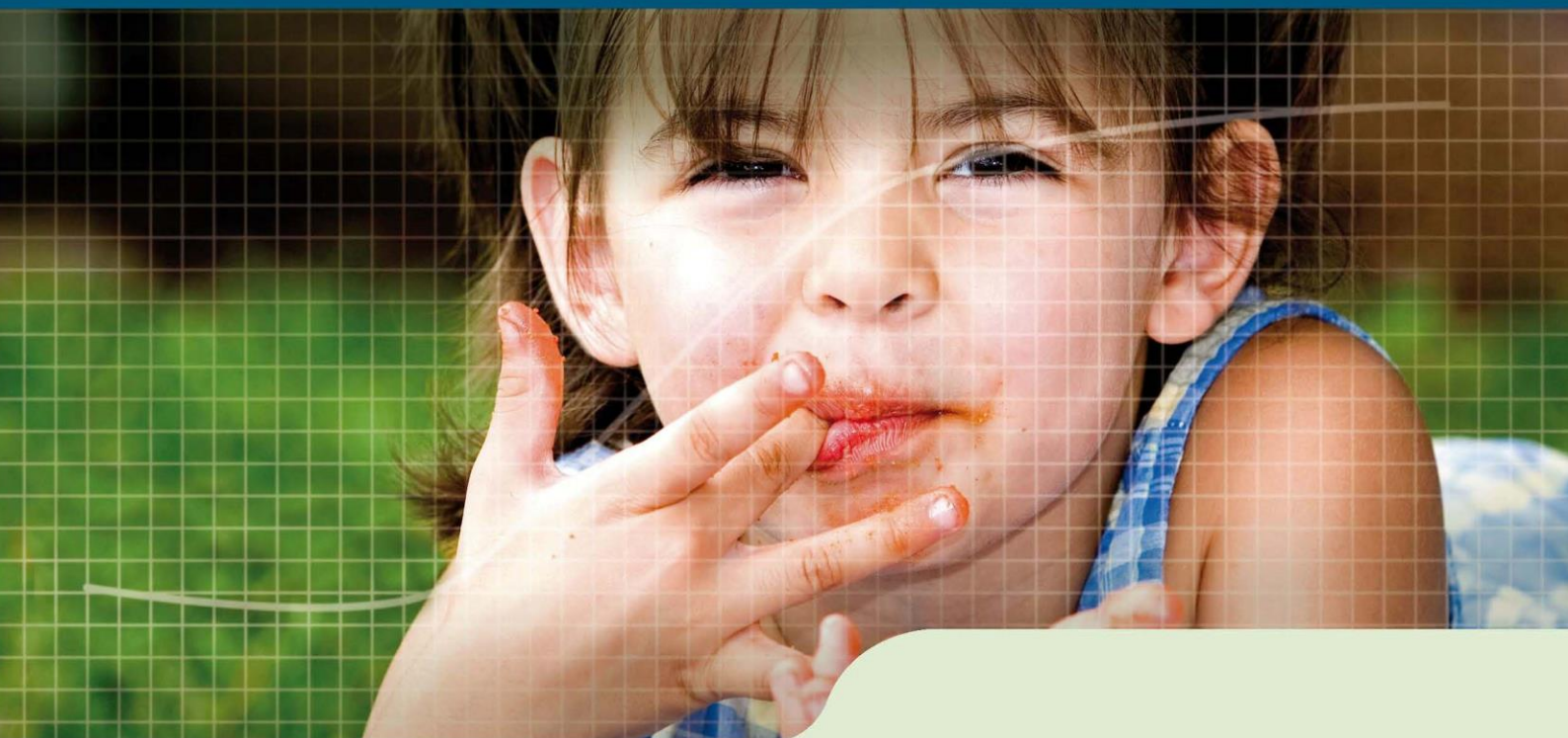


# Wageningen UR Livestock Research

*Partner in livestock innovations*



Rapport 741

Terugwinning van ammoniak uit mest op het boerenbedrijf met behulp van de LGL-stripper

Kunstmest van onder de staart

December 2013



**LIVESTOCK RESEARCH**  
**WAGENINGEN UR**

## Colofon

### Uitgever

Wageningen UR Livestock Research  
Postbus 65, 8200 AB Lelystad  
Telefoon 0320 - 238238  
Fax 0320 - 238050  
E-mail [info.livestockresearch@wur.nl](mailto:info.livestockresearch@wur.nl)  
Internet <http://www.livestockresearch.wur.nl>

### Redactie

Communication Services

### Copyright

© Wageningen UR Livestock Research, onderdeel van Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek, 2013

Overname van de inhoud is toegestaan, mits met duidelijke bronvermelding.

### Aansprakelijkheid

Wageningen UR 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 UR Livestock Research en Central Veterinary Institute, beiden onderdeel van Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek vormen samen met het Departement Dierwetenschappen van Wageningen University de Animal Sciences Group van Wageningen UR (University & Research centre).

Losse nummers zijn te verkrijgen via de website.



De certificering volgens ISO 9001 door DNV onderstreept ons kwaliteitsniveau. Op al onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponneerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

### Abstract

This report describes the development of the LGL stripper, a novel machine for the removal of ammonia from normal and digested manure.

### Keywords

Ammonia recovery, manure, digested manure

### Referaat

ISSN 1570 - 8616

### Auteur(s)

D.A.J. Starmans  
M. Timmerman

### Titel

Terugwinning van ammoniak uit mest op het boerenbedrijf met behulp van de LGL-stripper

Rapport 741

### Samenvatting

Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van de LGL stripper voor de verwijdering van ammoniak uit drijfmest en digestaat.

### Trefwoorden

Terugwinning ammoniak, drijfmest, digestaat



LIVESTOCK RESEARCH  
WAGENINGEN UR

Rapport 741

# Terugwinning van ammoniak uit mest op het boerenbedrijf met behulp van de LGL-stripper

D.A.J. Starmans  
M. Timmerman

December 2013



## Voorwoord

Een nieuwe ontwikkeling verloopt vaak met vallen en opstaan, zo ook in de ontwikkeling van de LGL stripper die in dit verslag is beschreven. De toewijding, inzet en doorzettingsvermogen van velen hebben het mogelijk gemaakt om de stap van een laboratoriumopstelling naar een pilotuitvoering op boerderijschaal te maken. Een dergelijke stap vraagt meer dan het alleen groter maken van de afzonderlijke onderdelen, waardoor onze initiële tijdplanning ambitieuzer bleek dan de realiteit ons deed ervaren.

De onderzoekers bedanken Dorset Green Machines, onze industriële partner in dit traject, voor de goede samenwerking en haar inzet om de LGL-stripper op De Marke gerealiseerd te krijgen. De inzet vóór en tijdens de experimenten werd zeer op prijs gesteld.

Dank gaat ook uit naar de medewerkers van Kennis Transfer Centrum De Marke. Niet alleen zorgden zij voor de benodigde gescheiden mest, zij waren tevens de dagelijkse ogen en oren tijdens de experimenten, en namen de vele monsters die zijn verzameld tijdens dit onderzoek.

Ook wil ik het Milieulaboratorium van AFSG bedanken. De monsters die werden aangeleverd waren verre van standaard. Gelukkig leverde jullie kennis en expertise betrouwbare resultaten.

Tenslotte bedanken we het Productschap Zuivel voor de cofinanciering.

Namens de onderzoekers,

***Dick***



## Samenvatting

Op Melkveeproefbedrijf De Marke werd een praktijkschaal LGL-stripper uitgetest voor de continue behandeling van gescheiden drijfmest en gescheiden digestaat. Tijdens de opstart van deze machine werden technische problemen opgelost, waarna de verwijdering van ammoniak door dit apparaat kon worden getest. De verwijderde ammoniak werd opgevangen in een zure fase. Het stoftransport tussen de vloeibare fasen werd vergroot door langzaam ronddraaiende schijven welke het uitwisselende oppervlak vergrootten.

De maximale verwijdering van ammoniak door de stripper werd getest met een waterige ammoniakoplossing. De behaalde resultaten werden vergeleken met de ammoniak verwijdering van het eerste, statische prototype. Het bleek dat er op praktijkschaal per vierkante meter uitwisselend oppervlak en tijdseenheid 80% van de theoretisch maximum waarde van het prototype werd gehaald. Een eenvoudige massabalans van dit experiment toonde aan dat 20% van de ammoniak niet werd teruggevonden in het systeem. Deze kan in het apparaat zijn opgehoopt of deze heeft het apparaat via de gasfase verlaten.

De invang van ammoniak uit de mest fracties bleef met 48% en 40% achter ten opzichte van de maximaal gevonden invang met ammoniakwater voor respectievelijk het laboratorium prototype en de praktijkschaal stripper op De Marke. De efficiëntie van het systeem wordt bepaald door de concentratie van de te behandelen ammoniak-rijke fase, hoe snel deze fase door het apparaat wordt geleid, en de concentratieopbouw in de gasfase van de installatie.

Het verloren gaan van 20% van de ammoniak zal hebben bijgedragen aan een verlaging van de efficiëntie. Een tussentijdse verhoging van de pH in experiment 3 (van 10 naar 12) had geen effect op de opgenomen hoeveelheid ammoniak in de zuurfase. De geregistreerde stijging in de efficiëntie van de stripper die werd berekend uit de analyses van de monsters digestaat, werd niet omgezet in een verhoogde opname van ammoniak in het zuur.

Verbeteringen van de LGL stripper zullen met name gericht moeten zijn op het verhogen van het vrijmaken van ammoniak. De huidige ammoniakverwijdering zorgt ervoor dat er meer mest uitgereden kan worden per hectare. De geproduceerde vloeibare kunstmest kan in een later stadium worden aangewend.





# Inhoudsopgave

## Voorwoord

## Samenvatting

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>1</b>
1.1	Achtergrond.....	1
1.2	Werkingsprincipe.....	1
1.3	Doel.....	2
<b>2</b>	<b>Materiaal en Methoden</b> .....	<b>3</b>
2.1	Lab-opstelling LGL-stripper.....	3
2.1.1	Opstelling.....	3
2.1.2	Bemonstering.....	3
2.1.3	Overzicht experimenten.....	3
2.1.4	Monsteranalyse.....	4
2.2	Rekenmodel 1.....	4
2.3	Prototype De Marke LGL-stripper .....	5
2.3.1	Opstelling.....	5
2.3.2	Bemonstering.....	6
2.3.3	Overzicht experimenten.....	8
2.4	Rekenmodel 2.....	9
<b>3</b>	<b>Resultaten Lab-opstelling LGL-stripper</b> .....	<b>10</b>
3.1	Experiment A – Striprendement dunne fractie.....	10
3.2	Experiment B – Effect van pH-verhoging.....	11
3.3	Experiment C – Effect van temperatuurverhoging.....	12
3.4	Berekeningen met model 1 – Verbliftijd en toevoeging NaOH .....	16
<b>4</b>	<b>Resultaten Prototype De Marke</b> .....	<b>17</b>
4.1	Berekeningen met model 2 – Keuze van het aantal gasfasen .....	17
4.2	Berekeningen model 2.....	17
4.3	Resultaten .....	19
4.3.1	Totaaloverzicht.....	19
4.3.2	Experiment 1 en 4 – Ammoniakwater versus zwavelzuur.....	22
4.3.3	Experiment 2 en 5 – Dunne fractie drijfmest versus zwavelzuur.....	23
4.3.4	Experiment 3 en 6/7 – Dunne fractie digestaat versus zwavelzuur.....	25
<b>5</b>	<b>Discussie</b> .....	<b>26</b>
5.1	Lab-opstelling.....	26
5.2	Dimensionering Prototype De Marke vanuit de Lab-opstelling.....	26
5.3	Interpretatie experimenten .....	27
5.3.1	Vergelijking met voorbeeldberekening artikel <sup>5</sup> .....	27
5.3.2	Invloed van pH-verhoging van de mestfracties .....	27
5.4	Verbeteringen voor de LGL stripper.....	27
5.5	Praktische gevolgen voor de melkveehouder .....	28
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>30</b>
6.1	Conclusies.....	30
6.2	Aanbevelingen .....	30
<b>7</b>	<b>Literatuur</b> .....	<b>31</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

In delen van Nederland wordt meer stikstof uit dierlijke mest geproduceerd dan ter plaatse op landbouwgrond mag worden aangewend (170 kg N/ha, Nitraat-richtlijn). Hierboven mag alleen kunstmest worden gebruikt om aan de stikstofbehoefte van de gewassen te voldoen. Het plaatsingsprobleem van de overtollige mest wordt op dit moment hoofdzakelijk opgelost door de mest regionaal te verwerken en/of te transporteren naar regio's in Nederland met een mesttekort of door de mest te verwerken en te exporteren. Aanvullend moet dan kunstmest worden aangekocht om in de verdere stikstofbehoefte van de gewassen te voorzien. Dit is echter een dure aangelegenheid doordat enerzijds de afvoer van (stikstof in) mest geld kost en anderzijds de aankoop van kunstmest opnieuw geld kost. Het gebruik van N-kunstmest is bovendien weinig duurzaam omdat de productie ervan veel (fossiele) energie vraagt.

De agrarische sector zoekt daarom naar alternatieven. Een interessant alternatief voor het gebruik van kunstmest is de toepassing van een uit mest teruggewonnen stikstof-concentraat. Initiatieven hiervoor zijn bij verschillende mestverwerkingsinstallaties opgestart. Het teruggewonnen stikstof-concentraat dient van een voldoende zuivere kwaliteit te zijn om als een kunstmestconcentraat in aanmerking te komen. Erkenning als anorganische meststof is een belangrijke voorwaarde voor de toepassingsmogelijkheden van N-concentraten uit mest.

Via membraantechologie is het mogelijk om mineralen onder hoge druk te concentreren en te gebruiken als kunstmestvervanger. Deze mogelijkheid wordt onderzocht in het lopende project 'Mineralenconcentraten'.<sup>1,2</sup> Nadelen van deze technologie zijn de complexiteit, de kosten en het relatief lage N-gehalte in het mineralenconcentraat. Bovendien is deze technologie alleen toepasbaar in mestfracties zonder zwevende deeltjes, met andere woorden: na een zeer grondige voorbehandeling.

De LGL-stripper<sup>3</sup> (Liquid-Gas-Liquid) is een nieuwe en perspectievolle techniek<sup>4</sup> waarmee tegen geringe energiekosten ammoniumstikstof uit mest kan worden gehaald en direct kan worden geconcentreerd in een zure vloeistof tot een stikstofmeststof met een hoge stikstofconcentratie. Dit stikstofconcentraat kan vervolgens met geëigende technieken worden aangewend op gras- of bouwland, terwijl de behandelde mest mogelijk zelfs zonder noodzakelijk gebruik van emissiearme aanwendingstechnieken kan worden aangewend.

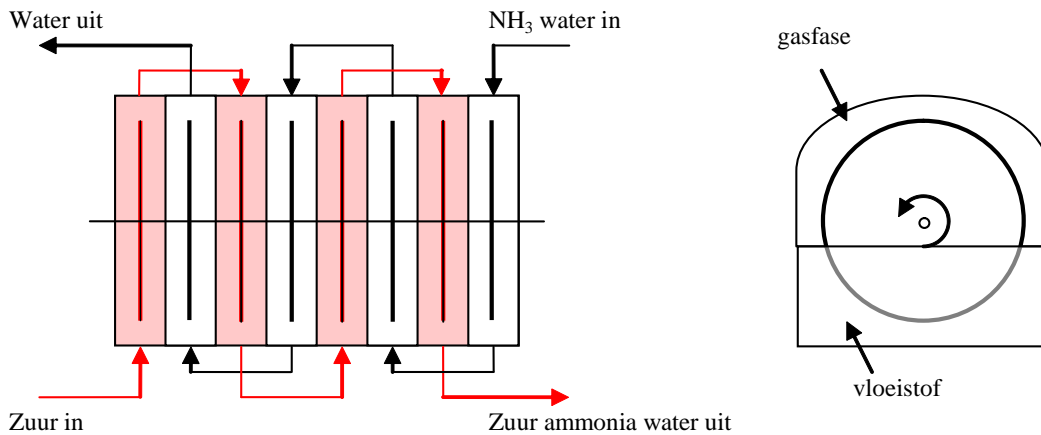
## 1.2 Werkingsprincipe

In de LGL-stripper wordt de ammoniumstikstof gestript uit de mestvloeistof, waarna deze wordt ingevangen in een tweede, zure vloeistof. Dit wordt gerealiseerd door een film van beide vloeistoffen te creëren op twee aparte, parallel draaiende schijven (figuur 1). De zo gecreëerde vloeistof-opervlakken raken elkaar niet, maar zijn wel zo dicht bij elkaar dat ammoniak gemakkelijk via de gasfase overgedragen kan worden. De draaiing van de schijven van enkele rotaties per minuut zorgt voor de verversing van de vloeistoffilm. Hiervoor wordt slechts een kleine hoeveelheid energie gebruikt.

De verschillende LGL-compartimenten kunnen in tegenstroom worden geschakeld voor een beter overall rendement, zoals getekend in figuur 1. Het debiet van de binnenkomende mestvloeistof kan bovendien vele malen hoger zijn dan het debiet van de zure oplossing (bijv. zwavelzuur) omdat deze laatste veel ammoniak kan bergen.

De belangrijkste verwachte voordelen van de LGL-stripper ten opzichte van andere technieken zijn:

- Eenvoudig systeem om te bedienen,
- Robuuste techniek,
- Lage operationele kosten,
- Productie van een enkelvoudige stikstof kunstmest met een hoge stikstofconcentratie,
- Sluiten van de stikstof kringloop: het stikstofconcentraat is vervanger van kunstmest
- Applicatie van het eindproduct is mogelijk met een spaakwielbemester,
- Laag energiegebruik ten opzichte van andere systemen (bv. omgekeerde osmose systemen),
- Vermindering van de emissie van broeikasgassen en ammoniak.



**Figuur 1** Bovenaanzicht (links) en zijaanzicht (rechts) van de LGL stripper

### 1.3 Doel

In dit rapport wordt de doorontwikkeling beschreven van de eerste lab-opstelling van de LGL-stripper tot een prototype op semi-praktijkschaal op proefbedrijf De Marke. Om verwarring tussen beide prototypes te voorkomen worden ze respectievelijk aangeduid als “Lab-opstelling” en “Prototype De Marke”. Zoals toegezegd in het projectvoorstel zijn met het prototype De Marke experimenten gedaan met rundveemest en digestaat van rundveemest.

De overgang van lab-opstelling naar prototype is geen recht-toe-recht-aan opschaling van klein (1 unit) naar groot (10 units). De batch-gewijze Lab-opstelling werd gebruikt voor het genereren van ontwerp cijfers voor het doorstroomde Prototype De Marke. De resultaten behaald met de Lab-opstelling werden gebruikt als input voor een eerste rekenmodel, waarmee een eerste dimensionering van het Prototype De Marke werd uitgerekend.

De resultaten van de experimenten die op De Marke werden gedaan werden gespiegeld aan de behaalde resultaten van de lab-opstelling en berekeningen in rekenmodel 2. Rekenmodel 2 maakt gebruik van de afmetingen van het Prototype De Marke. De ervaringen opgedaan met het Prototype De Marke apparaat werden gebruikt voor het doen van technische aanbevelingen voor de realisatie van een commerciële LGL-stripper.

Het uiteindelijke streven is om 80% van de ammoniumstikstof uit de mest(fractie) te halen, waarbij de ingevangen ammonium voldoende geconcentreerd is om ingezet te kunnen worden als anorganische meststof: “Kunstmest van onder de staart.”

## 2 Materiaal en Methoden

Bij aanvang van het onderzoek zijn eerst aantal experimenten uitgevoerd met de Lab-opstelling van de LGL-stripper. Op basis van deze resultaten is een eerste rekenmodel van de niet doorstroomde Lab-opstelling LGL-stripper gemaakt. Vervolgens zijn met het rekenmodel verschillende modelberekeningen uitgevoerd. De resultaten van de experimenten en de uitkomsten van de modelberekeningen vormden input voor het optimaliseren van de werking van de LGL-stripper. Daarnaast is het eerste rekenmodel het uitgangspunt geweest voor het maken van een tweede rekenmodel voor het doorstroomde Prototype De Marke. Dorset Green Machines BV heeft in nauwe samenwerking met Wageningen UR Livestock Research het ontwerp van het prototype op semi-praktijkschaal technisch uitgewerkt en de LGL-stripper vervolgens gebouwd op het melkvee proefbedrijf De Marke.

### 2.1 Lab-opstelling LGL-stripper

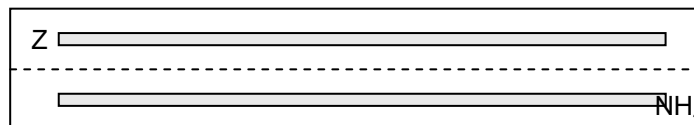
#### 2.1.1 Opstelling

De lab-opstelling van de LGL-stripper bestond twee compartimenten met elk een volume van 33 liter en een gezamenlijke gasfase.

- Compartiment 1 van de LGL stripper werd gevuld met 30 liter ammoniak houdende oplossing
- Compartiment 2 van de LGL stripper werd gevuld met 30 liter zuur houdende oplossing.

De schijven hadden elk een diameter van 1 meter en draaiden rond met 5 rotaties per minuut.

**Figuur 2** Bovenaanzicht van de Lab-opstelling LGL-stripper.



Nadat de beide compartimenten waren gevuld en gemengd, werd de motor voor aandrijving van de schijven aangezet en de kap op de LGL-stripper geplaatst.

#### 2.1.2 Bemonstering

Aansluitend aan het plaatsen van de kap op de opstelling werden de monsters op  $t=0$  genomen. Daarna werd op gezette tijden een monster genomen van beide vloeistoffasen. Bemonstering vond plaats via monsterslangen welke waren gemonteerd aan de onderzijde van de beide compartimenten. De bemonstering vond plaats tijdens de uitloop van de vloeistof in een schone emmer, waarbij rekening gehouden werd met een voorloop van 3 liter, hetgeen overeenkomt met de inhoud van de monsterslang. Na de bemonstering werd de voorloop geretourneerd aan het systeem via dezelfde monsterslang, waarna deze werd afgesloten.

#### 2.1.3 Overzicht experimenten

Een overzicht van de experimenten is weergegeven in tabel 1. Experiment A werd uitgevoerd om een beeld te krijgen van het stripdement van dunne fractie rundveedrijfmest in de LGL-stripper. Experiment B werd uitgevoerd om te bepalen wat het effect van het verhogen van de pH van de dunne fractie op het stripdement is. Experiment C werd uitgevoerd om te bepalen wat het effect van het verhogen van de temperatuur van de dunne fractie op het stripdement is. Deze experimenten werden uitgevoerd met 1 liter zwavelzuur-oplossing ( $3,3 \text{ mol H}_2\text{SO}_4$ ) (= ca. 1,27 kg) aangevuld met water in compartiment 2, om een vloeibare meststof te creëren welke toegepast zou

kunnen worden binnen de landbouw. De dunne fractie rundveedrijfmest was afkomstig van een melkveebedrijf waar de melkveedrijfmest is gescheiden met een vizepers.

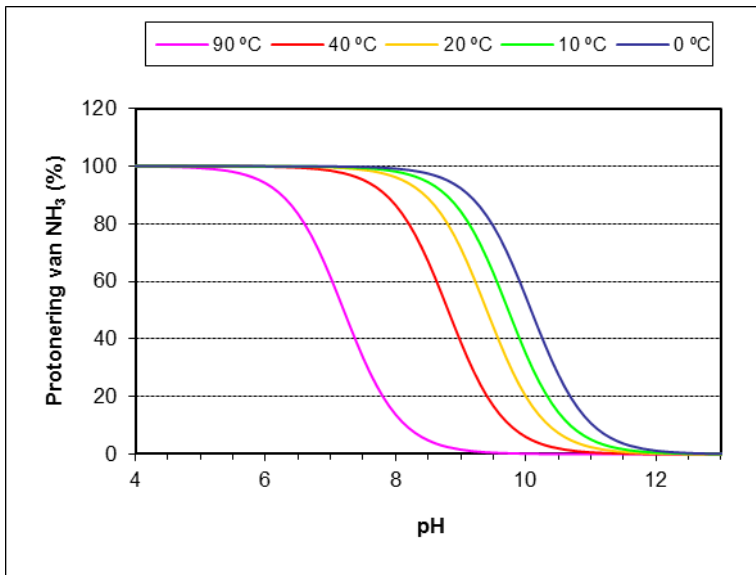
**Tabel 1.** Overzicht van de uitgevoerde experimenten met de Lab-opstelling LGL-stripper

Experiment		Compartiment		Schijven	
#	Doel	1	2	Aantal per compartiment	Rotatiesnelheid (rpm)
A	Striprendement dunne fractie	30 kg dunne fractie rundveedrijfmest	29 kg water + 1 l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -opl.	1	5
B	Effect pH verhogen op striprendement	30 kg dunne fractie rundveedrijfmest + 1 l NaOH-opl. (6 M)	30 kg water + 1 l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -opl.	1	5
C	Effect temperatuur verhogen op striprendement	30 kg dunne fractie rundveedrijfmest	29 kg water + 1 l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -opl.	1	5

### 2.1.4 Monsteranalyse

Het ammoniakgehalte en de pH van de genomen monsters werden bepaald door het AFSG Milieulaboratorium. De pH van de vloeistof werd bepaald omdat deze een maat is voor de protonering van ammoniak (figuur 3). De hoeveelheid overblijvende vrije ammoniak is samen met de stofoverdrachtscoëfficiënt een maat voor de stofoverdracht van ammoniak tussen de vloeistof en de gasfase.

**Figuur 3** Protoneringsgraad van ammoniak bij verschillende pH



## 2.2 Rekenmodel 1

Van de Lab-opstelling van de LGL-stripper is een rekenmodel gemaakt voor berekening van het striprendement en de gehalten ammoniak in de mest- en zuurvloeistof. Het model is als itererend werkblad geprogrammeerd in Excel. Over een zelf in te stellen (korte) tijdsperiode worden hierin de

concentraties van de deelnemende stoffen als constant gehouden, waardoor massatransporten als gevolg van convectie en diffusie zijn uit te rekenen. Aan de hand van deze massatransporten worden nieuwe concentraties berekend voor de daarop volgende iteratie/periode. Een typische tijdsperiode voor één iteratie is 1 seconde.

Het model gaat uit van een initiële gasfase zonder ammoniak ( $[\text{NH}_3] = 0 \text{ mol/m}^3$ ). De modellering van de stofoverdracht van ammoniak van de mestfase naar de gasfase en het stoftransport van ammoniak van de gasfase naar de zuurfase verloopt via dezelfde formules. Hierbij wordt dezelfde Henri-verdelingscoëfficiënt gebruikt om de schijnbare ammoniakconcentratie boven de vloeistoffase te berekenen uit de concentratie ammoniak in de bulk van de betreffende vloeistof. De richting van het uiteindelijke (cumulatieve) ammoniaktransport wordt bepaald door de lage concentratie vrij ammoniak in de zure fase, als gevolg van de lage pH.

Over een tijdsbestek van 1 seconde wordt het transport van ammoniak van en naar de vloeistof compartimenten als constant verondersteld. De nieuwe gasconcentratie wordt berekend uit een ammoniakbalans over de gasfase. De massabalansen over de beide vloeistoffasen leveren de nieuwe ammoniak-concentraties in de beide compartimenten. Vervolgens worden deze concentraties gebruikt voor een hernieuwde iteratie over een volgende seconde. De berekeningen worden beëindigd als er voldoende iteraties zijn verricht. Uit de gevonden ammoniakconcentraties wordt het rendement van de ammoniakverwijdering berekend. Dit berekende rendement werd uitgezet tegen de tijd.

## 2.3 Prototype De Marke LGL-stripper

### 2.3.1 Opstelling

Het Prototype De Marke zoals deze werd gebouwd door Dorset op Kennis Transfer Centrum De Marke bestaat uit een grote bak (vulvolume  $1 \text{ m}^3$ ) waarin een tiental zuurbakken (inhoud elk 61 liter) zijn gehangen (zie figuur 5). De zuurbakken fungeren als schotten in de grote bak waardoor de ammonium houdende ingaande vloeistof (ammoniak water, dunne fractie drijfmest of digestaat) in een meanderende "propstroom" beweging met een debiet van 100 L/uur door het apparaat stroomde. De tien met elkaar verbonden zuurbakken vormen de wanden van in totaal 11 naastgelegen compartimenten voor de ammoniak houdende vloeistof. Zo wisselen beide soorten compartimenten elkaar af.

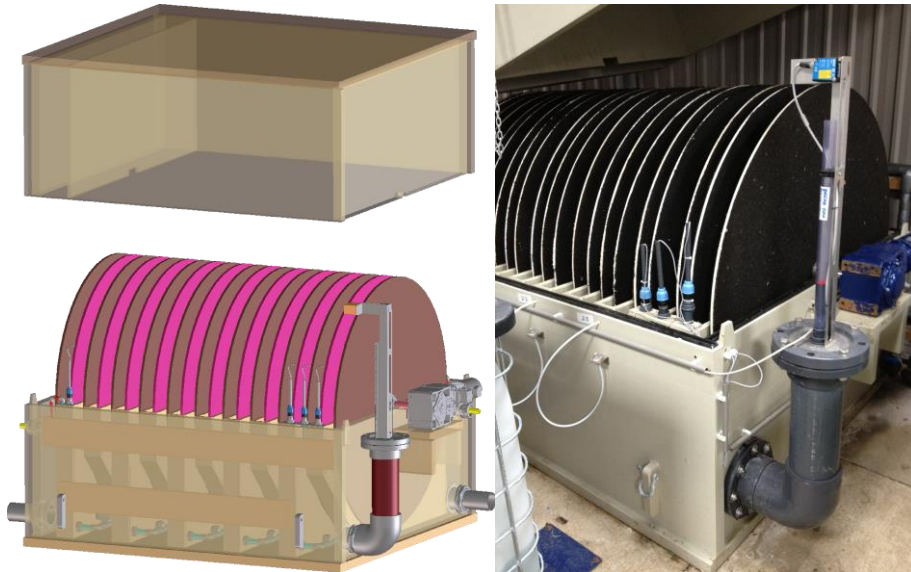
Elk compartiment heeft een schijf met een diameter van 1,5 m, welke met een snelheid van 5 rotaties per minuut ronddraait. Hierdoor wordt een groot uitwisselend oppervlak ( $1,76 \text{ m}^2$ ) gecreëerd waardoor transport van ammoniak van de vloeibare ammonium houdende vloeistof naar de zure vloeistof kan plaatsvinden.

De stripper is uitgerust met niveau sensoren voor het regelen van de vulgraad tijdens het bedrijf. De aansturing van de afvoerpomp voor de ammonium houdende vloeistof wordt gebruikt voor de niveauregeling binnen de stripper.

De ammonium houdende mestfase werd na oppompen in een voorraadvat eerst via een filterzeef ontdaan van grove delen ( $>4 \text{ mm}$ ), waarna het werd aangelooft met natronloog. Vervolgens werd het mengsel opgemengd in een statische mixer die in de aanvoerleiding was ingebouwd. Het waterige ammoniak-mengsel voor het bepalen van de maximale ammoniak-overdracht werd niet aangelooft voordat het de stripper inging.

De kap op de LGL stripper verdeelt de gasfase in twee afzonderlijke compartimenten. De compartimenten 1 tot en met 9 delen hun gezamenlijke gasfase (totaalvolume 2580 liter). Compartiment 10 heeft een eigen gasfase, om de laatste zuurfase zo goed mogelijk te kunnen verzadigen met ammoniak, voordat deze het apparaat verlaat. De inhoud van de gasfase boven zuurcompartiment 10 is 280 liter.

**Figuur 5** Schematische voorstelling en werkelijke uitvoering van de LGL stripper Prototype De Marke.



Een overzicht van de belangrijkste energieverbruikende onderdelen van de installatie is weergegeven in tabel 2. Het totaal vermogen voor de besturing en bewegende onderdelen bedraagt ongeveer 1,13 kW.

**Tabel 2.** Energie verbruikende onderdelen

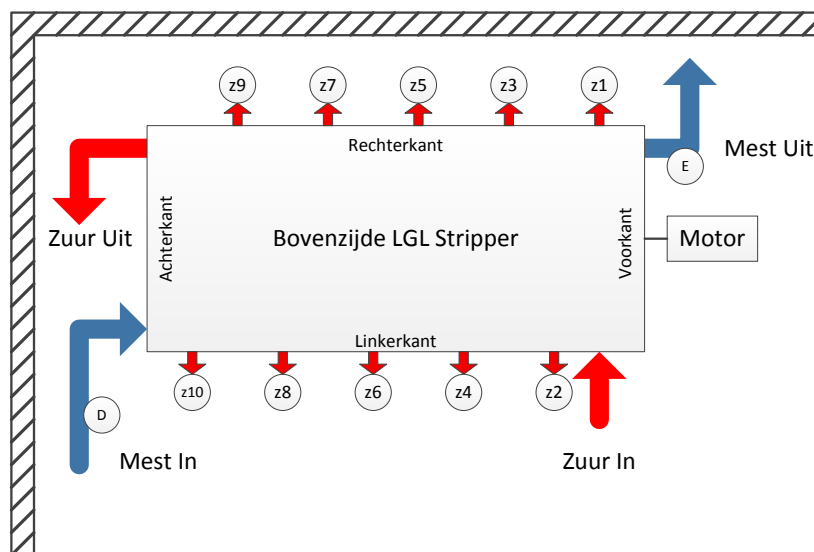
Onderdeel	Functie	Type	Aantal	Vermogen (kW)	Looptijd (min/uur)
Mestpomp	Toevoer naar buffertank	Wangen KL30S	1	2,2	2
Mestpomp	Toevoer naar stripper	Boyser AMP13A25	1	0,25	60
Mestpomp	Afvoer naar mestzak	Boyser AMP13A25	1	0,25	60
Loog pomp	Aanvoer NaOH	Milton Roy GA45D4T3	1	0,15	60
Zuur pomp	Aanvoer vers zuur	Boyser AMP13A25	1	0,25	1
Zuur pomp	Afvoer gebruikt zuur	Boyser AMP13A25	1	0,25	1
Aandrijfmotor	Aandrijving schijven	Elsto/Bonfiglioli A412	1	0,25	60
Besturing	Controle van het proces		1	0,15	60
<b>Totaal*</b>				<b>1,13</b>	<b>60</b>

\* Gewogen vermogen per uur.

### 2.3.2 Bemonstering

Bemonstering van de te behandelen (ammoniak rijke) fase vond plaats aan de ingaande (monsterpunt D, figuur 6) en uitgaande stroom (monsterpunt E, figuur 6) van het Prototype De Marke. Er werd in de eerste drie experimenten geen voorloop genomen, omdat het een doorstroomd systeem is en de afsluiter direct op de hoofdstroom is gemonteerd. Bij de laatste experimenten werd er wél een voorloop genomen, voordat het monster werd getrokken. De manier van monsternamen bleek weinig verschil in de resultaten op te leveren.



**Figuur 6** Bovenaanzicht plaatsing LGL stripper op proefbedrijf De Marke.

Bemonstering van de zure fase vond plaats op de 10 gemarkeerde monsternamenpunten welke waren aangesloten op de zuurbakken in de LGL-stripper (figuur 6). Deze monsternamenpunten waren voorzien van afgesloten koppelingen met daaraan dunne teflon leidingen die in de zuurbakken hingen. Door een passende snelkoppeling (figuur 7) aan te sluiten op de afgesloten koppeling werd een lekdichte verbinding gemaakt met het zuur in een zuur compartiment via een plastic leiding. Er werd 50 ml voorloop getrokken om zowel leiding als monsterspuit voor te spoelen. De voorloop werd afgevoerd als afval, waarna een representatief monster van 30 ml werd getrokken dat werd overgebracht in een gelabelde monsterbuis.

**Figuur 7** Foto van de monsterspuit voor de zuurbemonstering

De monsters werden in het AFSG-milieulaboratorium geanalyseerd. De ammoniak in de zure monsters werd gemeten volgens werkinstructie WI 4.25-114, terwijl de ammoniak in de mestfasen werd gemeten volgens werkinstructie WI 4.25-103 na uitvoering van een gravimetrische verdunning.

Tussen de experimenten werd de stripper gedurende minimaal twee dagen doorgespoeld met de nieuwe ammoniak houdende fase. Hierdoor werd de inhoud van de stripper in totaal vijf keer ververs. De zure fase werd opnieuw gebruikt, omdat deze fase ruim de aangeboden ammoniak kon binden.

### 2.3.3 Overzicht experimenten

Een overzicht van de uitgevoerde experimenten is weergegeven in tabel 3. De mestproducten waren afkomstig van melkvee proefbedrijf De Marke en werden vóór gebruik gescheiden door middel van een SMICON schroefpers (figuur 8).

**Tabel 3.** Overzicht experimenten

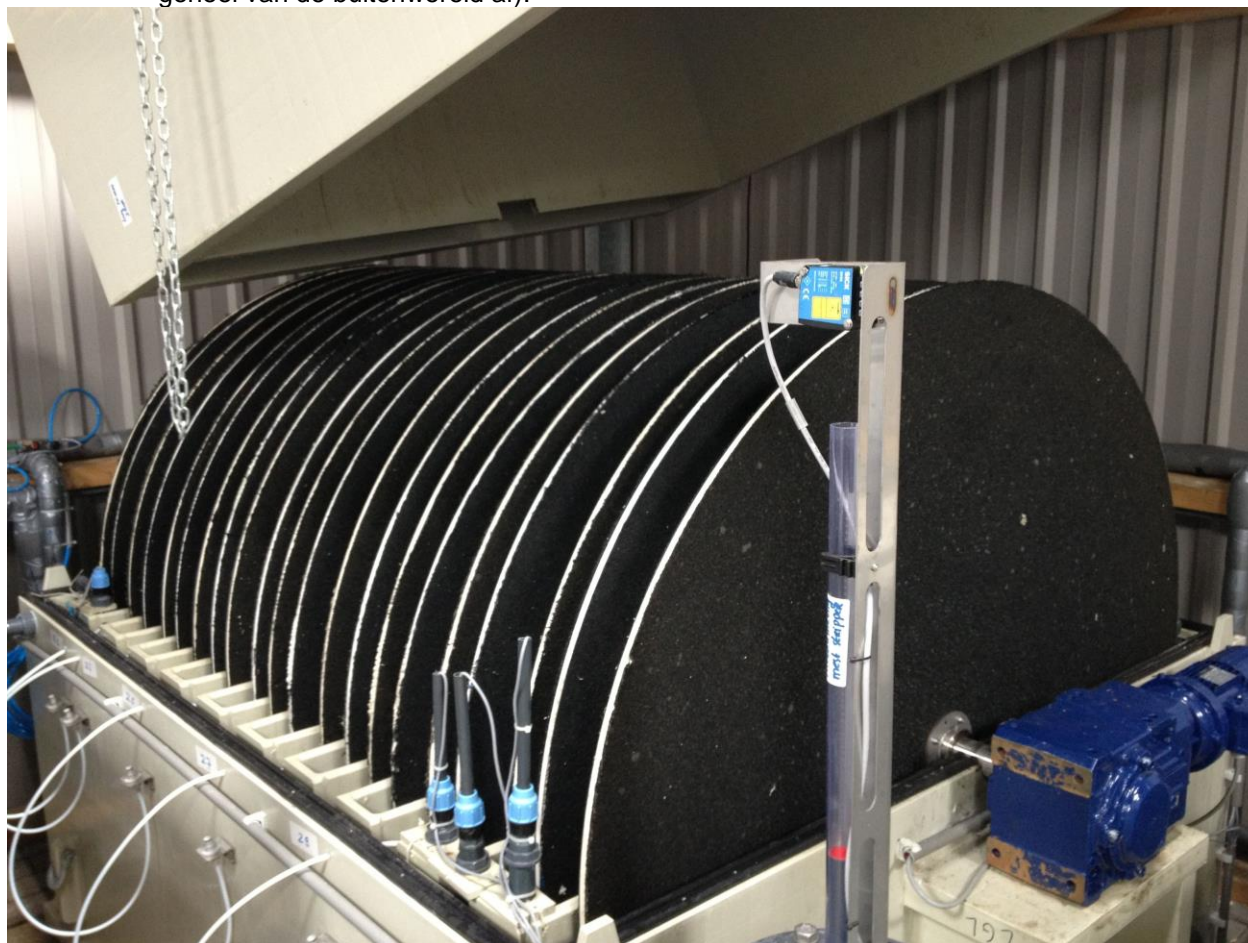
Experiment	Donorfase	Flow mest (L/uur)	NaOH flow (L/uur)	Acceptorfase	Flow zuur (L/uur)
1	NH <sub>3</sub> -water	98	0	Zwavelzuur (37%)	0
2	Dunne fractie drijfmest	100	0	Zwavelzuur (37%)	0
3	Dunne fractie digestaat	100	1.7*	Zwavelzuur (37%)	0
4	NH <sub>3</sub> -water	100.2	0	Zwavelzuur (37%)	0
5	Dunne fractie drijfmest	100	3**	Zwavelzuur (37%)	0
6	Dunne fractie digestaat	100	1.6***	Zwavelzuur (37%)	0

\* Pompsnelheid afhankelijk van pH, setpoint pH10, gemeten pH >10

\*\* Vaste pompsnelheid genomen.

\*\*\* Lichte terug regeling vaste pompsnelheid door vermindering slaglengte

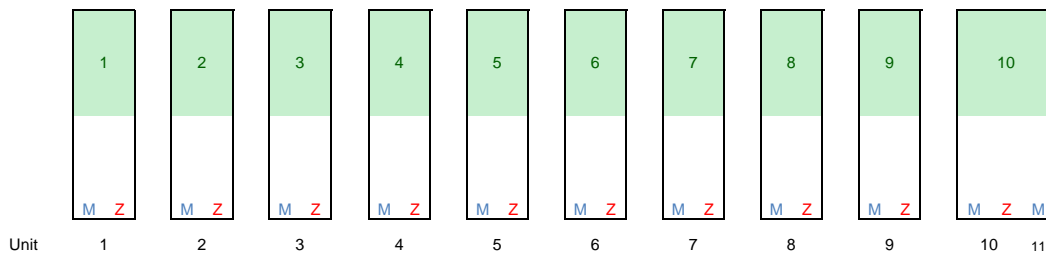
**Figuur 8** LGL stripper op KTC De Marke (de opgetilde kap sluit de opstelling tijdens normaal geheel van de buitenwereld af).



## 2.4 Rekenmodel 2

Rekenmodel 2 is een uitbreiding van rekenmodel 1, geschreven in Visual Basic for Applications (VBA) onder Excel. Rekenmodel 2 beschrijft een tiental LGL prototypen welke naast elkaar zijn gezet (figuur 4). De zuur- en mest-compartimenten zijn met elkaar verbonden. Het zuur stroomt discontinu van unit 1 naar unit 2 etc. en verlaat het model van het prototype vanuit unit 10. De meststroom stroomt continu van unit 11/10 via unit 9 etc. naar unit 1, waar de mest, net zoals bij het prototype, het model van de stripper verlaat (figuur 4).

**Figuur 9** Overzicht compartimenten mest (m), zuur (z) en gasfase (groen) en de gebruikte unit nummers in rekenmodel 2 voor het Prototype De Marke



Bij het maken van het rekenmodel werd in eerste instantie uitgegaan van één aparte gasfase per unit. In overleg met Dorset werd er besloten om in het model ook de tussenschotten tussen de gasfasen te kunnen verwijderen waardoor gasfasen kunnen worden samengevoegd. Doelstelling hierbij was het kunnen berekenen in hoeverre het rendement van het apparaat daalt als de gasfasen worden samengevoegd. Samenvoeging van de gasfasen houdt een versimpeling in van de constructie van het apparaat, waardoor het voor een lager bedrag geproduceerd kan worden.

Bij alle zuur fasen wordt ammoniak opgenomen, waardoor de pH van deze fasen stijgt. Binnen het model wordt het zuurdebiet geregeld door de pH van het zuur in unit 10, omdat de pH van deze fase het snelste stijgt vanwege het feit dat deze fase de hoogste concentratie ammoniak krijgt aangeboden van de vers binnenstromende mest. Als de pH het door de gebruiker ingestelde setpoint overschrijdt, dan wordt de zuurpomp aangezet en zal compartiment 1 voor 80% worden leeggepompt naar een virtueel voorraadvat voor gebruikt zuur (volume en aantal mol verpompte stikstof wordt via een lopend totaal bijgehouden als functie van de tijd). Tegelijkertijd zal er vanuit de overige units zuur in de richting van unit 10 stromen. Nadat 80 % van het zuurcompartiment van unit 10 is weggepompt, wordt het zuur debiet weer op nul teruggezet.

### 3 Resultaten Lab-opstelling LGL-stripper

#### 3.1 Experiment A – Striprendement dunne fractie

Na het vullen van beide compartimenten is het experiment opgestart en na 53 uur en 15 min is het experiment stopgezet. Na afloop van het experiment bleek dat de schijf aan de zuurkant niet goed vast zat op de as, maar wel meedraaide. De schijf aan de mestkant was gemeten vanaf de buitenkant voor 35 cm met mest bedekt. Het niveau in beide compartimenten was flink gedaald. Na afloop van het experiment zijn beide compartimenten terug gewogen:

- Zuurkant 22,7 kg water en zuur (ca. -7,6 kg)
- Mestkant 21,8 kg dunne mest fractie (ca. -8,2 kg)

De niveaudaling werd voor een groot deel veroorzaakt doordat in dit experiment van relatief grote monsterpotten met een inhoud van maximaal 1 liter werd gebruik gemaakt, waardoor bij monsternamen relatief veel materiaal werd afgevoerd. In tabel 4 staat het verloop van de pH-gehalten weergegeven.

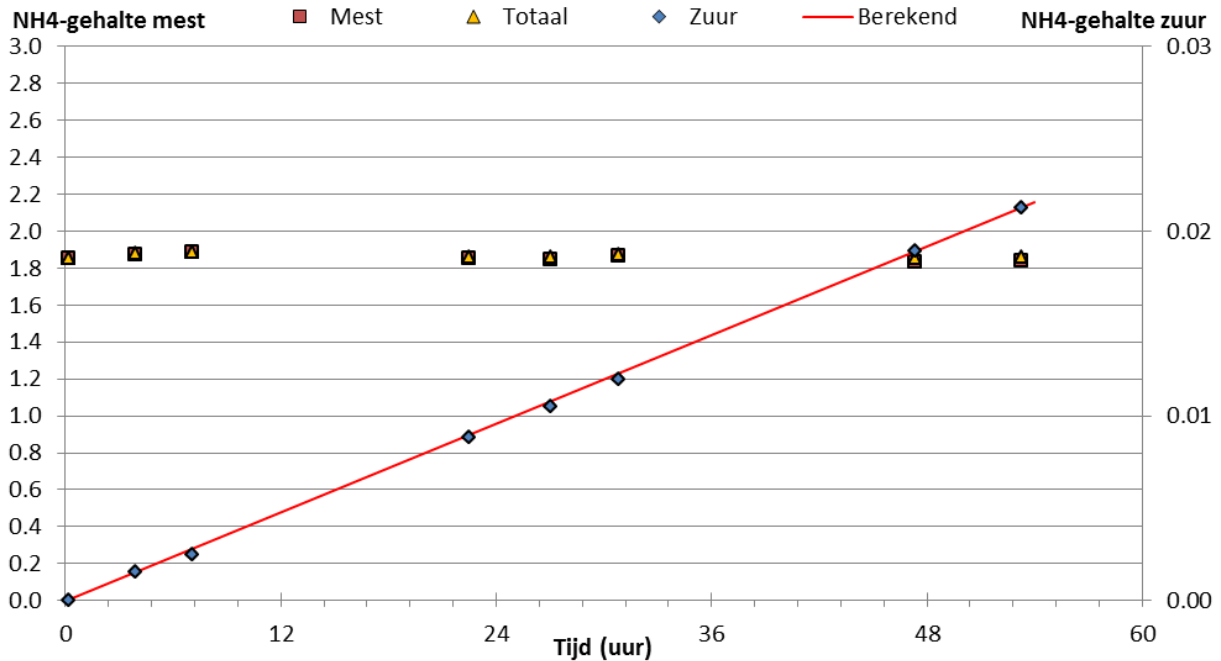
**Tabel 4.** Verloop van de pH-gehalten van het zuur en de mestfase in experiment

Tijd (uur)	pHzuur	pHmest
0	1,4	7,4
4	1,5	7,5
7	1,5	7,5
23	1,5	7,5
27	1,5	7,5
31	1,5	7,5
47	1,6	7,6

In figuur 10 staan de geanalyseerde ammoniumgehalten weergegeven van experiment A. De ammoniumgehalten in de mestfase (rode vierkantjes en gele driehoekjes) zijn in de tijd weergegeven. Het ammoniumgehalte in het zuur is weergegeven met blauwe rondjes.

De initiële stofoverdrachtssnelheid was in dit experiment zeer laag. Hierdoor was het scheidingsrendement van de dunne fractie rundveedrijfmest met 1% zeer laag. Dit wordt veroorzaakt door een relatief lage pH van 7,4 in de dunne fractie bij aanvang van het experiment. Tijdens het experiment loopt de pH weliswaar lichtjes op naar 7,6 maar dat is nog onvoldoende om een goede overdracht te realiseren.

**Figuur 10** Verloop van ammoniumgehalten (g/kg) als functie van de tijd in experiment A. De rode lijn geeft het verloop zoals berekend met het opgestelde model  $[H_2SO_4] = 1,1 \text{ mol/l}$  en stofoverdrachtscoëfficiënt  $K = 2,38E-7 \text{ mol N/sec}$ .



### 3.2 Experiment B – Effect van pH-verhoging

Na het vullen van beide compartimenten is het experiment opgestart en na 167 uur en 30 min is het experiment stopgezet. Tijdens het experiment kwamen de volgende zaken naar voren:

- T=0 uur. De mest is klonterig na het toevoegen van loog, dit verdwijnt later,
- T= 31 uur en (in mindere mate) T=47 uur: er komt vocht uit de stripper bij de afsluiting van de kap. Op T= 31 uur is via de zijopening gekeken of er schuimvorming was opgetreden. Dit bleek niet waarneembaar.
- T=47 uur en later: het zuur geurt sterk naar mest

Na afloop van het experiment zijn beide compartimenten terug gewogen:

- Zuurkant 29,1 kg water en zuur (ca. -2,2 kg)
- Mestkant 27,8 kg dunne mest fractie + loog (ca. -3,2 kg)

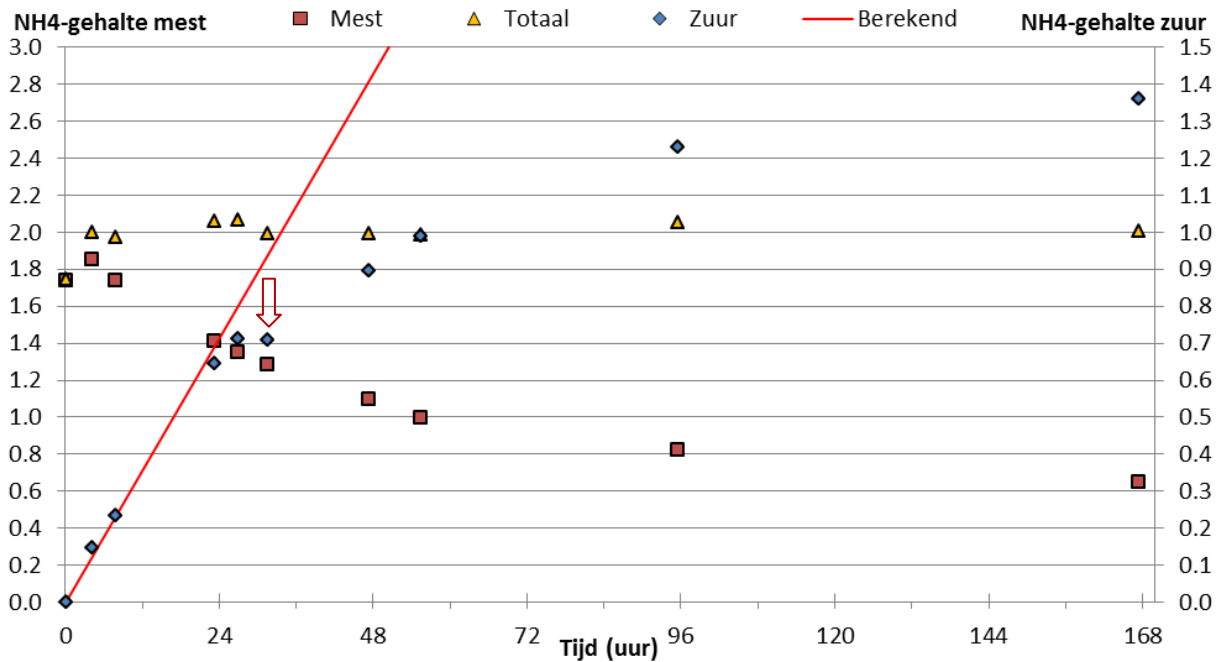
In tabel 5 staat het verloop van de pH-gehalten weergegeven.

**Tabel 5.** Verloop van de pH-gehalten van het zuur en de mestfase in Experiment B

Tijd (uur)	pHzuur	pHmest
0	1,0	12,1
4	1,1	9,6
8	1,1	9,6
23	1,2	9,4
27	1,2	9,4
32	1,2	9,4
47	1,3	9,2
56	1,3	9,1
96	1,4	8,8

In figuur 11 staan de geanalyseerde ammoniumgehalten weergegeven van Experiment B.

**Figuur 11** Verloop van ammoniumgehalten (g/kg) als functie van de tijd in experiment B, met toevoeging van NaOH. De rode lijn geeft het verloop zoals berekend met het opgestelde model  $[H_2SO_4] = 1,1 \text{ mol/l}$  en stofoverdrachtscoëfficiënt  $K = 1,77E-5 \text{ mol N/sec}$ . Bij de rode pijl werd de gasfase van de machine verstoord.



In de eerste paar uur van het experiment heeft een sterke pH-daling plaatsgevonden aan de mestkant. Mogelijk had de concentratie NaOH hoger moeten liggen om een langduriger effect te krijgen. Door de pH-verhoging was de initiële stofoverdrachtssnelheid een factor 74,4 hoger dan de initiële stofoverdrachtssnelheid in experiment A. De pH-verhoging bleek ook een invloed te hebben op de stofoverdracht van  $NH_3$  uit de dunne fractie. In experiment B lag deze met 68% aanzienlijk hoger dan in experiment A. Bij de rode pijl ( $T=31$  uur) is de verstoring van de gasfase te zien als gevolg van het openen van de zijopening. Het proces herstelt zich over de tijd (ongeveer 4 uur).

### 3.3 Experiment C – Effect van temperatuurverhoging

Na het vullen van beide compartimenten is het experiment opgestart en na 123 uur en 55 min is het experiment stopgezet. De temperatuur van de mest was  $20,7^\circ\text{C}$  voor het vullen. De ingestelde temperatuur van de verwarming in het compartiment van de mest was continu ingesteld op  $60^\circ\text{C}$ .

Tijdens het experiment kwamen de volgende zaken naar voren:

- T=0 wat schuimvorming op de mest
- T=5.25 uur. Verwarming op alarm, temp was gezakt tot 56 °C, waterniveau was te laag in thermostaat bak. Niveau aangevuld.
- T>21 uur. Bij de rubberen aansluiting tussen kap en bak was vocht te zien over de hele lengte van de mestkant. Aan de zuurkant was geen vocht te zien.
- T=44.8 uur. Voor meting bleek de aan/uitknop op stand=0 te staan. Knop op stand=2 gezet, zodat vanaf nu pas de schijven zijn gaan draaien. Monstername is hierna gebeurd.
- T=52 uur. De mest lijkt wat dunner te zijn.
- T=117 uur. LGL-stripper maakt semi-continue huilend, piepend geluid wat lijkt samen te hangen met rotatiefrequentie.
- T=124 uur. Vochtige plek onder de LGL-stripper. Hier vallen de vochtdruppels die van de zijkant mestkant komen bij de rubber aansluiting. (Slijtage rubber aansluiting begint te groot worden en moet voor een volgende experiment vervangen worden)
- T=124 uur. Zuur heeft een mestlucht, maar is wel helder.

Na afloop van het experiment zijn beide compartimenten terug-gewogen:

- Zuurkant 37,1 kg water en zuur (ca. +7,1 kg, maar circa 1 liter via monsters weg)
- Mestkant 13,7 kg dunne mest fractie + loog (ca. -16,3 kg waarvan circa 1 liter monsters)

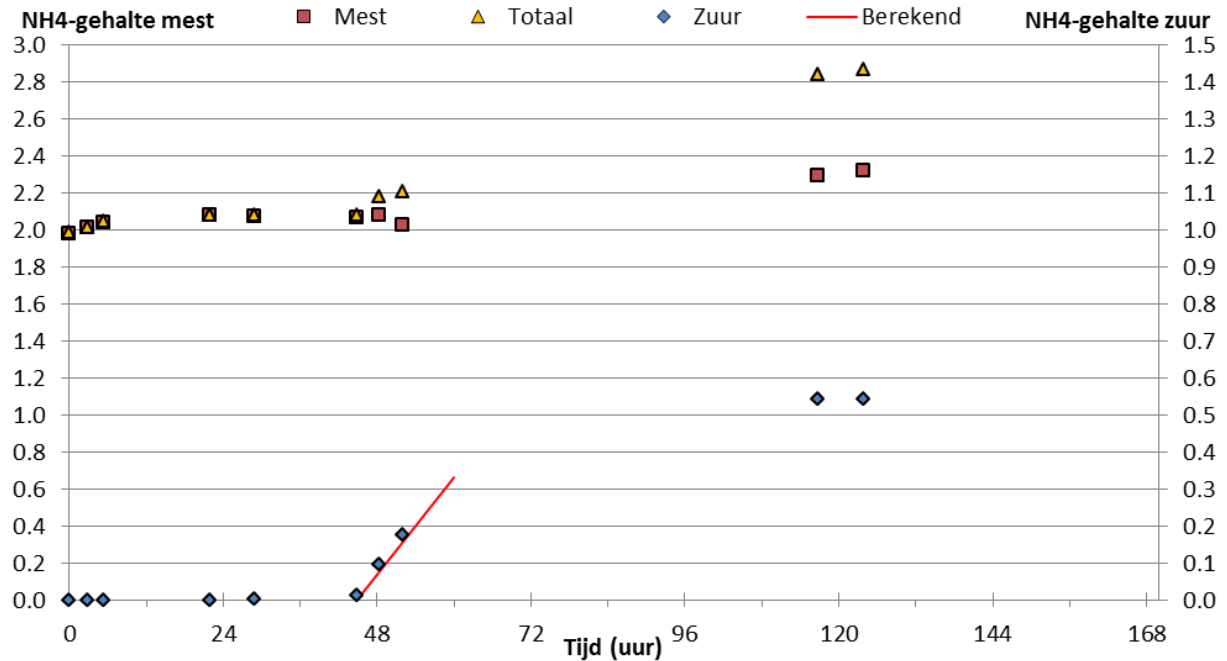
In tabel 6 staan de gemeten temperatuur en pH-gehalten in beide compartimenten weergegeven.

**Tabel 6.** Temperatuur in de compartimenten tijdens experiment C

Tijd (uur)	T <sub>zuur</sub> (°C)	T <sub>mest</sub> (°C)	pH <sub>zuur</sub> (-)	pH <sub>mest</sub> (-)
0	19	37	1,0	7,2
3	21	37	1,1	7,3
5	25	37	1,1	7,3
22	29	38	1,2	7,3
29	29	36	1,2	7,3
45	31	40	1,2	7,4
48	35	45	1,3	7,7
52	40	48	1,3	7,7
117	34	41	1,5	7,0
124	34	41		

In figuur 12 staan de geanalyseerde ammoniumgehalten weergegeven van Experiment C.

**Figuur 12** Verloop van ammoniumgehalten (g/kg) als functie van de tijd. De rode lijn geeft het verloop zoals berekend met het opgestelde model  $[H_2SO_4] = 1,1 \text{ mol/l}$  en stofoverdrachtscoëfficiënt  $K = 1,77E-5 \text{ mol N/sec}$ .



Na het op temperatuur komen van de mest werd het experiment gestart ( $T=44$  uur) door de aandrijfmotor voor de schijven aan te zetten. Op dat moment neemt het stikstofgehalte in de zure fase toe, iets wat in de voorgaande 44 uur niet het geval was. De initieel gemeten stofoverdrachtssnelheid vanaf dit punt ligt ruim 55 keer hoger dan de initiële stofoverdrachtssnelheid gemeten in experiment A. Het scheidingsrendement van de dunne fractie bleek toch nog 27% te bedragen, ondanks het feit dat de pH gedurende het hele experiment lager was dan 8.

De verhoging van de initiële stofoverdrachtssnelheid bij  $40^\circ\text{C}$  wordt verklaard door een verhoging van de uittreding van ammoniak uit de mestfase bij toenemende temperatuur. Verhoging van de uittreding van ammoniak uit de zuurfase vindt om dezelfde reden ook plaats, maar omdat de concentratie vrij ammoniak in de zuurfase uiterst laag is, is het netto effect van temperatuurverhoging een verbetering van het transport van ammoniak van de mestfase naar de zuurfase.

Naast ammoniak wordt ook het transport van waterdamp op eenzelfde manier gestimuleerd door een verhoogde temperatuur. Verhoging van de temperatuur zorgt in beide fasen voor een verhoging van het uittreden van water. Maar in dit geval is de binding van water aan een fase fysisch van aard: Beide oplossingen hebben een osmotische druk. Het transport van water tussen deze oplossingen wordt gestuurd door het verschil in osmotische druk. De fase met de grootste hoeveelheid zouten zal het water het meeste aantrekken. Netto treedt er daarom transport van waterdamp op van de mestfase naar de zure fase, waardoor laatstgenoemde fase wordt verdund.



De osmotische druk  $\pi$  is voor verdunde oplossingen is weergegeven in vergelijking 1:

$$\pi = iMRT \quad [1]$$

Hierbij is:

- $i$  de van 't Hoff-factor, deze is kleiner dan 1 als er interactie tussen de ionen plaatsvindt als gevolg van niet-ideale verdunning van de opgeloste stoffen.
- $M$  de concentratie van de oplossing (of het concentratieverschil), gegeven in mol per  $m^3$ . Het doet er hierbij niet toe *wat* er is opgelost, wel is het aantal opgeloste deeltjes belangrijk. Voor een 1 mol/liter oplossing van natriumchloride geldt dat  $M=2000$  ( $1000 \text{ mol/m}^3 \text{ Na}^+$ -ionen, en  $1000 \text{ mol/m}^3 \text{ Cl}^-$ -ionen).
- $R$  de gasconstante (ca. 8,3144 joule per mol per Kelvin)
- $T$  de absolute temperatuur in Kelvin

Als gevolg van de verhoogde temperatuur is er tijdens het experiment waterdamp op de koude metalen kap neergeslagen en op een ongecontroleerde manier langs de rubberen afsluiting buiten het apparaat terecht gekomen. Hierdoor wordt het maken van een sluitende massabalans moeilijk. Het probleem speelde met name toen de schijven gingen draaien, omdat de verdamping van het water vele malen wordt versneld door een groter oppervlak.

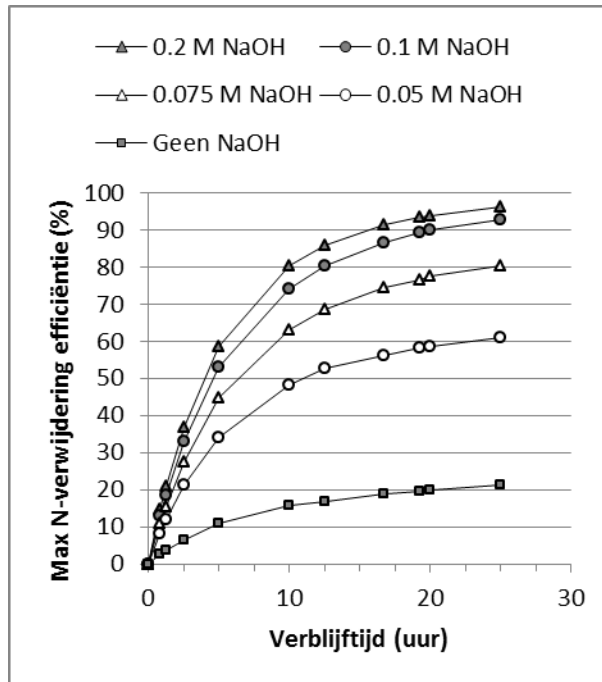
De gemeten toename van de stikstofconcentratie in de mest is het gevolg hiervan, immers, er gaat waterdamp uit de mest (in slechts beperkte mate zal er ammoniak via deze waterdamp mee worden getransporteerd), waardoor de concentratie ammoniak in de mest toeneemt.

Genoemde problemen worden als leerpunten gezien voor een toekomstig ontwerp dat van ammoniakoverdracht bij verhoogde temperatuur zou uitgaan. Samengevat zal er in deze gevallen gelet moeten worden op condensatie, afdichting en overslag van condenserende vloeistoffen tussen mestfase en zure fase.

### 3.4 Berekeningen met model 1 – Verblijftijd en toevoeging NaOH

Uitgaande van de fit voor het behandelde mestproduct (figuur 13, lijn met gevulde vierkantjes), werd met behulp van het model uitgerekend hoe het systeem zich zou gedragen als er natronloog aan modelmest zou worden toegevoegd. Deze modellering is eerder beschreven.<sup>5</sup>

**Figuur 13** Modelresultaten voor de verblijftijd als functie van verwijderingspercentage voor modelmest (een op mest gestoeld virtueel mengsel van bufferende stoffen en zouten met: 32 mM NaHCO<sub>3</sub>, 59 mM Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 16 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.15 M KCl, 0.11 M NH<sub>3</sub> en 0.09 M HCl) en natronloog mengsels bij verschillende concentraties natronloog



Figuur 13 maakt duidelijk dat langere verblijftijden nodig zijn voor een hogere ammoniak verwijdering. Het verband is niet lineair, voor de laatste procenten verwijdering moet een aanmerkelijk langere verblijftijd gegenereerd worden.

Ook is de functie van aanloggen van het mestproduct essentieel voor het verhogen van de ammoniak verwijdering. Bij gelijkblijvende N-verwijdering kan door aanloggen de verblijftijd in de LGL stripper drastisch worden verkort.

## 4 Resultaten Prototype De Marke

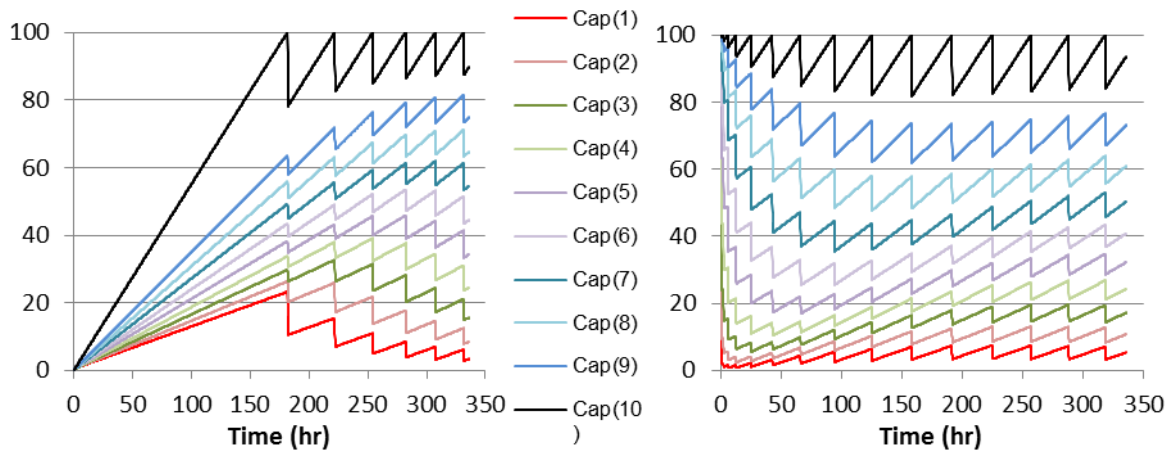
### 4.1 Berekeningen met model 2 – Keuze van het aantal gasfasen

Het aantal gasfasen van de stripper heeft invloed op de fabricagekosten (paragraaf 2.4). Om de invloed van het aantal gasfasen goed in te schatten, werden met model 2 berekeningen uitgevoerd. Uitgaande van een 10-unit stripper met de afmetingen van het eerste prototype, met bijbehorende K-waarde, werden bij respectievelijk 1, 2 en 10 gasfasen, rendementen voor de N-verwijdering van 66.5, 67.8 en 70.7% berekend. In dit rekenvoorbeeld is er een marginale verbetering van de stofuitwisseling te zien als gevolg van het aanbrengen van schotten in de gasfase van de stripper. Voor het prototype op praktijkschaal werd daarom gekozen voor het toepassen van één enkel schot waarmee gasfase 10 werd afgezonderd van de rest van de machine.

### 4.2 Berekeningen model 2

Er werden een tweetal simulaties gedaan met model 2, waarbij mest met 100 L/uur door de stripper stroomde. De concentratie ammoniak in de zure fasen van de stripper werd in simulatie I op nul gesteld, terwijl de concentratie ammoniak in de zure fasen van de stripper in simulatie II op nagenoeg volledige verzadiging (>99,9%) werd gezet. In figuur 14 zijn van beide experimenten de verlopen van de gebruikte invangcapaciteit voor ammoniak als percentage weergegeven van alle compartimenten.

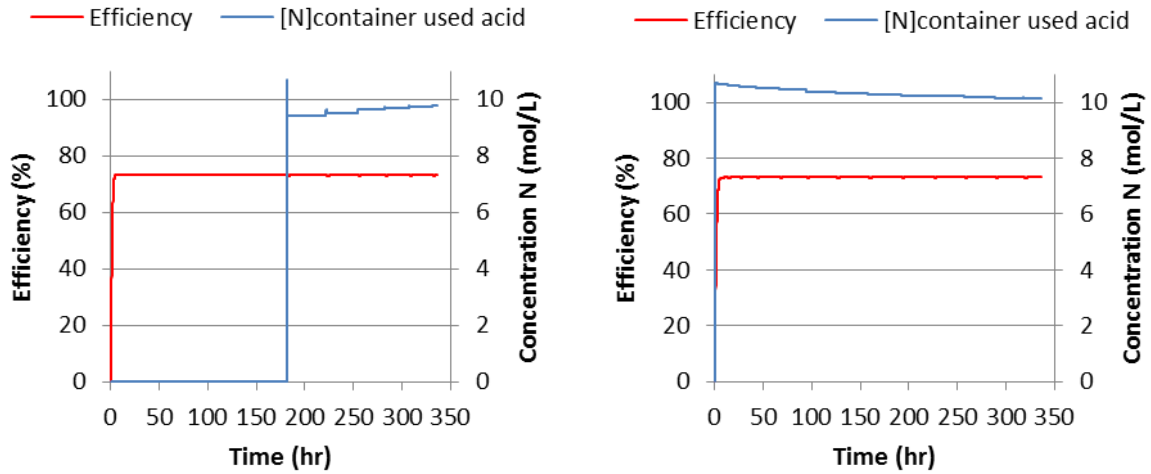
**Figuur 14** Invangcapaciteit (percentage) van de zure fasen in simulatie I (links) en II (rechts)



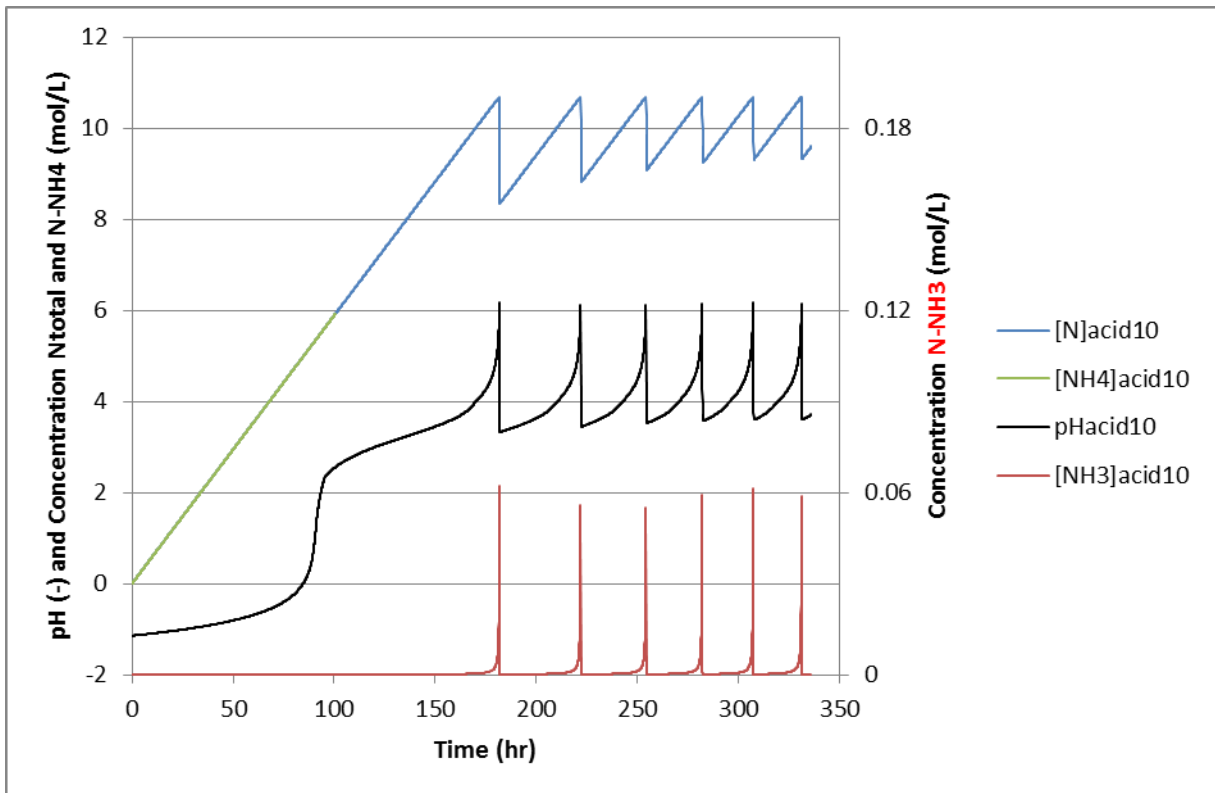
Duidelijk is te zien dat de dynamische eindsituatie van simulaties I en II op elkaar gaan lijken. Dit houdt in dat een uit balans gebrachte LGL stripper zichzelf inregelt naar eenzelfde dynamische situatie. Het initiële stijgingspercentage van unit 10 ligt boven normaal omdat deze unit twee mestfasen heeft.

De eindconcentraties in de opslagcontainer voor gebruikt zuur gaan in beide gevallen naar dezelfde waarde toe (ongeveer 10 mol/L, ofwel 140 g N/kg, ofwel 14 massaprocent N, figuur 15). De zuurlozingen (periode ongeveer 30 uur) hebben nauwelijks invloed op het overall rendement van de stripper.

**Figuur 15** Efficiëntie en concentratie N in de opslagcontainer van het gebruikte zuur in simulatie I (links) en II (rechts)



**Figuur 16** Belangrijke parameters van unit 10 tijdens simulatie I.



In figuur 16 is de pH uitgezet als functie van de tijd voor unit 10 tijdens simulatie I. Tijdens de opname van ammoniak door het gebruikte zwavelzuur neemt de pH toe. De tweewaardigheid van het zuur is duidelijk te onderscheiden door de sterke stijgingen in de pH bij 90 en 180 uur. Bij het vollopen van de invangcapaciteit van het zuur neemt op een gegeven moment de concentratie  $\text{NH}_3$  toe in de zure fase. Als er vervolgens zuur wordt gespuid, zakt deze waarde weer tot nagenoeg nul af.

## 4.3 Resultaten

### 4.3.1 Totaaloverzicht

Het totaaloverzicht van de analyses van de zuurfasen tijdens de uitgevoerde experimenten is weergegeven in figuur 17. Duidelijk zichtbaar zijn de twee periodes van drie afzonderlijke experimenten, gescheiden door de verticale stippellijnen. De tijd tussen beide periodes werd voor onderhoud aan de stripper. Nadien bleek de ammoniakopname in compartiment Z10 achter te blijven bij de rest. Controle achteraf bracht aan het licht dat de schijf in compartiment 10 niet meer draaide, waardoor de stripper tijdens experimenten 4, 5 en 6 zo'n 10 procent van zijn invangcapaciteit moest missen.

Het verloop van de experimenten kan als volgt worden gekenschetst:

#### Experiment 1: Ammoniak water

Tijdens het eerste experiment werd er een neerslag gevormd in de onderdelen benedenstrooms van het ammoniak doseersysteem. Hierdoor werd het experiment na 5 dagen gestopt. De statische menger werd schoongemaakt en de zeefbocht werd voorzien van een 4 mm zeef. In verdere experimenten werd deze zeef dagelijks schoongemaakt.

#### Experiment 2: Dunne fractie drijfmest

In de aanloop naar het experiment werd de pH dosering afgesteld (pH mest = 10 na aanloggen). Op dag 4 werd het experiment onderbroken doordat er tegen de noodstop werd gestoten. Het setpoint van de loogdosering ging verloren, waardoor er geen loog meer werd toegevoerd gedurende de resterende tijd.

#### Experiment 3: Dunne fractie digestaat

Experiment 3 verliep zonder storingen.

#### Experiment 4: Ammoniak water

Om het neerslag in de statische menger te voorkomen werd er uitgegaan van kraanwater in plaats van het bronwater van De Marke. Naast enkele storingen met betrekking tot de hoog-signalering van de vlotter in het buffervat vóór de installatie op 18 augustus zijn er geen storingen opgetreden. Visuele controle van de zuur monsters toonde geen verkleuringen aan van Z1 t/m Z10 en D, maar monster E was sterk vervuild (ook na het nemen van een voorloop tijdens de bemonstering).

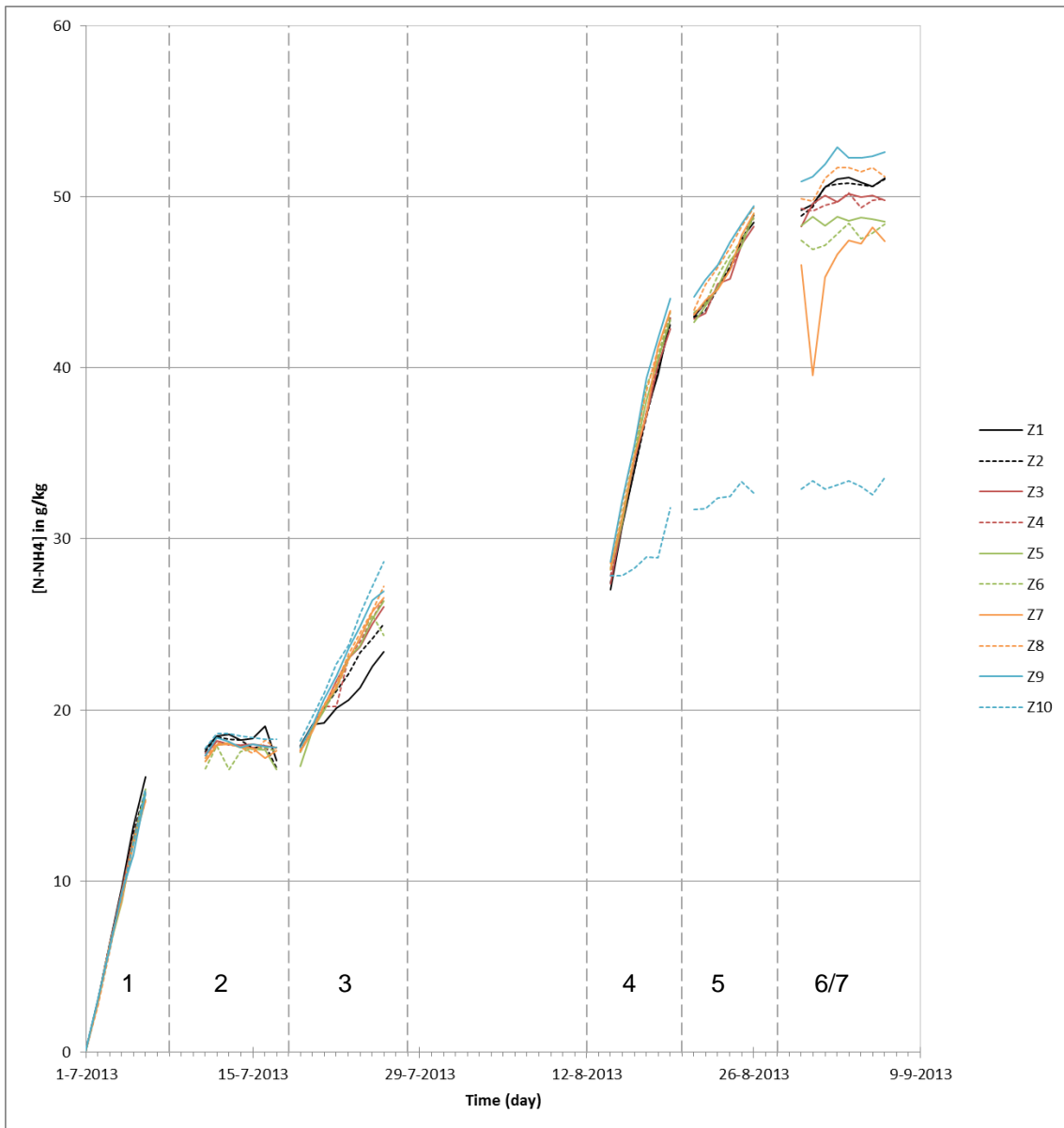
#### Experiment 5: Dunne fractie drijfmest

pH toediening werd vastgezet op 1,78 L loog / 100 L drijfmest. Dit gaf pH 12 aan de ingaande kant van de mest. Bij bemonstering tijdens dag 2 bleek dat het monster uit zuur fase 7 iets troebel was. Na afloop bleek het loogvat ruim half leeg (6 dagen draaien), er werd dus fors meer gedoseerd.

#### Experiment 6: Dunne fractie digestaat

Er werd gestart met het wisselen van dunne fractie naar digestaat. Na twee dagen bleek dat er door technische mankementen aan een pomp van de vergistingsinstallatie geen digestaat meer geleverd kon worden aan de LGL stripper. In plaats van het afbreken van het experiment, werd het doel van het experiment aangepast. De aan- en afvoer van digestaat naar de LGL stripper werd gestopt, zodat deze kon draaien op dezelfde wijze als het prototype Lab-opstelling.

**Figuur 17** Totaaloverzicht van de ammoniak concentratie in de zuurfasen tijdens de zes experimenten (experimenten zijn gescheiden door telkens minimaal 2 dagen doorspoelen van de installatie naar de nieuwe situatie. Gedurende die tijd werden geen monsters genomen)



Naar aanleiding van figuur 17 kan het volgende worden opgemerkt:

Experiment 4 is de herhaling van experiment 1, waar ammoniakwater in de stripper werd behandeld. De richtingscoëfficiënt in grafiek 17 is gelijk aan de massa ammoniakstikstof (g) die per dag per kg zuur wordt ingevangen. Gedurende experiment 1 en experiment 4 werd er 3,0 g ammoniakstikstof per dag ingevangen per kg zuur.

Experiment 5 is de herhaling van experiment 2, waarbij dunne fractie drijfmest werd behandeld tegen zwavelzuur. Door de te lage loogdosering werd er in experiment 2 geen ammoniak vrijgemaakt uit de dunne fractie. Tijdens de herhaling van het experiment bleek dat er per dag 1,1 g ammoniakstikstof per kg zuur kon worden ingevangen.

In experiment 3 werd digestaat behandeld tegen zwavelzuur. Tijdens dit experiment bleek er per dag 1.2 g ammoniakstikstof per kg zuur te worden ingevangen.

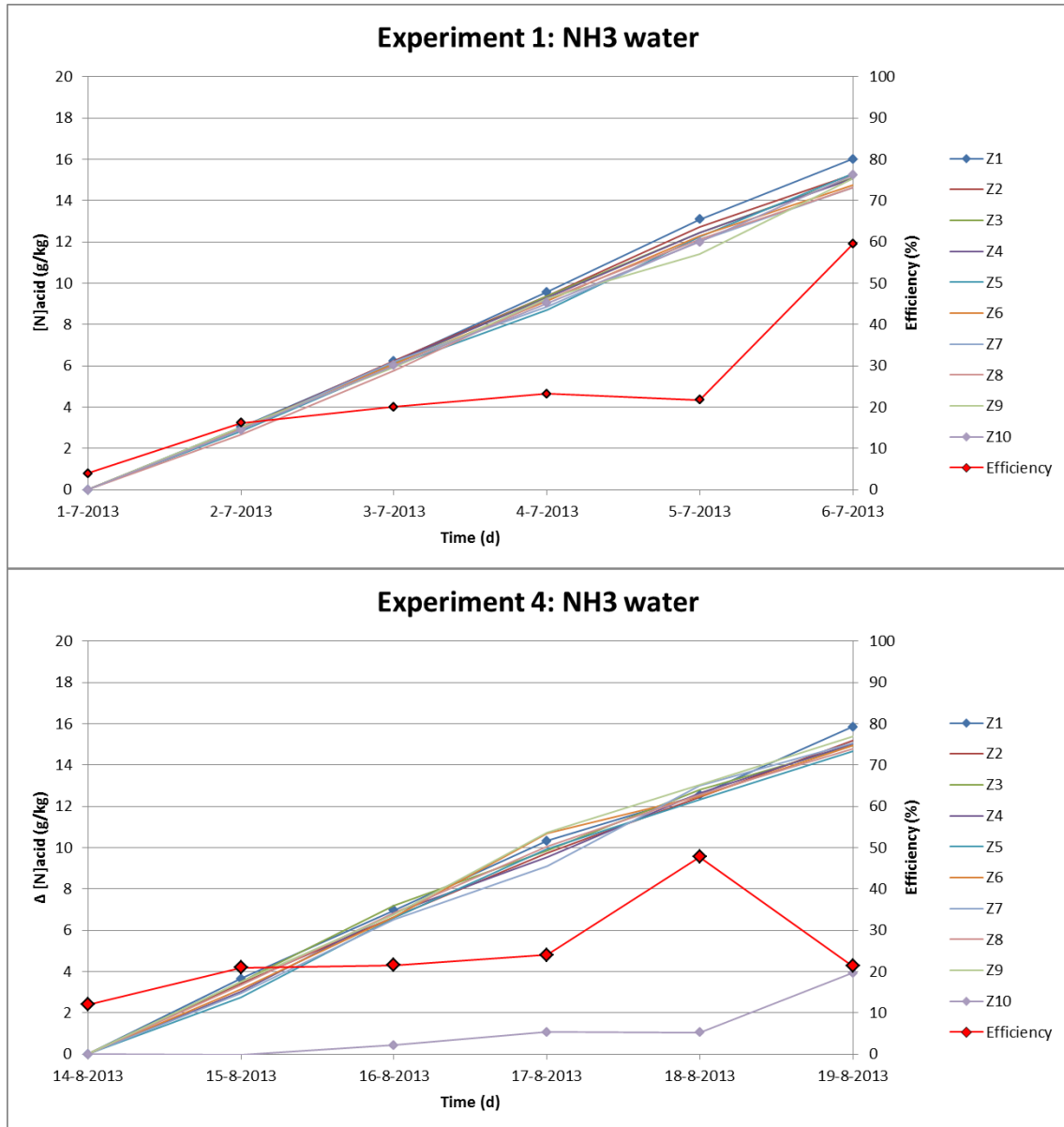
In experiment 6 werd de inflow van digestaat na twee dagen doorspoelen met digestaat (noodgedwongen) stopgezet. Er bleek tijdens de periode hierna nagenoeg geen ammoniak te worden opgenomen.

Op moleculaire basis is de maximale invangcapaciteit van 1 kg zwavelzuur oplossing (37%, 5,34 mol/L) gelijk aan 190,8 g  $\text{NH}_4$  (10,6 mol  $\text{NH}_4$ ). Maar net als eerder in paragraaf 4.2 aangegeven, zal deze concentratie niet compleet bereikt worden doordat de stofoverdracht van ammoniak stopt als de concentratie ammoniak in de zure fase gelijk wordt aan concentratie ammoniak in de gasfase (drijvende kracht voor stofoverdracht wordt nul). Toch is na experiment 6 de maximale invangcapaciteit van het zuur (ongeveer 10 mol  $\text{NH}_4$ ) nog niet bereikt.

4.3.2 Experiment 1 en 4 – Ammoniakwater versus zwavelzuur

Om experimenten 1 en 4 beter met elkaar te kunnen vergelijken werd de voorgeschiedenis van de concentratie ammoniak in de zuurfase verwijderd door het op nul stellen van de eerste waarde in de proef en een gelijke correctie toe te passen op de overige waarden. In figuur 18 zijn de gecorrigeerde concentraties weergegeven.

**Figuur 18** Toename van de ammoniakconcentratie en efficiëntie van de ammoniakverwijdering door Prototype De Marke voor experimenten 1 en 4.





Naast de individuele zuurfasen, werden ook de ingaande en uitgaande stroom van de te behandelen vloeistof bemonsterd. Met behulp van formule 2 werd per bemonstering een efficiëntie van het apparaat uitgerekend. De berekende efficiëntie waarden zijn eveneens opgenomen in figuur 17.

$$\text{Efficiëntie} = 100\% \times \left[ \frac{[\text{N-NH}_4]_{\text{in}} - [\text{N-NH}_4]_{\text{uit}}}{[\text{N-NH}_4]_{\text{in}}} \right] \quad [2]$$

Waarin:

$$\begin{aligned} [\text{N-NH}_4]_{\text{in}} &= \text{De concentratie ammoniumstikstof die de stripper ingaat} \\ [\text{N-NH}_4]_{\text{uit}} &= \text{De concentratie ammoniumstikstof die de stripper verlaat} \end{aligned}$$

De via formule 2 uitgerekende efficiëntie is een momentopname van de performance van de stripper op het moment dat het monster wordt genomen. Door het berekenen van meerdere efficiëntie waarden kan toch een beeld gekregen worden van de veranderlijkheid van de stripper gedurende het experiment.

Uit figuur 18 blijkt dat er bijna geen verschil is tussen de beide experimenten, en dat er gemiddeld 3 gram ammoniumstikstof per dag door 1 kg zuur wordt ingevangen met schijven van elk 1.5 m diameter, uitgaande van een 0.25 mol/L (4.5 g/kg) ammoniak oplossing.

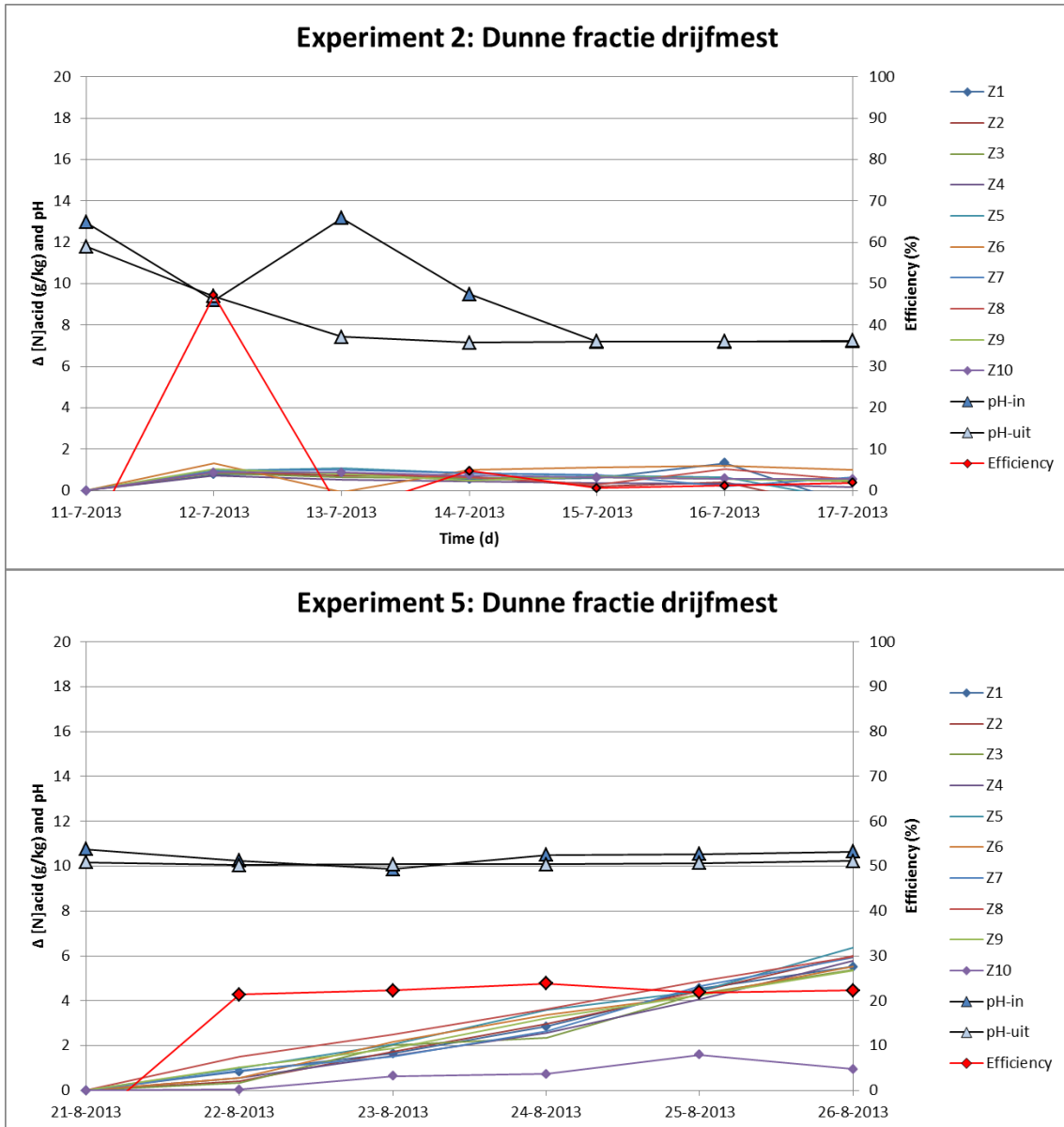
De efficiëntie van de LGL stripper blijft steken op 20% (rode lijn). Omdat er wordt uitgegaan van een waterig mengsel met ammoniak, zullen geen bufferende effecten meespelen. De lage efficiëntie is dan ook waarschijnlijk het gevolg van de doorstroomsnelheid en de geometrie van het systeem.

#### 4.3.3 Experiment 2 en 5 – Dunne fractie drijfmest versus zwavelzuur

Zoals aangegeven in het overzicht (paragraaf 4.3.1) werd alleen tijdens experiment 5 voldoende natronloog toegevoegd. De gevolgen voor de efficiëntie zijn duidelijk zichtbaar in figuur 19.

Bij pH 10 wordt er een actieve overdracht van ammoniak naar de zure fase waargenomen. Het rendement van de LGL stripper ligt dan rond de waarde van 20% dat ook bij ammoniakwater werd bereikt. De netto opgenomen hoeveelheid ammoniumstikstof is lager dan bij de experimenten 1 en 4, omdat de concentratie ammonium in de dunne fractie lager is dan de concentratie ammonium in het ammoniakwater dat werd gebruikt in de experimenten 1 en 4.

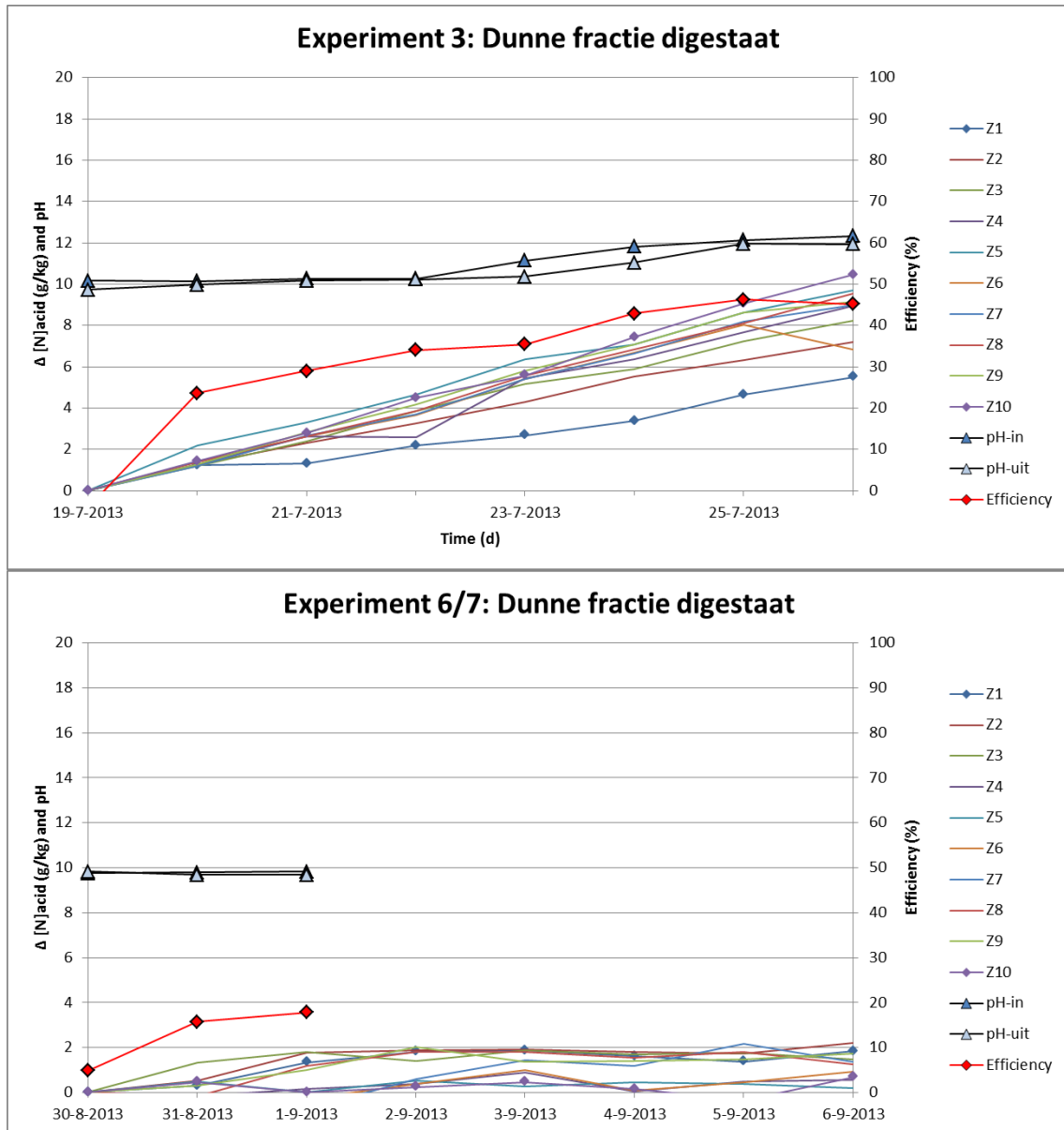
**Figuur 19** Toename van de ammoniakconcentratie en efficiëntie van de ammoniakverwijdering door de stripper voor experimenten 2 en 5.



4.3.4 Experiment 3 en 6/7 – Dunne fractie digestaat versus zwavelzuur

In het eerste deel van experimenten 3 en 6 werd de pH goed op 10 gehouden (figuur 20). Tijdens deze perioden bleek de efficiëntie van de LGL-stripper rond de 20%. Een toename van de pH van het digestaat bleek een verdere toename in de stripper efficiëntie te bewerkstelligen. De maximale invang capaciteit per kg zuur (3 g/dag per kg zuur), zoals gemeten in experimenten 1 en 4 werd echter niet gehaald.

**Figuur 20** Toename van de ammoniakconcentratie en efficiëntie van de ammoniakverwijdering door de stripper voor experimenten 3 en 6/7.



Door technische omstandigheden werd in experiment 6 na 2 dagen de flow van de dunne fractie digestaat stopgezet. Hierna bleek er geen veranderingen meer gevonden te worden in de hoeveelheid ammoniumstikstof die werd ingevangen in het zuur.

## 5 Discussie

### 5.1 Lab-opstelling

#### Effect toevoegen loog / temperatuurverhoging

Uit de resultaten blijkt dat zowel de toevoeging van loog als de verhoging van de temperatuur een manier zijn om de stofoverdracht van ammoniak vanuit mest naar een zure fase flink te verhogen. Het transport van water als gevolg van verhoging van de temperatuur verlaagt het rendement van de stripper en stelt extra eisen aan de bouw ervan. Hierdoor wordt de toevoeging van loog als beste optie gezien.

#### Rendement

Rendementsberekeningen met het tweede model voor een 10-unit LGL stripper met aparte gasfasen voor iedere unit tonen aan dat een rendement van 70,7% tot de mogelijkheden behoort. Bij een mestdebiet van 100 liter per uur (concentratie N = 2 g/kg) wordt er met tussenpozen van 30 uur, 24 liter zuur gespuid (gemiddeld debiet 0.8 liter/uur) met een eindconcentratie van ongeveer 10 mol/L ammonium.

Verdere verhoging van de concentratie natronloog in de mest om het ammoniak verwijderingsrendement te verhogen lijkt in eerste instantie de aangewezen oplossing, omdat daarmee de drijvende kracht voor stoftransport wordt verhoogd. Maar als alle ammonium in ammoniak-vorm aanwezig is (dit is het geval bij  $\text{pH} > 8.5$  bij  $20^\circ\text{C}$ ), zal dit geen verdere verhoging van het stoftransport opleveren tenzij het uitwisselend oppervlak verder wordt vergroot. De afvoersnelheid van ammoniak naar de zuurfase blijkt geen invloed te hebben op het rendement. Deze afvoersnelheid is maximaal bij gebruik van een zuur met voldoende zuursterkte ( $\text{pK}_a$  van het gebruikte zuur kleiner dan 9,24, de zuursterkte van ammonium).

### 5.2 Dimensionering Prototype De Marke vanuit de Lab-opstelling

De benodigde verblijftijd van de modelmest ( $0,11 \text{ mol/L NH}_3$ ) in de lab-opstelling bedroeg 12,5 uur voor een 80% verwijdering van de aanwezige ammoniak. Hiervoor werden schijven gebruikt met een oppervlak van  $0,785 \text{ m}^2$  (1 m diameter, half ondergedompeld).

De verblijftijd van de mest in het prototype LGL-stripper op De Marke bedroeg  $900 \text{ L} / 100 \text{ L/uur} = 9$  uur. Vergeleken met de lab-opstelling is dit nog steeds goed genoeg voor een verwijdering van 75% van de aanwezige ammoniak, als er gelijkwaardige mest zou worden behandeld, die ook op dezelfde manier zou worden aangelooft. Om deze reden werd de verblijftijd niet verhoogd.

De dunne fractie drijfmest van De Marke bevatte echter  $4,5 \text{ g/L}$  ammoniak ( $0,265 \text{ mol/L}$ , dit is 2,4 keer de model hoeveelheid), waardoor meer verwijderd dient te worden. Bij de dimensionering was uitgegaan van  $2 \text{ g/kg}$  ( $0,117 \text{ mol/L}$ ) ammoniak in de ingaande stroom.

De schijven werden vergroot met een factor 2,25 tot  $1,767 \text{ m}^2$  (1,5 m diameter, half ondergedompeld), om rekening te houden met de verschillen tussen statische en dynamische mestdoorvoer. Echter, deze marge bleek al in zijn geheel nodig om een deel van de extra benodigde overdracht te kunnen leveren vanwege de hogere concentratie ammoniak. De beoogde over dimensionering werd daardoor niet gerealiseerd. De overall lage efficiëntie die werd gevonden in experimenten 1 en 4 zijn daarom onder meer toe te schrijven aan de verschillen tussen een statisch bedreven apparaat en een dynamisch bedreven apparaat. Additioneel speelt de ratio volume/oppervlak ( $V/A$ ) per stripper-unit een rol. De ratio van het statische prototype was lager ( $V/A = 38 \text{ L/m}^2$ ) dan dat van de op De Marke geplaatste prototype ( $V/A = 51 \text{ L/m}^2$ ). Hierdoor werd er intensiever gestript in de Lab-opstelling dan met het Prototype De Marke apparaat.

Ongelimiteerd verkleinen van het volume/oppervlak ratio is niet mogelijk. Bij een grotere schijfdiameter wordt het steeds moeilijker om deze in een voldoende klein compartiment te laten ronddraaien zonder dat daarbij de randen worden geraakt.

### 5.3 Interpretatie experimenten

#### 5.3.1 Vergelijking met voorbeeldberekening artikel<sup>5</sup>

De berekeningen in het artikel over de Lab-Opstelling LGL-stripper gaan uit van  $125 \times 0,785 \text{ m}^2 = 98,1 \text{ m}^2$  uitwisselend oppervlak waarmee per dag  $24 \times 2,5 \times 5,3 \times 2 \text{ mol NH}_4 = 11,4 \text{ kg NH}_4$  werd ingevangen ( $116 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dag}$ ). De meest gunstige ammoniakuitwisseling van het Prototype De Marke onder de aangelegde standaardcondities is vastgesteld in experimenten 1 en 4. Het uitwisselende oppervlak van de in mest ronddraaiende schijven bedroeg  $11 \times 1,76 \text{ m}^2 = 19,4 \text{ m}^2$ . Hiermee werd per dag  $610 \times 3 \text{ g} = 1,83 \text{ kg}$  ammoniak ingevangen ( $94 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dag}$ ).

De ammoniak-opname van het Prototype De Marke is 81% van de ammoniak-opname van de Lab-opstelling LGL-stripper. De opschaling en overgang van batch naar doorstroomd apparaat is hiermee "goed" te noemen. Net als in het artikel, heeft de concentratie ammoniak van de ingaande meststroom een aanzienlijke invloed op de benodigde dimensionering van het apparaat en de daarbij gepaard gaande kosten.

Om na te gaan of andere verliezen naar de omgeving een rol speelden bij de LGL-stripper werd een massa balans gemaakt over de stripper gedurende experiment 1 (tot aan moment storing op 6 juli). Er bleek globaal 80 procent van de ammoniak die werd gedoseerd te worden teruggevonden in de zuurfase (De dunne fractie wordt ontdaan van 93,5 kg ammoniak, terwijl er in de zuurfracties 74,9 kg ammoniak werd teruggevonden). Een sluitende verklaring hiervoor is niet te vinden. Vervluchtiging van ammoniak (via luchtlekken in de kast van de LGL-stripper) kunnen een rol hebben gespeeld. Ook kunnen andere processen zoals precipitatie (struviet-vorming) en/of omzettingen een rol hebben gespeeld. Dit is een punt voor nader onderzoek.

#### 5.3.2 Invloed van pH-verhoging van de mestfracties

De tests zijn uitgevoerd met 3 ammoniakrijke vloeistoffen: ammoniakwater, dunne fractie mest en dunne fractie digestaat. De waterige ammoniakoplossing was in het geheel niet gebufferd. Dit houdt in dat zelfs als er veel ammoniak wordt verwijderd, de achterblijvende ammoniak in staat is om de pH van de oplossing voldoende hoog te houden voor verdere afdracht van ammoniak. Dit is niet het geval met de behandelde mestvloeistoffen. Daar zorgt verwijdering van ammoniak voor een daling van de pH, waardoor de drijvende kracht vermindert en de verdere afvoer van ammoniak wordt bemoeilijkt. Een afdoende aanloging van de mestfase is daarom essentieel voor een goede ammoniakverwijdering.

De gemeten ammoniak-overdracht bij behandeling van dunne fractie digestaat en drijfmest bedroeg slechts 40% van de met ammoniakwater gemeten (ideale) waarde. Tussentijdse stijging van de pH bleek een positief effect te hebben voor de gemeten efficiëntie van het apparaat. Zo ging in experiment 3 de pH van 10 naar 12, en werd een verhoging van de efficiëntie in de ammoniak verwijdering waargenomen van 35 naar 45%. Maar deze verhoging van de efficiëntie ging niet gepaard met een verhoogde opname van ammoniak door de zuurfase. Het is daarom waarschijnlijk dat de extra vrijgemaakte ammoniak via de gasfase is ontweken of in het apparaat als neerslag is achtergebleven.

Aanloggen tot pH 10 bleek genoeg om de ammoniakontwikkeling op gang te brengen. In experiment 2 werd de loogdosering onderbroken door een verkeerde instelling van de apparatuur. Hiervoor nam de pH van de mestfractie geleidelijk af, met als gevolg dat er geen uitwisseling van ammoniak meer werd gemeten.

### 5.4 Verbeteringen voor de LGL stripper

Een loodrechte positionering van de wielen van de LGL stripper bij de assemblage op de aandrijfas is erg moeilijk. Hierdoor lopen de wielen aan langs de randen van de zuurbakken en kan er mest bij de

zuurfase gekomen (dit geeft troebele zuurmonsters). Een belangrijk verkoopargument, de zuiverheid van de gemaakte kunstmestvloeistof, komt hierdoor in het geding.

De loogdosering is een punt van aandacht. De achter de loogdosering geplaatste statische menger bleek meerdere malen te verstopten na ongeveer 5 dagen. Lokaal sterk basische concentraties kunnen namelijk ongewenste neerslagvorming in de hand werken.

Het blijkt dat een pH-regeling van de mestfase moeilijk te realiseren is. Deels vanwege de tijd-afhankelijke tegenwerkende buffering van mest, deels vanwege de gevoeligheid van de pH sensor voor externe invloeden zoals de lekstroom over de frequentieregelaar van de motor van het filterpakket. Oplossingen hiervoor zijn mogelijk door middel van een aangepast ontwerp.

Vergelijking van de verschillen in resultaten tussen experimenten met een waterige ammonia-oplossing en experimenten waarin mestproducten worden behandeld tegen eenzelfde zure fase, geeft aan dat de meeste weerstand voor stoftransport niet in de zure fase zit, maar juist in de ammoniak donerende fase. Dit kan nog gedifferentieerd worden naar de volgende stoftransportverschijnselen:

- Gebrekkige aanvoer van ammoniak vanuit de bulk van de filmvloeistof naar het film-oppervlak: diffusielimitering op de schijf
- Voldoende ammoniak in de bulk van de vloeistof maar een slechte overdracht van deze ammoniak naar de filmvloeistof op de schijven, resulterend in een onvoldoende hoeveelheid ammoniak in de bulk van de vloeistoffilm op de schijven.
- Onvoldoende ammoniak in de bulk van het vloeistofreservoir (en daardoor ook onvoldoende ammoniak in de bulk van de vloeistoffilm op de schijven)

Transport door diffusie van ammoniak in de gasfase wordt niet als limiterend gezien, mits de afstand die overbrugd moet worden niet te groot is (maximaal enkele centimeters). Met een diffusiecoëfficiënt van  $4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  kan 80% van een origineel aangelegde concentratie ammoniak in 10 seconden 1 centimeter overbruggen volgens:

$$C/C_{\max} = \exp(-x^2 / (D \cdot t))$$

Met:

- D = Diffusiecoëfficiënt ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- C = Concentratie ammoniak op afstand x
- $C_{\max}$  = De concentratie van de bron
- x = de afstand tot de bron (m)
- t = de tijd (s)

## 5.5 Praktische gevolgen voor de melkveehouder

Een LGL-stripper biedt de melkveehouder een mogelijkheid tot het terugwinnen van waardevolle stikstof uit de dunne fractie drijfmest of vergiste mest op zijn bedrijf. Omdat er ammoniak uit de dunne fractie drijfmest wordt gehaald, kan er binnen de huidige regelgeving meer mest worden geplaatst op het land. De vrijgemaakte stikstof is geconcentreerd en kan worden gebruikt om een deel van de benodigde kunstmest te vervangen.

Het Prototype De Marke heeft laten zien dat het gebruik van dunne mestfractie of digestaat uit een vergister praktisch mogelijk is. Doorstroomproblemen nabij het looginjectiepunt moeten nog wel worden opgelost.

Het Prototype De Marke verwerkt per jaar (8000 draaiuren)  $800 \text{ m}^3$  dunne fractie mest, hetgeen overeenkomt met de mestproductie van een bedrijf met zo'n 28-30 hoog productieve melkkoeien. Hiervoor is ongeveer 9000 kW nodig, wat neerkomt op € 2000 aan energiekosten. Dit energiegebruik is afgeleid van het huidige prototype en de huidige instellingen. Het is nog niet geoptimaliseerd naar een laag energieverbruik. Dit is nog een aandachtspunt voor het vervolg.

Uit de dunne fractie mest wordt ongeveer 40% van de ammoniak verwijderd. Deze ammoniak komt terecht in de zure fase (totaal 480 kg N, concentratie meststof 140 g N / liter, volume per jaar 3.4 m<sup>3</sup>). De pH van de geproduceerde meststof ligt nabij pH 6. Deze is afhankelijk van de concentratie ammonium in de mest. Modelberekeningen laten zien dat een hoger rendement haalbaar is.

Toekomstige verbeteringen van het "Prototype De Marke" stripper moeten resulteren in een verhoging van de hoeveelheid teruggewonnen ammoniak. De hoeveelheid geproduceerde kunstmeststof zal daardoor toenemen, de concentratie ervan zal gelijk blijven.

De prestaties van het huidige prototype De Marke zijn nog onvoldoende om van een rendabel en voor de praktijk interessant proces te spreken. Hiervoor dient nog een verbeteringslag te worden doorgevoerd in het ontwerp en in het verwerkingsproces.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

- Het is mogelijk om ammonium uit mest te strippen met zowel de Lab-Opstelling (geen meststroom aanwezig) als het Prototype De Marke (meststroom van 100 L/uur).
- De overdracht van ammoniak naar de zure fase van het Prototype De Marke ligt op 81% van de waarde van de Lab-opstelling:
  - Laboratorium opstelling: 116 g/m<sup>2</sup>-dag
  - Prototype De Marke: 94 g/m<sup>2</sup>-dag

Beide cijfers werden gemeten met waterige ammoniak oplossingen, waar geen bufferende effecten in optraden zoals deze kunnen optreden in mestproducten. De waarde van 81% is goed.

- De overdracht van ammoniak uit mestfracties naar de zure fase blijft achter (48% bij het laboratorium prototype, 40% bij Prototype De Marke):
  - Laboratorium opstelling: 55.6 g/m<sup>2</sup>-dag
  - Prototype De Marke: 37.6 g/m<sup>2</sup>-dag

De ammoniak stofoverdracht vanuit de mestfase is hierbij limiterend.

- De zure fase blijft ammoniak opnemen tot nabij verzadiging. Hierdoor is er voldoende uitzicht op een hoge concentratie stikstof in het eindproduct, waardoor het doel "Kunstmest van onder de staart" is te realiseren. Hiervoor is wél relatief meer mest nodig, omdat de mest tot op heden nog maar voor 40% van ammoniak wordt ontdaan.
- Tijdens het proces treden nog verliezen op in de hoeveelheid ammonium-N. Dit volgt uit de massabalans van de beide vloeistoffasen. De stripper zal worden onderzocht op neerslagen op de bodem.

### 6.2 Aanbevelingen

Een verhoging van de overdracht van ammoniak naar de zure fase kan gerealiseerd worden door het verhogen van de concentratie ammoniak in de gasfase. Het is dan ook essentieel dat de gasfase goed van de buitenlucht is afgesloten, maar ook dat het vrijmaken van ammoniak uit de mestfase goed verloopt. Kritieke parameters hierin zijn de loogdosering en het uitwisselende oppervlak per volume-eenheid mest. Dit leidt tot de volgende praktische aanbevelingen:

- Zorg voor een goede afdichting van de stripper
- Zorg voor een diffuse instroom van natronloog, om hoge lokale concentraties te voorkomen
- Zorg voor een zo groot mogelijk uitwisselend oppervlak per volume-eenheid.

De doorstromingsnelheid van de stripper is van invloed op het rendement van de ammoniak-verwijdering. Technologische concepten die hierop inspelen dienen verder onderzocht te worden, en op hun praktische uitvoerbaarheid te worden getoetst.

De dosering van loog verdient aandacht. Bij een zeer lange verblijftijd in de LGL stripper moet wellicht aanvullend gedoseerd worden, om de pH daling als gevolg van de verwijdering van ammoniak te compenseren. Hierdoor hoeft de mest vóór binnenkomst in de stripper minder te worden aangelood, zodat de vorming van neerslagen in aanvoerleidingen voorkomen kan worden.



## 7 Literatuur

1. Hoeksma, P. *Production of mineral concentrates from animal manure*. Poster 2010; Available from: <http://edepot.wur.nl/159636>.
2. Hoeksma, P. and F.E. de Buissonjé, *Mineralenconcentraten uit dierlijke mest*, Wageningen UR Livestock Research Rapport 626, Lelystad, 2011.
3. Starmans, D.A.J. and M. Timmerman. *Method and system to transfer a volatile substance*. 2010. World Patent WO/2010/126361.
4. Starmans, D.A.J. and M. Timmerman, *Gas-Vloeistof-Gas Stripper - korte rapportage*, Wageningen UR Livestock Research Vertrouwelijk rapport 214, Lelystad, 2010.
5. Starmans, D.A.J. and M. Timmerman, *Apparatus for the ammonium recovery from liquid animal manure*. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013. **29**(5): p. 761-767.



Wageningen UR Livestock Research

Edelhertweg 15, 8219 PH Lelystad T 0320 238238 F 0320 238050

E [info.livestockresearch@wur.nl](mailto:info.livestockresearch@wur.nl) | [www.livestockresearch.wur.nl](http://www.livestockresearch.wur.nl)