

# BETUWSE KUNSTMEST



RAPPORT

2010  
30

stowa

BETUWSE KUNSTMEST

WINNING VAN STIKSTOF EN FOSFAAT UIT URINE

STOWA

2010

30

ISBN 978.90.5773.496.0



stowa@stowa.nl www.stowa.nl  
TEL 033 460 32 00 FAX 033 460 32 01  
Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort  
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

# COLOFON

Amersfoort, 2010

UITGAVE STOWA, Amersfoort

AUTEURS Iemke Bisschops LeAF  
Miriam van Eekert LeAF  
Ferdinand van Rossum GMB  
Martin Wilschut GMB  
Hielke van der Spoel WSRL

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Bert Palsma STOWA  
Tonnis van Dijk Nutriënten Management Instituut (NMI)  
Grietje Zeeman WUR-Milieutechnologie/LeAF  
Hans Wouters Brightwork BV, Mannen van de Wit  
Harm Baten Hoogheemraadschap Rijnland

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA rapportnummer 2010-30  
ISBN 978.90.5773.496.0

# TEN GELEIDE

Dit rapport omvat de resultaten van het project “Betuwse Kunstmest: Winning van stikstof en fosfaat uit urine”. De haalbaarheid van terugwinning van stikstof en fosfor uit apart ingezamelde humane urine is op semi technische schaal onderzocht op een proeflocatie in Tiel. Dit project was gezamenlijk initiatief van GMB en Waterschap Rivierenland. Beide partijen leverden een financiële bijdrage in de vorm van menskracht, materieel en/of analyses. De pilotproef werd uitgevoerd op het terrein van slibverwerking GMB in Tiel en de analyses zijn grotendeels uitgevoerd in het laboratorium van het waterschap.

De resultaten van de analyses die in de loop van het project aan alle verschillende waterstromen zijn uitgevoerd zijn verzameld in een database waar men indien gewenst over kan beschikken. Belangstellenden kunnen contact opnemen met GMB.

De urine was afkomstig van het “Moeders voor Moeders” project van Scheringh Plough. Dit leverde een behoorlijke hoeveelheid publiciteit op in de landelijke pers maar meer belangrijk maakte deze samenwerking het ook mogelijk om met verse urine van constante kwaliteit en in voldoende groot volume te werken. Stowa financierde de ondersteuning door LeAF. De Provincie Gelderland heeft een substantiële financiële bijdrage aan het onderzoek geleverd in het kader van de Stimuleringsregeling Milieu Gelderland.

De maatschappelijke discussie rond de hergebruik van fosfaat en de zuiveringsdoelstelling ten behoeve van schoon oppervlaktewater komen in dit project op een innovatieve manier samen.

Amersfoort, juni 2010

De directeur van de STOWA  
Ir. J.M.J. Leenen

# SAMENVATTING

## INLEIDING

Humane urine vormt in afvalwaterzuiveringssystemen een van de grootste belastingen van het zuiveringsproces. Een substantieel deel van de investeringen in installaties en processen en daarmee verbonden kosten is terug te voeren op de verwijdering van stikstof en fosfaat die met de urine in het afvalwater terechtkomen. De afgelopen jaren is er een toenemende belangstelling voor nieuwe sanitatieconcepten. De STOWA Koepelgroep ONSS (Ontwikkeling Nieuwe Sanitatie Systemen) geeft in de strategienota "Anders omgaan met huishoudelijk afvalwater" aan dat de focus de komende jaren primair gericht dient te zijn op de implementatie van kennis op het gebied van humane urine- en fecaliënbehandeling via pilotprojecten. Zo kan ervaring worden opgedaan ten aanzien van bijvoorbeeld de wijze van inzameling, transport en verwerking.

Het project Betuwse Kunstmest beoogde te zamen met andere projecten binnen het thema "nieuwe sanitatie" een praktische bijdrage te leveren aan het duurzaam inrichten van de Nederlandse afvalwaterketen in de toekomst. Belangrijkste doelstelling van dit project was om, met in achtname van (milieu-)rendement en efficiency, stikstof en fosfaat uit urine te verwijderen en te winnen opdat het kan worden gebruikt voor de productie van kunstmest.

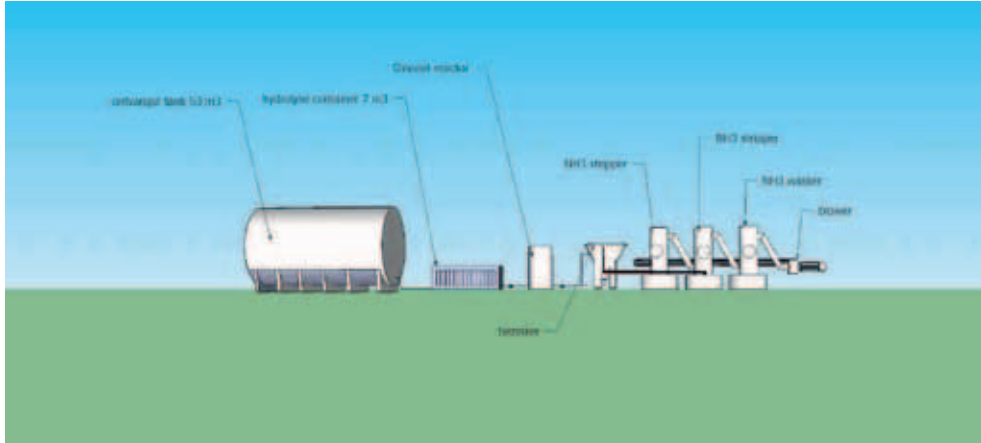
In samenwerking hebben Waterschap Rivierenland en GMB het project Betuwse Kunstmest geïnitieerd. In dit project is gekozen voor winning van fosfaat én stikstof uit urine in de vorm van struviet en ammoniumsulfaat op de slibverwerkingslocatie van GMB, gelegen naast de locale RWZI, in Tiel. De urine was afkomstig van "Moeders voor Moeders". Schering Plough maakt uit deze ingezamelde urine medicijnen die de vruchtbaarheid bevorderen. De verwerkte urine die normaliter op het riool wordt geloosd is in het Betuwse Kunstmest project verder behandeld in een proefinstallatie die in onderstaand schema is weergegeven. De twee hoofdprocessen waren struvietproductie gevolgd door productie van ammoniumsulfaat. Voor deze volgorde is gekozen om ongewenste neerslagvorming in de stripinstallatie te voorkomen. Om dezelfde reden is ook gekozen om als eerste stap in het proces direct na hydrolyse de (gevormde)  $\text{CO}_2$  uit de vloeistof te strippen. Bij struvietproductie wordt fosfaat en een deel van de stikstof uit urine gewonnen na toevoegen van magnesiumzouten. Bij productie van ammoniumsulfaat wordt het merendeel van de resterende stikstof (ammonium) gewonnen in een stripinstallatie en vervolgens opgelost in zwavelzuur waardoor een zure ammoniumsulfaatoplossing ontstaat. Struviet en ammoniumsulfaat kunnen worden afgezet als grondstof voor de kunstmestindustrie. Waterschap Rivierenland en GMB hebben het project in samenwerking met LeAF, Schering Plough en Stowa uitgevoerd.

In dit project is eveneens een eenvoudig rekenmodel ontwikkeld dat tijdens het bedrijven van de proefinstallatie en in de toekomst gebruikt kan worden om het proces meer inzichtelijk te maken. Het in Excel opgestelde rekenmodel koppelde de theorie van stikstof- en fosfaatverwijdering aan de in de proefinstallatie behaalde resultaten om zo de resultaten te verklaren. Daarnaast is het mogelijk om op basis van de opgedane ervaring het rendement van deze installatie voor behandeling van urine met andere samenstelling te voorspellen.

## RESULTATEN

In eerste instantie is de installatie ingeregeld en vanaf begin januari tot begin mei 2009 is in totaal 135 m<sup>3</sup> onverdunde urine verwerkt en 85 m<sup>3</sup> verdunde urine. De samenstelling van de urine was constant. Elke nieuwe levering urine evenals de uitgaande stromen van de diverse reactoren werden geanalyseerd op 24 parameters waaronder T, pH, CZV, N<sub>kjeldahl</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P <sub>totaal</sub>, en PO<sub>4</sub>.

### BEHANDELINGSCONCEPT VAN URINE IN "BETUWSE KUNSTMEST"-PROJECT



### HYDROLYSEREACTOR EN STRUVIETREACTOR (LINKS) EN STRIPINSTALLATIE (RECHTS)



## DE BEHANDELING VAN URINE

Onder de meest optimale procesomstandigheden werd er uit de onverdunde urine meer dan 90% van de N<sub>kjeldahl</sub> en ammonium-N verwijderd en meer dan 94% van de P <sub>totaal</sub>. De CZV van de urine lag rond de 13 g/l en bleef onveranderd. Het sulfaat- en natriumgehalte van het effluent was aanzienlijk hoger dan van onbehandelde urine omdat de urine in de hydrolyse reactor/CO<sub>2</sub> stripper eerst werd aangezuurd met zwavelzuur en vervolgens op hogere pH gebracht met natronloog. Normaal gesproken zal lozen van het effluent geen problemen opleveren aangezien dit gebeurt in overleg met de verantwoordelijke voor de waterzuivering. Bovendien is het volumeaandeel van urine in zijn algemeenheid hooguit 1% van de totale volumevracht en is het waarschijnlijk dat slechts een beperkt deel hiervan behandeld zal worden.

Voor vier keer verdunde urine lagen die verwijderingresultaten iets lager dan voor onverdunde urine namelijk op 89% (N) en 81% (P). De CZV-, sulfaat- en natriumgehalten van de behandelde verdunde urine waren lager dan voor onverdunde urine

### PRODUCTIE VAN STRUVIET EN AMMONIUMSULFAAT

De gemeten struvietvorming bedroeg ongeveer  $1,7 \text{ kg/m}^3$  urine. Dit is ongeveer 60% van de hoeveelheid struviet die op grond van de P-verwijdering gevormd zou zijn. Het “verlies” is te verklaren door de bezinking van de struviet die in het begin van het bedienen van de installatie nog niet optimaal verliep. De gevormde struviet blijkt relatief zuiver te zijn en weinig tot geen verontreinigingen te bevatten.

De ammoniumsulfaatproductie bedroeg ongeveer  $35 \text{ kg ammoniumsulfaat/m}^3$  urine. Dit is 85% van de maximaal berekende productie. Ook het ammoniumsulfaat bevatte weinig tot geen verontreinigingen.

### MEDICIJNRESTEN IN STRUVIET EN AMMONIUMSULFAAT

Er is gedurende korte tijd urine waaraan medicijnen waren toegevoegd door de installatie gevoerd om te onderzoeken in welke mate de medicijnresten in de struviet en/of ammoniumsulfaat terecht zouden komen. Uit de resultaten bleek dat de medicijnen voornamelijk door de installatie heenlopen en niet ophopen in de gevormde struviet en ammoniumsulfaat.

### ELEKTRICITEIT

Voor de energievoorziening van de proefinstallatie werd onder andere gebruik gemaakt van de op de locatie aanwezige laagwaardige restwarmte van de slibverwerking. Deze restwarmte blijft normaal onbenut. Voor onverdunde urine werd een energieverbruik geregistreerd van  $36 \text{ kWh/m}^3$  en voor verdunde urine  $41 \text{ kWh/m}^3$ . Aangezien de installatie voornamelijk was ingericht voor de verwijdering van stikstof is de energiebehoefte omgerekend per kg N: voor onverdunde urine  $6 \text{ kWh/kg N}$  en voor verdunde urine  $26 \text{ kWh/kg N}$ .

### GEUR EN GELUID

Het geluidsniveau in de nabijheid van de proefinstallatie was in het algemeen binnen de daarvoor geldende grenzen, maar voor de verwerking van urine dient wel te allen tijde rekening te worden gehouden met overlast door geurcomponenten.

### VERGELIJKING BETUWSE KUNSTMEST EN ANDERE ZUIVERINGSMETHODEN

De energievraag van het Betuwse Kunstmest proces voor de winning van struviet en ammoniumsulfaat uit gescheiden ingezamelde *onverdunde* urine bedroeg  $105 \text{ MJ/kg urine-N}$  (NB: hoewel uitgedrukt per kg urine-N is in de energie ook deel gebruikt voor de verwijdering van P). Hierbij is de energie gerelateerd aan elektriciteitsverbruik (*als primaire energie*) en de energie gerelateerd aan de productie van de verbruikte chemicaliën inbegrepen in de berekeningen. Bij een vergelijking blijkt dat het energieverbruik van de Betuwse Kunstmest met de hier gebruikte niet optimaal gedimensioneerde procesopstelling hoger is dan voor andere processen. Echter, een groot gedeelte van de energievraag komt voor rekening van de gebruikte elektriciteit ( $58 \text{ MJ/kg N}$  primaire energie, op basis van 38% rendement voor elektriciteit uit diverse bronnen). De rest ( $47 \text{ MJ/kg N}$ ) houdt verband met het chemicaliëngebruik in het proces. Een optimalisatie van de installatie kan het energieverbruik verder terugdringen. Er kan nog een verbeteringsslag gemaakt worden bijvoorbeeld door een optimalisatie van de  $\text{CO}_2$ -stripper, een betere inregeling van de ventilator in de wasser/stripper en een betere benutting van de capaciteit (bijvoorbeeld bij schaalvergroting).

## CONCLUSIES

### *Resultaten proefinstallatie en procesconcept*

- Het is mogelijk om in een niet optimaal gedimensioneerd systeem nutriënten met een voldoende hoog rendement (meer dan 93%) uit separaat ingezamelde onverdunde urine (met 6,3 g N/l en 0,4 g PO<sub>4</sub>-P/l) te verwijderen. Stikstof en fosfor zijn teruggewonnen als struviet en ammoniumsulfaat.
- Bij gebruik van restwarmte om niet ligt het energieverbruik (elektriciteit en chemicaliën) hoger dan voor (andere) biologische methoden, maar de verwachting is dat er nog wel winst te behalen is in het elektriciteitsverbruik. De gebruikte elektriciteit bepaalt voor een groot gedeelte de energie vraag van het hele proces.
- Met de proefinstallatie van het Betuwse Kunstmest project was het mogelijk om stikstof en fosfor met een redelijk rendement (meer dan 89% N verwijdering en meer dan 80% P verwijdering) te verwijderen uit *verdunde* urine. De energiebehoefte van het proces lijkt echter te hoog om het proces met op grotere schaal met verdunde urine te bedrijven.
- De succesvolle terugwinning van nutriënten op de hier gedemonstreerde schaal is alleen mogelijk op een locatie met:
  - voldoende ruimte en lozingspunt voor het effluent op een nabijgelegen waterzuiveringsinstallatie,
  - (laagwaardige) restwarmte om niet voor handen.
  - mogelijkheden voor procesluchtbehandeling
- Bottlenecks in het proces zoals ongewenste biomassagroei en scaling waren goed beheersbaar.
- Het effluent van de Betuwse Kunstmest proefinstallatie heeft weliswaar een hoge pH, CZV-, sulfaat- en natriumconcentratie, maar door verdunning van het effluent met influent (na voorbezinken) van een normale RWZI zal dit geen problemen opleveren voor verdere behandeling.
- *Communicatie, uitdragen resultaten*
- De schaal van het project (op demonstratieniveau) en de initiële berichtgeving onder meer naar aanleiding van het gebruik van urine van “Moeders voor Moeders” en alsook gescheiden ingezamelde urine tijdens het WK vierspan hebben geleid tot veel communicatie in de pers op diverse vlakken: kranten, radio, televisie. Daarnaast hebben er veel locatiebezoeken plaatsgevonden door ingenieurs- en adviesbureaus, waterschappen, particuliere partijen, en studenten/scholen, en heeft het projectteam andere projecten bezocht om ervaringen uit te wisselen.
- De in het project gewonnen struviet is in andere (onderzoeks) projecten beproefd en toegepast.

### *Projectaanpak*

- De pragmatische aanpak die gekozen is vanwege de geringe tijdspanne van het project, heeft vruchten afgeworpen. De opstart/inregeling van het proces heeft wellicht wat langer geduurd dan strikt noodzakelijk maar uiteindelijk heeft de aanpak geleid tot een robuuste en functionele installatie.
- Alle deelnemende projectpartners hebben vanuit eigen competenties een wezenlijke bijdrage aan het project geleverd. Dit creëerde commitment en waardering en bevorderde de samenwerking en daarmee het resultaat in forse mate.



## AANBEVELINGEN

- De veelbelovende resultaten van het Betuwse Kunstmest project geven aanleiding tot toepassing van dit proces op volle schaal met een bedrijfsmatige aanpak.
- Vanwege de beperkte volumes struviet in de “markt” zijn er nog geen geplaveide afzetkanalen voor dit relatief zuivere product. Bij opschaling van struvietproductie zal er vanuit schaalvoordelen meer hoogwaardige afzet moeten worden bewerkstelligd (“kip en ei”).
- Als dit proces in de praktijk wordt uitgevoerd kan medicijnverwijdering relatief gemakkelijk worden geïntegreerd in het proces.
- Medicijnen komen, behalve in geval van ongewenste/onbedoelde lozingen, slechts in het milieu terecht via urine en feces. Aanpak van deze bronnen zal daarom noodzakelijk zijn om daadwerkelijk iets te doen de problematiek van het voorkomen van medicijnen in het milieu. Met de verwijdering van stikstof en fosfor is een begin gemaakt met aanpak aan de bron van verontreinigingen. De verwijdering van medicijnen zal van echt van toegevoegde waarde zijn voor de bronaanpak van verontreinigingen in urine.
- In een vervolgproject zou een businesscase doorgerekend kunnen worden waarbij de grenzen van het project kunnen worden vastgesteld. Hierbij kan dan rekening gehouden worden met stikstofconcentraties, transport van de te behandelen stromen, optimalisatie van elektriciteitsverbruik en andere zaken die binnen het kader van het Betuwse Kunstmest project niet onderzocht konden worden.
- Andere geconcentreerde N- en P stromen kunnen ook behandeld worden in het systeem. Het combineren van dit soort afvalstromen en opschalen naar praktijkschaal is de volgende stap.
- Toelating van “groene” meststoffen verdient bijzondere aandacht
- Afstemming tussen kwaliteitseisen marktvraag en de winningsmogelijkheden moeten worden afgestemd/onderzocht/afgetast.
- Urine moet zo geconcentreerd mogelijk blijven. Minimaliseren van watergebruik is essentieel. Hiermee moet rekening gehouden worden bij het ontwerp van een scheidingsstoilet.
- De volgorde van de verschillende processtappen zoals die binnen het Betuwse Kunstmest project is toegepast is slechts een van de mogelijkheden voor de gecombineerde verwijdering van N en P uit urine en andere stromen. Het verdient aanbeveling om in een volgend project te onderzoeken of een andere volgorde (bijvoorbeeld struviet als laatste stap of gecombineerde hydrolyse en CO<sub>2</sub> verwijdering tijdens opslag) mogelijk leidt tot een efficiëntere verwijdering van N en P en ook een hoger rendement voor de winning van struviet en ammoniumsulfaat.
- Er zijn meerdere criteria die bepalen welk proces het meest geschikt is voor urinebehandeling. Naast de energievraag zijn dit bijvoorbeeld:
  - Waarde van duurzaamheid, wat is bijvoorbeeld de waarde van het terugwinnen van fosfaat?
  - Infrastructuur, logistiek
  - Beschikbare ruimte
  - Te behandelen effluentkwaliteit
  - Inkomende concentraties, kwaliteit urine
  - Robuustheid van het proces, zowel biologisch versus chemisch als keuze voor messtof
  - Wisselende samenstelling van ingaande urinestromen
  - Investing, afschrijving en operationele kosten

# DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 033 - 460 32 00.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort.

Email: [stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl).

Website: [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

# EXECUTIVE SUMMARY

## INTRODUCTION

A substantial part of the investments and operational costs of wastewater treatment plants for communal wastewater is related to the removal of nitrogen and phosphorus. Human urine is one of the main sources of nitrogen and phosphorus in domestic wastewater but only makes up < 1% of the total volume. In the past decade this led to an increased interest in sanitation concepts based on source separation. In the Netherlands STOWA (The Foundation for Applied Water Research) Koepelgroep ONSS (Ontwikkeling Nieuwe Sanitatie Systemen. Development New Sanitation Systems) has recognized that there is a lot of knowledge available on the treatment of human urine and fecal matter. STOWA Koepelgroep ONSS has therefore indicated that the focus of projects in the coming years should be primarily targeted towards the implementation of existing knowledge in this field through pilot scale projects to gain more experience in the collection, transport and processing of these waste streams at a large scale.

In the “Betuwse Kunstmest<sup>1</sup>” project GMB and Waterboard Rivierenland aim to contribute at a practical level to the design/organization of a sustainable Dutch water cycle within the framework of “new sanitation”. The main objective of this project was to remove and recover nitrogen and phosphate from urine for further use in the production of artificial fertilizer at a pilot plant scale while taking the environmental and process efficiency into regard as well.

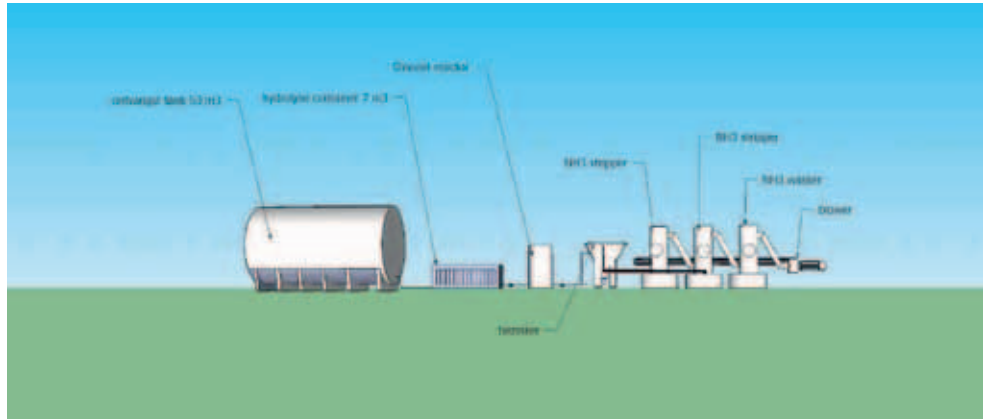
Waterboard Rivierenland and GMB initiated the “Betuwse Kunstmest” project and chose to recover phosphate and nitrogen from urine as struvite and ammonium sulfate at GMB’s sludge processing facility in Tiel near the local wastewater treatment plant. The source separated urine was provided by the “Moeders voor Moeders” (Mothers for Mothers) project by Scheringh Plough. There, fertility increasing hormones are extracted from the urine and normally the extracted urine is discharged to the sewer system. During this pilot scale trial the extracted urine was transported to Tiel for further use in the “Betuwse Kunstmest” project. The process used in Tiel is depicted in the scheme below. The two main processes are the production of struvite followed by the production of ammonium sulfate. Struvite production was placed as the first main step in the process to avoid undesirable precipitation reactions in the stripper units. For the same reason the CO<sub>2</sub> was stripped directly after the hydrolysis of ureum. Magnesium salts are added to remove the phosphate and a small part of the nitrogen via struvite precipitation in the struvite reactor. The main part of the nitrogen is removed in the stripper and subsequently dissolved in sulfuric acid resulting in the formation of an acid ammonium sulfate solution. Struvite and ammonium sulfate may be marketed as a (raw) material for the artificial fertilizer industry. Another activity in the project was the development of a very simple tool in ExCel for the pilot plant that was fine-tuned during operation of the plant. This tool is partially process based (for the hydrolysis and struvite formation), but simply fitted for the stripper performance and aims to couple the theory of nitrogen and phosphorous removal to the results from the pilot plant installation. Also, the tool enables the prediction of the treatment efficiency of the installation for the treatment of urine with a varying composition. Waterboard Rivierenland and GMB carried out this project with LeAF, Scheringh Plough and Stowa as partners.

1 Betuwse Kunstmest is Dutch for artificial fertilizer from the Betuwe. Tiel, which is the city where the pilot plant was installed, is located in the Betuwe region.

## RESULTS

After setting up the pilot plant and finetuning the operational modes the pilot plant processed a total of 221 m<sup>3</sup> of urine from January 2009 until the first week of May 2009. During the period January-March 135 m<sup>3</sup> of undiluted urine was treated and thereafter the performance of the pilot plant was assessed with 85 m<sup>3</sup> (four times) diluted urine. Every new delivery of urine was monitored on 24 different parameters like T, pH, CZV, N<sub>kjeldahl</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P<sub>total</sub> and PO<sub>4</sub>. The same 24 parameters were analysed in the effluents of every process step.

URINE TREATMENT PROCESS CONCEPT FOR THE "BETUWSE KUNSTMEST" PROJECT.



HYDROLYSIS REACTOR AND STRUVITE REACTOR (LEFT) AND STRIPPER UNITS (RIGHT)



## THE TREATMENT OF URINE

More than 90% of the N<sub>kjeldahl</sub> and ammonium-N and more than 94% of the P<sub>total</sub> in the undiluted urine were removed under the most optimal process conditions. The COD of the urine remained unchanged around 13 g/l. Sulfate and sodium levels in the effluent were much higher than in the undiluted untreated urine due to the acidification with sulfuric acid in the hydrolysereactor/CO<sub>2</sub> stripper and the subsequent raise of the pH with NaOH. It is expected that the increased sulfate and sodium levels will not lead to operational problems in the wastewater treatment plant that receives the "Betuwse Kunstmest" effluent, because discharge will normally only take place after consultation with the operators of the treatment plant. Moreover, the volume of the urine normally is not higher than 1% of the total incoming volume in a domestic wastewater plant, and only part of the total volume of urine that is produced will be separated at the source and processed in a "Betuwse Kunstmest" like plant.

The removal efficiencies were slightly lower for the four times diluted urine, namely 89% (N) and 81% (P). The COD, sulfate and sodium levels were also lower compared to treatment of the undiluted urine.

### PRODUCTION OF STRUVITE AND AMMONIUM SULFATE

The total amount of struvite extracted from the process was around 1,7 kg/m<sup>3</sup> urine. This is around 60% of the maximal theoretical amount of struvite that could have been formed based on the P-removal efficiencies observed. The 40% efficiency loss can partially be explained by the fact that the removal of the struvite crystals in the reactor initially turned out to be difficult, because of the very small size of the crystals. The struvite formed was relatively pure and virtually free of “contaminants” like e.g. calcium phosphates.

The ammonium sulfate production was around 35 kg ammoniumsulfaat/m<sup>3</sup> urine. This is 85% of the theoretical maximum production based on N-removal. The ammonium sulfate was relatively pure as well.

### PHARMACEUTICALS IN STRUVITE AND AMMONIUM SULFATE

There has been a small scale trial with pharmaceuticals to assess their fate during treatment of the urine. The pharmaceuticals under study (diclophenac, carbamazepine, and clofibrac acid) did not accumulate in the struvite and ammonium sulfate formed during the trial and ended up in the effluent.

### ELEKTRICITY

Low value residual heat that was available at the site was used as one of the energy sources for the operation of the pilot plant. In addition, the treatment of undiluted urine required 36 kWh/m<sup>3</sup> elektricity and for diluted urine 41 kWh/m<sup>3</sup>. The “Betuwse Kunstmest” pilot plant was mainly designated to remove nitrogen and therefore the electricity demand was calculated per kg N: for undiluted urine 6 kWh/kg N and 26 kWh/kg N for diluted urine.

### ODOR AND NOISE

The noise level in the surroundings of the pilot plant was generally within acceptable levels and legal limits, but odor nuisance has to be taken into account when urine is treated.

### COMPARISON “BETUWSE KUNSTMEST” AND OTHER TREATMENT METHODS

The energy demand of the “Betuwse Kunstmest” process for recovery of struvite and ammonium sulfate from source separated *undiluted* urine was 105 MJ/kg urine-N (NB: the energy demand is expressed per kg N, but also includes the energy needed for P removal). Both the energy demand as electricity (as primary energy) and the energy needed for the production of necessary chemicals was taken into account. Comparing that value with other N- and P removing processes shows that the demand in the process set-up used here (which was not optimized) is higher than for other processes. However a large part of the energy demand is related to the use of electricity (58 MJ/kg N primary energy, based on a 38% efficiency for electricity generation from different sources). The remainder of the energy demand is related to the use of chemicals (47 MJ/kg N). There is room for a decrease in the energy demand: e.g. the CO<sub>2</sub> stripper still needs to be optimized, the blowers in the stripper installation were largely overdimensioned and upscaling of the process will lead to a more efficient use of the capacity. Therefore, it is expected that the energy demand of Betuwse Kunstmest process will decrease in the future.

## CONCLUSIONS

### *Results pilot plant and process concept*

- With the “Betuwse Kunstmest” process it is possible to remove nutrients with a substantial efficiency from *undiluted* source separated urine. More than 93% of the nitrogen and phosphorus were removed (initial concentrations 6,3 g N/l and 0,4 g PO<sub>4</sub>-P/l) even though the set up of the process still needs to be optimized further. Nitrogen and phosphorous were recovered as struvite and ammonium sulfate.
- Despite of the use of free residual heat the energy demand (electricity and process chemicals) of the “Betuwse Kunstmest” process is high compare to other (biological) methods. The electricity demand is likely to decrease after optimization of the process. The electricity demands determines to a large extend the total energy requirement of the process.
- The “Betuwse Kunstmest” pilot plant was able to remove nitrogen and phosphorous with an acceptable efficiency (more than 89% N removal and more than 80% P removal) from *diluted* urine. However, the energy demand of the process seems to be to high for efficient in full scale operation with diluted urine.
- The recovery of nutrients at the scale that was demonstrated here is only possible on a location with:
  - Enough space available and a discharge point for the effluent at a nearby wastewater treatment plant
  - Free (low value) residual heat sources available
  - Possibilities for the treatment of process air
- Potential bottlenecks of the process like undesired biomass growth and scaling were easily controlled.
- The “Betuwse Kunstmest” effluent has a high pH, and high COD, sulfate and sodium levels. Nevertheless, the composition should not render any problems for further treatment in a common domestic wastewater treatment plant after dilution of the effluent with the influent the treatment plant.

### *Communication, propagation of the results*

- The scale of the project (at demonstration scale) and the initial news coverage amongst others as a consequence of using the Moeders voor Moeders urine and the source separated urine at the worldchampionship four-in-hand created a vast amount of media exposure in newspapers, on radio and television. Besides the media other parties visited the project site as well: engineering companies and consultantancies, waterboards, private parties and students and schools. Also, the project team visited other projects to learn about other parties experiences.
- The struvite that was recovered during the project has been tried and applied in other (research) projects.

### *Project approach*

- De pragmatic approach that was chosen because of the limited time available proofed to be fruitful for the project. The start-up may have taken somewhat longer than strictly necessary, but ultimately this led to the set-up of a robust and functional.
- A partners involved in the project delivered a substantial contribution to the project from their own expertise. This created commitment and mutual appreciation. Ultimately this improved the cooperation and in the end the quality of the result obtained.

## RECOMMENDATIONS

- The promising results obtained in the “Betuwse Kunstmest” project give rise to the development of the process in full scale with a business approach.
- The limited amount of available struvite is the main reason for the lack of market sales possibilities for the relatively pure product. Scaling up of the struvite production process will probably render increased sales possibilities (“chicken and egg”).
- Implementation of this process in practice will enable an easy integration of removal of pharmaceuticals from urine.
- Besides undesired/accidental discharge events urine and fecal matter are the main sources of pharmaceuticals in the environment. Treatment of these sources is necessary to ensure effective handling of the problems related to the presence of these compound in the environment. The removal of nitrogen and phosphorous is only the start of dealing with contaminants at the source. The removal of pharmaceuticals will give the concept of processing source separated urine additional value.
- The boundary conditions setting the limits for a successful operation of a full scale “Betuwse Kunstmest” project should be determined in a follow up project. In such a business case nitrogen concentrations, transport of waste streams, optimization of the energy/ electricity demand and other issues that could not be addressed within the “Betuwse Kunstmest” project should be taken into account.
- Other highly concentrated N and P containing waste streams may also be treated in the system. Combining different waste streams and scaling up to practical scale is a next step in the development.
- The development of governance for the admission of “green” fertilizers deserves special attention in the future.
- Fine tuning of quality demands, the market and fertilizer formation possibilities is warranted.
- Urine waste streams should remain as concentrated as possible. Minimization of the use of water for flushing is essential and should be taken into account during the design of separation toilets.
- The process order for the “Betuwse Kunstmest” process train is only one of the possible configurations for the combined removal of N and P from urine and other (waste) streams. A possible follow up project could be dedicated to assess the feasibility of different process schemes (e.g. struvite formation as the last step or combined hydrolysis and CO<sub>2</sub> removal during storage) and the influence on the efficiency of N and P removal and the recovery of struvite and ammonium sulfate.
- There are more criteria besides energy demand that determine the suitability of a process for the treatment of urine:
  - Value of sustainability: what is the return value of recovered phosphate?
  - Infrastructure, logistics
  - Availability of space
  - Desired effluent quality
  - Incoming concentrations, quality of urine
  - Robustness of the process, biologically and chemically and choice of fertilizer
  - Changing composition of urine streams
  - Investments, write-off costs and operational costs

# STOWA IN BRIEF

The Foundation for Applied Water Research (in short, STOWA) is a research platform for Dutch water controllers. STOWA participants are all ground and surface water managers in rural and urban areas, managers of domestic wastewater treatment installations and dam inspectors.

The water controllers avail themselves of STOWA's facilities for the realisation of all kinds of applied technological, scientific, administrative legal and social scientific research activities that may be of communal importance. Research programmes are developed based on requirement reports generated by the institute's participants. Research suggestions proposed by third parties such as knowledge institutes and consultants, are more than welcome. After having received such suggestions STOWA then consults its participants in order to verify the need for such proposed research.

STOWA does not conduct any research itself, instead it commissions specialised bodies to do the required research. All the studies are supervised by supervisory boards composed of staff from the various participating organisations and, where necessary, experts are brought in.

The money required for research, development, information and other services is raised by the various participating parties. At the moment, this amounts to an annual budget of some 6,5 million euro.

For telephone contact number is: +31 (0)33 - 460 32 00.

The postal address is: STOWA, P.O. Box 2180, 3800 CD Amersfoort.

E-mail: [stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl).

Website: [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl).





# BETUWSE KUNSTMEST

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
	EXECUTIVE SUMMARY	
	STOWA IN BRIEF	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
	1.1 Kader en achtergrond van dit project	1
	1.2 Doel	3
	1.3 Onderzoeksvragen	4
	1.4 Leeswijzer	4
<b>2</b>	<b>PRODUCTIE VAN STRUVIET EN AMMONIUMSULFAAT UIT URINE</b>	<b>5</b>
	2.1 Inleiding	5
	2.2 Samenstelling urine	6
	2.3 Hydrolyse van urine	7
	2.4 Struviet	8
	2.4.1 Eigenschappen, vorming en procescondities	8
	2.4.2 Afzet van struviet in de markt	9
	2.5 Ammoniumsulfaat	11
	2.5.1 Vorming en procescondities	11
	2.5.2 Afzet van ammoniumsulfaat in de markt	11
	2.6 Het effluent van het Betuwse kunstmest project	11

<b>3</b>	<b>BESCHRIJVING PROEFINSTALLATIE</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	Locatie en processchema	13
<b>3.2</b>	Fasering van de bedrijfsvoering	14
<b>3.3</b>	Gedetailleerde procesbeschrijving	14
<b>3.4</b>	Opzet rekenmodel	17
3.4.1	Algemene opzet	17
3.4.2	Aanvoer en Hydrolyse-Opslag	19
3.4.3	Hydrolyse reactor – CO <sub>2</sub> stripper	20
3.4.4	Struvietreactor en –bezinker	21
3.4.5	NH <sub>3</sub> -strippers en water	23
3.4.6	Samenvatting van proces	28
<b>4</b>	<b>RESULTATEN PROEFINSTALLATIE</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	Inleiding	29
<b>4.2</b>	Samenstelling van de urine	30
4.2.1	Onverdunde urine	30
4.2.2	Verdunde urine	31
<b>4.3</b>	Omzetting van stikstof en fosfor	32
4.3.1	Onverdunde urine	32
4.3.1	Verdunde urine	35
<b>4.4</b>	CZV en sulfaat	36
<b>4.5</b>	Overige parameters	38
<b>4.6</b>	Elektriciteitsverbruik	41
4.6.1	Onverdunde urine	41
4.6.2	Verdunde urine	42
4.6.3	Verandering in elektriciteitsverbruik	43
<b>4.7</b>	Productie van struviet en ammoniumsulfaat	44
4.7.1	Hoeveelheden	44
4.7.2	Kwaliteit	45
<b>4.8</b>	Chemicaliënconsumptie	45
<b>4.9</b>	Geur en geluid	47
4.9.1	Waarom zijn geur en geluid van belang?	47
4.9.2	Maatregelen rondom de installatie	48
4.9.3	Resultaten	48
4.9.4	Conclusie	48
<b>4.10</b>	Het lot van medicijnresten in de proefinstallatie	49
<b>5</b>	<b>VERGELIJK MODELRESULTATEN MET PRAKTIJKRESULTATEN</b>	<b>51</b>
<b>5.1</b>	CZV, N- en P	51
<b>5.2</b>	Struviet en ammoniumsulfaat	51
<b>5.3</b>	Chemicaliëngebruik	51
<b>6</b>	<b>VERGELIJKING “BETUWSE KUNSTMEST” MET ANDERE (CONVENTIONELE) ZUIVERINGSMETHODEN</b>	<b>54</b>
<b>6.1</b>	Inleiding	54
<b>6.2</b>	Afzet van struviet en ammoniumsulfaat	54
<b>6.3</b>	Effluentkwaliteit en effect van het separaat behandelen van urine op de totale zuivering van huishoudelijk afvalwater	55
<b>6.4</b>	Energieverbruik Betuwse Kunstmest in relatie tot conventionele zuiveringsmethoden	56
<b>6.5</b>	Conclusies hoofdstuk 6	58

7	DISCUSSIE	61
8	CONCLUSIES EN PERSPECTIEVEN VOOR DE TOEKOMST	65
8.1	Conclusies	65
8.2	Aanbevelingen	66
9	REFERENTIES	68
	BIJLAGEN	71
1	DETAILS PROEFINSTALLATIE	73
2	VERLOOP VAN CZV, $N_{\text{KJELDAHL}}$ , $NH_4\text{-N}$ , $P_{\text{TOTAAL}}$ EN $PO_4\text{-P}$ IN DE TIJD – ONVERDUNDE URINE	75
3	VERLOOP VAN CZV, $N_{\text{KJELDAHL}}$ , $NH_4\text{-N}$ , $P_{\text{TOTAAL}}$ EN $PO_4\text{-P}$ IN DE TIJD –VERDUNDE URINE	77
4	RESULTATEN VAN DE INSTALLATIE	79
5	ANALYSERESULTATEN PER PROCESSTAP SAMENGEVAT	81
6	GRAFIEKEN RESULTATEN ONVERDUNDE URINE	89
7	EM FOTO'S STRUVIETMONSTER 2	97

## LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1	Overzicht van decentrale sanitatieprojecten in Nederland (stand van zaken medio 2009)	2
Figuur 2	Behandelingsconcept van urine in "Betuwse Kunstmest"-project.	6
Figuur 3	Prijs van verschillende soorten kunstmest in de afgelopen 10 jaar (14). Maismap = ammoniumfosfaat (Standaard 20:20); triplesuperfosfaat bevat ongeveer 40% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ).	10
Figuur 4	Struviet geproduceerd in het Betuwse Kunstmestproject	10
Figuur 5	Schematische weergave van de urine verwerkingsinstallatie.	13
Figuur 6	De hydrolysereactor C met op de achtergrond de struvietreactor D met bezinker E	16
Figuur 7	Meet en regelkast van strippers en water	16
Figuur 8	Wasser met op de achtergrond twee striptoren G en F	16
Figuur 9	Openingspagina van rekenmodel	18
Figuur 10	Analyses aan afvalwaterstromen en verdere behandeling van de data	19
Figuur 11	Karakteristieken van te behandelen afval(water)stroom	20
Figuur 12	Hydrolyse van aangevoerde afval(water)stroom	20
Figuur 13	Effect van verblijf in hydrolysereactor en CO <sub>2</sub> stripper	21
Figuur 14	Vorming van struviet in struvietreactor en -bezinker	22
Figuur 15	Verwijdering van NH <sub>4</sub> -N in (eerste) stripper G	24
Figuur 16	Verwijdering van NH <sub>4</sub> -N in (tweede) stripper F	24
Figuur 17	Vorming van ammoniumsulfaat (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> in de wasser	25
Figuur 18	NH <sub>3</sub> en NH <sub>4</sub> -N gehalten in gasfase en effluent van de strippers als functie van het luchtdebiet. De proef is uitgevoerd met verdunde urine.	26
Figuur 19	NH <sub>3</sub> en NH <sub>4</sub> -N vrachten in gasfase en effluent van de strippers als functie van het luchtdebiet bij 35,4±0,8°C en pH 10,8±0,3. De proef is uitgevoerd met verdunde urine.	27
Figuur 20	Verwijderingsefficiëntie van NH <sub>3</sub> uit de vloeistoffase als functie van de pH en bij 37,4±1,6°C. De proef is uitgevoerd met onverdunde urine.	27
Figuur 21	Samenvatting van het proces.	28
Figuur 22	Cumulatieve weergave van de hoeveelheid urine die gedurende de testperiode verwerkt is.	29
Figuur 23	Gehaltes CZV, stikstof en fosfor in de urine.	30
Figuur 24	Gehaltes mineralen en pH in de urine	30
Figuur 25	Gehaltes CZV, stikstof en fosfor in de verdunde urine.	31
Figuur 26	Gehaltes mineralen en pH in de verdunde urine.	32
Figuur 27	Resultaten proefinstallatie januari 2009.	33
Figuur 28	Resultaten proefinstallatie februari 2009.	33
Figuur 29	Resultaten proefinstallatie maart 2009.	34
Figuur 30	Resultaten proefinstallatie tijdens het bedrijven met verdunde urine.	35
Figuur 31	Resultaten proefinstallatie tijdens het bedrijven met verdunde urine.	36
Figuur 32	CZV-resultaten proefinstallatie voor onverdunde urine	37
Figuur 33	Sulfaatresultaten proefinstallatie voor onverdunde urine	37
Figuur 34	Magnesiumresultaten proefinstallatie voor onverdunde urine.	38
Figuur 35	Natriumresultaten proefinstallatie voor onverdunde urine	39
Figuur 36	pH-resultaten proefinstallatie voor onverdunde urine	39
Figuur 37	Calciumresultaten proefinstallatie voor onverdunde urine	40
Figuur 38	Elektriciteitsverbruik van de installatie in kWh per m <sup>3</sup> verwerkte onverdunde urine	41
Figuur 39	Elektriciteitsverbruik van de installatie in kWh per kg verwijderd N uit onverdunde urine	41
Figuur 40	Elektriciteitsverbruik van de installatie in kWh per m <sup>3</sup> verwerkte verdunde urine	42
Figuur 41	Elektriciteitsverbruik van de installatie in kWh per kg verwijderd N uit verdunde urine	42
Figuur 42	Terugwinning van stikstof als ammoniumsulfaat, over gehele testperiode.	44
Figuur 43	Microscopfoto's van de gevormde Betuwse Kunstmest-struviet.	44
Figuur 44	Variatie in de opgeloste magnesiumconcentratie in de struvietreactor en -bezinker.	47
Figuur 45	Resultaten van het rekenmodel vergeleken met de in de praktijk gehaalde resultaten voor onverdunde urine.	52
Figuur 46	Resultaten van het rekenmodel vergeleken met de in de praktijk behaalde resultaten voor verdunde urine.	53
Figuur 47	Energiebehoefte (mJ/m <sup>3</sup> urine) om vloeistof in opslagtank en stripper te verwarmen bij afwezigheid van restwarmte	57
Figuur 48	Energiebehoefte (mJ/kg N) om vloeistof in opslagtank en stripper te verwarmen bij afwezigheid van restwarmte	58

**LIJST VAN TABELLEN**

Tabel 1	Samenstelling van urine uit verschillende bronnen/inzamelingsystemen (Data uit (15) en (11))	2
Tabel 2	Eisen aan producten voor terugwinning van P. Overgenomen uit (20)	9
Tabel 3	Lijst van parameters die in de urine en de effluënten van alle processtromen bepaald zijn.	15
Tabel 4	Doel, bijzonderheden en procesomstandigheden van de verschillende onderdelen van de proefinstallatie	17
Tabel 5	Effect van procesparameters op verwijderingsrendement in stripper G	26
Tabel 6	Effect van procesparameters op verwijderingsrendement in stripper F	26
Tabel 7	Gemiddelde N- en P-concentraties (mg/l) in het opslagvat en na het doorlopen van de proefinstallatie in januari, februari en maart.	35
Tabel 8	Gemiddelde N- en P-concentraties (mg/l) in het opslagvat en na het doorlopen van de proefinstallatie gedurende de test met verdunde urine.	36
Tabel 9	Elektriciteitsverbruik van de proefinstallatie in kWh per dag, per m <sup>3</sup> verwerkte urine, en per kg verwijderd N.	43
Tabel 10	Elektriciteitsverbruik van de proefinstallatie in kWh per m <sup>3</sup> verwerkte urine en per kg verwijderd N, zonder het piekverbruik mee te rekenen.	43
Tabel 11	Theoretische en gevonden gewichtspercentages van de elementen in geproduceerde struviet	46
Tabel 12	Analyseresultaten van gevormd ammoniumsulfaat (monster 25 maart 2009)	46
Tabel 13	Gebruikte chemicaliën en hun kenmerken	46
Tabel 14	Analyseresultaten uit de test met medicijndosering	50
Tabel 15	Vergelijking van verschillende processen voor de behandeling van onverdunde urine (15)	55
Tabel 16	Energieverbruik van proefinstallatie met piekbelasting door opstart aan begin van de week (+piek) en zonder piekbelasting (-piek).	59
Tabel 17	Energieverbruik bij Betuwse Kunstmest per kgN in onverdunde of verdunde urine en per m <sup>3</sup> urine	59
Tabel 18	Energie voor nitrificatie/denitrificatie en N-fixatie met Haber-Bosch.	59
Tabel 19	Energie voor verschillende urine behandelingsmethode om stikstof terug te winnen.	60



# 1

## INLEIDING

### 1.1 KADER EN ACHTERGROND VAN DIT PROJECT

Het aandeel van humane urine in ons afvalwater bedraagt met 1,2 tot 1,5 liter per persoon per dag niet meer dan 1% van het totale volume huishoudelijk afvalwater. Toch is 85% van de stikstof, 47% van het fosfaat en het grootste deel van medicijnen en hormoonstoffen in ons huishoudelijk afvalwater uit urine afkomstig (2). Daarom vormt humane urine in afvalwaterzuiveringssystemen een van de grootste belastingen van het zuiveringsproces. Een substantieel deel van de investeringen in installaties en processen en daarmee verbonden kosten is terug te voeren op stoffen die met urine in het afvalwater terechtkomen.

De eisen ten aanzien van lozingen op het oppervlaktewater worden steeds strenger in verband met de Europese kaderrichtlijn water. Een van de mogelijke oplossingen is om urine bij de bron te scheiden van vaste ontlasting. Men kan gesepareerde urine vervolgens gescheiden behandelen en herbruikbare N- en P-verbindingen, maar (op termijn) ook (hormoonversturende) medicijnresten verwijderen. Landelijk zijn er een aantal onderzoeksinitiatieven gaande op dit gebied (22). Voorbeelden van zulk onderzoek zijn:

- plaatsing urinescheidingstoiletten
- terugwinning van N en P
- toepassing verwerkte urine als meststof
- mobiele urineverwerking
- verwijdering van medicijnresten uit urine

Het onderzoek is nog in de initiërende of voorbereidende fase.

De afgelopen jaren is er een toenemende belangstelling voor brongescheiden sanitatieconcepten. De STOWA Koepelgroep ONSS (Ontwikkeling Nieuwe Sanitatie Systemen) geeft in de strategienota "Anders omgaan met huishoudelijk afvalwater" (2) aan dat de focus de komende jaren primair gericht dient te zijn op de implementatie van kennis op het gebied van humane urine- en fecaliënbehandeling via pilotprojecten. Het opdoen van ervaring door middel van pilotprojecten is noodzakelijk om de verschillende vragen te beantwoorden die er leven ten aanzien van bijvoorbeeld de wijze van inzameling, transport en verwerking. Inmiddels zijn dit soort projecten waarbij ervaring wordt opgedaan met de inzameling en het transport van urine op meerdere plaatsen in het land gestart.

De motieven van GMB en het Waterschap om aandacht te besteden aan nieuwe sanitatiesystemen zijn duidelijk. GMB is een familiebedrijf met activiteiten op het gebied van water, energie en bodem. Kennisgedreven en in samenwerking met ketenpartners wil GMB tot duurzame vernieuwing en innovatie in de waterketen komen. Waterschappen, gemeenten en andere betrokken partners zijn belangrijke stakeholders voor GMB. Uit het oogpunt van doelmatigheid en het terugdringen van de maatschappelijke kosten, de bedrijfsvoering van zuiveringsinstallaties evenals het beheer en functioneren van rioolssystemen wil GMB hier graag proactief en op innovatieve wijze aan bijdragen. Waterschap Rivierenland ziet nieuwe sanitatie



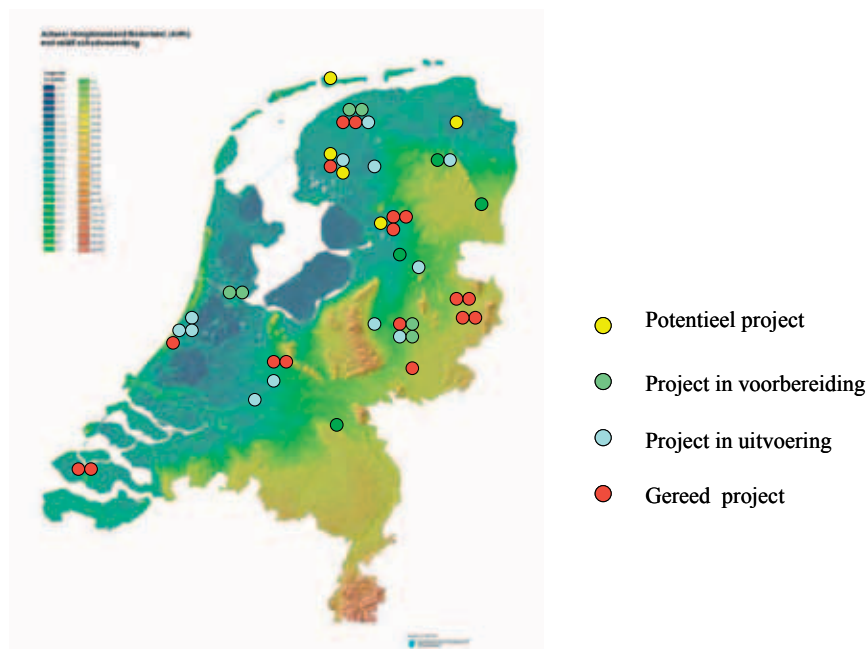
als een innovatiethema dat kan leiden tot meer doelmatigheid en duurzaamheid in de afvalwaterketen. Het project Betuwse Kunstmest moet samen met andere projecten binnen het thema “nieuwe sanitatie” een praktische bijdrage leveren aan de toekomstige inrichting van de Nederlandse afvalwaterketen.

In samenwerking hebben waterschap Rivierenland en GMB het project Betuwse Kunstmest geïnitieerd. In dit project is gekozen voor winning van fosfaat én stikstof uit urine in de vorm van struviet en ammoniumsulfaat. De slibverwerkingslocatie van GMB, gelegen naast de lokale RWZI, in Tiel was een geschikte locatie om ervaring op te doen met de verwerking van humane urine tot (grondstof voor) kunstmest. Dit was de aanleiding voor Waterschap Rivierenland (WSRL) en GMB om het “Betuwse Kunstmest” project op te starten en in samenwerking met LeAF, Schering Plough en Stowa uit te voeren. GMB is de projectverantwoordelijke voor het ontwerp, de bouw en het optimaliseren van de proefinstallatie. WSRL faciliteerde het project bijvoorbeeld door middel van de uitvoering van analyses en heeft bovendien een adviserende rol gehad evenals LeAF. De urine die in dit project behandeld is was afkomstig van het “Moeders voor Moeders”-project van Schering Plough. Schering-Plough maakt uit de urine die jaarlijks door ongeveer 36.000 zwangere vrouwen wordt geleverd medicijnen die de vruchtbaarheid bevorderen. Wat overblijft van de urine gaat normaal het riool in, maar wordt nu voor een deel gebruikt voor deze proef. Moeders voor Moeders heeft geen commercieel belang bij deze proef maar wil met haar deelname graag een bijdrage leveren aan een beter milieu.

Deze rapportage bevat de resultaten van de samenwerking tussen Stowa, Waterschap Rivierenland, GMB Watertechnologie B.V., Schering-Plough en LeAF. De in dit project gegenereerde kennis kan gebruikt worden om in de praktijk het volgende op een grotere schaal te bereiken:

- Een duurzame afvalwaterketen door de ontwikkeling van een schakel in de waterketen volgens het principe van nieuwe sanitatie;
- Het terugwinnen van de nutriënten fosfor en stikstof uit een afvalstof met de bedoeling deze (opnieuw) nuttig en verantwoord toe te passen als (kunst) mest;

FIGUUR 1 OVERZICHT VAN DECENTRALE SANITATIEPROJECTEN IN NEDERLAND (STAND VAN ZAKEN MEDIO 2009)<sup>2</sup>



<sup>2</sup> Met dank aan B. Swart (koepelgroep ONSS, Stowa).

- Meer energiezuinige productie van grondstoffen voor kunstmest in de toekomst;
- Hergebruik van de eindige P-voorraad; Fosfaaterts is als minerale grondstof als meststof van essentieel belang voor de groei van (voldoende) landbouwgewassen om de (toekomstige) wereldbevolking te kunnen blijven voeden.
- Op termijn zouden als vervolg op dit project mogelijk bepaalde urinestromen, die veel medicijnresten e.d. bevatten (ziekenhuizen, verzorgingstehuizen etc.), gericht behandeld kunnen worden wat leidt tot een verbetering van de oppervlaktewaterkwaliteit. De verwijdering van stikstof en fosfor uit urine zou dan een mogelijke voorstap zijn in een totaalconcept voor gescheiden ingezamelde urine.

## 1.2 DOEL

Het doel van het project “Betuwse Kunstmest” is het op pilotschaal bedrijven van een industriële installatie voor verwerking van humane urine. Belangrijkste doelstelling hierbij is om, met in achtneming van (milieu-)rendement en efficiency, stikstof en fosfaat uit urine te winnen die kan worden gebruikt voor de productie van kunstmest.

De twee hoofdprocessen zijn struvietproductie gevolgd door productie van ammoniumsulfaat. Bij struvietproductie wordt fosfaat en een deel van de stikstof uit urine gewonnen. Bij productie van ammoniumsulfaat wordt het merendeel van de resterende stikstof gewonnen. Struviet en ammoniumsulfaat kunnen worden afgezet als grondstof voor de kunstmestindustrie. Daarnaast wordt in dit project een eenvoudig rekenmodel ontwikkeld wat tijdens het bedrijven van de proefinstallatie en in de toekomst gebruikt kan worden om het proces meer inzichtelijk te maken.

Het project heeft meerdere hiermee samenhangende nevendoelen:

- verwerking van urine op een meer duurzame en kosteneffectieve wijze dan door het toevoegen aan het influent van de AWZI;
- het bieden van de mogelijkheid urine uit andere urinescheidingsprojecten in Nederland te ontvangen;
- het opdoen van ervaringen met de technologie;
- optimalisatie van de werkwijze, behandelwijze en processen op pilotschaal;
- inzicht te krijgen in de duurzaamheidsaspecten
- via publiciteit en voorlichting draagvlak creëren voor de technologie voor winning van struviet en ammoniumsulfaat uit urine;
- profilering van de bij het project betrokken partijen.

Geen doel maar wel een aandachtspunt is dat het teruggewonnen product afzetbaar moet zijn. GMB heeft een afzetkanaal voor ammoniumsulfaat dat al bij een ander productieproces vrijkomt. Naar de afzetmogelijkheid van struviet is een beperkt marktonderzoek gedaan.

### 1.3 ONDERZOEKSVRAGEN

Bij de start van het project zijn een aantal onderzoeksvragen opgesteld die na afloop van het project beantwoord moesten zijn:

- 1 Is het mogelijk om zowel fosfaat als stikstof, met een voldoende kwalitatieve samenstelling, uit urine te winnen?
- 2 Welk verwijderingsrendement valt bij het verwijderen van fosfaat en stikstof uit urine te behalen?
- 3 Wat is de meest optimale configuratie van een fosfaat- en stikstof winninginrichting gebaseerd op struviet- en ammoniumsulfaatwinning?
- 4 Wat zijn in de praktijk de bottlenecks bij het bedienen van de installatie en hoe kunnen deze worden overwonnen?
- 5 In welke mate treedt scaling op en hoe ga je daar mee om?
- 6 Welke duurzaamheidsaspecten zijn van toepassing (kwalitatief) en wat is hiervan de kwantitatieve impact?
- 7 Wat is het effect van de dosering van hulpstoffen, nodig om struviet en ammoniumsulfaat te laten neerslaan, op de kwaliteit van de resterende waterstroom?
- 8 Wordt naast magnesiumammoniumstruviet ook magnesiumkaliumstruviet gevormd? En zo ja, bij welke procescondities is dat het geval?
- 9 Wat is de samenstelling van de nevenstromen?
- 10 Hoe ziet de energiebalans van het proces er uit?

De antwoorden op deze vragen worden behandeld in de discussie in hoofdstuk 7.

### 1.4 LEESWIJZER

De verschillende aspecten die van belang zijn voor de behandeling van urine zoals die binnen het “Betuwse Kunstmest”project is toegepast, zullen in hoofdstuk 2 worden behandeld. Hierna volgt in hoofdstuk 3 een technische beschrijving van de installatie en de behaalde resultaten (hoofdstuk 3.4). Binnen het raamwerk van dit project is een eenvoudig rekenmodel ontwikkeld (in Excel) waarmee gaandeweg de looptijd van het project de resultaten van de proefinstallatie zijn beschreven en meer inzichtelijk konden worden gemaakt (hoofdstuk 5). Met name voor de struvietvorming en het strippen van ammonium en de daaropvolgende vorming van ammoniumsulfaat zijn de resultaten uit de praktijk gebruikt om het rekenmodel te valideren. In hoofdstuk 6 worden de resultaten van het Betuwse Kunstmest project vergeleken met conventionele methoden om urine te behandelen. De openstaande onderzoeksvragen zoals genoemd in sectie 1.3 zullen dan verder in hoofdstuk 7 worden beantwoord.

# 2

## PRODUCTIE VAN STRUVIET EN AMMONIUMSULFAAT UIT URINE

### 2.1 INLEIDING

Er zijn een aantal manieren geïdentificeerd om urine te verwerken. Ten eerste is er de algemeen gebruikte methode om urine gemengd met het andere huishoudelijk afvalwater te behandelen in communale zuiveringen. Er is echter een groeiende belangstelling voor gescheiden behandeling van urine gezien de aanzienlijke hoeveelheden stikstof, fosfor en kalium die in deze stroom aanwezig zijn. Methoden van behandeling van urine zijn (2, 15):

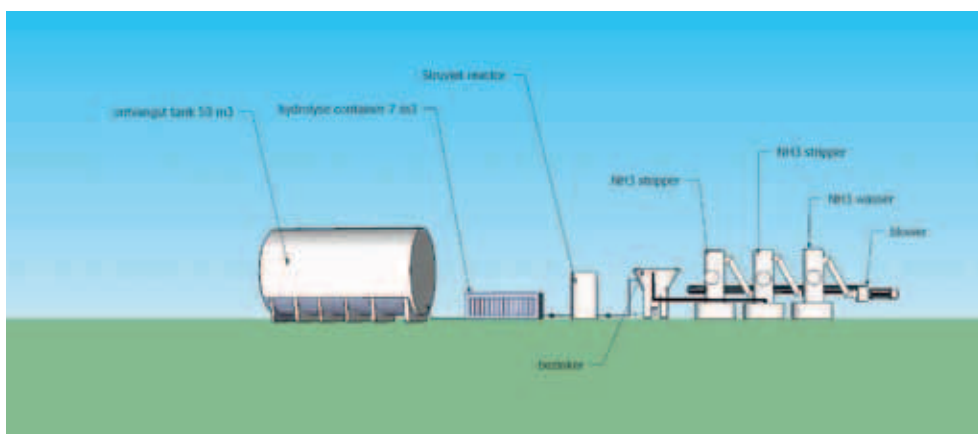
- Direct gebruik als meststof, waarbij opname door planten, uitloging en afbraak een rol spelen bij de verwijdering van de verschillende N- en P-houdende componenten maar vermoedelijk ook van hormonen en medicijnresten.
- Indirect gebruik als meststof na voorbehandeling in een biofilmreactor
- Hygiëniserende door opslag
- Volumereductie door verdamping, vriesdrogen, omgekeerde osmose of nanofiltratie met als resultaat een geconcentreerde stroom met in geval van nanofiltratie overigens maar een klein gedeelte van de ammonium. In het algemeen zijn dit soort processen wel gunstig voor N- en P-terugwinning
- Stabilisatie door aanzuren, microfiltratie of nitrificatie; er vindt geen stikstof of fosfor-terugwinning plaats
- P-terugwinning in de vorm van struviet met als bijkomend voordeel ook een geringe verwijdering van stikstof. Deze behandeling kan plaatsvinden voor of na voorbehandeling voor stikstof-terugwinning (zie hieronder)
- N-verwijdering
  - Biologische verwijdering van stikstof met SHARON-anammox of CANON-reactor
- N-terugwinning:
  - Verwijdering van stikstof uit de urine met ionenwisseling.
  - Struvietvorming
  - NH<sub>3</sub>-strippen
  - Isobutylaldehyde
- Verwijdering van organische microverontreinigingen
  - Electrolyse
  - Nanofiltratie
  - Actieve kool (Verwijdering van hormonen en medicijnen).
  - Ozon en/of UV (Verwijdering van de hormonen en medicijnen).

De hierboven genoemde behandelingsmethoden voor urine verwijderen stikstof en/of fosfaat (vermindering van de nutriëntenlast), soms organische verbindingen (vermindering van de totale vuillast), of specifiek hormonen en medicijnen (voorkomen ophoping van dit soort verbindingen in communale zuiveringen en/of lozing op het oppervlaktewater). In de meeste gevallen zal een combinatie van de hierboven genoemde behandelingsmethode worden toegepast.

In dit project is gekozen om de in de urine aanwezige stikstof en fosfor zoveel mogelijk te verwijderen door middel van neerslag van struviet en productie van ammoniumsulfaat. In eerste instantie is de pilot uitgevoerd met onverdunde urine. Daarna is de installatie bedreven met verdunde urine. Als laatste is een proef uitgevoerd waarin werd getest of medicijnen die in de urine aanwezig kunnen zijn in het gewonnen struviet of ammonium sulfaat terecht komen of dat deze organische verontreinigingen de installatie via het effluent verlaten. Het hele proces is weergegeven in Figuur 2. Na hydrolyse van de urine tijdens opslag vindt eerst verwijdering van opgelost carbonaat plaats. Daarna wordt fosfaat na dosering van magnesium verwijderd in de vorm van struviet. Het effluent van deze processtap wordt vervolgens op pH gebracht waarna ammoniak uit het water kan worden gestript. Terugwinning van de ammoniumstikstof vindt vervolgens plaats als ammoniumsulfaat door het wassen van de gasstroom met zwavelzuur.

FIGUUR 2

BEHANDELINGSCONCEPT VAN URINE IN "BETUWSE KUNSTMEST"-PROJECT  
(VOOR DETAILS VAN DE PROCESVOERING WORDT VERWEZEN NAAR BIJLAGE 1)



## 2.2 SAMENSTELLING URINE

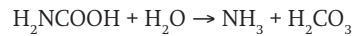
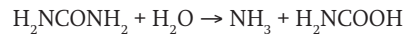
De samenstelling van urine afkomstig van verschillende bronnen en verkregen via verschillende inzamelingssystemen is min of meer bekend (Tabel 1). In het algemeen zal de behandeling van urine zich richten op opgeslagen urine en niet op verse urine. Het grootste verschil is de spontane hydrolyse van ureum die optreedt tijdens opslag (zie ook sectie 2.3).

De in een proefinstallatie te gebruiken urine kan een wisselende samenstelling hebben. Urine kan met water verdund zijn. Dit water kan afkomstig zijn van toiletspoelwater of afkomstig zijn van toepassing bij reiniging van (eco)toiletten. Momenteel is er een gebrek aan ingezamelde urine. De urine die is gebruikt in dit project was afkomstig van het "Moeders voor moeders" project. Voor dit project verzamelen zwangere vrouwen hun (relatief) geconcentreerde ochtendurine. Deze urine wordt in dit geval (omdat er geen toiletspoeling plaatsvindt) ook niet verdund en zou dus wat samenstelling betreft min of meer vergelijkbaar moeten zijn met de verse urine (Tabel 1), op de aanwezigheid van de conserveringsmiddelen na die een zekere hoeveelheid CZV vertegenwoordigen die normaliter niet in urine aanwezig is. Uit deze ochtendurine worden door een gespecialiseerd bedrijf zwangerschapshormonen verwijderd waarna de urine beschikbaar is gesteld aan het Betuwse Kunstmest project voor verdere verwerking. De gebruikte inzamelingsmethode garandeert een min of meer constante kwaliteit urine die ook niet of nauwelijks is gehydrolyseerd omdat direct bij inzameling van de urine conserveringsmiddelen aan de urine worden toegevoegd. Een bijkomend voordeel was dat deze urine op redelijke grote schaal beschikbaar was.

### 2.3 HYDROLYSE VAN URINE

Humane urine bevat tussen 0,4 en 0,5 M ureum (18). Ureum wordt in de natuur meestal snel omgezet in ammonium/ammonia en carbonaat. Dit is een microbiologisch proces gekatalyseerd door urease, een algemeen voorkomend enzym in de natuur. Een grote verscheidenheid aan micro-organismen in de bodem, aquatische systemen, maar ook in de menselijke darm is urease-positief en dus in staat om ureum te hydrolyseren (18). Chemische hydrolyse van ureum is een proces wat zeer langzaam verloopt met halfwaardetijden van 3,6 jaar bij 38°C (23).

De hydrolyse van ureum zal volgens de volgende reactievergelijkingen verlopen (18):

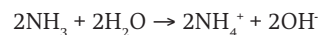
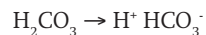


Bij fysiologische pH (rond pH7) dissocieert het zuur en ondergaat het ammoniak een protonering (door water) wat resulteert in een pH verhoging tot rond pH 9.

TABEL 1 SAMENSTELLING VAN URINE UIT VERSCHILLENDE BRONNEN/INZAMELINGSSYSTEMEN (DATA UIT (15) EN (11))

		Verse urine	Huis 1	Huis 2	School	Kantoor 1	Kantoor 2	Kantoor 3	Meppel <sup>b</sup>
				Zweden			Zwitserland		Kantoor
Verdunning <sup>a</sup>	(-)	1	0,33	0,75	0,33	0,26	?	1	?
pH	(-)	6,2	9	9,1	8,9	9	9	9,1	8,8
N <sub>totaal</sub>	g N m <sup>-3</sup>	8830	1795	3631	2610	1793	-	9200	584
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NH <sub>3</sub>	g N m <sup>-3</sup>	463	1691	3576	2499	1720	4347	8100	540
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	g N m <sup>-3</sup>	-	0,06	<0,1	0,07	-	-	0	
P <sub>totaal</sub>	g P m <sup>-3</sup>	800-2000	210	313	200	76	154	540	18,6
CZV	g m <sup>-3</sup>	-				1650	6000	10000	317
K	g m <sup>-3</sup>	2737	875	1000	1150	770	3284	2200	168
S	g m <sup>-3</sup>	1315	225	331	175	98	273	505	77(SO <sub>4</sub> )
Na	g m <sup>-3</sup>	3450	982	1210	938	837	1495	2600	
Cl	g m <sup>-3</sup>	4970	2500	1768	2235	1400	2112	3800	381
Ca	g m <sup>-3</sup>	233	15,75	18	13,34	28	-	0	22
Mg	g m <sup>-3</sup>	119	1,63	11,1	1,5	1,0	-	0	2,5
Mn	g m <sup>-3</sup>	0,019	0	0,037	0	-	-	-	
B	g m <sup>-3</sup>	0,97	0,435		0,440		-	-	

- a De verdunning wordt bepaald door de hoeveelheid gebruikt spoelwater. Verdunning 1 geeft aan dat de urine wordt verzameld zonder spoelwater.
- b Urine monster is afkomstig van scheidingsstoilet en analyses zijn na 2 jaar opslag uitgevoerd. Urine monster is waarschijnlijk zeer verdund vanwege de aanwezigheid van een automatische spoelenheid die zeer regelmatig het toilet spoelde (ook als het niet was gebruikt) en afwezigheid geconcentreerde ochtendurine. Verder zou de samenstelling ernstig beïnvloed kunnen zijn door biologische en chemische processen tijdens de opslag.



De hydrolyse van ureum kan dan beschreven worden met de volgende netto vergelijking:



Tijdens de hydrolyse van ureum precipiteren magnesium en calcium vaak in de vorm van carbonaten en fosfaten (15)<sup>3</sup>.

## 2.4 STRUVIET

### 2.4.1 EIGENSCHAPPEN, VORMING EN PROCESCONDITIES

Struviet ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) is een wit kristal met een molecuulgewicht van  $243,43 \text{ g mol}^{-1}$  (9). De oplosbaarheid van struviet in water is laag ( $0,18 \text{ g l}^{-1}$  bij  $25^\circ\text{C}$ ), maar struviet lost beter op in zure milieus ( $1,78 \text{ g l}^{-1}$  in  $0,01 \text{ N HCl}$  bij  $25^\circ\text{C}$ ). Struviet heeft een oplosbaarheidproduct van  $10^{-13,26}$ .

Struvietvorming vindt plaats volgens:



In de vorming en verdere ontwikkeling van struvietkristallen zijn twee stadia te onderscheiden: nucleatie (initiële vorming van het kristal) en groei van de kristallen. Het voorspellen en controleren van de vorming van kristallen is zeer complex, vooral door een aantal factoren die een rol spelen zoals: de kristallijne staat van de initiële substraten, thermodynamische aspecten aan kristalvorming, massaoverdracht tijdens kristalvorming, reactiekinetiek en fysisch-chemische parameters als pH, mate van verzadiging, energie gebruikt voor het mengen, temperatuur en de aanwezigheid van andere ionen zoals calcium. De inductietijd (tijd die verloopt voordat de nucleatie voor kristalvorming optreedt) hangt af van een aantal factoren zoals mate van oververzadiging, temperatuur, en de aanwezigheid van onzuiverheden (zoals andere ionen) in de oplossing. Een belangrijke factor voor de nucleatie is de mengsnelheid (meer menging, meer  $\text{CO}_2$  uit oplossing, hogere pH), maar deze is van minder belang voor de inductietijd (9).

De groeisnelheid van de kristallen is voornamelijk afhankelijk van de massaoverdracht (transport van ionen uit de oplossing naar het oppervlak door diffusie, convectie of beiden) en oppervlakte-integratieprocessen (inbedding van het materiaal in de bestaande kristalmatrix).

De pH is een van de belangrijkste parameters die de kristalvorming bepalen, via de invloed op oplosbaarheid en oververzadiging, precipitatiesnelheid en inductietijd. In zuiveringsinstallatie wordt struvietvorming voornamelijk gevonden als de pH toeneemt als het gevolg van het strippen van  $\text{CO}_2$  (9). Er is geen consensus over de minimum pH die in een systeem moet heersen om struvietvorming te induceren, maar in het algemeen wordt gesteld dat de maximale vormingssnelheid optreedt tussen pH 8,5 en 9,5. De pH beïnvloedt bovendien de kristallisationsnelheid. Een verhoging van de pH resulteert in een grotere mate van oververzadiging en dus een verhoogde groeisnelheid van de kristallen. Ook kan de pH de kristalkarakteristieken beïnvloeden. De grootte van de kristallen neemt af met toenemende pH. Ook zijn er indicaties dat in zuivere oplossingen bij hogere pH  $\text{Mg}_3\text{PO}_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$  stabiel is dan struviet. Deze specifieke magnesiumfosfaat vorm zou boven pH 9 kunnen concurreren met struviet.

3 In het menselijk lichaam kunnen deze zouten ook neerslaan als nierstenen. Deze bestaan meestal uit calciumoxalaat. Nierstenen kunnen echter ook struviet, calciumfosfaat, urinezuur, en cysteine (alleen bij mensen met de ziekte cystinurie) bevatten. De microbiële hydrolyse van ureum in ammoniak en  $\text{CO}_2$  (vaak door *Proteus mirabilis*) leidt tot de vorming van nierstenen in de vorm van struviet (4).

De temperatuur beïnvloedt de struvietvorming in mindere mate dan andere parameters zoals pH. Echter, het oplosbaarheidproduct kan tot tien keer hoger worden bij een verhoging van de temperatuur van 10 tot 50°C. Hierdoor verloopt de precipitatie van struviet bij hogere temperaturen aanmerkelijk moeilijker. De temperatuur heeft ook invloed op de kristalvorming (9). De aanwezigheid van andere ionen kan een negatief effect hebben op de struvietvorming. Zo kan de aanwezigheid van calcium en carbonaat leiden tot de vorming van onzuiverheden als calcium fosfaat-zouten (voornamelijk hydroxyapatiet) en calciumcarbonaat. Ook natrium en sulfaat kunnen een negatief effect hebben. Zo zou een verhoging van de sulfaatconcentratie van 12,5 mM (12500 mg/l) tot 25 mM (25000 mg/l) sulfaat leiden tot een verhoging van de inductietijd van 1 min 59 seconden tot 4 minuut 25 seconden.

#### 2.4.2 AFZET VAN STRUVIET IN DE MARKT

Struviet is een effectieve bron van nutriënten en heeft als voordeel dat het door de lage oplosbaarheid in water kan fungeren als “slow-release”-fertilizer (26). Struviet is minstens zo effectief als monocalciumfosfaten (9). Bij een proef met het gebruik op sportvelden van struviet gewonnen uit afvalwater van de aardappelverwerkende industrie bleek struviet even effectief als een goede meststof en werd bovendien het gras groener door de aanwezigheid van magnesium in de meststof (5, 10). Ook voor struviet dat ontstaat door het toevoegen van magnesium aan drijfmest tijdens vergisting zou een markt kunnen zijn als kunstmestvervanging (25). Echter in alle gevallen geldt dat er een afzetmarkt gevonden dient te worden. Hiervoor is het noodzakelijk dat er een structureel aanbod is met een constante kwaliteit. Verdoes en Melse (25) pleiten dan ook voor een aanpassing van de wet- en regelgeving inzake het gebruik van kunstmestvervangers. Een minder enge definitie zou al kunnen leiden tot gebruik van hoogwaardige producten uit de mestbe- of mestverwerkende industrie (zoals bijvoorbeeld struviet) als kunstmestvervanger. Vooralsnog lijkt het geringe volume van de geproduceerde stroom het zoeken naar een geschikte afzetmarkt te belemmeren, Japan is een van de weinige landen waar struviet commercieel verkrijgbaar is. Daar vindt struviet zijn toepassing in de rijst- en groenteteelt (9). Ook in Canada wordt struviet, dat gewonnen is uit afvalwater afgezet in de markt. Daar richt men zich met name op nichemarkten als golfbanen, kwekerijen en andere gespecialiseerde markten in de landbouw die behoefte hebben aan een “slow-release” kunstmest (28).

Kosten van struvietproductie worden in hoge mate bepaald door chemicaliën en energieverbruik (9). De prijs van fosfaaterts fluctueert sterk, van bijvoorbeeld 31-39 /ton in 1999 (9) tot 320/ton in 2001 (20). Momenteel lijkt de prijs van kunstmest echter weer enigszins te dalen door een dalende vraag (Figuur 3). Dan gaat waarschijnlijk de kwaliteit van de aangeboden meststoffen weer een grotere rol spelen. Struviet gevormd uit componenten uit humane urine lijkt vrij te zijn van organische microverontreinigingen, zoals medicijnen. Ook lijken de zware-metaalgehalten enkele ordes van grootte lager te zijn dan de concentraties zoals die normaliter worden gevonden in commerciële kunstmest en mest (21).

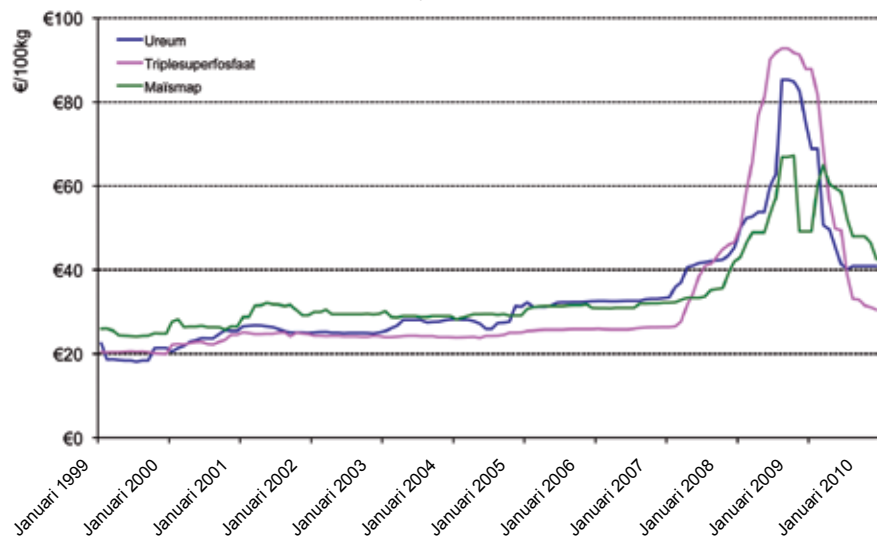
De eisen voor hergebruik door de kunstmestindustrie hangen af van de hergebruikende partij (Tabel 2). Vooralsnog lijkt de struviet die wordt gewonnen uit bijvoorbeeld gescheiden ingezamelde urine vooral afzetbaar als duurzaam materiaal in een eigen unieke niche.



TABEL 2 EISEN AAN PRODUCTEN VOOR TERUGWINNING VAN P. OVERGENOMEN UIT (20)

		Thermphos international B.V.	Amfert Fertilizers B.V. <sup>d</sup>
Droge stof	%	>75	>90
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% van DS	>18	>18
Fe	mg/kg	<10000 <sup>a</sup>	Geen eisen
Zn	mg/kg	<100 <sup>b</sup>	530
Cu	mg/kg	<10 <sup>c</sup>	220
Hg	mg/kg		1
As	mg/kg		20
Cd	mg/kg		14
Cr/Ni/Pb	mg/kg		170
Stikstof	-	Niet aanwezig	Geen eisen

- a Berekend op basis van 40000 ton P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (in mg/kg droge stof) en een maximale hoeveelheid van 2000 ton/jaar  
b Berekend op basis van 40000 ton P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (in mg/kg droge stof) en een maximale hoeveelheid van 20 ton/jaar  
c Berekend op basis van 40000 ton P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (in mg/kg droge stof) en een maximale hoeveelheid van 2 ton/jaar  
d momenteel onderdeel van ICL Fertilizer

FIGUUR 3 PRIJS VAN VERSCHILLENDE SOORTEN KUNSTMEST IN DE AFGELOPEN 10 JAAR (14). MAISMAP = AMMONIUMFOSFAAT (STANDAARD 20:20); TRIPLESUPERFOSFAAT BEVAT ONGEVEER 40% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

FIGUUR 4 STRUVIET GEPRODUCEERD IN HET BETUWSE KUNSTMESTPROJECT



## 2.5 AMMONIUMSULFAAT

### 2.5.1 VORMING EN PROCESCONDITIES

Een belangrijke grondstof voor de vorming van ammoniumsulfaat is ammonia dat normaliter wordt gevormd uit stikstofgas en waterstofgas via de Haber-Bosch reactie (4). Het is een belangrijk proces omdat het moeilijk is om ammonium op industriële schaal te produceren terwijl ammoniumhoudende kunstmest ongeveer een derde van de wereldvoedselproductie ondersteunt. Momenteel worden jaarlijks via het Haber-Bosch proces ongeveer 100 miljoen ton kunstmest geproduceerd vooral in de vorm van watervrije ammonia, ammoniumnitraat en ureum. Jaarlijks wordt ongeveer 1 tot 2% van de wereldwijde energieproductie geconsumeerd in het Haber-Bosch proces. De productie van ammoniumsulfaat ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) kan verlopen via de reactie tussen ammonia en zwavelzuur. Een mengsel van ammoniumgas en waterdamp wordt in een reactor in contact gebracht met een verzadigde oplossing van ammoniumsulfaat en 2 tot 4 % zwavelzuur bij 60°C. Deze reactie verloopt het best onder zure omstandigheden en de reactiewarmte is voldoende om de reactortemperatuur op 60°C te houden. Een andere methode om ammoniumsulfaat te produceren is via het sproeien van zwavelzuur in een ruimte gevuld met ammonia. Door de reactiewarmte verdampt al het water en blijft een droog poeder over. Ook kan ammoniumsulfaat uit gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en ammoniumcarbonaat worden gesynthetiseerd, waarbij calciumcarbonaat neerslaat en de ammoniumsulfaat in oplossing blijft. Ammoniumsulfaat is ook een (zeer zelden voorkomend) mineraal (mascagniet) in vulkanische fumarolen en door kolenbranden op stortplaatsen (1).

### 2.5.2 AFZET VAN AMMONIUMSULFAAT IN DE MARKT

Ammoniumsulfaat wordt in het algemeen toegepast als bemesting voor alkalische bodems. De sulfaat die in de bodem vrijkomt verlaagt de pH terwijl de stikstof beschikbaar komt voor de groei van planten (1).

GMB zet het ammoniumsulfaat wat tijdens hun slibverwerkingsactiviteiten wordt gewonnen af in de markt als voorjaarsmeststof op grasland, startmeststof op bouwland of stikstofmeststof gedurende het groeiseizoen met name in de akkerbouwgebieden van Nederland (Noord-Nederland/Flevopolder etc). Het product wordt dan geleverd als 40%oplossing in water met een  $N_{\text{totaal}}$  van 72-89 g/l en een  $S_{\text{totaal}}$  van 83-102 g/l (3). Momenteel ontstaat steeds "concurrentie" doordat veel zogenaamd spuiwater vrijkomt bij luchtwassers die steeds meer achter varkens- en kippenstallen worden geplaatst. Dit spuiwater heeft veelal echter een veel lagere kwaliteit (slechts 4-5%N, pH<4, stof en geur uit stallen) maar dit heeft wel een prijsdrukkend effect. Verder beweegt de prijs voor ammoniumsulfaat mee met de kunstmestprijs en dus ook met de algemene grondstofprijzen (olie/energie).

## 2.6 HET EFFLUENT VAN HET BETUWSE KUNSTMEST PROJECT

Het effluent van het Betuwse Kunstmest project is niet als zodanig te lozen op het oppervlaktewater en zal eerst gezuiverd moeten worden. De waterstroom zal na verwijdering van stikstof en fosfaat residuele CZV en verhoogde concentraties van de toeslagstoffen zoals bijvoorbeeld sulfaat (gedoseerd als zwavelzuur om de pH te verlagen in de hydrolyse- $\text{CO}_2$ stripreactor) bevatten. De aard en hoogte van de concentratie van deze toeslagstoffen hangt echter nauw samen met de bedrijfsvoering en de verschillende processtappen.

In urine kunnen medicijnresten aanwezig zijn. Een van de zaken waar momenteel in Nederland maar ook elders veel aandacht wordt besteed is het lot van medicijnen in afvalwater tijdens de zuivering en het risico dat deze stoffen in het oppervlaktewater terecht komen.

Ook kan urine zware metalen bevatten die zijn opgenomen via voeding en vervolgens weer worden uitgescheiden. Ook kan corrosie van leidingwerk waardoor de urine wordt getransporteerd leiden tot verhoogde gehalten van zware metalen in urine bij verwerking. De medicijnen en zware metalen zouden bij verwerking van de urine in de struviet en/of ammoniumsulfaat terecht kunnen komen. Dit is een ongewenste situatie. Inmiddels is uit onderzoek van Ronteltap *et al.* bekend dat struviet afkomstig uit urine geen medicijnen en zware metalen hoeft te bevatten (21). Het ammoniumsulfaat zal, omdat dit wordt gewonnen via een stripproces ook geen zware metalen en medicijnen bevatten omdat deze in het algemeen niet vluchtig zijn.

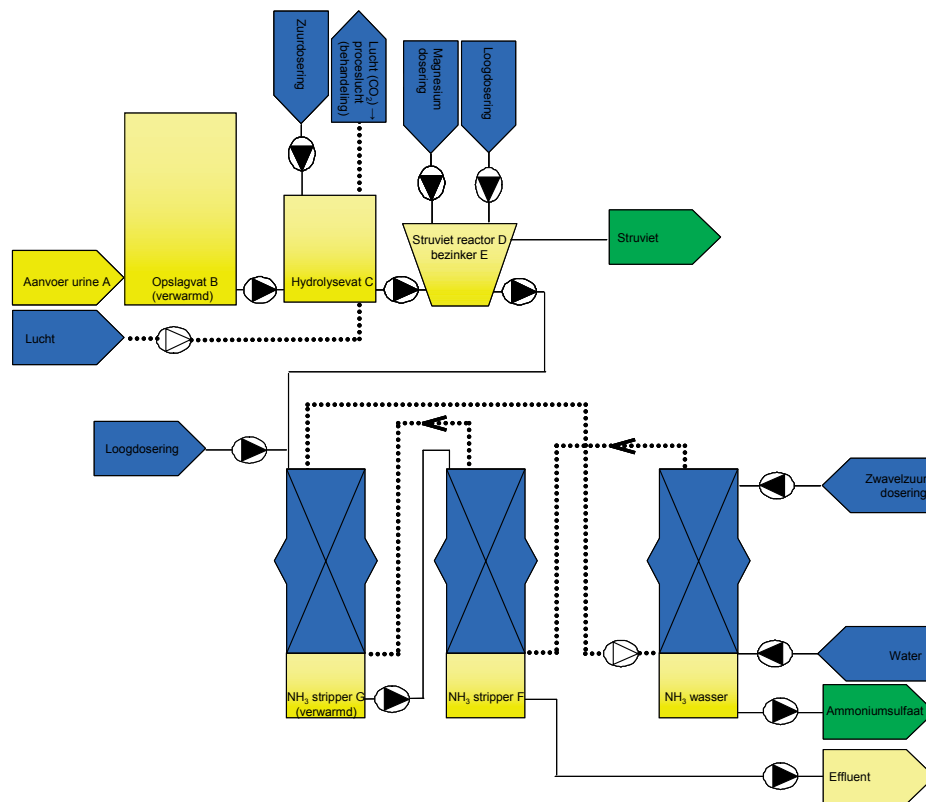
# 3

## BESCHRIJVING PROEFINSTALLATIE

### 3.1 LOCATIE EN PROCESSHEMA

De proefinstallatie stond op het terrein van de slibcomposteringshal van GMB in Tiel, grenzend aan het terrein van de RWZI Tiel. De opstelling bestond uit een aantal geschakelde reactoren (schematisch weergegeven in Figuur 5), die in eerste instantie in de buitenlucht waren opgesteld. Eind november/begin december is het geheel overkapt om te voorkomen dat er te veel warmte verloren ging. Een gedetailleerde beschrijving van de installatie wordt gegeven in paragraaf 3.3, de resultaten worden beschreven in hoofdstuk 3.4.

FIGUUR 5 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE URINE VERWERKINGSINSTALLATIE



Doorgetrokken lijnen geven de waterstromen en de dosering van toelagsstoffen weer, de onderbroken lijn geeft de luchtstroom weer. Hoofdletters komen overeen met codering van de verschillende processtappen elders in dit rapport.

#### CODERING

A	Aanvoer urine	E	Struvietbezinker
B	Opslagvat	F	Stripper
C	Hydrolysevat	G	Stripper
D	Struvietreactor		

### 3.2 FASERING VAN DE BEDRIJFSVOERING

Het opbouwen van de installatie vond plaats in september en oktober 2008. In de opstartfase en testfase van de onderdelen werd gebruik gemaakt van urine afkomstig van de WK vierspan uit Beesd. Deze urine werd zonder conservering ingezameld en opgeslagen, waardoor het materiaal verouderd en gehydrolyseerd was. Vanaf november kon er gebruik gemaakt worden van urine die afkomstig was uit de farmaceutische industrie. Deze urine wordt bij inzameling geconserveerd, waardoor de in de urine aanwezige ureum niet of nauwelijks hydrolyseert voordat het de proeflocatie bereikt. Gedurende de eerste twee maanden dat met constante aanvoer gedraaid kon worden (november en december) is de installatie ingeregeld, en daarna is de installatie vanaf januari 2009 bedreven met de genoemde urine van constante kwaliteit. De proefinstallatie heeft gedurende 6 maanden gedraaid volgens onderstaand schema:

Periode	Activiteiten
7 november 2008 – eind december 2008	Inregelen van de installatie Vaststellen procesparameters Batchgewijze procesvoering
januari 2009 – maart 2009	Winning N- en P uit onverdunde urine Continue procesvoering
april 2009 – 7 mei 2009	Winning N- en P uit verdunde urine Testen van procesvariabelen Het lot van medicijnen in urine bij de winning van struviet en ammoniumsulfaat in de proefinstallatie Continue procesvoering

Eind december 2008 kon de installatie als ingeregeld worden beschouwd, waarna er echt getest kon gaan worden. De eerste drie testmaanden (januari-maart 2009) is er met onverdunde urine gewerkt. Tijdens deze fase is het rekenmodel (zie sectie 3.4) zo goed mogelijk aangepast om de behaalde resultaten goed te kunnen simuleren. Om de grenzen van de installatie te verkennen en het model te kunnen verifiëren is er daarna met verdunde urine gewerkt. Hiervoor werd de aangeleverde urine in het opslagvat vier keer verdund met water.

Om praktische redenen is een deel van de proefinstallatie, bijvoorbeeld de pompen gedurende de weekeinden steeds uitgeschakeld. De verwarming van opslagtank en tent bleef in het weekeind wel gehandhaafd. Op maandag werden de pompen weer ingeschakeld, en van maandag tot en met donderdag werden er metingen verricht. Dit patroon is terug te zien in de grafieken met resultaten verderop in dit rapport en in de annex.

### 3.3 GEDETAILEERDE PROCESBESCHRIJVING

Tijdens opslag in tank B op de locatie vindt wel gedeeltelijke hydrolyse plaats. Dit proces vindt ook plaats in de hydrolysetank C. In de hydrolysetank wordt de pH op pH 4,0 gesteld. Alle aanwezige en gevormde carbonaat en bicarbonaat wordt onder deze omstandigheden als CO<sub>2</sub> gestript. Zo worden problemen als bijvoorbeeld carbonaatneerslagen in de struviet-reactor voorkomen. Hierna wordt de waterige stroom naar de struvietreactor D geleid. Hier wordt magnesium gedoseerd waardoor de pH stijgt en het fosfaat samen met ammonium en magnesium neerslaat als struviet. Magnesium is in de proefperiode in verschillende vormen gedoseerd. De vorm waarin magnesium werd gedoseerd werd onder andere bepaald door de verkrijgbaarheid, de kosten en de handelbaarheid op de locatie. In eerste instantie werd gebruik gemaakt van MgO (tot half december 2008), MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O (tot 10 februari 2009), en

later MgOH tot het eind van de proef. In eerste instantie werd de geproduceerde struviet afgescheiden in de bezinker E. In een later stadium is in de struvietreactor een zeef gehangen waarover het effluent van de reactor werd gecirculeerd. Hierdoor werden de grote struvietkristallen afgevangen. De kleinere struvietkristallen werden toen alsnog verwijderd in de bezinker. De vloeistofstroom werd vervolgens naar stripper G gevoerd en na loogdosering werd daar de ammoniak uit de vloeistof gestript bij 40°C. Het water werd vervolgens door een tweede stripunit F geleid. De luchtstroom die in de strippers werd beladen met ammoniak werd in een wasser na zuurdosering ontdaan van de ammoniak. Via dosering van water kon de ammoniumsulfaat vervolgens worden afgescheiden als 25-40% oplossing in water. Het effluent werd direct geloosd op de naastgelegen rioolwaterzuivering.

De beschrijvingen en procescondities van de verschillende onderdelen van de proefinstallatie staan hieronder samengevat in Tabel 4 en meer details met betrekking tot de proefinstallatie zijn weergegeven in Bijlage 1. In Figuur 6 t/m Figuur 8 zijn foto's van de installatie weergegeven. De hele installatie behalve opslagtank B stond vanaf december 2008 tot het eind van de proefperiode opgesteld onder een tent/overkapping om de het effect van de buitentemperatuur te verminderen en om geuremissie te voorkomen.

De urine en alle uit de verschillende processtappen afkomstige vloeistofstromen zijn gedurende de gehele periode regelmatig bemonsterd en op een uitgebreide lijst parameters geanalyseerd (Tabel 3). Daarnaast zijn bij de strippers ook de in- en uitgaande luchtstromen bemonsterd voor de bepaling van het ammoniakgehalte.

TABEL 3 LIJST VAN PARAMETERS DIE IN DE URINE EN DE EFFLUENTEN VAN ALLE PROCESSTROMEN BEPAALD ZIJN

Parameters*	Omschrijving	Eenheid
Algemeen	pH	-
	Temperatuur	°C
	CZV	mg/l
Vaste stof	Zwevende stof	mg/l
	Gloeirest	% (m/m)
	Organische zwevende stof	mg/l
	Indamprest	mg/kg
	Gloeirest vd indamprest	% (m/m)
	Organische stof	mg/kg
Stikstof	N <sub>Kjeldahl</sub>	mg N/l
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg N/l
	Ratio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / N <sub>Kjeldahl</sub>	-
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l
Fosfor	P <sub>totaal</sub>	mg P/l
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	mg P/l
Mineralen	Calcium	mg/l
	Carbonaat	mmol/l
	Bicarbonaat	mmol/l
	Chloride	mg/l
	Kalium	mg/l
	Magnesium	mg/l
	Natrium	mg/l
	Sulfaat	mg/l

\* Niet alle metingen konden vanaf het begin van de testperiode met de benodigde precisie gedaan worden. Bijvoorbeeld in het geval van magnesium was vaak alleen een maximale concentratie bekend in de vorm van de gehanteerde detectielimiet (50 mg/l). Bij fosfaat lag de detectielimiet gedurende de test met onverdunde urine op 12,5 mg/l maar werden er soms ook lagere getallen gerapporteerd. Hierdoor was het moeilijk om de efficiëntie met betrekking tot fosfaatverwijdering met zekerheid te kunnen berekenen.

FIGUUR 6 DE HYDROLYSEREACTOR C MET OP DE ACHTERGROND DE STRUVIETREACTOR D MET BEZINKER E



FIGUUR 7 MEET EN REGELKAST VAN STRIPPERS EN WASSER



FIGUUR 8 WASSER MET OP DE ACHTERGROND TWEE STRIPTORENS G EN F



TABEL 4 DOEL, BIJZONDERHEDEN EN PROCESOMSTANDIGHEDEN VAN DE VERSCHILLENDE ONDERDELEN VAN DE PROEFINSTALLATIE

Code	Omschrijving	Doel	Bijzonderheden	Volume (m <sup>3</sup> )	Debiet (m <sup>3</sup> /uur)		T (°C)
					Water	Lucht	
A	Vrachtwagen	Aanvoer urine	-	-	-	-	-
B	Opslagtank	Opslag van urine tot gebruik, spontane hydrolyse	Gemengd en verwarmd vanaf 3 februari 2003	50	-	-	omgeving /18-25°C <sup>a</sup>
C	Hydrolysetank	Verregaande hydrolyse van ureum, strippen van CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dosering om pH 4,0 te handhaven	4-5	0,5	-	
D	Struvietreactor	Neerslaan van fosfaat als struviet (MAP)	Dosering van Mg-zouten (MgO, MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O, MgOH)	2	0,5	-	
E	Struvietbezinker	Verwijdering struviet	In een later stadium vervangen door interne bezinker in D om de afvang van struviet te verbeteren	1,5	0,5	-	
G	Stripper 1	Verwijdering NH <sub>3</sub>	Loogdosering tot pH 9, striplucht van stripper 2	0,75	0,5	1500	35-40°C <sup>b</sup>
F	Stripper 2	Verwijdering NH <sub>3</sub>	Striplucht van Wasser	0,75	0,5	1500	35-40°C <sup>c</sup>
H	Wasser	NH <sub>3</sub> wasser: productie (NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Zuurdosering	0,75		1500	35-40°C <sup>c</sup>

- a Opwarming (na 3 februari) vond plaats met behulp van een warmtewisselaar die was aangesloten op het koelwater van de slibverwerking op de locatie. Dit koelwater had een temperatuur van ongeveer 30°C.
- b Opwarming van de urinestroom vond plaats met behulp van een warmtewisselaar die was aangesloten op de proceslucht van de slibverwerking.
- c De inhoud van de stripper2 en de wasser werden indirect verwarmd via de rondgepompte proceslucht.

### 3.4 OPZET REKENMODEL

Om meer inzicht te krijgen in het effect van de verschillende procesparameters op de verwijdering van stikstof en fosfaat uit de urine is een beschrijvend rekenmodel opgezet in Excel. Dit model is gedurende het project gevalideerd met resultaten van de proefinstallatie. Het model bevat de volgende invoerfuncties: debiet en eigenschappen van relevante in- en uitgangstromen (CZV, N, P, K, Mg, HCO<sub>3</sub>, pH, rendementen, stripdebieten, productie van struviet en ammoniumsulfaat, energieverbruik, chemicaliënverbruik (zuur, base, Mg)).

Het rekenmodel kan een hulpmiddel worden waarmee het proces inzichtelijk kan worden gemaakt ook voor gebruikers die niet op de hoogte zijn van de achterliggende fysisch-chemische processen.

#### 3.4.1 ALGEMENE OPZET

Het rekenmodel is zodanig opgezet dat per tabblad een processtap wordt beschreven. Op het startblad (Figuur 9) wordt een summierende uitleg van het systeem gegeven en een verklaring van de kleurcodering van de verschillende parameters in het rekenmodel op de navolgende tabbladen. Bovenaan elk volgend tabblad dat een van de processtappen beschrijft worden de belangrijkste karakteristieken van het water weergegeven (in geel) en ook het resultaat van



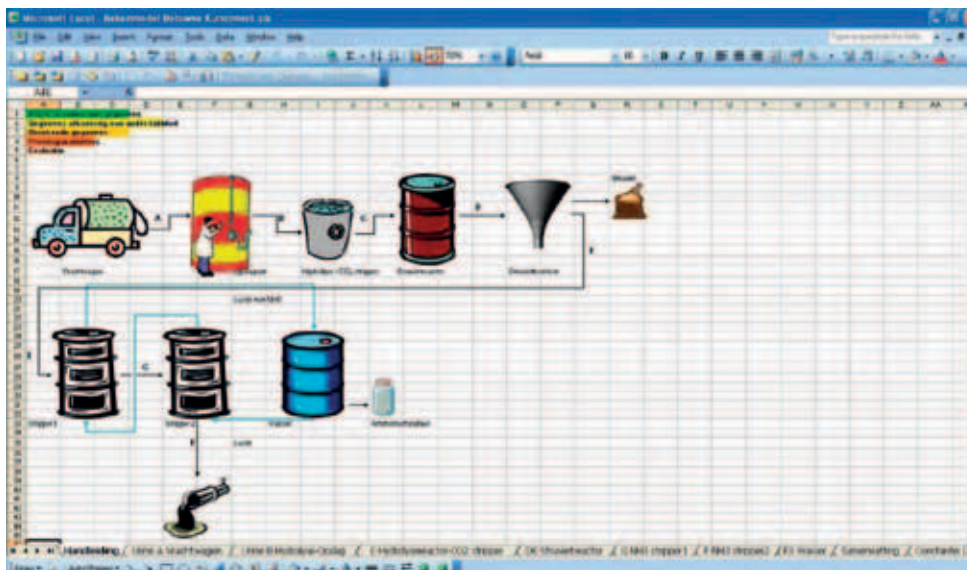
de processtap op de te behandelen afval(water)stroom (in oranje). De karakteristieke parameters van het water zijn in de meeste gevallen afkomstig van een voorgaand tabblad en dienen ook als input van de berekeningen. Op het startblad is het mogelijk om de samenstelling van de afval(water)stroom in te voeren. Het rekenmodel is opgesteld voor de behandeling van urine en ook gevalideerd voor de behandeling van deze specifieke stroom. Het invoeren van de samenstelling van de te behandelen afval(water)stroom zal na (eventueel) aanpassen van procesparameters resulteren in een rapport op het tabblad “samenvatting” waarin de belangrijkste parameters van de uitgaande effluentstroom en de benodigde hoeveelheid chemicaliën is weergegeven.

Voor het doorrekenen van de hydrolyse van de ureum in de urine, de struvietvorming en de stripprocessen zijn achtergrondprocessen in het rekenmodel ingevoerd die afkomstig zijn uit de literatuur. De resultaten van de berekeningen zijn gevalideerd aan de resultaten die behaald zijn op de proeflocatie.

Voor het bepalen van het effect van de verschillende processtappen op CZV en andere parameters is gebruik gemaakt van de resultaten met urine en (later) verdunde urine. Op de diverse ingaande en uitgaande stromen is zoals ook vermeld in sectie 3.3 met grote regelmaat een hele reeks analyses uitgevoerd (voor voorbeeld zie Figuur 10). De resultaten van deze analyses zijn gemiddeld en tevens is de standaarddeviatie bepaald per processtap. Daardoor was het mogelijk om in een bepaalde tijdsperiode het effect van een processtap op een bepaalde parameter X (bijvoorbeeld CZV) te bepalen. Uit deze eerste analyses van de resultaten bleek dat de proefinstallatie in het algemeen het meest constant had gedraaid in de maand maart, zodat de resultaten uit deze maand zijn gebruikt om een rendement van een bepaalde processtap op een bepaalde parameter X te bepalen. Dit “rendement” is berekend via  $X_{uit}/X_{in}$  (met bijbehorende standaard deviatie) en is (in voorkomende gevallen, zie ook paragrafen hierna) gebruikt in het rekenmodel.

FIGUUR 9

OPENINGSPAGINA VAN REKENMODEL



FIGUUR 10 ANALYSES AAN AFVALWATERSTROMEN EN VERDERE BEHANDELING VAN DE DATA

### 3.4.2 AANVOER EN HYDROLYSE-OPSLAG

De samenstelling van de te behandelen afval(water)stroom, in dit geval urine, waarvan de behandeling doorgerekend moet worden is in te voeren in het tabblad "Urine A vrachtwagen". Hierbij zijn voornamelijk de pH, CZV, N (Kjeldahl en  $\text{NH}_4$ ) en P (totaal, en  $\text{PO}_4\text{-P}$ ) van belang. De waarden zijn vrij in te vullen.

Aangezien de hydrolyse van de ureum in de urine voornamelijk tijdens opslag en vervoer van de urine zal plaatsvinden vinden de berekeningen van het effect van hydrolyse op de samenstelling van de urine plaats op het tabblad "Urine B Hydrolyse-Opslag" plaats (Figuur 12). Het effect van dit proces op de pH, CZV,  $\text{N}_{\text{Kjeldahl}}$ ,  $\text{P}_{\text{totaal}}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , natrium en sulfaat is bepaald met de hierboven beschreven rendementberekeningen. De bijbehorende factoren staan vermeld op het tabblad. Voor het bepalen van de hydrolyseconstante is in een apart experiment de omzettingssnelheid bepaald met verse urine die was aangeënt met gehydrolyseerde urine uit de opslagtank. De afbraak bleek volgens een eerste-orde reactiekinetiek te verlopen zoals ook al eerder aangegeven door Udert et al. (24):

$$C_{\text{Effluent}} = C_{\text{Influent}} e^{-kt}$$

waarin:

$C_{\text{effluent}}$  en  $C_{\text{influent}}$  = de ongehydrolyseerde  $\text{N}_{\text{Kjeldahl}}$ -concentratie in in- en effluent na verblijftijd t in opslagtank

k = hydrolyseconstante (experimenteel vastgesteld)

Het was mogelijk om met deze in het laboratorium gevonden hydrolyse constante van  $0,02 \text{ h}^{-1}$  (bij  $20^\circ\text{C}$ ) de praktijkresultaten te voorspellen en de hoeveelheid  $\text{NH}_4\text{-N}$  in de uitgaande stroom te voorspellen.

FIGUUR 11 KARAKTERISTIEKEN VAN TE BEHANDELEN AFVAL(WATER)STROOM

Parameter	Waarde	Eenheid	Referentie Aanpakmethode / opmerkingen
pH	7		A
ZV	1000	mg/l	A
COD	1000	mg/l	A
BOD	1000	mg/l	A
NH4-N	100	mg/l	A
P	10	mg/l	A
PO4-P	10	mg/l	A
Na	100	mg/l	A
SO4	100	mg/l	A

FIGUUR 12 HYDROLYSE VAN AANGEVOERDE AFVAL(WATER)STROOM

Parameter	Waarde	Eenheid	Referentie Aanpakmethode / opmerkingen
pH	7		A
ZV	1000	mg/l	A
COD	1000	mg/l	A
BOD	1000	mg/l	A
NH4-N	100	mg/l	A
P	10	mg/l	A
PO4-P	10	mg/l	A
Na	100	mg/l	A
SO4	100	mg/l	A

### 3.4.3 HYDROLYSEREACTOR – CO<sub>2</sub> STRIPPER

In het eerste ontwerp van de proefinstallatie was deze reactorstap bedoeld als hydrolysevat voor de ureum in de urine gecombineerd met het strippen van CO<sub>2</sub> (om problemen met ongewenste carbonaatneerslagen in de struvietreactor te voorkomen). Echter, de hydrolyse van de ureum in de urine vindt vooral plaats tijdens vervoer en opslag, waardoor de “hydrolyse reactor-CO<sub>2</sub>-stripper” nog slechts als CO<sub>2</sub>-stripper functioneerde en ook als zodanig in het rekenmodel is opgenomen (Figuur 13). In dit tabblad wordt het effect van het verblijf op de pH, CZV, N<sub>Kjeldahl</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, P<sub>total</sub>, PO<sub>4</sub>-P, natrium en sulfaat bepaald met de hierboven beschreven rendementberekeningen. De bijbehorende factoren staan vermeld op het tabblad.

De zuurdosering nodig voor de hydrolyse van het ureum tijdens de opslag en het strippen van de CO<sub>2</sub> wordt hier op twee manieren berekend, namelijk via de vorming van (bi)carbonaat tijdens strippen volgens:

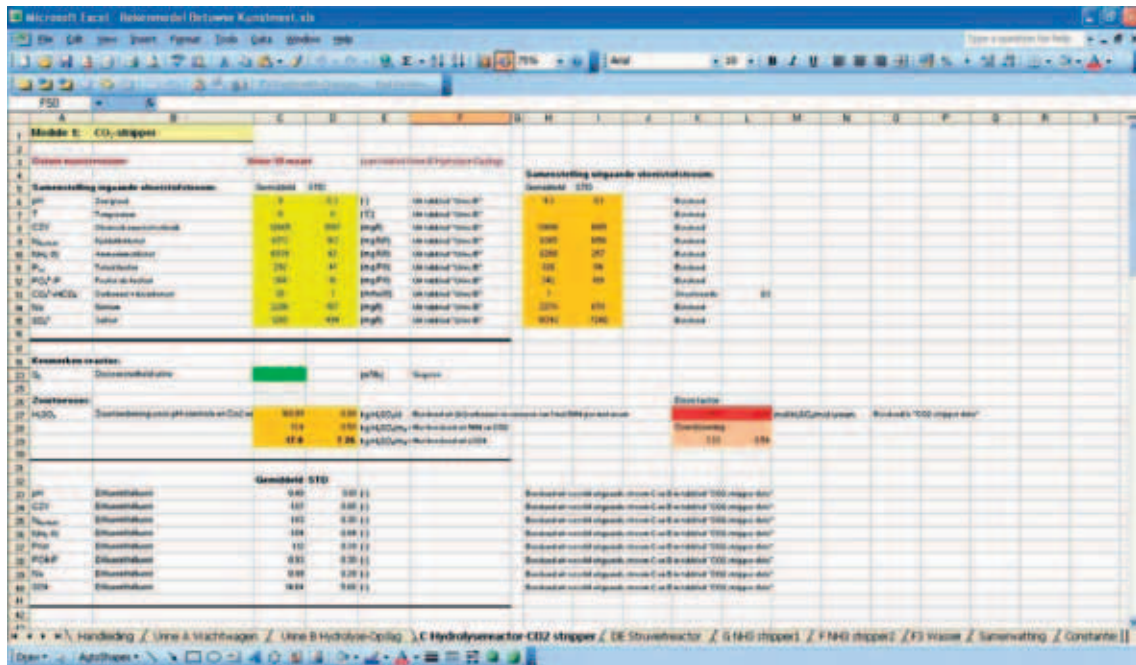
$$H_2SO_4 - dosering = \left[ (carbonaat_{in} - carbonaat_{uit}) + NH_{4,in} / (1000 * 14) \right] * Q * 24 * M_w(H_2SO_4)$$

waarin

- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-dosering = zwavelzuur dosering (kg/d)
- Carbonaat<sub>in,uit</sub> = carbonaatconcentratie (mol/l)
- NH<sub>4,in</sub> = ammoniumconcentratie in influent (mg/l)
- Q = debiet (m<sup>3</sup>/h)
- M<sub>w</sub>(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) = molecuul gewicht zwavelzuur (g/mol)

Ook kan de zwavelzuurdosering direct aan de hand van de sulfaatgehalten in in- en effluent van deze processtap worden berekend. Deze zijn namelijk direct gerelateerd aan de hoeveelheid zwavelzuur die is toegevoegd tijdens het bedienen van de proefinstallatie met onverdunde urine. In het rekenmodel hebben de resultaten van beide berekeningen niet dezelfde grootteorde. Dit komt waarschijnlijk omdat er al CO<sub>2</sub> is gestript in de opslagtank (waar het grootste gedeelte van de hydrolyse plaatsvindt) waardoor er een overschatting plaatsvindt.

FIGUUR 13 EFFECT VAN VERBLIJF IN HYDROLYSEREACTOR EN CO<sub>2</sub> STRIPPER



### 3.4.4 STRUVIETREACTOR EN -BEZINKER

In het rekenmodel wordt uitgegaan van een optimale bezinking en afscheiding van de gevormde struviet in de bezinker, en de struvietreactor en -bezinker zijn derhalve als een eenheid in het rekenmodel opgenomen (Figuur 14). In dit tabblad wordt het effect van het verblijf op de pH, CZV, N<sub>Kjeldahl</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, P<sub>totaal</sub>, natrium en sulfaat bepaald met de hierboven beschreven rendementberekeningen. De bijbehorende factoren staan vermeld op het tabblad. Voor de in de struviet neergeslagen ammonium-N wordt niet apart gecorrigeerd aangezien dit slechts een heel klein deel is van de totale hoeveelheid ammonium die aanwezig is.

De hoeveelheid struviet die wordt gevormd wordt berekend met behulp van twee verschillende methoden van Battistoni et al (6) en Nelson et al (19).

Battistoni et al. (2001) gaan ervan uit dat de hoeveelheid neerslag die gevormd wordt beperkt wordt door de hoeveelheid  $PO_4\text{-P}$  en dat alle fosfaat wordt teruggevonden als magnesium-ammoniumfosfaat (struviet) en hydroxyapatiet. Bij doorrekenen van de bij het bedrijven van de installatie verkregen resultaten blijkt dat het P-verwijderingsrendement redelijk hoog is ( $94,3 \pm 7,3\%$ ) en onafhankelijk van de pH (mits deze boven de pH 8 ligt) er onder de gegeven omstandigheden (toegepaste Mg:P ratio's van 1,6:1 en hoger) niet of nauwelijks hydroxyapatiet gevormd zal worden. Dit wordt bevestigd door de calciumanalyses. Er is nauwelijks een verschil in de calciumconcentraties in in- en effluent van deze reactor. Nelson et al (2003) gaan ervan uit dat de hoeveelheid gevormd struviet gecontroleerd wordt door de  $PO_4\text{-P}$ -concentratie, magnesiumconcentratie, de Mg:P-verhouding (moet hoger zijn dan 1,6:1) en de pH. Er wordt aangenomen dat het verschil tussen P in in- en effluent volledig ten goede komt aan de vorming van struviet. De struvietvorming is dan via een eerste-orde kinetiek gerelateerd aan de pH.

$$C_{Effluent} = C_{Influent} e^{-kt}$$

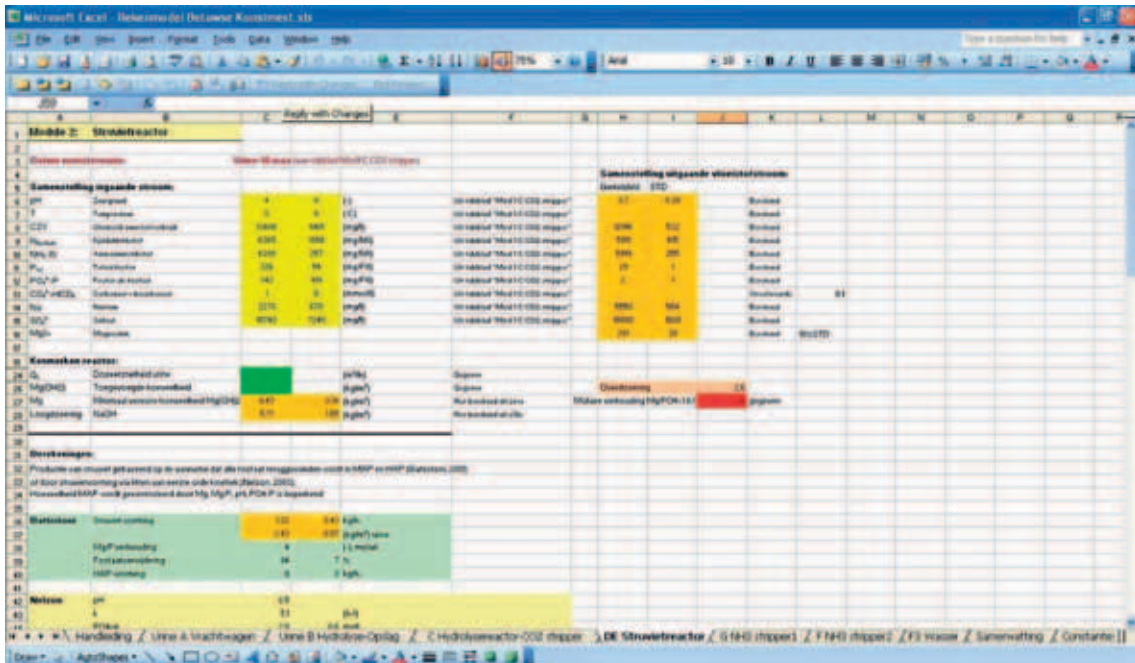
waarin:

$C_{effluent}$  en  $C_{influent}$  = de  $PO_4$ -concentratie in in- en effluent van de struvietreactor/bezinker bij verblijftijd t

k = pH afhankelijke struvietvormingsconstante ( $h^{-1}$ )

Beide methoden leveren ongeveer hetzelfde resultaat voor de hoeveelheid gevormd struviet.

FIGUUR 14 VORMING VAN STRUVIET IN STRUVIETREACTOR EN -BEZINKER



### 3.4.5 NH<sub>3</sub>-STRIPPERS EN WASSER

#### ALGEMEEN

De twee strippers worden in tegenstroom bedreven. De afval(water)stroom wordt eerst door stripper G gevoerd en de schone gasstroom loopt eerst door stripper F. De strippers zijn niet als een eenheid in het rekenmodel opgenomen, omdat door het tegenstroomprincipe de rendementen van beide strippers verschillend zijn (Figuur 15 en Figuur 16). In de tabbladen wordt het effect van het verblijf op de pH, CZV, N<sub>Kjeldahl</sub>, P<sub>totaal</sub>, PO<sub>4</sub>-P, natrium, sulfaat en magnesium bepaald met de hierboven beschreven rendementberekeningen. De bijbehorende factoren staan vermeld op het tabblad.

De wijze waarop de verschillende procesvariabelen in het stripproces zijn bepaald wordt elders in deze sectie meer in detail beschreven.

Per stripeenheid wordt de concentratie in de uitgaande vloeistofstroom en de gasstroom vervolgens berekend met:

$$C_{Effluent} = C_{Influent} * (1 - \eta)$$

$$C_{gas}^* = (C_{Influent} - C_{Effluent}) * Q_{vloeistof} / Q_{gas}$$

$$C_{gas}^F = C_{gas}^*$$

$$C_{gas}^G = C_{gas}^* + C_{gas}^F$$

waarin:

$C_{influent}$ en $C_{effluent}$	=	NH <sub>4</sub> concentratie in influent en effluent van desbetreffende stripeenheid (mg N/l)
$\eta$	=	NH <sub>4</sub> -N verwijderingsefficiëntie uit vloeistoffase (%/100)
$Q$	=	debiet (m <sup>3</sup> /h)
$C_{gas}^*$	=	NH <sub>4</sub> in stripper verwijderd in gasfase (mg/m <sup>3</sup> )
$C_{gas}^F$	=	NH <sub>4</sub> in gasfase stripper F (mg N/m <sup>3</sup> )
$C_{gas}^G$	=	NH <sub>4</sub> in gasfase stripper G (g N/m <sup>3</sup> ) = Gasstroom richting gaswasser

De loogdosering nodig om de gewenste basische pH te bereiken wordt op twee verschillende manieren berekend uit enerzijds de verschillen in ammoniumgehalten in in- en effluent van de stripper, en anderzijds de toename van de natriumconcentratie zoals deze is gevonden tijdens het bedrijven van de installatie met onverdunde urine. De resultaten van beide berekeningen zijn van dezelfde grootteorde. De onzekerheid in de resultaten van de natriumbepalingen is alleen wel groter.

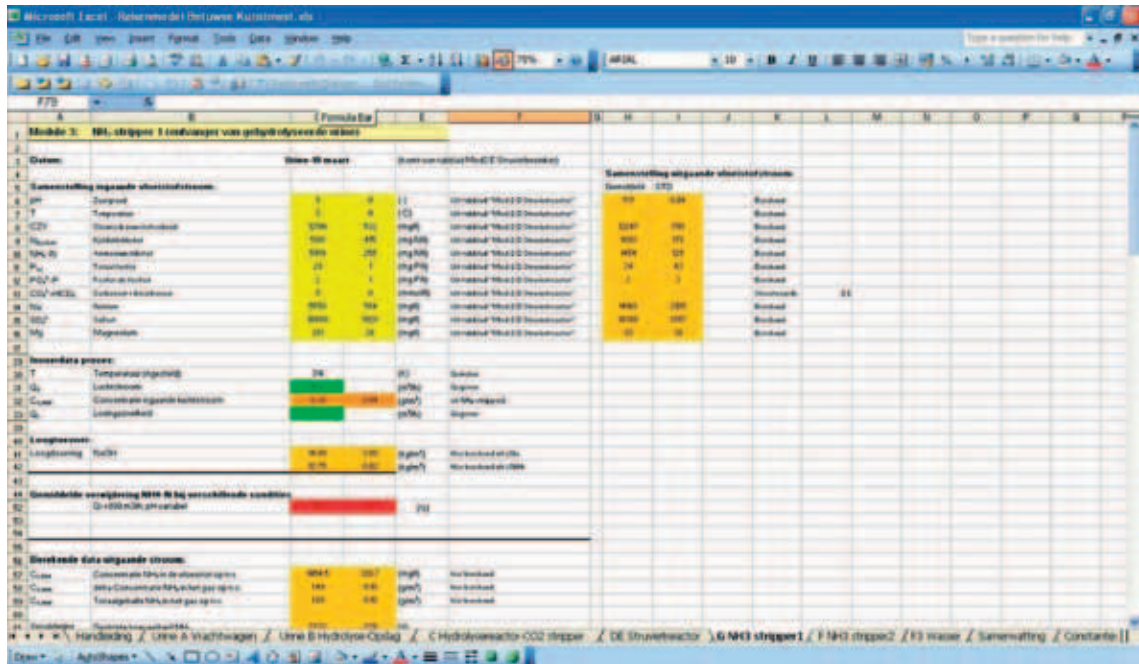
Het gaswasproces en de terugwinning van het ammonium(sulfaat) is op een apart tabblad weergegeven (Figuur 17). De berekening gaat uit van een volledige terugwinning van de ammonium in zwavelzuur.

$$(NH_4)_2SO_{4,geproduceerd} = C_{gas}^G * Q_{gas} * Mw((NH_4)_2SO_4) / (2 * 14 * 1000)$$

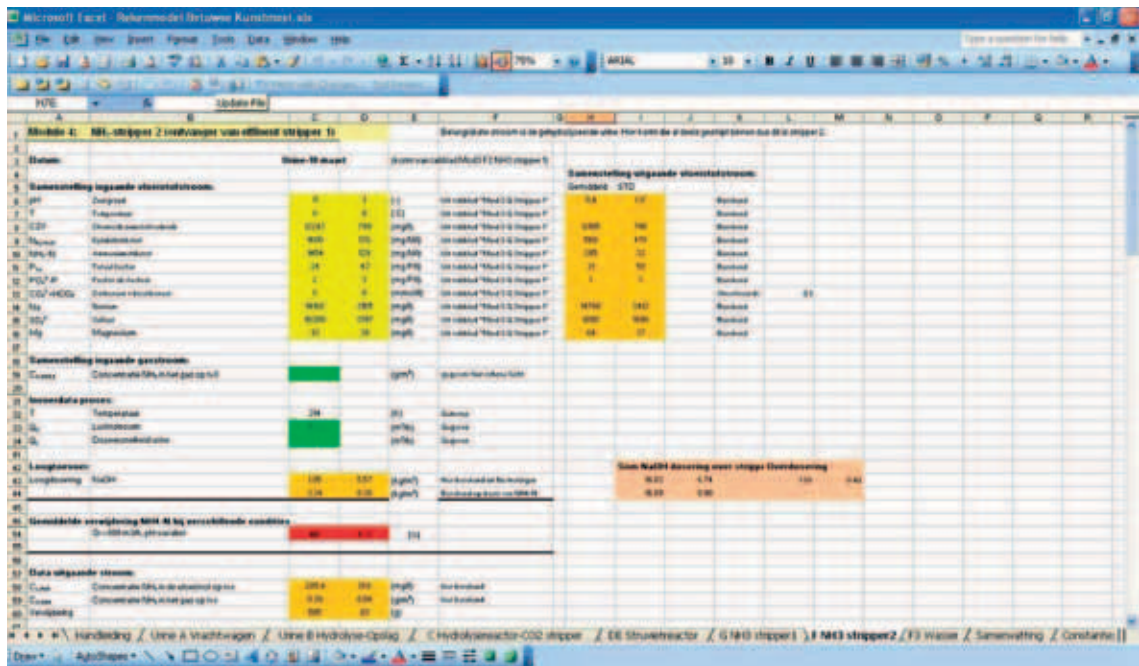
waarin:

$(NH_4)_2SO_{4,geproduceerd}$	=	Hoeveelheid geproduceerd ammoniumsulfaat (kg/d)
$C_{gas}^G$	=	NH <sub>4</sub> in gasfase stripper G (g N/m <sup>3</sup> ) = Gasstroom richting gaswasser
$Mw((NH_4)_2SO_4)$	=	molecuulgewicht ammoniumsulfaat (g/mol)

FIGUUR 15 VERWIJDERING VAN NH<sub>4</sub>-N IN (EERSTE) STRIPPER G



FIGUUR 16 VERWIJDERING VAN NH<sub>4</sub>-N IN (TWEDE) STRIPPER F



FIGUUR 17 VORMING VAN AMMONIUMSULFAAT  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  IN DE WASSER

Basisgegevens		Nooddata proces		Concentraties		Ammoniumsulfaat	
Concentratie NH4-N in gas	100	Temperatuur	30	pH	9,2	Concentratie NH4-N in water	100
Invoerdebiet	100	Luchtdebuït	100	Concentratie SO4 in water	100	Concentratie NH4-N in water	100
						Concentratie SO4 in water	100

### VASTSTELLEN VAN PROCESTECHNOLOGISCHE VARIABLEN BIJ HET STRIPPROCES

Het ammonium-stripproces heeft vanaf het begin van de proefperiode met vrijwel constante procesvoering gedraaid. Er is een kleine variatie in de pH, luchtdebuït en invoerdebiet aangebracht. Ondanks deze variaties werd een constant rendement behaald in beide strippers (Tabel 5, Tabel 6). Het verwijderingsrendement in stripper G bedroeg gemiddeld  $75,4 \pm 5,8\%$  en in stripper F  $80,4 \pm 5,3\%$ .

Gedurende de proefperiode zijn twee korte experimenten uitgevoerd om het effect van bepaalde procesparameters, gasdebiet en pH in de stripper, nauwkeuriger te kunnen vaststellen. In een proef met verdunde urine is het effect van het stripgasdebiet bepaald. De resultaten van dat experiment staan weergegeven in Figuur 18. Een volledige berekening van het verwijderingsrendement over het hele systeem is niet mogelijk omdat bij dit experiment de  $\text{NH}_4$ -concentratie in het influent niet bepaald. Daarnaast zijn er bij uitwerking van de resultaten twijfels gerezen over de betrouwbaarheid van de gasanalyses aangezien het niet mogelijk is om sluitende balansen over de stripsystemen te maken. Uit dit experiment is wel gebleken dat het striprendement aanzienlijk lager wordt bij stripgasdebieten lager dan  $800 \text{ m}^3/\text{h}$ . Deze waarde is gebruikt als ondergrens voor het gebruikte gasdebiet bij berekening van de efficiëntie in het rekenmodel.

In een tweede experiment met onverdunde urine is het effect van de pH op het rendement van het stripproces bepaald. In Figuur 20 staat het verband tussen het  $\text{NH}_4\text{-N}$  verwijderingsrendement in strippers G en F en de pH van de te strippen vloeistof weergegeven. Uit deze data blijkt dat het striprendement lager is als de pH lager wordt dan pH 10. Het exacte omslagpunt is echter niet duidelijk. De data uit Tabel 5 en Tabel 6 vertegenwoordigen een aanzienlijk grotere dataset. Daarom is in het rekenmodel voor stripper G en F (doorgetrokken lijnen in Figuur 20) een waarde ingevoerd die overeenkomt met het gemiddelde van de hele proefperiode. Voor lagere pH is de trendlijn genomen uit de experimenten. Het omslagpunt voor de pH komt dan te liggen op pH 9,2 voor stripper G en pH 9,6 voor stripper F.

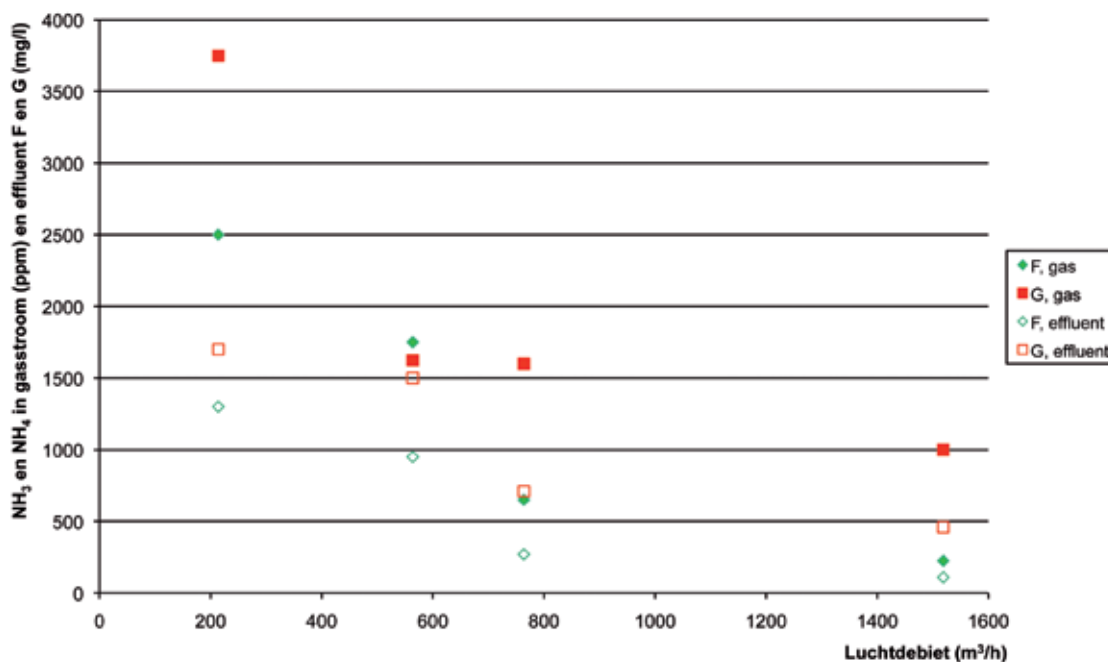


TABEL 5 EFFECT VAN PROCESPARAMETERS OP VERWIJDERINGSRENDEMENT IN STRIPPER G

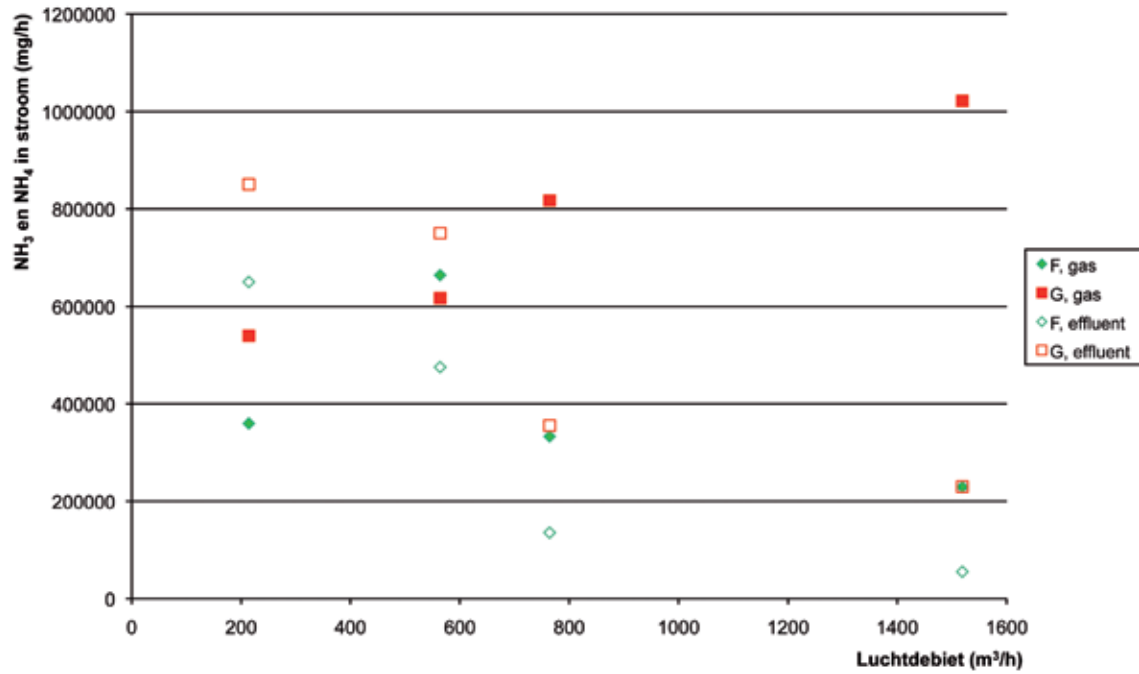
Procesparameter	Gemiddeld over pH proef periode				Q <sub>lucht</sub> (m <sup>3</sup> /h)		Urinedebiet (m <sup>3</sup> /h)	
	10	10-10.3	11-11.5	1500	1700	0.25	0.5	
Gemiddelde verwijdering (%)	75,4	72,1	73,2	78,0	76,0	71,8	76,9	74,7
Standaarddeviatie (%)	5,8	2,8	3,1	7,3	5,9	4,6	9,3	3,5
Aantal meetpunten	15	6	8	7	13	2		

TABEL 6 EFFECT VAN PROCESPARAMETERS OP VERWIJDERINGSRENDEMENT IN STRIPPER F

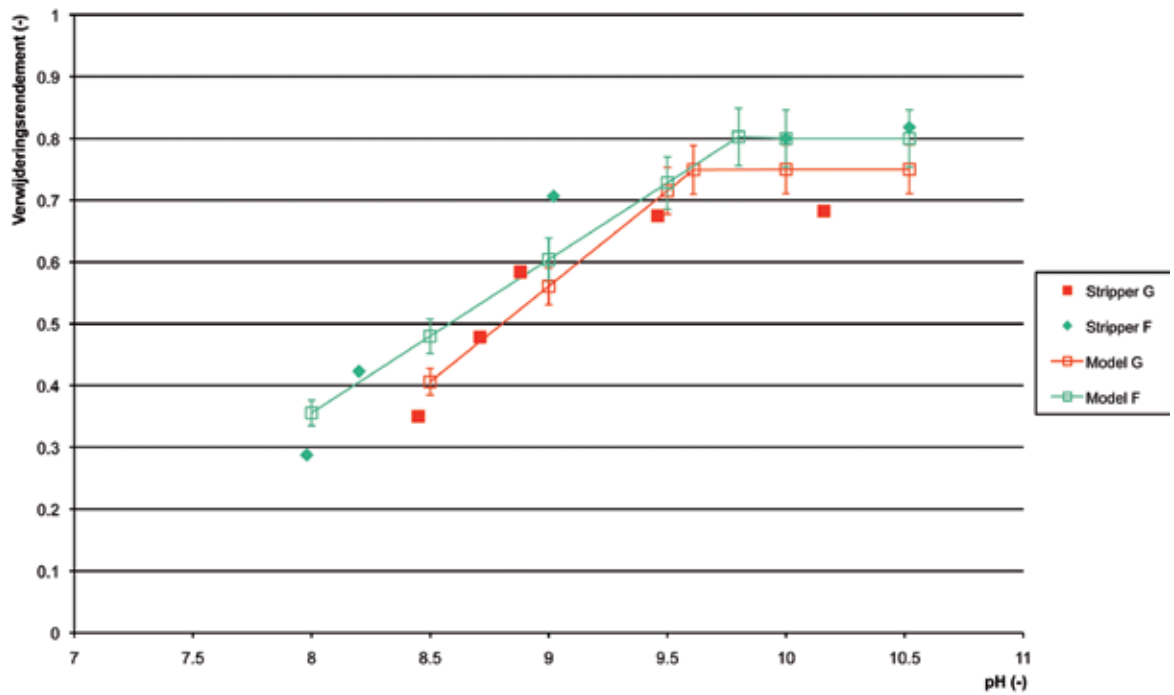
Procesparameter	Gemiddeld over pH proef periode				Q <sub>lucht</sub> (m <sup>3</sup> /h)			
	10	11	11.5	1400	1500	1600	>1600	
Gemiddelde verwijdering (%)	80,4	76,6	82,4	81,0	81,7	68,9	84,4	
Standaarddeviatie (%)	5,3	7,2	2,5	2,6	3,3	0,4	2,9	
Aantal meetpunten	16	5	7	2	10	2	2	

FIGUUR 18 NH<sub>3</sub>- EN NH<sub>4</sub>-N GEHALTEN IN GASFASE EN EFFLUENT VAN DE STRIPPERS ALS FUNCTIE VAN HET LUCHTDEBIET. DE PROEF IS UITGEVOERD MET VERDUNDE URINE

FIGUUR 19 NH<sub>3</sub>- EN NH<sub>4</sub>-N VRACHTEN IN GASFASE EN EFFLUENT VAN DE STRIPPERS ALS FUNCTIE VAN HET LUCHTDEBIET BIJ 35,4±0,8°C EN PH 10,8±0,3. DE PROEF IS UITGEVOERD MET VERDUNDE URINE



FIGUUR 20 VERWIJDERINGSEFFICIENTIE VAN NH<sub>3</sub> UIT DE VLOEISTOFFASE ALS FUNCTIE VAN DE PH EN BIJ 37,4±1,6°C. DE PROEF IS UITGEVOERD MET ONVERDUNDE URINE

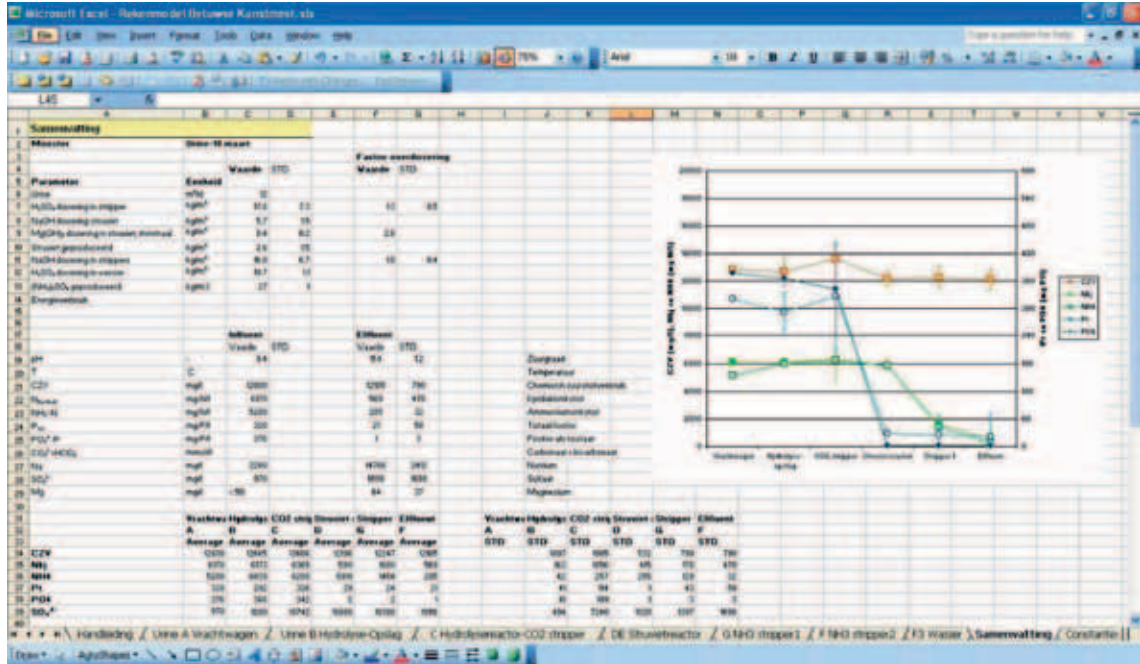


De verwijderingsefficiëntie voor stripper G is gedefinieerd als de verwijdering van NH<sub>4</sub>-N uit de vloeistoffase ten opzichte van het effluent van struvietbezinker E en voor stripper F als de verwijdering van NH<sub>4</sub>-N uit de vloeistoffase ten opzichte van het effluent van stripper G. Ook is weergegeven hoe deze verwijderingsrendementen zijn toegepast in het rekenmodel.

### 3.4.6 SAMENVATTING VAN PROCES

De samenvatting van het rekenmodel is weergegeven op een apart tabblad (Figuur 21), met daarop de samenstelling van de ingaande stroom en de uitgaande stroom (het effluent van stripper F), alsook de hoeveelheid zuur en loog die moeten worden toegevoegd en de hoeveelheid struviet en ammoniumsulfaat die worden gevormd

FIGUUR 21 SAMENVATTING VAN HET PROCES



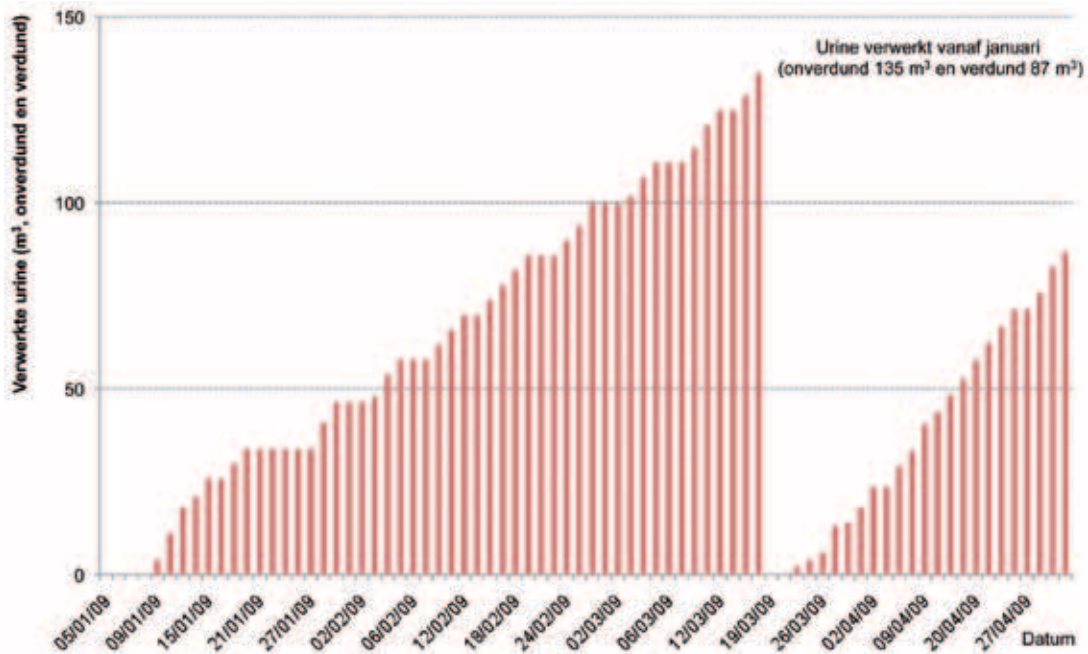
## 4

## RESULTATEN PROEFINSTALLATIE

## 4.1 INLEIDING

Voor de beschrijving van de resultaten van de proefinstallatie is alleen gebruik gemaakt van de data die verkregen zijn in de periode vanaf januari 2009, dit wil zeggen vanaf het moment dat de procesparameters vastgesteld waren en de installatie als ingeregeld beschouwd kon worden. Zoals beschreven in paragraaf 2.1 is de installatie eerst bedreven met onverdunde urine en daarna ter controle met verdunde urine. De hoeveelheid urine die in deze periode verwerkt is staat cumulatief weergegeven in onderstaande grafiek (Figuur 22).

FIGUUR 22 CUMULATIEVE WEERGAVE VAN DE HOEVEELHEID URINE DIE GEDURENDE DE TESTPERIODE VERWERKT IS



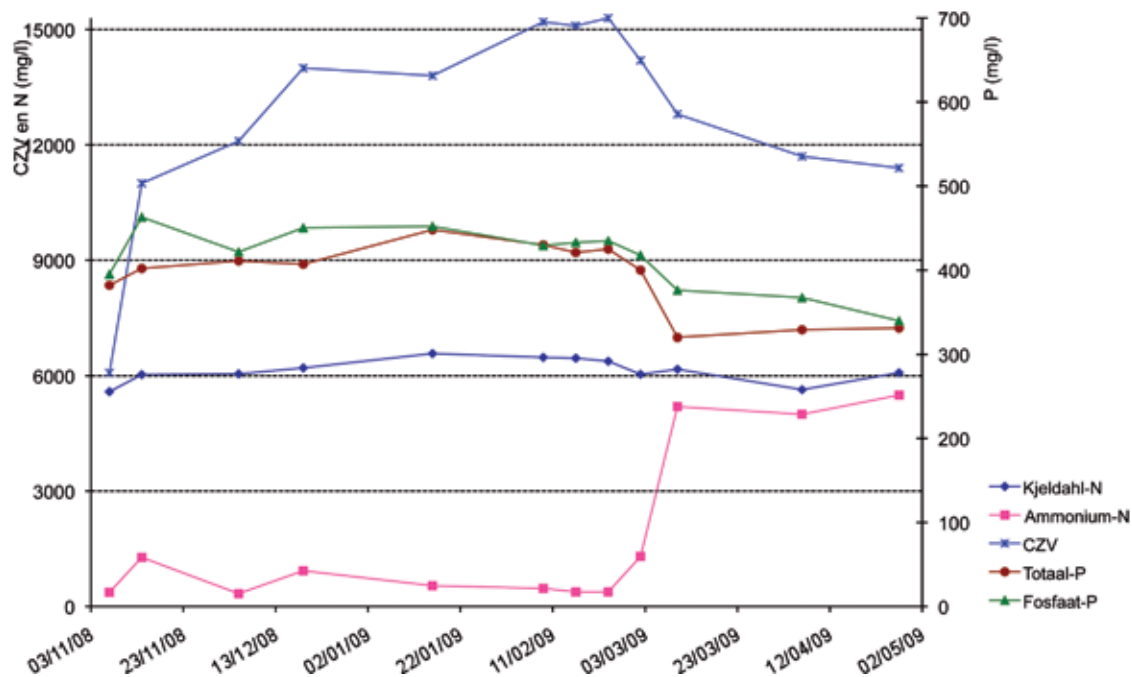
Bij de beschrijving van de resultaten die met de proefinstallatie behaald zijn, ligt de nadruk op de prestaties met betrekking tot het verwijderen van stikstof en fosfor. Van de andere gemeten parameters zijn met name de CZV- en sulfaatgehalten belangrijk in verband met de uiteindelijke lozing van het effluent van de installatie. Het verloop van de gehalten van de overige mineralen geeft wel informatie over het functioneren van de processtappen, maar deze zijn minder belangrijk voor de lozing.

## 4.2 SAMENSTELLING VAN DE URINE

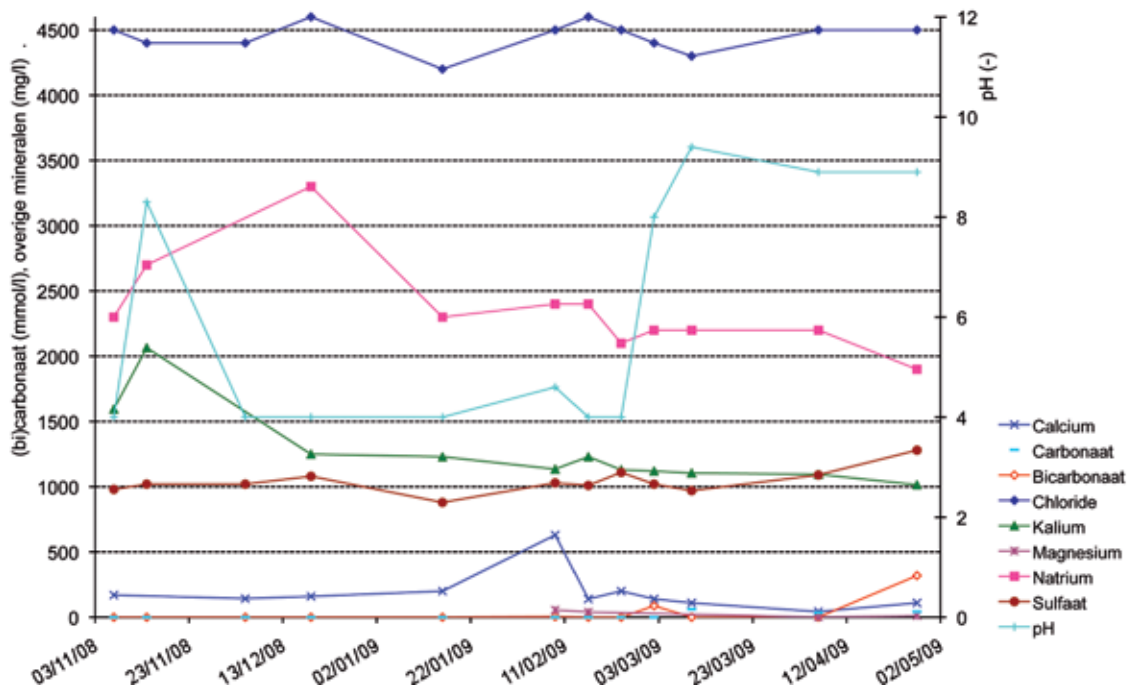
### 4.2.1 ONVERDUNDE URINE

De samenstelling van de gedurende de testperiode aangeleverde urine is weergegeven in Figuur 23 en Figuur 24. Vanaf 19 maart 2009 is er met verdunde urine gewerkt. Van elke nieuwe urinevracht werd na direct bij aflevering op de locatie uit de vrachtwagen een monster genomen ter analyse.

FIGUUR 23 GEHALTES CZV, STIKSTOF EN FOSFOR IN DE URINE



FIGUUR 24 GEHALTES MINERALEN EN PH IN DE URINE

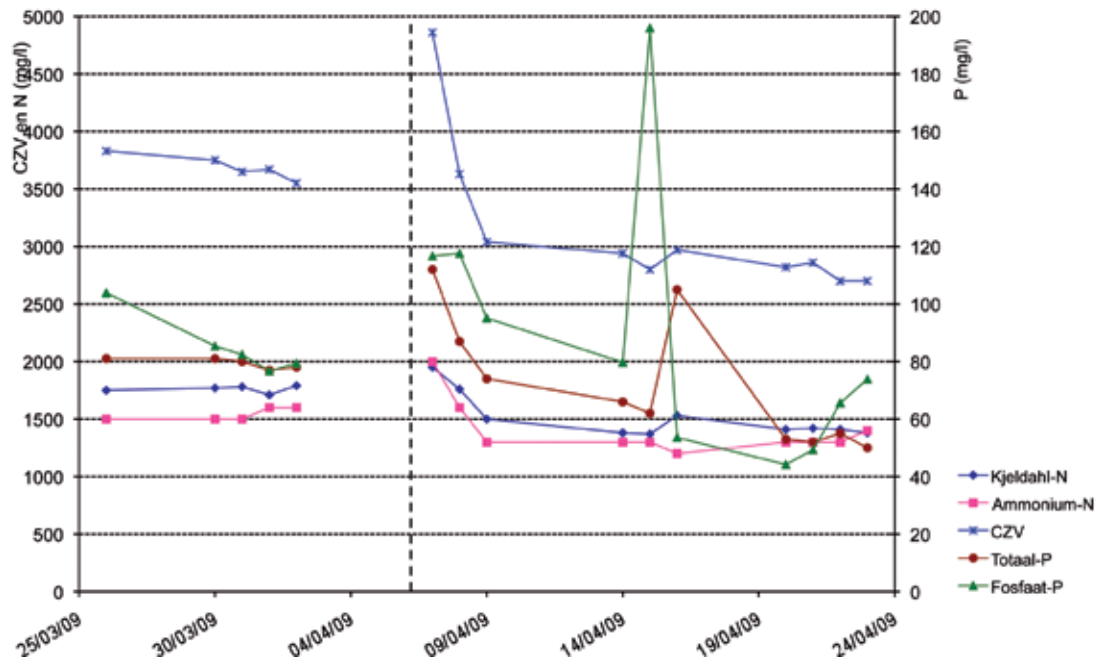


Het gehalte Kjeldahl-N van de aangeleverde urine was constant gedurende de hele periode (ca. 6000 mgN/l). Het is echter duidelijk te zien aan de ammoniumconcentratie (toename van ca. 500 naar ca. 5000 mgN/l) en de pH (toename van 4 naar ca. 9) dat de urine vanaf maart 2009 bij aanlevering al gehydrolyseerd was. Dit ging samen met een kleine verlaging van het fosforgehalte, wellicht veroorzaakt door precipitatie van P-zouten. Andere parameters die fluctuaties vertoonden waren CZV en natrium, wat mogelijk te maken kan hebben met de conservering van de urine. De gehalten totaal fosfor en fosfaat waren vrijwel aan elkaar gelijk. Dat het gemeten fosfaatgehalte vaak iets boven het totaal fosforgehalte lag, komt waarschijnlijk door de speciale matrix waarin gemeten moest worden. De standaardanalysemethoden voor water en afvalwater zijn niet geoptimaliseerd voor metingen in urine.

#### 4.2.2 VERDUNDE URINE

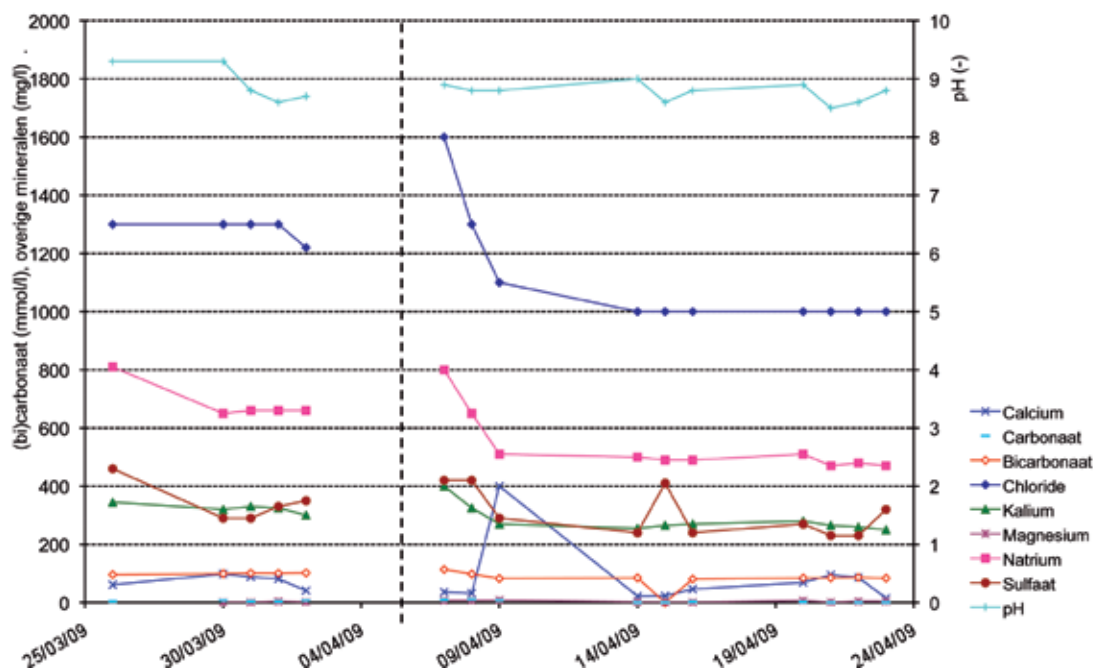
De samenstelling van de verdunde urine wordt weergegeven in Figuur 25 en Figuur 26. De urine die nog in de opslagtank aanwezig was werd voor deze testen vier keer verdund met water, en verder zoals in de testen met onverdunde urine in het opslagvat bewaard. Daaruit werden ook monsters voor de analyse genomen. De invloed van de aanlevering van verse urine (op 6 april) op de concentraties in de verdunde urine is duidelijk te zien. Dat is de enige verse aanvoer geweest in de testperiode. Na die dag zijn er echter ook veranderingen in de samenstelling. Die zouden het gevolg kunnen zijn van bijvoorbeeld chemische en/of biologische omzettingen/reacties in de opslagtank, variaties in de menging van de tank, of variaties in monsternamen.

FIGUUR 25 GEHALTES CZV, STIKSTOF EN FOSFOR IN DE VERDUNDE URINE



Verticale lijn geeft het moment aan dat een lading nieuwe urine is aangeleverd (en daarna verdund).

FIGUUR 26 GEHALTES MINERALEN EN PH IN DE VERDUNDE URINE



Verticale lijn geeft het moment aan dat een lading nieuwe urine is aangeleverd (en daarna verdund).

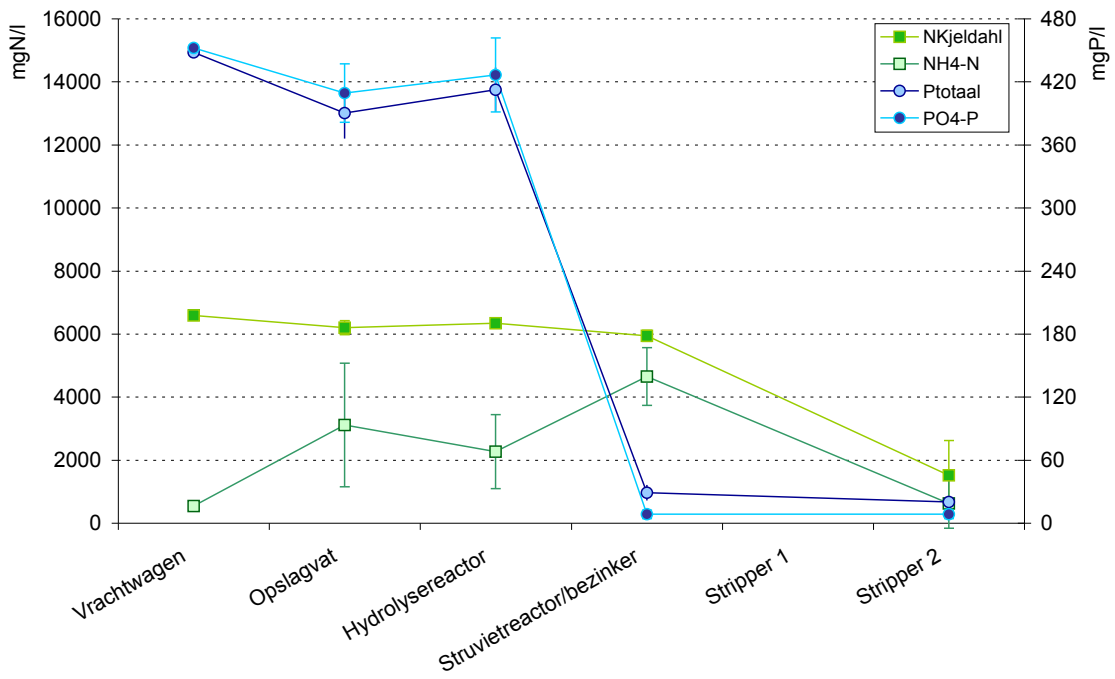
#### 4.3 OMZETTING VAN STIKSTOF EN FOSFOR

##### 4.3.1 ONVERDUNDE URINE

In onderstaande grafieken (Figuur 27, Figuur 28 en Figuur 29) zijn de behaalde resultaten voor stikstof- en fosforverwijdering in de verschillende processtappen per maand te zien. Voor deze weergave per maand is gekozen om de tijdens de proefperiode bereikte verbeteringen in de prestaties van de installatie te kunnen visualiseren. De gemiddelde waarde en de bijbehorende standaardafwijking geven een indruk van de “stabiliteit” van de installatie, die bepaald wordt door de variaties in de samenstelling van de aangeleverde urine en het functioneren van de installatie zelf.

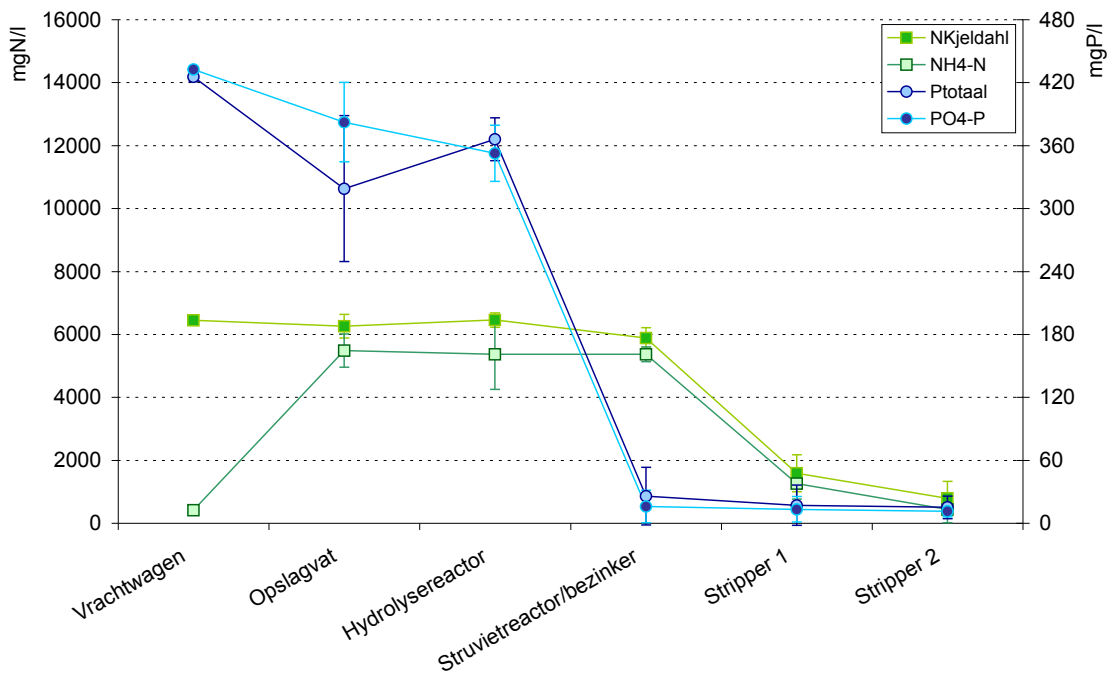
In januari was de fluctuatie van de ammoniumconcentratie nog vrij groot, met name doordat de hydrolyse van de urine niet altijd goed op gang kwam. Pas in de struvietreactor/bezinker lag de gemiddelde ammoniumconcentratie dicht bij de  $N_{\text{Kjeldahl}}$ -concentratie. De lage temperatuur in het opslagvat (soms  $<5^{\circ}\text{C}$ ) was de meest waarschijnlijke reden voor het uitblijven van hydrolyse. Ook werden er onderin en bovenin het opslagvat grote verschillen in ammoniumconcentratie gemeten. Op 4 februari werd daarom een circulatiesysteem met warmtewisseling in het opslagvat geïnstalleerd. Het is duidelijk te zien dat het grootste deel van de fosfor wordt verwijderd in de struvietreactor/bezinker. Aan stripper 1 werden er in januari nog geen metingen verricht, maar het is duidelijk dat de stikstofconcentraties na stripper 2 sterk afgenomen waren.

FIGUUR 27 RESULTATEN PROEFINSTALLATIE JANUARI 2009



Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking.

FIGUUR 28 RESULTATEN PROEFINSTALLATIE FEBRUARI 2009

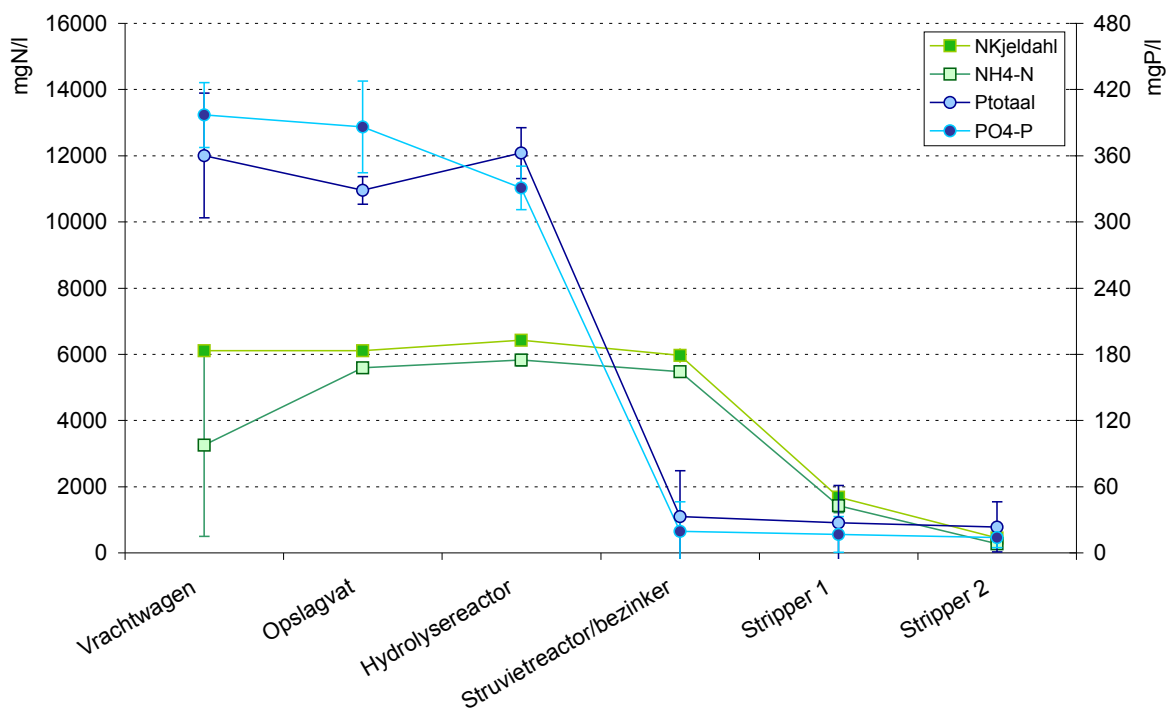


Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking.



In februari was de circulatie/verwarming van het opslagvat operationeel, met een positief effect op de hydrolyse. Dit is goed te zien aan de ammoniumconcentraties in de vrachtwagen en het opslagvat. De proefinstallatie werd in deze maand dus gevoed met volledig gehydrolyseerde urine. De standaardafwijking van de stikstofmetingen is lager dan in januari. Er is een afname van de fosforconcentratie te zien wanneer het gehalte in de vrachtwagen wordt vergeleken met dat in de hydrolyse reactor. In januari was deze afname niet zo uitgesproken. Mogelijk vindt er een neerslag van fosfor plaats, en/of wordt de fosfor verbruikt door de ureumhydrolyserende organismen. Het uiteindelijke fosforgehalte in het effluent na struvietvorming is vergelijkbaar met dat in januari. Voor stripper 1 zijn er in februari wel metingen gedaan, en het is duidelijk dat stripper 2 voor een extra verwijdering zorgt.

FIGUUR 29 RESULTATEN PROEFINSTALLATIE MAART 2009



Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking.

In maart waren de prestaties niet opvallend veel beter, maar werd er vooral met betrekking tot de stikstofconcentraties stabiel gedraaid. De in paragraaf 4.2 genoemde verandering van de urinekwaliteit wordt in de resultaten van maart zichtbaar als een grotere standaardafwijking van de concentratie in de vrachtwagen. De fosforgehalten ( $P_{\text{tot}}$  en  $PO_4^{3-}$ ) in het opslagvat variëren wat minder, maar verder zijn de prestaties van de installatie in maart vergelijkbaar. De bereikte stikstofgehalten in het effluent zijn gemiddeld wel iets lager.

Samenvattend kan gesteld worden dat de prestaties op het gebied van fosforverwijdering, beoordeeld op de bereikte eindconcentraties, gedurende de drie maanden gelijk is geweest. Uit de concentraties is echter niet af te leiden hoe de prestaties waren met betrekking tot de geproduceerde struviet en ammoniumsulfaat. Op de productie van struviet en ammoniumsulfaat wordt verderop in dit hoofdstuk meer in detail ingegaan (paragraaf 4.7). Voor stikstof is er in de tijd een prestatieverbetering te zien. Tabel 7 geeft een samenvatting van de gemiddelde N- en P-concentraties in het opslagvat en het effluent van stripper 2, met de bijbehorende standaardafwijking gegeven als percentage van de gemiddelde waarde. Voor de stikstof

concentraties is er is een duidelijke verbetering te zien in de standaardafwijking. Dit patroon is niet terug te zien in de fosforconcentraties, maar dat wordt veroorzaakt door de lage concentraties, die lastiger te meten zijn.

TABEL 7 GEMIDDELDE N- EN P-CONCENTRATIES (MG/L) IN HET OPSLAGVAT EN NA HET DOORLOPEN VAN DE PROEFINSTALLATIE IN JANUARI, FEBRUARI EN MAART

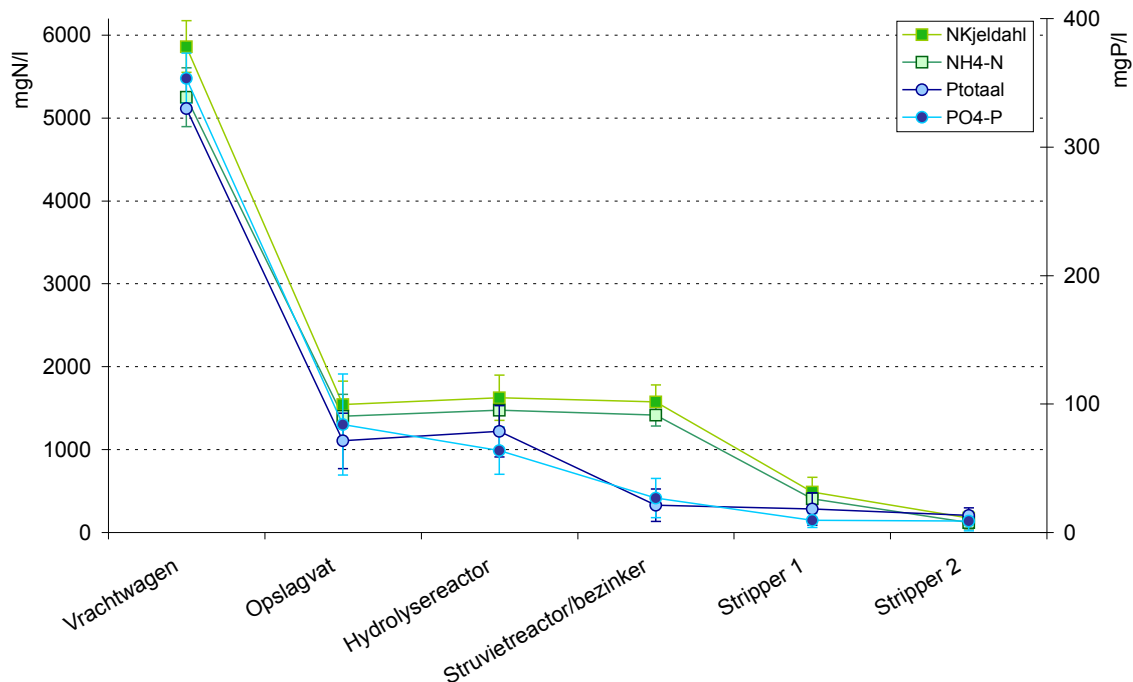
		$N_{\text{Kjeldahl}}^a$	$\text{NH}_4^+-\text{N}^a$	$P_{\text{totaal}}^a$	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}^a$
Januari	Opslagvat	6200 ± 4%	3110 ± 63%	390 ± 6%	409 ± 7%
	Stripper F	1512 ± 73%	624 ± 126%	20 ± 20%	8 ± 49%
	% verwijdering	76	80	95	98
Februari	Opslagvat	6260 ± 6%	5480 ± 10%	319 ± 22%	382 ± 10%
	Stripper F	782 ± 69%	437 ± 98%	15 ± 71%	11 ± 46%
	% verwijdering	88	92	95	97
Maart	Opslagvat	6096 ± 2%	5586 ± 3%	330 ± 4%	386 ± 11%
	Stripper F	422 ± 25%	267 ± 32%	20 ± 93%	14 ± 67%
	% verwijdering	93	95	94	96

<sup>a</sup> Standaardafwijking in %.

#### 4.3.2 VERDUNDE URINE

In onderstaande grafiek (Figuur 30) zijn de behaalde resultaten voor de verwijdering van stikstof en fosfor uit verdunde urine in de verschillende processtappen te zien. De grote afname van de concentraties in het opslagvat ten opzichte van de concentratie in de vrachtwagen is de verdunning die heeft plaatsgevonden (zie ook de voorgaande paragraaf).

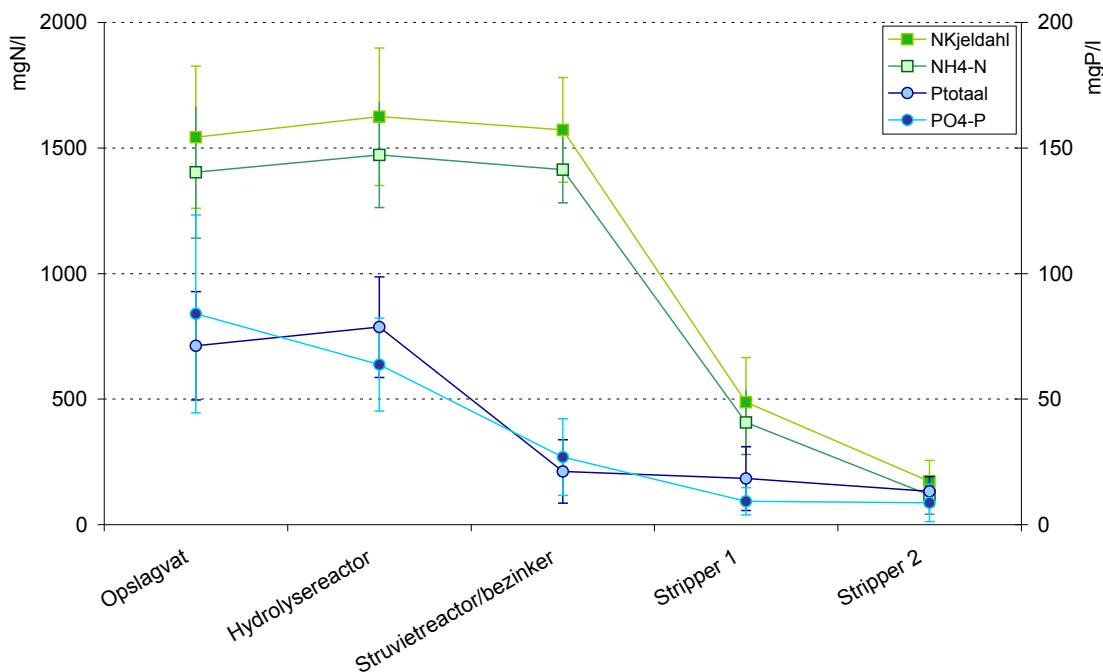
FIGUUR 30 RESULTATEN PROEFINSTALLATIE TIJDENS HET BEDRIJVEN MET VERDUNDE URINE



Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking.

Het verloop van de concentraties N en P in de verschillende onderdelen van de installatie is vergelijkbaar met het verloop voor de onverdunde urine (zie paragraaf 4.3.1). Ter verduidelijking is dezelfde figuur hieronder (Figuur 31) nogmaals gepresenteerd, maar dan zonder de bijbehorende concentraties voor aangeleverde onverdunde urine zodat de schaal aangepast kon worden aan de concentraties in de verdunde urine.

FIGUUR 31 RESULTATEN PROEFINSTALLATIE TIJDENS HET BEDRIJVEN MET VERDUNDE URINE



Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking. Let op: aangepaste schaal om variaties beter te kunnen zien, waardoor de standaardafwijkingen relatief groter lijken dan in de voorgaande grafieken.

TABEL 8 GEMIDDELDE N- EN P-CONCENTRATIES (MG/L) IN HET OPSLAGVAT EN NA HET DOORLOPEN VAN DE PROEFINSTALLATIE GEDURENDE DE TEST MET VERDUNDE URINE

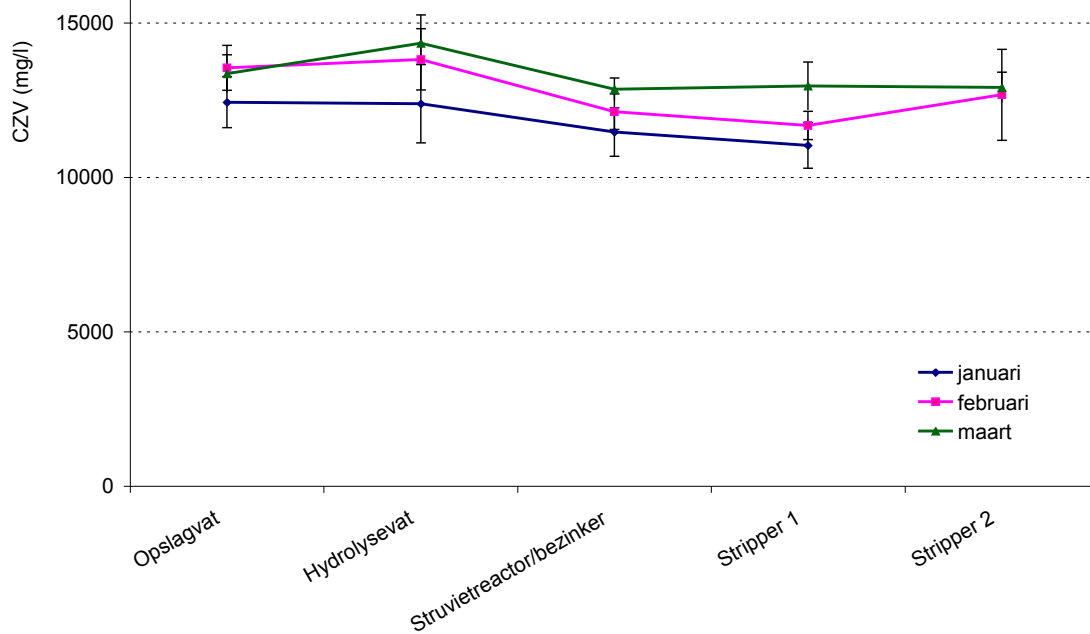
	$N_{\text{Kjeldahl}}^a$	$NH_4^+-N^a$	$P_{\text{totaal}}^a$	$PO_4^{3-}P^a$
Opslagvat	1542 ± 18%	1403 ± 19%	71 ± 30%	84 ± 47%
Stripper F	172 ± 49%	117 ± 65%	13 ± 45%	9 ± 86%
% verwijdering	89	92	81	90

<sup>a</sup>. Standaardafwijking in %

#### 4.4 CZV EN SULFAAT

Naast stikstof en fosfor zijn de CZV- en sulfaatconcentraties belangrijke parameters in verband met de lozing van het effluent van de installatie, aangezien beide van invloed zijn op de belasting van de RWZI waar de deelstroombehandeling op loost en meetellen in de berekening van het aantal vervuilingseenheden waarmee de verontreinigingsheffing wordt bepaald. In onderstaande grafieken worden de CZV- en sulfaatconcentraties die in de verschillende processtappen bij behandeling van onverdunde urine gemeten zijn weergegeven, als gemiddelden met de bijbehorende standaardafwijking. De resultaten worden daarnaast in detail beschreven in Bijlage 5. De grafieken die betrekking hebben op de behandeling van verdunde urine zijn weergegeven in Bijlage 6.

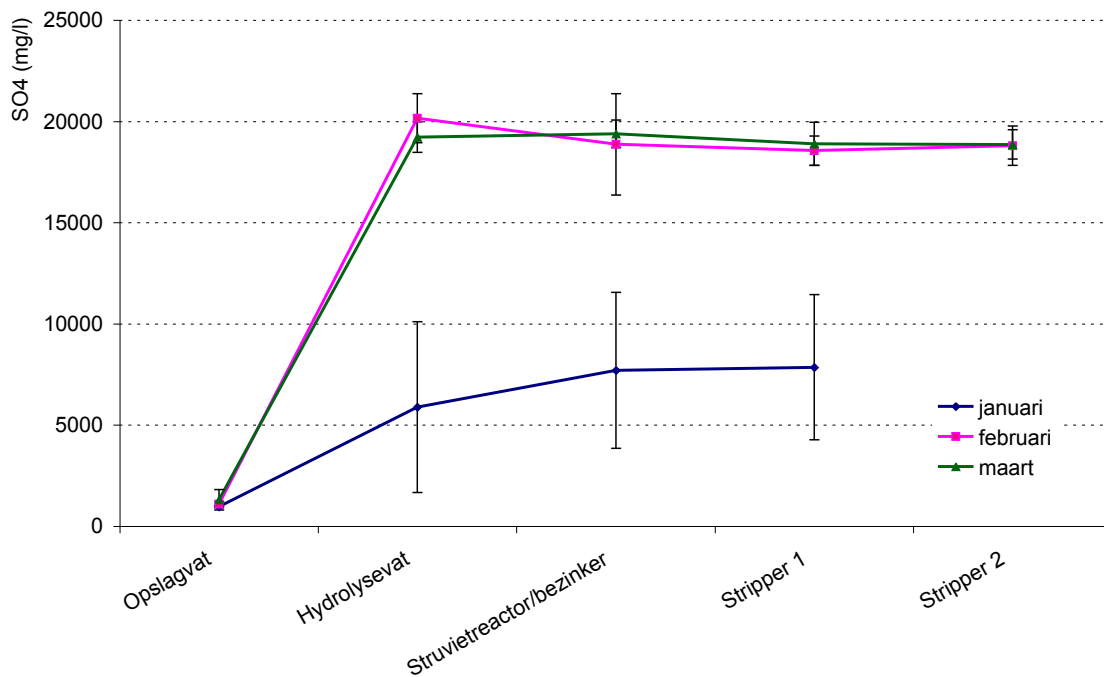
FIGUUR 32 CZV-RESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR ONVERDUNDE URINE



Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking.

De CZV-concentratie wordt gedurende het verblijf van de urine in de proefinstallatie nauwelijks beïnvloed. Het gehalte wordt bepaald door de organische verbindingen die van nature in urine aanwezig zijn, het conserveringsmiddel dat in dit geval aan de urine is toegevoegd en de groei van micro-organismen in de verschillende reactoren. In tegenstelling tot het verwijderen van stikstof en fosfor uit de urine waarbij de ontvangende RWZI wordt ontlast met betrekking tot de verwijdering van deze twee componenten, verandert de organische belasting door behandelen van deze deelstroom niet.

FIGUUR 33 SULFAATRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR ONVERDUNDE URINE



Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking.

Zwavelzuur wordt toegediend aan het hydrolysevat om de pH te verlagen. Hierdoor neemt de sulfaatconcentratie sterk toe. De sulfaatconcentratie wordt in de daaropvolgende processtappen niet verder beïnvloed. In januari werd de dosering nog gevarieerd, maar in februari en in maart was de hoeveelheid constant.

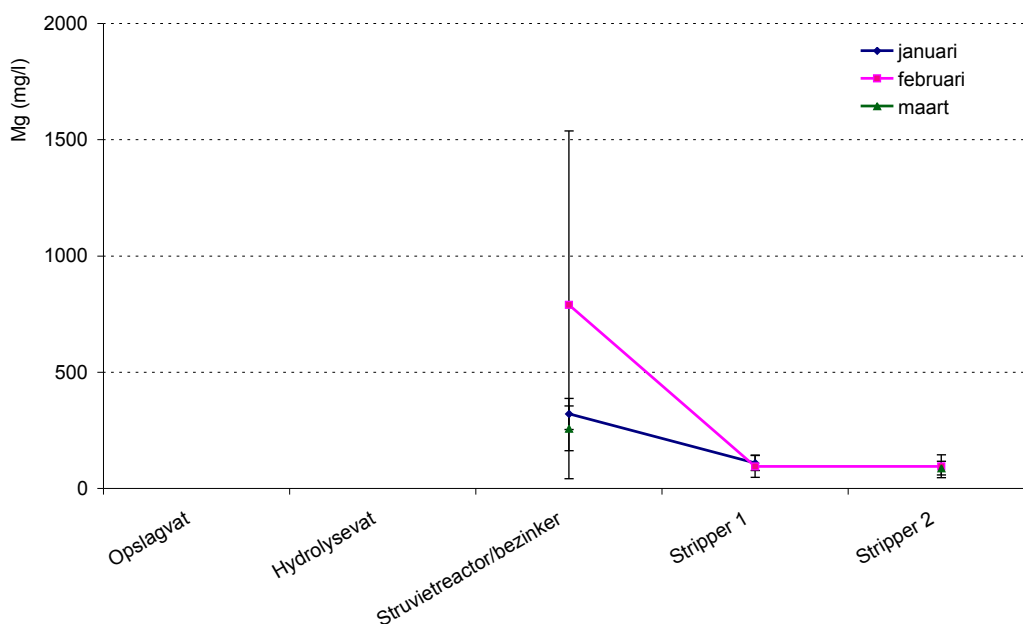
#### 4.5 OVERIGE PARAMETERS

De resultaten voor de overige parameters die gedurende de testperiode gemeten zijn worden in detail gegeven in Bijlage 5. De grafieken met de resultaten van de behandeling van verdunde urine zijn weergegeven in Bijlage 6. Hieronder staan de resultaten voor deze verschillende parameters bij behandeling van onverdunde urine in grafieken samengevat (Figuur 34 tot en met Figuur 37). Analoog aan de weergave van de resultaten voor de stikstof- en fosforconcentraties wordt voor de onverdunde urine van elk van de drie meetmaanden het gemiddelde en de standaardafwijking gegeven, en voor de verdunde urine het gemiddelde en de standaardafwijking voor de hele periode dat er verdunde urine gebruikt is (Bijlage 6).

De magnesiumconcentraties in de onverdunde urine kunnen voor het opslagvat en het hydrolysevat niet berekend worden, aangezien de waarden onder de toen geldende detectielimiet van 50 mg/l lagen. Hetzelfde is het geval bij de waarde in stripper 1 in maart. Het is goed te zien dat de magnesiummeting in het effluent van de struvietbezinker niet constant was. De grote spreiding wordt in geringe mate veroorzaakt door de aanwezigheid van struviet in verschillende deeltjesgroottes, wat als gevolg heeft dat deze soms wel en soms niet in de analyse meegenomen worden. Daarnaast is er nog vrij MgOH aanwezig in de vloeistof. Aan de concentraties in de strippers is te zien dat vrijwel alle magnesium in de struvietbezinker achter blijft.

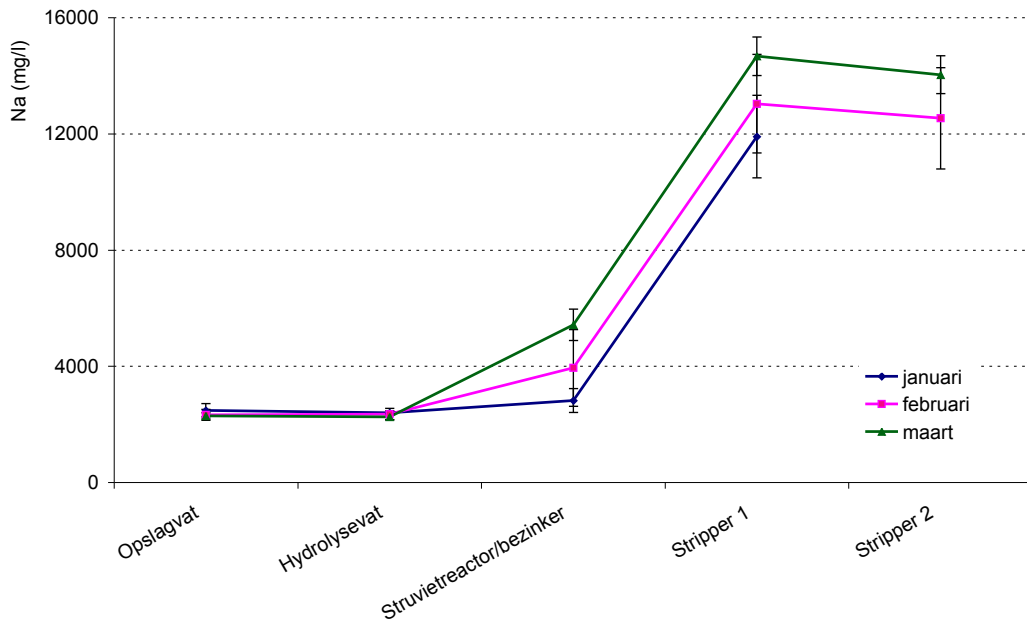
Natriumhydroxide wordt gedoseerd ten behoeve van de pH controle, en dus is de natriumconcentratie in de strippers hoger dan elders. Ook de struvietreactor heeft een hoge pH, maar deze wordt ook verhoogd door de toevoeging van bijvoorbeeld  $Mg(OH)_2$  en loog.

FIGUUR 34 MAGNESIUMRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR ONVERDUNDE URINE



Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking.

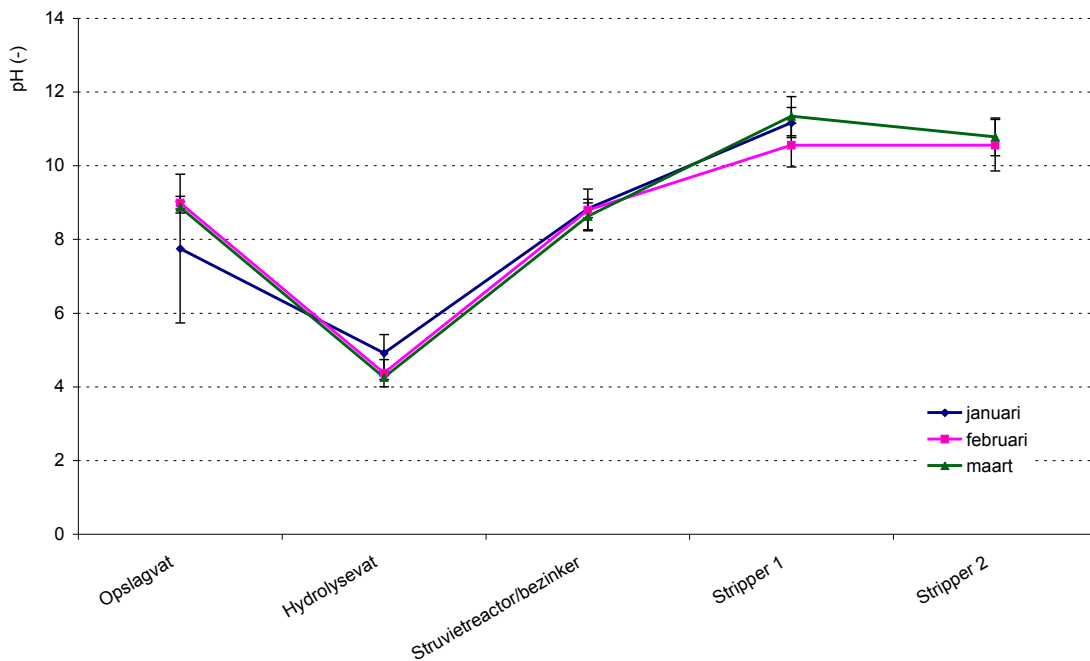
FIGUUR 35 NATRIUMRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR ONVERDUNDE URINE



Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking.

Aangezien de pH geregeld wordt zijn de waarden voor deze parameter zeer constant. Alleen in januari was er variatie in de pH waarde in het opslagvat, dit had te maken met de mate van hydrolyse van de urine. Door de soms te lage temperatuur in het vat was de hydrolyse niet altijd volledig. Met de verdunde urine was de pH in de strippers iets hoger dan in de testperiode met onverdunde urine omdat de pompregeling niet was aangepast aan de nieuwe condities (i.e het werken met verdunde urine).

FIGUUR 36 PH-RESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR ONVERDUNDE URINE



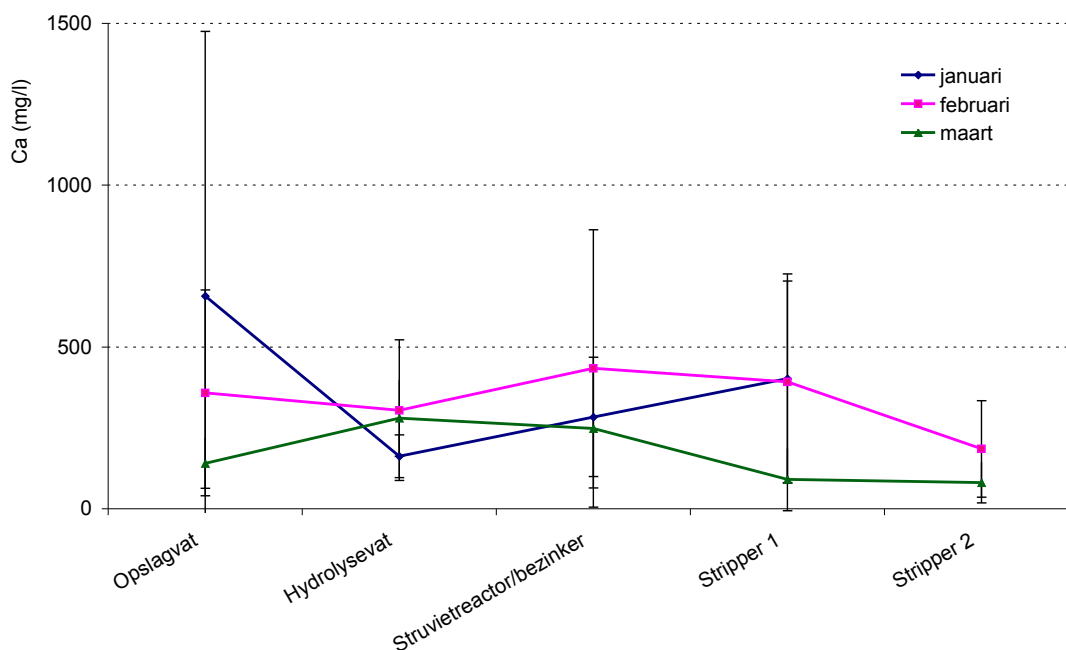
Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking.

Voorafgaand aan de testen was de calciumconcentratie ingeschat als een belangrijke parameter in verband met de vorming van mogelijke neerslagen, maar de meetwaardes bleken onbruikbaar voor opname van de calciumconcentratie als parameter in het rekenmodel. De gemeten concentraties varieerden zeer sterk, er werd echter geen verband gevonden tussen deze schommelingen en de concentraties van stoffen die mogelijk met calcium kunnen precipiteren. Het is niet duidelijk in welke mate de grote concentratieverschillen toch veroorzaakt werden door het onregelmatig optreden van neerslagreacties, of dat de monsternamen- en/of analysemethode de oorzaak zijn.

Het droge stofgehalte (grafiek in Bijlage 6) wordt bepaald door de aanwezigheid van zouten en vaste organische componenten zoals bacteriën die in de installatie groeiden. Vanwege de chemicaliëndoseringen aan de verschillende processtappen nam het droge stofgehalte in de installatie over het algemeen toe. De variatie in het gehalte was echter zo groot dat er geen conclusies aan verbonden kunnen worden.

De chloride- en de kaliumconcentraties in de installatie zijn in principe onafhankelijk van de procesvoering, behalve gedurende een periode in januari dat magnesiumchloride gebruikt werd in de struvietreactor. Verder zijn er niet bewust chloride- of kaliumzouten gebruikt in de proefinstallatie en (grafieken in Bijlage 6).

FIGUUR 37 CALCIUMRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR ONVERDUNDE URINE



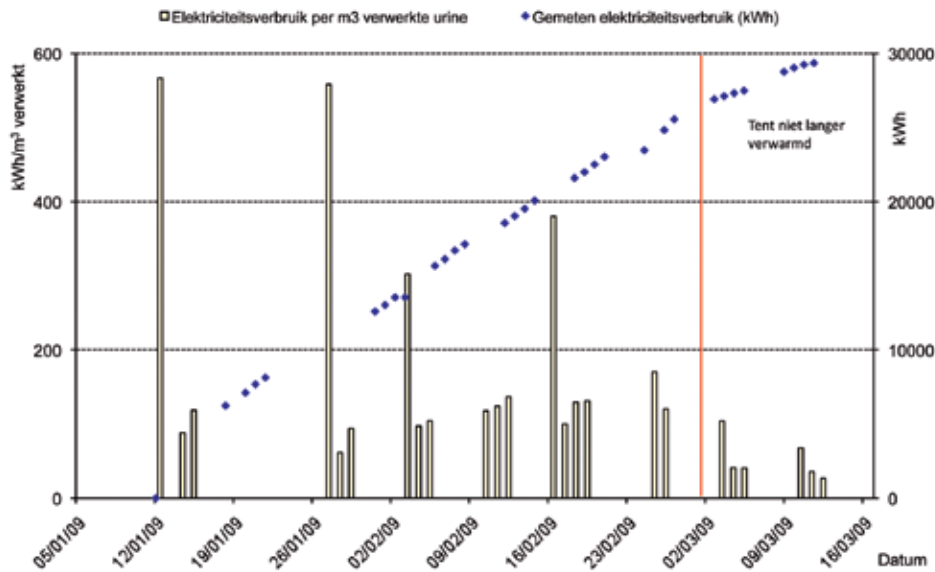
Weergegeven zijn gemiddelden per reactor(onderdeel) en de bijbehorende standaardafwijking.

## 4.6 ELEKTRICITEITSVERBRUIK

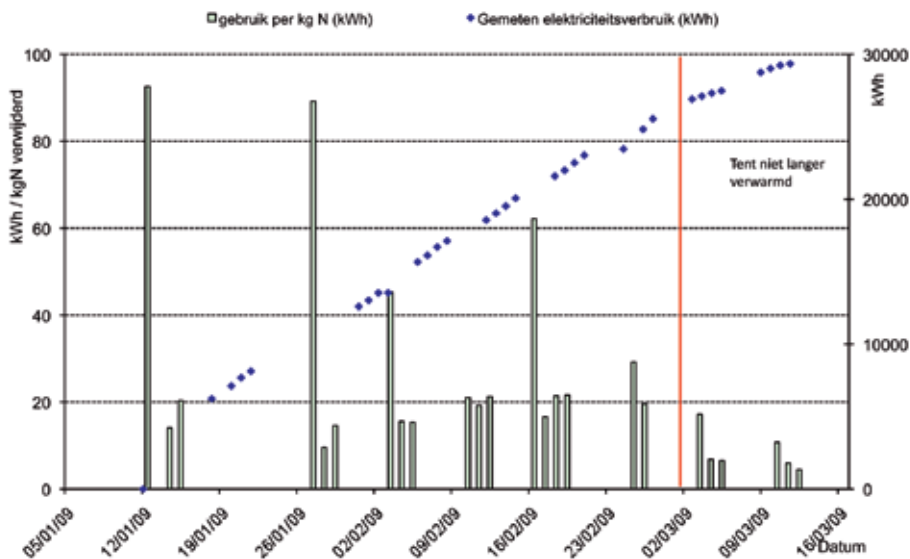
### 4.6.1 ONVERDUNDE URINE

Gedurende de testperiode is het elektriciteitsverbruik van de installatie bijgehouden. Zoals beschreven in Hoofdstuk 3 waren de pompen van de installatie in het weekeinde uitgeschakeld. De opslagtank en de tent/overkapping werden wel verwarmd in de weekeinden. Het starten van de pompen veroorzaakte bij de start van elke meetweek een piek in het elektriciteitsverbruik. Echter deze piek wordt ook veroorzaakt door het feit dat in de weekeinden het stroomverbruik niet werd afgelezen waardoor het op maandagen geregistreerde verbruik daadwerkelijk het gecombineerde verbruik van het weekeinde (bijvoorbeeld voor tentverwarming) en maandag betref. In Figuur 38 - Figuur 39 wordt het elektriciteitsverbruik van de installatie draaiend met onverdunde urine weergegeven voor de drie testmaanden. Het effect van de "maandagregistratie" en het aanschakelen van de pompen is duidelijk te zien, evenals het effect van het uitschakelen van de verwarming van de overkapping.

FIGUUR 38 ELEKTRICITEITSVERBRUIK VAN DE INSTALLATIE IN KWH PER M<sup>3</sup> VERWERKTE ONVERDUNDE URINE



FIGUUR 39 ELEKTRICITEITSVERBRUIK VAN DE INSTALLATIE IN KWH PER KG VERWIJDERD N UIT ONVERDUNDE URINE

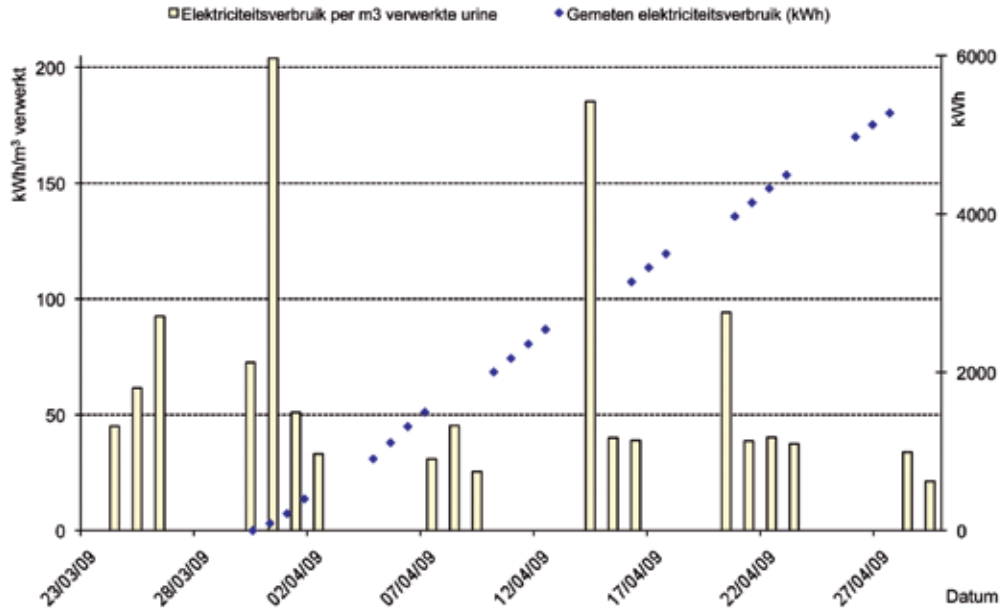




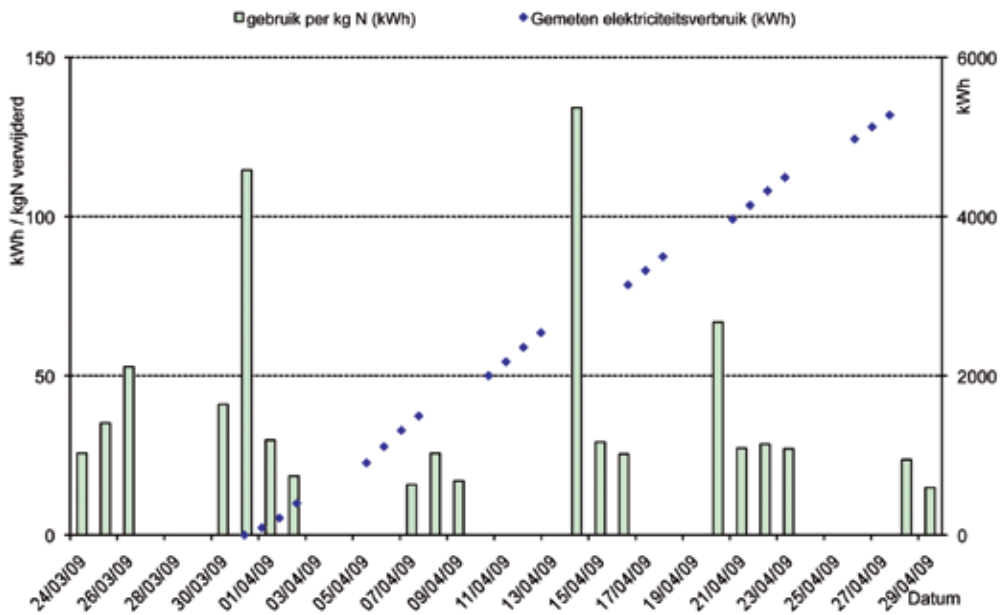
### 4.6.2 VERDUNDE URINE

In Figuur 40 - Figuur 41 wordt het elektriciteitsverbruik van de installatie draaiend met verdunde urine weergegeven.

FIGUUR 40 ELEKTRICITEITSVERBRUIK VAN DE INSTALLATIE IN KWH PER M<sup>3</sup> VERWERKTE VERDUNDE URINE



FIGUUR 41 ELEKTRICITEITSVERBRUIK VAN DE INSTALLATIE IN KWH PER KG VERWIJDERD N UIT VERDUNDE URINE



#### 4.6.3 VERANDERING IN ELEKTRICITEITSVERBRUIK

Tabel 9 geeft het elektriciteitsverbruik weer voor de proef met onverdunde urine, berekend voor de periode januari tot half maart en voor de afzonderlijke maanden. Voor de berekeningen is het verschil in de stand van de elektriciteitsmeter in de betreffende periode gedeeld door respectievelijk het aantal dagen, aantal kubieke meters verwerkte urine en het aantal kg verwijderd stikstof. De proefinstallatie is ingericht om een zo groot mogelijk deel van 5000 tot 6000 mg N/l en 300 tot 400 mg P/l. De energiebehoefte van de N verwijdering is omdat deze met twee strippers en een wasser plaatsvindt vele malen hoger dan de P-verwijdering door struvietprecipitatie. Dat en het verschil in concentratie tussen N en P in de urine maken dat het legitiem is om te stellen dat 90 tot 95% van de energievraag van de proefinstallatie als geheel gerelateerd is aan stikstofverwijdering. Daarom is in Tabel 9 (en Tabel 10) het elektriciteitsverbruik alleen gerelateerd aan N-verwijdering. Het koppelen van het elektriciteitsverbruik aan de verwijderde hoeveelheid P zou onevenredig hoog uitvallen.

TABEL 9 ELEKTRICITEITSVERBRUIK VAN DE PROEFINSTALLATIE IN KWH PER DAG, PER M<sup>3</sup> VERWERKTE URINE, EN PER KG VERWIJDERD N

Elektriciteitsverbruik	Urine	kWh/d	kWh/m <sup>3</sup>	kWh/kgN
Januari tot half maart	onverdund	445	235	38
Januari	onverdund	542	292	47
Februari	onverdund	360	174	28
Eerste helft van maart	onverdund	244	98	16
Eind maart en april	verdund	143	64	41

Het verwarmen van de overkapping had een duidelijk effect op het elektriciteitsverbruik van de proefinstallatie. De verwarming werd op 2 maart 2009 uitgeschakeld, wat betekent dat het lagere elektriciteitsverbruik in februari (ten opzichte van het verbruik in januari) waarschijnlijk te danken is aan een efficiëntere bedrijfsvoering. In maart daalde het verbruik verder, het is niet zeker of dit alleen komt door het uitzetten van het verwarmingssysteem, of dat ook de energie-efficiëntie verbeterde. Vergeleken met de resultaten met onverdunde urine in maart, is het energieverbruik in de testen met verdunde urine hoger per kg N verwijderd, lager per dag en ongeveer gelijk per m<sup>3</sup> verwerkte urine. Dit resultaat was te verwachten, aangezien er per kg N een grotere hoeveelheid water verwerkt moet worden.

Aangezien in een praktijksituatie de installatie continu voluit zou draaien, geven de pieken in de elektriciteitsconsumptie die veroorzaakt werden door het opnieuw inschakelen van alle procesonderdelen en het weekendverbruik, een overschatting van het elektriciteitsverbruik. Tabel 10 geeft de getallen voor de elektriciteitsconsumptie van de proefinstallatie bij het weglaten van de pieken. De invloed van de pieken op het elektriciteitsverbruik blijkt groot. In de hoofdstukken 6 en 7 wordt nader ingegaan op het effect van inregelen van de installatie en de afstemming van het debiet en de ontwerpdimensionering op het energieverbruik.

TABEL 10 ELEKTRICITEITSVERBRUIK VAN DE PROEFINSTALLATIE IN KWH PER M<sup>3</sup> VERWERKTE URINE EN PER KG VERWIJDERD N, ZONDER HET PIEKVERBRUIK MEE TE REKENEN

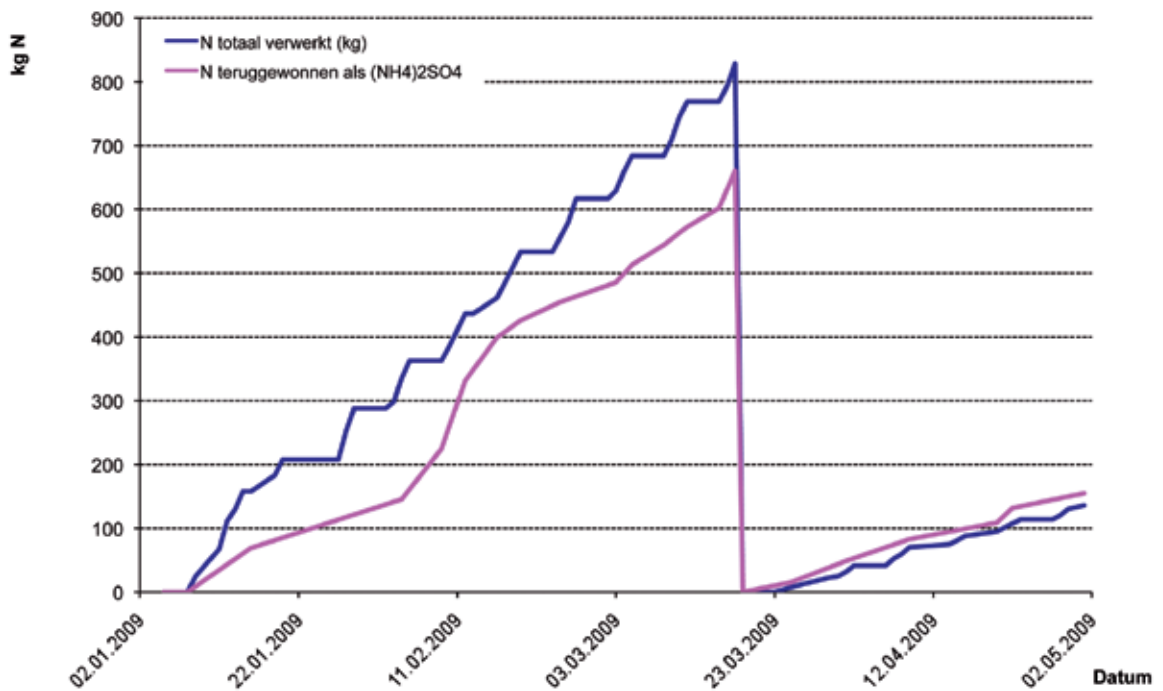
Elektriciteitsverbruik	Urine	kWh/m <sup>3</sup>	kWh/kgN
Januari tot half maart	Onverdund	97	16
Januari	Onverdund	90	15
Februari	Onverdund	123	20
Eerste helft van maart	Onverdund	36	6
Eind maart en april	Verdund	41	26

## 4.7 PRODUCTIE VAN STRUVIET EN AMMONIUMSULFAAT

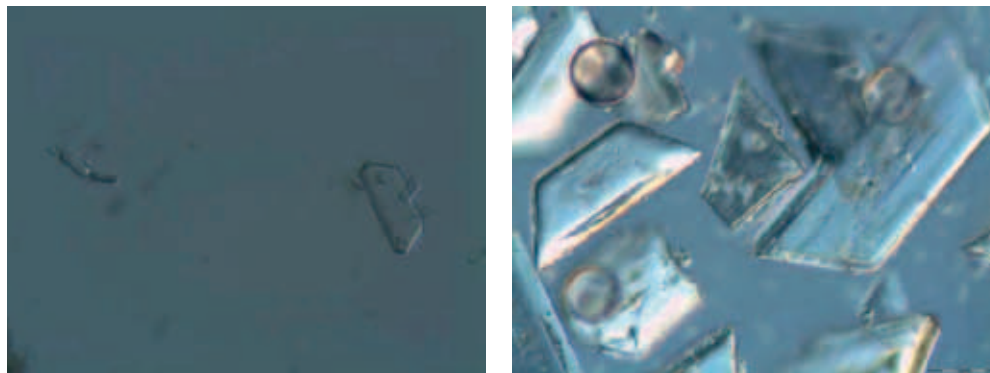
### 4.7.1 HOEVEELHEDEN

Na de in bedrijfname van de proefinstallatie en het instellen van alle procesparameters is er 221 m<sup>3</sup> urine behandeld. Hieruit werd 380 kg struviet gewonnen. Dit is gelijk aan 1,7 kg struviet/m<sup>3</sup> urine. Dit komt neer op 97,0 g N/m<sup>3</sup> urine en 214,7 g P/m<sup>3</sup> urine teruggewonnen als struviet. De gevormde struvietkristallen waren gedurende bepaalde perioden erg klein, wat het afvangen in de bezinker soms moeilijk maakte. In werkelijkheid zou de hoeveelheid struviet dus hoger kunnen liggen. Op grond van een gemiddeld PO<sub>4</sub>-P gehalte van de urine van 400 mg/l en een P-verwijderingsrendement van 90% zou er ongeveer 625 tot 630 kg struviet gevormd kunnen zijn in de proefperiode. Hiervan is dus ongeveer 60% daadwerkelijk teruggevonden als struviet.

FIGUUR 42 TERUGWINNING VAN STIKSTOF ALS AMMONIUMSULFAAT, OVER GEHELE TESTPERIODE



FIGUUR 43 MICROSCOOPFOTO'S VAN DE GEVORMDE BETUWSE KUNSTMEST-STRUVIET



Links struvietmonster E2 (4 maart 2009). Rechts een struvietmonster van 9 maart 2009 na zeven over 90 µm. De totale lengte van de staaf rechts is 5 µm.

Van de 965 kg N die in de urine aanwezig was is 815 kg teruggewonnen als ammoniumsulfaat-N (Figuur 42), hetgeen overeen komt met een terugwinning van 85%. Dit komt neer op 3,7 kg N/m<sup>3</sup> urine of 34,7 kg (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> urine.

#### 4.7.2 KWALITEIT

De samenstelling van de struviet geproduceerd in de proefinstallatie is een aantal maal geanalyseerd bij het laboratorium van het waterschap Rivierenland en bij TTI Wetsus in Leeuwarden onder andere met EDX (Energy dispersive X-ray spectroscopy). De analyses zijn uitgevoerd na drogen van de struviet (dus inclusief gebonden water) aan de lucht en na verassen van de struviet bij 500°C. Struvietkristallen bevatten bij kamertemperatuur 6 mol water per mol struviet. Bij verhitten boven 100°C, verdwijnt dit water uit de structuur.

De EDX resultaten staan weergegeven in Tabel 11. Deze resultaten suggereren dat de Betuwse Kunstmest-struviet bestaat uit magnesiumfosfaat-zouten, en dan meer in het bijzonder magnesiumammoniumfosfaat, i.e. struviet (13). Helaas zijn de gevonden waarden voor stikstof in struvietmonster 2 (uitgevoerd bij TTI Wetsus) niet betrouwbaar. Daar kunnen verder dus geen conclusies aan verbonden worden. Van de struviet zijn ook microscopische opnamen gemaakt. Deze zijn weergegeven in Figuur 43.

Ook het gevormde ammoniumsulfaat is door een extern laboratorium geanalyseerd (Tabel 12). Uit de resultaten blijkt dat de gevormde ammoniumsulfaat relatief weinig verontreinigingen bevat.

#### 4.8 CHEMICALIËNCONSUMPTIE

Het chemicaliënverbruik van de installatie is tijdens de gehele proefperiode zo goed mogelijk bijgehouden omdat op die manier kon worden vastgesteld hoeveel chemicaliën verbruikt worden voor de winning van een bepaalde hoeveelheid meststoffen en welke kosten uiteindelijk met de dosering zijn gemoeid. In het rekenmodel was het verbruik één van de factoren die op basis van theoretische gegevens berekend werden. De praktijkgegevens over het verbruik waren dus ook belangrijk om dat aspect van het rekenmodel te kunnen valideren. De gebruikte stoffen en hun toepassing worden in Tabel 13 samengevat. Een van de belangrijkste toeslagstoffen was het magnesiumzout dat gebruikt is om struviet te vormen. Er zijn verschillende magnesiumzouten gebruikt, namelijk MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O en Mg(OH)<sub>2</sub>. De dosering is gevarieerd maar uiteindelijk bleek het mogelijk de magnesiumhoeveelheid te optimaliseren zodat de hoeveelheid vrij magnesium in de waterfase minimaal was (Figuur 44).

TABEL 11 THEORETISCHE EN GEVONDEN GEWICHTSPERCENTAGES VAN DE ELEMENTEN IN GEPRODUCEERDE STRUVIET

Element	Luchtgedroogd				Verassen bij 500°C		
	Theoretisch		Analyses		Theoretisch		Analyses
	Struviet <sup>a</sup>	Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>b</sup>	Struviet monster 1	Struviet monster 2	Struviet <sup>a</sup>	Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>b</sup>	Struviet monster 2
Mg	9,9	11,6	9,32	19,0	17,6	27,8	28,8
N	5,7		5,40	3,4	10,1		0,8
P	12,6	9,9	12,0	15,4	22,6	23,7	20,7
O	32,5	76,5		48,1	46,5	48,8	38,9
C				6,9			2,3
Na			<4,0	1,0			-
S			0,1	2,2			3,5
Cl				1,7			0,4
K			0,2	0,7			0,7
Fe			<0,1				
Ca			0,2	1,6			3,5

<sup>a</sup> De kristalmatrix van struviet bevat bij 40°C 6 mol H<sub>2</sub>O per mol struviet, na verassen bij 500°C is geen water meer in het kristal aanwezig

<sup>b</sup> De kristalmatrix van Mg<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> bevat bij 40°C 22 mol H<sub>2</sub>O per mol, na verassen bij 500°C is geen water meer in het kristal aanwezig

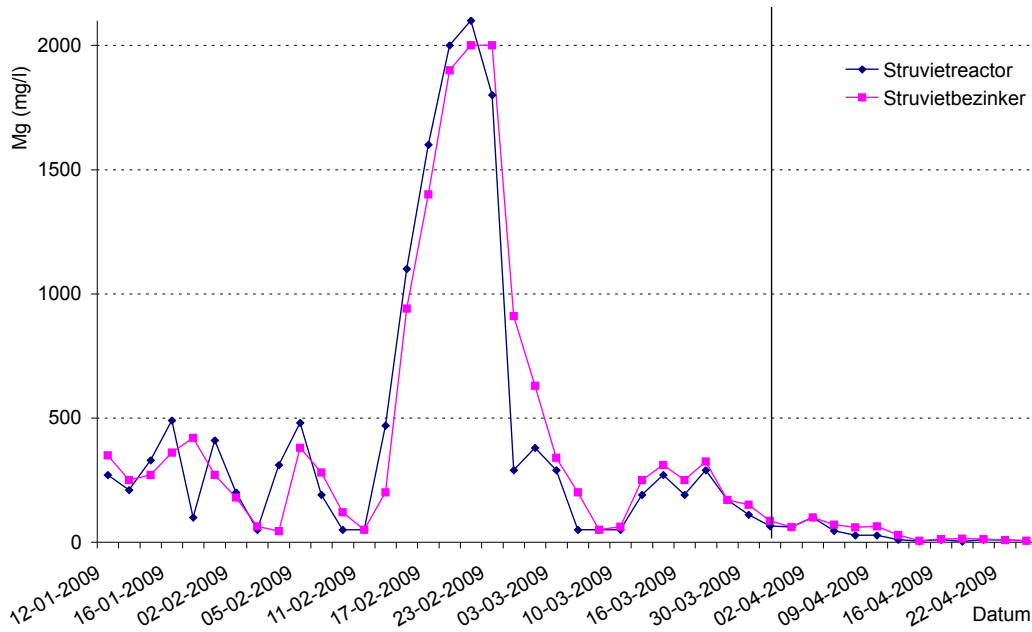
TABEL 12 ANALYSERESULTATEN VAN GEVORMD AMMONIUMSULFAAT (MONSTER 25 MAART 2009)

Analyse	Eenheid	Waarde
NH <sub>4</sub> -N	mg N/l	56000
NH <sub>4</sub>	mg/l	72000
SO <sub>4</sub>	mg/l	220000
SO <sub>4</sub> -S	mg S/l	73000
Indamprest	mg/l	270000
Arsen	µg/l	32
Cadmium	µg/l	<4,0
Chroom	µg/l	73
Koper	µg/l	160
Kwik	µg/l	13
Nikkel	µg/l	83
Lood	µg/l	<50
Zink	µg/l	130

TABEL 13 GEBRUIKTE CHEMICALIËN EN HUN KENMERKEN

	Specificatie	Processtap	Doel	Verbruik
Zwavelzuur	96% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	C, H	pH verlagen	± 40 kg/m <sup>3</sup> urine
Magnesiumzout	Mg(Cl) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	D	struvietvorming	
	97% Mg(OH) <sub>2</sub>		struvietvorming en pH-verhoging	
Natronloog	50% NaOH	D, F, G	pH-verhoging	± 40 kg/m <sup>3</sup> urine

FIGUUR 44 VARIATIE IN DE OPGELOSTE MAGNESIUMCONCENTRATIE IN DE STRUVIETREACTOR EN -BEZINKER



De verticale lijn geeft het begin van de testperiode met verdunde urine aan.

## 4.9 GEUR EN GELUID

### 4.9.1 WAAROM ZIJN GEUR EN GELUID VAN BELANG?

De geur van verse urine en de geurbeleving kan per persoon verschillen. Het geurprobleem wordt bepaald door twee stadia van urine, n.l. verse urine en verouderde urine.

De geur van verse urine wordt veroorzaakt door de stoffen die van nature afgescheiden worden door de mens. Een aantal daarvan geven (afhankelijk van de vluchtigheid) een geurbeleving, bijvoorbeeld zwavel verbindingen. Het tweede stadium is de geur van verouderde urine. Veroudering betekent dat o.a. dat bacteriën actief zijn geweest in het materiaal. Daarbij worden “nieuwe” stoffen gevormd die mee gaan spelen in de geurcomponent. Ammoniak is het voorbeeld van deze “nieuwe” gevormde stoffen en meteen een belangrijke, omdat de concentratie aanzienlijk is. De urinegeur wordt bij oplopende ammoniakconcentratie penetranter doordat bij de omzetting van ureum niet alleen ammoniak ontstaat, maar ook de pH oploopt. Bij een hogere pH komt meer ammonium in de vluchtige ammoniakvorm en stijgt de emissie. In de procesvoering wordt gebruik gemaakt van zwavelzuur ( $H_2SO_4$ ). Sulfaat kan onder anaerobe omstandigheden microbiëel worden omgezet naar  $H_2S$ , wat een tweede belangrijke geurcomponent is.

Het bedrijven van een installatie die urine verwerkt is vergunningsplichtig. Onder toezicht hierbij staan o.a. geur en geluid. De voor dit project aangevraagde vergunning verplichtte tot het volgen van  $NH_3$ ,  $H_2S$  en overige koolwaterstoffen. Ammoniak heeft een MAC waarde van 20 ppm (14 mg/m<sup>3</sup>).  $H_2S$  heeft een MAC waarde van 1,6 ppm (2,3 mg/m<sup>3</sup>). De overige koolwaterstoffen zijn niet genormeerd geweest in de vergunning. De MAC waarden mogen tijdens het bedrijven van de installatie niet overschreden worden. Het bepalen van de geuremissie van overige koolwaterstoffen is apart voor de proef onderzocht door Buro Blauw, een erkend bureau.

Het bedrijven van een installatie (welke dan ook) kan ook qua geluid nadelige consequenties hebben voor de omgeving. De akoestiek van de proef is daarom door het daarvoor erkende adviesbureau Tauw onderzocht. Het akoestisch onderzoek is uitgevoerd op basis van de locatie, de geluidszones, en de installatie. De installatie is op basis van de specificaties van de verschillende geluidsproducerende onderdelen getoetst op de gevolgen voor het geluid naar de omgeving. Een praktische toets van het geluid aan de geluidzone is niet uitgevoerd omdat het hier slechts een tijdelijke proefneming betrof. De gegevens zijn getoetst met behulp van een daarvoor bestemd softwarepakket aan de geluidseisen uit de vigerende vergunning.

#### 4.9.2 MAATREGELEN RONDOM DE INSTALLATIE

De geurbestrijding die is doorgevoerd in de installatie, is gericht geweest op de geur van de gehydrolyseerde urine. Dat betekent dat we ons gericht hebben op vrij ammoniak. Vooraf is in het ontwerp van de installatie afzuiging op alle installatie onderdelen waarbij ammoniak vrij kan komen, i.e. de hydrolysetank, de struvietreactor en de bezinker, afzuiging aangebracht. De omstandigheden in deze tanks (beluchting, open) kunnen leiden tot ammoniak afgifte. Dit was niet het geval voor de ontvangsttank omdat er nog geen hydrolyse van de ureum had plaatsgevonden, en de stripinstallatie, omdat de ammoniak daar juist selectief wordt afgevangen. De afgezogen lucht van hydrolysetank en struvietreactor en -bezinker wordt over biofilters geleid. De biofilters van de compostering zijn gedimensioneerd voor luchtreiniging van een veel groter debiet (ongeveer 60000 m<sup>3</sup>/uur) dan het in de proefopstelling gehanteerde debiet van 400 m<sup>3</sup>/uur.

#### 4.9.3 RESULTATEN

Tijdens de proef blijkt dat de hydrolyse van ureum plaatsvindt in de ontvangsttank. De pH en de concentratie aan ammoniak zijn hier het hoogst. De ontvangsttank kan door de grootte niet in tent worden opgesteld. Geurcomponenten die hier vrijkomen kunnen aan de lucht vervliegen. Aangezien de tank geïsoleerd is en slechts een kleine opening aan de buitenlucht heeft, is afgifte van ammoniak zeer beperkt en heeft dit niet tot overlast geleid. Bij een doorstart van de proef moet deze opstelling opgenomen worden in het afzuigcircuit.

De ammoniakmetingen in de lucht van de overkoepelende tent zijn dagelijks uitgevoerd. De metingen van zwavelwaterstof zijn minder frequent doorgevoerd. De waarden voor ammoniak en zwavelwaterstof zijn nooit boven de MAC waarde geweest. Zwavelwaterstof is zelfs nooit aangetoond tijdens de metingen. Ammoniak was wel altijd in de ruimte aanwezig. De meetniveaus liggen tussen 2 en 10 ppm met een gemiddelde van 5,2.

Het onderzoek op de geur levert op dat de geurconcentratie van de urineverwerking hoger is dan de geur van de proceslucht in de fabriek. De urineverwerking zorgt voor een gemeten geurconcentratie van 31000 ou<sub>e</sub>/m<sup>3</sup> en 44000 ou<sub>e</sub>/m<sup>3</sup>. Bij een afzuigdebiet van 400m<sup>3</sup>/uur levert dat 2 gemeten geurvrachten op van 13 en 18 Mou<sub>e</sub>/uur. De geuremissie van de urineverwerking is daarmee vastgesteld op 13 Mou<sub>e</sub>/uur of 27 Mge/uur.

Uit de gegevens van het akoestisch onderzoek blijkt aan de zonegrens een toename te verwachten is van 3 dB.

#### 4.9.4 CONCLUSIE

De gemeten waarden aan ammoniak zijn laag en duidelijk onder de MAC waarde. Zwavelwaterstof is nooit aangetoond tijdens de proef. Bij een goed ingerichte installatie is geen probleem geconstateerd of te verwachten m.b.t. deze twee stoffen.

De verwerking van urine leidt toch tot een aanzienlijke geurconcentratie (ou<sub>e</sub>/m<sup>3</sup>) en daarom dient met deze parameter rekening gehouden te worden bij het inrichten van een verwerkingsinstallatie. Bij de gebruikte opstelling gedurende de proef is er geen geurprobleem

geweest in de tent of buiten de tent als gevolg van de verwerking van urine. Bij het ontbreken of disfunctioneren van de voorzieningen zijn er wel serieuze consequenties te verwachten. De geurvracht van de urineverwerking naar de luchtbehandeling van de composteringsinstallatie van GMB levert geen enkel probleem op. De biofilters zijn geschikt voor verwerking van ongeveer 60000m<sup>3</sup>/uur lucht en daarvan wordt 400m<sup>3</sup>/uur aangeleverd door de urineverwerking.

Een verhoging van 3dB aan de zonegrens is geen hoorbare verhoging en leidt daarom niet tot problemen.

#### 4.10 HET LOT VAN MEDICIJNRESTEN IN DE PROEFINSTALLATIE

Ter evaluatie van het gedrag van medicijnresten in de installatie is een proef gedaan met urine waaraan extra medicijnen waren toegevoegd. Hiervoor zijn aan een hoeveelheid urine in de opslagtank carbamazepine, clofibrinezuur en diclofenac gedoseerd. Deze stoffen zijn geselecteerd op grond van hun relatieve persistentie in aerobe en anaerobe milieus (12). De concentraties van carbamazepine en diclofenac in de urine zijn ook bepaald in de urine voorafgaand aan het experiment (Tabel 14). De achtergrondconcentraties van deze stoffen bedroeg respectievelijk 10 en 0,7 µg/l. Door Kujawa-Roeleveld et al. (12) is berekend dat op grond van het geregistreerde medicijnverbruik urine in Nederland gemiddeld 50 µg/l carbamazepine, 300 µg/l diclofenac en 1 µg/l clofibrinezuur zou kunnen bevatten. Daarnaast is in dezelfde studie gevonden dat gescheiden ingezamelde urine 26 µg/l carbamazepine en 12,5 µg/l diclofenac bevatte. De concentratie clofibrinezuur is niet bepaald. De gevonden achtergrondwaarden voor de urine die in het Betuwse Kunstmest project is gebruikt liggen dus aanzienlijk beneden die gerapporteerde waarden, hetgeen gezien de herkomst van de urine (zwangere vrouwen) verwacht kon worden.

De test is verder uitgevoerd zonder speciale voorbereidingen, schoonmaak of aanpassingen aan de installatie. Op dag 4 na de start van de dosering van urine met extra medicijnen zijn uit alle procesonderdelen monsters genomen voor analyse op medicijnen. Deze monsters zijn door Het Waterlaboratorium in Haarlem geanalyseerd. Tabel 14 geeft de resultaten weer. De getallen suggereren dat er in de installatie in elke stap verwijdering van medicijnen plaatsvindt. Het is echter zo dat er in de installatie in elke stap een verdunning plaatsheeft gevonden met reeds in de installatie aanwezige (schone) urine, aangezien de installatie voorafgaand aan de test niet was schoongemaakt. Er is niet met zekerheid te zeggen of er alleen een verdunningseffect speelt of dat er ook enige verwijdering optreedt, maar dit laatste is gezien de door anderen waargenomen persistentie van de verbindingen niet waarschijnlijk (12).

Er zijn een aantal factoren, die de in struviet en ammoniumsulfaat teruggevonden gehalten, beïnvloeden:

- De analyse van met name de struvietgehalten kan beïnvloed zijn door aanhangend vocht (met daarin opgeloste medicijnen) en door de aanwezigheid van organische stof. De verwachting is dat medicijnen ook gebonden zijn aan de nog aanwezige fractie organische stof in het gevormde struviet. De toepassing van andere scheidingstechnieken, bijvoorbeeld hydrocyclonen zal er in de toekomst toe leiden dat de hoeveelheid organische stof met daaraan gesorbeerde verbindingen verder afneemt.
- Het is niet uit te sluiten dat de geanalyseerde struviet/ ammoniumsulfaat gemengd was met struviet/ammoniumsulfaat die voorafgaand aan deze test al in de reactoren/opvangvaten aanwezig was.



- Daarnaast heeft het laboratorium in de analyses slechts een zeer kleine hoeveelheid struviet gebruikt. Deze is opgelost in zoutzuur, en aan deze oplossing zijn concentraties gemeten die overeenkomen met die in de ammoniumsulfaat. Deze kleine waarden zijn teruggerekend naar een gehalte per kg struviet, wat door de grote verdunningsfactor leidde tot aanzienlijk hogere waarden.

Het is in ieder geval duidelijk dat clofibrinezuur en diclofenac niet in detecteerbare hoeveelheden in de struviet of ammoniumsulfaat worden teruggevonden. Voor carbamazepine geldt dat wel (Tabel 14). Als alle carbamazepine (10 µg/l) uit de urine in de uit de urine gevormde struviet (1,7 kg/m<sup>3</sup>, zie sectie 4.7.1) zou zitten zou dit een gehalte van 5,8 mg/kg struviet tot gevolg hebben. Het hier gevonden gehalte is veel lager. Eenzelfde redenering van voor ammoniumsulfaat (35 kg/m<sup>3</sup> urine) leidt tot een gehalte van 286 µg/kg ammoniumsulfaat (of bij een 40% oplossing 115 µg/l).

Uit bovenstaande resultaten en berekeningen lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat de geteste medicijnen slechts in zeer geringe mate voorkomen in de gevormde struviet en ammoniumsulfaat. Vervolgonderzoek zal moeten uitwijzen of aanhangend vocht of ingesloten organisch materiaal verantwoordelijk is voor de huidige analyseresultaten.

TABEL 14 ANALYSERESULTATEN UIT DE TEST MET MEDICIJNDOSERING

			Carbamazepine	Clofibrinezuur	Diclofenac
Urine achtergrondconcentratie		µg/l	10,9±0,3	Niet bepaald	0,7±0,1
Procesonderdeel	B	µg/l	67,5	94,3	104,7
	C	µg/l	63,3	96,7	85,3
	D	µg/l	54,7	98,5	74,5
	E	µg/l	43,9	87,6	55,8
	F	µg/l	41,0	65,2	53,5
	G	µg/l	34,6	59,1	48,4
Producten	Struviet	µg/kg	18,3	BDL <sup>a</sup>	BDL
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	µg/l	0,08	BDL	BDL

<sup>a</sup>BDL = Beneden detectielimiet. De detectielimieten van de medicijnen zijn:  
 Carbamazepine: 2 µg/kg in struviet en 0,006 µg/l in ammoniumsulfaatoplossing;  
 Clofibrinezuur: 100 µg/kg in struviet en 0,3 µg/l in ammoniumsulfaatoplossing;  
 Diclofenac: 26,7 µg/kg in struviet en 0,08 µg/l in ammoniumsulfaatoplossing.

# 5

## VERGELIJK MODELRESULTATEN MET PRAKTIJKRESULTATEN

### 5.1 CZV, N- EN P

Twee verschillende situaties, namelijk gehydrolyseerde urine (Figuur 45, links) en ongehydrolyseerde urine (Figuur 45, rechts) zijn met het model doorgerekend. In het algemeen lijkt het model redelijk goed het verloop van  $N_{\text{kjeldahl}}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $P_{\text{totaal}}$  en  $\text{PO}_4\text{-P}$  te voorspellen (Figuur 45, rijen C en D). Dit geldt ook voor de CZV-concentratie in gehydrolyseerde urine (Figuur 45, links panel A), maar voor de CZV-concentratie voor niet-gehydrolyseerde urine is de voorspelling niet goed en ongeveer 25% te hoog. Of dit te maken heeft met het feit dat het in dat geval nog niet gehydrolyseerde urine betreft is niet duidelijk.

Bij doorrekenen van het model met verdunde urine lijkt het model in de praktijk gevonden waarden voor  $N_{\text{kjeldahl}}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $P_{\text{totaal}}$  en  $\text{PO}_4\text{-P}$  redelijk goed te benaderen (Figuur 46). Ook hier lijkt de CZV concentratie die in de praktijk wordt gemeten niet goed met het model te kunnen worden benaderd, maar in tegenstelling tot de resultaten met de onverdunde ongehydrolyseerde urine, waar het rekenmodel ongeveer 25% te hoge waarden voor de CZV berekende zijn de hier voor verdunde urine berekende waarden ongeveer 20% te laag.

### 5.2 STRUVIET EN AMMONIUMSULFAAT

De hoeveelheid gevormd struviet en ammoniumsulfaat komen redelijk goed overeen met voorspelde hoeveelheid.

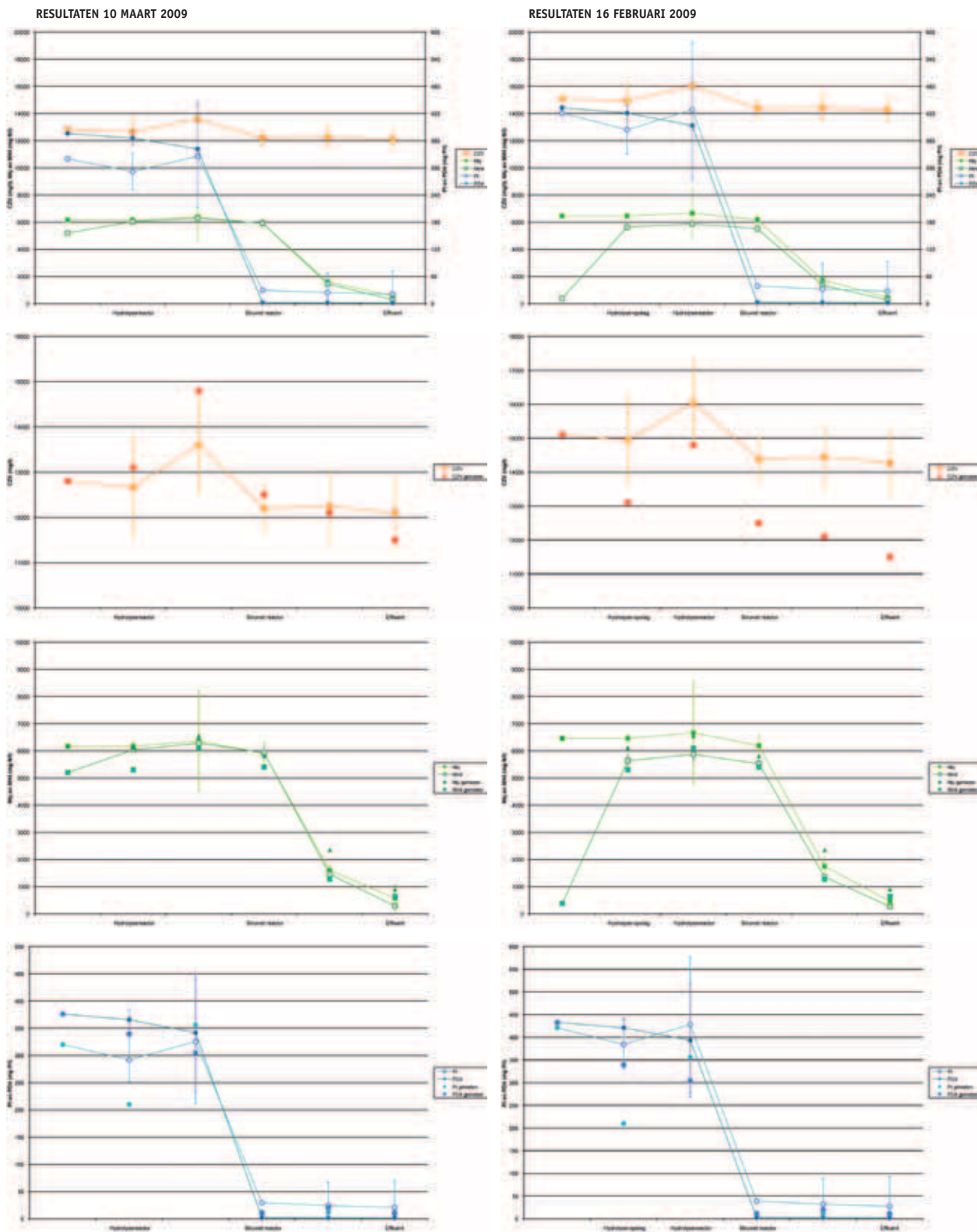
Het model voorspelt voor de struvietproductie uit de gemiddelde urine van maart 2009 de vorming van 2,4 tot 2,6 kg struviet/m<sup>3</sup> urine. Dit komt aardig overeen met de uiteindelijk verzamelde hoeveelheid van 1,7 kg/m<sup>3</sup> en de verwacht hoeveelheid van 2,8 kg struviet/m<sup>3</sup> urine die uiteindelijk overall in het project gevonden is. Voor diezelfde gemiddelde urine wordt een ammoniumsulfaatproductie van 27 kg/m<sup>3</sup> urine berekend. Overall is er in het project 34,7 kg/m<sup>3</sup> gewonnen. Aangezien niet in de hele periode de concentratie van de geproduceerde ammoniumsulfaatoplossing is vastgesteld zou de gewonnen hoeveelheid best iets lager (of hoger) kunnen uitvallen. Bovendien gaat de berekening uit van een constant gasdebiet.

### 5.3 CHEMICALIËNGBEbruik

In het algemeen kon het chemicaliën verbruik redelijk goed worden ingeschat met het rekenmodel. Uitzondering is de hoeveelheid zwavelzuur die gedoseerd moet worden in de CO<sub>2</sub>-stripper. Als het model de vereiste hoeveelheid berekent op basis van de hoeveelheid alkaliniteit die ontstaat via hydrolyse van de ureum valt het resultaat veel hoger uit dan in werkelijkheid het geval was. Dit wordt mogelijk veroorzaakt doordat de gevormde CO<sub>2</sub> al gedeeltelijk gestript wordt in de opslagtank en/of vorming van carbonaat-neerslagen in de opslag-

tank, waardoor de bicarbonaat/carbonaat de CO<sub>2</sub> stripper niet meer bereikt. Voor alle andere chemicaliënverbruik berekeningen kwamen de resultaten van de berekeningen voor zover dat was na te gaan wel overeen met de werkelijkheid.

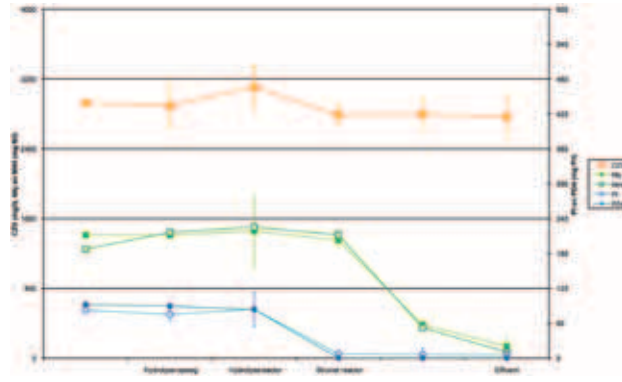
FIGUUR 45 RESULTATEN VAN HET REKENMODEL VERGELEKEN MET DE IN DE PRAKTIJK GEHAALDE RESULTATEN VOOR ONVERDUNDE URINE. DOORGETROKKEN LIJNEN ZIJN RESULTATEN MET VOORSPELDE STANDAARDDEVIATIE VAN HET REKENMODEL. LOSSE SYMBOLEN GEVEN IN DE PRAKTIJK GEVONDEN CONCENTRATIES WEER



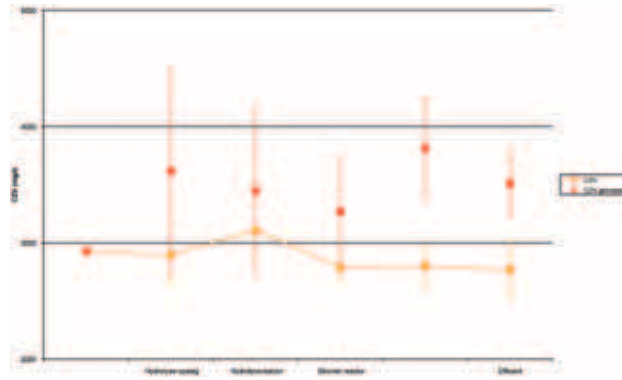
FIGUUR 46 RESULTATEN VAN HET REKENMODEL VERGELEKEN MET DE IN DE PRAKTIJK BEHAALDE RESULTATEN VOOR VERDUNDE URINEDOORGETROKKEN LIJNEN ZIJN RESULTATEN MET VOORSPELDE STANDAARDDEVIATIE VAN HET REKENMODEL. LOSSE SYMBOLEN GEVEN IN DE PRAKTIJK GEVONDEN CONCENTRATIES WEER

RESULTATEN 6-14 APRIL 2009

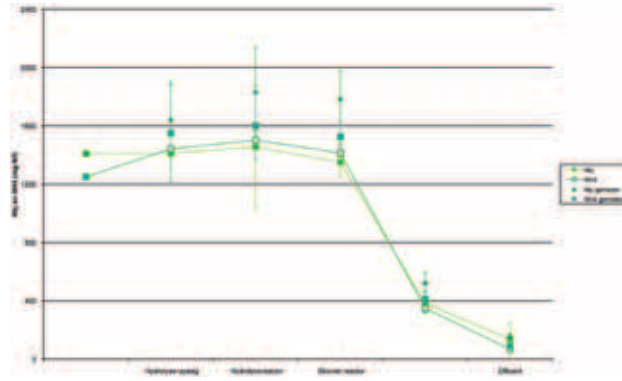
A



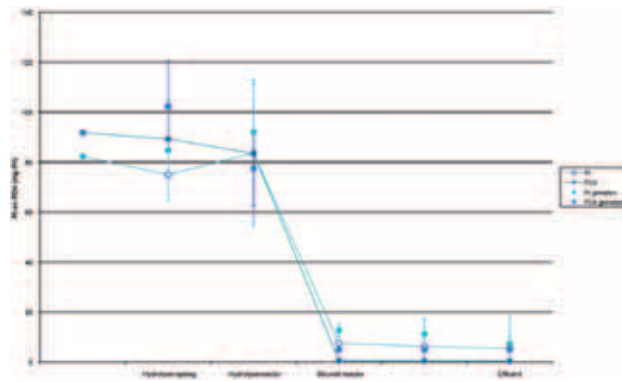
B



C



D



# 6

## VERGELIJKING “BETUWSE KUNSTMEST” MET ANDERE (CONVENTIONELE) ZUIVERINGSMETHODEN

### 6.1 INLEIDING

De belangrijkste criteria om het effect van een separate behandeling van urine volgens het “Betuwse Kunstmest” te beoordelen zijn:

- Hoeveelheid struviet en afzetmogelijkheid
- Hoeveelheid ammoniumsulfaat en afzetmogelijkheid
- Effluentkwaliteit, en besparing op zuiveringskosten vanwege separate behandeling van de urine
- Energieverbruik
- Kosten

Momenteel zijn er een aantal processen beschikbaar om (onverdunde) urine te behandelen en eventueel de aanwezige stikstof en fosfor uit urine te verwijderen en/of terug te winnen (Tabel 15). Uit de gegevens in Tabel 15 blijkt dat er meestal een combinatie van technieken nodig is om een significante hoeveelheid stikstof en fosfor te verwijderen. Het verwijderen en/of concentreren van beide nutriënten met een proces is alleen mogelijk met de input van veel energie, bijvoorbeeld via vriesdrogen, met omgekeerde osmose, elektrolyse en door nanofiltratie.

### 6.2 AFZET VAN STRUVIET EN AMMONIUMSULFAAT

Er is in Nederland (en daarbuiten) een markt voor de afzet van ammoniumsulfaat. Door de dalende kunstmestprijzen zijn de prijzen voor ammoniumsulfaat momenteel echter ook lager. Verder beweegt de prijs van ammoniumsulfaat mee met de normale grondstofprijzen (8). De mogelijkheden voor de afzet van struviet zijn momenteel nog onduidelijk. In het buitenland (Canada, Japan) is er blijkbaar een afzetmarkt die groot genoeg is om N- en P op commerciële (en dus blijkbaar winstgevende) basis uit afvalwater te verwijderen en als het struviet in de (niche)markt te zetten. In Nederland is in een aantal projecten de effectiviteit van struviet als slow P-releasing kunstmest inmiddels bewezen (5). Het wachten is nu op wetgeving en initiatieven vanuit het ministerie van Landbouw, Natuur en Visserij om grootschaliger toepassing in de praktijk mogelijk te maken. Als dat eenmaal het geval is zullen er vanzelf (niche)markten beschikbaar komen waarin struviet kan worden afgezet.

TABEL 15 VERGELIJKING VAN VERSCHILLENDE PROCESSEN VOOR DE BEHANDELING VAN ONVERDUNDE URINE (15)

Proces	Input	Welk deel (%) van Q <sup>a</sup> , C, N, P, en OMV in onverdunde urine komt door de behandeling in de effluentstroom terecht					Aard processtroom anders dan effluent die rest van Q/C/N/P/OMV bevat
		Q	C	N	P	OMV	
Opslag		98	99	99	80	98	Neerslag en vervluchtiging
Indamping	Energie: 400 MJ m <sup>-3</sup>	5	99	95	100	100	Distillaat
Vriesdrogen	Energie: 1100 MJ m <sup>-3</sup>	25	?	80	80	?	Diluaat
Omgekeerde osmose	Zuur (? ppm)	?	60	85	2	8	Concentraat
Aanzuren	Zuur 60 mol H <sup>+</sup> m <sup>-3</sup>	100	100	100	100	100	
Gedeeltelijke nitrificatie	Zuurstof Energie: 54 MJ m <sup>-3</sup>	100	18	100	100	?	
Struviet	Mg <sup>2+</sup> Energie: 50 MJ m <sup>-3</sup>	100	100	97	2	>98	Struviet
Ionenwisselaar	Zeoliet	100	100	20-36	100	?	N-geladen zeoliet
Ammonia strippen <sup>b</sup>	Water	100	100	?	100	100	10% ammonium oplossing
Anamnox	Zuurstof Energie: 54 MJ m <sup>-3</sup>	100	100	20	100	?	
Electrodialyse	Energie: 30 kWh m <sup>-3</sup>	65	10	10	10	90	Concentraat
Nanofiltratie	Energie: 6 kWh m <sup>-3</sup>	?	60	85	2	8	Retentaat
Ozon en 'advanced oxidation	Oxidant	100	?	100	100	0	

a Q = debiet; C = koolstof; N = stikstof; P = fosfor; OMV = organische microverontreinigingen;

b Ammonium onder vacuüm gestript en onder druk geadsorbeerd

### 6.3 EFFLUENTKWALITEIT EN EFFECT VAN HET SEPARAAT BEHANDELEN VAN URINE OP DE TOTALE ZUIVERING VAN HUISHOUDELIJK AFVALWATER

Het separaat behandelen van de urinestroom zal voornamelijk effect hebben op processen in de conventionele zuivering waarin stikstof- en fosfaat verwijderd worden. De invloed zal het grootst zijn op de stikstofverwijdering aangezien de omvang van een installatie en de zuiveringskosten voor een groot deel worden bepaald door de stikstofverwijdering (27). Op zich zijn biologische processen zoals genoemd in Tabel 15 geschikt om de N in separaat ingezamelde urine te verwijderen. Uit onderzoek door Wilsenach (27) bleek dat het mogelijk was om apart ingezamelde urine onverdund te behandelen via gedeeltelijke nitrificatie tot nitriet (bij lage temperaturen) al dan niet in combinatie met gedeeltelijke denitrificatie en Anamnox. Wilsenach (2006) heeft verder berekend dat bij separate behandeling van 50% van de urine de stikstofverwijdering van de rest van het afvalwater kan oplopen tot 95%. Bij behandeling van het totale huishoudelijk afvalwater (met urine) is de N-verwijdering normaal ongeveer 90%, waarbij 65% van de stikstof moet worden verwijderd via denitrificatie. Het verbeterde rendement kan echter ook behaald worden door extra doseren van koolstofbron voor denitrificatie. Apart behandelen van de urine zorgt er wel voor dat er minder denitrificatiecapaciteit nodig is. Een gevolg is dan dat er verdergaande primaire bezinking kan worden uitgevoerd waardoor de zuurstofvraag lager wordt. Door het volledig afkoppelen van urine zou er geen denitrificatie meer nodig zijn in conventionele zuiveringen waardoor het zuiveringssysteem als geheel simpeler zou worden terwijl het systeem met 30 tot 40% meer belasting zou kunnen worden bedreven bij gelijk zuiveringsrendement. Probleem hierbij is wel dat slechts 50% van de totale hoeveelheid urine geproduceerd wordt in de stedelijke gebieden en dus efficiënt separaat kan worden ingezameld en behandeld.

Aangezien de verwijdering van P in het algemeen maximaal is in conventionele zuiveringen is het effect van separaat behandelen van urine niet erg groot. Het enige voordeel, naast de terugwinning van P, is dat bij chemische precipitatie van fosfaat minder chemicaliën nodig zijn na afkoppelen van de urinestroom (27).

Volgens Wilsenach (27) zou behandeling van urine samen met het rejectiewater van de slibvergisting in een SHARON-Anammox proces met een voorgeschakelde MAP precipitatie de beste manier zijn om de behandeling van apart ingezamelde urine te combineren met de conventionele behandeling van huishoudelijk afvalwater. Zo'n configuratie levert bij 50% urinescheiding een energiebesparing van bijna 80% op ten opzichte van een conventioneel BCFS (Biologisch Chemisch Fosfaat en Stikstof verwijderings)stelsel. De energiekosten van zo'n conventioneel systeem zijn ongeveer 50 MJ/d. Dit komt neer op een verbruik van 3 MJ/m<sup>3</sup>, 66 MJ/kg N en 413 MJ/kg P<sup>5</sup>.

#### 6.4 ENERGIEVERBRUIK BETUWSE KUNSTMEST IN RELATIE TOT CONVENTIONELE ZUIVERINGSMETHODEN

Uit de elektriciteitsgegevens van het bedrijven van de proefinstallatie is het energieverbruik uitgerekend (Tabel 16). Het effect van het uitschakelen van de verwarming begin maart en het effect van de "opstart" aan het begin van de week (vergelijk "+piek" en "-piek") zijn duidelijk. Ook blijkt uit Tabel 16 nogmaals dat het behandelen van verdunde urine relatief veel energie vergt. Daarnaast is het energieverbruik van het totale proces, dus inclusief chemicaliën berekend (Tabel 17). In Tabel 18 en Tabel 19 is de energievraag van verschillende N-productie en -verwijdering of terugwinningprocessen weergegeven.

Bij vergelijking met de meest optimale resultaten van de proefinstallatie (Tabel 17) lijkt het "Betuwse Kunstmest" proces voor onverdunde urine met een energievraag van 105 MJ/kg N nu nog hoger uit te vallen dan andere N-verwerkende processen. Opvallend is dat het grootste gedeelte van de energievraag zit in het energieverbruik. Bij deze waarde zijn een aantal kanttekeningen te maken:

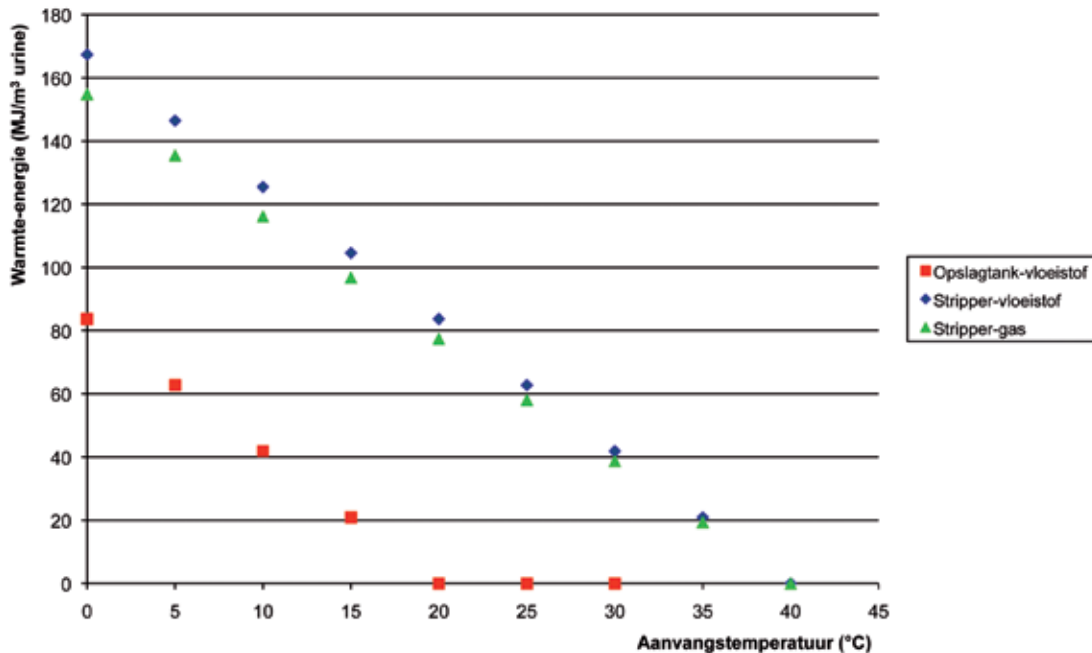
- Er is gebruik gemaakt van restwarmte die aanwezig was op de locatie. Ook stond de installatie in een (temperatuur) geïsoleerde omgeving. Als het gebruik van restwarmte achterwege was gebleven dan zou de energievraag aanmerkelijk hoger uitvallen. De verwarming van de opslagtank (van omgevingstemperatuur naar 18-25°C, de opwarming van de vloeistofbak van stripper G en de opwarming van de lucht waarmee gestript wordt vereisen nog een extra energietoever (Figuur 47 en Figuur 48). Bij een omgevingstemperatuur van 15°C vraagt het systeem om een energietoever van 35-40 MJ/kg N extra, hetgeen neerkomt op een verdubbeling van de energiekosten.
- De getallen die zijn weergegeven in Tabel 16 en Tabel 17 vertegenwoordigen het energieverbruik in het hele proces en niet alleen processen die gerelateerd zijn aan N-verwijdering/terugwinning.
- De blowers voor het stripproces waren zwaar overgedimensioneerd.
- Het proces kan op verscheidene plaatsen nog geoptimaliseerd worden waardoor er energie bespaard kan worden. Behalve bij de eerder genoemde blowers is kan er bijvoorbeeld ook nog energie bespaard worden door betere isolatie van de bedrijfsruimte en integratie van de eerste processtappen.

5 Voor deze berekening is uitgegaan van een influent debiet van 15250 m<sup>3</sup>/d, 537 gCOD/m<sup>3</sup>, 50 gN<sub>total</sub>/m<sup>3</sup> en 8 gP/m<sup>3</sup> (24). SHARON/Anammox wordt (nog) niet toegepast op geconcentreerde onverdunde urine. Er zijn wel studies uitgevoerd naar de toepassing van dit proces voor verdunde urine (bijv. Udert et al., 2008. Effect of heterotrophic growth on nitrification/anammox. Wat. Sci. Technol. 58(2): 277). Het is echter nog onduidelijk of het proces ook toepasbaar zal zijn voor onverdunde gescheiden ingezamelde urine vanwege de hoge nitrietconcentraties die mogelijk kunnen worden gevormd.

Uit een scenariostudie van Maurer et al. (16) bleek dat bij het apart inzamelen en verwerken van urine door middel van gecentraliseerde thermische reductie en gebruik van het product in de landbouw een energieverbruik van ongeveer  $65 \text{ MJ kg}^{-1}\text{N}$ <sup>6</sup> hoort ten opzichte van  $153 \text{ MJ kg}^{-1}\text{N}$  voor conventionele “recycling” van nitrificatie/denitrificatie en gebruik van  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  op het land. Uit Tabel 17 en Tabel 18 kan worden afgeleid dat nitrificatie/denitrificatie gecombineerd met Haber Bosch (momenteel de manier om stikstof te recyclen) ongeveer  $(45 + 45) = 90 \text{ MJ/kg N}$  kost. Sharon-Anammox en kunstmestproductie met urine kost ongeveer  $(19 + 45) = 64 \text{ MJ/kg N}$  (16).

Betuwse Kunstmest lijkt dus nog niet direct te kunnen concurreren, maar met een nieuwe speciaal voor onverdunde urine gebouwde installatie is waarschijnlijk nog wel winst te halen met name op het elektriciteitsverbruik. Het totale energieverbruik is vergelijkbaar met andere fysisch-chemische processen zoals strippen (Tabel 19). Het chemicaliënverbruik lijkt redelijk nauwkeurig te zijn afgestemd op de hoeveelheid N en P in de urine aangezien dit voor de onverdunde en verdunde urine nagenoeg gelijk is (Tabel 17). Zoals eerder gemeld wordt het energieverbruik per kg P hier buiten beschouwing gelaten. Ook de energie gerelateerd aan het transport van de onverdunde urine naar de verwerkingslocatie wordt niet meegenomen in de berekeningen.

FIGUUR 47 ENERGIEBEHOEFTE ( $\text{MJ/M}^3$  URINE) OM VLOEISTOF IN OPSLAGTANK EN STRIPPER TE VERWARMEN BIJ AFWEZIGHEID VAN RESTWARMTE

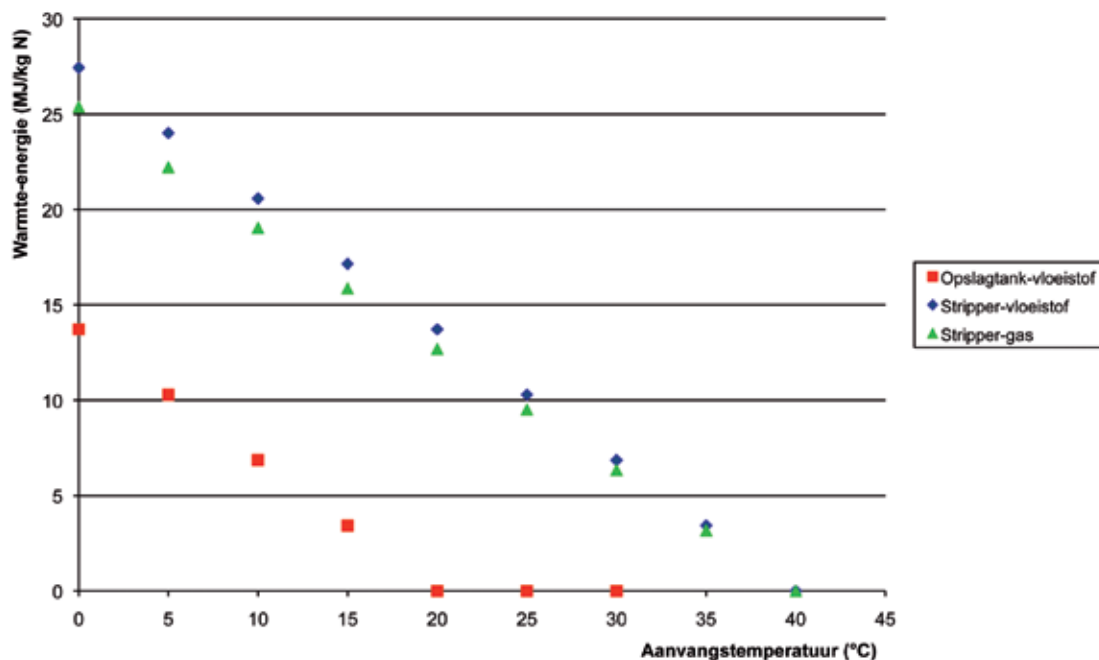


Bij deze berekening is uitgegaan van een eindtemperatuur van  $20^\circ\text{C}$  in de opslagtank en  $40^\circ\text{C}$  in de stripper eenheid. Het stripdebiet is  $3000 \text{ m}^3/\text{m}^3$  urine. Strippervloeistof en lucht worden maar een keer opgewarmd.

6 NB: Ongeveer een derde van het energieverbruik komt voor rekening van de plastic pijpleidingen die nodig zijn voor de inzameling.



FIGUUR 48 ENERGIEBEHOEFTE (MJ/KG N) OM VLOEISTOF IN OPSLAGTANK EN STRIPPER TE VERWARMEN BIJ AFWEZIGHEID VAN RESTWARMTE



Bij deze berekening is uitgegaan van een eindtemperatuur van 20°C in de opslagtank en 40°C in de stripper eenheid. Het stripdebiet is 3000 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> urine. Strippervloeistof en lucht worden maar een keer opgewarmd.

Betuwse Kunstmest lijkt dus nog niet direct te kunnen concurreren, maar met een nieuwe speciaal voor onverdunde urine gebouwde installatie is waarschijnlijk nog wel winst te halen met name op het elektriciteitsverbruik. Het totale energieverbruik is vergelijkbaar met andere fysisch-chemische processen zoals strippen (Tabel 19). Het chemicaliënverbruik lijkt redelijk nauwkeurig te zijn afgestemd op de hoeveelheid N en P in de urine aangezien dit voor de onverdunde en verdunde urine nagenoeg gelijk is (Tabel 17). Zoals eerder gemeld wordt het energieverbruik per kg P hier buiten beschouwing gelaten. Ook de energie gerelateerd aan het transport van de onverdunde urine naar de verwerkingslocatie wordt niet meegenomen in de berekeningen.

## 6.5 CONCLUSIES HOOFDSTUK 6

- Met een niet optimaal gedimensioneerde procesopstelling is het mogelijk om met een redelijke energie-input struviet en ammoniumsulfaat terug te winnen uit gescheiden ingezamelde onverdunde urine.
- De terugwinning van N en P zoals hier toegepast is energetische alleen aantrekkelijk in vergelijking met andere processen als er gebruik gemaakt kan worden van om niet aanwezige (laagwaardige) restwarmte op de locatie.
- Bij vergelijking van de energievraag van het Betuwse Kunstmest proces (105 MJ/kg N), het Haber-Bosch proces (37 MJ/ kg N) en Sharon Anammox (19 MJ/kg N) kan geconcludeerd worden dat de Betuwse Kunstmest procesvoering vooralsnog niet kan wedijveren met bovengenoemde processen voor wat betreft het energieverbruik. Er kan nog een verbeteringslag gemaakt worden bijvoorbeeld door een optimalisatie van de CO<sub>2</sub>-stripper, een betere inregeling van de ventilator in de wasser/stripper en een betere benutting van de capaciteit (bijvoorbeeld bij schaalvergroting).

**TABEL 16** ENERGIEVERBRUIK VAN PROEFINSTALLATIE MET PIEKBELASTING DOOR OPSTART AAN BEGIN VAN DE WEEK (+PIEK) EN ZONDER PIEKBELASTING (-PIEK). GEGEVENS ZIJN BEREKEND MET DATA VAN TABEL 9 EN TABEL 10 EN EEN CONVERSIEFACTOR VAN 3,6 MJ/KWH. POMPEN MENGEN, MEET- EN REGELSYSTEMEN EN DE BLOWER VAN DE STRIPPERS ZIJN INBEGREPEN. ENERGIEVERBRUIK BIJ CHEMICALIËNPRODUCTIE EN VERWARMING ZIJN NIET OPGENOMEN IN DE ENERGIEBEREKENING. VETGEDRUKTE GETALLEN ZIJN GEGEVENS DIE ONDER OPTIMALE OMSTANDIGHEDEN VERKREGEN ZIJN

Electriciteitsverbruik	Urine	kJ/d	MJ/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	MJ/kgN <sup>a</sup>	MJ/kgN <sup>a</sup>
		+piek	+piek	-piek	+piek	-piek
Januari tot half maart	Onverdund	1602	846	349	137	58
Januari	Onverdund	1951	1051	324	169	54
Februari	Onverdund	1296	626	443	101	72
Eerste helft van maart	Onverdund	878	353	130	58	22
Eind maart en april	Verdund	515	230	148	148	94

- a NB: De energie is hier weergegeven per kg N in de urine. Echter een gedeelte van de energie is ten goede gekomen van P verwijdering

**TABEL 17** ENERGIEVERBRUIK BIJ BETUWSE KUNSTMEST PER KG N IN ONVERDUNDE OF VERDUNDE URINE EN PER M<sup>3</sup> URINE. (NB: DE ENERGIE IS HIER WEERGEGEVEN PER KG N IN DE URINE. ECHTER EEN GEDEELTE VAN DE ENERGIE IS TEN GOEDE GEKOMEN VAN P VERWIJDERING)

	Primaire energie <sup>a</sup> (MJ/kg N)	Chemicalien <sup>b</sup> (MJ/kg N)	Totaal (MJ/kg N)	Totaal (MJ/m <sup>3</sup> )
Onverdunde urine	58	47	105	678
Verdunde urine (laag energieverbruik)	58	49	107	151
Verdunde urine (hoog energieverbruik)	247	49	297	419

- a Berekeningen met een elektriciteitsverbruik van 22 MJ/kg N of 94 MJ/kg N (zie ook Tabel 16). De omzetting van elektriciteit naar primaire energie is gebaseerd op een gemiddeld Europees mengsel van bronnen (38% rendement, EC Reference document on best available techniques for energy efficiency, February 2009)
- b Energieverbruik voor productie chemicaliën is gebaseerd op de volgende gegevens:  
 NaOH: 23.3 MJ/kg (in 50% oplossing) (Data uit Ecoinvent database bedraagt de Cumulative Energy Demand (CED) (= GER-waarde) voor: Sodium hydroxide, 50% in water, production mix, at plant/RER S)  
 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: -6 MJ/kg (BREF Large volume inorganic chemicals - Ammonia, Acids and Fertilizers, August 2007, <http://eippcb.jrc.es/>)  
 Mg(O): 7.2 MJ/kg Mg (BREF Cement Lime and Magnesium Manufacturing Industries, May 2009, <http://eippcb.jrc.es/>)

**TABEL 18** ENERGIE VOOR NITRIFICATIE/DENITRIFICATIE EN N-FIXATIE MET HABER-BOSCH. ALLEEN OPERATIONELE KOSTEN VOOR BIJVOORBEELD BELUCHTING ZIJN MEEGENOMEN. ENERGIEVERBRUIK VOOR BOUWMATERIALEN EN MOTOREN/MACHINE ZIJN NIET MEEGENOMEN. DE OMZETTING VAN ELEKTRICITEIT IN PRIMAIRE ENERGIE IS GEBASEERD OP EEN GEMIDDELD EUROPEES MENGSEL VAN BRONNEN (RENDEMENT 0,31) VOLGENS UCPT (1994). AANGEPAST UIT (16) EN AANGEVULD MET GEGEVENS UIT (27)

Proces	Product	Elektriciteit MJ (kg N) <sup>-1</sup>	Ander <sup>b</sup> MJ (kg N) <sup>-1</sup>	Total UCPT MJ (kg N) <sup>-1</sup>
Nitrificatie/predenitrificatie in RWZI		14	-	45
Nitrificatie/denitrificatie met methanol	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	32	77 (C)	144
Sharon/Anammox	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	13	-	48
Sharon/Anammox met urine (+CZV verwijdering)		6	-	19
Ammonium productie (best beschikbare technologie)		-	37	37
Gemiddeld N-kunstmest productie Europa		0.8	42	45
Gemiddeld ammonium productie Europa		-	43	43
Gemiddeld ureum productie Europa		1	51	54

- a Productie van NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> representeert 35 MJ/kg N
- b E = energie uit fossiele of andere bron; C = thermisch energie uit chemicaliën; T, transport van slib;  
 A = afgasbehandeling; V= verlies in brander door verbranding van anorganisch materiaal.

**TABEL 19** ENERGIE VOOR VERSCHILLENDE URINE BEHANDELINGSMETHODE OM STIKSTOF TERUG TE WINNEN. ALLEEN OPERATIONELE KOSTEN VOOR BIJVOORBEELD BELUCHTING ZIJN MEEGENOMEN. ENERGIEVERBRUIK VOOR BOUWMATERIALEN EN MOTOREN/MACHINE ZIJN NIET MEEGENOMEN. DE OMZETTING VAN ELEKTRICITEIT IN PRIMAIRE ENERGIE IS GEBASEERD OP EEN GEMIDDELD EUROPEES MENGSEL VAN BRONNEN (RENDEMENT 0,31) VOLGENS UCPTA (1994). AANGEPAST UIT (16) EN AANGEVULD MET GEGEVENS UIT (27)

Proces	Product	Elektriciteit	Ander <sup>a</sup>	Totaal UCPTA
		MJ (kg N) <sup>-1</sup>	MJ (kg N) <sup>-1</sup>	MJ (kg N) <sup>-1</sup>
Thermische reductie van volume van gestabiliseerde urine (10-voud), eenstaps-distillatie		-	389 (E)	389
Thermische reductie van volume van gestabiliseerde urine (10-voud), vapour compression	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	23	11 (E)	34
Volumereductie van gestabiliseerde urine met omgekeerde osmose (5-voud)		29	-	29
Struvietproductie (kwantitatieve P-fixering)	MAP	6	6 (C)	25
Struvietproductie (kwantitatieve N-fixering)	MAP	9	72 (C)	102
Strippen met lucht (tot 40% eindproduct)	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	84	6 (C)	90

a E = energie uit fossiele of andere bron; C = thermisch energie uit chemicaliën; T, transport van slib; A = afgasbehandeling; V= verlies in brander door verbranding van anorganisch materiaal.

# 7

## DISCUSSIE

Bij aanvang van het project zijn een aantal onderzoeksvragen geponeerd waarop in de loop van het onderzoek antwoord verkregen zou moeten worden.

### **IS HET MOGELIJK OM ZOWEL FOSFAAT ALS STIKSTOF, MET EEN VOLDOENDE KWALITATIEVE SAMENSTELLING, UIT URINE TE WINNEN?**

*Gezien het resultaat van de analyses (sectie 4.7) is het mogelijk om zowel fosfaat als stikstof in redelijk zuivere vorm te winnen uit urine.*

Daarbij dient opgemerkt te worden dat het voor struviet (nog) niet duidelijk is waar een potentiële afzetmarkt ligt. Medicijnresten uit urine komen niet of nauwelijks in de struviet en ammoniumsulfaat terecht (sectie 4.10).

### **WELK VERWIJDERINGRENDAMENT VALT BIJ HET VERWIJDEREN VAN FOSFAAT EN STIKSTOF UIT URINE TE BEHALEN?**

*Bij onverdunde urine wordt meer dan 90% van de stikstof en ongeveer 95% van de fosfor verwijderd. Voor verdunde urine liggen de verwijderingspercentages enkele procenten (stikstof) en ongeveer 10% lager (fosfor) (sectie 4.3).*

### **WAT IS DE MEEST OPTIMALE CONFIGURATIE VAN EEN FOSFAAT- EN STIKSTOF WINNINGINRICHTING GEBASEERD OP STRUVIET- EN AMMONIUMSULFAATWINNING?**

*Met de in dit project gebruikte proefopstelling is wel een referentiekader gecreëerd voor de volgorde/opstelling van de onderhavige technieken. Ook kunnen op basis van de verkregen gegevens uitspraken worden gedaan over de toepasbaarheid/geschiktheid van de verschillende procesonderdelen. Dat kan dan weer als uitgangspunt dienen voor een in de toekomst verder uit te werken verwerkingsinrichting. De gebruikte inrichting van de installatie als geheel is in ieder geval functioneel en robuust gebleken.*

Het is echter nog niet mogelijk om de ideale configuratie voor een Betuwse Kunstmest installatie te bepalen. Tijdens de proefperiode beschreven in deze rapportage is gekozen voor een configuratie waarin het strippen van CO<sub>2</sub> plaatsvindt voor struvietvorming en ammoniumstrippen om te voorkomen dat de struviet verontreinigd zou zijn met carbonaatzouten en hydroxyapatiet. Bovendien wordt zo het risico op scaling in de installatie kleiner. Er is niet getest of er zonder strippen van CO<sub>2</sub> daadwerkelijk vorming van carbonaatzouten en/of scaling zou optreden. Alternatieve configuraties zouden kunnen zijn om de CO<sub>2</sub> te strippen in de struvietreactor (zoals bijvoorbeeld gebeurt door Battistoni et al (6, 7)) of om de CO<sub>2</sub> te strippen in de opslagtank en deze uit te rusten met een pH controller (met setpoint pH 6). In dat laatste geval zou hydrolyse van ureum nog wel kunnen verlopen, maar zou de CO<sub>2</sub> door middel van matige beluchting wel gestript kunnen worden. Er zou wel een goede afzuiging moeten zijn om ongewenste geuremissies te beperken.

Een andere variant op de bestaande configuratie zou kunnen zijn om de ammoniakstripper voor de struvietreactor te plaatsen (al dan niet na verwijdering van carbonaat/bicarbonaat). Nadeel van die configuratie is dat er nauwkeurig gestuurd moet worden op de aanwezigheid van voldoende ammonium om magnesiumammoniumstruviet te laten neerslaan. Echter,

dit kan ook omzeild worden door (indien nodig) toevoegen van kalium met kaliumstruvietvorming als resultaat.

### **WAT ZIJN IN DE PRAKTIJK DE BOTTLENECKS BIJ HET BEDRIJVEN VAN DE INSTALLATIE EN HOE KUNNEN DEZE WORDEN OVERWONNEN?**

Tijdens het bedrijven van de proefinstallatie zijn een aantal zaken aan het licht gekomen die de procesvoering nadelig beïnvloeden. Hiervoor zijn gaandeweg de test ook oplossingen gevonden:

- Van batchgewijs werken naar proces(continu)gewijs werken vergt een behoorlijke inspanning. Bij onderhavige pilot is er ook in verband met het meten / monitoren voor gekozen om dit te ondervangen via intensieve personele begeleiding.
- Gebleken is dat na het gaandeweg inregelen van de installatie deze steeds beter begon te werken. N-strippen en wassen is zeer robuust proces.
- Het maken en winnen van struviet is een kritisch, maar goed inregelbaar proces.
- Verwerking van urinevrachten met wisselende samenstelling zal aandacht vergen qua instellingen. Het is moeilijk om de marges voor succesvolle verwerking aan te geven. Procesmatig maakt de mate van verdunning voor het verwijderingsrendement van stikstof en fosfaat bij de in dit project toegepaste verdunning (4 maal) niet zo veel uit. Echter voor het energieverbruik is het vier maal verdunnen van de urine uitermate ongunstig. Het energieverbruik uitgedrukt per kg stikstof in de urine is (in vergelijking met onverdunde urine) drie keer hoger bij vier keer verdunde urine. Het omslagpunt voor de mate van verdunning waarbij het proces niet meer energetisch rendabel is, is nu nog niet vast te stellen. Daarvoor spelen nog te veel andere factoren een rol (bijvoorbeeld het feit dat de installatie overgedimensioneerd was).
- De installatie zal in een temperatuur gecontroleerde omgeving moeten worden geplaatst. Voorafgaand aan de proefperiode is de invloed van de buitentemperatuur op bijvoorbeeld de snelheid van de hydrolyse en het stripproces, maar ook op de viscositeit van toeslagstoffen zoals loog, onderschat. De buitenopstelling heeft daarom veel tijd / inspanning en energie gekost.
- Afvangen van het gevormde struviet was met de hier gebruikte configuratie niet gemakkelijk. In eerste instantie waren de struvietkristallen te klein om met voldoende hoog rendement af te vangen in de bezinker. Verlengen van de verblijftijd in de reactor leidde tot de vorming van grotere kristallen en een hoger verwijderingsrendement. Toepassen van een andere technologie, bijvoorbeeld hydrocyclonen zal leiden tot een betere afscheiding van struviet en organische stof en een betere ontwaterbaarheid.
- Schuimvorming door bacteriële activiteit. Deze kan teruggedrongen worden door bijvoorbeeld betere P verwijdering en/of antischuim-dosering.
- Het gebruik van zwavelzuur voor de pH controle tijdens hydrolyse en CO<sub>2</sub>-strippen leidt tot hoge sulfaatconcentraties in het effluent van de proefinstallatie. Toepassing van een ander zuur zou dit probleem kunnen opheffen.

### **IN WELKE MATE TREEDT SCALING OP EN HOE GA JE DAAR MEE OM?**

Om scaling in de installatie te voorkomen is als een van de eerste behandelingstappen de CO<sub>2</sub> stripper geïntroduceerd. Wellicht mede als gevolg van deze processtap is scaling niet in grote mate opgetreden in de reactor. Er is wel aanwas van (microbiële) biomassa waargenomen bijvoorbeeld in de stripinstallatie.

### **WELKE DUURZAAMHEIDASPECTEN ZIJN VAN TOEPASSING (KWALITATIEF) EN WAT IS HIERVAN DE KWANTITATIEVE IMPACT?**

Er zijn een aantal duurzaamheidsaspecten die een rol spelen bij de beoordeling van het Betuwse Kunstmest project: bijvoorbeeld terugwinning van nutriënten, energie, het lot van medicijnen en de mogelijke combinatie met andere N- en P-bevattende stromen.

- Fosfaat is een eindige grondstof. De gangbare mening is dat de P-mijnen binnen afzienbare tijd zullen zijn uitgeput.
- N-winning uit urine (bronaanpak) tegenover N winning (Haber Bosch) en N verwijdering uit verdund afvalwater. Met betrekking tot de energievraag van het proces kan gesteld worden dat het energieverbruik nog hoger ligt dan het energieverbruik van andere stikstofterugwinningsprocessen (sectie 6.4). Er zijn echter nog wel mogelijkheden om de energie-efficiëntie van het proces te verhogen. Het energieverbruik gerelateerd aan het vervoer van de urine is overigens buiten beschouwing gelaten.
- Gebruik van onbenutte laagwaardige (rest)warmte uit bijvoorbeeld verwerking van slibstromen (compostering/vergisting) = duurzame warmte. Normaliter zou de temperatuur in de luchtstroom (50-60°C) te laag zijn om te kunnen gebruiken.
- Separate behandeling biedt in de toekomst ook mogelijkheden voor medicijn verwijdering en ander vervelende stoffen. Medicijnen hebben geen invloed op de kwaliteit van de struviet en ammoniumsulfaat. Deze komen in het effluent van het proces en dus bij de reguliere waterzuivering terecht.
- Daar waar waterzuivering en waterketen technische of abstracte onderwerpen zijn is nieuwe sanitatie, m.a.w. toilet gebruik, urine, fecaliën en medicijngebruik, een onderwerp dat iedereen goed kent. Aan de hand van deze onderwerpen kan men goed uitleggen wat de impact is op de waterketen en hoe zaken effectiever en efficiënter kunnen. Het feit dat dit onderwerp door de media ook steeds laagdrempelig wordt opgepakt is veelzeggend. Deze laagdrempeligheid kan benut worden om watergerelateerde onderwerpen breder onder de aandacht te brengen.
- Goede kans om ook andere N/P rijke stromen gecombineerd te behandelen, schaalvoordeel, rejectiewater. De installatie is bij aanvang van het project ook al ingezet voor de behandeling van gescheiden ingezamelde urine op het WK Vierspannen in Beesd.
- Behandeling van rejectiewater maakt dat mogelijk meer C in voorbezinker kan worden gewonnen (rekening houden met juiste C:N verhouding ten behoeve van de zuivering) die uiteindelijk via vergisting in energiedrager kan worden omgezet.
- Ter plaatse uit vergister + WKK gewonnen energie kan direct worden toegepast.
- Realiseren van een goede verwerkingslocatie maakt dat andere duurzame initiatieven ook versneld / makkelijker geïnitieerd kunnen worden. Geen separaat verzamelde urine terug in de RWZI anders valt gelijk het draagvlak weg (zelfde als met de GFT aparte inzameling vroeger).

### **WAT IS HET EFFECT VAN DE DOSERING VAN HULPSTOFFEN, NODIG OM STRUVIET EN AMMONIUMSULFAAT TE LATEN NEERSLAAN, OP DE KWALITEIT VAN DE RESTERENDE WATERSTROOM?**

De resterende waterstroom bevat veel sulfaat (~ 15 g/l), veel natrium (~ 13 g/l) en CZV (~ 11 g/l). De pH van de waterstroom ligt rond de pH 10-10,5. Het volume van menselijke afvalstoffen bedraagt echter slechts 1-2% van de totale afvalstroom die richting RWZI gaat (17). Bij menging van de resterende waterstroom met het 'normale' influent van de RWZI zal er dus een aanzienlijke verdunning plaatsvinden.

**WORDT NAAST MAGNESIUMAMMONIUMSTRUVIET OOK (MAGNESIUM-) KALIUMSTRUVIET GEVORMD? EN ZO JA, BIJ WELKE PROCESCONDITIES IS DAT HET GEVAL?**

Er wordt geen kaliumstruviet gevormd. De vorming van kaliumstruviet is indien gewenst nauwgezet in te regelen door de pH te regelen. Vanuit de markt (kunstmest) lijkt er echter geen behoefte te zijn aan gebonden kalium in de chemische verhouding waarin dit binnen kaliumstruviet plaatsvindt.

**WAT IS DE SAMENSTELLING VAN DE NEVENSTROMEN?**

Naast de in sectie 7.7 genoemde nevenstromen is er ook nog proceslucht die ontstaat bij het strippen van de CO<sub>2</sub> uit de urine. Hierbij kunnen vluchtige componenten uit de urine in de proceslucht terechtkomen. Deze proceslucht wordt over een compostbed geleid om de verontreinigingen en eventuele stankstoffen te verwijderen.

**HOE ZIET DE ENERGIEBALANS VAN HET PROCES ER UIT?**

Zie hoofdstuk 6.

# 8

## CONCLUSIES EN PERSPECTIEVEN VOOR DE TOEKOMST

### 8.1 CONCLUSIES

#### RESULTATEN PROEFINSTALLATIE EN PROCESCONCEPT

- Het is mogelijk om in een niet optimaal gedimensioneerd systeem nutriënten met een voldoende hoog rendement (meer dan 93%) uit separaat ingezamelde onverdunde urine (met 6,3 g N/l en 0,4 g PO<sub>4</sub>-P/l) te verwijderen. Stikstof en fosfor zijn teruggewonnen als struviet en ammoniumsulfaat.
- Bij gebruik van restwarmte om niet ligt het energieverbruik (elektriciteit en chemicaliën) hoger dan voor (andere) biologische methoden, maar de verwachting is dat er nog wel winst te behalen is in het elektriciteitsverbruik. De gebruikte elektriciteit bepaalt voor een groot gedeelte de energie vraag van het hele proces.
- De veelbelovende resultaten van het Betuwse Kunstmest project geven aanleiding tot toepassing van dit proces op volle schaal met een bedrijfsmatige aanpak.
- Met de proefinstallatie van het Betuwse Kunstmest project was het mogelijk om stikstof en fosfor met een redelijk rendement (meer dan 89% N verwijdering en meer dan 80% P verwijdering) te verwijderen uit *verdunde* urine. De energiebehoefte van het proces lijkt echter te hoog om het proces op grotere schaal te bedrijven.
- De succesvolle terugwinning van nutriënten op de hier gedemonstreerde schaal is alleen mogelijk op een locatie met:
  - voldoende ruimte en lozingspunt voor het effluent op een nabijgelegen waterzuiveringsinstallatie,
  - (laagwaardige) restwarmte om niet voor handen is
  - mogelijkheden voor procesluchtbehandeling
- Bottlenecks in het proces zoals ongewenste biomassagroei en scaling waren goed beheersbaar.
- Het effluent van de Betuwse Kunstmest proefinstallatie heeft weliswaar een hoge pH, CZV-, sulfaat- en natriumconcentratie, maar door verdunning van het effluent met influent (na voorbezinken) van een normale RWZI zal dit geen problemen opleveren voor verdere behandeling.
- Vanwege de beperkte volumes struviet in de “markt” zijn er nog geen geplaveide afzetkanalen voor dit relatief zuivere product. Bij opschaling van struvietproductie zal er vanuit schaalvoordelen meer hoogwaardige afzet moeten worden bewerkstelligd (“kip en ei”).

#### COMMUNICATIE, UITDRAGEN RESULTATEN

- De schaal van het project (op demonstratie niveau) en de initiële berichtgeving onder meer naar aanleiding van het gebruik van urine van Moeders voor Moeders, hebben ge-



leid tot veel communicatie in de pers op diverse vlakken, kranten, radio, televisie naar aanleiding van het project maar ook via Moeders voor Moeders en bijvoorbeeld het WK vierspan waar in eerste instantie ook urine ingezameld is. Daarnaast hebben er veel locatiebezoeken plaatsgevonden door ingenieurs- en adviesbureaus, waterschappen, particuliere partijen, en studenten/scholen, en heeft het projectteam andere projecten bezocht om ervaringen uit te wisselen.

- De in het project gewonnen struviet is in andere (onderzoeks)projecten beproefd en toegepast.

#### PROJECTAANPAK

- De pragmatische aanpak die gekozen is vanwege de geringe tijdspanne van het project, heeft vruchten afgeworpen. De opstart/inregeling van het proces heeft wellicht wat langer geduurd dan strikt noodzakelijk maar uiteindelijk heeft de aanpak geleid tot een robuuste en functionele installatie.
- De financiële en arbeidsinspanning die nodig zijn voor het verzamelen van een betrouwbare dataset zijn onderschat.
- Alle deelnemende projectpartners hebben vanuit eigen competenties een wezenlijke bijdrage aan het project geleverd. Dit creëerde commitment en waardering en bevorderde de samenwerking en daarmee het resultaat in forse mate.

#### 8.2 AANBEVELINGEN

- De veelbelovende resultaten van het Betuwse Kunstmest project geven aanleiding tot toepassing van dit proces op volle schaal met een bedrijfsmatige aanpak.
- Vanwege de beperkte volumes struviet in de “markt” zijn er nog geen geplaveide afzetkanalen voor dit relatief zuivere product. Bij opschaling van struvietproductie zal er vanuit schaalvoordelen meer hoogwaardige afzet moeten worden bewerkstelligd (“kip en ei”).
- Als dit proces in de praktijk wordt uitgevoerd kan medicijnverwijdering relatief gemakkelijk worden geïntegreerd in het proces.
- Medicijnen komen, behalve in geval van ongewenste/onbedoelde lozingen, slechts in het milieu terecht via urine en feces. Aanpak van deze bronnen zal daarom noodzakelijk zijn om daadwerkelijk iets te doen de problematiek van het voorkomen van medicijnen in het milieu. Met de verwijdering van stikstof en fosfor is een begin gemaakt met aanpak aan de bron van verontreinigingen. De verwijdering van medicijnen zal van echt van toegevoegde waarde zijn voor de bronaanpak van verontreinigingen in urine.
- In een vervolgproject zou een businesscase doorgerekend kunnen worden waarbij de grenzen van het project kunnen worden vastgesteld. Hierbij kan dan rekening gehouden worden met stikstofconcentraties, transport van de te behandelen stromen, optimalisatie van elektriciteitsverbruik en andere zaken die binnen het kader van het Betuwse Kunstmest project niet onderzocht konden worden.
- Andere geconcentreerde N- en P stromen kunnen ook behandeld worden in het systeem. Het combineren van dit soort afvalstromen en opschalen naar praktijkschaal is de volgende stap.
- Toelating van “groene” meststoffen verdient bijzondere aandacht
- Afstemming tussen kwaliteitseisen marktvrage en de winningsmogelijkheden moeten worden afgestemd/onderzocht/afgetast.

- Urine moet zo geconcentreerd mogelijk blijven. Minimaliseren van watergebruik is essentieel. Hiermee moet rekening gehouden worden bij het ontwerp van een scheidings toilet.
- De volgorde van de verschillende processtappen zoals die binnen het Betuwse Kunstmest project is toegepast is slechts een van de mogelijkheden voor de gecombineerde verwijdering van N en P uit urine en andere stromen. Het verdient aanbeveling om in een volgend project te onderzoeken of een andere volgorde (bijvoorbeeld struviet als laatste stap of gecombineerde hydrolyse en CO<sub>2</sub> verwijdering tijdens opslag) mogelijk leidt tot een efficiëntere verwijdering van N en P en ook een hoger rendement voor de winning van struviet en ammoniumsulfaat.
- Er zijn meerdere criteria die bepalen welk proces het meest geschikt is voor urinebehandeling. Naast de energievraag zijn dit bijvoorbeeld:
  - Waarde van duurzaamheid, wat is bijvoorbeeld de waarde van het terugwinnen van fosfaat?
  - Infrastructuur, logistiek
  - Beschikbare ruimte
  - Te behandelen effluentkwaliteit
  - Inkomende concentraties, kwaliteit urine
  - Robuustheid van het proces, zowel biologisch versus chemisch als keuze voor messtof
  - Wisselende samenstelling van ingaande urinestromen
  - Investerings, afschrijving en operationele kosten

## 9

## REFERENTIES

1. 2009. Ammonium sulfate. [http://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium\\_sulfate](http://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium_sulfate).
2. 2006. Anders omgaan met huishoudelijk afvalwater; strategienota. Koepelgroep ONSS Ontwikkeling Nieuwe Sanitatie Systemen in opdracht van STOWA.
3. 2009. Gebruikershandleiding/afleveringsbewijs. Ref wk26/Fr/Fr/GMB SZ.0
4. 2009. Haber process. [http://en.wikipedia.org/wiki/Haber\\_process](http://en.wikipedia.org/wiki/Haber_process).
5. 2009. Struviet blijkt goede meststof. Neerslag, tijdschrift voor de regionale secties van Waternetwerk.
6. **Battistoni, P., A. De Angelis, P. Pavan, M. Prisciandaro, and F. Cecchi.** 2001. Phosphorus removal from a real anaerobic supernatant by struvite crystallization. *Water Research* **35**:2167-2178.
7. **Battistoni, P., A. De Angelis, M. Prisciandaro, R. Boccadoro, and D. Bolzonella.** 2002. P removal from anaerobic supernatants by struvite crystallization: long term validation and process modelling. *Water Research* **36**:1927-1938.
8. **Bennenbroek, M.** 2009. *Pers. comm.*
9. **Corre, K. S. I., E. Valsami-Jones, P. Hobbs, and S. A. Parsons.** 2009. Phosphorous recovery from wastewater by struvite crystallization: a review. *Critical reviews in Environmental Science and Technology* **39**:433-477.
10. **Haarhuis, R.** 2009. [www.waterstromen.nl](http://www.waterstromen.nl).
11. **Kujawa-Roeleveld, K.** 2009. *Pers. comm.*
12. **Kujawa-Roeleveld, K., D. Kragic-Kok, E. Schuman, J. Jacobi, T. Grotenhuis, and A. Mels.** 2008. Sorption and biodegradation of pharmaceuticals from urine in soil. LeAF.
13. **Kuntke, P.** 2009. *Pers. comm.*
14. **LEI.** 2009. (<http://www.lei.wur.nl/NL/statistieken/Agrarische+prijzen/>)15. **Maurer, M., W. Pronk, and T. A. Larsen.** 2006. Treatment processes for source-separated urine. *Water Research* **40**: 3151-3166.
16. **Maurer, M., P. Schwegler, and T. A. Larsen.** 2003. Nutrients in urine: energetic aspects of removal and recovery. *Water Science and Technology* **48**:37-46.
17. **Mels, A. e. a.** 2005. Afvalwaterketen ontketend. STOWA.
18. **Mobley, H. L., and R. P. Hausinger.** 1989. Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* **53**:85-108.
19. **Nelson, N. O., R. L. Mikkelsen, and D. L. Hesterberg.** 2003. Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of pH and Mg:P ratio and determination of rate constant. *Bioresource Technology* **89**:229-236.
20. **Roeleveld, P., P. Loeffen, H. Temmink, and B. Klapwijk.** 2004. Dutch analysis for P-recovery from municipal wastewater. *Water Science and Technology* **49**:191-199.

21. **Ronteltap, M., M. Maurer, and W. Gujer.** 2007. The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine. *Water research* **41**:1859-1568.
22. **STOWA-themasite.** [http://themas.stowa.nl/Themas/Nieuwe\\_sanitatie.aspx?rID=846](http://themas.stowa.nl/Themas/Nieuwe_sanitatie.aspx?rID=846).
23. **Udert, K. M., T. A. Larsen, and W. Gujer.** 2003. Biologically induces precipitation in urine-collecting systems. *Water Science and Technology* **3**:71-78.
24. **Udert, K. M., T. A. Larsen, and W. Gujer.** 2003. Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems. *Water Research* **37**:2667-2677.
25. **Verdoes, N., and R. Melse.** 2005. Mestverwerkersmarkt telt achttien typen met perspectief. *V focus*:38-39.
26. **Versluis, H. P., S. Radersma, and W. van Dijk.** 2005. Ondersteuning duurzame mestbe- en verwerkingsproducten. *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.*
27. **Wilsenach, J. A.** 2006. Treatment of source separated urine and its effects on wastewater systems. Delft University of Technology, Delft.
28. **[www.ostara.com](http://www.ostara.com)**.



# BIJLAGEN



## BIJLAGE 1

# DETAILS PROEFINSTALLATIE

Ontvangstank met:

- Warmtewisseling bestaande uit een leiding en een circulatiepomp.
- Aftappunt.
- Vulopening middels melktank aansluiting.
- Overloopopening.
- Niveaumeting.
- Bemonsteringspunt onder en boven.
- Afvoerleiding urine PE 600 mm.

Hydrolysetank:

- 7m<sup>3</sup> metalen tank
- Deksel bovenop de tank. 1 deksel is vervangen door een aluminiumplaat met afzuigopening
- Afzuigpunt voor geurverwijdering met een debiet van 400 m<sup>3</sup>/uur
- Aftappunt onderin voor het circuleren van urine
- Circulatiesysteem voor urine met een zuurdoseer- en pH-registratiesysteem
- Niveaumeter
- Afvoerpomp met afvoerleiding PE 315mm
- Aanvoerpunt urine onderin tank geschikt voor aansluiting PE 600mm
- Aanvoerleiding urine PE 600 mm

Struvietreactor bestaande uit:

- 2m<sup>3</sup> vat van polypropyleen (ketelafmetingen diameter 1200x1800mm)
- Roerder (vermogen 0,75 kW; 690 toeren per minuut; 380 V)
- Aanvoerleiding 315 mm PE voor urinetoevoer bovenin het vat
- Circulatieleiding t.b.v. menging chemicaliën en urine
- Niveauregeling
- Deksel
- Mengvat 50 liter met roerder en afvoerpomp(toevoerpomp) met leiding t.b.v. doseren van Mg-zout
- Toevoerpomp voor doseren van natriumhydroxide
- Kristallen afscheidingsysteem. Eigen ontwerp
- Afvoerslangenpomp van 0,8 m<sup>3</sup> per uur
- Aanvoerleiding PE 315 mm

Struvietbezinker bestaat uit:

- 2160 liter HPE bezinkbak
- V-schotten systeem met overloop naar stripper
- Slibaftappunt
- Aanvoerpunt met geleiding tot onder in bezinkerpunt
- Aanvoerleiding PE 315 mm

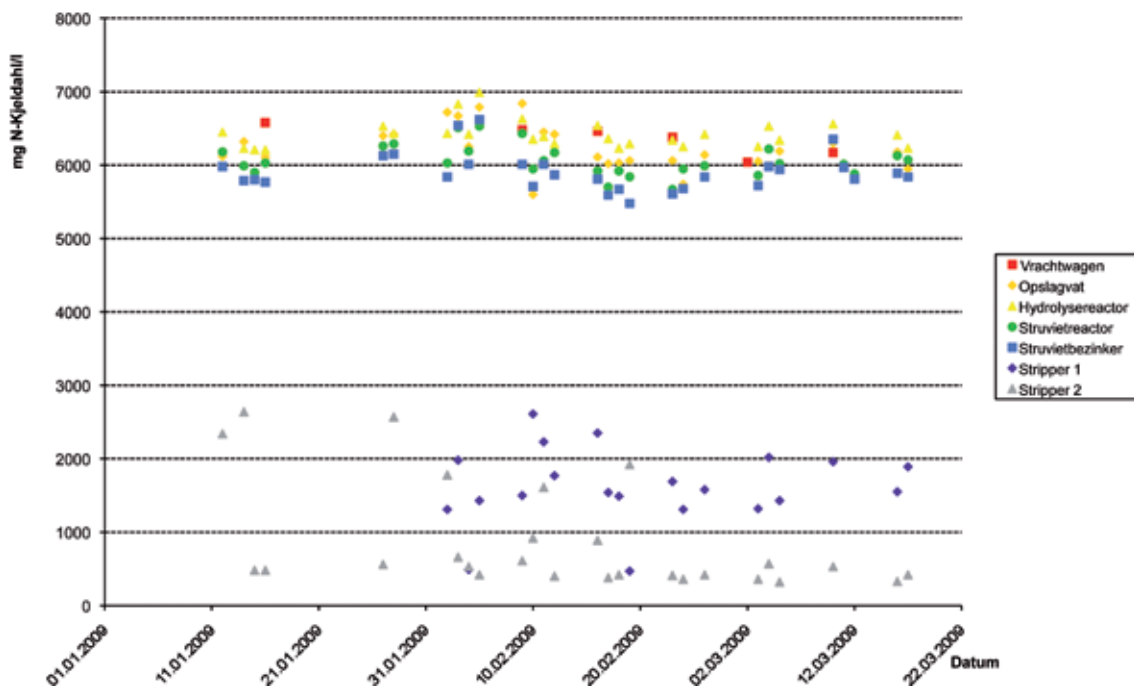
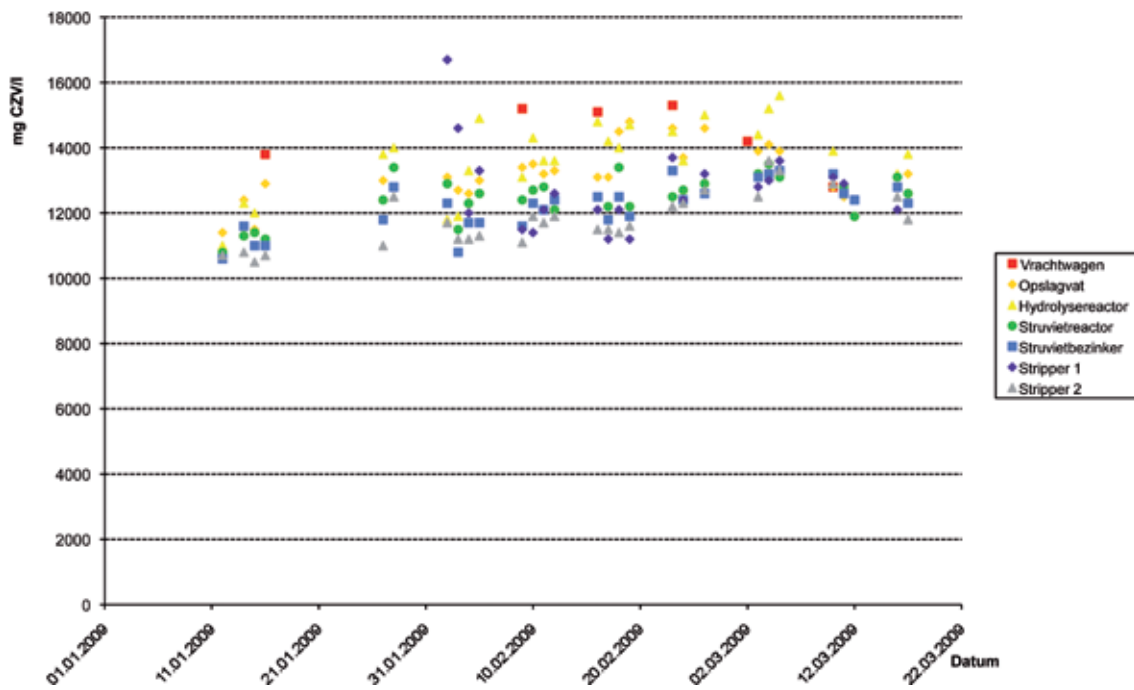


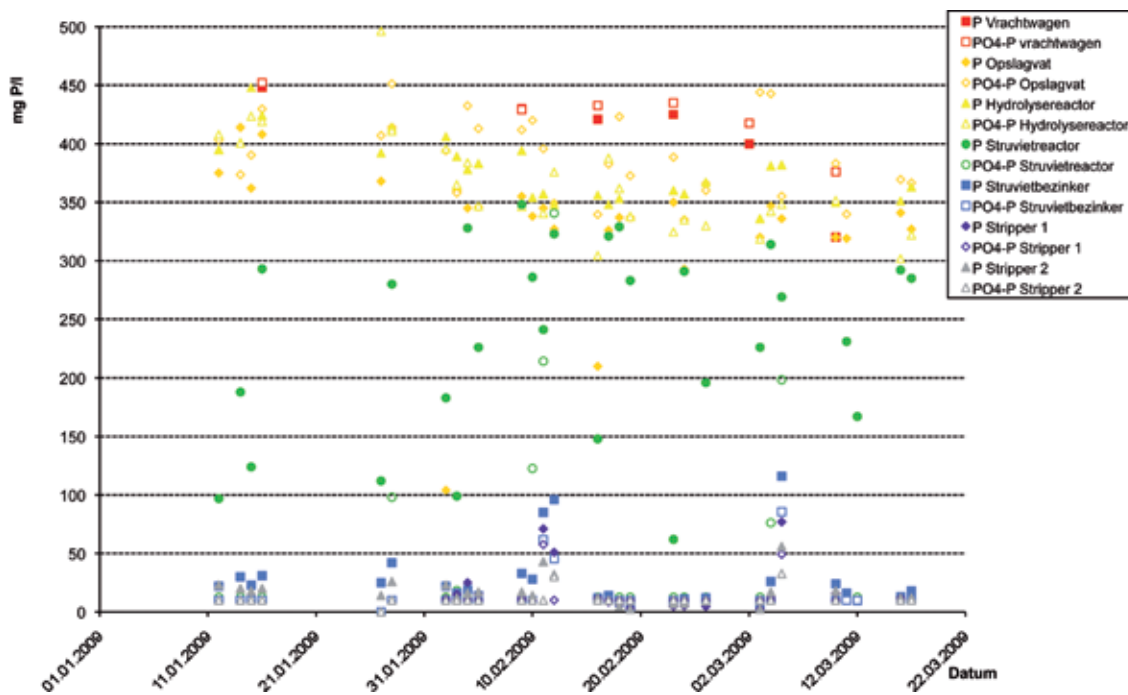
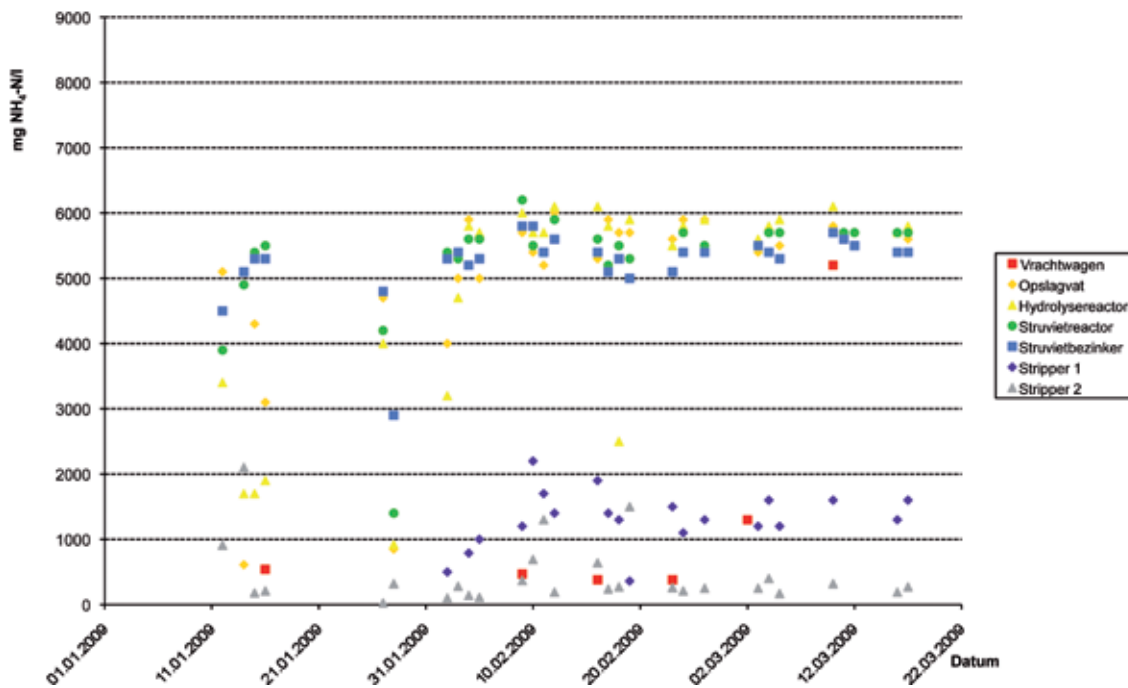
Stripinstallatie/Wasser bestaat uit:

- Meet en regelunit met stroomvoorziening van 63A-6h met 5-polige stekker
- 3 strip/wastorens met identieke configuratie
- Luchtcirculatie systeem met blower ingebouwd
- Blower (maximum capaciteit 10000 m<sup>3</sup>/uur)
- Aanvoer urine in opstelling 2 middels vrij verval
- Communicerende vaten aan onderkant tussen vat 1 en vat 2
- Wastoren met zuurbestendig vlotter
- Zuur en base dosering middels 2 membraanpompen
- Vloeistofniveau bewaking
- 3 Lowara pompen met met rvs behuizing (0,75 kW). Deze pompen verzorgen de vloeistofstroom naar de striptorens
- Analysesysteem voor meten pH en geleidbaarheid (alleen voor wastoren). De flow door deze leidingen werd verzorgd door de geïnstalleerde Lowara pompen (een aftapleiding met een eigen flowregeling)
- Afpomp en opvangregeling voor afvoer van ammoniumsulfaat is door GMB ingebouwd in de Askove opstelling. Als opvangbak functioneerde een IBC. Het legen van het zure wasvloeistof uit de Askove opstelling was een geautomatiseerd proces, gestuurd met de geleidbaarheid. Het legen van de IBC werd met de hand gedaan
- Afvoerput voor afvoer effluent
- Afvoerleiding voor afvoer condensvocht en overtollige schone lucht uit blower naar buiten de tent in verband met risico op luchtvervuiling bij doorslag
- Pakkingvolume is 0,3 m<sup>3</sup> Super-Intalox<sup>®</sup> zadel-vulling met specifiek oppervlakte van 250
- Geleidbaarheidsmeter.
- pH meter (3 maal) regelmatig gekalibreerd met buffers pH 4 en 7
- Verdringerpomp 5 m<sup>3</sup>/uur, 0,75 kW, voor verwarmen van urine
- Aanvoerleiding PE 315mm

BIJLAGE 2

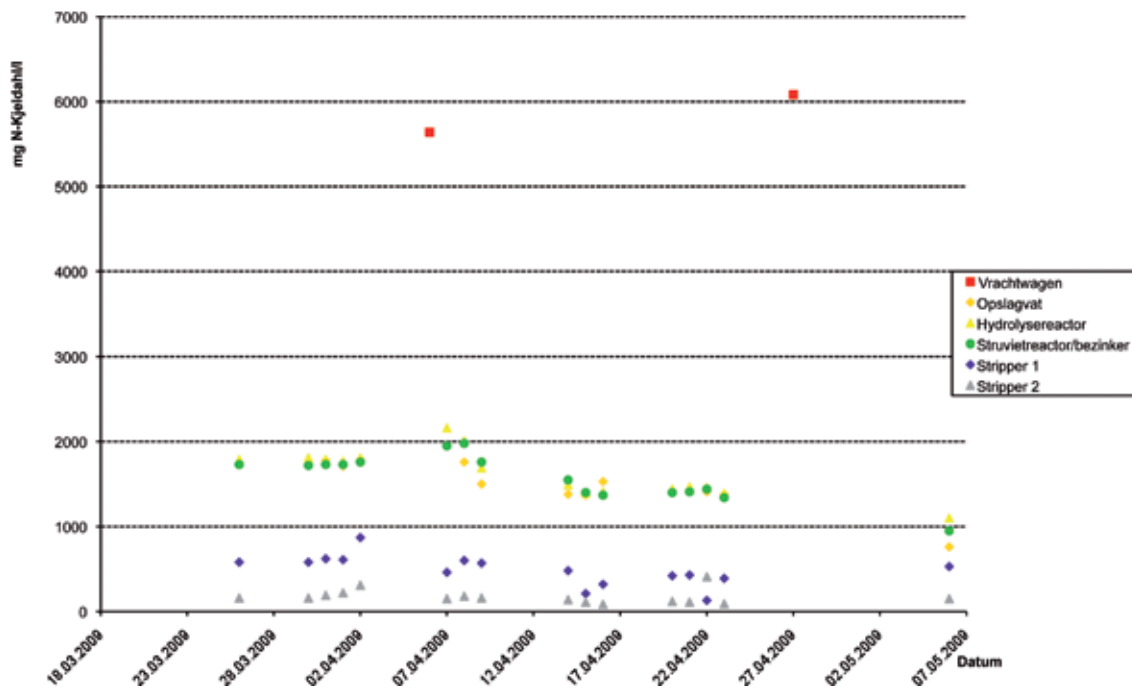
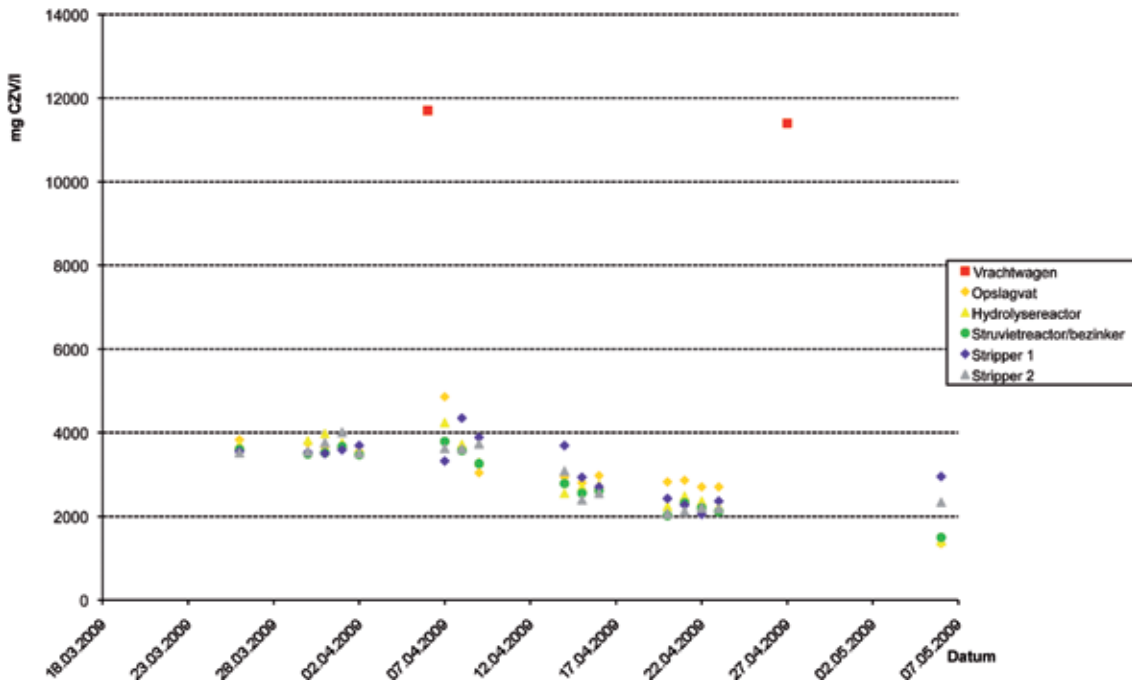
# VERLOOP VAN CZV, N<sub>KJELDAHL</sub>, NH<sub>4</sub>-N, P<sub>TOTAAL</sub> EN PO<sub>4</sub>-P IN DE TIJD – ONVERDUNDE URINE

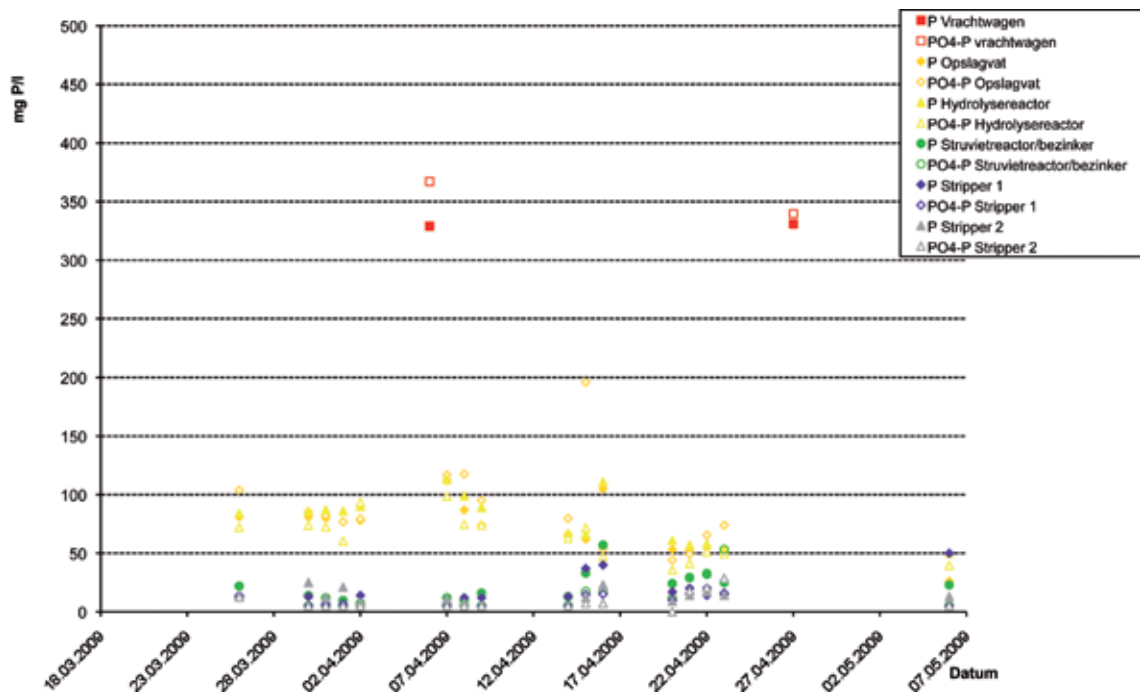
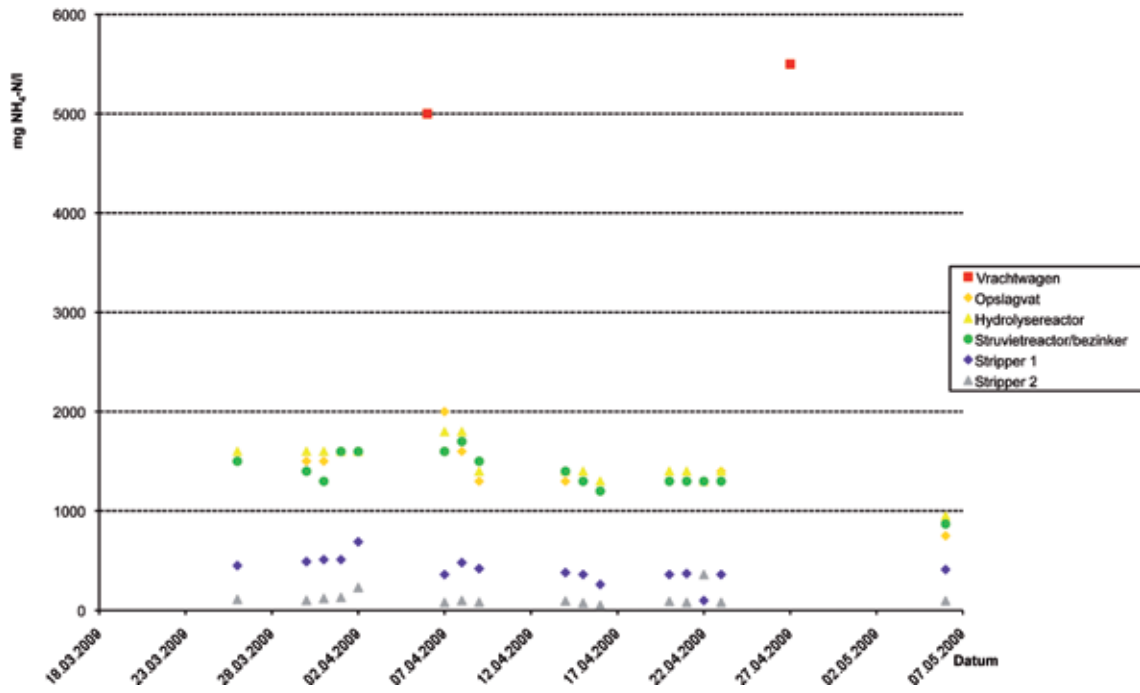




BIJLAGE 3

# VERLOOP VAN CZV, NKJELDAHL, NH4-N, PTOTAAL EN PO4-P IN DE TIJD – VERDUNDE URINE

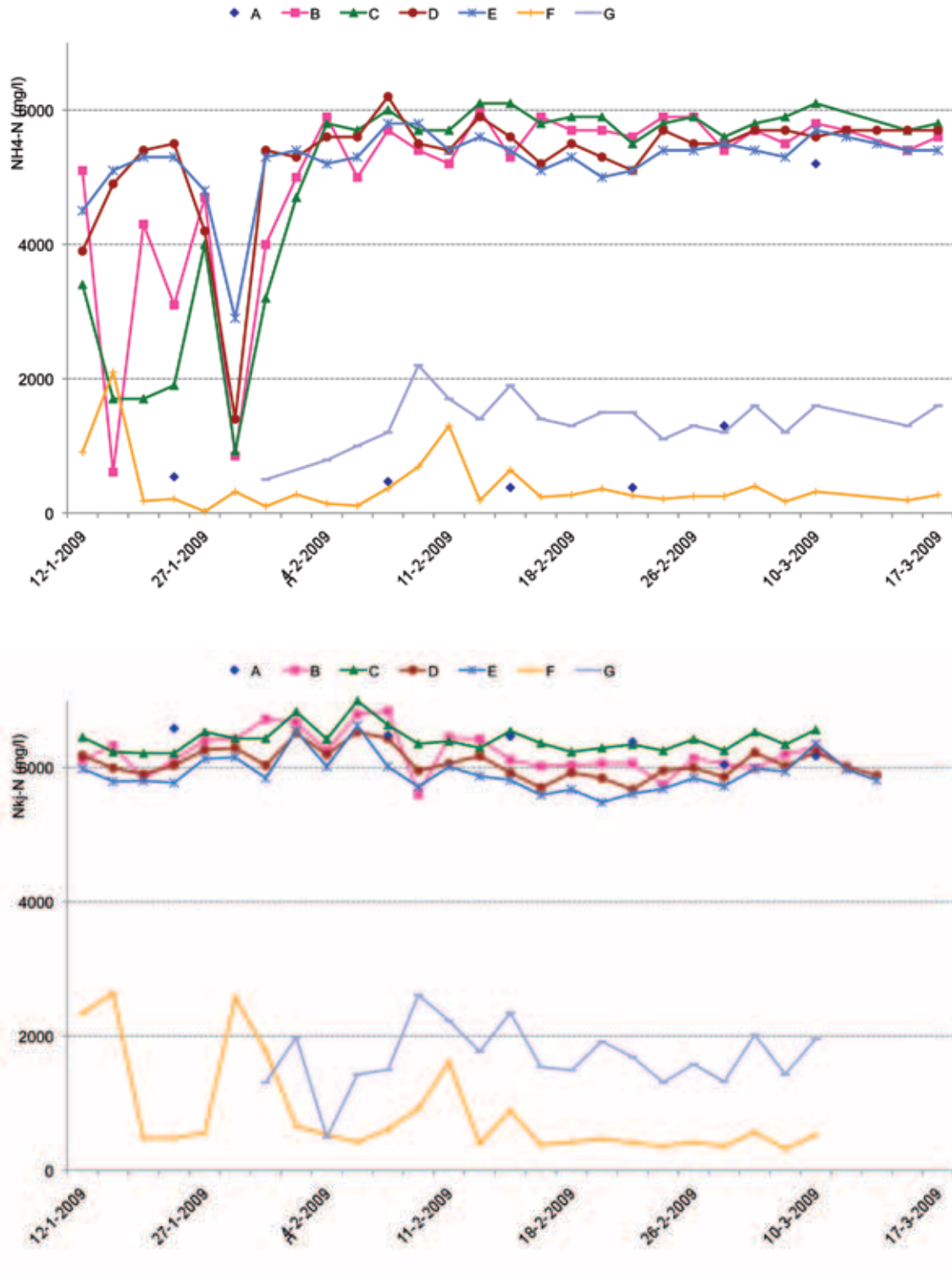


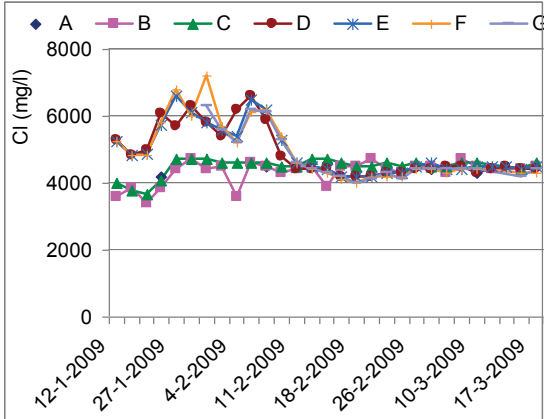
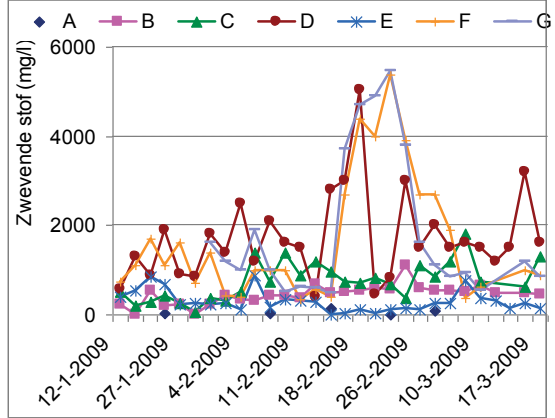
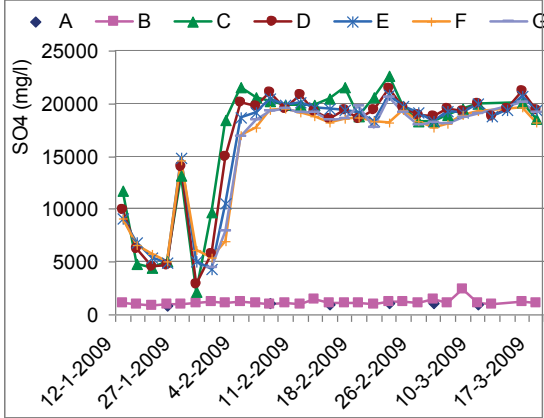
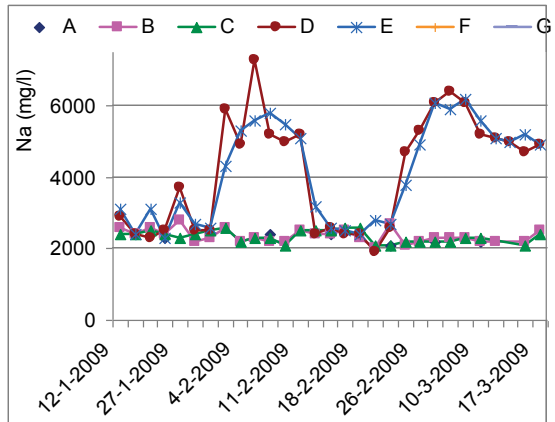
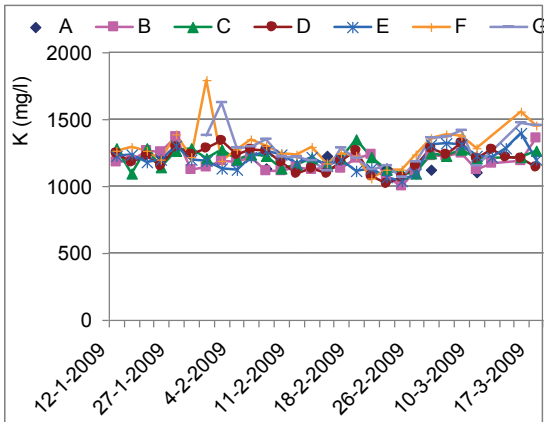


BIJLAGE 4

# RESULTATEN VAN DE INSTALLATIE

NB: Letters A tot en met G geven de verschillende reactiestappen weer (zie ook Figuur 5)





BIJLAGE 5

ANALYSERESULTATEN  
PER PROCESSTAP SAMENGEVAT



Urine A: Samenstelling urine bij aanlevering (vrachtwagen)		N=10												
Parameters	Omschrijving	Eenheid	2009			Maart			Februari			Januari		
			Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV
Algemeen	pH	-	6	2	42.4	9	1	11.4	4	0	8.2	4		
	Temperatuur	°C												
	CZV	mg/l	14400	990	6.9	13500	990	7.3	15200	100	0.7	13800		
Vaste stof	Zwevende stof	mg/l	50	51	102.1	72			54	67	123.6	17		
	Gloeirest	% (m/m)												
	Organische zwevende stof	mg/l												
	Indamprest	mg/kg	22300	2387	10.7	20000			21833	1258	5.8	26000		
	Gloeirest vd indamprest	% (m/m)	42	4	9.1	47			42	2	4.8	37		
	Organische stof	mg/kg	13004	2247	17.3	10600			12680	1162	9.2	16380		
Stikstof	N <sub> Kjeldahl</sub>	mg N/l	6352	206	3.2	6105	92	1.5	6440	53	0.8	6580		
	Ureum-N	mg N/l												
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg N/l	1378	1904	138.2	3250	2758	84.9	410	52	12.7	540		
	Ratio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / N <sub> Kjeldahl</sub>	-	0	0	68.0	0			0	0	12.1	0		
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l												
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l												
Fosfor	P <sub> totaal</sub>	mg P/l	407	45	11.2	360	57	15.7	425	5	1.1	448		
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	mg P/l	424	26	6.1	397	29	7.4	432	3	0.7	452		
Mineralen	Calcium	mg/l	237	196	82.8	125	21	17.0	323	267	82.7	200		
	Carbonaat	mmol/l	62			62								
	Bicarbonaat	mmol/l	46	59	127.9	88								
	Chloride	mg/l	4417	147	3.3	4350	71	1.6	4533	58	1.3	4200		
	Kalium	mg/l	1158	56	4.9	1113	11	1.0	1165	56	4.8	1230		
	Magnesium	mg/l												
	Natrium	mg/l	2267	121	5.3	2200	0	0.0	2300	173	7.5	2300		
	Sulfaat	mg/l	1003	76	7.6	995	35	3.6	1050	53	5.0	880		

Monster B: Samenstelling na hydrolyse opslag		N=29											
		2009			Maart			Februari			Januari		
Parameters	Omschrijving	Eenheid	Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV	STD	%STDEV
Algemeen	pH	-	8.9	0.2	2.0	8.9	0.2	1.9	8.9	0.1	1.4	0.3	3.0
	pH lab		8.7	1.1	12.4	8.9	0.2	2.0	9.0	0.2	1.9	2.0	26.1
	Temperatuur	°C											
Vaste stof	CZV	mg/l	12803	2593	20	13357	616	5	13547	729	5.4	4760	44.7
	Zwevende stof	mg/l	351	269	77	1	0	2	505	203	40.2	172	110.9
	Gloeirest	% (m/m)											
Stikstof	Organische zwevende stof	mg/l											
	Indamprest	mg/kg	14083	6597	47	523	12	2	15733	2427	15.4	7454	45.6
	Gloeirest vd indamprest	% (m/m)	53	14	27				57	8	13.4	20	46.1
	Organische stof	mg/kg	7280	2873	39				6850	2068	30.2	4178	50.9
	N <sub>Kydelakt</sub>	mg N/l	5987	1235	21	6108	133	2	6260	377	6.0	5314	44.3
	Ureum-N	mg N/l											
Fosfor	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg N/l	4826	1634	34	5586	157	3	5480	528	9.6	2143	80.4
	Ratio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / N <sub>Kydelakt</sub>	-	1	0	40				0.88	0.12	13.2	0.35	80.8
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l	2	2	94				4			2	141.4
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l	4	6	141							6	141.4
	P <sub>total</sub>	mg P/l	325	88	27	328	13	4	319	70	21.8	149	44.6
Mineralen	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	mg P/l	376	81	22	386	42	11	382	38	9.9	157	44.7
	Calcium	mg/l	355	455	128	140	77	55	357	318	89.1	787	139.8
	Carbonaat	mmol/l	42	23	54	23	7	31	45	18	40.2	33	56.4
	Bicarbonaat	mmol/l	10	12	122							10	122.1
	Chloride	mg/l	4162	872	21	4471	125	3	4373	279	6.4	1565	46.0
	Kalium	mg/l	1139	232	20	1220	75	6	1140	60	5.2	471	44.7
	Magnesium	mg/l											
	Natrium	mg/l	2272	475	21	2286	107	5	2327	191	8.2	964	45.0
	Sulfaat	mg/l	1096	347	32	1313	505	38	1109	124	11.2	382	44.8

Parameters	Omschrijving	Eenheid	N=29											
			2009			Maart			Februari			Januari		
			Average	STD	%STDEV	Average	#DIV/O!	STD	%STDEV	Average	#DIV/O!	STD	%STDEV	Average
Algemeen	pH	-	4.1	1.4	34.4	4.3	0.1	1.3	4.4	0.3	7.8	3.3	2.6	77.5
	pH lab		4.3	0.9	21.9	4.3	0.1	1.3	4.4	0.4	8.6	4.2	1.9	45.4
	Temperatuur	°C												
	CZV	mg/l	13132	2841	22	14350	907	6	13820	976	7.1	10614	4822	45.4
Vaste stof	Zwevende stof	mg/l	558	433	78	4	0	2	813	355	43.6	248	189	76.3
	Gloeirest	% (m/m)												
	Organische zwevende stof	mg/l												
	Indamprest	mg/kg	29814	14149	47	1287	476	37	38300	3930	10.3	23857	11441	48.0
	Gloeirest vd indamprest	% (m/m)	28	8	29				27	2	7.3	32	14	45.8
	Organische stof	mg/kg	23925	7892	33	27997	2962	10.6	27997	2962	10.6	15200	7833	51.5
Stikstof	N <sub>gledaht</sub>	mg N/l	6173	1273	21	6420	149	2	6451	224	3.5	5437	2401	44.2
	Ureum-N	mg N/l												
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg N/l	4604	1872	41	5817	172	3	5360	1110	20.7	1946	1372	70.5
	Ratio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / N <sub>gledaht</sub>	-	1	0	46				1	0	20.9	0	0	68.9
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l	1	2	141							1	2	141.4
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l	3	5	141							3	5	141.4
Fosfor	P <sub> totaal</sub>	mg P/l	362	79	22	362	23	6	366	20	5.6	353	157	44.4
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	mg P/l	351	83	24	331	20	6	352	27	7.6	365	164	45.0
Mineralen	Calcium	mg/l	319	285	89	248	131	53	410	348	84.8	186	157	84.3
	Carbonaat	mmol/l	0									0		
	Bicarbonaat	mmol/l	24	27	113				19	17	88.9	28	34	123.9
	Chloride	mg/l	4318	888	21	4533	82	2	4587	77	1.7	3559	1622	45.6
	Kalium	mg/l	1167	238	20	1239	25	2	1193	64	5.4	1049	469	44.7
	Magnesium	mg/l												
	Natrium	mg/l	2257	470	21	2250	105	5	2353	198	8.4	2057	909	44.2
	Sulfaat	mg/l	16016	6728	42	19225	747	4	19463	3025	15.5	5880	4823	82.0

Monster D: Samenstelling na struvietreactor		N=29												
		2009			Maart			Februari			Januari			
Parameters	Omschrijving	Eenheid	Average	STD	%STDEV	Average	STD	#DIV/0!	%STDEV	Average	STD	%STDEV	STD	%STDEV
Algemeen	pH	-	8.5	0.7	8.4	8.5	0.8	0.5	8.4	8.5	0.8	9.4	0.2	2.0
	pH lab		8.6	0.8	9.2	8.5	0.9	5.9	10.0	8.7	0.9	10.0	0.9	10.9
	Temperatuur	°C												
Vaste stof	CZV	mg/l	12014	2411	20	12886	521	4	3.5	12513	439	3.5	4528	45.0
	Zwevende stof	mg/l	1423	1192	84	4	0	8	61.7	1942	1199	61.7	588	64.0
	Gloeirest	% (m/m)												
	Organische zwevende stof	mg/l												
Stikstof	Indamprest	mg/kg	31184	14375	46	1700	265	16	9.5	39667	3788	9.5	11947	46.6
	Gloeirest vd indamprest	% (m/m)	48	14	28	54	8	14.7	14.8	37	16	44.8	16	44.8
	Organische stof	mg/kg	17016	4548	27	18082	2538	14.0	14.0	14732	6961	14.0	6961	47.3
	N <sub>gel</sub> daht	mg N/l	5833	1186	20	5998	144	2	4.4	6057	266	4.4	2313	44.2
	Ureum-N	mg N/l												
Fosfor	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg N/l	4914	1467	30	6198	725	11.7	11.7	4606	1953	11.7	1953	42.4
	Ratio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / N <sub>gel</sub> daht	-	1	0	30	5520	276	5.0	5.0	3614	2113	5.0	2113	58.5
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l	1	1	141								1	141.4
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l	0										0	
	P <sub>total</sub>	mg P/l	206	107	52	172	126	73	36.7	244	90	36.7	105	67.1
Mineralen	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	mg P/l	134	113	85	137	87	63	78.7	174	137	78.7	69	141.4
	Calcium	mg/l	329	291	88	187	143	77	80.8	376	304	80.8	357	96.1
	Carbonaat	mmol/l	34	27	80	22	7	30	56.5	34	19	56.5	47	121.6
	Bicarbonaat	mmol/l	110	57	52	149	21	14	43.0	115	49	43.0	63	141.4
	Chloride	mg/l	4965	1613	32	5329	2369	44	17.1	4900	838	17.1	2160	45.6
	Kalium	mg/l	1160	238	20	1240	60	5	8.2	1175	96	8.2	465	44.3
	Magnesium	mg/l												
Sulfaat	Natrium	mg/l	3962	1742	44	5471	699	13	41.8	4020	1682	41.8	1132	48.6
	Sulfaat	mg/l	15711	6565	42	19473	819	4	20.6	18473	3813	20.6	4649	77.1

Monster E: Samenstelling na struivbezinker		N=29															
		2009			Maart			Februari			Januari						
Parameters	Omschrijving	Eenheid	Average	STD	%STDEV	Average	STD	#DIV/0!	%STDEV	Average	STD	#DIV/0!	%STDEV	Average	STD	#DIV/0!	%STDEV
Algemeen	pH	-	8.6	0.5	5.4	8.6	0.5	0.4	4.2	8.5	0.5	0.4	5.6	8.9	0.0	0.5	0.5
	pH Lab		8.7	0.5	5.3	8.6	0.4	4.2	8.8	0.6	6.5	8.8	0.3	2.8			
Vaste stof	Temperatuur	°C															
	CZV	mg/l	11787	2344	20	12863	393	3	3	12127	576	4.8	4.8	9829	4393	44.7	44.7
	Zwevende stof	mg/l	252	253	100	4	0	11	11	221	211	95.4	95.4	421	287	68.1	68.1
	Gloeirest	% (m/m)								44	23	53.2	53.2	0			
	Organische zwevende stof	mg/l															
Stikstof	Indamprest	mg/kg	32950	17088	52	420	294	70	70	41933	9903	23.6	23.6	27643	13247	47.9	47.9
	Gloeirest vdl indamprest	% (m/m)	43	11	26	43	6	14	14	47	6	13.1	13.1	34	15	45.5	45.5
	Organische stof	mg/kg	20650	7836	38					22423	7174	32.0	32.0	16851	8374	49.7	49.7
	N <sub>Kjeldahl</sub>	mg N/l	5703	1148	20	5962	216	4	4	5886	324	5.5	5.5	5089	2250	44.2	44.2
	Ureum-N	mg N/l															
Fosfor	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg N/l	5073	1089	21	5475	128	2	2	6179	911	14.7	14.7	5037	1261	25.0	25.0
	Ratio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / N <sub>Kjeldahl</sub>	-	0.86	0	23	0.92	0.03	3	3	0.91	0.05	5.9	5.9	0.67	0.34	49.7	49.7
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l	2	2	129									2	2	129.4	129.4
Mineralen	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l	0											0			
	P <sub>totaal</sub>	mg P/l	27	28	102	33	42	127	127	26	27	107.1	107.1	25	13	51.9	51.9
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	mg P/l	17	20	115	19	27	138	138	16	16	98.8	98.8				
Mineralen	Calcium	mg/l	378	378	100	265	188	71	71	433	429	98.9	98.9	388	442	114.0	114.0
	Carbonaat	mmol/l	22	14	62	12	9	77	77	26	12	45.9	45.9	19	18	92.5	92.5
	Bicarbonaat	mmol/l	101	49	49	136	1	1	1	89	1	1.4	1.4	60	85	141.4	141.4
	Chloride	mg/l	4983	1596	32	5263	2239	43	43	4933	793	16.1	16.1	4770	2201	46.1	46.1
	Kalium	mg/l	1165	234	20	1284	67	5	5	1156	63	5.5	5.5	1047	464	44.3	44.3
	Magnesium	mg/l	492	582	118	218				740	746	100.8	100.8	274	136	49.4	49.4
	Natrium	mg/l	4000	1548	39	5500	518	9	9	3940	1318	33.5	33.5	2414	1129	46.8	46.8
Sulfaat	mg/l	15654	6348	41	19366	726	4	4	17897	4477	25.0	25.0	6604	4570	69.2	69.2	

Monster F: Samenstelling na stripper F = Effluent		N=29												
Parameters	Omschrijving	Eenheid	2009			Maart			Februari			Januari		
			Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV
Algemeen	pH	-	10.4	0.6	5.8				10	1	6.8	10.7	0.2	2.3
	pH lab		10.8	0.6	5.8	11.3	0.5	4.8	11	1	5.6	11.2	0.4	3.7
	Temperatuur	°C	39	4	10				39	2	5.8	38	6	17.0
Vaste stof	CZV	mg/l	11357	2363	21	12767	644	5	11680	454	3.9	9457	4224	44.7
	Zwevende stof	mg/l	1462	1519	104	5	0	5	1973	1722	87.3	991	581	58.6
	Gloeirest	% (m/m)	51	46	92	84	5	6						
	Organische zwevende stof	mg/l												
	Indamprest	mg/kg	40479	19039	47	1657	1184	71	50867	7057	13.9	34857	16522	47.4
	Gloeirest vd indamprest	% (m/m)	80	19	24				83	9	10.4	73	32	44.6
	Organische stof	mg/kg	7816	5867	75				8898	6408	72.0	5498	3936	71.6
Stikstof	N <sub>kgeldahl</sub>	mg N/l	868	758	87	445	123	28	782	543	69.5	1296	1160	89.5
	Ureum-N	mg N/l												
			1023	777	76	267	85	32	1446	662	45.8	1213	809	66.7
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg N/l	468	536	114				437	428	98.0	535	754	141.0
	Ratio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / N <sub>kgeldahl</sub>	-	0.40	0.29	73				1	0	39.2	0.31	0.28	89.8
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l	0.60	0.85	141							1	1	141.4
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l												
Fosfor	P <sub> totaal</sub>	mg P/l	17	12	73	23	23	98	15	11	71.2	17	8	49.2
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	mg P/l	11	7	59	14	9	67	11	5	46.0	0		
Mineralen	Calcium	mg/l	255	285	112	101	100	99	298	309	103.4	292	324	111.0
	Carbonaat	mmol/l	82	55	66	53	20	37	85	50	58.9	105	80	76.6
	Bicarbonaat	mmol/l												
	Chloride	mg/l	4780	1284	27	4350	55	1	4947	972	19.7	4790	2226	46.5
	Kalium	mg/l	1246	283	23	1403	94	7	1258	166	13.2	1088	484	44.5
	Magnesium	mg/l	115	156	135	50	0	0	146	205	140.2	91	53	58.4
	Natrium	mg/l	12668	2994	24	14633	720	5	13033	1694	13.0	10200	4681	45.9
	Sulfaat	mg/l	14723	6088	41	18585	733	4	16906	4417	26.1	6734	4419	65.6

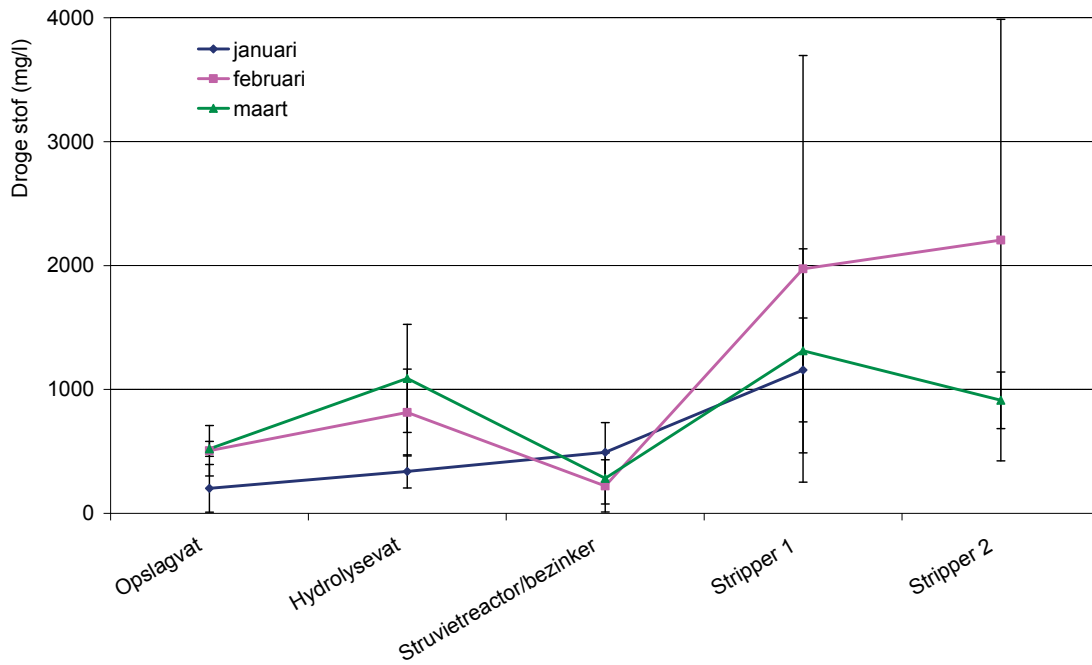
Parameters	Omschrijving	Eenheid	2009					Maart			Februari			Januari			
			Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV	Average	STD	%STDEV			
			N=29														
Algemeen	pH	-	10	0	4.6												
	pH lab		11	1	6.1	11	1	4.7									
	Temperatuur	°C	40	4	9.3												
	CZV	mg/l	12743	1264	9.9	12917	488	3.8									
Vaste stof	Zwevende stof	mg/l	1838	1824	99.2	6	1	17.3									
	Gloeirest	% (m/m)	79	14	17.2	79	14	17.2									
	Organische zwevende stof	mg/l															
	Indamprest	mg/kg	38938	18445	47.4	960	131	13.7									
	Gloeirest vd indamprest	% (m/m)	86	5	6.3												
	Organische stof	mg/kg	6746	3198	47.4												
Stikstof	N <sub>gledaht</sub>	mg N/l	1604	543	33.8	1683	359	21.3									
	Ureum-N	mg N/l															
			772	608	78.8												
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg N/l	1308	435	33.3	1417	204	14.4									
	Ratio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / N <sub>gledaht</sub>	-	0.80	0.29	36.6	0.84	0.05	6.0									
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l															
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg N/l															
Fosfor	P <sub>total</sub>	mg P/l	19	22	115.6	27	34	124.4									
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	mg P/l	14	13	92.9	17	16	96.9									
Mineralen	Calcium	mg/l	271	368	135.9	136	146	107.3									
	Carbonaat	mmol/l	99	47	47.6	70	15	20.7									
	Bicarbonaat	mmol/l															
	Chloride	mg/l	4729	736	15.6	4367	82	1.9									
	Kalium	mg/l	1280	140	10.9	1369	117	8.5									
	Magnesium	mg/l	121	190	157.3	72	29	40.2									
	Natrium	mg/l	12962	1646	12.7	14033	653	4.7									
	Sulfaat	mg/l	17609	3940	22.4	18862	718	3.8									

BIJLAGE 6

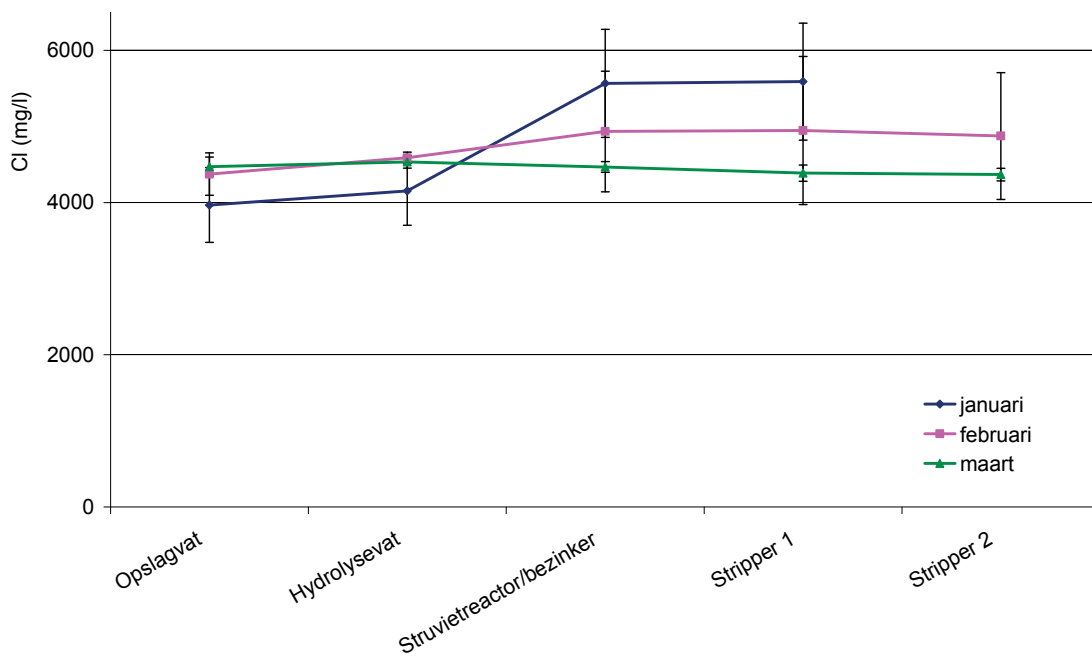
# GRAFIEKEN RESULTATEN

## ONVERDUNDE URINE

DROGE STOFRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR ONVERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL) EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING

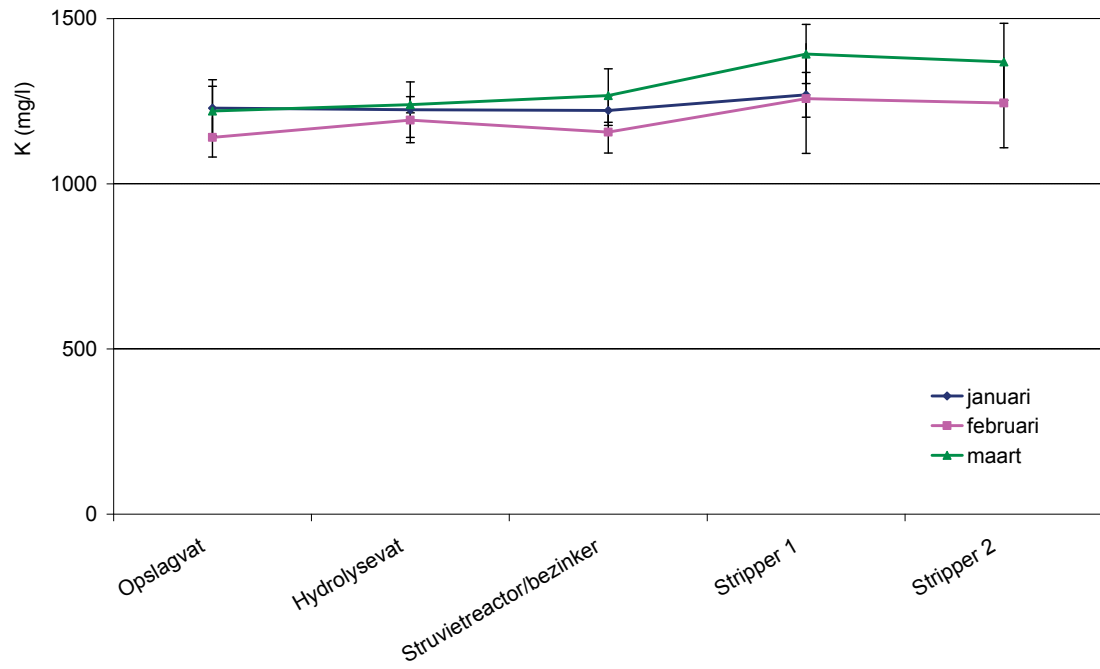


CHLORIDERESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR ONVERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL) EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING



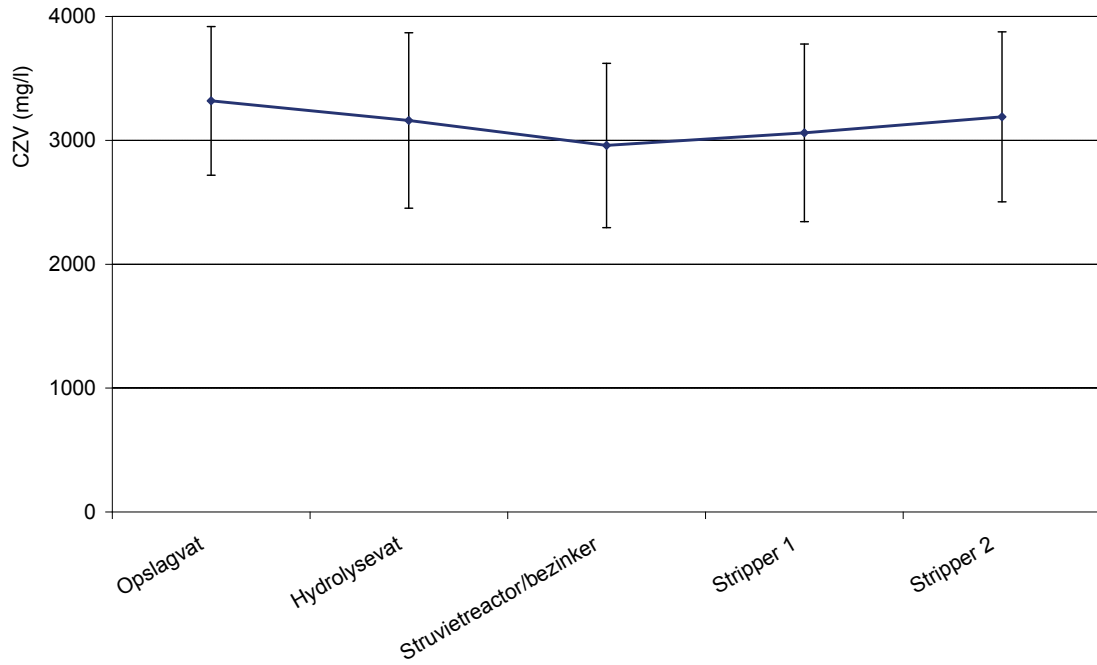


KALIUMRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR ONVERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL)  
EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING

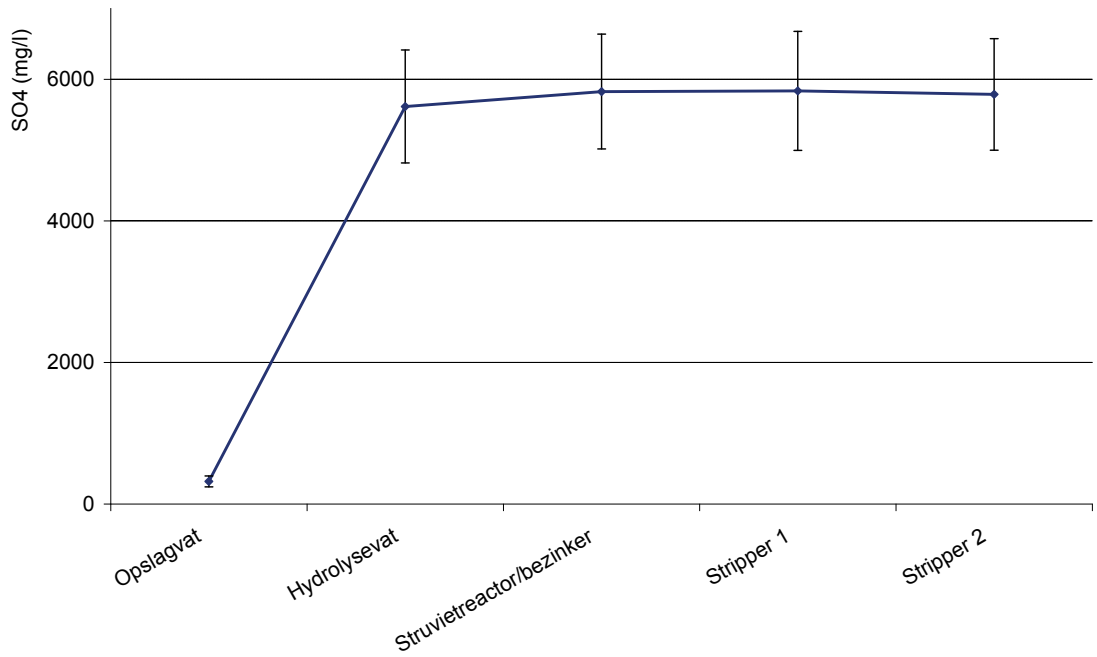


## GRAFIEKEN RESULTATEN VERDUNDE URINE

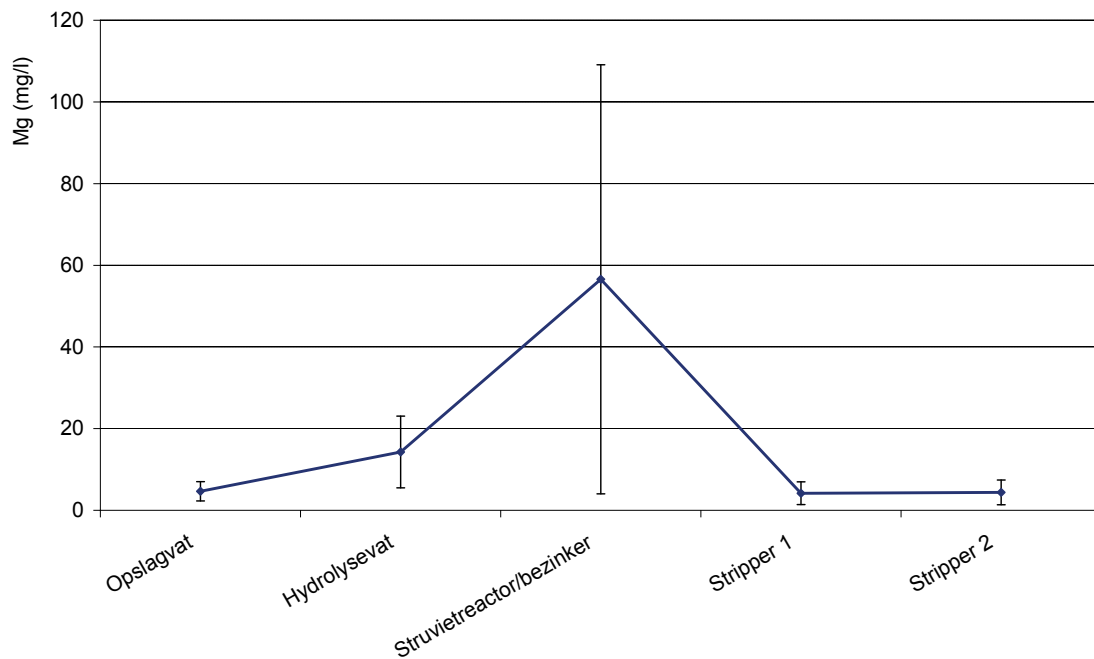
CZY-RESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR VERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL)  
EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING



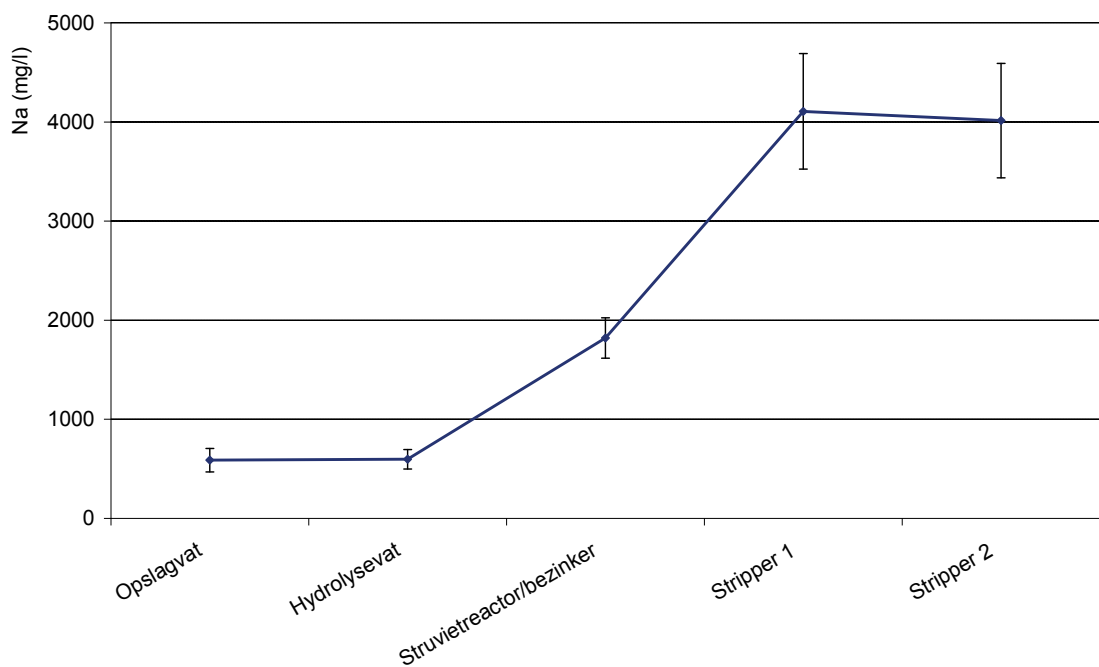
SULFAATRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR VERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL)  
EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING



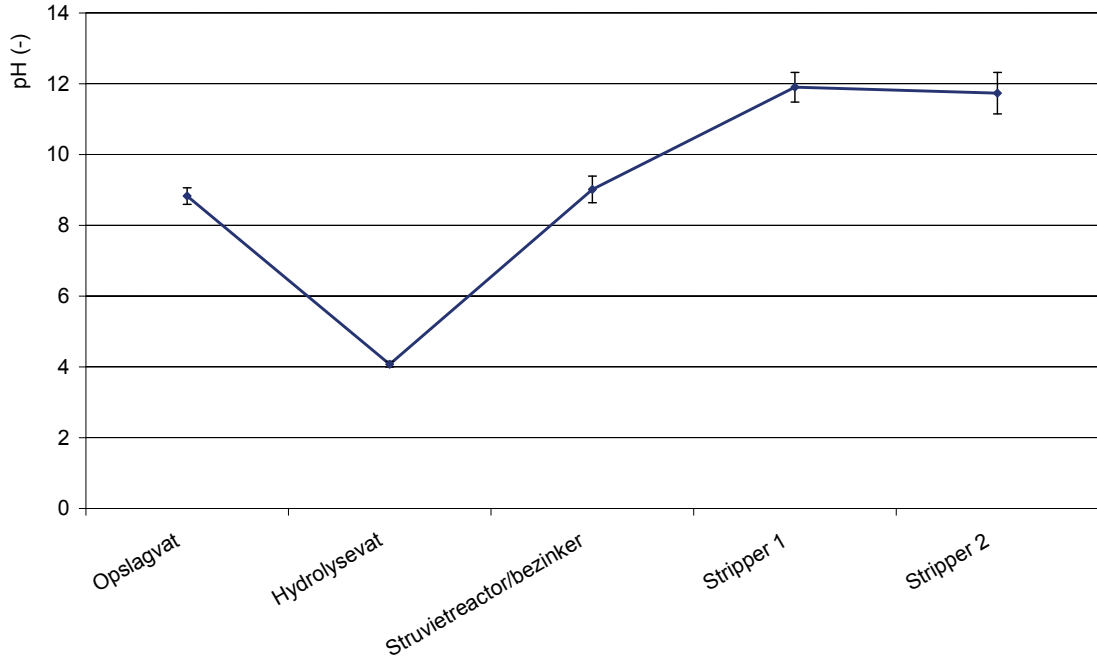
MAGNESIUMRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR VERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL)  
EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING



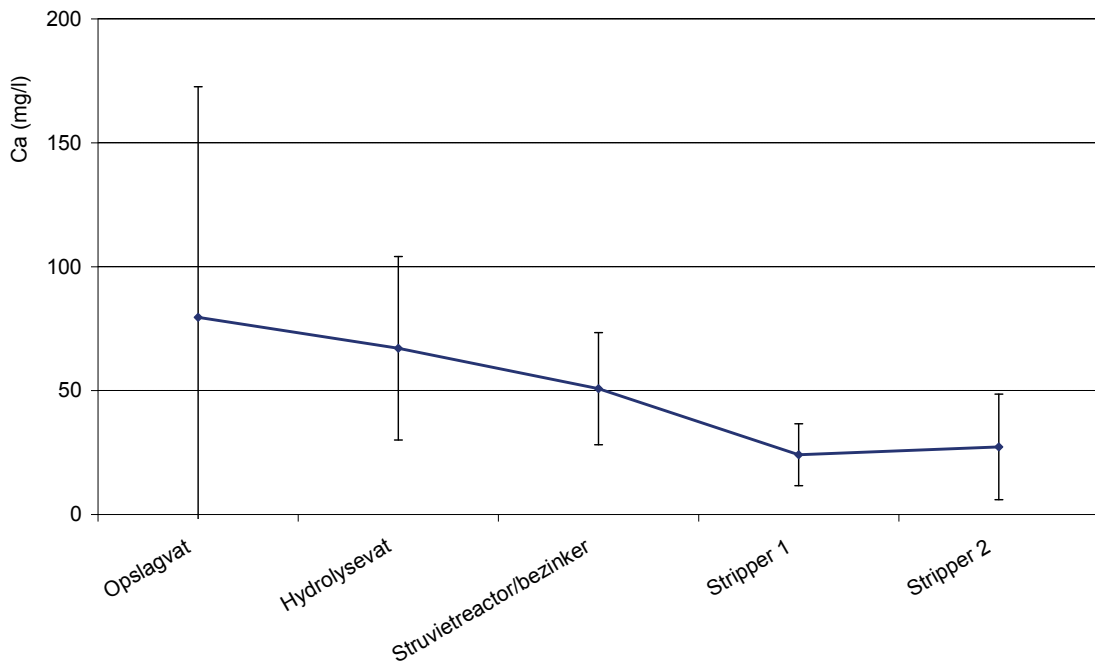
NATRIUMRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR VERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL)  
EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING.



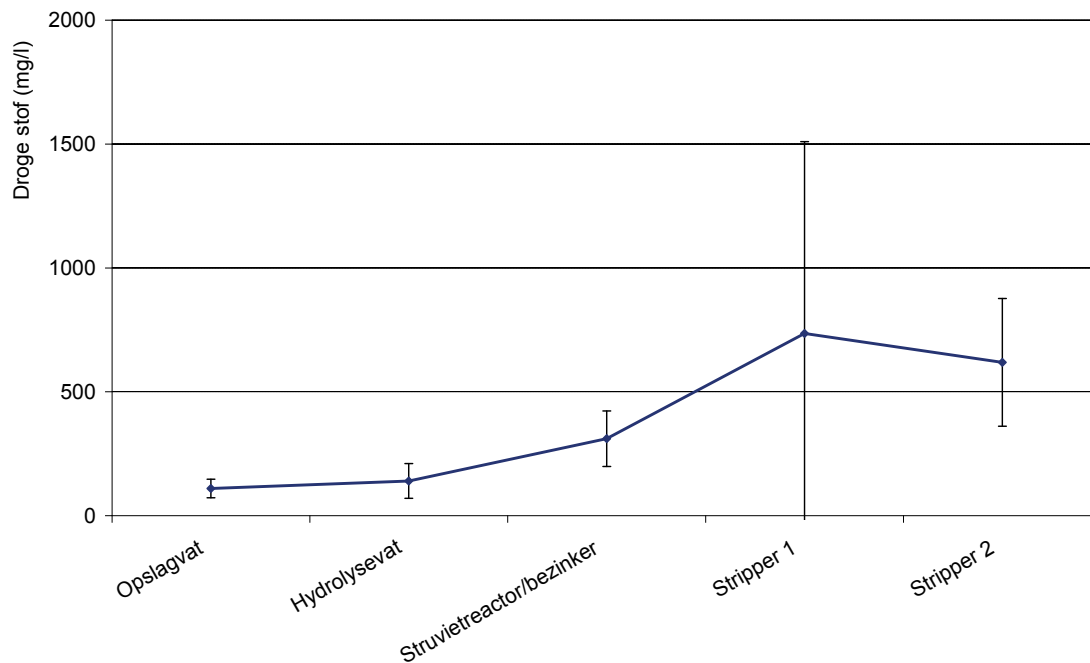
PH-RESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR VERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL)  
EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING.



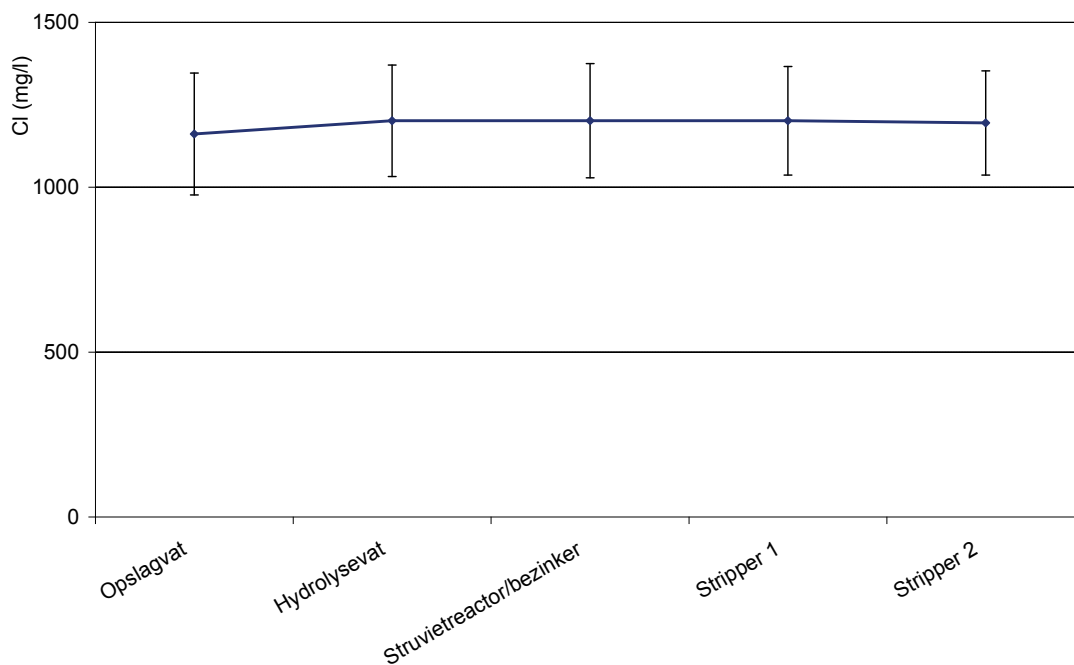
CALCIUMRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR VERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL)  
EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING.



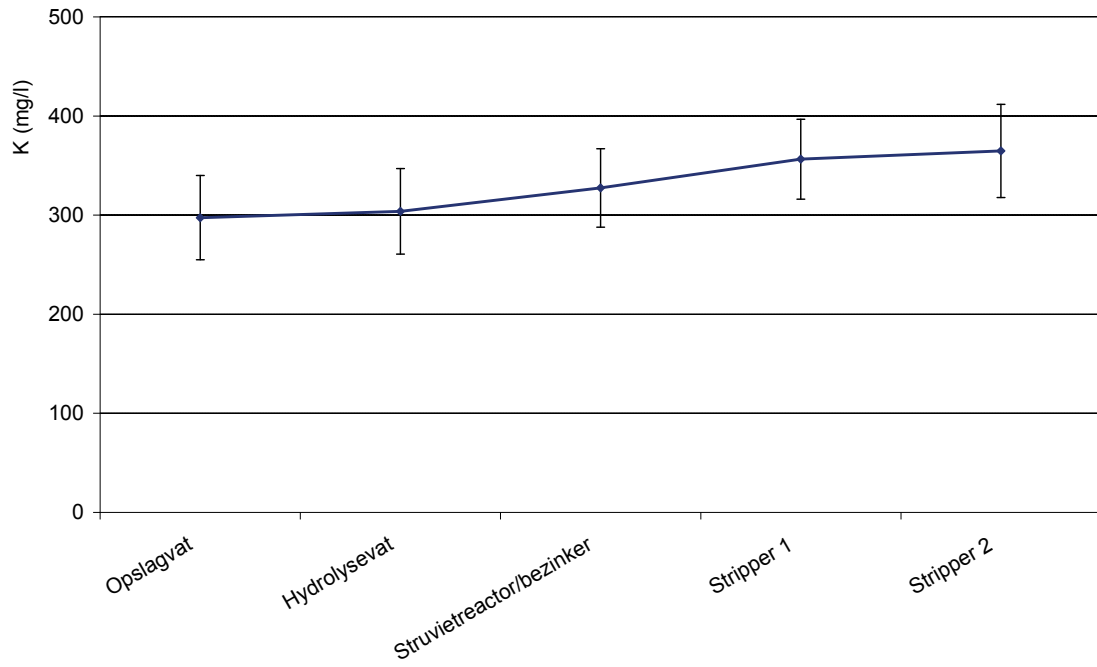
DROGE STOFRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR VERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL)  
EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING



CHLORIDERESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR VERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR(ONDERDEEL)  
EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING



KALIUMRESULTATEN PROEFINSTALLATIE VOOR VERDUNDE URINE WEERGEGEVEN ZIJN GEMIDDELDEN PER REACTOR (ONDERDEEL)  
EN DE BIJBEHORENDE STANDAARDAFWIJKING



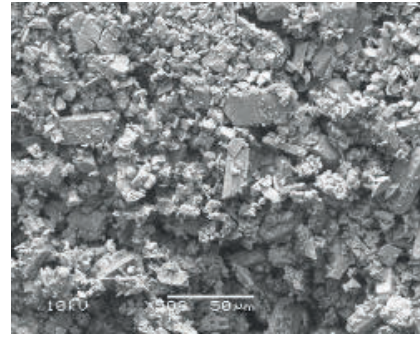
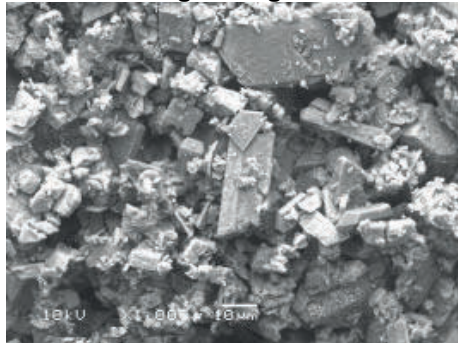


BIJLAGE 7

# EM FOTO'S STRUVIETMONSTER 2

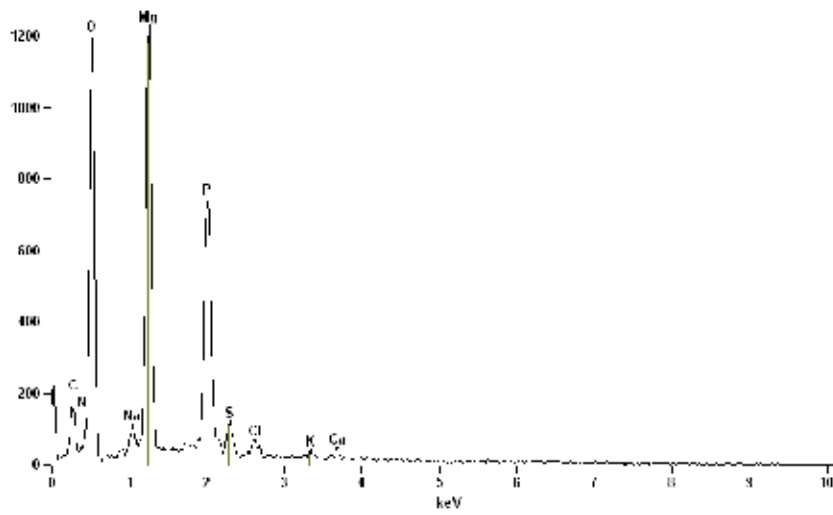
(met dank aan Philip Kuntke (TTIW Wetsus))

## Struviet luchtgedroogd



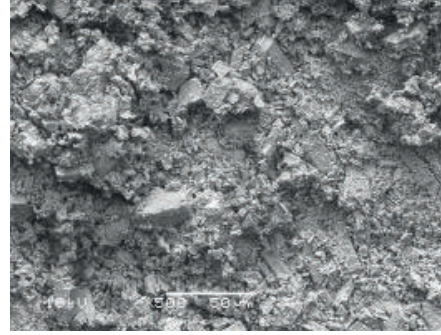
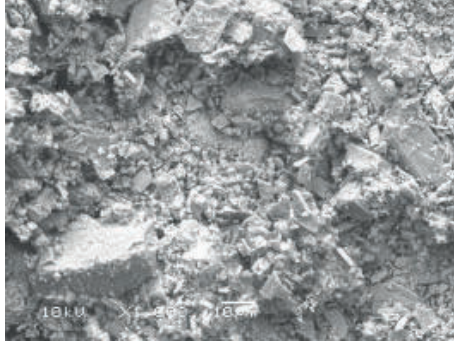
Full scale counts: 1230

080609 struvite.tif 500.x1





### Struviet gedroogd bij 500°C



Full scale counts: 1669

090609 struvite t/d 500x1

