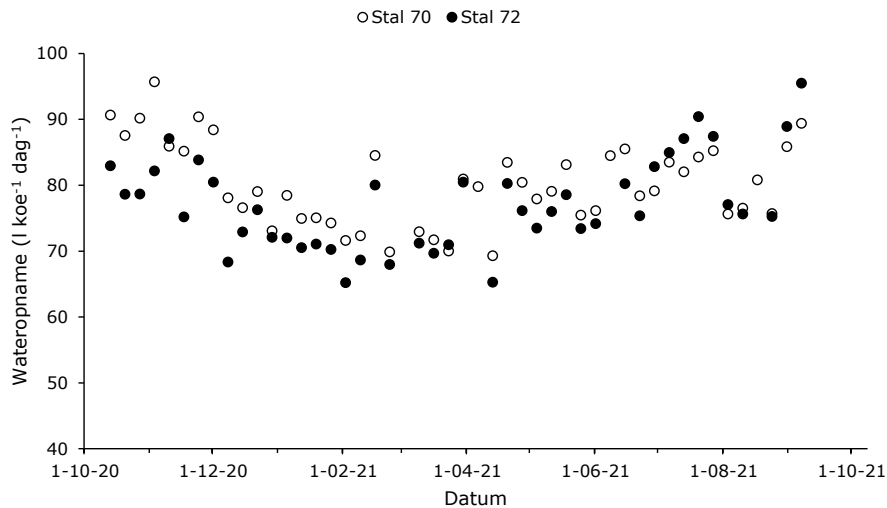
Met het hele rantsoen (PMR en brok) werd, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag (variant 1), bruto 18,9 tot 29,0 kg DS dier⁻¹ dag⁻¹ gevoerd, gemiddeld 23,1 kg, en bruto 2,86 tot 4,81 kg RE dier⁻¹ dag⁻¹, gemiddeld 3,62 kg. Van de bruto eiwitgift werd 86% verstrekt met PMR en 14% met brok. Het (gewogen) eiwitgehalte van het hele bruto rantsoen (PMR en brok) varieerde, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag, van 136 tot 183 g RE kg⁻¹ DS, en was over de balansperiode gemiddeld 157 g RE kg⁻¹ DS (Fig. 11).



Figuur 11 Gehalte ruw eiwit in het hele rantsoen gevoerd aan de koeien in stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode.

3.4 Drinkwater en zaagsel

De wateropname uit de waterbak (inclusief morsen) in stal 70 varieerde tijdens de balansperiode van 56 tot 96 l koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 80 l koe⁻¹ dag⁻¹ (Fig. 12). Het waterverbruik door de mestrobot, in de periode van 28 april t/m 12 juli 2021, varieerde van 134 tot 196 l dag⁻¹ en was gemiddeld 174 l dag⁻¹. Dit verbruik is exclusief de 20,4 m³ water die op 30 april 2021 in de mestkelder liep als gevolg van een lekkage bij de wateraansluiting van de mestrobot. Het zaagselverbruik tijdens de balansperiode was dagelijks een half pak (ca. 8,6 kg product).

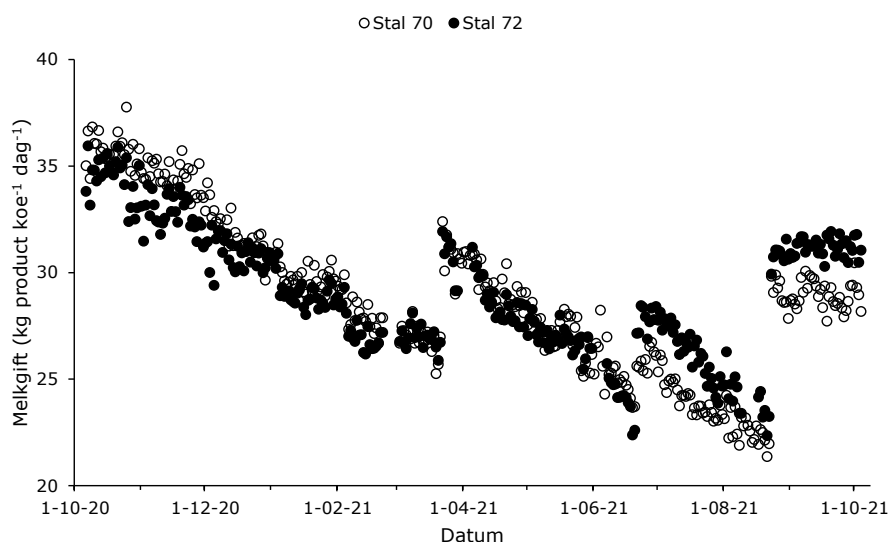


Figuur 12 Dagelijkse wateropname (inclusief morsen) door de koeien in stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode.

3.5 Melkproductie en melksamenstelling

Melkgift

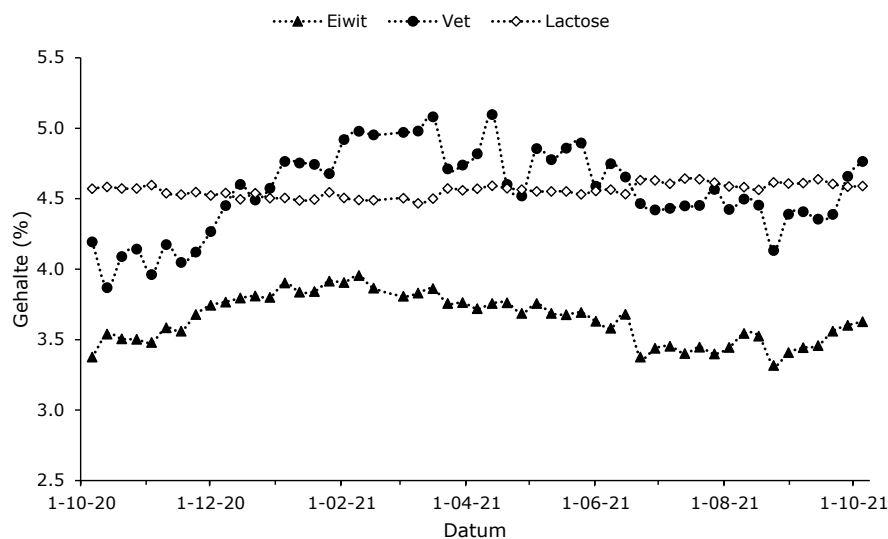
De melkgift van de koeien varieerde van 21,4 tot 37,8 kg koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 28,9 kg (Fig. 13). De melkgift vertoonde een dalende trend tijdens een groot deel van de balansperiode, tot eind augustus, en lag daarna op een hoger en stabiel niveau tot aan het einde van de balansperiode. De tussentijdse toenames waren het gevolg van de koewisselingen. Bij vergelijking van stal 70 met stal 72, waarbij perioden met missende gegevens en weken leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was de gemiddelde melkgift voor stal 70 en 72 respectievelijk 28,5 en 28,7 kg dier⁻¹ dag⁻¹, 1% lager bij stal 70 vergeleken met stal 72.



Figuur 13 Dagelijkse melkgift van de koeien in stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode.

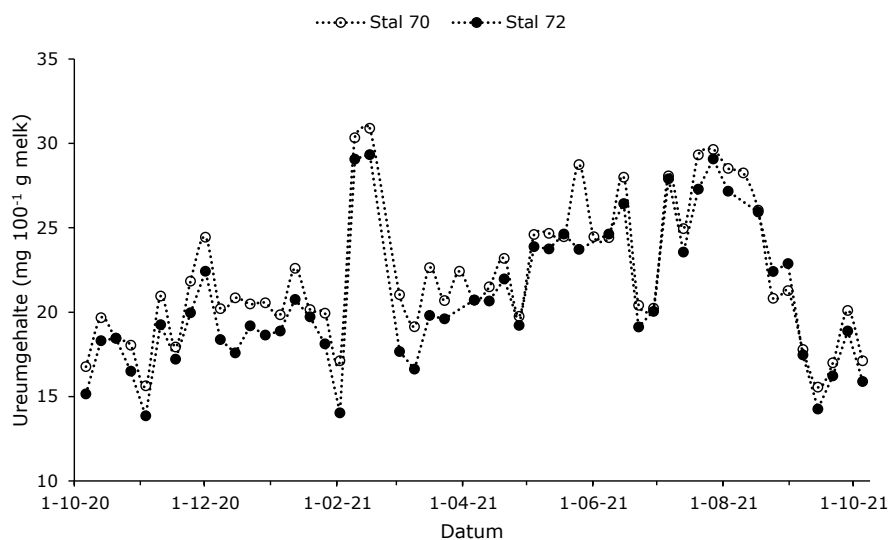
Melksamenstelling

Het gewogen eiwitgehalte van de melk, gemeten met NIR, varieerde van 3,32% tot 3,96%, en was gemiddeld 3,64% (Fig. 14). Het gewogen vetgehalte varieerde van 3,87% tot 5,10%, en was gemiddeld 4,56%. Het gewogen lactosegehalte varieerde van 4,47% tot 4,64%, en was gemiddeld 4,56%. Het gewogen ureumgetal varieerde van 15,6 tot 30,9 mg 100⁻¹ ml, en was gemiddeld 22,2 mg (Fig. 15).



Figuur 14 Eiwit-, vet-, en lactosegehalte in de melk van de koeien in stal 70 (CowToilet) tijdens de balansperiode, gewogen gemiddelden van de wekelijkse melkcontroles.

Bij vergelijking van stal 70 met 72, waarbij perioden met missende gegevens en weken leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was het gewogen eiwitgehalte voor stal 70 en 72 respectievelijk 3,65% en 3,68%, het gewogen vetgehalte respectievelijk 4,59% en 4,61%, het gewogen lactosegehalte respectievelijk 4,56% en 4,55%, en het gewogen ureumgetal respectievelijk 22,3 en 21,0 mg 100⁻¹ ml. Het gewogen ureumgetal was daarmee 6% lager voor stal 72 vergeleken met stal 70.



Figuur 15 Ureumgehalte in de melk van de koeien in stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode, gewogen gemiddelden van de wekelijkse melkcontroles.

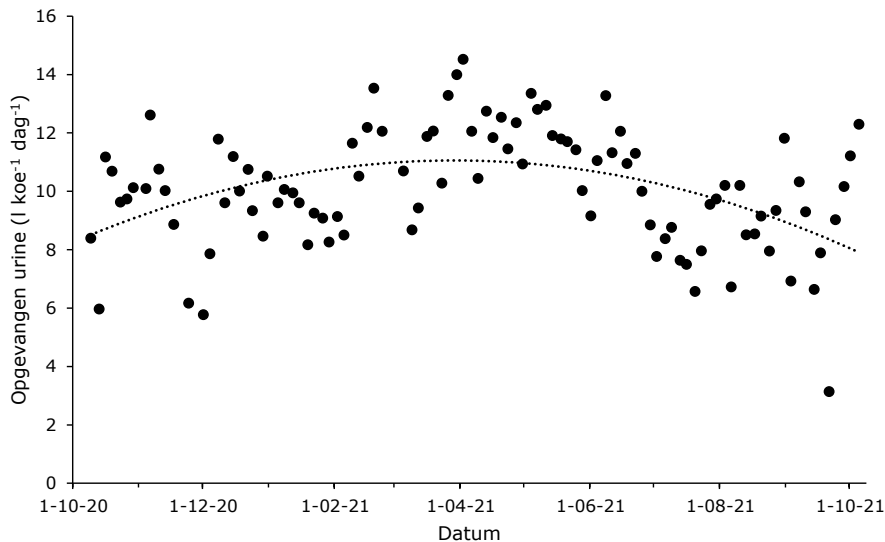
3.6 Hoeveelheid en samenstelling opgevangen urine

Hoeveelheid uitgescheiden urine

In de periode van 1 december 2020 t/m 14 september 2021 werd in stal 60 gemiddeld 32,8 kg liter dunne fractie $\text{koe}^{-1} \text{dag}^{-1}$ opgevangen in de kelder, met een gemiddelde EC van $41,3 \text{ mS cm}^{-1}$. Daarnaast werd gemiddeld 45,7 kg dikke fractie $\text{koe}^{-1} \text{dag}^{-1}$ afgeschoven, met een gemiddelde EC van $6,5 \text{ mS cm}^{-1}$. De EC van de in stal 70 opgevangen urine was in dezelfde periode gemiddeld $51,2 \text{ mS cm}^{-1}$. De hoeveelheid in de kelder opgevangen urine werd berekend op $(32,8 * 41,3) / 51,2 = 26,4 \text{ kg}$, en de hoeveelheid gemorst water op $32,8 - 26,4 = 6,4 \text{ kg}$. De hoeveelheid urine in de dikke fractie werd berekend op 3,2 kg en de hoeveelheid verse feces op 42,5 kg. De totale hoeveelheid uitgescheiden urine was $26,4 + 3,2 = 29,6 \text{ kg}$, omgerekend 29,0 liter.

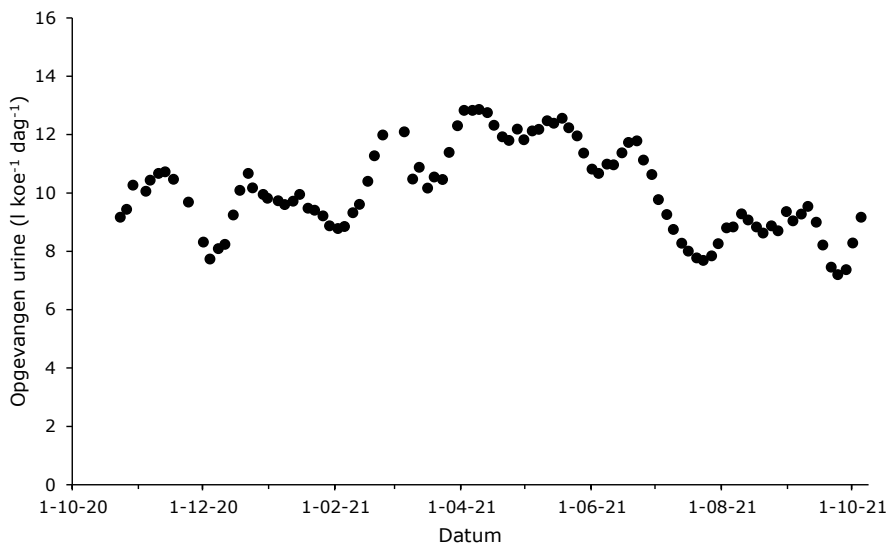
Hoeveelheid opgevangen urine

De hoeveelheid met het CowToilet opgevangen urine varieerde in de balansperiode tussen 3,1 en $14,5 \text{ l koe}^{-1} \text{dag}^{-1}$, en was gemiddeld $10,1 \text{ l koe}^{-1} \text{dag}^{-1}$ (Figuur 16, Tabel 1). In de periode van 1 december 2020 t/m 14 september 2021 was de met het CowToilet hoeveelheid opgevangen urine gemiddeld $10,3 \text{ l koe}^{-1} \text{dag}^{-1}$ en daarmee $(10,3 / 29,0) = 35\%$ van de gemiddelde uitgescheiden hoeveelheid.



Figuur 16 *Dagelijkse hoeveelheid urine opgevangen met het CowToilet in stal 70 tijdens de balansperiode, gemiddeld over opvangperioden van drie of vier dagen.*

Er was een tweedegraads polynome relatie tussen hoeveelheid opgevangen urine en dagnr. ($P < 0,001$; $R^2_{\text{adj.}} = 18\%$), waarbij de opgevangen hoeveelheid halverwege de balansperiode groter was dan aan het begin of einde (Fig. 16). Uit het verloop van het 14-daags voortschrijdend gemiddelde blijkt dat er perioden waren waarbinnen de hoeveelheid opgevangen urine toe- of afnam (Figuur 17).



Figuur 17 *Dagelijkse hoeveelheid urine opgevangen met het CowToilet in stal 70 tijdens de balansperiode, weergegeven als voortschrijdend 14-daags gemiddelde.*

Samenstelling urine

De opgevangen urine had een hoge pH, die fluctueerde binnen een nauwe marge, en bevatte een relatief grote buffer van anorganische C, gemiddeld 53% van de totale C (Tabel 1). Naast basisch (hoge pH) was de urine ook relatief zout (hoge EC) en bevatte de DS veel as (gem. 67%) ($As = DS - OS$). Het totale N-gehalte bestond voor gemiddeld 61% uit NH_4-N , 10% organische N, en 29% ureum-N die op het moment van bemonsteren/analyseren nog niet was gehydrolyseerd tot NH_4-N . Wanneer de urine voorafgaande aan de NH_4-N meting niet werd geëxtraheerd met 1 M KCl, maar met het wat mildere extractiemiddel 0,01 M $CaCl_2$, dan bestond gemiddeld 14% in plaats van gemiddeld 10% van de totale N uit organische N. Het K-gehalte was ongeveer het dubbele van het N-gehalte, en het P-gehalte was verwaarloosbaar laag.

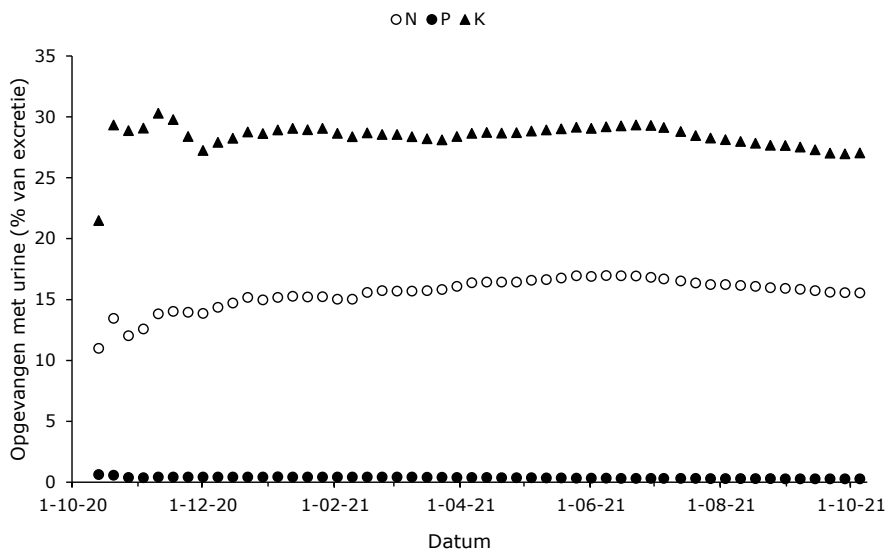
Tabel 1 Eigenschappen van urine opgevangen met het CowToilet in stal 70 tijdens de balansperiode.

Eigenschap	Eenheid	Parameter					
		Gemiddelde	SD ¹⁾	Mediaan	Min.	Max.	n=
Opgevangen hoeveelheid	L dag ⁻¹	10,1	2,0	10,1	3,1	14,5	100
Dichtheid	kg l ⁻¹	1,02	0,00	1,02	1,02	1,03	30
pH	-	8,9	0,1	9,0	8,8	9,1	30
EC	mS cm ⁻¹	51	4	51	44	57	30
DS	g kg ⁻¹ vers	39	4	39	31	50	39
OS	% van DS	33	6	32	24	42	16
N-totaal	g kg ⁻¹ vers	5,6	0,7	5,6	3,8	7,2	53
P-totaal	mg kg ⁻¹ vers	14	9	11	3	45	53
K-totaal	g kg ⁻¹ vers	10,9	0,6	10,9	8,3	12,3	53
N-NH ₄	g kg ⁻¹ vers	3,4	0,7	3,5	1,7	4,6	26
N-NH ₄	% van N-totaal	61	14	67	24	75	26
N-organisch - 1 M KCl	% van N-totaal	10	3	11	6	13	4
N-organisch - 0,01 M CaCl ₂	% van N-totaal	14	4	15	9	16	4
C-totaal	g kg ⁻¹ vers	7,6	1,6	7,3	5,2	11,8	30
C-organisch	% van C-totaal	53	14	52	33	79	15

¹⁾ Standaardafwijking

3.7 Scheiding van mineralen met urineopvang

Het cumulatieve scheidingsrendement van het CowToilet voor de mineralen N, P, en K, uitgedrukt als percentage van de excretie, was over de hele balansperiode respectievelijk 16% voor N, 0,3% voor P, en 27% voor K (Fig. 18). De met urine opgevangen minimale hoeveelheid P was het gevolg van vervuiling van de opvangbak met feces.



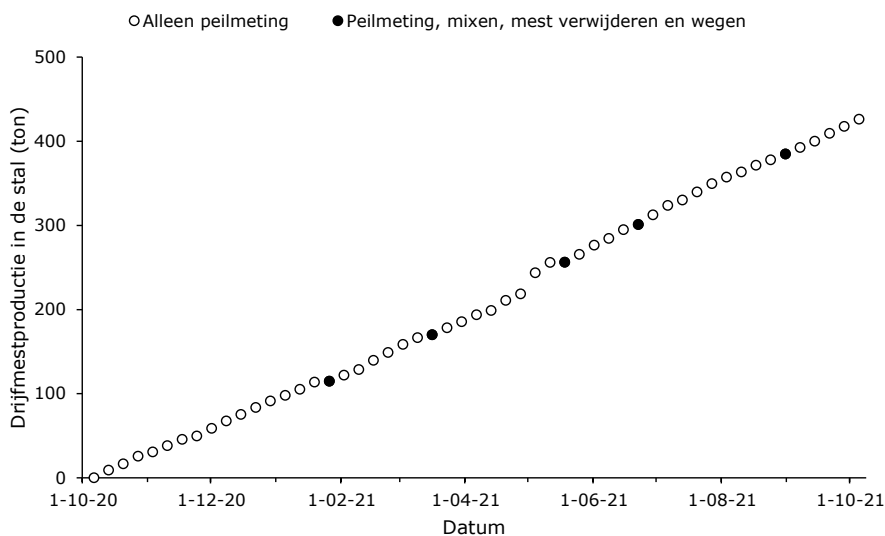
Figuur 18 Cumulatief met urine opgevangen hoeveelheid mineralen door het CowToilet tijdens de balansperiode, uitgedrukt als percentage van de cumulatieve excretie.

3.8 Drijfmestproductie en drijfmestsamenstelling

Drijfmestproductie in de stal

Het mestpeil in de kelder, gemiddeld over 53 peilmetingen tijdens de balansperiode, was 67 cm. Daarmee was de kelder gemiddeld voor 50% gevuld (= 67 / 134 cm), vergeleken met 55% voor referentiestal 72. De op basis van de peilmeting berekende massa drijfmest in de kelder nam in de perioden tussen legingen regelmatig toe (Fig. 19). 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 in de buurt kwam van de gemiddelde waarde van 0,99 kg l⁻¹ in de goed gemixte monsters ($\pm 0,01$) (Tabel 2). De aanzienlijke toename in cumulatieve hoeveelheid drijfmest tussen 27 april en 4 mei 2021 was het gevolg van de waterlekkage bij de aansluiting van de mestrobot, waarbij in korte tijd 20,4 ton water in de kelder stroomde.

Er werd drijfmest uit de kelder gepompt op 26 januari (86,9 ton), 15 maart (69,6 ton), 17/18 mei (85,7 ton), 21 juni (54,4 ton), en 25 augustus (67,3 ton), in totaal 364 ton, of 95% van de drijfmest opgevangen in de kelder in de periode van 6 oktober 2020 t/m 31 augustus 2021. De drijfmestproductie per koe per dag in de stal, gecorrigeerd voor leegstand, voor toegevoegd water met de mestrobot, en inclusief opgevangen urine, varieerde tussen de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen van 73 kg (van 6 oktober 2020 t/m 26 januari 2021) tot 93 kg (van 26 januari tot 16 maart 2021), en was gemiddeld 79 kg over de periode van 6 oktober 2020 t/m 31 augustus 2021. Over dezelfde periode was de drijfmestproductie voor referentiestal 72 gemiddeld 78 kg, 0,7% lager. De mestproductie in de stal werd 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 70.



Figuur 19 Cumulatief geproduceerde hoeveelheid drijfmest in stal 70 tijdens de balansperiode, inclusief verwijderde hoeveelheden en de urine opgevangen met het CowToilet.

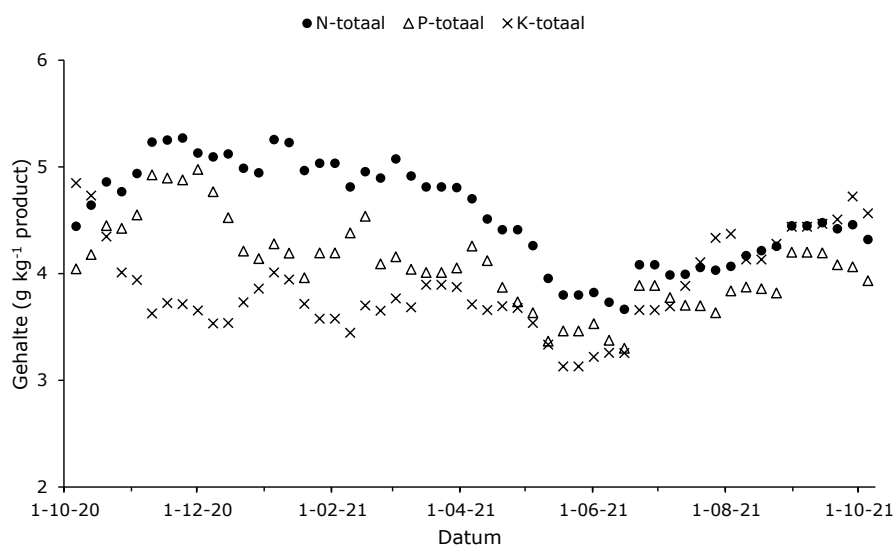
Drijfmestproductie buiten de stal

De koeien waren ten behoeve van het melken dagelijks ca 1,5 uur of 6% van de tijd buiten de stal. Uit de frequentiemetingen (paragraaf 2.4) 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 uitscheidde (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 alleen 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 daarmee 83 kg per koe per dag, in de periode van 6 oktober 2020 t/m 31 augustus 2021 en gecorrigeerd voor de week leegstand, toegevoegd water, en opgevangen urine.

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. 20). Een negatieve trend in een gehalte kan wijzen op een dalende aanvoer van het betreffende mineraal met het voer of op ontmenging van de drijfmest in de kelder, maar kan ook het gevolg zijn van een toenemend effect van de urine-opvang door het CowToilet. De aanzienlijke daling van de gehalten begin mei, en de lagere gehalten in mei/juni, waren het gevolg van de waterlekage op 30 april, waarbij in korte tijd 20,4 ton water in de kelder stroomde en de mest ongeveer 20% verdund werd. De gehalten kwamen weer op een hoger niveau te liggen na de gedeeltelijke leging van de kelder op 21 juni. In de laatste drie maanden van de balansperiode was de variatie in gehalten kleiner dan in de eerste helft van de balansperiode, en lagen de N- en K-gehalten dicht bij elkaar, terwijl in de eerste maanden het K-gehalte aanzienlijk lager was dan het N-gehalte.



Figuur 20 Verloop van de gehalten N-, P-, en K-totaal in drijfmest in de kelder van stal 70 tijdens de balansperiode. Het P-gehalte is ten behoeve van de weergave vermenigvuldigd met factor 5.

Als gevolg van de opvang van een deel van de urine door het CowToilet was het zoutgehalte van de drijfmest in de kelder (afgeleid van de EC) lager vergeleken met drijfmest in de kelder van referentiestal 72 (Tabel 2), had de drijfmest een iets hoger gehalte DS, een iets lager gehalte N-totaal, een hoger gehalte P-totaal, een duidelijk lager K-gehalte, en een duidelijk lager gehalte $\text{NH}_4\text{-N}$ en aandeel $\text{NH}_4\text{-N}$ in N-totaal. De weergegeven mesteigenschappen zijn alleen vergeleken voor de meetgegevens uit de periode vanaf 2 februari t/m 27 april en de periode 31 augustus t/m 5 oktober 2021. De periode vanaf 6 oktober t/m 26 januari 2021 (eerste gedeeltelijke kelderleging) is niet meegenomen, omdat de mestsamenstelling tot dat moment nog steeds werd beïnvloed door de mest die bij start van de balansperiode al in de kelder aanwezig was. De periode van 27 april tot 31 augustus (gedeeltelijke kelderleging) werd niet meegenomen vanwege het (na-ijlende) effect van de waterlekage en water sproeien door de mestrobot. Opgemerkt wordt dat het uitsluiten van de metingen in deze twee perioden nauwelijks effect had op de gemiddelde waarden, zowel voor stal 70 als voor stal 72.

Drijfmestsamenstelling buiten de stal

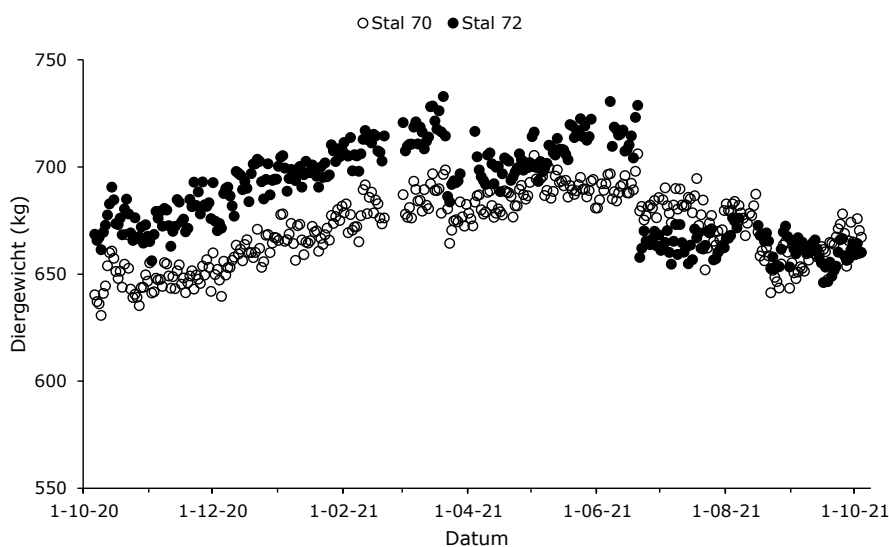
Bij rundvee wordt met urine ca. 50% van de N en 0% van de P uitgescheiden, en met feces ca. 50% van de N en 100% van de P (De Boer, 2023a). Bij aanname dat op de helft van de tijd buiten de stal de frequentie van excretie van voor het melken van toepassing was, en op de andere helft van de tijd de frequentie van na het melken, werd geschat dat de totale 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.

Tabel 2 Eigenschappen van drijfmest in de kelder van de stal met het CowToilet (stal 70) vergeleken met de referentiestal zonder CowToilet (stal 72), gemiddelden over de periode vanaf 2 februari t/m 27 april en vanaf 31 augustus t/m 5 oktober 2021.

Eigenschap	Eenheid	Stal 70	Stal 72	Vershil (%)
Dichtheid	kg l ⁻¹	0,99	0,99	0
pH	-	7,1	7,2	-2
EC	mS cm ⁻¹	16	18	-10
DS	g kg ⁻¹ vers	113	109	4
OS	% van DS	81	79	2
N-totaal	g kg ⁻¹ vers	4,6	4,7	-3
P-totaal	g kg ⁻¹ vers	0,8	0,8	9
K-totaal	g kg ⁻¹ vers	3,9	4,6	-16
N-NH ₄	g kg ⁻¹ vers	1,4	1,7	-22
N-NH ₄	% van N-totaal	30	37	-19
C-totaal	g kg ⁻¹ vers	47	45	4
C-organisch	% van C-totaal	94	94	1

3.9 Koegewicht

Het dagelijks gemiddelde gewicht van de koeien varieerde tijdens de balansperiode van 631 tot 706 kg, en was gemiddeld 671 kg (Fig. 21). Er werd een aantal koeien vervangen op 22 maart (6 koeien), 21 juni (9 koeien), en 23 augustus (9 koeien).



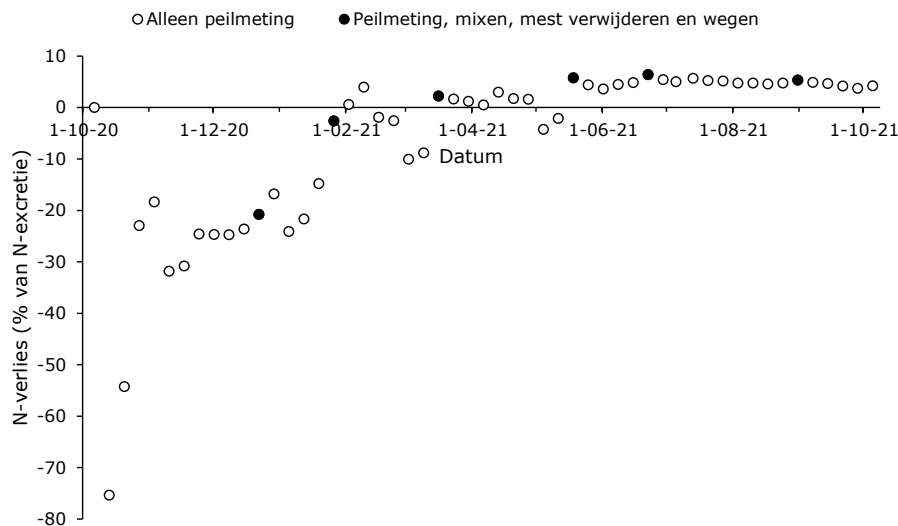
Figuur 21 Dagelijks gemiddelde gewicht van de koeien in stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode.

Het gewicht van de kudde in stal 70 nam vanaf 6 oktober 2020 t/m 21 maart 2021 (eerste vervanging) toe met 932 kg (+9%), nam vanaf 23 maart t/m 20 juni (tweede vervanging) toe met 670 kg (+6%), nam vanaf 22 juni t/m 22 augustus af met 645 kg (-6%), en nam vanaf 24 augustus t/m 4 oktober (einde balans) toe met 299 kg (+3%).

3.10 Mineralenbalansen

Stikstofbalans zonder correctie voor de meetfout

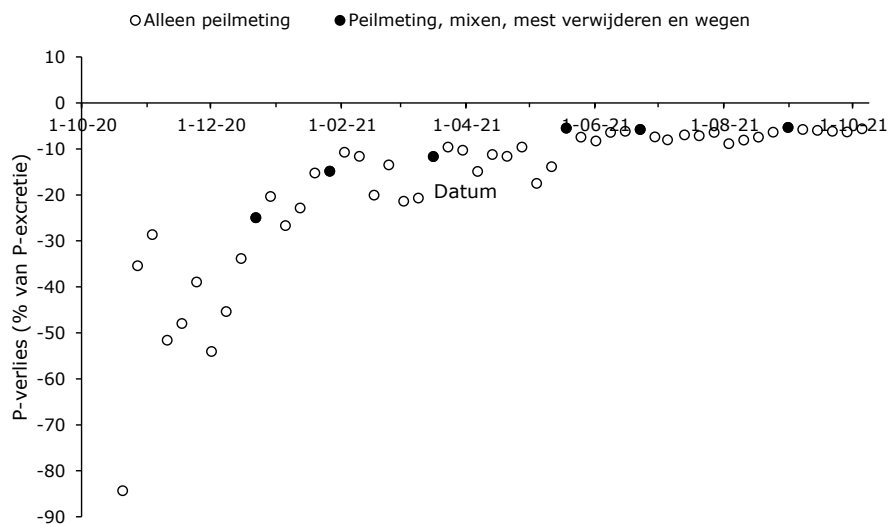
Bij de N-balans varieerde het N-verlies, als percentage van de N-excretie en zonder correctie voor de meetfout, van -75% op 13 oktober 2020 tot 6% op 22 juni 2021 (Fig. 22). Aan het einde van de balansperiode was het on gecorrigeerde N-verlies 4%. Het on gecorrigeerde N-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, de meest betrouwbare metingen, nam toe van een verlies van -21% op 22 december 2020 tot 5% 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 (opnieuw) 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 22 Verandering van het cumulatieve N-verlies uit stal 70 tijdens de balansperiode, afgeleid van de N-balans zonder correctie voor de meetfout.

Fosforbalans zonder correctie voor de meetfout

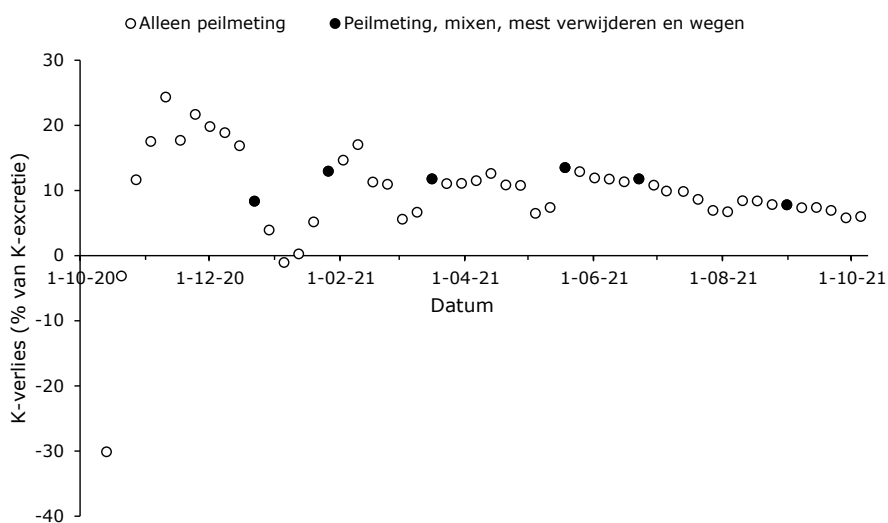
Bij de P-balans varieerde het P-verlies (meetfout), als percentage van de P-excretie, van -147% op 13 oktober 2020 tot -6% vanaf 24 augustus 2021 (Fig. 23). Aan het einde van de balansperiode was het P-verlies -6%. Het P-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, varieerde van -25% op 22 december 2020 tot -5% op 31 augustus 2021, het laatste tijdstip met dit type meting.



Figuur 23 Verandering van het cumulatieve P-*'verlies'* (meetfout) uit stal 70 tijdens de balansperiode, afgeleid van de P-balans. Het P-*'verlies'* op 13 oktober 2021 (-147%) is niet weergegeven i.v.m. de schaal.

Kaliumbalans zonder correctie voor de meetfout

Bij de K-balans varieerde het K-*'verlies'* (meetfout) als percentage van de K-excretie, van -30% op 13 oktober 2020 tot 24% op 10 november 2020 (Fig. 24). Aan het einde van de balansperiode was het K-verlies 6%. Het K-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, lag vanaf 7 september 2021 op een niveau van 6-7%.

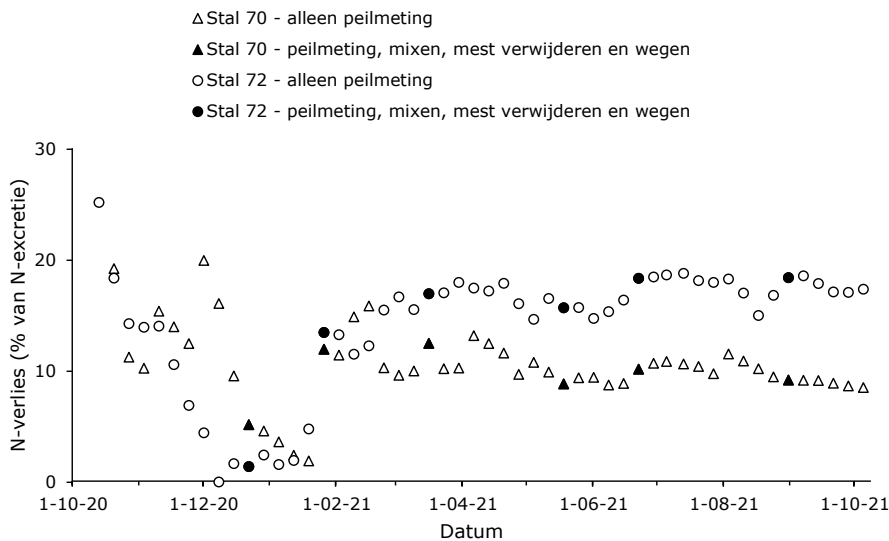


Figuur 24 Verandering van het cumulatieve K-*'verlies'* uit stal 70 (meetfout) tijdens de balansperiode, afgeleid van de K-balans.

Stikstofbalans gecorrigeerd voor de meetfout

Na correctie 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 19 januari 2021 tot 29% op 13 oktober 2020, en was het verlies aan het einde van de balansperiode 9% (9,3%) (Fig. 25). Na uitsluiting van de week leegstand was het gecorrigeerde N-verlies aan het einde van de balansperiode 9,5% van de N-excretie. Het gecorrigeerde N-verlies op de tijdstippen met mixen, mest verwijderen en wegen, nam toe van een verlies van 3% op 22 december 2020 tot 10% op 31 augustus 2021, het laatste tijdstip met dit type meting.

Bij vergelijking van het voor de meetfout gecorrigeerde N-verlies van stal 70 met stal 72 blijkt dat vanaf begin februari het N-verlies van stal 70 duidelijk lager was. Aan het einde van de balansperiode was voor stal 70 het cumulatieve N-verlies 9,3%, 46% lager vergeleken met het cumulatieve N-verlies van stal 72 (17,3%). Bij deze vergelijking is nog niet gecorrigeerd voor weken leegstand en andere verschillen tussen beide stallen, dit volgt in paragraaf 3.11.



Figuur 25 Verandering van het cumulatieve N-verlies uit stal 70 (met CowToilet) en stal 72 (referentiestal) tijdens de balansperiode, afgeleid van de N-balans na correctie voor de meetfout op de bijbehorende P-balans.

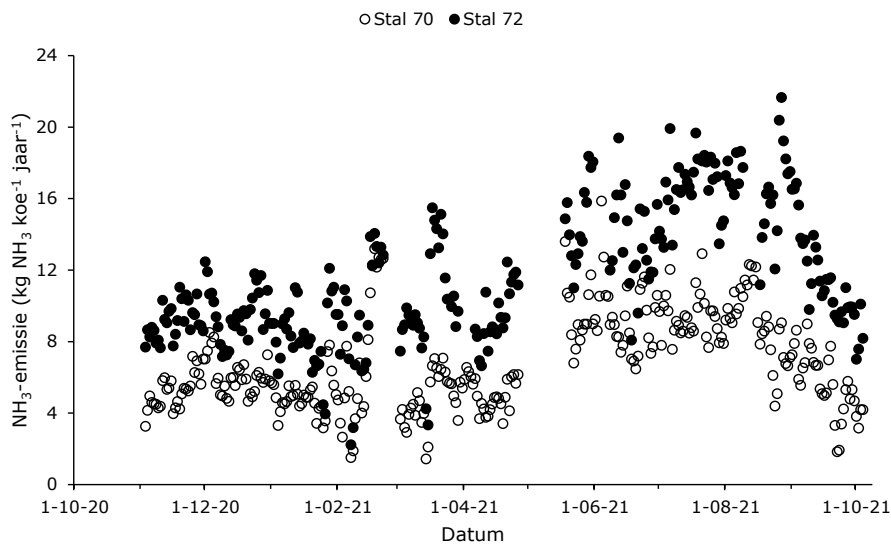
Bijdrage van de aan- en afvoerposten aan de gecorrigeerde mineralenbalansen

Bij de N-balans werd, na correctie voor de meetfout, over de hele balansperiode 84,6% van de N aangevoerd met het PMR, 14,8% met brok, 0,5% met drinkwater, en 0,1% met zaagsel. Van de aangevoerde N werd 63,2% vastgelegd in drijfmest, 29,4% in melk, 0,9% in dieren, en ging 6,5% verloren. Bij P werd 77,8% aangevoerd met PMR, 22,1% met brok, 0,07% met zaagsel, en 0,05% met drinkwater. Van de aangevoerde P werd 63,1% vastgelegd in drijfmest, 35,0% in melk, en 1,9% in dieren. Bij K werd 92,0% aangevoerd met PMR, 7,9% met brok, 0,06% met zaagsel, en 0,01% met drinkwater. Van de aangevoerde K werd 89,9% vastgelegd in drijfmest, 10,0% in melk, en 0,09% in dieren.

3.11 Samenstelling van het stikstofverlies

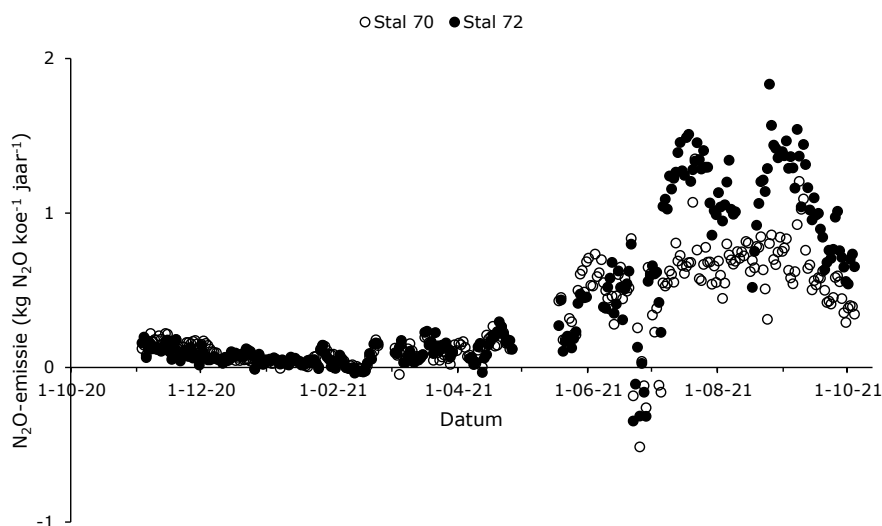
De dagelijkse hoeveelheid NH_3 -emissie tijdens de balansperiode van 308 dagen, uitgedrukt op jaarbasis, varieerde van 1,4 tot 15,9 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$, en was gemiddeld 6,8 kg (Fig. 26). De gemiddelde NH_3 -emissie over deze periode veranderde niet bij uitsluiting van de maandagen (waarop de gordijnen een deel van de dag konden openstaan) (6,9 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$) of de dagen waarop de mest werd gemixt (6,9 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$). De balansperiode van stal 70 bevatte een periode waarin de vloer werd schoongemaakt met een mestrobot, die een deel van de periode ook water sproeide. Het relatieve verschil tussen stal 70 en 72 tijdens de periode met en zonder mestrobot, en binnen de periode met de mestrobot met en zonder water sproeien, werd gebruikt om te beoordelen welk effect de mestrobot had op de NH_3 -emissie. Bij vergelijking van de gemiddelde NH_3 -emissie van stal 70 met stal 72, waarbij perioden met missende gegevens en weken leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd (resterende meetperiode voor beide stallen van 287 dagen), was de gemiddelde emissie van stal 70 (6,6 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$) 43% lager vergeleken met stal 72 (11,6 kg). Wanneer bij beide stallen ook de periode met de mestrobot werd uitgesloten, was de gemiddelde emissie eveneens 43% lager, en wanneer alleen de periode met de mestrobot en water sproeien werd uitgesloten, was de gemiddelde emissie 45% lager. Bij de laatste uitsluiting zou verwacht worden dat het verschil in emissie wat kleiner kon zijn, omdat water over de vloer sproeien de NH_3 -emissie kan verlagen, maar dit was niet het geval.

Uit de resultaten werd geconstateerd dat het schoonmaken van de roostervloer met de mestrobot, met en zonder water sproeien, geen effect van betekenis op de NH_3 -emissie had. Daarom wordt bij het vervolg van de analyse geen onderscheid gemaakt tussen de periode met en zonder mestrobot.



Figuur 26 Dagelijks gemeten NH_3 -emissie in stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode, uitgedrukt op jaarbasis.

De dagelijkse N_2O -emissie tijdens de balansperiode van 308 dagen varieerde van $-0,51$ tot $1,35 \text{ kg N}_2\text{O koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$, en was gemiddeld $0,31 \text{ kg}$ (Fig. 27). NB: meetwaarden kunnen soms negatief zijn als de N_2O -concentratie buiten de stal (achtergrondconcentratie) hoger is dan in de stal. Na verwijdering van alle negatieve meetwaarden was de N_2O -emissie gemiddeld $0,32 \text{ kg}$. Bij vergelijking van de gemiddelde N_2O -emissie van stal 70 met stal 72, waarbij perioden met missende gegevens en weken leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd (resterende meetperiode voor beide stallen van 287 dagen), was de gemiddelde emissie van stal 70 ($0,29 \text{ kg N}_2\text{O koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$) 31% lager vergeleken met stal 72 ($0,42 \text{ kg}$).



Figuur 27 Dagelijks gemeten N_2O -emissie in stal 70 (CowToilet) en stal 72 (referentie) tijdens de balansperiode, uitgedrukt op jaarbasis.

Wanneer bij beide stallen ook de periode met de mestrobot werd uitgesloten, dan was de gemiddelde emissie 35% lager, wanneer alleen de periode met de mestrobot zonder water sproeien werd uitgesloten was de emissie 32% lager, en wanneer alleen de periode met mestrobot en water sproeien werd uitgesloten was de gemiddelde emissie 34% lager. Deze resultaten geven de indruk dat bij gebruik van de mestrobot zonder water sproeien de N₂O-emissie mogelijk wat lager was vergeleken met gebruik van de mestrobot met water sproeien, of geen gebruik van de mestrobot. Desondanks is besloten om bij het vervolg van de analyse geen onderscheid te maken tussen de periode met en zonder mestrobot.

De hoeveelheden N-emissie per N-vorm waren, voor de balansperiode van 308 dagen en correctie van het N-balansverlies met de gemeten gegevens, voor N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ + NO_x respectievelijk gemiddeld 12,5, 5,6, 0,20, en 6,7 kg N kg koe⁻¹ jaar⁻¹, de relatieve N-emissies respectievelijk 9,2%, 4,1%, 0,14%, en 5,0% van de N-excretie (136 kg koe⁻¹ jaar⁻¹), en de aandelen van de N-vormen in de totale N-emissie voor NH₃, N₂O, en N₂ + NO_x respectievelijk 45%, 1,6%, en 54%. Na correctie van de N-balans op basis van (verfijnd) geschat in plaats van gemeten N-balansverlies, waren de relatieve N-emissies respectievelijk 9,2%, 4,1%, 0,14%, en 4,9% van de N-excretie (136 kg koe⁻¹ jaar⁻¹), en waren de relatieve aandelen van de N-vormen in de totale N-emissie onveranderd. Bij toepassing van deze aandelen op het N-balansverlies over de balansperiode van 357 dagen, waarbij het N-balansverlies alleen werd gecorrigeerd voor de week leegstand op basis van verfijnd geschat N-verlies, waren de relatieve N-emissies voor N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ + NO_x respectievelijk 9,2%, 4,1%, 0,14%, en 4,9% van de N-excretie (135 kg koe⁻¹ jaar⁻¹). Geconstateerd wordt dat correctie op basis van (verfijnd) geschat N-balansverlies in plaats van de gemeten gegevens in dit onderzoek vrijwel geen effect had op relatieve N-emissies.

Bij vergelijking van de N-emissie per N-vorm tussen stal 70 en stal 72, waarbij de emissiegegevens en de N-balansverliezen van beide stallen werden gecorrigeerd voor de perioden met missende emissiegegevens en de weken leegstand in beide stallen, op basis van (verfijnd) geschat N-balansverlies, met een resterende balansperiode voor beide stallen van 287 dagen, waren voor stal 70 de relatieve N-emissies voor N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ + NO_x respectievelijk 9,2%, 4,0%, 0,14%, en 5,1% van de N-excretie (136 kg koe⁻¹ jaar⁻¹), en voor stal 72 respectievelijk 16,6%, 6,9%, 0,19%, en 9,5% van de N-excretie (138 kg koe⁻¹ jaar⁻¹). Vergeleken met stal 72 waren de relatieve emissies van stal 70 daarmee respectievelijk 45%, 42%, 29%, en 47% lager.

Bij aanvullende correctie voor het 7% hogere ventilatiedebiet van stal 72 vergeleken met stal 70, waarbij de emissies van NH₃ en N₂O voor stal 72 met 7% werden verlaagd, en de totale N-emissie vervolgens opnieuw werd berekend, waren voor stal 72 de relatieve N-emissies respectievelijk 16,1%, 6,4%, 0,18%, en 9,5% van de N-excretie (138 kg koe⁻¹ jaar⁻¹). De relatieve N-emissies van stal 70 waren daarmee respectievelijk 43%, 38%, 24%, en 47% lager vergeleken met stal 72.

Tot slot werden de emissies nog gecorrigeerd voor een verschil in gemiddelde temperatuur en gemiddeld ureumgetal tussen stal 70 en 72. Bij toepassing van lineaire regressie verklaarde alleen de temperatuur 58% ($P < 0,001$) van de variantie in NH₃-emissie van stal 72, en alleen het ureumgetal 39% ($P < 0,001$). Toevoeging van het ureumgetal als verklarende variabele aan het model met alleen de temperatuur leidde tot significant ($P < 0,001$) meer verklaarde variantie ($R^2_{adj.} = 74\%$). De relatie werd beschreven als: NH₃-emissie = $-0,31 + 0,3443 * \text{temperatuur} + 0,3393 * \text{ureumgetal}$, en met behulp van deze relatie werd de hoeveelheid NH₃-emissie voor stal 72 met 2% verhoogd, van 8,9 tot 9,1 kg N dier⁻¹ jaar⁻¹. Bij de N₂O-emissie verklaarde alleen temperatuur 65% van de variantie in N₂O-emissie ($P < 0,001$) en alleen het ureumgetal 7% ($P = 0,05$). Toevoeging van ureumgetal als verklarende variabele aan het model met alleen temperatuur verklaarde niet significant ($P > 0,05$) meer variantie ($R^2_{adj.} = 64\%$). De relatie met alleen temperatuur werd beschreven als: N₂O-emissie = $-0,494 + 0,06708 * \text{temperatuur}$, en met behulp van deze relatie werd de hoeveelheid N₂O-emissie voor stal 72 met 7% verlaagd van 0,25 kg tot 0,23 kg N dier⁻¹ jaar⁻¹, en de hoeveelheid N₂-emissie van 13,1 tot 12,2 kg N. De hoeveelheid totale N-emissie werd opnieuw berekend ($9,1 + 0,23 + 12,2$) op 21,5 kg N. Op basis hier van waren voor stal 72 de relatieve N-emissies respectievelijk 15,6%, 6,6%, 0,17%, en 8,8% van de N-excretie (138 kg koe⁻¹ jaar⁻¹), en waren de relatieve N-emissies van N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ (+ NO_x) voor stal 70 daarmee respectievelijk 41%, 39%, 18%, en 43% lager.

4 Discussie

4.1 Fouten op balansposten

Een uitgebreide discussie over de fouten op diverse balansposten is gegeven in De Boer (2023b). Stal 70 is grotendeels vergelijkbaar met stal 72, met als duidelijke afwijking het opvangen van een deel van de uitgescheiden urine met het CowToilet, een mogelijk iets andere afwijking op de uitgedraaide hoeveelheid PMR met de voermengwagen, en mogelijk een klein verschil in afwijking op de hoeveelheid verstrekte brok. Daarnaast was de samenstelling van de kudde in stal 70 wat afwijkend van de kudde in 72 (gezien het verschil in ureumgetal van de melk en van het koegewicht), was het ventilatiedebiet gemiddeld lager, en was de temperatuur gemiddeld wat hoger. Tot slot was er in stal 70 op 30 april 2021 een waterlekkage, waardoor 20,4 ton water in de kelder liep en de aanwezige mest werd verdund.

Bij de met het CowToilet opgevangen urine was de fout op het vaststellen van de opgevangen massa en op de bemonstering waarschijnlijk kleiner dan bij de drijfmest. Het aflezen van de hoeveelheid opgevangen urine van een vaste schaal was minstens zo nauwkeurig als de peilmeting van de drijfmest in de kelder, en de berekening van de massa urine was nauwkeuriger, omdat de urine niet in volume kon toenemen door gasproductie. Bij de bemonstering kon de urine in het opvangvat goed worden gemengd, terwijl dit bij drijfmest in de kelder niet het geval was.

Bij de door de voermengwagen uitgedraaide PMR in stal 70 is niet gecorrigeerd voor de onderschatting van het gewicht van 1%, vastgesteld bij 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 ook hoelang de afwijking sinds de start van de balansperiode van toepassing was. Correctie voor deze onderschatting over de hele balansperiode had het ongecorrigeerde totale N-verlies met een procentpunt verhoogd, maar had geen effect gehad op het gecorrigeerde N-verlies, omdat de relatieve afwijking voor de N- en P-balans even groot zou zijn geweest.

De brok werd in stal 70 uit dezelfde silo via dezelfde hoofdleiding aangevoerd als in stal 72, en de eerder besproken foutmarges (De Boer, 2023b) zijn ook grotendeels op stal 70 van toepassing. Het is mogelijk dat de fout op de brokafgifte tussen beide stallen iets afweek door een verschil in type voerstation.

De verschillen in gemiddeld ureumgetal van de melk, het koegewicht, het ventilatiedebiet, en de temperatuur werden niet alleen gemeten, maar de resultaten van de emissiemetingen en het N-balansverlies bleken hiervoor ook goed gecorrigeerd te kunnen worden, waardoor de uiteindelijke vergelijking tussen stal 70 en 72 behoorlijk nauwkeurig is.

De waterlekkage in stal 70 heeft waarschijnlijk geen effect van betekenis gehad op de N-emissies en de vergelijking tussen stal 70 en 72. De lekkage vond plaats op de eerste dag van een periode van 18 dagen met missende emissiemetingen voor beide stallen, zodat een eventueel direct effect of na-ijleffect al niet in de gemiddelden werd meegenomen. De N-balansen van beide stallen werden ook voor deze periode gecorrigeerd, ten behoeve van de afstemming van de periode met emissiemeting en N-balansmeting. Een dag na het einde van deze periode werd de mestkelder grotendeels geleeegd, waarmee ook een groot deel van de verdunde drijfmest werd verwijderd, en een eventueel effect op de periode daarna beperkt zal zijn geweest.

4.2 Correctie van de stikstofbalans

Uit de balansmetingen bleek dat de (cumulatieve) meetfout op de P-balans bij stal 70 (6% overschot) aan het einde van de balansperiode wat groter was dan bij stal 72 (4% overschot), maar de meetfout op de K-balans aanzienlijk kleiner (6% tekort versus 16% tekort). De grotere fout op de P-balans kan mogelijk verklaard worden vanuit de wat dikkere mest in stal 70 vergeleken met stal 72 (Tabel 2), waardoor mogelijk wat meer (P-rijke) dikke fractie werd meegenomen bij bemonstering. De aanzienlijk lagere fout op de K-balans werd in ieder geval voor een aanzienlijk deel veroorzaakt door opvang van 27% van de uitgescheiden K met de urine (Fig. 18).

Na correctie voor de belangrijkste verschillen tussen stal 70 en 72 (ventilatie-debiet, temperatuur, ureumgetal) was, als gevolg van de opvang van urine, de reductie van de totale N-emissie (-41%) grotendeels vergelijkbaar met de reductie van de N-NH₃-emissie (-39%). Dit lijkt erop te wijzen dat de aanvoer van minerale N met urine voor zowel de NH₃-emissie als de N₂-emissie de bepalende factor was.

4.3 Stikstofemissie tijdens urine-opslag

Bij de referentiestal waren de gemeten N-emissies inclusief de emissie uit alle opgeslagen drijfmest onder de keldervloer. Bij de stal met het CowToilet werd een deel van de urine na opvang weggepompt naar de opslag buiten de stal, en werd deze opslag iedere drie tot vier dagen geleegd. Hierdoor zijn de N-emissies uit deze urine maar voor een beperkt deel meegenomen in de totale N-emissie uit de stal en moet hiervoor nog gecorrigeerd worden om een zuivere vergelijking te maken tussen beide stallen. Een laatste fase die nog meegenomen zou moeten worden, om vast te stellen wat over de hele keten (uitscheiding in de stal, opslag, aanwending) het emissiereducerende effect van het CowToilet is, is een eventueel verschil in N-emissie bij het uitrijden van de urine in plaats van drijfmest op het land.

Het N₂-verlies uit opgeslagen urine is naar verwachting veel kleiner dan wanneer deze urine in de drijfmest in de kelder aanwezig zou zijn, omdat urine geen organische drijfslag heeft en er daardoor waarschijnlijk vrijwel geen nitrificatie-denitrificatie optreedt. Het N-verlies uit opgeslagen urine is daardoor vooral in de vorm van NH₃, en vooral afhankelijk van de manier waarop de urine wordt opgeslagen. Wanneer er wordt uitgegaan van eenzelfde niveau van NH₃-emissie uit opgeslagen urine als uit drijfmest in de kelder, wanneer deze bijdrage uit de kelder wordt gesteld op 40% van de totale NH₃-emissie uit de stal (Van Dooren et al., 2019), wanneer aangenomen wordt dat vloer- en kelderemissie relatief evenveel worden gereduceerd, en dat alle NH₃-emissie van de minerale N in de urine afkomstig is, dan moet bij opvang en opslag van 35% van de uitgescheiden urine de N-NH₃-emissie uit de stal met CowToilet (4,0%) nog verhoogd worden met indicatief $0,40 * ((1 / 0,65) - 1) * 4,0 = 0,9\%$, tot 4,9% van de N-excretie. De emissiereductie ten opzichte van de referentiestal zou hierdoor voor de totale N-emissie afnemen van 41% tot 35% en voor de N-NH₃-emissie van 39% tot 26%. Wanneer de NH₃-emissie van de urine tijdens opslag de helft zou zijn vergeleken met drijfmest in de kelder, dan zou de reductie voor de totale N-emissie afnemen tot 38% en voor de N-NH₃-emissie tot 33%. Bij een dubbele emissie tijdens opslag zou de reductie voor de totale N-emissie afnemen tot 30% en voor de N-NH₃-emissie tot 13%. Het moet mogelijk zijn om de urine op te slaan onder omstandigheden waarbij de emissie duidelijk lager is dan uit drijfmest in de relatief open kelder, en een voorlopige schatting is dat dit de helft van dat N-verlies kan zijn. In dat geval bedraagt de emissiereductie van het CowToilet, op basis van dit onderzoek, rond 33%. Mogelijk kan de urine emissiearmere worden opgeslagen dan geschat, maar dit zal door nader onderzoek vastgesteld moeten worden.

4.4 Effect van hoeveelheid opgevangen urine op stikstofemissie

De schatting van de totale hoeveelheid uitgescheiden urine, en daarmee van het percentage opgevangen urine, was afhankelijk van een aantal aannames, waaronder de EC van de verse feces. Deze werd niet gemeten, maar geschat op 3,1 mS cm⁻¹, het gemiddelde van de metingen van Chen et al. (2008), waarbij de meetwaarden varieerden van 1,9 tot 6,9 mS cm⁻¹ (n = 86). De gemiddelde EC van de verse feces zou in het voorliggende onderzoek wat hoger of lager geweest kunnen zijn dan 3,1 mS cm⁻¹, maar waarschijnlijk niet veel meer dan ± 1 mS cm⁻¹. Bij een dergelijke afwijking varieert het geschatte aandeel opgevangen urine van 34% tot 36%.

Bij de schatting van de hoeveelheid uitgescheiden urine werd gebruik gemaakt van gegevens van stal 60, en de urineproductie kan verschillend geweest zijn tussen stal 70 en stal 60. Dit blijkt echter niet uit de gemiddelde hoeveelheid geproduceerde drijfmest, die vrijwel niet verschilde tussen stal 70 (79,2 kg dier⁻¹ dag⁻¹) en stal 60 (78,5 kg dier⁻¹ dag⁻¹).

De reductie in totale N-emissie (41%) en N-NH₃-emissie (39%) als gevolg van urine-opvang was groter dan het geschatte aandeel opgevangen urine (35%), maar dit werd mede veroorzaakt doordat het N-verlies tijdens langere opslag van de opgevangen urine nog niet was meegenomen. Inclusief bovenstaande finale schatting voor dit verlies, met aanname van een 50% lagere emissie uit de opgeslagen urine vergeleken met

drijfmest in de kelder, was de emissiereductie voor totale N (38%) wat groter en voor N-NH₃ (33%) wat kleiner dan het geschatte aandeel opgevangen urine. Door verbeteringen aan het CowToilet kan er mogelijk in de toekomst meer urine worden opgevangen dan in de balansperiode, waardoor de emissies verder kunnen worden gereduceerd.

4.5 Effect van mixen van drijfmest in de kelder

Tijdens de balansperiode werd de drijfmest in de kelder van stal 70 en 72 vrijwel niet gemixt. Bij stal 72 werd eerder een totaal N-verlies van 16,7% van de N-excretie vastgesteld, waarvan 9,7% waarschijnlijk het gevolg was van nitrificatie-denitrificatie in de drijfslag op de mest (De Boer, 2023b). Aangegeven werd dat door regelmatig mixen van de drijfmest in de kelder, en daarmee het voorkomen van een drijfslag, het N₂-verlies door denitrificatie waarschijnlijk aanzienlijk verlaagd kan worden. Als deze hypothese klopt, dan zal bij regelmatig mixen van de mest in de kelder de reductie van de N₂-emissie door gebruik van het CowToilet waarschijnlijk aanzienlijk kleiner zijn dan in het voorliggende onderzoek. De reductie van de NH₃-emissie blijft naar verwachting wel in stand, omdat er geen aanwijzingen zijn dat regelmatig mixen (b.v. eens per week) tot een andere NH₃-emissie leidt (Van Dooren et al., 2022).

Conclusies

- Met het CowToilet kon over de balansperiode 3,1 tot 14,5 l urine koe⁻¹ dag⁻¹ worden opgevangen, gemiddeld 10,1 liter en naar schatting 35% van de uitgescheiden hoeveelheid;
- Als gevolg van de urine-opvang veranderde de samenstelling van de drijfmest in de kelder, en had deze in de stal met het CowToilet een iets lagere pH (-2%), een lagere EC (-10%), een hoger gehalte DS (+4%), een lager gehalte N (-3%), een hoger gehalte P (+9%), een lager gehalte K (-16%), en een lager gehalte NH₄-N (-19%), vergeleken met de referentiestal;
- Door gebruik van het CowToilet waren de relatieve N-emissies van N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ (+ NO_x) (als percentage van de N-excretie) respectievelijk 41%, 39%, 18%, en 43% lager vergeleken met de referentiestal;
- Bij deze reducties was de emissie uit (langere) opslag van de opgevangen urine niet meegenomen voor de stal met het CowToilet, maar wel voor de referentiestal. Wordt deze emissie voor de stal met het CowToilet wel meegenomen, dan zal de totale reductie lager zijn dan nu uit het onderzoek blijkt, en ligt bij emissiearme opslag naar schatting rond 38% voor de totale N-emissie en 33% voor de N-NH₃-emissie. De reducties voor N-N₂O en N-N₂ (+ N-NO_x) veranderen naar verwachting nauwelijks;
- Tijdens de balansperiode werd de drijfmest in de kelder vrijwel niet gemixt. Bij regelmatig mixen zal de reductie van het N₂-verlies door het CowToilet aanzienlijk kleiner kunnen zijn dan nu gemeten, omdat als gevolg van mixen het N-verlies door nitrificatie-denitrificatie mogelijk aanzienlijk kan afnemen;
- Door toepassing van het CowToilet kan een aanzienlijke reductie van de totale N-emissie en de N-NH₃-emissie uit de melkveeststal met roostervloer worden gerealiseerd. Deze reductie was in het onderzoek voor het totale N-verlies (38%) wat groter dan het geschatte aandeel opgevangen urine (35%), en voor het N-NH₃-verlies (33%) wat kleiner.

Dankwoord

Ik dank Paul Galama (projectleider PPS 'Mestscheiding in Melkveestallen') voor zijn cruciale rol bij het mogelijk maken van dit onderzoek en voor de ondersteuning; de staf van proeffaciliteit Dairy Campus (Wageningen Livestock Research) voor de uitgevoerde metingen, bemonsteringen, facilitaire ondersteuning, en het gegevensmanagement; 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 Jeroen Verstegen (Hanskamp Agrotech), Ronald Zom (Wageningen Livestock Research / Van Hall Larenstein), Paul Galama (Wageningen Livestock Research), en Roselinde Goselink (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.
- Chen LJ, Cui LY, Xing L, Han LJ (2008) Prediction of the nutrient content in dairy manure using artificial neural network modeling. *Journal of Dairy Science* 91:4822-4829.
- 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) Niveau en samenstelling van het stikstofverlies uit een melkveestal met roostervloer. Rapport 1437, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- De Boer HC (2023c) Niveau en samenstelling van het stikstofverlies uit een melkveestal met doorlaatbare tegelvloer. Rapport Wageningen Livestock Research, Wageningen (in voorbereiding).
- Van Dooren HJC, Ogink NWM, van Riel JW, Mosquera J, Zonderland JL (2019) Beïnvloeding van de ammoniakemissie uit melkveestallen met roostervloer door beweiding - Onderzoek op Dairy Campus. Rapport 1130, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- 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.
- Walther 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.

