



Niveau en samenstelling van het stikstofverlies uit een melkveestal met filterende tegelvloer

H.C. de Boer

Openbaar
Rapport 1542



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Niveau en samenstelling van het stikstofverlies uit een melkveestal met filterende tegelvloer

H.C. 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, januari 2025

Rapport 1542

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/685854> 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, 2025

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.

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Materiaal & methoden	8
	2.1 Introductie	8
	2.2 Stalinrichting	8
	2.3 Diermanagement en rantsoen	12
	2.4 Waarnemingen	12
	2.5 Analyses	14
	2.6 Kalibratie en justering	15
	2.7 Berekening mineralenbalansen	17
	2.8 Correctie van de balansperiode en het stikstofverlies	19
	2.9 Samenstelling van het stikstofverlies	19
	2.10 Uitgescheiden urine en feces	20
	2.11 Overzicht van activiteiten en aanpassingen in de stal	22
3	Resultaten	23
	3.1 Staltemperatuur	23
	3.2 Ventilatie-debiet	23
	3.3 Rantsoen	24
	3.4 Drinkwater en zaagsel	27
	3.5 Melkproductie en melksamenstelling	27
	3.6 Koegewicht	29
	3.7 Hoeveelheid en samenstelling dunne fractie	30
	3.8 Hoeveelheid en samenstelling dikke fractie	34
	3.9 Scheiding van mineralen in dunne en dikke fractie	39
	3.10 Zuurverbruik dunne fractie	39
	3.11 Mineralenbalansen	40
	3.12 Samenstelling van het stikstofverlies	42
4	Discussie	46
	4.1 Fouten op balansposten	46
	4.2 Stikstofemissie bij opslag en uitrijden van feces	47
	4.3 Effect van aanzuren op het stikstofverlies door denitrificatie	47
	4.4 Berekening van urine- en fecesproductie	47
	4.5 Effecten van aanpassing van de filterende tegel	48
	Conclusies	49
	Dankwoord	50
	Literatuur	51

Samenvatting

Stikstof (N) in door koeien uitgescheiden urine is voor een groot 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), onder emissiearme omstandigheden op te slaan, en emissiearm uit te rijden op het land. Bronscheiding geeft ook een scheiding van mineralen, en wanneer urine en feces (grotendeels) gescheiden kunnen worden opgevangen, ontstaan er twee fracties met een verschillende samenstelling. Deze fracties kunnen op of buiten het melkveebedrijf specifiek worden ingezet dan mengproduct drijfmest, bijvoorbeeld bij de afvoer van mineralen van het bedrijf of bij de bemesting van gewassen. Bronscheiding van urine kan worden uitgevoerd met meerdere methoden, die verschillen in de opgevangen hoeveelheid en verontreiniging met feces. Bij gebruik van een filterende tegelvloer loopt de door de koeien uitgescheiden urine door de tegels in de kelder onder de vloer, terwijl de feces op de tegel blijft liggen en met een vouwschuif wordt afgeschoven in een grup. Met een filterende tegelvloer wordt het overgrote deel van de urine apart opgevangen en wordt de feces grotendeels gescheiden van de urine. Vanwege de verontreiniging van urine met feces (en water), en van feces met urine, wordt niet meer gesproken van urine en feces, maar van dunne en dikke fractie.

De effectiviteit van de filterende tegelvloer is tot dusver niet wetenschappelijk onderzocht. Belangrijke vragen zijn hoeveel dunne en dikke fractie er onder praktijkomstandigheden wordt opgevangen, wat de samenstelling van beide fracties is, in welke mate N, P (fosfor), en K (kalium) worden gescheiden, en of en met hoeveel de NH₃-emissie kan worden gereduceerd. Naast het effect op de NH₃-emissie is het ook van belang om vast te stellen welk effect de scheiding heeft op andere N-emissies uit de stal, in de vorm van lachgas (N₂O) en stikstofgas (N₂). In de PPS 'Mestscheiding in melkveestallen' is onderzoek gedaan naar de effectiviteit van enkele bronscheidingssystemen, waaronder die van de filterende tegelvloer. Het doel van het onderzoek was het vaststellen van het effect van de scheiding op het totale gasvormige N-verlies uit de stal, de samenstelling van dit verlies (NH₃, N₂O, N₂), de samenstelling van de dunne en dikke fractie, en het scheidingsrendement voor N, P, en K.

De effectiviteit van de filterende tegelvloer werd onderzocht in de Milieumeetstal op proeffaciliteit Dairy Campus, in een stal waarin jaarrond 16 melkgevende koeien waren gestald. De resultaten van de stal met de filterende tegelvloer werden ook vergeleken met een vrijwel identieke stal met roostervloer (referentiestal). Het totale N-verlies uit beide stallen werd gemeten door het wekelijks opstellen van (cumulatieve) mineralenbalansen voor N, P, en K, waarbij het (cumulatieve) N-verlies het verschil was tussen totale aanvoer en totale vastlegging van N. In de hele meetperiode (1 december 2020 t/m 13 september 2021; 41 weken) werd de balans opgemaakt voor twee aparte periodes: een periode zonder aanzuren van de dunne fractie in de kelder (vanaf 1 december 2020 t/m 1 februari 2021) en een periode met aanzuren (vanaf 30 maart t/m 13 september 2021). De mineralen werden in de stallen voornamelijk aangevoerd met ruwvoer en krachtvoer, en voornamelijk vastgelegd in dunne en dikke fractie (stal met tegelvloer), drijfmest (referentiestal), 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 dunne fractie in de kelder werd iedere dinsdag gemeten en bemonsterd ter bepaling van de samenstelling. De hoeveelheid afgeschoven dikke fractie werd dagelijks gewogen, en iedere dinsdag bemonsterd ter bepaling van de samenstelling. In de hele meetperiode werd vier keer een deel van de dunne fractie verwijderd, en werd de verwijderde hoeveelheid vastgelegd. 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 dagelijks gemeten NH₃- en N₂O-emissie werd onderscheiden welk deel van het totale gasvormige N-verlies bestond uit NH₃, N₂O, en (restpost) N₂ (incl. NO_x).

Uit de resultaten blijkt dat met de filterende tegelvloer over de hele meetperiode gemiddeld 32,9 kg dunne fractie en 45,8 kg dikke fractie per koe per dag werd opgevangen. Met de dikke fractie werd in de hele meetperiode respectievelijk 52%, 88%, en 22% van de oorspronkelijk uitgescheiden N, P, en K opgevangen.

Voor de gebruikte balansperiode zonder aanzuren (63 dagen) werd het totale N-verlies uit de stal met de filterende tegelvloer vastgesteld op 6,7% van de N-excretie (148 kg N koe⁻¹ jaar⁻¹), bij een eiwitgehalte in het rantsoen van gemiddeld 166 g kg⁻¹ DS, een melkproductie van 29,7 kg koe⁻¹ dag⁻¹, een eiwitgehalte in de melk van 3,87%, en een ureumgetal in de melk van 19,6 mg 100⁻¹ g. De temperatuur in de stal was gemiddeld 7,1 °C en het ventilatiedebiet gemiddeld 19640 m³ uur⁻¹. Het totale N-verlies van 6,7% was lager dan het totaal van het verlies van N-NH₃ (8,1%; 14,6 kg NH₃ koe⁻¹ jaar⁻¹) en N-N₂O (0,02%), wat, ook gelet op de erg lage N₂O-emissie, suggereert dat het N-verlies in de balansperiode zonder aanzuren vrijwel volledig uit NH₃ bestond, er vrijwel geen N₂-emissie als gevolg van denitrificatie optrad, en de negatieve waarde voor de N₂-emissie het gevolg was van een relatief grote fout op de balans als gevolg van een korte balansperiode. Een vergelijking van de N-emissie per N-vorm tussen de stal met filterende tegelvloer en de referentiestal werd daarom voor de periode zonder aanzuren alleen gemaakt voor NH₃ en N₂O. Na correctie van de resultaten van de referentiestal voor een lager ventilatiedebiet (-10%), een hogere temperatuur (+3%), en een lager ureumgetal in de melk (-4%) vergeleken met de stal met de filterende tegelvloer, waren voor de stal met de filterende tegelvloer de relatieve N-emissies van NH₃ en N₂O respectievelijk 53% hoger en 13% lager vergeleken met de referentiestal.

Voor de gebruikte balansperiode met aanzuren (161 dagen) werd het totale N-verlies uit de stal met de filterende tegelvloer vastgesteld op 8,5% van de N-excretie (131 kg N koe⁻¹ jaar⁻¹), bij een eiwitgehalte in het rantsoen van gemiddeld 157 g kg⁻¹ DS, een melkproductie van 27,1 kg koe⁻¹ dag⁻¹, een eiwitgehalte in de melk van 3,53%, en een ureumgetal in de melk van 23,2 mg 100⁻¹ g. De temperatuur in de stal was gemiddeld 17,4 °C en het ventilatiedebiet gemiddeld 19914 m³ uur⁻¹. Het totale N-verlies van 8,5% was opgebouwd uit 3,9% N-NH₃ (6,3 kg NH₃ koe⁻¹ jaar⁻¹), 0,4% N-N₂O, en 4,2% N-N₂ (incl. enig N-NO_x). Na correctie van de resultaten van de referentiestal voor een lager ventilatiedebiet (-14%) en een hogere temperatuur (+4%) (het ureumgetal in de melk was hetzelfde) vergeleken met de stal met de filterende tegelvloer, waren voor de stal met de filterende tegelvloer de relatieve N-emissies van N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ (+ NO_x) respectievelijk 52%, 62%, 9%, en 40% lager.

Bij deze emissiereducties was de emissie uit (langer durende) opslag van de dikke fractie niet meegenomen bij de stal met de filterende tegelvloer, terwijl deze (als onderdeel van de drijfmest) bij de referentiestal wel bijdroeg aan de emissie. Voor de emissie tijdens opslag moet nog gecorrigeerd worden om een meer zuivere vergelijking te maken tussen beide stallen. Een laatste fase die nog meegenomen zou moeten worden is een eventueel verschil in N-emissie tussen het uitrijden van dunne en dikke fractie op het land, en het uitrijden van drijfmest.

Geconcludeerd wordt dat de filterende tegelvloer een goede scheiding gaf in een dunne en dikke fractie, maar zonder aanvullende behandeling van de dunne fractie een hogere NH₃-emissie gaf vergeleken met de roostervloer. Naast behandeling van de dunne fractie kan door een verdere ontwikkeling van de tegel, o.a. een verlaging van het absorptievermogen, de NH₃-emissie verder verlaagd worden.

1 Inleiding

Stikstofemissie uit de melkveestal draagt bij aan 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 vervluchtigde N als ammoniak (NH_3) neerslaan in gebieden waar externe N-aanvoer ongewenst is. Het is daarom van belang om de N-emissie uit melkveestallen beperkt te houden.

De totale hoeveelheid door de koe uitgescheiden 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 ammonium (NH_4) dat wordt gevormd en 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 drijfmest). Stikstofverlies uit de melkveestal en vanaf het land 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 kalium (K) en natrium, maar het bevat geen fosfor (P). De feces daarentegen bevat vrijwel alle P, vrijwel alle organische N, en het overgrote deel van de organische stof. Wanneer urine en feces grotendeels gescheiden kunnen worden opgevangen, ontstaan er twee fracties met een verschillende samenstelling. Deze fracties kunnen daardoor op of buiten het melkveebedrijf specifiekere worden ingezet dan het mengproduct drijfmest, bijvoorbeeld bij de afvoer van mineralen van het bedrijf of bij de bemesting van gewassen.

Bronscheiding van urine kan worden uitgevoerd met meerdere methoden, die verschillen in de opgevangen hoeveelheid en de verontreiniging met feces. Vrijwel zuivere urine kan worden opgevangen met het CowToilet (Hanskamp, Doetinchem). Het CowToilet vangt echter maar een deel van de uitgescheiden urine op, naar schatting 35% (De Boer, 2023c). Hierdoor komt bijna tweederde van de urine nog steeds bij de feces en wordt er nog steeds drijfmest gevormd.

Een andere methode om urine op te vangen, en tegelijk ook grotendeels van de feces te scheiden, is de toepassing van een filterende tegelvloer. Hierbij loopt de door de koeien uitgescheiden urine door de tegel in de kelder, terwijl de feces op de tegel blijft liggen en wordt afgeschoven in een grup. Voordelen van de filterende tegelvloer, vergeleken met het CowToilet, zijn dat een veel groter deel van de urine wordt opgevangen, en ook dat de feces grotendeels wordt gescheiden van de urine. Nadelen zijn dat de urine meer verontreinigd wordt met feces, en dat de urine niet afgesloten wordt opgevangen. Vanwege de verontreiniging van urine met feces, en van feces met urine, wordt er niet meer gesproken van urine en feces, maar van dunne en dikke fractie.

De effectiviteit van de filterende tegelvloer is tot dusver niet wetenschappelijk onderzocht. Belangrijke vragen zijn hoeveel dunne en dikke fractie er onder praktijkomstandigheden wordt opgevangen, wat de samenstelling van beide fracties is, in welke mate N, P, en K worden gescheiden, of de NH_3 -emissie kan worden gereduceerd, en wat het effect van scheiding is 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 die van de filterende tegelvloer. Het doel van het onderzoek was het vaststellen van het effect van de scheiding op het totale N-verlies uit de stal, de samenstelling van dit verlies (NH_3 , N_2O , N_2), de samenstelling van de dunne en dikke fractie, en het scheidingsrendement van N, P, en K. De opzet, uitvoering, en resultaten van dit onderzoek zijn beschreven in het voorliggende rapport.

2 Materiaal & methoden

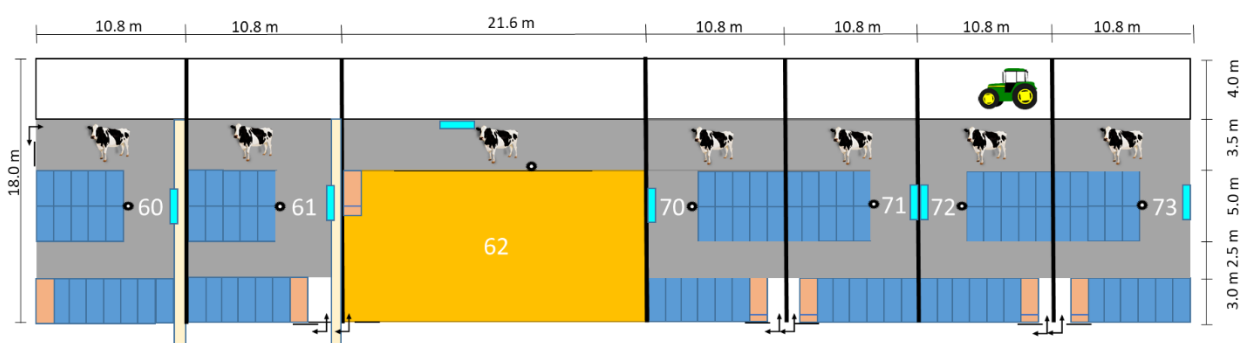
2.1 Introductie

Het totale gasvormige N-verlies van een melkveestal met filterende tegelvloer werd berekend uit de N-massabalans voor een experimenteel compartiment ('stal') in de Milieumeetstal op proeffaciliteit Dairy Campus (Leeuwarden). In deze stal lag een roostervloer met daarop een filterende tegelvloer en de urine liep als dunne fractie door de tegels in de kelder onder de vloer. De dikke fractie werd regelmatig met vouwschuiven van de tegels naar een grup geschoven en de grup werd regelmatig geleegd in een opvangbak buiten de stal. De balans werd wekelijks opgesteld voor een periode van 41 weken (1 december 2020 t/m 13 september 2021), voor een periode zonder aanzuren van de dunne fractie in de kelder (vanaf 1 december 2020 t/m 1 februari 2021) en voor een periode met aanzuren (vanaf 30 maart t/m 13 september 2021). Het management van de stal was erop gericht om een reguliere melkveestal met roostervloer zo goed mogelijk te benaderen. De balansmetingen waren oorspronkelijk gestart op 6 oktober 2020, maar uit schommelingen in het peil van de dunne fractie in de mestkelder bleek dat er enkele scheuren in de keldermuren aanwezig waren, waardoor waterige fractie uit een naastgelegen kelder in de kelder van de stal met de tegelvloer liep. Na reparatie van de keldermuren werd per 1 december 2020 opnieuw gestart met de metingen. Hierna volgt voor de stal met de tegelvloer een beschrijving van 1) de stalinrichting, het koemanagement, en de uitgevoerde metingen; 2) de gebruikte methoden voor het opstellen van de N-balans, het berekenen van het totale N-verlies, en de samenstelling van dit verlies; en 3) de manier van vergelijken van de resultaten van de stal met de tegelvloer met de resultaten van een vrijwel identieke stal zonder tegelvloer (referentiestal) (De Boer 2023b). Een chronologisch overzicht van een aantal belangrijke veranderingen/aanpassingen in de stal tijdens de meetperiode is weergegeven aan het einde van dit hoofdstuk, in Tabel 1.

2.2 Stalinrichting

Milieumeetstal

De Milieumeetstal op Dairy Campus bestond uit zeven individuele stallen, genummerd 60, 61, 62, 70, 71, 72, en 73 (Fig. 1). Stallen 60 en 61 waren net voor start van het onderzoek nieuw opgeleverd, en waren het resultaat van een splitsing van een groter stalcompartiment.



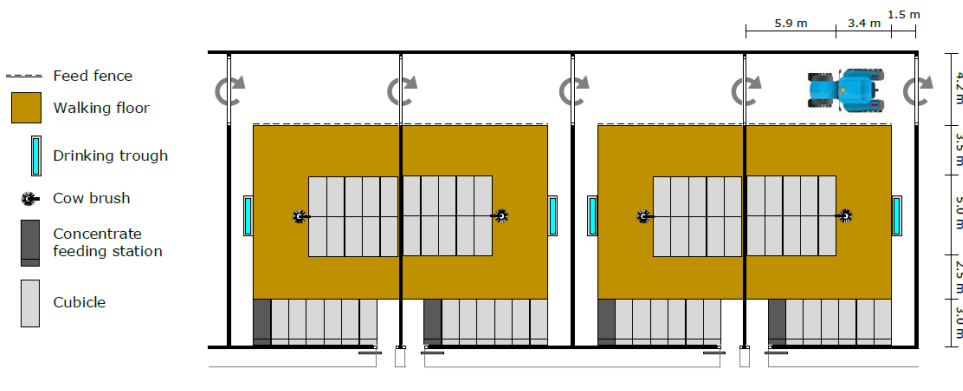
Figuur 1 Plattegrond van de indeling van de individuele stallen in de Milieumeetstal op proeffaciliteit Dairy Campus, bij start van het onderzoek.

De Milieumeetstal had een puntdak en oriëntatie NNW-ZZO. De individuele stallen waren klimaatgescheiden, en hadden 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. Het open deel was 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) deuren, die normaal waren gesloten, behalve bij het voeren, en die ook (deels) op maandagen open konden zijn. 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).

Stal 60 en 72

Het onderzoek aan de tegelvloer werd uitgevoerd in (nieuwe) stal 60 en als referentie werd stal 72 gebruikt. Het vloeroppervlak voor de dieren was in beide stallen 118 m^2 , waarvan 72 m^2 roostervloer en 46 m^2 ligboxen, met voor ieder dier een ligbox van $1,15 \text{ m}$ breed en $2,5 \text{ m}$ 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). De roostervloer in beide stallen bestond uit betonnen roosters van 14 cm dik, met om de 16 cm een gleuf van $3,5 \text{ cm}$ breed. De betonnen vloeren van beide stallen waren grotendeels identiek, met als belangrijkste verschil dat het zijpad buiten de scheidingswand bij stal 60 niet was onderkelderd maar bij stal 72 wel. In plaats van een stuk mestkelder was bij stal 60 een grup aangebracht voor de afvoer van de dikke fractie vanaf de tegelvloer. Door het wegvallen van een deel mestkelder was het oppervlak van de mestkelder bij stal 60 (netto 120 m^2) kleiner dan bij stal 72 (netto 135 m^2). De afstand van de keldervloer tot aan de onderkant van de roosters was in beide stallen 134 cm . De afmetingen van de grup in stal 60 waren $13,7 \times 0,43 \times 0,58 \text{ m}$ (l x b x h). De grup liep buiten de stal nog ca. 10 m door tot aan een hok waarin de dikke fractie in een opvangbak werd gestort. De grup was in de stal open en buiten de stal overdekt.



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

Filterende tegelvloer

De filterende tegelvloer (Zeraflex, Emmen) in stal 60 bestond uit tegels met een standaardafmeting van $100 \times 100 \times 3,5 \text{ cm}$ (l x b x h). Een tegel bestond uit een harde kunststof onderplaat met opstaande randen, met in deze 'bak' een poreuze rubberen plaat (Fig. 3). De bovenkant, zijkant, en klein deel van de onderkant van de tegel was omgeven met een filterdoek (maaswijdte $0,55 \times 0,55 \text{ mm}$) (Fig. 4).



Figuur 3 Naast elkaar de drie onderdelen van de filterende tegel. Links de kunststof onderplaat met opstaande randen (gezien vanaf de bovenkant), in het midden de rubberen plaat, en rechts het filterdoek met omslaande randen (gezien vanaf de onderkant).



Figuur 4 De filterende tegel gezien vanaf de onderkant.

De kunststof onderplaat was voorzien van 100 ronde gaten met een doorsnede van 29 mm en een onderlinge afstand van 10 cm. De ronde gaten waren ook aangebracht in de rubberen plaat en hadden daar een doorsnede van 25 mm. Urine liep eerst door het filterdoek en de gaten en vervolgens door de gleuven van de roostervloer in de kelder.

Op de tegelvloer waren twee vouwshuiven geïnstalleerd, één in de voorste mestgang direct achter het voerhek en één in de achterste mestgang tussen de twee rijen ligboxen, in beide mestgangen over de volle breedte van de mestgang (Fig. 2). De vloerschuiven waren geprogrammeerd om iedere 1,5 tot 2 uur te schuiven, waarbij de feces vanaf de tegelvloer werd meegenomen en in de grup aan de zijkant werd gedeponeerd. De (reciproke) schuif in de grup was geprogrammeerd om eens per 1,5 tot 2 uur te schuiven en daarbij de grup te legen. Aan het einde van de grup, buiten de stal, werd de aangevoerde dikke fractie met een vijzel omhoog gebracht en in een opvangbak gestort. Deze bak werd iedere dag gewogen en gelegegd. Over het afstortpunt heen was een hok gebouwd, zodat de dikke fractie niet werd vermengd met regenwater. Het mestafschuifstelsel, de grup, en de aansturing, waren geïnstalleerd door A&S Techniek (Burgum).

Schoonspuiten tegels

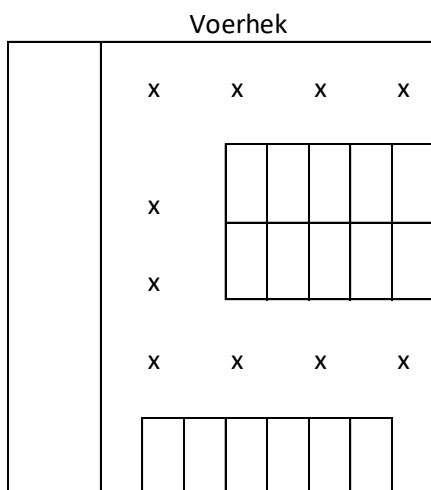
Na verloop van tijd gingen de tegels dichtslibben, onder andere vanwege afzettingen uit de urine. Op maandag 8 maart zijn daarom de tegels uit stal 60 verwijderd en buiten de stal met een hogedrukreiniger schoongespoten. Ook de toplaag van de roostervloer werd met de hogedrukreiniger schoongespoten.

Op 11 maart werden de tegels weer op de roostervloer teruggelegd. Het schoonspuiten van de tegels vond plaats in een periode dat de koeien niet in de stal waren (1 tot 15 maart 2021).

Aanzuren van dunne fractie in de kelder

Tijdens een deel van de hele meetperiode is de dunne fractie in de kelder aangezuurd met zwavelzuur (H_2SO_4) om de NH_3 -emissie te verlagen. Het aanzuren startte op 29 maart 2021 en werd voor de laatste keer uitgevoerd op 6 september 2021, zeven dagen voor het einde van de hele meetperiode op 13 september.

Op maandag 29 maart 2021 werd 1400 kg H_2SO_4 (94-98%; ~777 liter) in hoeveelheden van 20-100 liter met tussenpozen gemengd met de kelderinhoud (~45 m³). Uit pH-meting na het aanzuren bleek dat de pH eigenlijk te ver was gedaald, tot een waarde van 1,3, waardoor mogelijk het beton in de kelder aangetast zou kunnen worden. Daarom werd op woensdag 31 maart de kelder zoveel mogelijk geleegd, tot een resterend peil van 16,5 cm, zodat door de aanvoer van verse urine de pH weer zo snel mogelijk op een hogere waarde zou komen. Nadat de pH van de aangezuurde dunne fractie in de gewenste range was gekomen (pH 4,0 tot 5,0) werd iedere twee tot vier dagen handmatig zuur bijgemengd wanneer de pH de waarde van 5 naderde. Bij ieder aanzuurmoment werd eerst de pH op 10 meetposities bepaald (Fig. 5), werd de benodigde hoeveelheid zuur geschat, en werd vervolgens de kelderinhoud aangezuurd met 1 tot 4 jerrycans met 20 l H_2SO_4 (37%). Deze hoeveelheid werd over de vier bereikbare mestgangen verdeeld, waarbij het zuur rechtstreeks vanuit de kraan van de jerrycan door een gleuf in de roostervloer in de dunne fractie liep. Na het aanzuren werd de inhoud van de kelder kortdurend (meestal een half uur) gemixt met het aanwezige Smart Slurry Aeration System (SSAS; DairyPower Equipment, Blarney, Ierland), om het toegediende zuur zo goed mogelijk door de kelder te verdelen. Na het mixen werd de pH opnieuw gemeten op de 10 posities en werd aanvullend aangezuurd als de pH niet voldoende was gedaald (tot rond een waarde rond 4,0). Op 31 mei en 29 juni werd er een hoeveelheid dunne fractie uit de kelder verwijderd om daarmee de aan te zuren hoeveelheid dunne fractie en de benodigde hoeveelheid zuur te beperken. Alle pH-metingen (behalve die van wekelijkse verzamelmonsters, zie paragraaf 2.4) werden uitgevoerd met een handheld Hanna pH-tester (HI 98121, Hanna Instruments, Smithfield RI, USA).



Figuur 5 Schets van de indeling van stal 60 in de Milieumeetstal op Dairy Campus, met de tien meet- en bemonsteringspunten voor dunne fractie indicatief aangegeven met 'x'.

Pompsysteem

Op maandag 29 maart, voor de start van het aanzuren, werd er in stal 60 een pompsysteem geïnstalleerd. Hiermee werd de dunne fractie links vooraan het voerhek (Fig. 1) uit de voorste mestgang gepompt en via een slang rechts achterin de achterste mestgang gepompt. De bedoeling hiervan was om de dunne fractie voortdurend gemengd te houden, en te voorkomen dat de pH plaatselijk te hoog kon worden en de NH_3 -emissie daardoor kon toenemen. Aan de slang naar achteren was met een aftakking een extra slang bevestigd; deze werd bij het aanzuren gebruikt om de roostervloer op de aanzuurplekken schoon te spoelen en later om de vloer met aangezuurde dunne fractie te spoelen (zie onder).

Aanpassing van de tegels

Op maandag 31 mei 2021 zijn de tegels vervangen door een aangepaste versie waarbij de rubberen plaat was samengesteld uit een fijnere rubberkorrel. De bedoeling was dat het rubber hierdoor minder urine zou vasthouden en er minder NH₃ zou emitteren. Daarnaast was de rubberen plaat zodanig aangepast dat de gaten beter aansloten op de gaten in de kunststof onderplaat, en de urine hierdoor makkelijker door de plaat weg kon lopen.

Spoelen met aangezuurde dunne fractie

In de periode vanaf 2 augustus t/m 7 augustus werd de tegelvloer tussen 6:30 en 17:00 ieder uur bevoeid met 4 tot 5 l m⁻² aangezuurde dunne fractie uit de kelder. Het doel hiervan was om vast te stellen of door regelmatige bevoeiing, en daarmee het doorspoelen van de tegels, de NH₃-emissie van de vloer zou afnemen. Tijdens het spoelen bleven de meetgordijnen gesloten vanaf 7 uur tot 17 uur.

2.3 Diermanagement en rantsoen

Diermanagement

In de meetperiode 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/tegelvloer en 2,9 m² ligbox. De koeien werden dagelijks gemolken tussen 5 en 7 uur en tussen 15 en 17 uur en verlieten daarvoor de stal voor een periode van drie kwartier per keer, in totaal 1,5 uur per dag. In de meetperiode waren er in stal 60 geen koeien aanwezig vanaf 1 maart tot 15 maart 2021 en vanaf 24 mei t/m 31 mei 2021. De koeien verlieten de stal op maandagochtend bij het melken (rond 5 uur) en kwamen terug tussen 6 en 7 uur op maandagochtend 15 maart, en rond 16 uur op maandag 31 mei.

Rantsoen

Het voer bestond uit een basisrantsoen aangevuld met brok, waarbij gestuurd werd op een ruw eiwitgehalte in het totale rantsoen van 160 tot 170 g kg⁻¹ DS. 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.

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 dunne fractie, en de afgeschoven dikke fractie. Ook gemeten werden de frequentie van urine- en fecesexcretie rond het melken, het koegewicht, de staltemperatuur 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 soja- en gerstemeel, en uit een aanvoerleiding voor het water. Bij iedere vulling werd de lading gewogen met de weeginstallatie in de voermengwagen en werd de toename in gewicht geregistreerd. Na het vullen werd de inhoud continu gemengd en werden alle 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 in stal 72. Plukmonsters werden na verzameling ingevroren (-18 °C) bewaard tot het moment van analyse. De overblijvende hoeveelheden PMR (restvoer) van iedere maandag en donderdag werden voor stal 72 respectievelijk iedere dinsdag- en vrijdagochtend gewogen. De eerste 14 dagen werd deze restvoerbepaling dagelijks uitgevoerd.

Na afloop van de meetperiode 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 gedurende een maand iedere dinsdagochtend meteen na het uitdraaien bemonsterd door het nemen van een plukmonster over de negen meter breedte van het voerhek, in stal 70. 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 voor zowel het voerstation in stal 60 (SAC FDS1, SAC-Group, Kolding, Denemarken) als voor het voerstation in de melkstal (AutoRotor PerFormer Plus, GEA, Düsseldorf, Duitsland). Brok werd iedere dinsdagochtend bemonsterd uit het voerstation van stal 72 en monsters werden ingevroren (-18 °C) bewaard tot het moment van analyse. Het voerstation in stal 72 was hetzelfde type als in stal 60; in de rapportage van stal 72 (De Boer, 2023b) is abusievelijk een verkeerde referentie opgenomen.

Drinkwater

Het gebruik van drinkwater (bronwater) door de koeien werd geregistreerd via de watermeter in stal 60, geplaatst in de aanvoerleiding van de waterbak. De watermeter werd iedere dinsdag afgelezen en de stand geregistreerd. Het drinkwater werd iedere dinsdag bemonsterd uit de aanvoerleiding van de waterbak in stal 70 en monsters werden ingevroren (-18 °C) bewaard 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. Enkele keren in de meetperiode werd een monster genomen, en ingevroren (-18 °C) bewaard 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 werd dit 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). De volgende ochtend werd deze procedure herhaald, en werden beide verzamelmonsters daarna samengevoegd tot een nieuw monster dat ingevroren (-18 °C) werd bewaard tot het moment van analyse.

Dunne fractie

Bij start van de meetperiode was het peil van de dunne fractie in de kelder 2 cm. Het peil werd iedere volgende dinsdagochtend gemeten met een peilbuis met mm-schaalverdeling, op 10 verschillende posities regelmatig verdeeld over het vloeroppervlak (Fig. 5), en de meetresultaten werden gemiddeld. De dunne fractie werd op vergelijkbare posities bemonsterd met een multisampler (lengte 1,8 m, ø 30 mm; Eijkelkamp, Giesbeek), waarbij de 10 deelmonsters werden gemengd tot een verzamelmonster dat ingevroren (-18 °C) werd bewaard tot het moment van analyse. De multisampler bestond uit een holle buis die bij monsternamen door de laag dunne fractie in de kelder werd geduwd en vervolgens van onderen werd afgesloten, waardoor het materiaal in de buis een doorsnede van de hele laag vertegenwoordigde. De volumetrische dichtheid van de genomen monsters werd vanaf 2 maart 2021 bepaald door de monsters over te gieten in een maatkan (1000 ml), de inhoud te wegen, het volume af te lezen, en vervolgens de dichtheid te berekenen. De dunne fractie werd bij de wekelijkse peilmeting en bemonstering normaliter niet gemixt, zeker niet in de periode zonder aanzuren, om de NH₃-emissie niet te stimuleren.

In de periode met aanzuren werd er op vier tijdstippen een hoeveelheid dunne fractie uit de kelder gepompt, deels met een vrachtwagen, deels met de giertank van Dairy Campus, en voor een klein deel met een pomp. Daarbij werd het verwijderde gewicht (vrachtwagen, giertank) of volume (pomp) geregistreerd. Op geen van de tijdstippen werd de verwijderde dunne fractie bemonsterd.

Dikke fractie

De bak met opgevangen dikke fractie werd dagelijks gewogen op de weegbrug, geleegd, en weer teruggezet. Wegen en legen vond meestal plaats tussen 9 en 10 uur in de ochtend. Op basis van het bekende leeggewicht van de roestvrijstalen opvangbak (450 kg; \pm 10 kg) werd berekend hoeveel dikke fractie netto was opgevangen. Iedere dinsdagochtend werd de dikke fractie in de bak, voorafgaande aan het moment van legen, bemonsterd. Op meerdere plekken werd met een spade een hoeveelheid dikke fractie uit de opvangbak in een speciekuip geschept, werd de inhoud van de speciekuip grondig gemengd, en werd een verzamelmonster genomen dat ingevroren (-18 °C) werd bewaard tot het moment van analyse.

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 gemiddeld over de 16 koeien in de stal.

Staltemperatuur en ventilatiedebiet

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

NH₃- en N₂O-emissie

De NH₃- en N₂O-emissie uit de stal werd in de meetperiode 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 werden de concentraties gemeten. De gegevens van de laatste vier minuten werden 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 emissie 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, de brok, het drinkwater, en de 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 de destructie werden de brokmonsters gemalen (1 mm) en de PMR-monsters gedroogd (70 °C, 15 uur) en gemalen (1 mm). De meting van N-Kjeldahl werd uitgevoerd cf. NEN 7434 en de meting van P- en K-totaal cf. NEN 7435 ICP-OES.

De monsters van de dunne fractie, dikke fractie, en het zaagsel werden door het Chemisch-Biologisch Laboratorium Bodem (CBLB, Wageningen) nat-chemisch geanalyseerd, de monsters van de dikke en dunne fractie 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. De pH en EC werden in het verse materiaal gemeten met standaard elektroden, bij de dikke fractie in uitlekvocht; 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.

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 (omgerekend naar DS), 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 werd er 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).

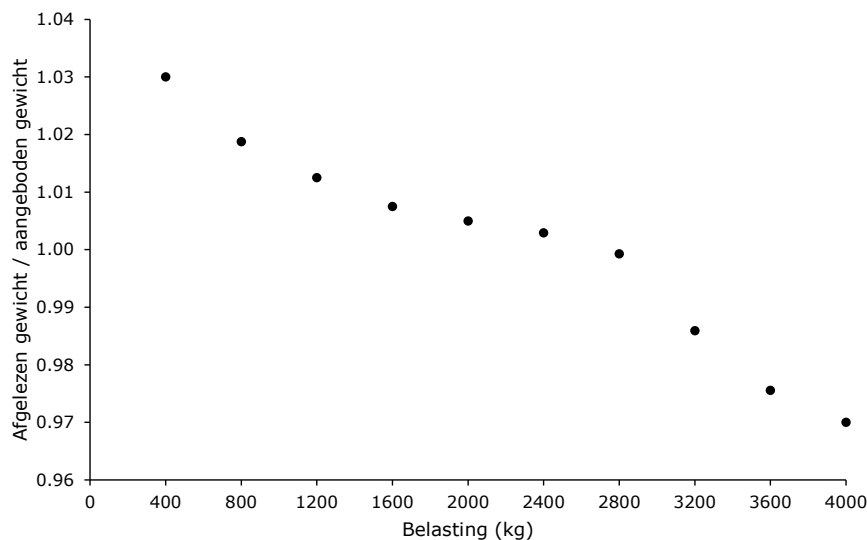
2.6 Kalibratie en justering

Voor, tijdens of na de meetperiode werden kalibraties uitgevoerd aan de weegbrug, de weeginstallatie van de voermengwagen, het voerstation in stal 60 en in de melkstal, de melkmeters in de melkstal, de meetwaaiers ter bepaling van het ventilatiedebiet, en de pH-meter. De weegbrug, de weeginstallatie van de voermengwagen, de voerstations, en de pH-meter werden, indien nodig, aanvullend ook gejusteerd.

De weegbrug werd gekalibreerd op 5 mei 2020, na het uitvoeren van een reparatie. Van deze kalibratie en justering konden geen detailgegevens worden teruggevonden. De weegbrug werd, lang na afloop van de meetperiode, opnieuw gekalibreerd op 23 oktober 2023, door Kalibra International (Delft), bij een omgevingstemperatuur van 6 °C. De weegbrug werd daarbij onderzocht door vergelijking van de geïndiceerde waarde met de massa aangebracht door belasting met standaard massastukken van 400 kg, eerst toenemend tot 20000 kg en daarna afnemend tot 0. De meetmethode was gebaseerd op de instructies uit de norm EN 45501. Binnen het traject van 400 tot 2000 kg, de situatie die representatief was voor het gewicht van de volle mestbak (max. 1660 kg), was er bij kalibratie op 23 oktober 2023 een onderschatting van het aangeboden gewicht van 2 tot 3%.

De weeginstallatie van de voermengwagen werd gekalibreerd op 19 januari 2021 door Kalibra International (Delft), bij een omgevingstemperatuur van 7 °C. De weeginstallatie 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. 6). Ongeveer een maand na de kalibratie werd de weeginstallatie tijdens regulier onderhoud gejusteerd door Kuperus Oudehorne (Oudehorne).



Figuur 6 Afwijking van de weergegeven waarde door de weeginstallatie van de voermengwagen bij neergaande belasting tijdens kalibratie, met het gewicht 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 meetperiode, 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 van beide voerstations (in stal 60 en in de melkstal) werd eens per maand gecontroleerd door een ingestelde hoeveelheid af te draaien en te wegen, en de afgifte werd eventueel gejusteerd door bij een groter dan toegestane afwijking de ingevoerde hoeveelheid bij te stellen. Omdat de afgegeven hoeveelheid brok gebaseerd was op het aantal vijzelomwentelingen, en er in de meetperiode steeds hetzelfde type brok werd gevoerd, waren afwijkingen op de afgegeven hoeveelheid minimaal (niet geregistreerd).

De meetwaaiers voor meting van het ventilatiedebiet in stal 60 waren bij start van de meetperiode voor het laatst gekalibreerd in 2016, na de installatie van het toen nieuwe materiaal, en werden opnieuw gekalibreerd op 11 januari 2022, vier maanden na afloop van de meetperiode. Per ventilator werd een extra meetwaaier gemonteerd onder de bestaande meetwaaier en vervolgens werd de ventilator ingesteld op 20%, 40%, 60%, en 80% van de capaciteit. Bij deze ventilatieniveaus werd de pulsefrequentie (Hz) van de extra meetwaaier vergeleken met de de puls-frequentie van de bestaande meetwaaier en werd er een kalibratielijijn afgeleid. Deze kalibratielijijn werd gebruikt om tijdens de balansperiode gemeten puls-frequenties om te rekenen naar debiet.

De pH-meter werd regelmatig, meestal wekelijks, gekalibreerd, en indien nodig gejusteerd. Kalibratie en justering werden uitgevoerd met behulp van twee ijkpunten, pH = 4 en pH = 7. Hiervoor werden kalibratievloeistoffen met pH = 4.01 (HI7004, Hanna Instruments) en pH = 7.01 (HI7007, Hanna Instruments) gebruikt.

2.7 Berekening mineralenbalansen

Principe

Het cumulatieve N-verlies uit de stal werd berekend uit een cumulatieve N-massabalans, wekelijks opgesteld voor 41 weken in de periode vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 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 berekend als het verschil tussen N die wordt aangevoerd in de stal (vooral met voer) en N die wordt vastgelegd (vooral in dunne fractie, dikke fractie, en melk).

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

$$M_{\text{balans}} = M_{\text{drinkwater}} + M_{\text{zaagsel}} + M_{\text{voer}} - M_{\text{dunne fractie}} - M_{\text{dikke fractie}} - M_{\text{melk}} - M_{\text{dieren}}$$

Fosfor en K vervluchtigen niet, en alle aanvoer van deze mineralen moet daarom worden teruggevonden in dikke fractie, dunne fractie, 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 60 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 dunne en dikke fractie vastgelegde hoeveelheden mineralen, is de correctie volledig toegepast op de vastlegging in dunne en dikke fractie. De hoeveelheid in dunne en dikke fractie vastgelegde N werd daarbij gecorrigeerd als: in dunne en dikke fractie vastgelegde N / (1 - (P-verlies (kg) / P-excretie (kg))). De P-excretie werd berekend als: $P_{\text{drinkwater}} + P_{\text{voer}} - P_{\text{melk}} - P_{\text{dieren}}$. Het N-verlies werd uitgedrukt als percentage van de N-excretie, berekend als: $N_{\text{drinkwater}} + N_{\text{voer}} - N_{\text{melk}} - N_{\text{dieren}}$. 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, alleen berekend voor N, werden per dag de hoeveelheden N-Kjeldahl voor iedere PMR-component berekend als: gevoerde hoeveelheid PMR-component (kg) * gehalte N-Kjeldahl in PMR-component (g kg⁻¹ DS). De dagelijks verstrekte hoeveelheid nitraat werd voor de graskuil berekend als: verstrekte hoeveelheid (kg) graskuil * nitraatgehalte (g kg⁻¹) in graskuil. Dagelijkse verstrekte hoeveelheden N-Kjeldahl en nitraat werden vervolgens per week gesommeerd. Bij de eerste variant 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 de tweede variant waren de gehalten afkomstig van bemonstering en analyse op het niveau van gehele kuilen (gras en snijmaïs) en geleverde partijen (enkelvoudig krachtvoer, lactatie-mineralenmix). Bij de eerste variant werden de bruto gevoerde hoeveelheden PMR per balansweek gecorrigeerd voor het percentage restvoer.

De tweede variant werd berekend om te kunnen corrigeren voor het nitraatgehalte in het PMR, aangezien dit niet was gemeten in de wekelijks genomen PMR-monsters. De per balansweek berekende hoeveelheid N-Kjeldahl in PMR werd daarvoor vermenigvuldigd met een wekelijkse nitraatfactor.

Deze factor werd met de gegevens van de tweede variant per balansweek berekend als: $(N-NO_3 \text{ (kg)} / N\text{-Kjeldahl (kg)}) + 1$. Nitraatgehalten waren alleen geanalyseerd in de graskuilmonsters, omdat het nitraatgehalte in de andere PMR-componenten verwaarloosbaar klein is. Wanneer de andere PMR-componenten toch enig nitraat hadden bevat, dan zouden de N-aanvoer met PMR en het N-balansverlies licht zijn onderschat.

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 dunne en dikke fractie

Het volume (m³) dunne fractie in de kelder werd berekend als: peil dunne fractie (m) * oppervlakte keldervloer (m²). De hoeveelheid vastgelegde mineralen (kg) in dunne fractie in de kelder werd per balansweek berekend als: hoeveelheid in de kelder aanwezige dunne fractie (l) * dichtheid van het monster dunne fractie (kg l⁻¹) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in monsters dunne fractie. 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. Op 1 december 2020 kon de 2 cm (vervuilde) dunne fractie in de kelder niet worden bemonsterd, en voor deze datum werden de gehalten van de volgende meting gebruikt. Op 2 maart 2020 weken de gehalten erg af naar beneden, waarschijnlijk als gevolg van bezinking (de koeien waren op het moment van de bemonstering een dag uit de stal), en voor deze datum werden daarom de gehalten van de vorige meting gebruikt. De hoeveelheid verwijderde mineralen (kg) bij het verwijderen van een partij dunne fractie uit de kelder werd voor de verwijdering op 31 mei en 29 juni berekend op basis van de verwijderde hoeveelheid en het gemiddelde van de gemeten gehalten in de voorgaande week en de volgende week. Deze berekening kwam beter overeen met de trend in toename van hoeveelheid mineralen dan het alternatief: een berekening op basis van de verwijderde hoeveelheid, de overblijvende hoeveelheid in de kelder, en de verandering in samenstelling kort voor en kort na het verwijderen. Bij verwijdering van een hoeveelheid dunne fractie op de andere twee momenten (29 en 31 maart) werd niet de hoeveelheid verwijderde mineralen berekend, maar werd het peil van de dunne fractie in de kelder aangepast. Deze aanpassing was als oplossing praktischer, aangezien de verwijdering van de dunne fractie vrijwel samenviel met de start van de balansperiode met aanzuren.

De hoeveelheid vastgelegde mineralen (kg) in dikke fractie werd per balansweek berekend als: hoeveelheid opgevangen dikke fractie (kg) * minerale gehalten (g kg⁻¹) in monsters dikke fractie. 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. Op 2 maart en 1 juni was de dikke fractie niet bemonsterd. Voor 2 maart werden de gemiddelde gehalten van de voorgaande twee bemonsteringen gebruikt (de twee volgende weken kon er niet bemonsterd worden omdat de koeien uit de stal waren), en voor 1 juni het gemiddelde van de gehalten van de voorgaande en volgende bemonstering.

De berekende hoeveelheden mineralen in de dunne en dikke fractie waren een onderschatting van de werkelijke hoeveelheid mineralen die werd uitgescheiden met 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 dunne en dikke fractie er relatief buiten de stal werd uitgescheiden. De totale cumulatieve hoeveelheid in dunne en dikke fractie vastgelegde mineralen (kg) werd per balansweek berekend door het optellen van de hoeveelheid mineralen in cumulatief opgevangen dunne fractie, in cumulatief opgevangen dikke fractie, en het totaal te vermenigvuldigen met een factor voor productie van dunne en dikke fractie 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 in 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 60 werd per wekelijkse melkcontrole berekend door de melkgift per koe per melking (avond- en ochtendmelking) te vermenigvuldigen met het eiwitgehalte per melking, de tijdens de melkcontrole geproduceerde hoeveelheden melk en eiwit van alle koeien in stal 60 te sommeren, en de gesommeerde eiwitproductie te delen door de gesommeerde melkproductie. Het gewogen vetgehalte, lactosegehalte, en het ureumgetal werden op dezelfde manier berekend.

Mineralen in dieren

De hoeveelheid mineralen vastgelegd in de 16 koeien in stal 60 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 veranderingen in 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).

2.8 Correctie van de balansperiode en het stikstofverlies

Het N-verlies werd voor de periode zonder aanzuren berekend voor één variant van de balansperiode, vanaf 1 december 2020 t/m 1 februari 2021. De laatste weken van deze periode begon het N-verlies te stabiliseren, terwijl na deze periode het N-verlies begon op te lopen, als gevolg van een plotselinge toename van het N-gehalte in de dunne fractie, waardoor de periode vanaf 2 februari t/m 1 maart 2021 weinig representatief leek (zie ook paragraaf 4.1). Voor de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021) werd het N-verlies berekend voor balansperiodes met verschillende lengtes, als gevolg van correctie voor perioden met missende emissiegegevens of leegstand. Bij de correctie werd het 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 over de hele balansperiode. De correctie met geschat N-verlies werd als alternatief gebruikt voor een correctie op basis van gemeten N-verlies, omdat er een aanzienlijke toevallige fout aanwezig kon zijn op de wekelijkse verandering in gemeten N-verlies, waardoor deze fout een dominant en niet-representatief effect kon hebben op het resultaat van een correctie. Door gebruik van een geschat N-verlies kan deze fout worden verkleind.

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 over 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 in 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 7,0 kg N, was de verfijnde schatting van het N-verlies $(0,40 * 0,45 + 0,80 * 0,55) * 7,0 = 4,34$ kg N.

2.9 Samenstelling van het stikstofverlies

Samenstelling van het stikstofverlies uit de stal met de tegelvloer

De samenstelling van het totale N-verlies uit stal 60 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 gemiddeld over respectievelijk de balansperiode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 februari 2021) en de balansperiode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021). Voor de balansperiode met aanzuren werden daarbij de dagelijkse emissiewaarden in de week leegstand verwijderd.

In de balansperiode met aanzuren was ook een periode met missende emissiegegevens, vanaf 27 april t/m 17 mei 2021, waarbij er aanvullend een aantal dagelijkse emissiewaarden werden verwijderd om deze periode aan te passen naar hele balansweken. Het totale N-verlies over de periode met aanzuren, berekend met de N-balans, werd ook gecorrigeerd voor de perioden met missende emissiegegevens en de week leegstand (zie paragraaf 2.8). De op de bovenstaande manier gecorrigeerde en afgestemde balansperiode duurde 61 dagen voor de periode zonder aanzuren en 140 dagen voor de periode met aanzuren. 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 balansperioden. Vervolgens werden de percentages per N-vorm uitgedrukt als aandeel van het totale percentage N-verlies. Voor de periode met aanzuren werden deze aandelen tot slot ook vermenigvuldigd met het totale percentage N-verlies over de balansperiode inclusief de periode met missende emissiegegevens, maar wel gecorrigeerd voor de week leegstand. Deze periode duurde 161 dagen.

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

Bij vergelijking van de N-verliezen per N-vorm van stal 60 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 (zie paragraaf 2.8). Voor de balansperiode zonder aanzuren waren bovenstaande correcties niet van toepassing. Voor de periode met aanzuren werd de balanscorrectie voor de week leegstand in stal 60 en de drie weken leegstand in stal 72 uitgevoerd met de verfijnde schatting van het N-verlies per stal, dus inclusief een correctie voor de mogelijk afwijkende emissie in deze weken in deze stallen. Voor de correctie van de drie weken leegstand in stal 72 werd bij stal 60 gebruik gemaakt van het geschatte totale N-verlies voor stal 60 zonder verfijning, omdat in deze drie weken de koeien in stal 60 gewoon op stal stonden. De op de voorgaande manier gecorrigeerde en afgestemde balansperiode duurde voor beide stallen 119 dagen.

Na bovenstaande afstemming van de balansperioden van beide stallen werden voor de periode met aanzuren 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 60 vergeleken met stal 72 kan betekenen dat er in stal 60 meer ureum met de urine werd uitgescheiden, en de NH₃-emissie in stal 60 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 60 vergeleken met stal 72 betekent dat in stal 60 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). Voor de correctie van de NH₃-, N₂O- en N₂-emissie van referentiestal 72 werden de methoden en relaties zoals beschreven in De Boer (2023c) toegepast.

2.10 Uitgescheiden urine en feces

De hoeveelheid door de koeien uitgescheiden urine werd geschat met behulp van verschillen in gemeten EC tussen de in stal 70 opgevangen urine (De Boer 2023c) en de in stal 60 opgevangen dunne en dikke fractie. De EC van een vloeistof is een directe afgeleide van het zoutgehalte, en het overgrote deel van de door de koe uitgescheiden zouten wordt in de urine uitgescheiden. De zoutuitscheiding van de koeien in urine en feces kan worden gebruikt om de urineproductie te schatten, mits de interactie (en daardoor mogelijke chemische reactie en beïnvloeding van de EC) tussen urine en feces beperkt blijft. In stal 60 was de vervuiling van de dunne fractie met feces relatief gering, en de verzamelde dikke fractie werd binnen een dag na uitscheiding bemonsterd. Hierdoor is naar verwachting de wederzijdse beïnvloeding van de EC van beide fracties beperkt gebleven.

In stal 60, een stal met een vergelijkbaar management als stal 70 en 72, liep de door de koeien uitgescheiden urine door de filterende tegels in de kelder onder de vloer.

Naast urine bevatte de dunne fractie in de kelder ook een vervuiling met feces, water wat de koeien morsten bij het drinken, en toegediend zwavelzuur. De uitgescheiden feces bleef in eerste instantie op de tegels liggen en werd later als dikke fractie van de vloer afgeschoven. De dikke fractie bevatte naast feces ook 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 geproduceerde dikke fractie werd dagelijks gewogen en iedere dinsdag bemonsterd.

Bij de schatting van de gemiddelde dagelijkse hoeveelheid uitgescheiden urine werd eerst geschat hoeveel van de urine in de kelder kwam. Deze hoeveelheid werd geschat als: ((gem. hoeveelheid opgevangen dunne fractie (kg koe⁻¹ dag⁻¹) * gem. EC_{dunne fractie} * aantal dagen periode * aantal koeien) - (hoeveelheid toegediend zwavelzuur 37% (kg) * EC_{zwavelzuur 37%})) / (aantal dagen periode * aantal koeien) / gem. EC_{opgevangen urine in stal 70}, met als aannames dat de EC van het gemorste water verwaarloosbaar laag was en dat de vervuiling met feces een verwaarloosbaar effect op de EC van de dunne fractie had. Voor de EC van het toegediende zwavelzuur (37%) werd een waarde van 67 mS cm⁻¹ gebruikt (Darling, 1964; bij 15 °C). Er werd niet gecorrigeerd voor de zwavelzuur 98% die op 29 maart 2021 werd toegediend, omdat de kelder in de dagen erna grotendeels werd geleegd en de EC-metingen van 30 maart, 6 april en 13 april niet werden meegenomen bij de berekening van de gemiddelde EC van de dunne fractie.

De gemiddelde dagelijkse hoeveelheid opgevangen hoeveelheid dunne fractie was berekend inclusief water dat door de koeien werd gemorst tijdens het drinken, maar exclusief toegediende hoeveelheid zuur en water bij het aanzuren. De gemiddelde dagelijkse hoeveelheid door de koeien gemorst water in de kelder werd geschat als: hoeveelheid in de kelder opgevangen dunne fractie (kg) - hoeveelheid in de kelder opgevangen urine (kg).

De gemiddelde dagelijkse hoeveelheid urine in de afgeschoven dikke fractie werd geschat met behulp van de formule: (hoeveelheid urine in dikke fractie (kg) * gem. EC_{opgevangen urine in stal 70} + hoeveelheid verse feces (kg) * gem. EC_{verse feces}) = hoeveelheid dikke fractie (kg) * gem. EC_{dikke fractie}, en de formule: hoeveelheid urine in dikke fractie (kg) + hoeveelheid verse feces (kg) = hoeveelheid 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 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 in stal 70. De bovenstaande berekeningen werden uitgevoerd voor de periode vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021.

2.11 Overzicht van activiteiten en aanpassingen in de stal

Een overzicht van een aantal belangrijke activiteiten en aanpassingen in de stal tijdens de meetperiode is gegeven in Tabel 1.

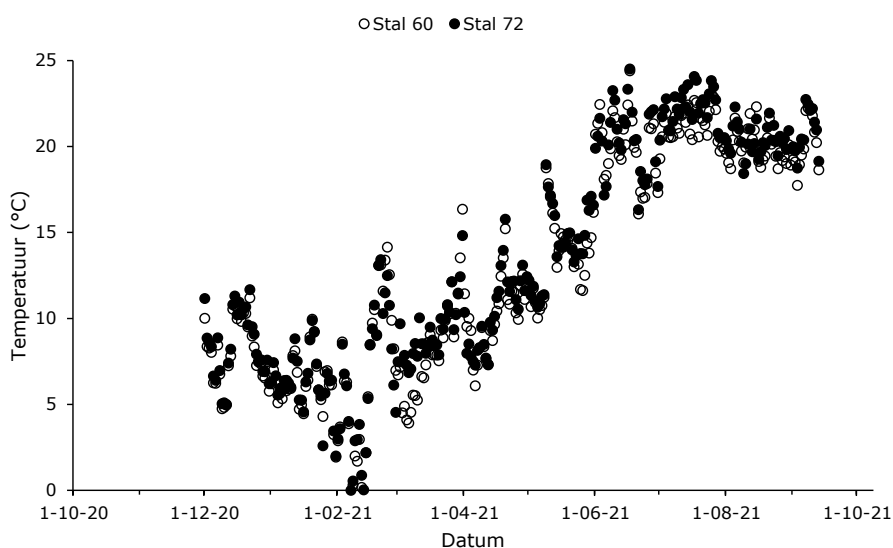
Tabel 1 *Overzicht van een aantal belangrijke activiteiten en aanpassingen in de stal tijdens de meetperiode.*

Datum	Activiteit of aanpassing
01-12-2020	start metingen
01-03-2021	koeien uit de stal
08-03-2021	schoonspuiten tegelvloer
15-03-2021	koeien terug in de stal
22-03-2021	vervanging 10 koeien
29-03-2021	start aanzuren; installatie pompsysteem
29-03-2021	verwijderen dunne fractie uit kelder (14,3 ton)
31-03-2021	verwijderen dunne fractie uit kelder (28,5 ton)
24-05-2021	koeien uit de stal
31-05-2021	koeien terug in de stal; verwijderen dunne fractie uit kelder (31,7 ton)
31-05-2021	aangepaste tegelversie geïnstalleerd
21-06-2021	vervanging 6 koeien
29-06-2021	verwijderen dunne fractie uit kelder (18,3 ton)
02-08-2021	eerste dag tegels bevoeien
07-08-2021	laatste dag tegels bevoeien
23-08-2021	vervanging 9 koeien
07-09-2021	laatste keer aanzuren
13-09-2021	einde metingen

3 Resultaten

3.1 Staltemperatuur

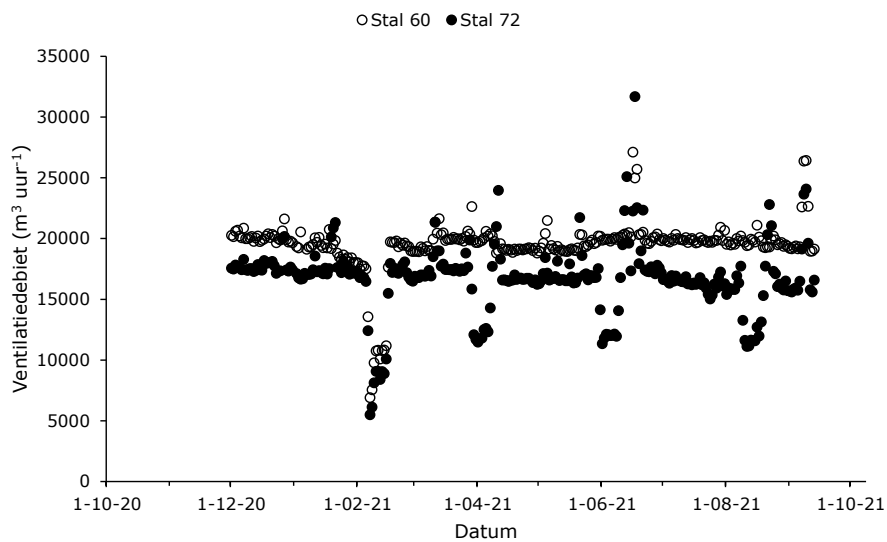
De dagelijks gemiddelde temperatuur in stal 60 varieerde in de hele meetperiode van -0,5 tot 24,4 °C, was inclusief de perioden met leegstand gemiddeld 13,0 °C, en was zonder de perioden met leegstand gemiddeld 13,4 °C (Fig. 7). In de periode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 maart 2021) was de temperatuur gemiddeld 7,0 °C, en in de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021), zonder de periode met leegstand, was de temperatuur gemiddeld 17,4 °C. Bij vergelijking van stal 60 met 72, waarbij perioden met missende emissiegegevens en met leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was de gemiddelde temperatuur in de periode zonder aanzuren voor stal 60 en 72 respectievelijk 6,7 en 6,9 °C, en in de periode met aanzuren respectievelijk 18,1 en 18,9 °C.



Figuur 7 Dagelijks gemiddelde temperatuur in stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie) in de hele meetperiode.

3.2 Ventilatie-debiet

Het dagelijks gemiddelde ventilatie-debiet van stal 60 varieerde in de hele meetperiode van 6904 tot 27118 m³ uur⁻¹, was inclusief de perioden leegstand gemiddeld 19462 m³ uur⁻¹, en was zonder de perioden leegstand gemiddeld 19435 m³ uur⁻¹ (Fig. 8). Over de hele meetperiode was het debiet stabiel. Tijdens enkele 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. In de periode zonder aanzuren was het debiet gemiddeld 18434 m³ uur⁻¹, en in de periode met aanzuren, zonder de periode met leegstand, was het debiet gemiddeld 19914 m³ uur⁻¹. Bij vergelijking van stal 60 met 72, waarbij perioden met missende emissiegegevens en met leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was het gemiddelde debiet in de periode zonder aanzuren voor stal 60 en 72 respectievelijk 18364 en 16523 m³ uur⁻¹, en in de periode met aanzuren respectievelijk 20022 en 17279 m³ uur⁻¹.

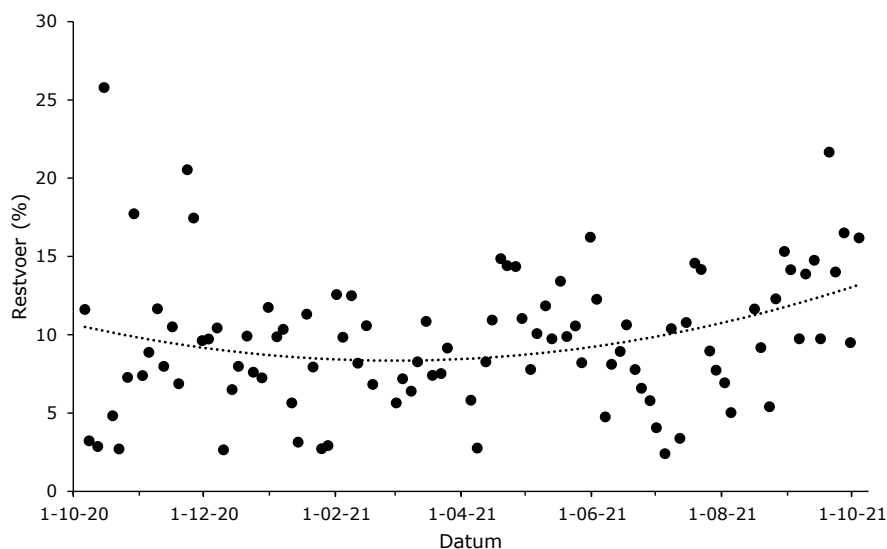


Figuur 8 *Dagelijks gemiddelde ventilatiedebiet van stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie) in de hele meetperiode.*

3.3 Rantsoen

Partial mixed ration

Het percentage restvoer van maandag en donderdag, gemeten in stal 72, varieerde in de hele meetperiode van 2,4% tot 25,8%, en was gemiddeld 9,7% (Fig. 9). Er was een tweedegraads polynome relatie tussen percentage restvoer en dagnr. ($P = 0,02$) met een verklaarde variantie van 7% (De Boer, 2023b).



Figuur 9 *Percentage restvoer van het PMR gevoerd op maandag en donderdag in stal 72 in de hele meetperiode.*

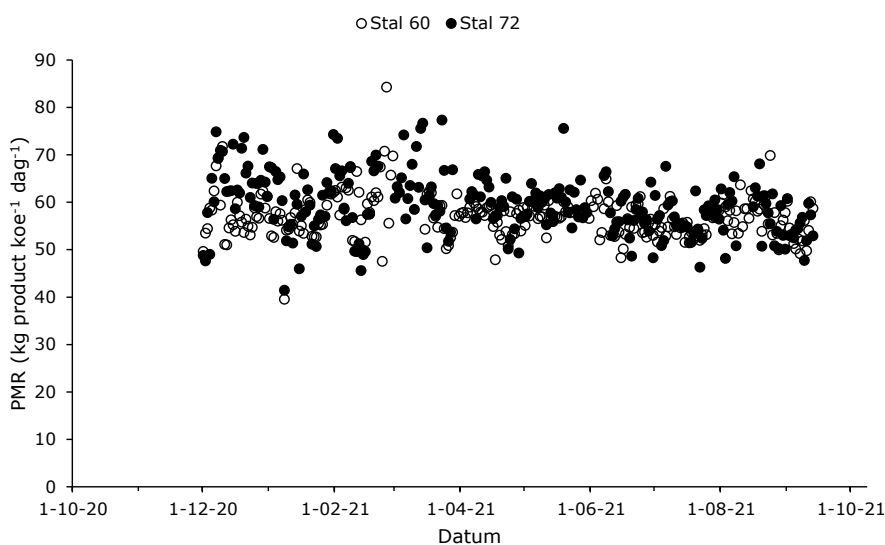
Het dagelijkse restvoer in stal 72 was niet gecorreleerd met de dagelijkse gevoerde hoeveelheid PMR, dagelijkse staltemperatuur, dagelijkse melkproductie, het dagelijkse koegewicht, of het dagelijkse ventilatiedebiet van stal 72 ($P > 0,05$). Omdat dagnr. erg weinig van de variantie in percentage restvoer verklaarde, 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 60 (5452 kg) de geregistreerde hoeveelheid op dat moment met tenminste 3% werd onderschat. Een meer precieze vaststelling van de onderschatting kon niet worden vastgesteld, omdat de gemiddelde uitgedraaide hoeveelheid buiten het kalibratiebereik viel. De geregistreerde hoeveelheden uitgedraaide PMR werden niet gecorrigeerd voor de bij de kalibratie geconstateerde onderschatting (zie paragraaf 4.1).

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 (netto) 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 60 varieerde in de hele meetperiode van 39,6 tot 84,3 kg product $\text{coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$, gemiddeld 57,0 kg (Fig. 10). De bruto dagelijks met PMR gevoerde hoeveelheid DS varieerde, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag, van 16,0 tot 22,7 kg DS $\text{coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$, en was gemiddeld 18,7 kg. De netto dagelijks gevoerde hoeveelheid PMR, op basis van de wekelijkse meting en gecorrigeerd voor een voerrest van gemiddeld 9,7%, was respectievelijk gemiddeld 51,3 kg product of 16,9 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, varieerde op DS-basis van 61% tot 75%, en was gemiddeld 68% (De Boer, 2023b).

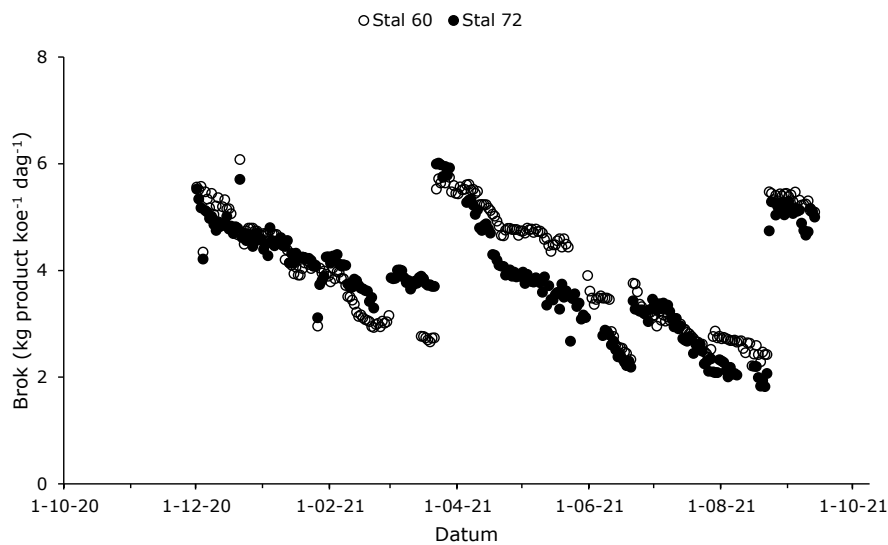


Figuur 10 Dagelijkse bruto gevoerde hoeveelheid PMR in stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie) in de hele meetperiode.

Het ruw eiwitgehalte van het PMR ($\text{N-Kjeldahl} \times 6,25$) varieerde, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag, van 136 tot 195 g RE kg^{-1} DS, en was gemiddeld 167 g RE kg^{-1} DS. Met het PMR werd, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag (op dinsdag gevoerde hoeveelheid PMR \times RE-gehalte PMR), bruto gemiddeld 3,12 kg RE $\text{dier}^{-1} \text{dag}^{-1}$ verstrekt.

Brok

De dagelijks verstrekte hoeveelheid brok aan de koeien van stal 60 varieerde van 2,2 tot 6,1 kg product koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 4,0 kg (Fig. 11). De hoeveelheid verstrekte brok nam in de hele meetperiode aanzienlijk af, maar was enkele keren tussendoor, bij koewisselingen, tijdelijk hoger.

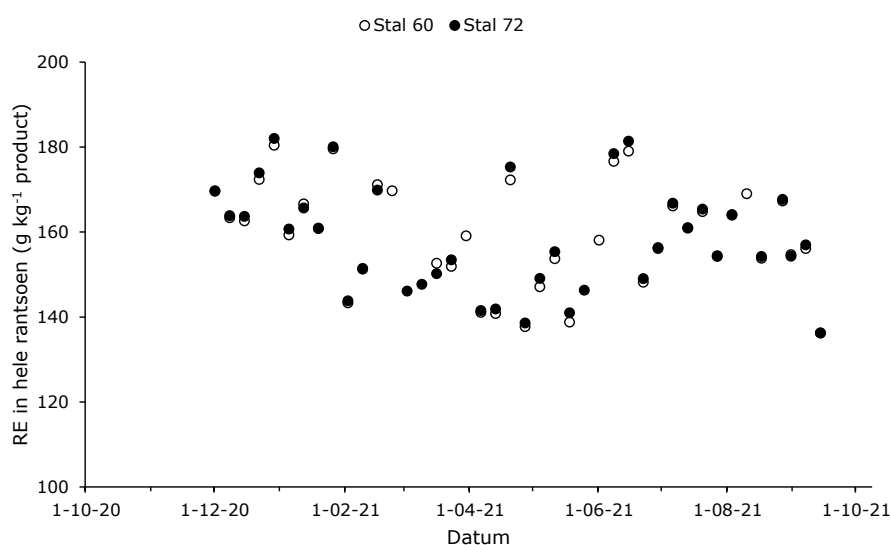


Figuur 11 Dagelijks verstrekte brok aan de koeien in stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie) in de hele meetperiode.

Het ruw eiwitgehalte (N-Kjeldahl * 6,25) van de verstrekte brok varieerde in de wekelijks genomen monsters van 101 tot 143 g kg⁻¹ DS, en was gemiddeld 121 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 0,44 kg RE dier⁻¹ dag⁻¹ verstrekt.

Hele rantsoen

Met het hele rantsoen (PMR en brok) werd, op basis van de wekelijkse meting op dinsdag, bruto 18,4 tot 26,8 kg DS dier⁻¹ dag⁻¹ gevoerd, gemiddeld 22,4 kg, en bruto 2,94 tot 4,44 kg RE dier⁻¹ dag⁻¹, gemiddeld 3,56 kg. Van de bruto eiwitgift werd 88% verstrekt met PMR en 12% 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 180 g RE kg⁻¹ DS, en was over de hele meetperiode gemiddeld 159 g RE kg⁻¹ DS (Fig. 12). Het gewogen eiwitgehalte van het netto hele rantsoen (na correctie voor de voerrest van het PMR) was over de hele meetperiode gemiddeld 158 g RE kg⁻¹ DS.

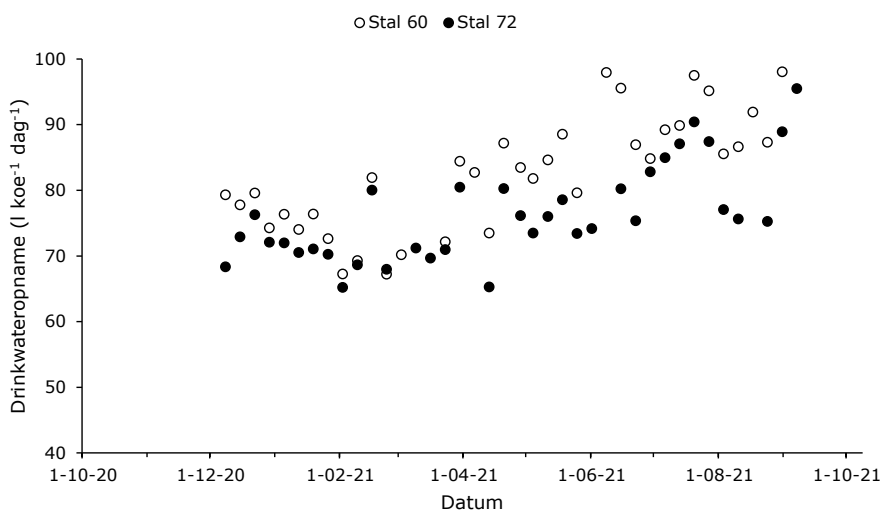


Figuur 12 Gehalte ruw eiwit in het hele rantsoen gevoerd aan de koeien in stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie) in de hele meetperiode.

In de periode zonder aanzuren was het gewogen eiwitgehalte van het hele rantsoen gemiddeld 165 g RE kg⁻¹ DS, en in de periode met aanzuren gemiddeld 157 g RE kg⁻¹ DS. Bij vergelijking van stal 60 met 72, waarbij perioden met missende emissiegegevens en met leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was het gemiddelde eiwitgehalte in de periode zonder aanzuren voor stal 60 en 72 respectievelijk 165 en 165 g RE kg⁻¹ DS, en in de periode met aanzuren respectievelijk 157 en 158 g RE kg⁻¹ DS.

3.4 Drinkwater en zaagsel

De wateropname uit de waterbak (inclusief morsen) in stal 60 varieerde in de hele meetperiode van 67 tot 101 l koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 83 l koe⁻¹ dag⁻¹ (Fig. 13). Bij vergelijking van stal 60 met 72, waarbij perioden met missende emissiegegevens en met leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was de gemiddelde wateropname respectievelijk 83 en 77 l koe⁻¹ dag⁻¹ voor stal 60 en 72, aanzienlijk hoger in stal 60 vergeleken met stal 72. De gemorste hoeveelheid water werd geschat op 7,2 l koe⁻¹ dag⁻¹ (zie paragraaf 3.8). Het zaagselverbruik in de hele meetperiode was dagelijks een half pak (ca. 8,6 kg product).

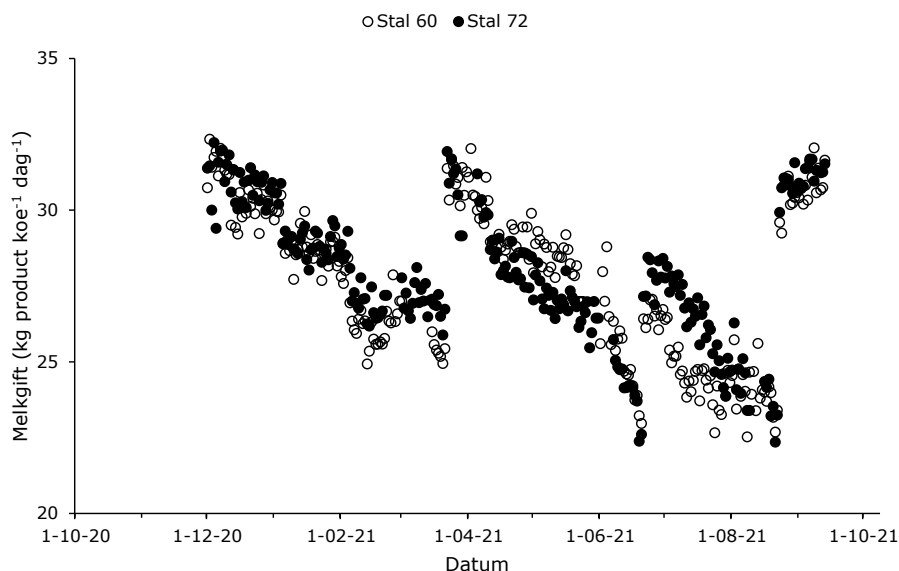


Figuur 13 Dagelijkse drinkwateropname (inclusief morsen) door de koeien in stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie) in de hele meetperiode.

3.5 Melkproductie en melksamenstelling

Melkgift

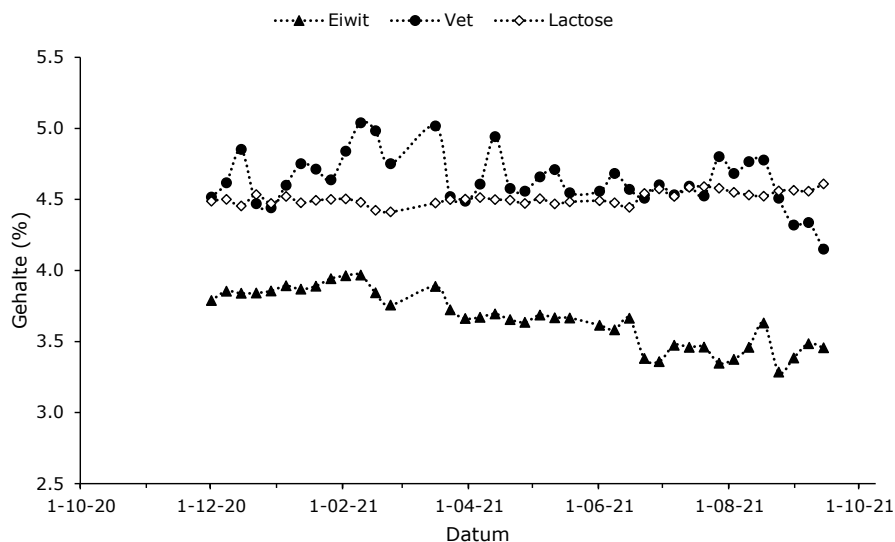
De melkgift van de koeien varieerde in de hele meetperiode van 22,5 tot 32,3 kg koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 27,7 kg (Fig. 14). De melkgift vertoonde een dalende trend in een groot deel van de meetperiode, met tussentijdse toenames als gevolg van de koewisselingen. In de periode zonder aanzuren was de melkgift gemiddeld 28,7 kg dier⁻¹ dag⁻¹, en in de periode met aanzuren was de melkgift gemiddeld 27,1 kg dier⁻¹ dag⁻¹. Bij vergelijking van stal 60 met 72, waarbij perioden met missende emissiegegevens en met leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was de gemiddelde melkgift in de periode zonder aanzuren voor stal 60 en 72 respectievelijk 28,9 en 29,3 kg dier⁻¹ dag⁻¹, en in de periode met aanzuren respectievelijk 26,8 en 27,2 kg dier⁻¹ dag⁻¹.



Figuur 14 Dagelijkse melkgift van de koeien in stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie) in de hele meetperiode.

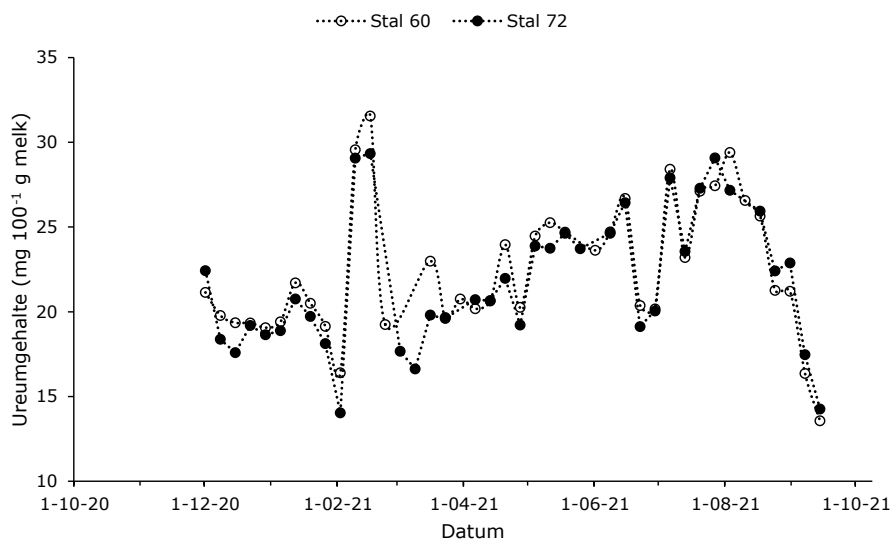
Melksamenstelling

Het gewogen eiwitgehalte van de melk, gemeten met NIR, varieerde van 3,28% tot 3,97%, en was gemiddeld 3,66% (Fig. 15). Het gewogen vetgehalte varieerde van 4,15% tot 5,04%, en was gemiddeld 4,63%. Het gewogen lactosegehalte varieerde van 4,41% tot 4,61%, en was gemiddeld 4,51%. Het gewogen ureumgetal varieerde van 13,6 tot 31,6 mg 100⁻¹ ml, en was gemiddeld 22,4 mg (Fig. 16).



Figuur 15 Eiwit-, vet-, en lactosegehalte in de melk van de koeien in stal 60 (tegelvloer) in de hele meetperiode, gewogen gemiddelden van de wekelijkse melkcontroles.

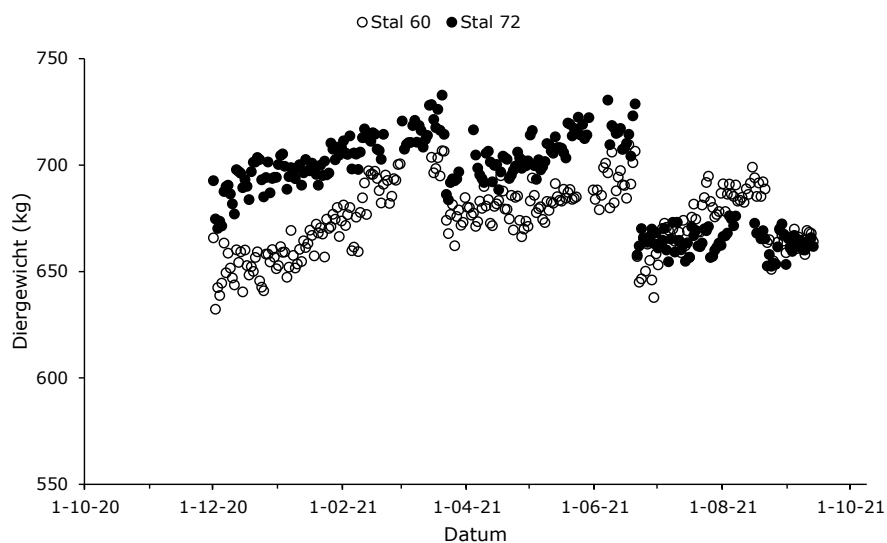
Bij vergelijking van stal 60 met 72, waarbij perioden met missende gegevens en met leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was in de periode zonder aanzuren het gewogen eiwitgehalte voor stal 60 en 72 respectievelijk 3,88% en 3,89%, het gewogen vetgehalte respectievelijk 4,71% en 4,65%, het gewogen lactosegehalte respectievelijk 4,49% en 4,51%, en het gewogen ureumgetal respectievelijk 21,4 en 20,5 mg 100⁻¹ ml. In de periode met aanzuren was het gewogen eiwitgehalte voor stal 60 en 72 respectievelijk 3,50% en 3,53%, het gewogen vetgehalte respectievelijk 4,57% en 4,61%, het gewogen lactosegehalte respectievelijk 4,54% en 4,58%, en het gewogen ureumgetal respectievelijk 23,1 en 23,1 mg 100⁻¹ ml.



Figuur 16 Ureumgehalte in de melk van de koeien in stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie) in de hele meetperiode, gewogen gemiddelden van de wekelijkse melkcontroles.

3.6 Koegewicht

Het dagelijks gemiddelde gewicht van de koeien varieerde in de hele meetperiode van 632 tot 710 kg, en was gemiddeld 674 kg (Fig. 17). Er werd een groep koeien vervangen op 22 maart (10 koeien), 21 juni (9 koeien), en 23 augustus (9 koeien).



Figuur 17 Dagelijks gemiddelde gewicht van de koeien in stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie) in de hele meetperiode.

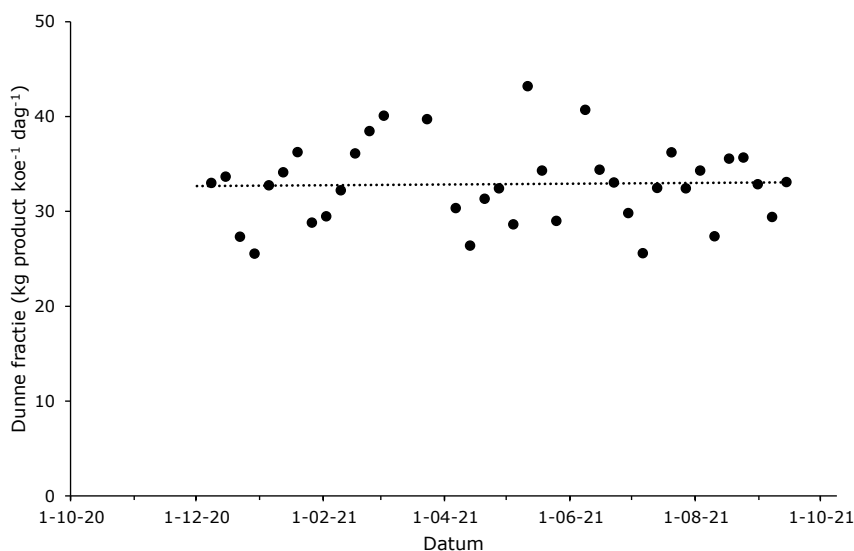
Het gewicht van de kudde in stal 60 nam vanaf 6 oktober 2020 t/m 21 maart 2021 (eerste vervanging) toe met 651 kg (+6%), nam vanaf 23 maart t/m 20 juni (tweede vervanging) toe met 619 kg (+6%), nam vanaf 22 juni t/m 22 augustus toe met 298 kg (+3%), en nam vanaf 24 augustus t/m 13 september (einde meetperiode) toe met 208 kg (+2%).

3.7 Hoeveelheid en samenstelling dunne fractie

Hoeveelheid opgevangen dunne fractie

Het peil van de dunne fractie in de kelder, gemiddeld over de 42 peilmetingen in de periode vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021, was 27,0 cm. Daarmee was de kelder gemiddeld voor 20% gevuld (= 27,0 / 134 cm), vergeleken met 55% voor referentiestal 72. De over de volledige meetperiode in de kelder opgevangen hoeveelheid dunne fractie, berekend op basis van de wekelijkse peilmetingen, gecorrigeerd voor leegstand, zonder het zuur en water dat was toegevoegd in de aanzuurperiode, varieerde van 25,5 tot 43,2 kg koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 32,9 kg (Fig. 18). Inclusief toegediend zuur en water varieerde deze hoeveelheid van 25,5 tot 44,1 kg, en was gemiddeld 33,5 kg. Over de hele meetperiode genomen was de hoeveelheid opgevangen dunne fractie stabiel, maar tijdens kortere perioden waren er trends in opgevangen hoeveelheid, bijvoorbeeld tussen 26 januari en 2 maart 2021 (toename), en tussen 8 juni en 6 juli 2021 (afname). De opgevangen hoeveelheid dunne fractie was inclusief water dat door de koeien werd gemorst 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 60.

Voorafgaande aan de start van het aanzuren, op 29 maart, werd er in totaal 14,2 ton dunne fractie uit de kelder gehaald, 12,8 ton met de giertank en 1,3 ton met een pomp. Op woensdag 31 maart, twee dagen na het aanzuren, werd er 28,5 ton dunne fractie uit de kelder gehaald, 21,9 ton met een vrachtwagen en 6,6 ton met een pomp. Op 31 mei en 29 juni werd er met de giertank van DC respectievelijk 31,7 en 18,3 ton uit de kelder verwijderd.



Figuur 18 Opgevangen dunne fractie in de kelder van stal 60 (tegelvloer) in de periode vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021, exclusief toegediend zuur en water in de aanzuurperiode.

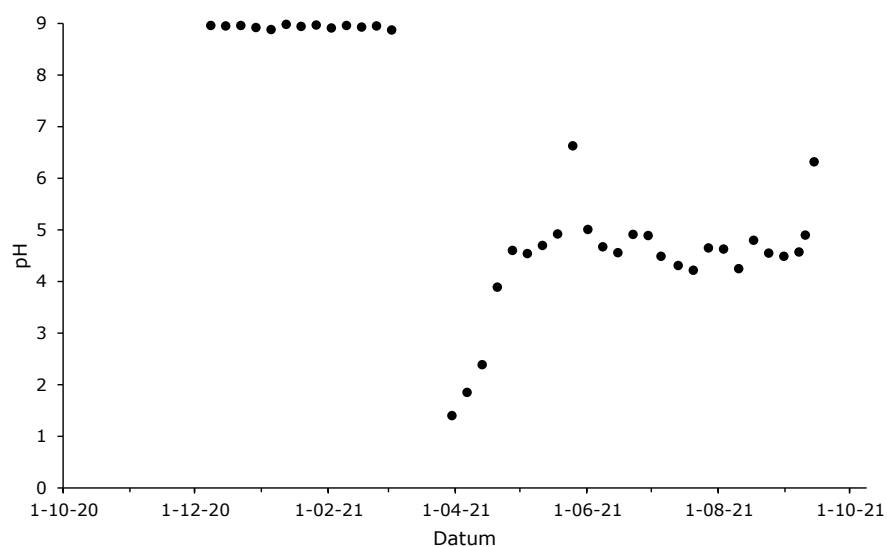
Samenstelling dunne fractie zonder aanzuren

In de periode zonder aanzuren had de opgevangen urine een hoge pH die fluctueerde binnen een nauwe marge (Fig. 19, Tabel 2). De buffer van anorganische C was gemiddeld 37% van de totale C. Naast basisch (hoge pH) was de dunne fractie ook relatief zout (hoge EC) en bevatte de DS veel as (gem. 61%) (As = DS - OS). Het gehalte N-totaal bestond voor gemiddeld 67% uit NH₄-N en voor de rest uit ureum-N en andere organische N. Het K-gehalte was het dubbele van het N-gehalte, en het P-gehalte was laag. In Tabel 2 zijn de gehalten op 1 december 2020 en 2 maart 2021 niet opgenomen. Op 1 december, bij de start van de meetperiode, was er erg weinig dunne fractie in de kelder aanwezig, waardoor deze niet bemonsterd kon worden. Daarnaast was dit materiaal niet representatief. Bij de bemonstering op 2 maart waren de mineralgehalten ongebruikelijk laag (Fig. 21, Fig. 23) en niet representatief. Deze bemonstering werd uitgevoerd toen de koeien ruim een dag uit de stal waren, en mogelijk waren de lagere gehalten het gevolg van ontmenging en bezinking.

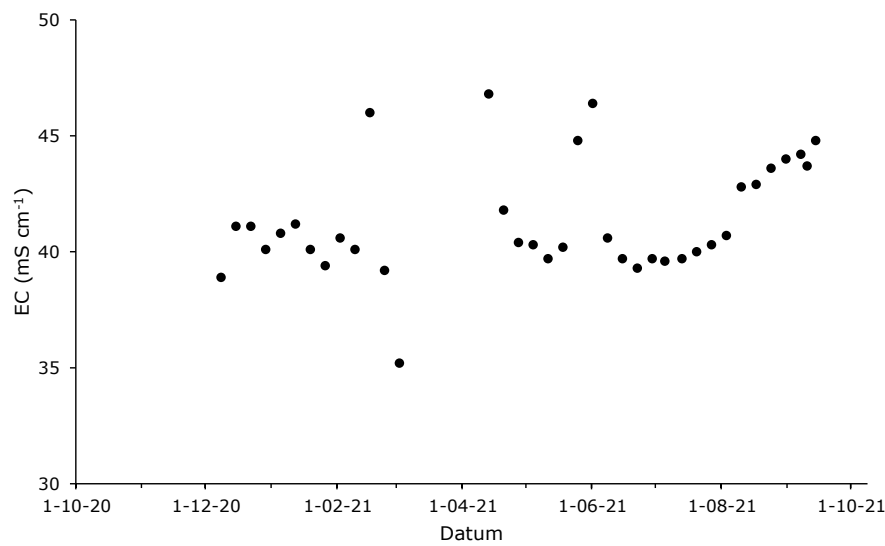
Tabel 2 Eigenschappen van de dunne fractie gefilterd door de tegelvloer in stal 60 in de periode zonder aanzuren, vanaf 8 december 2020 t/m 23 februari 2021.

Eigenschap	Eenheid	Parameter					
		Gemiddelde	SD ¹⁾	Mediaan	Min.	Max.	n=
Opgevangen hoeveelheid	kg koe ⁻¹ dag ⁻¹	32,3	3,9	32,9	25,5	38,5	12
pH	-	8,9	0,0	9,0	8,9	9,0	12
EC	mS cm ⁻¹	41	2	40	39	46	12
DS	g kg ⁻¹ vers	34	1	34	32	36	12
OS	% van DS	39	1	39	38	40	5
N-totaal	g kg ⁻¹ vers	4,3	0,2	4,3	4,1	4,8	12
P-totaal	mg kg ⁻¹ vers	105	13	108	81	120	12
K-totaal	g kg ⁻¹ vers	8,4	0,4	8,3	7,9	9,6	12
N-NH ₄	g kg ⁻¹ vers	2,9	0,2	2,9	2,5	3,4	12
N-NH ₄	% van N-totaal	67	4	68	59	73	12
C-totaal	g kg ⁻¹ vers	8,9	0,6	8,8	8,0	9,6	8
C-organisch	% van C-totaal	63	4	63	56	67	5

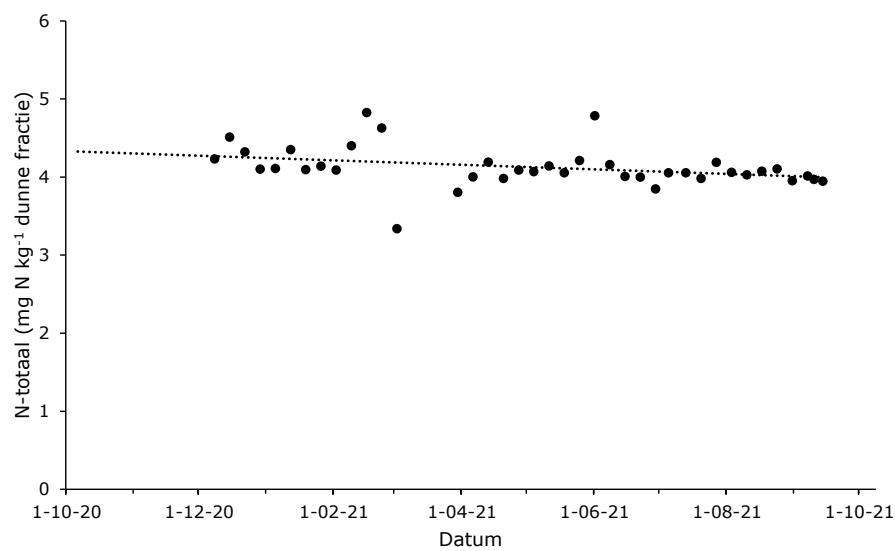
¹⁾ Standaardafwijking



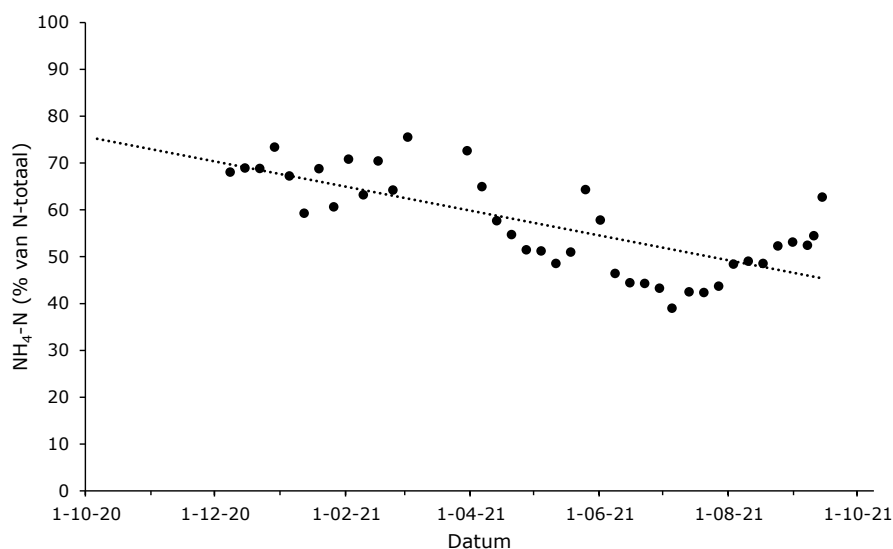
Figuur 19 Verandering van de pH van de dunne fractie in de kelder van stal 60 (tegelvloer) in de periode vanaf 8 december 2020 t/m 13 september 2021.



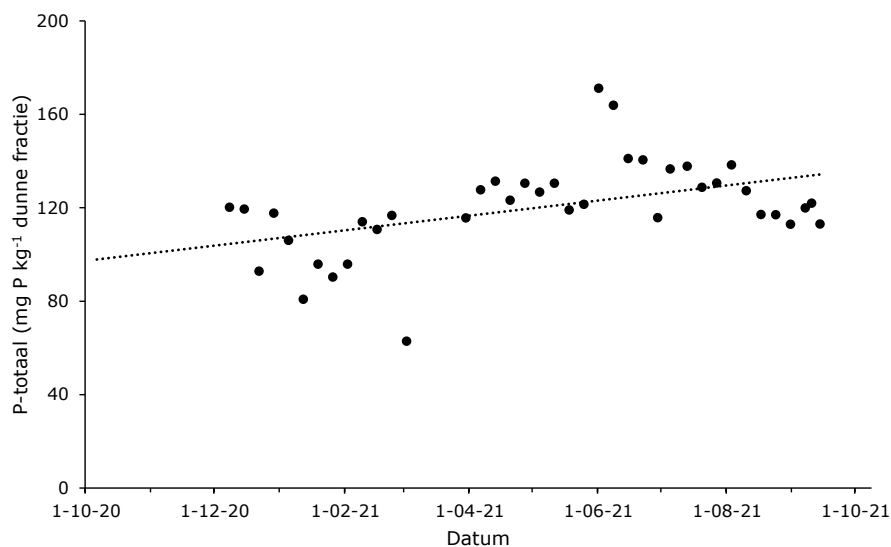
Figuur 20 Verandering van de EC van de dunne fractie in de kelder van stal 60 (tegelvloer) in de periode vanaf 8 december 2020 t/m 13 september 2021.



Figuur 21 Verandering van het gehalte N-totaal in de dunne fractie in de kelder van stal 60 (tegelvloer) in de periode vanaf 8 december 2020 t/m 13 september 2021.



Figuur 22 Verandering van het aandeel $\text{NH}_4\text{-N}$ in N-totaal in de dunne fractie in de kelder van stal 60 (tegelvloer) in de periode vanaf 8 december 2020 t/m 13 september 2021.



Figuur 23 Verandering van het gehalte P-totaal in de dunne fractie in de kelder van stal 60 (tegelvloer) in de periode vanaf 8 december 2020 t/m 13 september 2021.

Samenstelling dunne fractie met aanzuren

In de periode met aanzuren begon de pH op een erg laag niveau (Fig. 19) als gevolg van de toevoeging van teveel zuur in het begin. De pH was na drie weken in de gewenste range en werd daar gehandhaafd voor de rest van de periode (Tabel 3, Fig. 19). De aangezuurde dunne fractie bevatte vrijwel geen anorganische buffer meer; deze was gemiddeld 9% van de totale C. Evenals de niet-aangezuurde dunne fractie was ook de aangezuurde fractie relatief zout, en bij het begin van de aanzuurperiode extra hoog, waarschijnlijk als gevolg van de toevoeging van de overmaat aan zuur (Fig. 20). Het drogestofgehalte van de aangezuurde dunne fractie was hoger dan van de niet-aangezuurde fractie, maar het asgehalte iets lager. Het totale N-gehalte bestond voor gemiddeld 48% uit $\text{NH}_4\text{-N}$ en de rest uit ureum-N en andere organische N (Tabel 3). Het lagere aandeel $\text{NH}_4\text{-N}$ betekent waarschijnlijk dat als gevolg van aanzuren een groter deel van de N nog in ureumvorm aanwezig was. Evenals bij de niet-aangezuurde dunne fractie was het K-gehalte het dubbele van het N-gehalte, en was het P-gehalte laag.

Tabel 3 Eigenschappen van de dunne fractie gefilterd door de tegelvloer in stal 60 in de periode met aanzuren, vanaf 20 april t/m 7 september 2021.

Eigenschap	Eenheid	Parameter					
		Gemiddelde	SD ¹⁾	Mediaan	Min.	Max.	n=
Opgevangen hoeveelheid	kg koe ⁻¹ dag ⁻¹	33,2	4,2	32,9	25,6	43,2	19
pH	-	4,6	0,3	4,6	3,9	4,9	19
EC	mS cm ⁻¹	41	2	40	39	44	19
DS	g kg ⁻¹ vers	46	2	46	42	50	16
OS	% van DS	47	2	48	44	48	8
N-totaal	g kg ⁻¹ vers	4,0	0,1	4,1	3,8	4,2	19
P-totaal	mg kg ⁻¹ vers	129	12	129	113	164	19
K-totaal	g kg ⁻¹ vers	7,9	0,3	7,9	7,4	8,3	19
N-NH ₄	g kg ⁻¹ vers	1,9	0,2	2,0	1,6	2,2	19
N-NH ₄	% van N-totaal	48	4	49	39	55	19
C-totaal	g kg ⁻¹ vers	8,0	1,2	7,3	6,7	9,9	9
C-organisch	% van C-totaal	91	3	91	87	95	8

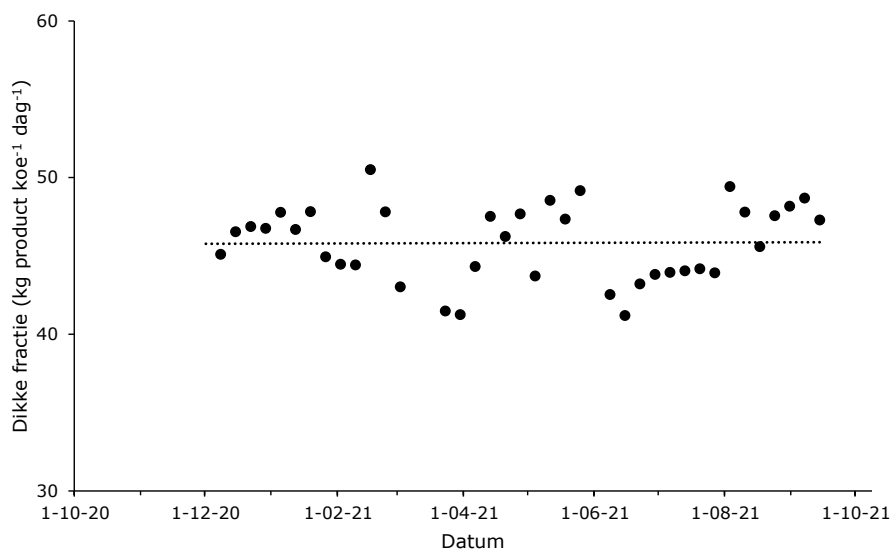
¹⁾ Standaardafwijking

In Tabel 3 zijn de resultaten van een aantal bemonsteringen niet meegenomen vanwege afwijkende waarden. De resultaten op 30 maart, 6 april en 13 april 2021 weken af, waarschijnlijk als gevolg van het sterk aanzuren op 29 maart. De resultaten van 25 mei en 1 juni weken ook af, waarschijnlijk als gevolg van het feit dat de koeien op 24 mei de stal waren uitgegaan en op 31 mei waren teruggekomen (zie ook de resultaten van 2 maart). De resultaten van 14 september weken af omdat na 7 september de dunne fractie niet meer werd aangezuurd, waardoor b.v. de pH op 14 september was opgelopen tot een waarde van 6,3.

3.8 Hoeveelheid en samenstelling dikke fractie

Hoeveelheid afgeschoven dikke fractie

De in de hele meetperiode afgeschoven hoeveelheid dikke fractie varieerde van 41,2 tot 50,5 kg koe⁻¹ dag⁻¹, en was gemiddeld 45,8 kg (Fig. 24). Over de hele meetperiode genomen was de hoeveelheid afgeschoven dikke fractie stabiel, maar tussentijds leek er sprake te zijn van tijdelijke trends met een toe- of afname.



Figuur 24 Afgeschoven dikke fractie vanaf de tegelvloer in stal 60 in de periode vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021.

Samenstelling dikke fractie in de hele meetperiode

De afgeschoven dikke fractie had in de hele meetperiode (1 december 2020 t/m 13 september 2021) gemiddeld een vrijwel neutrale pH, die evenals bij de dunne fractie binnen een nauwe marge fluctueerde (Tabel 4).

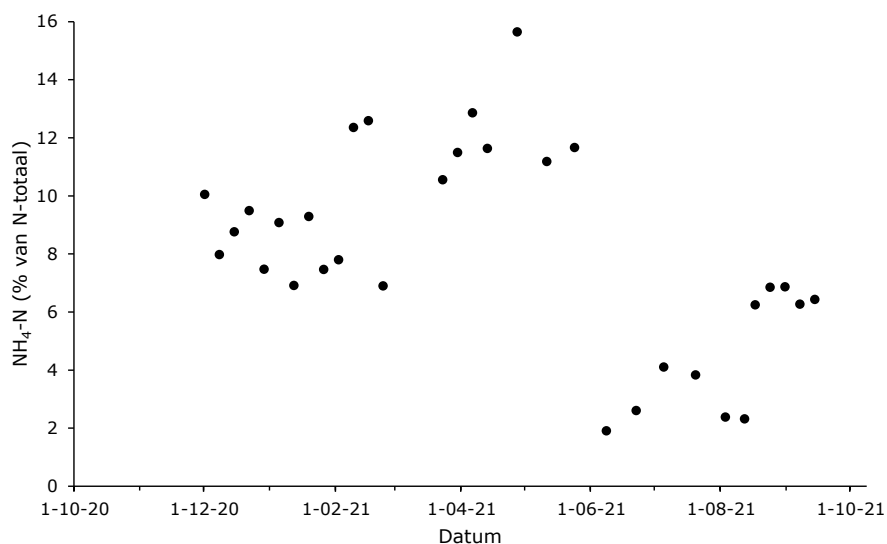
Tabel 4 Eigenschappen van dikke fractie afgeschoven van de tegelvloer in stal 60 in de periode van 1 december 2020 t/m 13 september 2021.

Eigenschap	Eenheid	Parameter					
		Gemiddelde	SD ¹⁾	Mediaan	Min.	Max.	n=
Afgeschoven dikke fractie	kg koe ⁻¹ dag ⁻¹	45,8	2,4	46,4	41,2	50,5	38
pH	-	6,9	0,3	6,9	6,4	7,5	34
EC	mS cm ⁻¹	6,5	1,4	6,8	2,7	8,6	34
DS	g kg ⁻¹ vers	137	7,9	136	126	154	38
OS	% van DS	86	2	86	84	88	17
N-totaal	g kg ⁻¹ vers	4,3	0,5	4,2	3,6	5,4	38
P-totaal	g kg ⁻¹ vers	0,9	0,1	0,9	0,7	1,2	38
K-totaal	g kg ⁻¹ vers	2,0	0,2	2,0	1,6	2,5	38
N-NH ₄	g kg ⁻¹ vers	0,4	0,2	0,4	0,1	0,7	31
N-NH ₄	% van N-totaal	8	3	8	2	16	31
C-totaal	g kg ⁻¹ vers	59	4	58	53	67	24
C-organisch	% van C-totaal	97	5	98	87	104	17

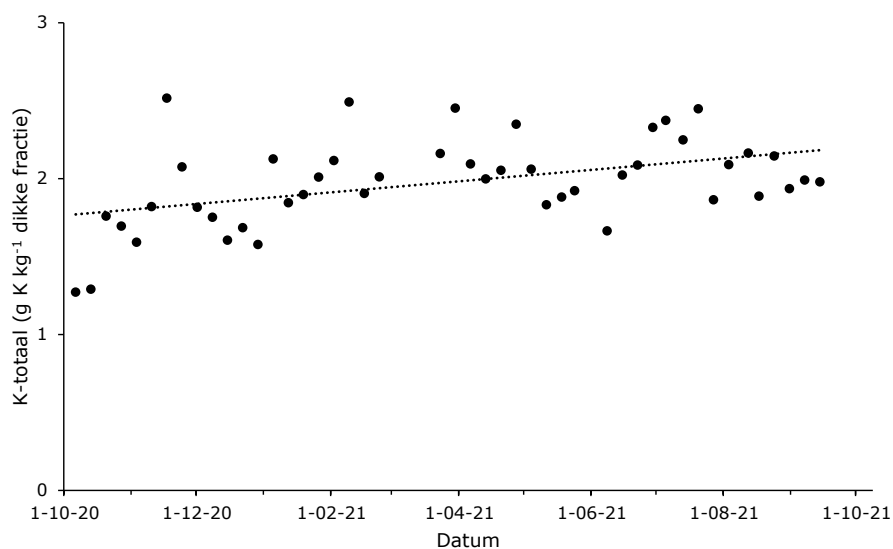
¹⁾ Standaardafwijking

Anders dan bij de dunne fractie was de EC van de dikke fractie laag. Het drogestofgehalte van de dikke fractie was aanzienlijk hoger dan dat van de dunne fractie, het aandeel as in de drogestof aanzienlijk lager, en de C bestond vrijwel geheel uit organische C. Het totale N-gehalte was vergelijkbaar met dat van de dunne fractie, maar het aandeel NH₄-N was veel lager, en het aandeel organische N (de rest) veel hoger. Het P-gehalte was aanzienlijk hoger dan bij de dunne fractie, en het K-gehalte aanzienlijk lager, ongeveer de helft van het N-gehalte. Volledigheidshalve wordt de samenstelling van de dikke fractie ook nog apart voor de periode zonder en met aanzuren gegeven (Tabel 5, Tabel 6). Uit vergelijking van de gegevens blijkt dat de gemiddelde samenstelling van de dikke fractie weinig verschilde tussen de twee perioden.

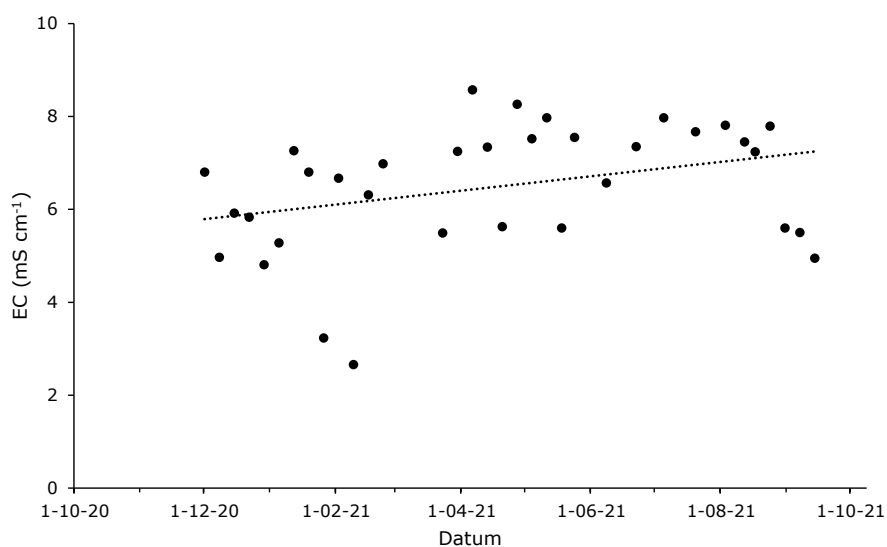
Het aandeel NH₄-N lag in de periode vanaf 1 juni t/m 13 september 2021 duidelijk lager dan in de periode daarvoor (Fig. 25). Hieruit zou afgeleid kunnen worden dat er in deze periode, waarin de aangepaste versie van de tegel werd gebruikt, meer urine werd doorgelaten naar de kelder en minder urine werd vermengd met de dikke fractie. In dat geval zouden ook het gehalte K-totaal en de EC van de dikke fractie in deze periode lager moeten zijn, maar dat was niet het geval (Fig. 26, Fig. 27). Verder was in deze periode de hoeveelheid opgevangen dunne fractie in de kelder (gem. 32,9 kg koe⁻¹ dag⁻¹) niet verschillend van de periode daarvoor (gem. 32,9 kg koe⁻¹ dag⁻¹).



Figuur 25 Verandering van het aandeel NH₄-N in N-totaal van de afgeschoven dikke fractie in stal 60 (tegelvloer) in de periode vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021.



Figuur 26 Verandering van het gehalte K-totaal in de afgeschoven dikke fractie in stal 60 (tegelvloer) in de periode vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021.



Figuur 27 Verandering van de EC van de afgeschoven dikke fractie in stal 60 (tegelvloer) in de periode vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021.

Tabel 5 Eigenschappen van dikke fractie afgeschoven van de tegelvloer in stal 60 in de periode vanaf 1 december 2020 t/m 23 februari 2021.

Eigenschap	Eenheid	Parameter					
		Gemiddelde	SD ¹⁾	Mediaan	Min.	Max.	n=
Afgeschoven dikke fractie	kg koe ⁻¹ dag ⁻¹	46,7	1,8	46,7	44,4	50,5	12,0
pH	-	6,7	0,2	6,6	6,4	7,3	13
EC	mS cm ⁻¹	5,7	1,4	5,9	2,7	7,3	13
DS	g kg ⁻¹ vers	139	8,6	140	126	154	13
OS	% van DS	87	1	87	86	88	6
N-totaal	g kg ⁻¹ vers	4,7	0,4	4,6	4,0	5,4	13
P-totaal	g kg ⁻¹ vers	0,9	0,1	0,9	0,8	1,1	13
K-totaal	g kg ⁻¹ vers	1,9	0,2	1,9	1,6	2,5	13
N-NH ₄	g kg ⁻¹ vers	0,4	0,1	0,4	0,3	0,7	13
N-NH ₄	% van N-totaal	9	2	9	7	13	13
C-totaal	g kg ⁻¹ vers	61	4	59	54	67	9
C-organisch	% van C-totaal	99	2	99	98	102	6

¹⁾ Standaardafwijking

Tabel 6 Eigenschappen van dikke fractie afgeschoven van de tegelvloer in stal 60 in de periode vanaf 30 maart t/m 13 september 2021.

Eigenschap	Eenheid	Parameter					
		Gemiddelde	SD ¹⁾	Mediaan	Min.	Max.	n=
Afgeschoven dikke fractie	kg koe ⁻¹ dag ⁻¹	45,7	2,5	45,9	41,2	49,4	24
pH	-	7,0	0,3	7,0	6,6	7,5	20
EC	mS cm ⁻¹	7,1	1,1	7,4	5,0	8,6	20
DS	g kg ⁻¹ vers	135	7	134	127	153	24
OS	% van DS	85	1	85	84	88	11
N-totaal	g kg ⁻¹ vers	4,1	0,4	4,0	3,6	5,2	24
P-totaal	g kg ⁻¹ vers	1,0	0,1	1,0	0,7	1,2	24
K-totaal	g kg ⁻¹ vers	2,1	0,2	2,1	1,7	2,5	24
N-NH ₄	g kg ⁻¹ vers	0,3	0,2	0,3	0,1	0,7	17
N-NH ₄	% van N-totaal	7	4	6	2	16	17
C-totaal	g kg ⁻¹ vers	58	4	56	53	66	15
C-organisch	% van C-totaal	95	5	94	87	104	11

¹⁾ Standaardafwijking

Productie van 'drijfmest' in stal 60

De productie van 'drijfmest' in stal 60, ofwel dunne en dikke fractie bij elkaar opgeteld, was gemiddeld 78,8 kg koe⁻¹ dag⁻¹ over de periode vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021. Om een vergelijking te kunnen maken met referentiestal 72 werd de drijfmestproductie ook berekend over de periode vanaf 16 maart t/m 31 augustus 2021, een periode waarin de drijfmestproductie in stal 72 betrouwbaar berekend kon worden (zie De Boer, 2023b). In deze periode was de drijfmestproductie in stal 60 (78,5 kg koe⁻¹ dag⁻¹) 2% lager vergeleken met referentiestal 72 (80,2 kg).

Productie van 'drijfmest' (urine + feces) 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 uitscheidde 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 82,4 kg koe⁻¹ dag⁻¹ in de periode van 1 december 2020 t/m 13 september 2021. NB: bij correctie voor 1,5 uur buiten de stal zou de drijfmestproductie strikt genomen niet met 6% maar met $(24 / 22,5) = 6,7\%$ verhoogd moeten worden. Omdat bij de berekeningen voor stal 72 destijds 6% is gebruikt (De Boer, 2023b), is ter wille van de vergelijkbaarheid voor stal 70 (De Boer, 2023c) en stal 60 ook deze 6% aangehouden.

Samenstelling 'drijfmest' (urine + feces) buiten de stal

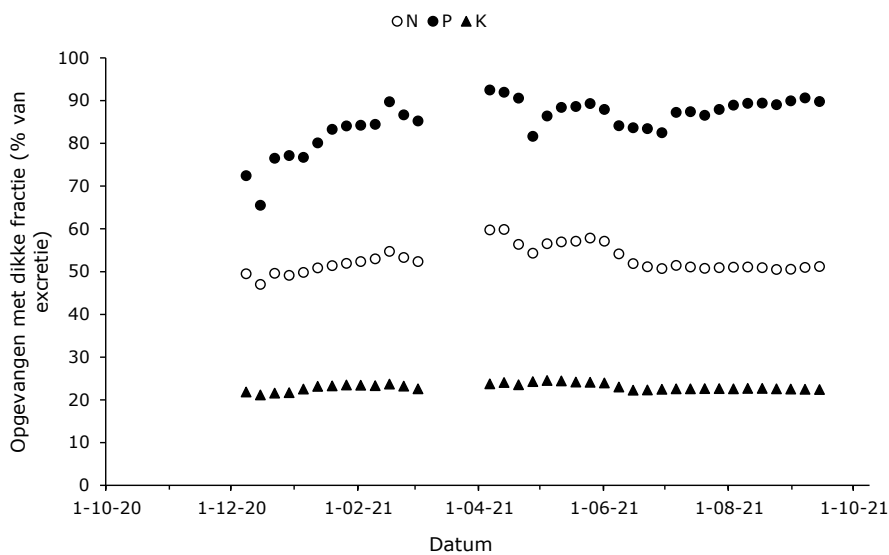
Bij rundvee wordt met urine ca. 50% van de N en 0% van de P uitgescheiden, en met feces ca. 50% van de N en 100% van de P (De Boer, 2023a). Bij aanname dat op de helft van de tijd buiten de stal de frequentie van excretie van voor het melken van toepassing was, en op de andere helft van de tijd de frequentie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

Hoeveelheid uitgescheiden urine en feces in de stal

In de periode van 1 december 2020 t/m 13 september 2021 (287 dagen) werd in stal 60 gemiddeld 32,9 kg dunne fractie $\text{coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$ in de kelder opgevangen, met een gemiddelde EC van $41,3 \text{ mS cm}^{-1}$. Daarnaast werd gemiddeld 45,8 kg dikke fractie $\text{coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$ afgeschoven, met een gemiddelde EC van $6,5 \text{ mS cm}^{-1}$. De EC van de in stal 70 met het CowToilet opgevangen (zuivere) urine was in de periode vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021 gemiddeld $51,2 \text{ mS cm}^{-1}$ (De Boer, 2023c), en er werd in deze periode 2727 kg zwavelzuur 37% gebruikt met een EC van 67 mS cm^{-1} (Darling, 1964) De gemiddelde hoeveelheid in de kelder opgevangen urine werd daarmee berekend op $((32,9 * 41,3 * 287 * 16) - (2727 * 67)) / (287 * 16) / 51,2 = 25,7 \text{ kg coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$, en de hoeveelheid gemorst water op $(32,9 - 25,7) = 7,2 \text{ kg coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$. De hoeveelheid urine in de dikke fractie werd berekend op $3,3 \text{ kg coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$ en de hoeveelheid verse feces in de dikke fractie daarmee op $(45,8 - 3,3) = 42,6 \text{ kg coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$. De totale hoeveelheid uitgescheiden urine was $25,7 + 3,3 = 29,0 \text{ kg coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$, omgerekend 28,3 liter $\text{coe}^{-1} \text{dag}^{-1}$.

3.9 Scheiding van mineralen in dunne en dikke fractie

Met de dikke fractie werd in de periode zonder aanzuren respectievelijk 52%, 85%, en 23% van de oorspronkelijk uitgescheiden N, P, en K opgevangen, en in de periode met aanzuren respectievelijk 51%, 90%, en 22% (Fig. 28). Bij beide perioden gecombineerd werd respectievelijk 52%, 88%, en 22% van de oorspronkelijk uitgescheiden N, P, en K met de dikke fractie opgevangen. Met de dunne fractie werd daarmee van de uitgescheiden P en K respectievelijk 12% en 78% opgevangen. De met de dunne fractie opgevangen N was lager dan 48% van de uitgescheiden N, aangezien er in de tijd tussen uitscheiding en opvang in de kelder al een deel van de uitgescheiden N door vervluchtiging verloren ging.



Figuur 28 Cumulatieve opgevangen hoeveelheid mineralen in de dikke fractie afgeschoven van de filterende tegelvloer in de periode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 maart 2021) en de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021), uitgedrukt als percentage van de cumulatieve uitscheiding.

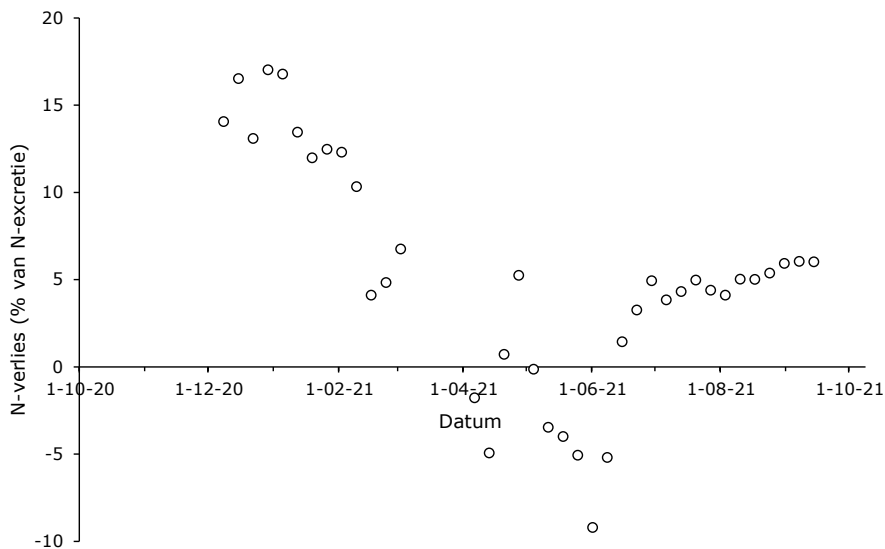
3.10 Zuurverbruik dunne fractie

Het zuurverbruik bij het aanzuren met de jerrycans, met als doel om de pH-waarde tussen 4 en 5 te houden, was in de periode vanaf 29 april t/m 6 september 2021 in totaal 2727 kg H_2SO_4 (37%), omgerekend 1064 kg H_2SO_4 (96%). Een meer precieze berekening werd gemaakt voor de periode vanaf 9 augustus t/m 6 september 2021, in totaal 28 dagen. Na het aanzuren op 9 augustus was de pH 4,11, en na het aanzuren op 6 september was de pH 4,12. In deze periode werd 621 kg H_2SO_4 (37%) gebruikt, omgerekend 242 kg of 132 l H_2SO_4 (96%), 0,29 l per koe per dag, en 8,8 l per ton opgevangen dunne fractie.

3.11 Mineralenbalansen

Stikstofbalans zonder correctie voor de meetfout

Bij de N-balans varieerde het cumulatieve verlies, als percentage van de N-excretie en zonder correctie voor de meetfout, in de periode zonder aanzuren van 17% op 29 december 2020 tot 4% op 16 februari 2021, en in de periode met aanzuren van -9% op 1 juni 2021 tot 6% op 7 september 2021 (Fig. 29).



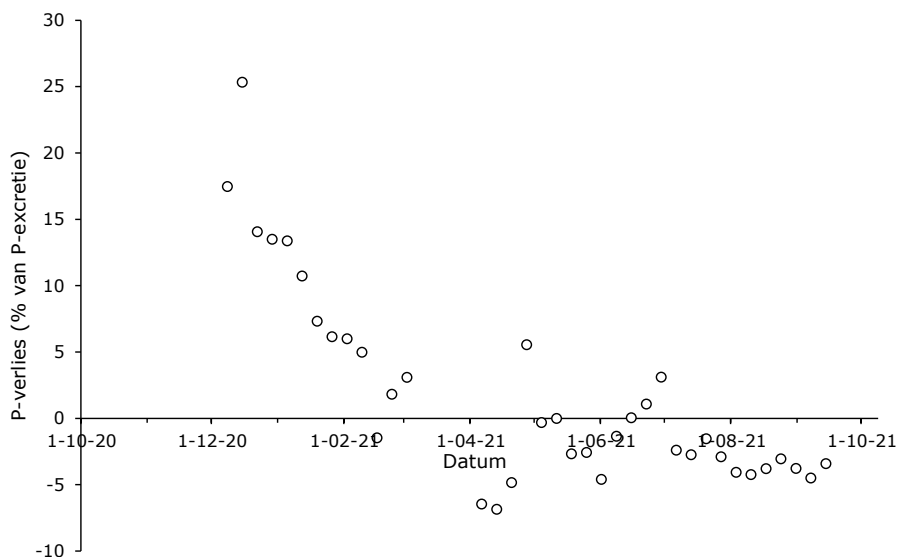
Figuur 29 Verandering van het cumulatieve N-verlies uit stal 60 in de periode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 maart 2021) en de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021), berekend uit de N-balans zonder correctie voor de meetfout.

In de balansperiode zonder aanzuren stabiliseerde het ongecorrigeerde N-verlies rond 12% in de periode vanaf 12 januari t/m 1 februari 2021. Na deze periode daalde het N-verlies en aan het einde van deze balansperiode was het N-verlies 7%. De afname van het N-verlies richting het einde van de balansperiode zonder aanzuren is niet realistisch, in die zin dat het onwaarschijnlijk is dat er sprake was van een plotselinge sterke afname van de cumulatieve N-emissie. De daling wordt toegeschreven aan een verandering in de menging van de dunne fractie in de kelder (zie paragraaf 4.1), als gevolg waarvan het N-gehalte in de genomen monsters richting het einde van de balansperiode hoger was.

In de balansperiode met aanzuren was het ongecorrigeerde N-verlies in het begin regelmatig negatief (als gevolg van de meetfout), nam daarna toe en werd positief, en stabiliseerde aan het einde van deze balansperiode rond 6% van de N-excretie.

Fosforbalans zonder correctie voor de meetfout

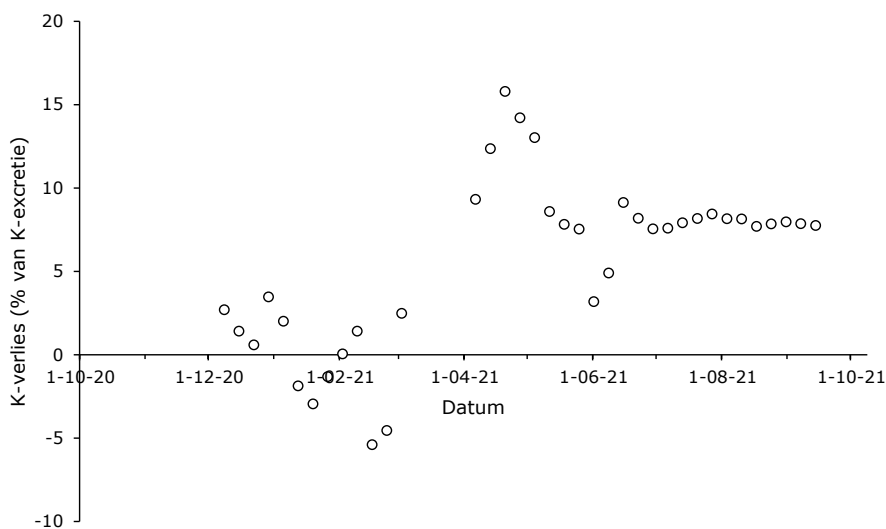
Bij de P-balans varieerde het 'verlies' (meetfout), als percentage van de P-excretie, in de periode zonder aanzuren van 25% op 15 december 2020 tot -1% op 16 februari 2021, en in de periode met aanzuren van -7% op 13 april 2021 tot 6% op 27 april 2021 (Fig. 30). Aan het einde van de balansperiode met aanzuren, vanaf 27 juli t/m 13 september 2021, stabiliseerde het P-verlies op een waarde van -3 tot -4%, ofwel was er een P-overschot van 3 tot 4%.



Figuur 30 Verandering van het cumulatieve P-*'verlies'* (meetfout) uit stal 60 in de periode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 maart 2021) en de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021).

Kaliumbalans zonder correctie voor de meetfout

Bij de K-balans varieerde het *'verlies'* (meetfout), als percentage van de K-excretie, in de periode zonder aanzuren van 3% op 29 december 2020 tot -5% op 16 februari 2021, en in de periode met aanzuren van 16% op 20 april 2021 tot 3% op 1 juni 2021 (Fig. 31). In de tweede helft van de balansperiode met aanzuren, vanaf 22 juni t/m 13 september 2021, stabiliseerde het K-verlies op een waarde van 8%, ofwel was er een K-tekort van 8%.

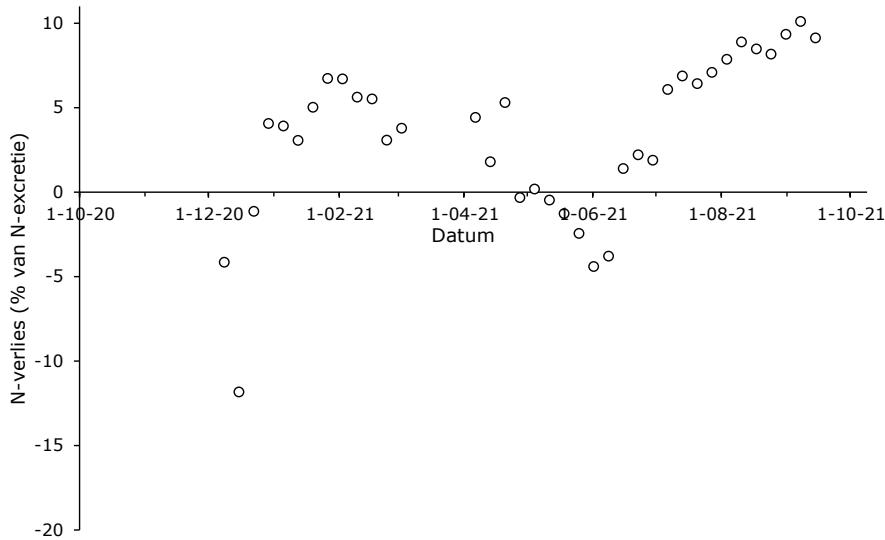


Figuur 31 Verandering van het cumulatieve K-*'verlies'* uit stal 60 in de periode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 maart 2021) en de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021).

Stikstofbalans gecorrigeerd voor de meetfout

Na correctie van de N-balans, op basis van de meetfout op de P-balans, varieerde het cumulatieve N-verlies, als percentage van de N-excretie, in de periode zonder aanzuren van -12% op 15 december 2020 tot 7% op 26 januari 2021, en in de periode met aanzuren van -4% op 1 juni 2021 tot 10% op 7 september 2021 (Fig. 32). Aan het einde van de balansperiode zonder aanzuren stabiliseerde het gecorrigeerde N-verlies op een

waarde van 7% (op 26 januari en 2 februari), en aan het einde van de balansperiode met aanzuren op een waarde van 9%.



Figuur 32 Verandering van het cumulatieve N-verlies uit stal 60 (tegelvloer) in de periode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 maart 2021) en de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021), berekend uit de N-balans en na correctie voor de meetfout op de bijbehorende P-balans.

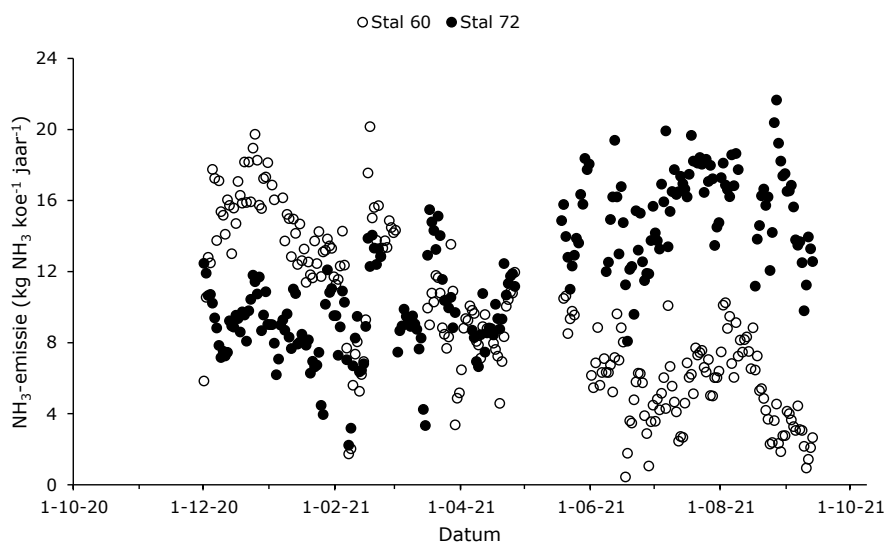
Bijdrage van de aan- en afvoerposten aan de gecorrigeerde mineralenbalansen

Bij de N-balans werd, na correctie voor de meetfout op de P-balans, over de hele meetperiode 86,7% van de N aangevoerd met het PMR, 12,8% met brok, 0,5% met drinkwater, en 0,1% met zaagsel.

Van de aangevoerde N werd 66,0% vastgelegd in dunne en dikke fractie, 27,6% in melk, 1,4% in dieren, en ging 5,0% verloren. Bij P werd, na correctie voor de meetfout op deze balans, 80,5% aangevoerd met PMR, 19,4% met brok, 0,08% met zaagsel, en 0,05% met drinkwater. Van de aangevoerde P werd 63,6% vastgelegd in dunne en dikke fractie, 33,3% in melk, en 3,1% in dieren. Bij K werd, na correctie voor de meetfout op deze balans, 93,2% aangevoerd met PMR, 6,8% met brok, 0,06% met zaagsel, en 0,01% met drinkwater. Van de aangevoerde K werd 90,4% vastgelegd in dunne en dikke fractie, 9,5% in melk, en 0,1% in dieren.

3.12 Samenstelling van het stikstofverlies

De dagelijkse hoeveelheid NH_3 -emissie in stal 60, uitgedrukt op jaarbasis, varieerde in de hele meetperiode (vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021) van 0,4 tot 20,2 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$, en was gemiddeld 9,1 kg (Fig. 33). 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) (9,0 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$). In de periode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 maart 2021) varieerde de dagelijkse hoeveelheid NH_3 -emissie van 1,7 tot 20,2 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$, en was gemiddeld 13,6 kg. In de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021) varieerde de dagelijkse hoeveelheid NH_3 -emissie van 0,4 tot 13,5 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$, en was gemiddeld 6,2 kg. Bij vergelijking van de gemiddelde NH_3 -emissie van stal 60 met stal 72, waarbij weken met missende gegevens en weken leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was in de periode zonder aanzuren de gemiddelde emissie van stal 60 (13,6 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$) 49% hoger vergeleken met stal 72 (9,1 kg), en was in de periode met aanzuren de gemiddelde emissie (6,0 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$) 58% lager vergeleken met stal 72 (14,3 kg). Bij hetzelfde type vergelijking tussen stal 60 en stal 72, waarbij alleen de metingen van de periode met de aangepaste versie van de tegel werden gebruikt (1 juni t/m 13 september 2021), was in deze periode met aanzuren de gemiddelde emissie (5,1 $\text{kg NH}_3 \text{ koe}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$) 67% lager vergeleken met stal 72 (15,5 kg).

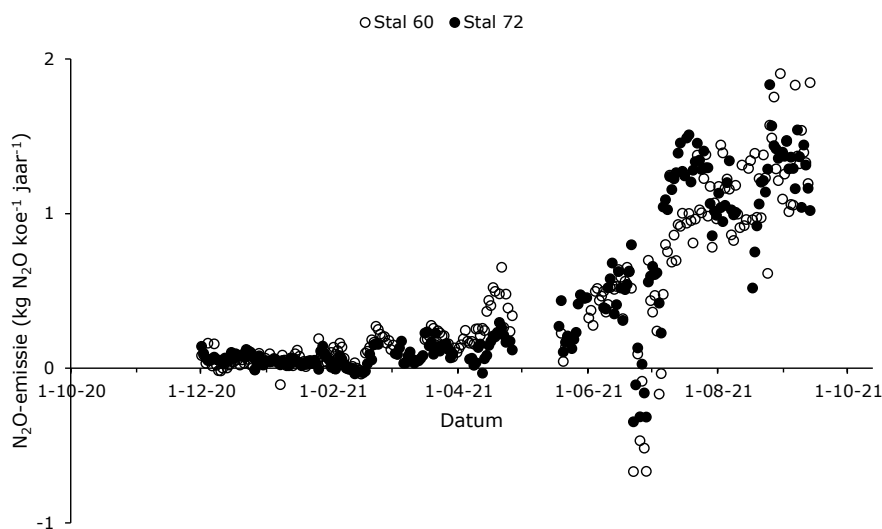


Figuur 33 *Dagelijks gemeten NH₃-emissie in stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie), uitgedrukt op jaarbasis, in de periode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 maart 2021) en de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021).*

De dagelijkse hoeveelheid N₂O-emissie in stal 60, uitgedrukt op jaarbasis, varieerde in de hele meetperiode (vanaf 1 december 2020 t/m 13 september 2021) van -0,67 tot 1,91 kg N₂O koe⁻¹ jaar⁻¹, en was gemiddeld 0,45 kg (Fig. 34). In de periode zonder aanzuren varieerde de dagelijkse hoeveelheid N₂O-emissie van -0,11 tot 0,27 kg N₂O koe⁻¹ jaar⁻¹, en was gemiddeld 0,07 kg. In de periode met aanzuren varieerde de dagelijkse hoeveelheid N₂O-emissie van -0,67 tot 1,91 kg N₂O koe⁻¹ jaar⁻¹, en was gemiddeld 0,72 kg.

NB: meetwaarden kunnen soms negatief zijn als de N₂O-concentratie buiten de stal (achtergrondconcentratie) hoger is dan in de stal. Na verwijdering van alle negatieve meetwaarden was de N₂O-emissie respectievelijk gemiddeld 0,08 en 0,78 kg voor de periode zonder en met aanzuren.

Bij vergelijking van de gemiddelde N₂O-emissie van stal 60 met stal 72, waarbij weken met missende gegevens en weken leegstand in beide stallen voor beide stallen werden verwijderd, was in de periode zonder aanzuren de gemiddelde emissie van stal 60 (0,06 kg N₂O koe⁻¹ jaar⁻¹) 19% hoger vergeleken met stal 72 (0,05 kg), en was in de periode met aanzuren de gemiddelde emissie (0,74 kg N₂O koe⁻¹ jaar⁻¹) 4% lager vergeleken met stal 72 (0,77 kg). Bij hetzelfde type vergelijking tussen stal 60 en stal 72, waarbij alleen de metingen van de periode met de aangepaste versie van de tegel werden gebruikt (1 juni t/m 13 september 2021), was in deze periode met aanzuren de gemiddelde emissie (0,87 kg N₂O koe⁻¹ jaar⁻¹) 9% lager vergeleken met stal 72 (0,96 kg).



Figuur 34 Dagelijks gemeten N_2O -emissie in stal 60 (tegelvloer) en stal 72 (referentie), uitgedrukt op jaarbasis, in de periode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 maart 2021) en de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021).

N-emissie per N-vorm - periode zonder aanzuren

Voor deze berekening, en de rest van de rapportage, werd voor de periode zonder aanzuren de periode t/m 1 februari 2021 gebruikt, omdat in de resterende maand het berekende totale N-verlies van de balans instabiel bleek te zijn. In deze periode zonder aanzuren (1 december 2020 t/m 1 februari 2021) waren de hoeveelheden N-emissie per N-vorm, voor de balansperiode van 63 dagen, voor N-totaal, NH_3 , N_2O , en $N_2 + NO_x$ respectievelijk gemiddeld 9,9, 12,0, 0,03, en -2,1 kg N kg koe⁻¹ jaar⁻¹, en de relatieve N-emissies respectievelijk 6,7%, 8,1%, 0,02%, en -1,4% van de N-excretie (148 kg koe⁻¹ jaar⁻¹). De negatieve waarden voor $N_2 + NO_x$ suggereren dat het N-verlies in de periode zonder aanzuren vrijwel volledig uit NH_3 -emissie bestond en er vrijwel geen N_2 -emissie optrad. Een vergelijking van de N-emissie per N-vorm tussen stal 60 en stal 72 werd alleen gemaakt voor NH_3 en N_2O , maar niet voor $N_2 + NO_x$, gezien de negatieve waarden bij stal 60 en omdat vanwege de korte balansperiode ook het totale N-verlies voor stal 72 waarschijnlijk minder representatief was. Bij de vergelijking waren voor stal 60 de relatieve N-emissies voor NH_3 en N_2O respectievelijk 8,1% en 0,02% van de N-excretie (148 kg koe⁻¹ jaar⁻¹), en voor stal 72 respectievelijk 4,7% en 0,02% van de N-excretie (159 kg koe⁻¹ jaar⁻¹). Vergeleken met stal 72 waren de relatieve emissies van stal 60 daarmee respectievelijk 73% hoger en 4% lager. Omdat in de periode van 1 december 2020 t/m 1 februari 2021 er geen missende gegevens waren en de koeien niet voor langere tijd de stal verlieten, waren op dat punt geen correcties nodig.

Na correctie voor het 11% hogere ventilatiedebiet van stal 60 vergeleken met stal 72, waarbij de emissies van NH_3 en N_2O voor stal 72 met 11% werden verhoogd, waren voor stal 72 de relatieve N-emissies voor NH_3 en N_2O respectievelijk 5,2% en 0,03% van de N-excretie. Vergeleken met stal 72 waren de relatieve N-emissies van stal 60 daarmee respectievelijk 56% hoger en 13% lager.

Bij correctie voor het verschil in gemiddelde temperatuur en gemiddeld ureumgetal tussen stal 60 en 72 werd de hoeveelheid NH_3 -emissie voor stal 72 met 2% verhoogd, van 8,2 tot 8,4 kg N dier⁻¹ jaar⁻¹ en bleef de hoeveelheid N_2O -emissie ongewijzigd op 0,04 kg N dier⁻¹ jaar⁻¹. De relatieve N-emissies van stal 60 waren daarmee uiteindelijk respectievelijk 53% hoger en 13% lager vergeleken met stal 72.

N-emissie per N-vorm - periode met aanzuren

Voor de periode met aanzuren (30 maart t/m 13 september 2021) waren de hoeveelheden N-emissie per N-vorm, voor de balansperiode van 140 dagen en na correctie van het N-balansverlies op basis van (verfijnd) geschat N-verlies, voor N-totaal, NH_3 , N_2O , en $N_2 + NO_x$ respectievelijk gemiddeld 11,1, 5,1, 0,5, en 5,5 kg N kg koe⁻¹ jaar⁻¹, de relatieve N-emissies respectievelijk 8,3%, 3,8%, 0,3%, en 4,1% van de N-excretie (134 kg koe⁻¹ jaar⁻¹), en de aandelen van de N-vormen in de totale N-emissie voor NH_3 , N_2O , en $N_2 + NO_x$ respectievelijk 46%, 4%, en 50%. Bij toepassing van deze aandelen op het N-balansverlies over de balansperiode van 161 dagen, waarbij het N-balansverlies alleen werd gecorrigeerd voor de week leegstand

(op basis van verijnd geschat N-verlies), waren de relatieve N-emissies voor N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ + NO_x respectievelijk 8,5%, 3,9%, 0,4%, en 4,2% van de N-excretie (131 kg koe⁻¹ jaar⁻¹).

Bij vergelijking van de N-emissie per N-vorm tussen stal 60 en stal 72, waarbij de emissiegegevens en de N-balansverliezen van beide stallen werden gecorrigeerd voor de weken met missende emissiegegevens en de weken leegstand in beide stallen, op basis van (verijnd) geschat N-balansverlies, met een resterende balansperiode voor beide stallen van 119 dagen, waren voor stal 60 de relatieve N-emissies voor N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ + NO_x respectievelijk 8,3%, 3,7%, 0,4%, en 4,2% van de N-excretie (133 kg koe⁻¹ jaar⁻¹), en voor stal 72 respectievelijk 16,5%, 8,7%, 0,4%, en 7,5% van de N-excretie (136 kg koe⁻¹ jaar⁻¹). Vergeleken met stal 72 waren de relatieve emissies van stal 60 daarmee in de periode met aanzuren respectievelijk 50%, 57%, 1%, en 44% lager.

Na correctie voor het 16% hogere ventilatiedebiet van stal 60 vergeleken met stal 72, waarbij de emissies van NH₃ en N₂O voor stal 72 met 16% werden verhoogd, en de totale N-emissie vervolgens opnieuw werd berekend, waren voor stal 72 de relatieve N-emissies respectievelijk 18,0%, 10,0%, 0,4%, en 7,5% van de N-excretie (136 kg koe⁻¹ jaar⁻¹). De relatieve N-emissies van stal 60 waren daarmee respectievelijk 54%, 63%, 15%, en 44% lager vergeleken met stal 72.

Bij de correctie voor het verschil in gemiddelde temperatuur en gemiddeld ureumgetal tussen stal 60 en stal 72 werd de hoeveelheid NH₃-emissie voor stal 72 met 2% verlaagd, van 13,6 tot 13,3 kg N dier⁻¹ jaar⁻¹, werd de hoeveelheid N₂O-emissie met 6% verlaagd van 0,57 tot 0,53 kg N dier⁻¹ jaar⁻¹, en werd de hoeveelheid N₂ (+ NO_x)-emissie verlaagd van 10,2 tot 9,6 kg N. De hoeveelheid totale N-emissie werd opnieuw berekend (13,3 + 0,53 + 9,6) op 23,5 kg N. Op basis hiervan waren voor stal 72 de relatieve N-emissies respectievelijk 17,3%, 9,8%, 0,4%, en 7,1% van de N-excretie (136 kg koe⁻¹ jaar⁻¹), en waren de relatieve N-emissies van N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ (+ NO_x) voor stal 60 daarmee uiteindelijk respectievelijk 52%, 62%, 9%, en 40% lager.

4 Discussie

4.1 Fouten op balansposten

Een uitgebreide discussie over de fouten op diverse balansposten is gegeven in De Boer (2023b). Stal 60 was grotendeels vergelijkbaar met stal 72, met als duidelijke afwijking het apart opvangen, wegen en bemonsteren van de dikke fractie, het apart opvangen en bemonsteren van de dunne fractie, een mogelijk andere afwijking op de met de voermengwagen uitgedraaide hoeveelheid PMR, en een mogelijk klein verschil in afwijking op de hoeveelheid verstrekte brok. Daarnaast was de samenstelling van de kudde in stal 60 mogelijk wat afwijkend van de kudde in stal 72 (gezien het verschil in koegewicht), was het ventilatiedebiet gemiddeld hoger, en was de temperatuur gemiddeld lager.

De fout op het totaal van de opgevangen massa dunne en dikke fractie was waarschijnlijk kleiner dan de fout op de opgevangen massa drijfmest in stal 72. De dunne fractie in de kelder van stal 60 zette niet uit als gevolg van gasproductie, zoals bij de drijfmest in stal 72 wel het geval was, waardoor de massa bij de dunne fractie nauwkeuriger bepaald kon worden dan bij de drijfmest. De dikke fractie werd iedere dag gewogen, waardoor de massa hiervan ook nauwkeuriger bepaald kon worden dan van de drijfmest, met een afwijking van enkele procenten op de weegbrug (paragraaf 2.4).

De bemonstering van de dunne fractie was niet altijd voldoende representatief. Het verloop in de tijd van een aantal eigenschappen van de dunne fractie wekt de indruk dat deze fractie in de kelder niet altijd goed gemengd was. Dit gold vooral in de periode zonder aanzuren. Vanaf 9 t/m 23 februari 2021 was het gehalte N-totaal duidelijk hoger dan in de periode ervoor (Fig. 21), een verschil dat eerder logisch verklaard kan worden uit een afwijkende menging van de dunne fractie in de kelder dan uit bijvoorbeeld een hogere N-uitscheiding of lagere N-emissie. Het hogere gehalte volgt na een periode met lage temperatuur (vanaf 7 t/m 14 februari) (Fig. 7), en mogelijk was deze temperatuurdaling de reden van de afwijkende menging, mogelijk als gevolg van een verandering in oplosbaarheid van zouten. De fluctuatie in menging van de mineralen in de dunne fractie in de kelder, die ook beïnvloed werd door het wel of niet aanwezig zijn van koeien in de stal (zie de metingen van 1 maart, 25 mei, en 1 juni), heeft gevolgen voor de balansberekening van de periode zonder aanzuren, die voor een verkorte periode (t/m 1 februari) is uitgevoerd en mogelijk minder betrouwbaar is. Dat laatste speelt minder tot niet voor de periode met aanzuren, in ieder geval niet wat betreft de tweede helft van deze periode die voor de berekening van het N-verlies het belangrijkste is. Mogelijke oorzaken hiervoor zijn de hogere temperatuur (betere oplosbaarheid van zouten), de lagere pH (mogelijk betere oplosbaarheid van zouten), de langere meetperiode, en het feit dat de koeien in de tweede helft niet meer voor langere tijd de stal verlieten.

Bij de door de voermengwagen in stal 60 uitgedraaide hoeveelheid PMR is niet gecorrigeerd voor een mogelijke onderschatting van het gevoerde gewicht, zoals dat werd vastgesteld bij de kalibratie op 19 januari 2021. Redenen hiervoor zijn dat de weeginstallatie ongeveer een maand na kalibratie werd gejusteerd, en dat onduidelijk was hoelang de afwijking sinds de start van de balansperiode van toepassing was. Correctie voor deze onderschatting had het ongecorrigeerde totale N-verlies 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 60 uit dezelfde silo via dezelfde hoofdleiding aangevoerd als in stal 72, en de eerder besproken foutmarges (De Boer, 2023b) zijn daarmee ook op stal 60 van toepassing.

De verschillen tussen stal 60 en 72 in gemiddeld ureumgetal van de melk, het koegewicht, het ventilatiedebiet, en de temperatuur werden niet alleen gemeten, maar ook gebruikt om de resultaten van de emissiemetingen en het N-balansverlies te corrigeren, waardoor de nauwkeurigheid van de vergelijking tussen beide stallen werd verhoogd.

Uit de balansmetingen bleek dat de (cumulatieve) meetfout op de P-balans bij stal 60 aan het einde van de aanzuurperiode (3-4% overschot) vergelijkbaar was met stal 72 (4% overschot), maar de meetfout op de K-balans aanzienlijk kleiner was (8% tekort versus 16% tekort). Opgemerkt moet worden dat de vergelijkbare fout op de P-balans en kleinere fout op de K-balans bij stal 60 werden gerealiseerd over een aanzienlijk kortere balansperiode.

4.2 Stikstofemissie bij opslag en uitrijden van feces

Bij de referentiestal waren de gemeten N-emissies uit de stal inclusief de emissies uit de opgeslagen drijfmest onder de keldervloer. Bij de stal met de tegelvloer werd de afgeschoven dikke fractie binnen korte tijd afgevoerd naar buiten de stal. Hierdoor zijn de N-emissies uit de dikke fractie maar voor een beperkt deel meegenomen in de totale N-emissie uit de stal en moet er nog gecorrigeerd worden voor de emissies in de opslagperiode, om een meer zuivere vergelijking te maken tussen beide stalsystemen. Een laatste onderdeel dat nog meegenomen zou moeten worden is een eventueel verschil in N-emissie tussen het uitrijden van dunne en dikke fractie op het land, vergeleken met het uitrijden van drijfmest.

4.3 Effect van aanzuren op het stikstofverlies door denitrificatie

In de periode met aanzuren bestond een deel van het N-verlies (4,2% van de N-excretie) uit rest-N, zeer waarschijnlijk uit N₂ die ontstond als gevolg van denitrificatie. In de periode zonder aanzuren leek er geen denitrificatie van betekenis te zijn. De N₂O-emissie in deze laatste periode was erg laag, minder dan 10% van de N₂O-emissie in de periode met aanzuren. Hieruit kan worden afgeleid dat de N₂-emissie in de periode zonder aanzuren waarschijnlijk ook laag was. De voornaamste oorzaak van de lage N₂O-emissie lijkt de lage temperatuur te zijn geweest. De verhouding van de N-N₂ : N-N₂O-emissie in de periode met aanzuren kan eventueel gebruikt worden om een schatting te maken van de N₂-emissie in de periode zonder aanzuren. De verhouding was in de periode met aanzuren 18,0, en de N₂-emissie in de periode zonder aanzuren kan daarmee geschat worden op $(0,03\% * 18,0) = 0,4\%$ van de N-excretie. Dit kan een onderschatting zijn, omdat bij een lagere pH (periode met aanzuren) de verhouding N-N₂ : N-N₂O meestal ook lager is. Daar staat tegenover dat bij een lagere temperatuur (periode zonder aanzuren) deze verhouding ook lager wordt.

Bij toepassing van de filterende tegelvloer werd geen N-verlies door denitrificatie verwacht. De gemeten N₂O-emissie geeft aan dat er in ieder geval nitrificatie is opgetreden, waarbij het voor de hand ligt dat er ook denitrificatie heeft plaatsgehad. De vraag is op welke plek de nitrificatie en denitrificatie zijn opgetreden. Voor nitrificatie en de productie van N₂O is zuurstof nodig, voor de productie van hydroxylamine of nitriet. De dunne fractie in de kelder was zuurstofarm en bevatte geen drijfslag. Mogelijk is er door luchtstroming over het oppervlak toch enige nitrificatie optreden, die dan in het zuurstofarme milieu daaronder tot denitrificatie heeft geleid. Het (zeer beperkte) mixen met lucht (DSD-systeem) in de periode met aanzuren kan mogelijk ook enige nitrificatie en vervolgens denitrificatie hebben gegeven. In beide gevallen is deze bijdrage waarschijnlijk beperkt gebleven, omdat bij de lage pH van de dunne fractie het biologische proces van nitrificatie sterk geremd kan worden. Het lijkt waarschijnlijker dat nitrificatie en denitrificatie hebben plaatsgevonden op en in de tegels, als gevolg van de afwisseling van plaatselijk vernatten en opdrogen. Een andere mogelijkheid is dat (een deel) van de nitrificatieproducten (hydroxylamine, nitriet, nitraat) door de tegels heen in de kelder zijn gespoeld en daar zijn gedenitrificeerd.

In de periode met aanzuren was het N₂O-verlies uit de stal met tegelvloer vrijwel vergelijkbaar (-9%) met het N₂O-verlies uit de referentiestal, terwijl het N₂-verlies (-40%) duidelijk lager was. Uit de literatuur is bekend dat bij een lagere pH van het substraat de N₂O-emissie zowel relatief als absoluut kan toenemen bij een afname van de N₂-emissie, en daarmee is het verschil in relatieve afname van de N₂O- en N₂-emissie tussen de twee stallen verklaarbaar.

4.4 Berekening van urine- en fecesproductie

De in de stal geproduceerde hoeveelheid urine en feces werd berekend op basis van hoeveelheden dikke en dunne fractie, en verschillen in EC tussen deze fracties en urine (opgevangen in stal 70). De dunne fractie bevatte een deel van de met feces uitgescheiden P. Dit suggereert dat een deel van de dikke fractie door de tegel heen in de kelder was gespoeld, en dat de berekende hoeveelheden urine en feces hiervoor gecorrigeerd zouden moeten worden. Het is echter niet waarschijnlijk dat er een betekenisvolle hoeveelheid feces door de tegel is gespoeld.

De dunne fractie was waterdun, bevatte geen grove deeltjes organische stof, had geen drijfslag, en het DS-gehalte in de periode zonder aanzuren (gem. 3,41%) was, na correctie voor verdunning door gemorst water, vergelijkbaar (gem. 4,35%) met het DS-gehalte van de in stal 70 opgevangen urine (gem. 4,30%). De P in de dunne fractie bestond waarschijnlijk voor een aanzienlijk deel uit wateroplosbare P, die als gevolg van het urineren op de besmeurde vloer in de urine oploste en vervolgens door de tegels spoelde. Uit eerder onderzoek blijkt dat rundveedrijfmest tot 9% wateroplosbaar P kan bevatten, en dat door verdunning met water dit aandeel verder kan toenemen (Timmerman et al., 2018). Een deel van de doorgespoelde P bestond mogelijk ook uit organische P die aanwezig was in kleine deeltjes organische stof. Vanwege bovenstaande overwegingen is de berekening van de urine- en fecesproductie niet gecorrigeerd voor de P in dunne fractie. De uiteindelijk berekende hoeveelheid urine (29,0 kg) bedroeg 40% van de totale hoeveelheid urine + feces (71,5 kg), een gangbare verhouding.

De in dit rapport berekende hoeveelheid in de kelder opgevangen urine, hoeveelheid gemorst water, en totale hoeveelheid uitgescheiden urine was respectievelijk 3% lager, 12% hoger, en 3% lager vergeleken met de eerdere voorlopige berekening in De Boer (2023c). De reden hiervoor is dat in De Boer (2023c) niet werd gecorrigeerd voor de EC van het toegevoegde zwavelzuur.

4.5 Effecten van aanpassing van de filterende tegel

Op 31 mei 2021 werden de filterende tegels vervangen door een aangepaste versie waarvan de gaten in de rubberen plaat beter aansloten bij de gaten in de kunststof onderplaat, en waarbij voor de rubberen plaat fijnere rubberkorrels waren gebruikt. Door de betere afstemming van de gaten liep de urine sneller weg, maar door gebruik van de fijnere korrels werd er meer urine in de rubberen plaat vastgehouden. Dit laatste heeft waarschijnlijk de bijdrage van de rubberen plaat aan de NH₃-emissie van de tegel verhoogd, omdat het langer duurt voordat een tegel opdroogt en de NH₃-emissie daardoor langer kan aanhouden. De grotere vochtabsorptie kan daarnaast ook effect hebben gehad op het nitrificatie- en denitrificatieverlies. Bij gebruik van grovere rubberkorrels houdt de rubberen plaat minder vocht vast en kan daardoor sneller opdrogen, waardoor de NH₃-emissie van de tegel lager kan zijn in zowel de situatie met als zonder aanzuren van de dunne fractie. In de hele periode met aanzuren was de NH₃-emissie van de stal met tegelvloer 62% lager dan de referentiestal, en in de periode met aanzuren en aangepaste tegel 67% lager. Verdere aanpassing van de tegel, onder andere gebruik van een grovere rubberkorrel, moet, in combinatie met aanzuren, de reductie van NH₃-emissie verder kunnen verhogen tot meer dan 70%.

Tijdens het onderzoek bleek dat het filterdoek en de gaten in de tegels deels konden dichtslibben door een kalkachtige, vettige afzetting uit de urine. Hierdoor kunnen er langere tijd plasjes urine op de tegel blijven staan, waardoor de NH₃-emissie toeneemt. Door de tegels regelmatig schoon te spuiten wordt dichtslibben voorkomen, kan de urine sneller worden afgevoerd, en kan de NH₃-emissie afnemen. Een andere optie is om de tegel dagelijks te sproeien of te spoelen met water, bij voorkeur licht aangezuurd, waardoor het dichtslibben verminderd of voorkomen kan worden. Het sproeien kan zelf ook de NH₃-emissie van de tegels verlagen.

Door het aanzuren van de dunne fractie werd de NH₃-emissie uit de kelder vrijwel volledig uitgeschakeld, en was de NH₃-emissie van de stal met tegelvloer 62% lager vergeleken met de referentiestal. Hieruit kan worden afgeleid dat in de stal met tegelvloer ongeveer 40% van de stalemissie afkomstig was van de vloer en 60% uit de kelder. Dit is een andere verhouding dan in een stal met roostervloer, waar grofweg 60% van de emissie afkomstig is van de vloer en 40% uit de kelder (Van Dooren et al., 2019).

Conclusies

- Met de filterende tegelvloer werd over de hele meetperiode (41 weken) gemiddeld 32,9 kg dunne fractie en 45,8 kg dikke fractie per koe per dag opgevangen;
- De filterende tegelvloer gaf een goede scheiding in een dunne en dikke fractie. Met de dikke fractie werd over de hele meetperiode ongeveer de helft (52%) van de uitgescheiden N opgevangen, het overgrote deel (88%) van de P, en een beperkt deel (22%) van de K. De dunne fractie bevatte een beperkt deel van de uitgescheiden P (12%) en het overgrote deel van de K (78%);
- In de balansperiode zonder aanzuren van de dunne fractie (1 december 2020 t/m 1 februari 2021) waren de relatieve N-emissies van NH₃ en N₂O respectievelijk 8,1% en 0,02% van de N-excretie (148 kg N koe⁻¹ jaar⁻¹). De relatieve N-emissie kon voor N₂ (+ NO_x) niet betrouwbaar worden vastgesteld, maar de erg lage N₂O-emissie wekte de indruk dat er vrijwel geen denitrificatie optrad in deze (koude) periode. De relatieve N-emissies van NH₃ en N₂O waren voor de stal met filterende tegelvloer respectievelijk 53% hoger en 13% lager vergeleken met de referentiestal;
- In de balansperiode met regelmatig aanzuren (pH 4-5) van de dunne fractie waren de relatieve N-emissies voor N-totaal, NH₃, N₂O, en N₂ + NO_x respectievelijk 8,5%, 3,9%, 0,4%, en 4,2% van de N-excretie (131 kg koe⁻¹ jaar⁻¹), en respectievelijk 52%, 62%, 9%, en 40% lager vergeleken met de referentiestal;
- Bij de bovenstaande reducties waren de emissies uit (langere) opslag van de dikke fractie niet meegenomen voor de stal met de tegelvloer, maar wel voor de referentiestal. Voor de emissie tijdens opslag moet nog gecorrigeerd worden om een meer zuivere vergelijking tussen beide stallen te maken. Een laatste fase die nog meegenomen zou moeten worden is een eventueel verschil in N-emissie tussen het uitrijden van dunne en dikke fractie op het land, en het uitrijden van drijfmest;
- De filterende tegelvloer gaf een goede scheiding in een dunne en dikke fractie, maar gaf zonder aanvullende behandeling van de dunne fractie een hogere NH₃-emissie vergeleken met de roostervloer. Naast behandeling van de dunne fractie kan door een verdere ontwikkeling van de tegel, o.a. een verlaging van het absorptievermogen, de NH₃-emissie verder verlaagd worden.

Dankwoord

De auteur dankt Paul Galama (projectleider PPS 'Mestscheiding in Melkveestallen') voor zijn cruciale rol bij het mogelijk maken van dit onderzoek en voor de ondersteuning; Anne de Boer (ADB Techniek, Burgum) voor de operationele ondersteuning van de tegelvloer en bijbehorende techniek; de staf van proeffaciliteit Dairy Campus voor de uitgevoerde metingen, bemonsteringen, facilitaire ondersteuning, en het datamanagement; Klaas Blanken en Henk Schilder voor het uitvoeren van de wekelijkse peilmetingen, mestbemonstering, en andere ondersteuning; Carsten Schep en Hendrik Jan van Dooren voor het aanleveren van de gegevens van NH₃- en N₂O-emissie, temperatuur, en ventilatiedebiet; en Paul Galama en Roselinde Goselink 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.
- Darling HE (1964) Conductivity of sulfuric acid solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data* 9:421-426.
- 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 roostervloer en een koetoilet. Rapport 1448, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- Timmerman M, Regelink IC, Verdoes N, Kupers G, Blanken K (2018). Fosfaatvormen in melkveemest en potentieel voor terugwinning. Rapport 1087, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- 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.
- 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.

