

stowa

LOKAAL EN MOBIEL? OF TOCH CENTRAAL?

# BEHANDELING VAN URINE



RAPPORT

2010  
W02

BEHANDELING VAN URINE,  
LOKAAL EN MOBIEL? OF TOCH CENTRAAL?

STOWA

2010  
W02



# COLOFON

UITGAVE STOWA, Amersfoort 2010

## AUTEURS

Hennie van Vliet (Grontmij, De Bilt) ( 227941)  
Jan Hofman (KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein)  
Kees Roest (KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein)

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Bert Palsma (STOWA, voorzitter)  
Gertjan Euverink (Wetsus)  
Ferdinand Kiestra (waterschap Aa en Maas)  
Mark van Loosdrecht (TU Delft)  
Adriaan Mels (LeAF)  
Mathijs Oosterhuis (waterschap Regge en Dinkel)  
Henry van Veldhuizen (waterschap Groot Salland)  
Miranda Verhulst (TNW)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA rapportnummer 2010-W02

# TEN GELEIDE

De ontwikkelingen omtrent nieuwe sanitatiesystemen heeft, met name gedurende de laatste jaren, in Nederland een grote vlucht genomen. Er vinden momenteel verspreid over Nederland verschillende onderzoeksprojecten plaats. Bij deze ontwikkeling is er door de betrokken partijen bewust voor gekozen vooral voorbeelden te genereren op grond waarvan ook andere maatschappelijke organisaties konden worden overtuigd van het belang van onderzoek en demonstratieprojecten rond deze ontwikkeling. Enerzijds omdat deze past binnen de context van een duurzaamheids- en of innovatiebeleid en anderzijds omdat deze maatschappelijk geaccepteerd wordt. Om de opzet van demonstratieprojecten en implementatie te vergemakkelijken is, bij de keuze van de technieken, waar mogelijk aansluiting gezocht bij de bestaande praktijken in de bouw en het gebruik van de sanitaire voorzieningen. Het resulteerde in een groot aantal projecten waarin telkens een klein stapje is gezet om uiteindelijk een groter doel te bereiken. Dat grotere doel voor de STOWA is de mogelijkheid om de afwegingen en keuzes voor de toepassingen van nieuwe sanitatie te onderbouwen met kennis. Kennis van alle aspecten die hiervoor van belang zijn zoals bijvoorbeeld inzameling, beheer, volksgezondheid, acceptatie, (milieu)rendement, gebruikerservaringen, financiën, verantwoordelijkheid, aanleg en bouw en zuiveringstechniek.

Over de verschillende projecten zijn inmiddels onder de verantwoordelijkheid van STOWA meerdere rapportages verschenen, een aantal is nog in voorbereiding. Ook deze rapportage belicht een deelaspect van het totale kennispallet. Zij geeft inzicht in de mogelijkheden om apart ingezamelde urine mobiel, decentraal of centraal te verwerken. Natuurlijk is het een moment opname en we kunnen gelukkig constateren dat de kennisontwikkeling op het gebied van nieuwe sanitatie een grote vlucht neemt. Daarmee biedt dit rapport inzicht in de verwerkingsmogelijkheden van urine voor de korte termijn, voor de projecten die nu of binnen enkele jaren gerealiseerd gaan worden.

Wij hopen dat deze rapportage wederom bijdraagt aan de verdere ontwikkeling van de kennis en praktijkervaring op het gebied van de nieuwe sanitatie in Nederland.

Utrecht, december 2009

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

# SAMENVATTING

'Het nieuwe plassen' kon zich in 2007, bij de aanvang van dit onderzoek, verheugen in een snel groeiende aandacht. Op diverse locaties in Nederland werden toiletten geplaatst die urine en fecaliën apart hielden. Het ging veelal om voorbeeld- of om onderzoeksprojecten. Daarbij was de behandeling van de separaat ingezamelde urine niet op voorhand en zeker niet voor de langere termijn geregeld. Daarom was er een behoefte om na te denken over de mogelijke behandelopties van de veelal kleinschalig en wijdverspreid ingezamelde urine. Voor de behandeling van de aldus ingezamelde urine leken er op voorhand twee mogelijkheden te zijn:

- Centrale behandeling, bijvoorbeeld op een centrale plek in het land maar daardoor wel met lange transportafstanden, of,
- Lokale kleinschalige behandeling, op de locatie waar de urine ook wordt ingezameld waardoor er geen transport nodig is maar de installatie wellicht wel onevenredig duur zou kunnen zijn.

Het leek wenselijk om na te gaan of er wellicht nog andere alternatieven zijn. Gedacht werd ondermeer aan kleine installaties die tijdelijk op locatie konden worden geplaatst om een hoe-veelheid urine te verwerken of aan installaties die tijdens het transport van de urine tegelijk de urine zouden verwerken.

Het doel van de studie was om na te gaan of er verwerkingsmogelijkheden zijn waarmee:

- De verwerking op kleine en mobiele wijze kan worden uitgevoerd;
- De betreffende stoffen vergaand uit de urine worden verwijderd;
- Zo mogelijk een herbruikbaar restproduct ontstaat;
- En waarmee het te transporteren volume wordt verkleind.

De doelstelling van het project was:

*"te komen tot een keuze voor zuiveringstechnieken die in een te realiseren mobiele urinezuiveringsinstallatie, de "Urimob", kunnen worden toegepast."*

Het onderzoek is uitgevoerd door KWR watercycle research institue en Grontmij en werd begeleid door een Begeleidingscommissie. Het onderzoek heeft uiteindelijk ruim twee jaar in beslag genomen. Tegelijkertijd stonden uiteraard de ontwikkelingen niet stil. Nieuwe inzichten en ontwikkelingen zijn weliswaar zoveel mogelijk meegenomen maar het is duidelijk dat we nu wat anders tegen sommige aspecten aan kijken dan bij het begin van het onderzoek.

Tijdens de inventarisatie en de evaluatie van de verschillende opties bleek al gauw dat voor de verwerking van de urine biologische processen de voorkeur verdienen maar dat deze in een installatie die regelmatig getransporteerd moet worden onvoldoende bedrijfszeker zijn. Op verzoek van de Begeleidingscommissie is het onderzoek daarom uitgebreid in de richting van lokale en regionale behandelingen en is aandacht besteed aan het proces van concentratie van de urine om de transportkosten te reduceren.

## BESCHOUWDE TECHNOLOGIEËN

Voor het verwerken van urine zijn de volgende biologische verwerkingstechnieken beschouwd: anaerobe vergisting, conventioneel actief slib, actief slib membraan bioreactor (MBR), bio-P-verwijdering en autotrofe stikstofomzettingstechnieken.

In het algemeen kan worden gesteld dat biologische technieken vanwege de capaciteit en stabiliteit niet geschikt zijn voor een mobiel concept als Urimob, maar dat een aantal technieken wel geschikt zijn voor stationaire concepten. Voor een totale verwijdering en/of terugwinning van nutriënten, hormonen en medicijnresten is echter altijd een combinatie van behandelingstechnieken vereist.

In het onderzoek zijn de volgende fysisch-chemische technieken beschouwd: strippen, ionenwisseling, concentreren, verschillende membraan filtratie technieken, trickling filter, actieve kool, precipitatie, ozon, geavanceerde oxidatie en UV.

Het resultaat van de meeste fysisch-chemische technieken is dat de urine in twee aparte stromen wordt gescheiden, die daarna beiden nog een verdere behandeling moeten ondergaan.

### BEHANDELOPTIES

Een aantal combinaties van biologische en fysisch-chemische technieken lijken geschikt voor het verwerken van separaat ingezamelde urine. Het gaat daarbij vooral om combinaties van actief slib (in een MBR systeem) of autotrofe stikstofverwijderingstechnieken met struvietvorming, ozonisatie en/of actief kool behandeling.

#### *Mobiel*

Mobiele behandeling (het Urimob concept) is geen reële optie omdat het bedienen van biologische systemen én van fysisch chemische systemen in een mobiele opstelling niet stabiel zal zijn.

#### *Voorbehandeling gevolgd door mobiel*

Om dezelfde reden als de optie mobiel is ook een decentrale stationaire voorbehandeling, gevolgd door Urimob als vervolgbehandeling, niet haalbaar.

#### *(De)centraal stationair, variant 1*

Deze variant is gericht op de verwijdering van N en P. De inzetbare biologische technieken met de aanvullend in te zetten fysisch-chemische technieken zijn:

1. conventionele denitrificatie-nitrificatie (als MBR); aan te vullen met verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen middels:
  - a. struvietprecipitatie;
  - b. ozon en eventueel actief kool;
 of
2. autotrofe stikstofverwijderingstechnieken, aan te vullen met verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen middels:
  - a. struvietprecipitatie;
  - b. ozon en eventueel actief kool.

#### *(De)centraal stationair, variant 2*

Deze variant is gericht op de terugwinning van N en P. Ten opzichte van variant 1 dient daarvoor de volgorde van de processtappen te worden aangepast:

1. struvietvorming middels:
  - a. de aanpak met alleen MgO dosering (maximale P terugwinning) of
  - b. MgO en aanvullende P-dosering (maximale P én N terugwinning);
2. na stap 1 a (en eventueel ook na stap 1 b) biologische (rest) N verwijdering middels:
  - a. conventionele aanpak (MBR);
  - b. of autotrofe stikstofverwijdering;
3. nabehandeling middels ozon en eventueel actief kool.

Zowel decentraal als centraal kunnen dezelfde bovenstaande urine verwerkingstechnieken gebruikt worden. Er is uiteraard wel een verschil in dimensionering.

#### *Electrodialyse*

Op verzoek van de Begeleidingscommissie is tot slot een variant toegevoegd gericht op het reduceren van het volume door electrodialyse.

### **CONCLUSIES**

1. De doelstellingen (verwijderen en zo mogelijk terugwinnen van N en P en verwijderen van hormonen en medicijnen) zijn te ambitieus voor het oorspronkelijke Urimob concept (een mobiele urineverwerking). Datzelfde geldt ook voor de optie waarbij wordt uitgegaan van een decentrale voorbehandeling gevolgd door een mobiele nabehandeling.
2. De doelstellingen zijn wél haalbaar met een decentrale of centrale stationaire behandeling. Er zijn meerdere varianten beschikbaar die onderling verschillen in de mate waarin zowel N als P herbruikbaar worden teruggewonnen.
3. In alle uitgewerkte varianten wordt P teruggewonnen. Varianten waarbij struviet als tweede stap wordt gewonnen hebben de voorkeur omdat dan minder organisch materiaal wordt ingesloten.
4. Bij de separate behandeling van urine lijkt het schaalvoordeel bij de kostencalculaties evident. Bij de gehanteerde uitgangspunten zijn de kosten voor de verwerking van 1 m<sup>3</sup> urine bij een centrale behandeling circa 3x lager dan bij een decentrale behandeling.
5. De toegevoegde variant Electrodialyse richt zich vooral op concentratie van de urinevloeistof gevolgd door een nabehandeling. Een directe toepassing van het concentraat als meststof lijkt momenteel wettelijk niet mogelijk en is om die reden in dit onderzoek afgefallen. Bij een volledige terugwinning van N én P liggen de kosten in combinatie met Electrodialyse op een zelfde nivo als bij de volledige terugwinning van N én P bij de decentrale urinebehandeling, wel zijn de kosten voor het transport lager.

### **OVERWEGINGEN / DISCUSSIE**

Het onderzoek had aanvankelijk als doel vooral te kijken naar mobiele verwerkingstechnieken. Gaandeweg heeft het onderzoek zich ontwikkeld tot een algemene inventarisatie van de behandelingsopties voor urine op verschillende schaalniveaus en voor verschillende omstandigheden en met verschillende doelstellingen. Uiteindelijk zijn de meest kansrijke varianten technisch en financieel uitgewerkt. Dat geeft een waardevolle eerste inschatting van de mogelijk gewenste ontwikkelingen op korte termijn. Er zijn echter ook kanttekeningen te plaatsen.

#### *Kennisontwikkeling*

De studie is nadrukkelijk een quick-scan waarbij gebruik is gemaakt van algemene kentallen en aannames. Wijzigingen in de kentallen of de aannames kunnen gevolgen hebben voor de resultaten. Het kan dan gaan om de verdere stijging van de energieprijzen of het toestaan van urine (Urevit) als meststof. Ook onze kennis over de optimale schaalgrootte van de onderzochte technieken is in ontwikkeling. Dit betekent dat de studie indicatief van aard is. De studie geeft aan welke beschikbare technieken op dit moment het beste zouden kunnen worden toegepast.

*Bij afweging meerdere maatschappelijke waarden belangrijk*

De studie heeft zich primair gericht op het in beeld brengen van de technologische configuraties met een globale kostenindicatie. De uiteindelijke keuze voor een systeem zal van veel meer factoren afhangen. De Carbonfootprint, het energieverbruik en andere duurzaamheidsaspecten zoals het verwijderen van medicijnresten kunnen eveneens een belangrijke rol gaan spelen.

*De keuze van het transportsysteem*

De studie heeft zich gericht op een systeem waarbij de urine via korte leidingen in een tank wordt opgeslagen waarna de urine of de behandelde urine per as wordt getransporteerd. Die keuze had ook te maken met de nog erg verspreid gelegen en zeer kleine pilotprojecten. Zeker in nieuwe situaties waarbij in grotere gebieden urine apart wordt ingezameld kan transport per leiding in de toekomst een reële optie worden. Uiteraard is de keuze voor het transportsysteem van invloed op de verwerkingsmogelijkheden van de ingezamelde urine. Interessant zou de gedachte kunnen zijn van een leiding waarin een deel van het verwerkingsproces plaats vindt. Een in de discussie genoemde optie is dat een deel van de denitrificatie na de strufietvorming en nitrificatie wellicht in het riool zou kunnen plaatsvinden.

*Vergelijking met conventionele zuivering*

De studie richt zich op een kostenvergelijking tussen de verschillende varianten maar geeft tevens aan wat de referentieprij is voor de verwerking van 1 m<sup>3</sup> verdunde urine in de conventionele zuivering. Het is verleidelijk deze kosten met elkaar te vergelijken. Om die vergelijking echter goed te kunnen maken zou bij de berekening van de conventionele kosten ook een calculatie moeten worden opgenomen voor het verwijderen van medicijnresten en hormoon-systeemverstorende stoffen.

Vergelijken we echter de prijs van de centrale stationaire installatie (€ 100,= per m<sup>3</sup> excl. transport) en trekken we daar de kosten voor ozon en actief kool van af (€ 81,= per m<sup>3</sup>) dan bedragen de kosten voor de verwerking van 1 m<sup>3</sup> urine nog maar € 19,=. Dit ligt redelijk in lijn met de berekende referentieprij van € 16,=.

Ook de omgekeerde berekening is natuurlijk interessant. Welke kosten zou je moeten maken om dezelfde hoeveelheid medicijnen en hormoonsysteemverstorende stoffen uit conventioneel afvalwater te verwijderen? Behandeling van geconcentreerde deelstromen is zeker concurrerend ten opzichte van behandeling van verdunde mengstromen.

*De gedefinieerde schaalgrootte voor een centrale behandeling*

De centrale behandeling is gedefinieerd op een omvang van 15 - 20 m<sup>3</sup> per maand. Dit is een productie die door een woonwijk van circa 125 - 170 mensen (50 - 75 woningen) wordt gerealiseerd. Op dit moment zijn er meerdere woningbouwprojecten in voorbereiding waar vanuit duurzaamheid voorstellen zijn gedaan voor het toepassen van nieuwe sanitatie. Het betreft locaties van 1200 (Sneek, Harinxmaland) tot 7000 (Utrecht Rijnenburg) woningen. Het ligt in de lijn der verwachting dat de berekende kostprijs nog verder kan worden verlaagd indien projecten op deze schaal inderdaad worden gerealiseerd.



**AANBEVELINGEN**

Aanbevolen wordt vanwege de technische complicaties om af te zien van het verder werken aan mobiele urineverwerkingsconcepten.

1. Indien op korte termijn een verwerkingsunit moet worden gerealiseerd voor de verwerking van de op de verschillende locaties separaat ingezamelde urine dan is een centrale oplossing volgens variant 1 (conventionele denitrificatie-nitrificatie, aangevuld met struvietprecipitatie en ozon) op basis van de aannamen, het meest kosteneffectief. Niettemin verdient het aanbeveling na te gaan of deze variant ook uit oogpunt van duurzaamheid en klimaat/energieverbruik wel goed scoort. Een nader afweging op meer dan alleen een technologische haalbaarheid en kostenanalyse is gewenst.
2. Gelet op de snelle ontwikkelingen op het gebied van het duurzaam bouwen en de schaal-sprong die nu gemaakt wordt is het gewenst na te gaan wat de invloed is van de schaal op de vergelijking van de verschillende varianten. Daarbij zou als aanname kunnen worden gesteld dat transport via een leiding gebeurd en dat de verwerking van de urine op een schaal van 1000 tot 10.000 woningen plaats vindt. Daarbij is het tevens interessant na te gaan welk deel van het verwerkingsproces voor of tijdens het transport in de leiding zou kunnen plaatsvinden.
3. Er is nog onduidelijkheid omtrent de belastbaarheid van de verschillende Anamox-installaties (Demon, Sharon, Canon). Nader onderzoek naar hun werking met een influent bestaande uit verdunde urine is gewenst.
4. Om in de toekomst tot goede vergelijkingen te komen tussen de behandeling van urine in een conventioneel afvalwatersysteem en separaat ingezamelde urine is het gewenst uit te gaan van gelijke normen voor het verwijderen van met name medicijnresten en hormoonstelsystem-verstorende stoffen.

# 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)



# BEHANDELING VAN URINE

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
1.1	De onderzoeksvraag	1
1.2	Het proces	2
1.3	Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>UITGANGSPUNTEN</b>	<b>3</b>
2.1	Uitwerking vraagstelling	3
2.2	Berekeningsgrondslagen	4
2.2.1	Influent, samenstelling en hoeveelheden	4
2.2.2	Schaal en ontwerpcapaciteiten	6
2.2.3	Kostencalculaties	6
2.2.4	Maximale afmetingen	7
2.3	Overige kanttekeningen	8
<b>3</b>	<b>BEHANDELINGSMOGELIJKHEDEN</b>	<b>9</b>
3.1	Biologische technieken	9
3.1.1	Algemeen	9
3.1.2	Het conventionele actief slib proces	10
3.1.3	Sharon	13
3.1.4	Autotrofe vormen van stikstofverwijdering	15
3.2	Fysisch chemische technieken	20
3.2.1	Algemeen	20
3.2.2	Strippen	20
3.2.3	Ionenwisseling	22
3.2.4	Concentreren (verdampen en vries/dooi-proces)	23
3.2.5	Membraanfiltratie	25
3.2.6	Electrodialyse	27
3.2.7	Nitrificerende filtratie	29

	3.2.8	Adsorptie aan actieve kool	30
	3.2.9	Precipitatie van fosfor als fosfaat	31
	3.2.10	Precipitatie van fosfor als struviet	33
	3.2.11	Ozon	35
	3.2.12	Geavanceerde oxidatie	37
	3.2.13	Chloor	38
	3.2.14	Natriumhypochloriet	38
	3.2.15	UV	39
<b>4</b>		<b>VERKENNING MOGELIJKE VARIANTEN</b>	<b>41</b>
	<b>4.1</b>	Mogelijke combinaties van processen	41
	<b>4.2</b>	Het mobiele Urimob concept	42
	4.2.1	Variant 1: hergebruik N én P.	42
	4.2.2	Variant 2: hergebruik P.	42
	<b>4.3</b>	Decentrale stationaire voorbehandeling, gevolgd door Urimob	43
	4.3.1	Variant 1: conventioneel	43
	4.3.2	Variant 2: Sharon	43
	<b>4.4</b>	Decentrale stationaire behandeling	44
	4.4.1	Variant 1: N en P verwijdering	44
	4.4.2	Variant 2: N en P terugwinning	44
	<b>4.5</b>	Centrale stationaire behandeling	45
	4.5.1	Variant 1: N en P verwijdering	45
	4.5.2	Variant 2: N en P terugwinning	45
	<b>4.6</b>	Additionele variant met decentrale stationaire voorbehandeling	46
	4.6.1	Variant 1:	46
	4.6.2	Variant 2:	46
<b>5</b>		<b>UITWERKING VAN DE GESELECTEERDE VARIANTEN</b>	<b>48</b>
	<b>5.1</b>	Mobiele Urimob concept	48
	<b>5.2</b>	Decentrale stationaire voorbehandeling, gevolgd door Urimob	48
	<b>5.3</b>	Decentrale stationaire behandeling	48
	5.3.1	Decentrale stationaire behandeling, variant 1	48
	5.3.2	Decentrale stationaire behandeling, variant 2.1.a	50
	5.3.3	Decentrale stationaire behandeling, variant 2.1.b	51
	<b>5.4</b>	Centrale stationaire behandeling	52
	5.4.1	Centrale stationaire behandeling, variant 1	52
	5.4.2	Centrale stationaire behandeling, variant 2.1.a	53
	5.4.3	Centrale stationaire behandeling, variant 2.1.b	54
	<b>5.5</b>	Additionele Electrolyse variant met decentrale stationaire voorbehandeling en centrale nabehandeling	56
<b>6</b>		<b>PERSPECTIEVEN</b>	<b>58</b>
	<b>6.1</b>	Conclusies	58
	<b>6.2</b>	Overwegingen / discussie	59
	<b>6.3</b>	Aanbevelingen	61
		<b>LITERATUUR</b>	<b>62</b>
		<b>APPENDIX</b>	
	1	DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING	65
	2	CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING	67
	3	DECENTRALE ED, GEVOLGD DOOR CENTRALE STRUVIETPRECIPITATIE	69

# 1

## INLEIDING

### 1.1 DE ONDERZOEKSVRAAG

‘Het nieuwe plassen’ kon zich in 2007, bij de aanvang van dit onderzoek, verheugen in een snel groeiende aandacht. Op diverse locaties in Nederland werden toiletten geplaatst die urine en fecaliën apart hielden. Het ging veelal om voorbeeld- of om onderzoeksprojecten. Daarbij was de behandeling van de separaat ingezamelde urine niet op voorhand en zeker niet voor de langere termijn geregeld. Daarom was er een behoefte om na te denken over de mogelijke behandelopties van de veelal kleinschalig en wijdverspreid ingezamelde urine. Tot op dat moment was de inspanning rondom ‘het nieuwe plassen’ vooral gericht op het initiëren van demonstratieprojecten voor separatie. Het bleek dat het separaat opvangen van urine technisch mogelijk is en maatschappelijk wordt aanvaard. Een relevante volgende stap in de ontwikkeling was de aparte behandeling van de separaat ingezamelde urine. Het doel daarvan was, om in de geconcentreerde stroom een vergaande verwijdering te bereiken van fosfaat, stikstof, hormonen en medicijnresten. Het nevensdoel was, om daarbij herbruikbare reststoffen te verkrijgen. Vooralsnog werd ervan uitgegaan, dat de reststroom vervolgens voor de finale verwerking geloosd zou worden op een gewone RWZI.

Voor de behandeling van de separaat ingezamelde gele stroom leken op voorhand twee opties relevant:

- Inzameling van de urine vanaf de verschillende locaties en transport naar een centrale locatie, gevolgd door centrale behandeling;
- Lokale kleinschalige behandeling op de plaats waar de urine verzameld is.

Aan de inzameling, gevolgd door centrale behandeling is, mede door de kleine volumeschaal, een relatief hoge transportinspanning gekoppeld. Voor de decentrale behandeling is van belang, dat er per locatie kleine hoeveelheden vrij komen. De daarvoor vereiste installaties (schaal liters per uur) zijn relatief kostbaar.

Het was daarom wenselijk om na te gaan of er wellicht alternatieven zijn. Gedacht werd ondermeer aan kleine installaties die tijdelijk op locatie konden worden geplaatst om een hoeveelheid urine te verwerken of aan installaties die tijdens het transport van de urine tegelijk de urine zouden verwerken.

Het doel was dan ook na te gaan of er verwerkingsmogelijkheden zijn waarmee:

- De verwerking op kleine en mobiele wijze kan worden uitgevoerd;
- Waarbij de betreffende stoffen vergaand uit de urine worden verwijderd;
- Waarbij zo mogelijk een herbruikbare restproduct ontstaat;
- En waarmee het te transporteren volume wordt verkleind.

### PROJECTDEFINITIE

*“De doelstelling van het project is te komen tot een keuze voor zuiveringstechnieken die in de te realiseren mobiele urinezuiveringsinstallatie, de “Urimob”, kunnen worden toegepast.”*

De uitgevoerde studie bestaat uit een literatuurstudie naar de behandeltechnieken die een optie zijn. Hierbij zijn zowel biologische als fysisch chemische technieken in beschouwing genomen. Naast literatuurstudie zijn ook experts op dit gebied geraadpleegd. Aanvankelijk zouden ook oriënterende experimenten op laboratoriumschaal worden uitgevoerd met de urine uit de urinetank bij Kiwa Water Research. In overleg met de Begeleidingscommissie is hier van afgezien.

In de variantenkeuze is een eerste afweging gemaakt van de beschikbare technieken. Hierbij is nagegaan welke technieken zich lenen voor een mobiele zuivering, welke resultaten daarmee behaald kunnen worden en welke globale kosten daarmee gemoeid zijn. Andere afwegingscriteria, zoals het energieverbruik, zijn in deze fase van het onderzoek nog niet meegewogen. De resultaten moeten dan ook duidelijk worden gezien als een eerste globale beoordeling.

## 1.2 HET PROCES

Het onderzoek is uitgevoerd door KWR-watercycle research institute en Grontmij en werd begeleid door een Begeleidingscommissie. Het onderzoek heeft uiteindelijk ruim twee jaar in beslag genomen. Tegelijkertijd stonden uiteraard de ontwikkelingen niet stil. Nieuwe inzichten en ontwikkelingen zijn weliswaar zoveel mogelijk meegenomen maar het is duidelijk dat we nu wat anders tegen sommige aspecten aan kijken dan bij het begin van het onderzoek.

Tijdens de inventarisatie en de evaluatie van de verschillende opties bleek al gauw dat voor de verwerking van de urine biologische processen de voorkeur verdienen maar dat deze in een installatie die regelmatig getransporteerd moet worden onvoldoende bedrijfszeker zijn. Op verzoek van de Begeleidingscommissie is het onderzoek daarom uitgebreid in de richting van centrale behandelingen en is aandacht besteed aan het proces van concentratie van de urine om de transportkosten te reduceren.

## 1.3 LEESWIJZER

In **hoofdstuk 2 “Uitgangspunten”** wordt de vraagstelling die in overleg met de Begeleidingscommissie nader is gepreciseerd verder uitgewerkt en worden de grondslagen voor de berekeningen toegelicht.

**Hoofdstuk 3 “Behandelingsmogelijkheden”** geeft een overzicht van de beschikbare technieken en hun effectiviteit. Onderscheid wordt gemaakt tussen biologische en fysisch/chemische technieken. Elke techniek wordt kort beschreven en uiteindelijk beoordeeld in welke mate zij geschikt zou kunnen zijn voor een centrale en decentrale toepassing.

Omdat geen van de technieken alleen geschikt is om de urine compleet te verwerken zijn in **hoofdstuk 4 “Verkenning mogelijke concepten”** voor de beide situaties centraal / decentraal de technieken gecombineerd tot theoretische verwerkingsconcepten. Elk concept wordt uiteindelijk op basis van BPJ (Best Professional Judgement) beoordeeld op haalbaarheid.

De als haalbaar beoordeelde verwerkingsconcepten zijn in **hoofdstuk 5 “Uitwerking geselecteerde varianten”** op kosten doorgerekend.

In **hoofdstuk 6 “Perspectieven”** worden de conclusies geformuleerd en worden de resultaten van het onderzoek in een breder en hedendaags perspectief geplaatst.

# 2

## UITGANGSPUNTEN

### 2.1 UITWERKING VRAAGSTELLING

Urine draagt slechts voor een zeer klein deel bij aan het volume van rioolwater (< 1 %) Het levert echter wel de grootste belasting van nutriënten in het communaal afvalwater. In de literatuur wordt vermeld dat 80 % van de N en 50 % van de P in rioolwater afkomstig is uit urine (Larsen en Gujer, 1996; Larsen en Udert, 1999). Het separaat opvangen en behandelen van urine kan daardoor van groot voordeel zijn en de belasting van een RWZI drastisch verminderen.

Vanwege het geringe volume zijn er grofweg drie methodes om de separaat ingezamelde urine te verwerken:

- lokale opslag in combinatie met een mobiele verwerkingsinstallatie;
- lokale kleinschalige behandeling;
- opslag en transport naar een centrale verwerkingsinstallatie.

Daarnaast is in Zweden een concept getest waarbij urine tijdelijk wordt opgeslagen in buffertanks en afhankelijk van de belastingsruimte op de RWZI gedoseerd wordt geloosd via het riool. Op deze manier kan de nutriëntenbelasting van een RWZI worden gestuurd. (Rauch *et al.*, 2003).

De alternatieven, waar de onderhavige studie zich op richt, zijn decentrale en centrale behandelingen, met als doelen:

- de verwijdering van:
  - ammonium N;
  - medicijnresten;
  - hormoonogelijkende stoffen;
- de verwijdering en mogelijk terugwinning van:
  - fosfor;
  - ammonium.

De beschouwde schaalalternatieven zijn:

- kleinschalige mobiele behandeling: het Urimob-concept;
- kleinschalige stationaire behandeling;
- centrale stationaire behandeling.

De Begeleidingscommissie heeft aangegeven, dat de volgende combinatie van doelen en schaalgroottes onderzocht dient te worden:

- 1 Urimob: kleinschalige mobiele verwerking, gericht op de verwijdering van N, P, hormonen en geneesmiddelen, met mogelijke terugwinning van N en P;
- 2 decentrale stationaire voorbehandeling, gericht op verwijdering van N, gevolgd door Urimob, gericht op de verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen, met mogelijke terugwinning van P;



- 3 decentrale stationaire behandeling, gericht op de verwijdering van N, P, hormonen en geneesmiddelen, met mogelijke terugwinning van N en P;
- 4 centrale stationaire behandeling, gericht op de verwijdering van N, P, hormonen en geneesmiddelen, met mogelijke terugwinning van N en P. Daarbij wordt gedacht aan tot maximaal 5 behandelingslocaties in Nederland. De transportafstand tot een centrale unit ligt daarbij in de orde van 50 km.

## 2.2 BEREKENINGSGRONDSLAGEN

### 2.2.1 INFLUENT, SAMENSTELLING EN HOEVEELHEDEN

Separaat ingezameld urine is zelden onverdund. Het is gebruikelijk om bij separate inzameling met enig water te spoelen uit het oogpunt van geurbestrijding. Daarnaast is de samenstelling van opgeslagen urine afwijkend van verse urine. Door hydrolyse onder invloed van aanwezige microorganismen wordt ureum snel omgezet in ammonium. Over een breed pH gebied komt de hydrolyse van ureum binnen enkele uren op gang en verloopt dan binnen circa 12 uur (Mels, 2007). Udert *et al.* (2003) hebben studie gedaan naar de hydrolyse en precipitatiekinetiek bij opslag van urine. De pH stijgt daarbij tot waarden rond de 9. Het gevolg daarvan is, dat Ca en Mg precipiteren. Ook kan door de hoge pH een deel van de ammonia als ammoniak vervluchtigen. Door de hydrolyse neemt de buffercapaciteit enorm toe. De alkaliteit stijgt van 22 mM naar 490 mM (simulatie) (Udert *et al.*, 2006). De buffer wordt gevormd door ammonium en bicarbonaat, beide afkomstig uit de ureumhydrolyse. Zwavel is vooral (90 %) in de vorm van sulfaat aanwezig, maar ook organische zwavelverbindingen kunnen aanwezig zijn (zwavelzuuresters en neutrale verbindingen). Het zwavelgehalte kan worden beïnvloed door biologische sulfaatreductie en of precipitatie.

Urine bevat naast zouten ook een hoog gehalte aan organische stof (CZV). De belangrijkste stoffen die in urine aanwezig zijn, zijn organische zuren, creatinine (2-Amino-1-methylimidazolidin-4-one), aminozuren en koolhydraten. Circa 85 % van de CZV is biodegradeerbaar (Udert *et al.*, 2006).

Tabel 1 geeft een overzicht van de samenstelling van verse en gehydrolyseerde urine.

TABEL 1 SAMENSTELLING VAN URINE

component	eenheid	Verse urine <sup>1</sup>	Verse urine <sup>2</sup>	Opgeslagen gehydrolyseerde urine <sup>2</sup>	Urineopslag KWR <sup>3</sup>	Urineopslag KWR <sup>4</sup>	Uitgangspunt berekeningen dit rapport
CZV	mg O <sub>2</sub> /l	-	8.150	1.650	3.250	2.266 ± 404	2.270
Zuurgraad	pH	6,2	7,2	9,0	9,2		9,1
N (Kjeldahl)	mg/l N	8.830			2.240	2.400 ± 346	2.400
N (ammonium)	mg/l N	463	254	1.720	500	1.766 ± 240	1.760
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l N	-	-	-	-	-	-
Ureum	mg/l N	-	5.810	73	-	-	-
P-totaal	mg/l P	800-2.000	367	76	120 (o-PO <sub>4</sub> )	-	120
K <sup>+</sup>	mg/l	2.737	2.170	770	700	-	700
Na <sup>+</sup>	mg/l	3.450	2.670	837	-	-	830
Cl <sup>-</sup>	mg/l	4.970	3.830	1.400	1.900	-	1.900
Ca <sup>2+</sup>	mg/l	233	129	28	-	-	28
Mg <sup>2+</sup>	mg/l	119	77	1	< 1	-	1
TIC	mg/l C	-	-	966	-	-	1.000
S (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/l S	1.315	264	103	-	-	100
Geleidbaarheid	mS/m	-	-	-	-	1.414 ± 175	
Geschatte verdunning		1		0,35	0,3		0,3

1 Maurer *et al.*, 2006

2 Udert *et al.*, 2003

3 Analyse Grontmij, 2007; indien volledige ureumhydrolyse wordt aangenomen is het gehalte ammonium-N waarschijnlijk te laag, maar ureum is niet bepaald.

4 Analyses door Waterschap Regge en Dinkel, 13-2-2008, 25-2-2008, 12-3-2008

De samenstelling van separaat ingezamelde urine wijkt fundamenteel af van het gebruikelijke stedelijke afvalwater. Ter vergelijking kan de samenstelling dienen van het influent van:

- rwzi's: CZV 0,45 - 0,62 g/l, N-totaal 0,044 - 0,060 g/l, P-totaal 0,008 - 0,010 g/l (STOWA 2001-39);
- IBA's: CZV 0,6 - 1,0 g/l, BZV 0,25 - 0,40 g/l; N-totaal 0,05 - 0,10 g/l, P-totaal 0,006 - 0,016 g/l (<http://www.ibahelpdesk.nl/content/view/13/36/>).

De gehalten in onverdunde urine variëren. In de literatuur worden verschillende gehalten gerapporteerd, die overigens wel in de orde passen van de in de tabel opgegeven waarden. STOWA 2001-39 geeft bijvoorbeeld: CZV 10 g/l, N-totaal 10 g/l, P-totaal 0,8 g/l.

Voor de onderhavige studie wordt de samenstelling van ruwweg 3 maal verdunde urine conform STOWA 2001-39 als de te behandelen stroom aangehouden.

Naar een RWZI wordt circa 300 l afvalwater per persoon per dag afgevoerd. Hiervan is ruwweg 120 l/p.d afkomstig van drinkwater. De informatie over de hoeveelheid onverdunde urine per persoon per dag is zeer divers. In de literatuur m.b.t. de verwerking separaat ingezamelde urine is 1,2 - 1,5 l/p.d (STOWA, 2006) tot 2 l/p.d (Wilsenach, 2006) gevonden. Op het www (zoekwoord: vochtbalans) is een nog bredere range gevonden. Het Voedingscentrum noemt voor een volwassene, bij geringe inspanning en een normale omgevingstemperatuur, circa 1,5 l/d (Voedingscentrum, 2008). Andere bronnen op het web geven ranges van 0,7 - 1,4 l/p.d en 1,0 - 1,6 l/p.d.

De urine kan worden ingezameld met watervrije urinoirs of urinescheidingstoiletten. In watervrije urinoirs is de verdunning van de urine vrijwel nihil (enig schoonmaakwater); de verdunning in de gangbare urinescheidingstoiletten bedraagt minimaal een factor 3.

In de dagelijkse praktijk is dit echter veelal meer. Voor toekomstige situatie met een combinatie van urinoirs en scheidingstoiletten en een adequaat beheer lijkt het reëel uit te gaan van een verdunningsfactor van 3.

Een drievoudige verdunning resulteert in een hoeveelheid verdunde urine van 2,1 tot 6,0 l/p.d met een gemiddelde van 4,1 l/p.d.

### 2.2.2 SCHAAL EN ONTWERPCAPACITEITEN

De afgeleide benodigde capaciteit betreft de urine, zoals aangeboden. Hierbij is sprake van verdunning. In deze studie wordt aangehouden, dat er sprake is van een verdunning met een factor 3.

#### URIMOB

Voor een volledig mobiel systeem is als volgt geredeneerd:

- de huidige productie per locatie ligt in de orde van 1 m<sup>3</sup>/maand;
- per locatie ligt de beschikbare opslagcapaciteit in de orde van 2 m<sup>3</sup>;
- de daadwerkelijk vereiste afvoer op afroep is dan te stellen op 1,5 - 2 m<sup>3</sup> per keer;
- de voor de mobiele behandeling beschikbare tijd kan worden gesteld op 1 tot 2 uur;
- bijgevolg is de vereiste schaalgrootte 2 - 1 m<sup>3</sup>/uur.

#### DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB

De decentrale voorbehandeling (gericht op de verwijdering van N) kan kleinschalig zijn. Een productie van 1 m<sup>3</sup>/maand vraagt een behandeling van 1,5 l/uur (bij continu bedrijf). Voor de daarop volgende mobiele behandeling geldt weer de schaalgrootte 2 - 1 m<sup>3</sup>/uur.

#### DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Bij een volledig decentrale behandeling vraagt de productie van 1 m<sup>3</sup>/maand om een schaalgrootte in de orde van 0,035 m<sup>3</sup>/dag, 1,5 l/uur.

#### CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Bij een centrale stationaire behandeling is de vereiste schaalgrootte uiteraard afhankelijk van de aanvoer. Indicatief kan worden uitgegaan van een maandelijkse aanvoer van 10 locaties, 15 - 20 m<sup>3</sup>/maand. Bij continu bedrijf is de schaalgrootte dan 20 - 25 l/uur.

### 2.2.3 KOSTENCALCULATIES

Met betrekking tot de kosten wordt aangenomen, dat het effluent zonder verdere kosten kan worden geloosd op een rwzi dan wel kan worden geloosd op het oppervlaktewater. Ook de afzet van de restproducten / het product van de behandeling wordt geacht om niet plaats te kunnen vinden.

Voor het bepalen van het huidige kostenniveau voor de behandeling van separaat ingezamelde urine is als volgt geredeneerd:

Uitgaande van 10 g CZV/l en 10 g N/l urine bevat separaat opgevangen, maar wel verdunde urine circa 3.000 mg CZV/l en 3.000 mg N/l.

Bij continu bedrijf op een schaal van 1,5 l/uur is de vuillast te stellen op  $1,5 \times 24 / 1.000 \times (3.000 + 4,57 \times 3.000 / 136) = 4,4$  i.e.

De prijs van de behandeling in een grootschalige rwzi is ongeveer € 45 per i.e. Het huidige kostenniveau kan dan worden berekend op  $4,4 \times 45 / \text{dagdebiet in m}^3 / 365 = € 16$  per m<sup>3</sup> verdunde urine.

Voor de kosten van het transport is uitgegaan van 110 euro per 7 ton), de kosten van opslag-tanks zijn niet meegerekend.

Voor chemicaliëndosering is gerekend met de volgende prijzen:

H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , 85%,	€ 70 per 100 kg,
MgCl <sub>2</sub>	€ 25 per 100 kg,
MeOH	€ 300 per 1.000 kg (1.250 l).

#### 2.2.4 MAXIMALE AFMETINGEN

##### URIMOB

De zuivering dient voor mobiel bedrijf te worden opgebouwd als een unit, die zelfstandig kan opereren. Daarbij wordt gedacht aan opbouw in een container. Gebruikelijke standaardlengtes zijn 20 en 40 voet. In verband met de bereikbaarheid van de urineopslag gaat de voorkeur uit naar een kleine container. De afstand tot de opslag mag niet al te groot zijn, omdat het leegzuigen dan niet mogelijk is. Gedacht kan worden aan een afstand tot circa 5 m. Het laadvermogen van een 20 voet container is maximaal 28 ton, bij een eigen gewicht van circa 2 ton. Het toegestane maximale gewicht van een vrachtauto is 50 ton.

De vereiste opslag (influent en effluent) is gesteld op minimaal 2 x 2 m<sup>3</sup>. Indicatief uitgaande van evenveel reactorvolume voor de N-verwijdering, de P-terugwinning en de hormonen en medicijnen verwijdering is het beschikbare reactorvolume ruwweg 5 m<sup>3</sup>. De beschikbare vloeistofhoogte (natte hoogte) is dan 1,5 m.

##### DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB

Bij een decentrale stationaire voorbehandeling kan als beschikbare ruimte voor de voorbehandeling worden gedacht aan de afmetingen van een garage of kelderbox, een vloeroppervlak van circa 15 m<sup>2</sup> bij een hoogte van 2,5 m. Het alternatief is, dat bij de bouw rekening wordt gehouden met de noodzakelijke ruimte. Dan is de ruimte voor de voorbehandeling niet limiterend. Voor de mobiele vervolgbehandeling geldt weer de beschikbare ruimte als voor Urimob.

##### DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Bij een decentrale stationaire en volledige behandeling kan als beschikbare ruimte worden gedacht aan de afmetingen van een garage of kelderbox, een vloeroppervlak van circa 15 m<sup>2</sup> bij een hoogte van 2,5 m. Het alternatief is, dat bij de bouw rekening wordt gehouden met de noodzakelijke ruimte. Dan is de ruimte voor de behandeling niet limiterend.

##### CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Bij een centrale stationaire volledige behandeling kan de ruimte vergaand vrij worden aangepast aan de eisen op basis van het ontwerp van een installatie. Gegeven de relatieve kleinschaligheid zal de beschikbare ruimte niet limiterend zijn. Gedacht kan worden aan nog vrije ruimte bij een rwzi.

## 2.3 OVERIGE KANTTEKENINGEN

### LOZING VAN EFFLUENT

Er wordt aangenomen, dat het effluent van de behandeling van separaat ingezamelde urine wordt afgevoerd naar een RWZI. Binnen de mogelijkheden van de verschillende concepten wordt het influent zo ver mogelijk gezuiverd, het restant wordt als lozing geaccepteerd. Ook na de verwijdering van hormonen en medicijnen kan niet op voorhand worden verwacht, dat lozing op oppervlaktewater mogelijk is. Hierbij kan sprake blijven van verhoogde gehalten van stikstof-totaal ten opzichte van de gebruikelijke lozingseis.

### VERKEERSKUNDIGE EN VOERTUIGTECHNISCHE BEPERKINGEN

Onduidelijk is of een onbemensde werkende zuiveringsinstallatie op een rijdende wagen is toegestaan.

Navraag bij de regionale politiedienst Utrecht leerde, dat de vraag inderdaad gesteld moet worden. De dienst was echter niet in staat, om een definitief antwoord te geven. De verkeersspecialist, naar wie werd doorverwezen reageerde als volgt: "Een dergelijke vraag was hem niet eerder gesteld. Het principe is, dat als het voertuig voldoet aan hard geformuleerde eisen (afmetingen, gewicht), het zou moeten kunnen."

Maar het gaat niet alleen om de harde eisen aan het voertuig. Bijkomende aspecten zijn:

- De aanwezigheid van gevaarlijke stoffen;
- De geschiktheid van de apparatuur om in een rijdende wagen te functioneren. De vraag wordt dan eerder, of het technisch wel kan i.p.v. of het wel mag. Voor de leveranciers is dit een nieuwe vraag, waarop niet met een eenvoudig ja of nee kan worden geantwoord. Pompen zullen in het algemeen ook in mobiel bedrijf redelijk werken. Niveaumeters, reactoren e.d. zullen in ieder geval minder goed werken. Bezinkers, afscheiders e.d. zullen niet of hoogstens slecht werken;
- De kans op vrijkomen van stoffen bij gewoon gebruik (wat werken met gesloten tanks en systemen noodzakelijk kan maken);
- De invloed van diverse al dan niet gedeeltelijk gevulde tanks op de stabiliteit van de wagen (met name: in bochten en bij hard remmen) en de kans op vrijkomen van stoffen bij een ongeluk. (naar analogie met tankwagens zouden eisen van toepassing kunnen zijn m.b.t. de sterkte voor tanks, leidingen, bevestigingen, maar het is niet duidelijk, welke eisen dat dan zouden moeten zijn). De RDW (Dienst Wegverkeer, met name de Vestiging Veendam) is de instantie is die hier over gaat. Zij bleek echter niet bereikbaar. Navraag bij Transport en Logistiek Nederland heeft evenmin duidelijke informatie opgeleverd.

### NIET BESCHOUWDE ASPECTEN

De volgende aspecten zijn niet meegenomen in de studie:

- wat is het huidige aanbod van separaat ingezamelde urine?
- welke ontwikkeling in het aanbod wordt verwacht?
- welke daadwerkelijke afzetmogelijkheden bestaan er op korte termijn (mede in relatie met de haalbare zuiverheden en de constantheid van de kwaliteit)?
- welke vergunningen zijn nodig?
- welke veiligheidseisen zijn van toepassing?

# 3

## BEHANDELINGSMOGELIJKHEDEN

Voor het verwijderen of terugwinnen van de verschillende componenten uit de urine zijn verschillende, zowel biologische als fysisch/chemische, technieken beschikbaar. In dit hoofdstuk worden zij na een korte introductie achtereenvolgens beschreven en beoordeeld op de mate waarin zij eventueel toegepast zouden kunnen worden.

### 3.1 BIOLOGISCHE TECHNIEKEN

#### 3.1.1 ALGEMEEN

Bij biologische technieken wordt onderscheid gemaakt tussen aerobe technieken en anaerobe technieken.

Anaerobe technieken zijn over het algemeen zeer compact en leveren biogas. Zij zouden daarvoor goed passen in een decentraal en mobiel verwerkingsconcept. De keuze tussen de toepassing van aerobe dan wel anaerobe technieken is evenwel vooral afhankelijk van het gehalte van de te verwijderen zuurstofvragende componenten. Voor de toepasbaarheid van anaerobe systemen geldt als ondergrens een CZV-gehalte van 5 g O<sub>2</sub>/l.

Bij onverdunde urine met een CZV van circa 10 g/l (STOWA 2001-39) is een anaerobe techniek niet op voorhand uitgesloten. Aangezien er echter sprake is van verdunning (circa 3 maal) vallen anaerobe technieken om die reden af.

Een bijkomend nadeel van anaerobe technieken is, dat er geen stikstofverwijdering plaats vindt. Dit moet dan alsnog gebeuren terwijl de voor de nitrificatie – denitrificatie benodigde CZV dan al vergaand is weggenomen.

Verder levert de opvang van het gevormde biogas in het mobiele concept uitvoeringsproblemen op.

Bij een aerobe behandeling zijn voor CZV rendementen van >90% haalbaar, met restgehalten van 0,03 - 0,06 g/l. Deze gehalten zijn voor de behandeling van separaat ingezamelde urine echter vermoedelijk niet haalbaar. Bij een CZV van 3.000 mg/l en de eerder genoemde afbreekbaarheid van 85% (Udert *et al.*, 2006) is het biologisch best bereikbare CZV-restgehalte 450 mg/l.

In een strikt aerob systeem wordt geen stikstof verwijderd. De standaardpraktijk is een aerob-anoxisch systeem, waarin nitrificatie-denitrificatie plaats vindt. Voor laag N-belast rioolwater kan de ondergrens voor de stikstofverwijdering worden gesteld op 5 - 10 mg/l. De gebruikelijke uitvoeringsvorm is reactoren in serie, waarover wordt gecirculeerd. Met de moderne voor hoge N-lasten ontworpen systemen (SHARON, DEMON, One Step Anammox) zijn minder lage restgehalte aan stikstof-totaal (ammonium-N, nitraat en nitriet) bereikbaar. Gedacht kan worden aan 50 tot 150 mg/l.

De verwijdering van fosfaat is in aerobe systemen slecht tot matig (mede afhankelijk van de aanwezigheid van metalen e/o calcium). In anoxische / anaerobe systemen slaan fosfaten wel

neer. Bij de behandeling van huishoudelijk afvalwater is een aanvullende fysisch chemische behandeling gebruikelijk. Voor fosfaat is met precipitatie-technieken 1 tot 2 mg/l bereikbaar.

De restvloeistof bevat nog een belangrijk deel van de hormonen en medicijnresten. De biologische verwijdering van medicijnresten en hormoongelijken stoffen is matig. Voor huishoudelijk afvalwater geldt, dat circa de helft van de geneesmiddelen in het effluent van een rwzi wordt teruggevonden. Natuurlijke hormonen worden beter verwijderd. Uit eerste onderzoek blijkt, dat de halfwaarde tijd van natuurlijke hormonen in een biologische reactor 15 minuten is (Ternes, 2005).

Voor alle biologische systemen geldt, dat een vergaande voorafgaande verwijdering van N e/o P kan leiden tot verminderde bacteriegroei. Als richtwaarde kan worden aangehouden, dat de ondergrens voor N en P respectievelijk 5 en 1 % van het te verwijderen BZV dient te bedragen. Indien de voor RWZI's gebruikelijke verhouding BZV:CZV=0,4 wordt aangehouden, dan dient er bij een CZV van 3.000 mg/l voor de biologie minimaal 60 mg N/l en 12 mg P/l aanwezig te zijn.

Voor een volledige biologische denitrificatie geldt BZV:N=3. Uitgaande van een CZV van 3.000 mg/l kan bijgevolg maximaal  $3.000 \times 0,4 / 3 = 400$  mg/l N worden verwijderd. Dit is circa 13% van de aanwezige N.

Er bestaat inmiddels een uitgebreide literatuur over de stikstofverwijdering uit integraal afvalwater, separaat ingezamelde urine en/of separaat ingezameld zwart water (diverse STOWA rapporten, Volcke 2006, Mauer et al, 2006). De praktijkervaring met biologische technieken voor menselijk afvalwater betreft vooral grootschalige toepassingen. Voor de onderhavige studie is het van belang, of de specifieke technieken ook geschikt zijn voor kleinschalige toepassing. Een mechanisch aandachtspunt daarbij is de robuustheid/onderhoudsgevoeligheid van hardware (pompen, kleppen) op kleine schaal.

Opgemerkt moet nog worden, dat biologische technieken vooral geschikt zijn voor de verwijdering van componenten, die relatief makkelijk biologisch afbreekbaar zijn. Om moeilijk afbreekbare componenten en/of (voedings)zouten vergaand te verwijderen zijn onvermijdelijk aanvullende fysisch chemische technieken nodig. Dit betekent op voorhand, dat er bij een keuze voor biologische technieken een combinatie gezocht zal moeten worden met fysisch chemische technieken.

In dit hoofdstuk worden de verschillende beschikbare processen vergeleken op basis van eisen met betrekking tot de schaalgrootte, procesomstandigheden, belastbaarheid, hulpstoffen, de mate waarin er sprake is van een bestaande techniek en tenslotte de geschiktheid voor de verschillende behandelingconcepten.

### 3.1.2 HET CONVENTIONELE ACTIEF SLIB PROCES

In het conventionele proces wordt het water aerobisch zo ver behandeld, dat alle ammonium-N wordt omgezet in nitraat (nitrificatie). Vervolgens wordt de nitraat onder anoxische omstandigheden biologisch omgezet in stikstofgas (denitrificatie). Ten opzichte van de andere methoden is het ruimtebeslag relatief groot. In een uitvoering als membraambioreactor (MBR) is het mogelijk om met circa 2 maal zo hoge slibgehalten te werken. Hierdoor daalt het ruimtebeslag. In een uitvoering als SBR is eveneens een hoger slibgehalte mogelijk, maar minder hoog dan in een MBR. SBR heeft wel als voordelen, dat de het gehele proces in één reactor plaats vindt en dat de procesvoering (aflaat en vultijd, aerobe tijd, anaerobe tijd) is bij te

stellen. Zeker op kleine schaal is dit voordeel echter ook weer een nadeel: de processturing wordt gecompliceerder en vraagt meer aandacht. De uitvoering als MBR heeft in kleinschalige uitvoering de voorkeur.

### **SCHAALGROOTTE**

Er is geen ondergrens aan de schaalgrootte. Het is mogelijk om het proces ook op kleine schaal stabiel te bedrijven.

### **PROCESOMSTANDIGHEDEN**

De eisen aan de temperatuur zijn  $12 - 15\text{ C} < T < 38\text{ C}$ . In mobiel bedrijf is, zeker in de koude periode, verwarming nodig.

### **BELASTBAARHEID**

De omzetting van stikstof kan worden gesteld op  $0,02 - 0,03\text{ kg N/ kg slib.dag}$ , het slibgehalte op  $4 - 5\text{ g slib/l}$  (MBR:  $10\text{ g slib/l}$ , SBR:  $6\text{ g/l}$ ). Dit geeft een N verwijdering van circa  $100\text{ g/m}^3\text{ reactor.dag}$  (MBR:  $200\text{ g/m}^3\text{.dag}$ , SBR  $90\text{ g/m}^3\text{.dag}$ ).

### **HULPSTOFFEN**

De aerobe omzetting van ammonium-N naar nitriet en vervolgens nitraat verloopt autotroof, er is geen organische koolstof voor nodig. De omzetting van nitraat naar stikstofgas verloopt heterotroof, er is organische koolstof nodig. Een maat voor de beschikbare organische koolstof is het CZV gehalte. Bij volledige biologische beschikbaarheid dient de verhouding CZV:N 3,5 te bedragen. Gegeven de CZV: N verhouding in (verdunde) urine van 1:1 is C-bron dosering nodig.

### **STAND VAN DE TECHNIEK**

De techniek is volwassen.

### **GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Bij een reactorvolume van  $5\text{ m}^3$  kan  $0,1\text{ m}^3$  onverdunde urine per dag worden behandeld (bij een N gehalte van  $10\text{ g/m}^3$ ). Dat is veel minder dan de gewenste capaciteit van  $1 - 2\text{ m}^3/\text{uur}$ . Gegeven de geringe capaciteit is de aanpak niet geschikt voor Urimob.

### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

Voor de stationaire voorbehandeling is de gewenste capaciteit gering. Bij circa  $0,036\text{ m}^3/\text{dag}$  volstaat voor de nitrificatie een reactor van  $800\text{ l}$ . De omzetting naar stikstof verloopt 2 maal zo snel als de nitrificatie. Het vereiste reactorvolume voor denitrificatie is bijgevolg 50% van nitrificatie,  $400\text{ l}$ . Het totale reactorvolume is  $1,2\text{ m}^3$ . Bij het gebruik van membranen kan met een hoger slibgehalte worden gerekend, tot  $10\text{ g ds/l}$  i.p.v.  $4,5\text{ g ds/l}$ . Het benodigde totale volume daalt dan naar  $540\text{ l}$ .

Voor de denitrificatie is C-bron dosering nodig. Uitgaande van methanol is circa  $0,2\text{ l/dag}$  nodig. De opstelling kan zijn denitrificatie - nitrificatie. Hierdoor is de in urine aanwezige CZV maximaal beschikbaar voor de denitrificatie.

Voor een vergaande verwijdering van N is recirculatie nodig. Voor 95% verwijdering kan een recirculatiefactor van 20 worden aangehouden. Voor 99% N-verwijdering (restgehalte bij ingaand  $3.000\text{ mg/l}$   $30\text{ mg/l}$ ) is een recirculatiefactor van 99 nodig. De verblijftijd per cyclus in de anoxische reactor is dan 3 uur, nog steeds meer dan het vereiste minimum van 1 uur. Het recirculatie-debiet bedraagt dan  $150\text{ l}$  per uur.

De zuurstofbehoefte in de beluchte reactor is maximaal circa  $25\text{ g/uur}$  (worst-case: indien



het CZV in de urine het geheel niet afgebroken kan worden door de zuurstof in de gevormde nitraat). Bij een mogelijke tank hoogte van 1,5 m betekent dit, dat er per uur ongeveer 1,6 m<sup>3</sup> lucht moet worden ingebracht. Dit vereist een beluchteroppervlak van ongeveer 0,13 m<sup>2</sup>. Bij een beschikbaar tankoppervlak van circa 0,5 m<sup>2</sup> is dit mogelijk.

De conventionele denitrificatie-nitrificatie is geschikt voor de kleinschalige decentrale stationaire voorbehandeling van separaat ingezamelde urine, gericht op de verwijdering van CZV en N. De verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen heeft dan echter nog niet plaatsgevonden.

#### **TUSSENVOEGSEL BIOP-VERWIJDERING**

Een via de biologie lopende manier om P terug te winnen is BioP-verwijdering en terugwinning van de P uit de verbrandingsas van het resulterende slib. Voor BioP-verwijdering is circa 2 uur anaerobe verblijftijd van (een deel van) het slib nodig; tot 4% van het droge gewicht van het spuislib is de mogelijk te verwijderen hoeveelheid. De RWZI-praktijk is, dat 10 - 20 mg P/l is te verwijderen. Verdunde urine, met een CZV van 3.000 mg/l, geeft bij een afbreekbaarheid van 85% circa 1.300 mg slib/l. Daarmee is to circa 50 mg/l P te verwijderen. In verdunde urine is het gehalte P 100 - 200 mg/l. Er kan op deze manier dus maar een beperkt deel P worden verwijderd.

#### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De conventionele CZV en N verwijdering is in dit concept op dezelfde wijze mogelijk als in het vorige concept. Ook nu geldt weer, dat de verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen nog niet heeft plaatsgevonden.

In de praktijk is gebleken, dat er zich bij aerobe behandeling van separaat ingezamelde urine nitrietophoping voordoet [M. Oosterhuis, persoonlijke mededeling, 2009]. Dit betekent, dat er in de praktijk bij de aerobe-anoxische behandeling van separaat ingezamelde urine een lagere zuurstofvraag, dus een lager energieverbruik bestaat in vergelijking met de behandeling van afvalwaterstromen, waarin (aanmerkelijk) lagere gehalten aan ammonium aanwezig zijn. Omdat er voor deze situatie (nog) geen ontwerpkenntallen beschikbaar zijn, wordt er voor de dimensionering veiligheidshalve nog van uitgegaan, dat de zuurstofvraag wél moet worden afgestemd op een volledige oxidatie van de aanwezige ammonium naar nitraat. Opgemerkt kan nog worden dat de vervolgens gewenste omzetting naar stikstof ook vanaf nitriet verloopt. Nitrietophoping is daarom geen beletsel voor het toepassen van deze techniek.

#### **GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

In het geval van centrale stationaire behandeling veranderen de uitgangspunten ten opzichte van de decentrale concepten. De gewenste capaciteit stijgt naar circa 0,6 m<sup>3</sup>/dag. Voor de nitrificatie is dan een reactor van 13 m<sup>3</sup> vereist. Het vereiste reactorvolume voor denitrificatie is 50% van nitrificatie, 6,7 m<sup>3</sup>. Het totale reactorvolume is 20 m<sup>3</sup>. Bij het gebruik van membranen kan met een hoger slibgehalte worden gerekend, tot 10 i.p.v. 4,5 g ds/l. Het benodigde totale volume daalt dan naar 9 m<sup>3</sup>.

Voor de denitrificatie is C-bron dosering nodig. Uitgaande van methanol is circa 3 l/dag nodig. De opstelling in conventioneel proces en MBR kan zijn denitrificatie - nitrificatie. Hierdoor is de in urine aanwezige CZV maximaal beschikbaar voor de denitrificatie.

Voor een vergaande verwijdering van N is recirculatie nodig. Voor 95% verwijdering kan een recirculatiefactor van 20 worden aangehouden. Omdat er sprake is van hoogbelast afvalwater is er een verdergaande verwijdering mogelijk. Voor 99% N-verwijdering is een recirculatie-

factor van 99 nodig. De verblijftijd per cyclus in de anoxische reactor is dan 3 uur, nog steeds meer dan het vereiste minimum van 1 uur. Het recirculatie debiet bedraagt dan 2,5 m<sup>3</sup>/uur. De zuurstofbehoefte in de beluchte reactor is circa 420 g/uur (worst case: indien met het CZV in de urine het geheel niet afgebroken kan worden door de zuurstof in de gevormde nitraat). Bij een vrij te kiezen tank hoogte van bijvoorbeeld 5 m betekent dit, dat er per uur ongeveer 8 m<sup>3</sup> lucht moet worden ingebracht. Dit vereist een beluchteroppervlak van ongeveer 0,6 m<sup>2</sup>. Bij een beschikbaar tankoppervlak van circa 2,7 m<sup>2</sup> (uitgaande van een ronde beluchte tank) is dit mogelijk.

De conventionele denitrificatie-nitrificatie is geschikt voor de centrale stationaire voorbehandeling van separaat ingezamelde urine, gericht op de verwijdering van CZV en N. De verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen dient echter nog plaats te vinden.

### 3.1.3 SHARON

In het SHARON-proces (Stable and High activity Ammonia Removal Over Nitrite) verloopt de aerobe omzetting van ammonium-N niet tot nitraat, maar slechts tot nitriet. Dit is mogelijk, door de slibleeftijd te beïnvloeden. Bij een lage slibleeftijd zijn er onvoldoende (want: relatief langzaam groeiende) bacteriën aanwezig, om de dóóroxidatie van nitriet naar nitraat te laten plaatsvinden. Bij aanwezigheid van organische koolstof zullen ook heterotrofe bacteriën groeien. De verwijdering van CZV verloopt aanzienlijk sneller dan de omzetting van ammonium, zodat er tevens sprake is van vergaande CZV-verwijdering. Het gevormde nitriet wordt onder anoxische omstandigheden omgezet in stikstofgas. Voor deze heterotrofe omzetting is organische koolstof nodig. Evenals in het conventionele systeem komt het afvalwater daarom binnen in de anoxische reactor en vindt er vanuit de aerobe reactor recirculatie plaats naar de anoxische reactor.

In vergelijking met het conventionele proces is SHARON effectiever en zuiniger met energie.

#### SCHAALGROOTTE

Het SHARON proces is ook op kleine schaal stabiel (2,4 l/d). De sturing van het proces is gecompliceerder dan de sturing van de conventionele processen.

#### PROCESOMSTANDIGHEDEN

De eisen aan de temperatuur zijn  $30\text{ C} < T < 40\text{ C}$ . Als de begintemperatuur niet binnen de range valt is koeling of verwarming nodig. Voor de verwerking van urine is de verwachting dat altijd enige bijverwarming noodzakelijk is. In de koude periode is dat zeker het geval. Voor de verblijftijden geldt hydraulische verblijftijd (HRT) = slibretentietijd (SRT) Voor het oxisch deel wordt 1 - 1,5 dag aangehouden, voor het anoxisch deel 0,75 d. De gebruikelijke recirculatiefactoren liggen in de range 10 - 20 (bereikbaar restgehalte N-totaal  $1/11^e - 1/21^e$  van de invoer, komend van 3.000 mg N/l dus 300 - 150 mg/l).

#### BELASTBAARHEID

SHARON wordt gestuurd op verblijftijd, niet op slibbelasting. Omzettingen in de orde van 1 kg N/m<sup>3</sup>.dag zijn mogelijk.

#### HULPSTOFFEN

In het geval van urine (CZV:N=1) is voor de omzetting naar stikstof dosering van een C-bron noodzakelijk. Voor de pH controle kan een loogdosering nodig zijn.

### STAND VAN DE TECHNIEK

De techniek is volwassen. SHARON is een robuust proces gebleken. Er zijn 6 grootschalige toepassingen operationeel (stand eind 2008). De kleinste SHARON heeft een belasting van 410 kg N/d, een reactorvolume van 1.400 m<sup>3</sup> en een debiet van 600 m<sup>3</sup>/d.

### GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT

Bij een mobiele installatie met een maximaal reactorvolume van 5 m<sup>3</sup> geeft een indicatieve capaciteitsberekening voor 3 maal verdunde urine, dat er 51 l/uur kan worden behandeld, los van de eventuele problemen met het inbrengen van voldoende zuurstof. Dat is veel minder dan de gevraagde capaciteit. SHARON kan in het Urimob concept niet worden toegepast.

### GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB

Voor de stationaire voorbehandeling is de benodigde capaciteit geringer. Bij circa 0,036 m<sup>3</sup>/dag mag de oxische reactor voor de omzetting naar nitriet in verband met de verblijftijdeis niet groter zijn dan 36 - 54 l. Het vereist anoxische reactorvolume voor de omzetting naar stikstof is te stellen op 27 l.

De zuurstofbehoefte in de beluchte reactor is maximaal circa 15 g/uur (best-case: het CZV in de urine wordt volledig afgebroken door de zuurstof uit het gevormde nitriet). Bij een mogelijke natte hoogte van 1,5 m betekent dit, dat er per uur ongeveer 1 m<sup>3</sup> lucht moet worden ingebracht. Dit vereist een beluchteroppervlak van ongeveer 0,07 m<sup>2</sup>. Maar gegeven de eis aan het volume van de oxische reactor is bij een natte hoogte van 1,5 m slechts circa 0,02 m<sup>2</sup> beschikbaar. Het is niet mogelijk, om de vereiste hoeveelheid lucht in de reactor te brengen. Ook bij het kiezen van een lagere tankhoogte (en bijgevolg een hoger beschikbaar vloeroppervlak) blijft het onmogelijk, om voldoende lucht in te brengen. Dit komt, doordat de zuurstof overdracht evenredig afneemt met de hoogte.

Het ammoniumgehalte in 3 maal verdunde urine is te hoog, om in een SHARON te worden behandeld. Om SHARON toch toe te kunnen passen moet de verdunde urine tot 3 maal verder worden verdund. Het reactorvolume neemt met een zelfde factor toe (oxisch 130 - 190 l., anoxisch 95 l.). De zuurstofbehoefte blijft gelijk. Bij een gelijkblijvende natte hoogte (1,5 m) stijgt het voor beluchting beschikbare oppervlak dan tot 0,1 m<sup>2</sup>. Dit is voldoende.

De verdunning kan niet plaats vinden met effluent, omdat dat alsnog leidt tot slibretentie en dus tot het op gang komen van nitrificatie. Wellicht is een mogelijkheid, om het slib in het effluent vergaand af te scheiden via een membraan. Maar het volgende probleem is dan, dat er te weinig effluent beschikbaar is voor de noodzakelijke verdunning.

Het SHARON concept is niet geschikt voor de kleinschalige stationaire voorbehandeling van separaat ingezamelde urine, gericht op de verwijdering van N (en CZV). Bijgevolg is een decentrale stationaire voorbehandeling niet mogelijk.

Indien de ingezamelde verdunde urine nog 2-3 maal wordt verdund, kan SHARON wel worden ingezet voor de decentrale stationaire voorbehandeling. Maar er moet dan wel een oplossing worden gevonden voor het verdunningsprobleem.

### GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Omdat het toepasbaar zijn van SHARON niet bepaald wordt door de schaal, maar door het ammoniumgehalte, is de aanpak ook niet geschikt voor een decentrale stationaire behandeling. Bij verdere verdunning is toepassing wel mogelijk. Indien de ingezamelde verdunde urine nog 2-3 maal wordt verdund, kan SHARON wel worden ingezet voor de decentrale stationaire behandeling. De vereiste reactorvolumina zijn gelijk aan die bij de decentrale stationaire voorbehandeling. Ook het verdunningsprobleem is hetzelfde.

### GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Omdat het toepasbaar zijn van SHARON niet bepaald wordt door de schaal, maar door het ammoniumgehalte is de aanpak ook niet geschikt voor een centrale stationaire behandeling. Bij verdere verdunning is toepassing wel mogelijk. Indien de ingezamelde verdunde urine nog 2-3 maal wordt verdund, kan SHARON wel worden ingezet voor een centrale stationaire behandeling.

Bij een debiet van 20 l verdunde urine (80 l verder verdunde urine) is het vereiste oxidische volume te stellen op 340 - 430 l en het anoxische op 140 l. Bij een natte hoogte van 5 m is er nog voldoende oppervlak beschikbaar, om de vereiste hoeveelheid lucht in te brengen.

Als bij de vorige concepten aangegeven, kan de verdunning niet plaats vinden met effluent, omdat dat alsnog leidt tot slibretentie en dus tot nitrificatie. Wellicht is een mogelijkheid, om het slib in het effluent vergaand af te scheiden via een membraan. Maar er is dan te weinig effluent beschikbaar voor de noodzakelijke verdunning. Het verdunningsprobleem is op een centrale locatie, zeker op een RWZI, beter oplosbaar en controleerbaar. Wellicht is een mogelijkheid het gebruik van een deel van het water van de slibvergisting (al moet er dan in verband met de aanwezigheid van ammonium in dat water wel meer worden verdund, wat tot een verdere toename van de schaalgrootte leidt).

#### 3.1.4 AUTOTROFE VORMEN VAN STIKSTOFVERWIJDERING

Zoals in het voorafgaande besproken kan stikstof uit afvalwater worden verwijderd in het conventionele actiefslibproces zowel als met behulp van het SHARON proces. De oxidatie van ammonium naar nitraat respectievelijk nitriet vereist geen organische koolstof (autotroof proces), terwijl voor de vervolgomzetting naar stikstofgas wél organische koolstof is vereist (heterotroof proces). Gegeven de BZV-N verhouding in verdunde urine dient er voor een vergaande N-verwijdering extra organische koolstof worden gedoseerd.

De laatste jaren zijn er een aantal processen ontwikkeld, waarbij niet alleen de oxidatie van ammonium, maar ook daaropvolgende reductie naar stikstofgas autotroof verloop. Hierbij is dus geen dosering van organische koolstof nodig. Autotrofe bacteriën gebruiken de koolstof uit opgelost CO<sub>2</sub> als koolstofbron.

In deze paragraaf wordt eerst deze techniek in het algemeen besproken; daarna wordt in sub paragrafen nog ingegaan op de drie afzonderlijke technieken.

In het Anammox proces (ANAerobic AMMonium OXidation) worden nitriet plus ammonium onder anoxische omstandigheden autotroof omgezet in stikstofgas. Omdat slechts de helft van de ammonium-N geoxideerd hoeft te worden, vraagt het proces minder energie dan SHARON. Omdat er in urine geen nitriet aanwezig is, is Anammox als zelfstandige techniek voor de behandeling van urine niet toepasbaar.

In de combinatie van SHARON en Anammox wordt het SHARON proces gebruikt om uit de urine een mengsel te verkrijgen waarin circa 50 % van het ammonium is omgezet naar nitriet. In de tweede reactor worden ammonium plus nitriet door middel van het Anammox proces omgezet in stikstofgas. Door na de SHARON-stap het slib af te scheiden wordt voorkomen, dat de Anammox-bacterie wordt verdrongen. SHARON-Anammox verloopt in 2 reactoren.

Het is mogelijk gebleken, om het gecombineerde proces (gedeeltelijk omzetting van ammonium naar nitriet en reductie van de nitriet met aanwezig ammonium) ook in 1 reactor te laten verlopen. Bij een lage zuurstofconcentratie (<0,5 mg/l) kunnen de *Nitrosomonas* bacterie (nitrietvormer) en de *Anammoxians* bacterie (N<sub>2</sub>-vormer) in dezelfde reactor groeien.

De *Nitrosomonas* groeit om de *Anammoxians* heen, waardoor de *Anammoxians* voor zuurstof wordt afgeschermd. Het aanwezige ammonium en het gevormde nitriet kunnen (diffusie gecontroleerd) de *Anammoxians* wél bereiken. Omdat het proces diffusie gecontroleerd is, is het belangrijk, dat de zuurstofspanning (en de pH) nauwkeurig wordt gestuurd. Het proces is gevoeliger voor storingen dan het conventionele proces en het SHARON proces. Omdat *Anammoxians* bacteriën langzaam groeien dient te worden gerekend met een relatief lange her-opstart na verstoringen. Verder is er bij urine sprake van CZV:N van 1:1. Daardoor is het mogelijk, dat de *Anammoxians* bacteriën (te) vergaand overgroeien, waardoor deze niet meer, althans onvoldoende, bereikbaar zijn. En tenslotte is gebleken, dat in *Anammoxians* bevattende systemen toch ook enige nitraatvorming optreedt. Dit betekent, dat de systemen niet geschikt zijn voor een zuivering tot oppervlaktewaterkwaliteit ( $N_{\text{t}} < 10 \text{ mg/l}$ ). De systemen zijn geschikt voor een aanpak tot een  $N_{\text{t}}$  van circa 50 mg/l. De verdere stikstofverwijdering dient plaats te vinden in een conventioneel anoxisch-aeroob systeem.

Momenteel zijn er 2 uitvoeringsvormen bekend. De eerste uitvoeringsvorm is het gebruik van een continue korrelreactor, One Step Anammox (voorheen bekend onder de naam CANON), het tweede een batchproces, dat gebruik maakt van slibvlokken (DEMON, DE-amMONificatie). Bij DEMON is de slibbelasting lager (het reactorvolume bijgevolg hoger), evenals het energieverbruik. Slibvlokken zijn wat minder storingsgevoelig en blijven beter diffundeerbaar dan slibkorrels. Voor beide processen is ten opzichte van de combinatie SHARON-Anammox het belangrijke voordeel, dat met 1 reactor kan worden volstaan.

Gegeven de relatieve complexiteit van de systemen, de vereiste controles (dus hoge eisen aan de bediening) en de lange her-opstart tijd na verstoringen is een centrale stationaire behandeling (met bijvoorbeeld opstelling bij een rwzi, zodat deskundig personeel beschikbaar is) een betere insteek voor de toepassing van de processen dan een decentrale opstelling.

### 3.1.4 A ANAMMOX-SHARON

#### SCHAALGROOTTE

Het SHARON proces kan ook op kleinere schaal draaien. Anammox is minder stabiel dan SHARON, ook op lab-schaal. Dit is mogelijk het gevolg van fosfaat en/of nitrietinhibitie (Van Hulle, 2006). Nitriet is een mogelijke inhibitor van het Anammox-proces. Als aan te houden N-totaal (nitriet plus ammonium) wordt wel 1.200 mg/l genoemd. Het gehalte in separaat verzamelde urine is ruwweg 2 maal zo hoog.

#### PROCESOMSTANDIGHEDEN

De eisen aan de temperatuur zijn  $30 \text{ C} < T < 37 \text{ C}$ . Als de begintemperatuur niet binnen de range valt is koeling of verwarming nodig. Voor de verwerking van urine is de verwachting dat altijd enige bijverwarming noodzakelijk is. In de koude periode is dat zeker het geval. Voor de verblijftijden geldt HRT 4 dagen, SRT 20 - 30 dagen.

#### BELASTBAARHEID

Voor het SHARON deel kan worden gerekend met een capaciteit van 1,1 kg N/m<sup>3</sup>.dag, voor het Anammox deel kan worden gerekend met een capaciteit van 7 kg N/m<sup>3</sup>.dag.

**HULPSTOFFEN**

In het combinatieproces is er voor de

- SHARON stap
  - wel voorverwarming nodig;
  - geen C-bron nodig (alleen nitrificatie, uitgangspunt is, dat er voldoende (bi)carbonaat aanwezig is);
  - wellicht loogdosering nodig, afhankelijk de buffercapaciteit in de vorm van bijvoorbeeld aanwezig bicarbonaat. Bij onvoldoende buffering is loogdosering noodzakelijk;
- Anammox stap
  - geen verwarming nodig; als het influent van de SHARON wordt verwarmd is de stroom voldoende op temperatuur voor de Anammox stap;
  - geen C bron dosering nodig;
  - een eventuele loogdosering nodig, afhankelijk van de buffercapaciteit.

**STAND VAN DE TECHNIEK**

Het combinatieproces is operationeel op de locatie RWZI Sluisjesdijk. Hierbij hebben zich langdurig opstartproblemen voorgedaan, vooral met de stabiliteit van de Anammox-stap. Uiteindelijk zijn deze problemen overwonnen. Ten opzichte van de later ontwikkelde 1-reactor combinatie-processen is een belangrijk nadeel, dat de SHARON-Anammox combinatie een 2-reactoren proces is. In de evaluatie (STOWA 2008, 18) wordt gesteld, dat er tegenwoordig verschillende procestoepassingen zijn van de gecombineerde reactie. “De eenetrapsvariant wordt hierbij geprefereerd boven de tweetrapsvariant.”

**GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Bij een verdeling van het beschikbare reactorvolume naar evenredigheid met de capaciteit kan in 5 m<sup>3</sup> indicatief circa 21 l/uur worden behandeld. De combinatie is, gegeven de gewenste capaciteit, ongeschikt voor het Urimob concept.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

Gegeven de problemen met de stabiliteit van het proces in hoogbelaste systemen wordt de aanpak niet geschikt geacht voor decentrale stationaire voorbehandeling, gevolgd door Urimob.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Gegeven de tot nu toe ervaren problemen met de stabiliteit van het proces in hoogbelaste systemen wordt de aanpak niet geschikt geacht voor decentrale stationaire behandeling.

**GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Gegeven de tot nu toe ervaren problemen met de stabiliteit van het proces in hoogbelaste systemen wordt de aanpak niet geschikt geacht voor centrale stationaire behandeling.

**3.1.4 B ONE STEP ANAMMOX**

In de praktijk blijken verhoogde gehalten aan fosfaat een slechte invloed te hebben op de stabiliteit en de diffundeerbaarheid van de korrel. Daarom is voorafgaande defosfatering noodzakelijk gebleken. Mogelijk zijn de vorming van neerslagen met behulp van ijzer, aluminium of magnesium. In het geval van urinebehandeling ligt het voor de hand, om het fosfaat eerst als struviet te verwijderen.

**SCHAALGROOTTE**

Het is niet bekend, of One Step Anammox op kleinere schaal kan draaien.

**PROCESOMSTANDIGHEDEN**

De eisen aan de temperatuur zijn  $T > 30, < 40$  C. Voor de verwerking van urine is de verwachting dat altijd enige bijverwarming noodzakelijk is. Bij de omzetting van ammoniumstikstof naar nitriet komt een geringe hoeveelheid warmte vrij. De korrel is gevoelig voor scaling door de vorming van fosfaatneerslag.

**BELASTBAARHEID**

De haalbare omzetting is te stellen op  $1,5 \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{dag}$ .

**HULPSTOFFEN**

Er is geen C-bron dosering nodig. Wel dient er voldoende (bi)carbonaat aanwezig te zijn.

**STAND VAN DE TECHNIEK**

One Step Anammox is in gebruik op specifiek industrieel afvalwater (aardappelverwerking). Hierbij wordt voorafgaande defosfatering toegepast door middel van struvietvorming. Er is geen literatuur gevonden met detailinformatie over de werking.

**GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Het resultaat van de indicatieve berekening voor urine is, dat One Step Anammox in het Urimob concept niet kan worden toegepast, omdat er onvoldoende zuurstof kan worden ingebracht.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

Omdat als extra stap voorafgaande defosfatering noodzakelijk is, is One Step Anammox niet aantrekkelijk als decentrale voorbehandelingsmethode.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Als One Step Anammox als tweede trap wordt geschakeld na decentrale stationaire struvietverwijdering als voorbehandeling, is bij een debiet van  $1,5 \text{ l/uur}$  een reactorvolume van  $72 \text{ l}$  nodig. Bij een natte hoogte van  $1,5 \text{ m}$  is het voor beluchting beschikbare oppervlak dan  $0,5 \text{ m}^2$ . Dit is net iets minder, dat aan beluchtingoppervlak nodig is.

**GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Ook voor de centrale stationaire behandeling dient éérst een fysisch chemische P-verwijdering te worden toegepast (bijvoorbeeld via struviet).

Bij een debiet van  $20 \text{ l/uur}$  is een reactorvolume van  $0,96 \text{ m}^3$  nodig. Bij een natte hoogte van  $5 \text{ m}$  is er dan een oppervlak van  $0,19 \text{ m}^2$  beschikbaar. Dit is net te kort voor de vereiste zuurstofinbreng. One Step Anammox kan bijgevolg net niet centraal worden toegepast voor de verwerking van 3 maal verdunde urine. Als de al verdunde urine nog iets verder wordt verdund (ruwweg  $1 + 0,5$ ) e/o recirculatie wordt toegepast over een wat groter reactorvolume is toepassing wel mogelijk. Gegeven de relatieve complexiteit van het systeem, de vereiste controles (dus hoge eisen aan de bediening) en de lange her-opstart tijd na verstoringen is een centrale stationaire behandeling (met bijvoorbeeld opstelling bij een rwzi, zodat deskundig personeel beschikbaar is) is een centrale opstelling ook een betere insteek dan een decentrale opstelling. Na de behandeling middels One Step Anammox dienen P, medicijnen en hormonen nog aanvullend te worden verwijderd.

### 3.1.4 C DEMON

Het batchproces DEMON verloopt in drie stappen:

1. vullen en intermitterend beluchten, waarbij circa 50% van het ammonium wordt omgezet naar nitriet tijdens de beluchte fase en tijdens de onbeluchte fase het ammonium plus nitriet worden omgezet in stikstofgas;
2. bezinken;
3. aflaten.

#### SCHAALGROOTTE

Het is niet bekend, of DEMON op kleinere schaal kan draaien.

#### PROCESOMSTANDIGHEDEN

De eisen aan de temperatuur zijn  $T > 30, < 40$  C. Bij de behandeling van separaat ingezamelde urine zal enige verwarming van het influent gewenst zijn. Bij de omzetting van ammoniumstikstof naar nitriet komt een geringe hoeveelheid warmte vrij. Tijdens de beluchte fase daalt de pH tengevolge van de nitrificatie. Tijdens de onbeluchte fase stijgt de pH door de Anammox-reactie. De noodzaak van loog of zuurdosering is afhankelijk van het bufferende vermogen (voorbeeld bicarbonaat, waarbij dan de verhouding bicarbonaat/ammonium en rol speelt). Er is geen C-bron dosering nodig. De sturing is relatief gecompliceerd, zowel op pH als op  $O_2$ .

#### BELASTBAARHEID

De omzetting is te stellen op maximaal circa  $0,6 \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{dag}$  bij een slibgehalte van  $5 \text{ g ds/l}$ .

#### HULPSTOFFEN

Er is geen C-bron dosering nodig. Wel dient er voldoende (bi)carbonaat aanwezig te zijn.

#### STAND VAN DE TECHNIEK

Er zijn al langere tijd twee installaties in bedrijf:

- Strass, Oostenrijk: stikstofvracht  $200 - 300 \text{ kg/dag}$ , N-verwijdering  $> 80 \%$ ; slib:  $4,3 \text{ g/liter}$ ; reactorvolume  $500 \text{ m}^3$ , debiet  $117 \text{ m}^3/\text{dag}$ ;
- Glarnerland, Zwitserland: stikstofvracht  $150 - 200 \text{ kg/dag}$ , N-verwijdering  $> 90 \%$ ; slib:  $5 \text{ g/liter}$ ; reactorvolume  $400 \text{ m}^3$ , debiet  $250 \text{ m}^3/\text{dag}$ .

In Apeldoorn is een DEMON in aanbouw voor de verwerking van rejectwater uit de slibvergisting van een rwzi (stikstofvracht  $1.200 \text{ kg/dag}$ , reactorvolume  $2.500 \text{ m}^3$ ).

#### GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT

Het resultaat van de indicatieve capaciteitsberekening voor urine is, dat DEMON in het Urimobconcept niet kan worden toegepast.

#### GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB

Voor de decentrale stationaire voorbehandeling middels DEMON is een volume van  $180 \text{ l}$  nodig. Bij een natte hoogte van  $1,5 \text{ m}$  is er dan een oppervlak van  $0,12 \text{ m}^2$  beschikbaar. Dit is net voldoende voor de vereiste zuurstofinbreng.

#### GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

De voor de decentrale stationaire voorbehandeling gegeven informatie geldt ook voor de decentrale behandeling.



### **GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Voor de centrale stationaire voorbehandeling middels DEMON van 20 l/uur is een reactorvolume van 2,4 m<sup>3</sup> nodig. Bij een natte hoogte van 5 m is er dan een oppervlak van 0,48 m<sup>2</sup> beschikbaar. Dit is voldoende voor de vereiste zuurstofinbreng.

DEMON kan centraal worden toegepast. Gegeven de relatieve complexiteit van het systeem, de vereiste controles (dus hoge eisen aan de bediening) en de lange her-opstart tijd na verstoringen is een centrale stationaire behandeling (met bijvoorbeeld opstelling bij een rwzi, zodat deskundig personeel beschikbaar is) is een centrale opstelling ook een betere insteek dan een decentrale opstelling.

Na de behandeling middels DEMON dienen P, medicijnen en hormonen nog aanvullend te worden verwijderd. Uiteraard is ook de volgorde P-verwijdering – DEMON - verdere behandeling mogelijk.

## **3.2 FYSISCH CHEMISCHE TECHNIEKEN**

### **3.2.1 ALGEMEEN**

Fysisch-chemische technieken berusten òf op het scheiden van componenten gebaseerd op hun fysische eigenschappen in het afvalwater (oplosbaarheid, ad/absorptie gedrag, deeltjesvorming), òf op de omzetting in andere chemische stoffen (aangaan van onderlinge chemische reacties, reduceren / oxideren tot andere chemische stoffen).

In het algemeen zijn fysisch-chemische processen weinig gevoelig voor schaal effecten. Een probleem dat met name bij opschaling naar grote capaciteiten speelt zijn menging en stromingseffecten. Voor een kleinschalige urineverwerking is dit waarschijnlijk niet van belang. Kleinschaligheid kan wel tot specifieke technische problemen leiden. Kleinschalige hardware (pompen, kleppen) is over het algemeen onderhoudsgevoeliger dan zwaardere apparaten. In de onderhavige toepassing, waarbij (ook) P verwijderd dient te worden in de vorm van een winbaar neerslag, kan er sprake zijn van een verhoogde kans op verstoppingen in een kleinschaligere installatie. Verder kan de commerciële beschikbaarheid van voldoende kleinschalige systeemcomponenten een knelpunt zijn, of wordt de capaciteit van een mobiele urinebehandelinginstallatie bepaald door de beschikbaarheid van de benodigde componenten.

Fysisch-chemische technieken zijn in principe in staat, om alle verontreinigingen uit afvalwater te verwijderen. Maar per type verontreiniging kan een andere techniek vereist zijn. Voor het Urimob concept betekent dit, dat er op voorhand van uit moet worden gegaan, dat er combinaties van fysisch-chemische technieken toegepast moeten worden.

### **3.2.2 STRIPPEN**

Bij strippen worden vluchtige componenten aan de urine onttrokken door intensieve beluchting. Ammonium wordt bij hoge pH in de vorm van ammoniak verwijderd. Afhankelijk van de aard kan ook een deel van de CZV (al dan niet na manipulatie van de omstandigheden als bijvoorbeeld de zuurgraad) door strippen worden verwijderd. Als voorbeeld kunnen vluchtige vetzuren worden genoemd.

Vanwege de lage Henrycoëfficiënt van ammoniak (0,76 atm/molfractie) zijn grote gas/vloeistofverhoudingen noodzakelijk, om tot een voldoende hoog striprendement te komen. Naast het strippen zelf, is ook behandeling van het stripgas noodzakelijk. De uit de urine gestrippte stoffen kunnen niet in de atmosfeer worden geloosd. Een mogelijkheid is het toepassen van gaswassers, waarbij het ammoniak weer wordt opgelost in water onder verhoogde druk.

Fosfaat, hormonen en geneesmiddelen zijn niet verwijderbaar door strippen.

### SCHAALGROOTTE

Er is geen ondergrens aan de schaalgrootte. Ook op kleine schaal kan het proces stabiel worden bedreven.

### PROCESOMSTANDIGHEDEN

De optimale pH voor het strippen van ammoniak is 10,8-11,5. De efficiency van strippen is temperatuurafhankelijk, bij hogere temperatuur verloopt het proces beter. Er zijn voor ammoniak echter geen harde temperatuureisen bekend. Door de hoge pH kan afzetting van calcium carbonaat optreden. Mogelijk kunnen ook andere afzettingen (bijvoorbeeld struviet) belemmerend werken en leiden tot veel onderhoud. De optimale pH voor de verwijdering van andere zuurstofvragende componenten kan een volkomen andere zijn. Voor vluchtige vetzuren is de range bijvoorbeeld 3 – 6. Strippen vindt plaats in een gepakte striptoren. Lucht kan zijdelings worden aangevoerd (cross flow) of van onder (tegenstroom). De laatste aanpak is meer gebruikelijk. De hydraulische belastbaarheid van een stripsysteem is laag. Voor 90% verwijdering van ammonium-N is een lucht/water verhouding van 4.000 - 6.000 nodig. (Horan et al., 1994). Het energieverbruik van een stripsysteem bedraagt 105 kWh/m<sup>3</sup> urine of 19,2 kWh/g N.

### BELASTBAARHEID

De belastbaarheid bij hoge ammoniak concentraties is niet bekend. De Waste Water Technology Fact Sheet van de USEPA (EPA, 2000) vermeldt dat strippen geschikt is tot een gehalte van 100 mg/l N. Daarboven wordt stoomstrippen of een biologische omzetting geadviseerd. Horan *et al.* (1994) geven ook een aantal referenties naar systemen waar tot 1.000 mg/l N wordt verwijderd uit industrieel afvalwater of percolatiewater van stortplaatsen.

### HULPSTOFFEN

Om ammoniak strippen mogelijk te maken, is dosering van een base nodig, bijvoorbeeld kalkmelk of natronloog, om de pH te verhogen tot de gewenste waarde. Voor het stripproces zijn grote hoeveelheden lucht nodig. Voor de noodzakelijke afgraasreiniging zijn wederom hulpstoffen nodig.

### STAND VAN DE TECHNIEK

De techniek is volwassen.

### GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT

In de literatuur zijn geen referenties gevonden voor toepassing van ammonia strippen voor urinebehandeling. Gezien de grote benodigde lucht/water verhoudingen, het hoge energieverbruik en de benodigde afmetingen (bouwhoogte 6-8 meter) is strippen niet geschikt voor toepassing in Urimob.

### GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB

Ook over stikstofverwijdering in een stationair concept (lokale behandeling), wordt in de literatuur geen melding gemaakt. Gezien het relatief groot bouwvolume, het hoge energieverbruik en de geluidsbelasting ten gevolge van de benodigde luchtcompressie, is dit proces eveneens niet geschikt voor stikstofverwijdering op locatie.

### GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Voor de decentrale stationaire behandeling is het niet te verwachten, dat strippen een goede techniek is.

## GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Ook voor een centraal concept gelden dezelfde belemmeringen, zodat strippen hiervoor niet als goede techniek kan worden gezien.

### 3.2.3 IONENWISSELING

Ionenwisseling is beschouwd in combinatie met precipitatie en strippen. Door middel van ionenwisseling is het mogelijk, om fosfaat, ammonium en nitraat uit afvalwater te verwijderen. Omdat urine ook andere ionen zoals Na, K, Cl, SO<sub>4</sub> Ca en Mg bevat, zal er veel concurrentie zijn bij de adsorptie. De keuze van de ionenwisselaar, met een hoge affiniteit voor ammonium is daarbij van groot belang. Door de concurrentie zal de efficiëntie voor verwijdering van fosfaat, ammonium en nitraat vrij laag zijn, waardoor toepassing van ionenwisseling relatief duur wordt. Daarnaast zal de ionenwisselaar frequent geregenereerd moeten worden, hetgeen leidt tot een hoog chemicaliënverbruik.

Een bijzondere vorm van ammoniumbinding door ionenwisseling is toepassing van zeolieten. De natuurlijke zeolieten clinoptiloliet en wollastoniet hebben een hoge affiniteit voor ammonium. Laboratoriumonderzoek naar toepassing van zeolieten in combinatie met struvietprecipitatie lijkt een reductie van het nutriëtniveau te kunnen realiseren, maar de ammoniumconcentraties in het supernatant blijven nog relatief hoog (1.000 g N/m<sup>3</sup>) (Ganrot *et al.* 2007, Bán en Dave, 2004). Lind *et al.* (2000) hebben verwijderingsrendementen tussen 20 en 50% gerapporteerd. Zeolieten bieden dus mogelijkheden voor verwijdering van ammonium maar zullen als meertraps systeem moeten worden uitgevoerd of gecombineerd met andere technieken moeten worden ingezet.

Door de ionenwisselaar te regenereren komen de ionen vervolgens in geconcentreerde vorm vrij. Vanuit de geconcentreerde vorm kunnen fosfaat en ammonium worden neergeslagen als struviet en/of kan ammonium door strippen worden verwijderd. De overmaat ammoniak kan dan worden afgevangen in zwavelzuur (omzetting in ammoniumsulfaat).

Met ionenwisseling kunnen de voedingszouten worden afgevangen, maar er vindt geen/weinig CZV verlaging plaats, evenmin als verwijdering van hormonen en medicijnresten.

### SCHAALGROOTTE

Er is geen ondergrens aan de schaalgrootte.

### PROCESOMSTANDIGHEDEN

Zeolieten kunnen worden toegepast in de vorm van een vastbed filtratie. Door de beperkte adsorptiecapaciteit zullen zeolietfilters in meerdere trappen of in combinatie met andere processen moeten worden ingezet.

### BELASTBAARHEID

De adsorptiecapaciteit van zeolieten bedraagt ongeveer 1 mg N/g zeoliet. Voor ammoniumverwijdering bij de drinkwaterproductie is de toepassing van zeolieten op twee locaties onderzocht. De belasting daarbij was echter 100 tot 1000 maal lager (0,3-3 mg/l N) dan voor urine. Ammonium brak op deze filters door na enkele tientallen tot honderdtallen bedvolumina. De verwachting is dat toepassing bij veel hogere belasting zoals bij urine, veel grotere filters nodig zijn of veel kortere looptijden gerealiseerd zullen worden.

### HULPSTOFFEN

Voor de regeneratie van de ionenwisselaars zijn chemicaliën nodig.

**STAND VAN DE TECHNIEK**

De techniek is volwassen bij stationaire toepassing. Er zijn geen gegevens gevonden van mobiele toepassing.

**GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Vanwege de selectiviteit voor ammonium, komen alleen zeolieten in aanmerking voor urinebehandeling. Vanwege de adsorptiecapaciteit van zeolieten voor ammonium (grootteorde 1 mg-N per g zeoliet) is de aanpak echter niet geschikt voor een mobiele unit.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

De beperkte adsorptiecapaciteit maakt zeolieten ook voor decentrale stationaire voorbehandeling ongeschikt.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De beperkte adsorptiecapaciteit maakt zeolieten ook voor decentrale stationaire behandeling ongeschikt.

**GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Voor centrale behandeling kunnen zeolietfilters in combinatie met andere technieken mogelijk worden toegepast voor gedeeltelijke ammonium verwijdering. Voordat zeolietfiltratie echter praktijkschaal kan worden toegepast, is nog veel onderzoek nodig.

**3.2.4 CONCENTREREN (VERDAMPEN EN VRIES/DOOI-PROCES)**

Overwogen kan worden, om de verschillende stofgroepen niet separaat te verwijderen, maar om te volstaan met het verder concentreren van de urine, waarna het concentraat wordt afgezet voor hergebruik. Daarnaast wordt het te transporteren volume aanzienlijk vermindert. Geconcentreerde urine kan mogelijk worden afgezet als toeslagstof bij compostering ('spiking'), benut worden als nutriëntenbron bij industriële waterzuiveringsinstallaties of als ureum voor verwijdering van stikstofoxiden uit rookgassen, mits de ureum nog niet is gehydrolyseerd. Voor de laatste toepassing werkt de aanwezigheid van zouten belemmerend (bijvoorbeeld door de vorming van afzettingen en/of door corrosie o.i.v. chloride). Voor het concentreren van urine zijn verschillende technieken beschikbaar:

- Verdamping bij verlaagde dampspanning is in verschillende vormen mogelijk. Verschillende technieken zijn ontwikkeld voor de ruimtevaart, waarbij de focus vooral gericht is op hergebruik van water (Wieland, 1994);
- Verdamping op basis van zonnewarmte: LeAF werkt momenteel met het bedrijf Zonnewater aan de ontwikkeling van een techniek die gebruikt maakt van de ventilatiestromen van gebouwen. Overgezet naar een mobiel proces zou gedacht kunnen worden aan het gebruik van de warmte van de motor van de vrachtwagen, om de urine te concentreren;
- Vries-dooi proces: door Lind *et al.* (2001) is aangetoond dat door bevriezing van urine ongeveer 80 % van de nutriënten kan worden geconcentreerd in ongeveer 25 % van het oorspronkelijk volume. Ook Ganrot *et al.* (2007) rapporteren over succesvolle inzet van dit proces op laboratoriumschaal, maar geven ook aan dat verder onderzoek nodig is om het te optimaliseren in combinatie met terugwintechnieken voor N en P en dat een kosten-batenanalyse gewenst is;
- Memstill: membraandestillatie, waarbij de membranen en de condensor zijn geïntegreerd. Hierdoor is Memstill zeer efficiënt met energie en kan gebruik gemaakt worden van lage kwaliteit restwarmte, en is een hoog verdampingsoppervlak in klein volume

aanwezig. Daarnaast is Memstill, dat ontwikkeld is voor zeewaterontzouting, bijzonder geschikt voor toepassing in zeer zoute omgeving. Een aandachtspunt is mogelijk de verdamping van ammoniak via het membraan.

### **SCHAALGROOTTE**

Verdampingsprocessen zijn weinig afhankelijk van de schaal, mits voldoende verdampingsoppervlak kan worden gecreëerd. Ook vries/dooi-installaties kunnen klein en compact worden gebouwd.

### **PROCESOMSTANDIGHEDEN**

Genoemde processen zijn sterk afhankelijk van beschikbaarheid van energie in de juiste vorm. Voor verdampingsprocessen is uiteraard energie in de vorm van warmte nodig. Voor vries/dooi systemen is voldoende elektrisch vermogen nodig. Een aandachtspunt bij verdampings-systemen is voorts het optreden van scaling en/of corrosie, waardoor de warmteoverdracht kan worden belemmerd.

### **BELASTBAARHEID**

De belastbaarheid bij verdampingssystemen hangt sterk af van het aangeboden verdampingsoppervlak.

### **HULPSTOFFEN**

Er zijn in principe geen hulpstoffen vereist, wel warmte. Maar een belangrijke uitdaging bij toepassing van concentreringstechnieken is het voorkomen van ammoniumverlies en het energieverbruik. Verlies van ammonium kan worden voorkomen door gebruik te maken van niet gehydrolyseerde urine (wat in de praktijk niet haalbaar is) of verlaging van de pH. Het energieverbruik kan worden verlaagd door toepassing van energierugwinning.

### **STAND VAN DE TECHNIEK**

De techniek is niet operationeel. Vries-dooi processen worden wel ingezet bij slibindikkingsprocessen.

### **GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

In het Urimob proces kan voor indikking door verdamping mogelijk (deels) gebruik worden gemaakt van de restwarmte van de vrachtwagencombinatie. Uitvoeringstechnisch is dit echter erg gecompliceerd. Het vries/dooiproces wordt niet als bruikbaar beschouwd voor het Urimob concept.

### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

In een decentraal stationair concept waarbij lokaal stikstof wordt verwijderd en via een mobiele behandeling P en organische componenten worden verwijderd, kan een concentreringsstap een positieve bijdrage bieden. Door de concentrering wordt volumewinst geboekt. Hierdoor kan de mobiele behandeling mogelijk eenvoudiger zijn en/of is een minder frequente mobiele behandeling nodig.

### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De techniek wordt niet als bruikbaar beschouwd voor decentrale stationaire behandeling.

### **GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De techniek wordt niet als bruikbaar beschouwd voor centrale stationaire behandeling.

### 3.2.5 MEMBRAANFILTRATIE

Een andere manier, om verontreinigende componenten te concentreren en (deels) te scheiden is membraanfiltratie. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen micro- en ultrafiltratie enerzijds en nanofiltratie en omgekeerde osmose anderzijds. Daarnaast wordt in de literatuur melding gemaakt van toepassing van electro-dialyse, waarbij scheiding plaatsvindt onder invloed van een elektrisch veld en ionselectieve membranen.

Er zijn in beperkte mate studies verricht naar het gebruik van membranen in de behandeling van urine. Er is nog geen sprake van een operationele techniek. Als problematische aspecten worden genoemd de bedrijfseconomie, vervuiling van de membranen en de verwerking van de verkregen concentraten (Pronk *et al.*, 2006).

#### MICRO- EN ULTRAFILTRATIE

Dit is een scheidingsmethode op grond van deeltjesgrootte. Deeltjes groter dan de poriën in het membraan worden tegengehouden. Microfiltratie (MF) houdt deeltjes groter dan 0,1 µm tegen, ultrafiltratie (UF) deeltjes groter dan 0,01 µm. Opgeloste stoffen zoals ammonium, fosfaat, maar ook geneesmiddelen en hormonen worden door deze membranen volledig doorgelaten.

Micro- en ultrafiltratie kan worden toegepast voor de verwijdering van neerslag in de opgeslagen gehydrolyseerde urine (struviet, hydroxyapatiet, calciumcarbonaat) en het verwijderen van bacteriën, en virussen bij toepassing van ultrafiltratie. Beide technieken kunnen daarom een voorzuivering vormen als in de daaropvolgende processtappen aanwezige neerslagen belemmerend zijn.

Omdat urine aanleiding kan geven tot sterke vervuiling van de membranen, kan de toepassing van keramische membranen worden overwogen. De membranen zullen periodiek worden teruggespoeld. De gefiltreerde deeltjes zullen daarbij in de vorm van een verdunde slibstroom vrijkomen. Onderzocht zal moeten worden wat de exacte samenstelling van dit slib is en op welke wijze dit slib verder wordt verwerkt. De verwachting is dat het voor een belangrijk deel zal bestaan uit neergeslagen calcium- en magnesiumzouten.

#### NANOFILTRATIE EN OMGEKEERDE OSMOSE

Nanofiltratie (NF) en omgekeerde osmose (RO) zijn in staat om opgeloste stoffen te scheiden. Dit gebeurt in een semipermeabel membraan, dat water zal doorlaten en opgeloste stoffen zal tegenhouden. De mate van retentie van opgeloste stoffen hangt af van het membraantype en de stoffen zelf. Nanofiltratie zal met name meerwaardige zoutionen zoals calcium, magnesium, sulfaat en orthofosfaat tegenhouden, maar ook organische stoffen met een hoger molecuulgewicht. Bij deze laatste speelt echter ook de pH en de polariteit van de organische moleculen een belangrijke rol. Omgekeerde osmose houdt ook eenwaardige ionen en organische stoffen met een lager molecuulgewicht tegen. RO zal daardoor voornamelijk als concentreringstechniek in aanmerking komen.

Pronk *et al.* (2006) hebben uitgebreid onderzoek verricht naar de behandeling van urine met verschillende typen nanofiltratiemembranen. In dit onderzoek is gekeken naar de verwijdering van geneesmiddelen en de scheiding van N en P. Uit het onderzoek wordt geconcludeerd dat het NF270 membraan het meest geschikt is voor de behandeling van urine. Ureum werd door het membraan volledig doorgelaten, ammonium voor meer dan 50 % en fosfaat werd vrijwel volledig tegengehouden. Voor de bij het onderzoek aan de urine gedoseerde stoffen ethinylestradiol, propranolol, ibuprofen, diclofenac en carbamezapin werden verwijderingsrendementen van 92%-98% gevonden bij toepassing van het NF270 membraan. De andere

membranen hadden beduidend lagere retenties voor deze stoffen of lieten ze in het geheel door.

Toepassing van NF kan de urine dus grofweg in twee stromen scheiden, die apart verder behandeld moeten worden:

- een geconcentreerde stroom met fosfaat, een deel van de ammonium en de medicijnresten. Deze stroom kan verder worden behandeld door fosfaat en ammonium te laten precipiteren tot struviet. Geneesmiddelen worden daarbij niet in de struvietmatrix opgenomen. Het na de precipitatie overblijvende supernatant zal daarom apart moeten worden verwerkt;
- een stikstofrijke waterstroom met daarin vooral ureum en ammonium waaruit de stikstof geconcentreerd kan worden tot meststof.

De omvang van beide stromen, en daarmee de uiteindelijk te bereiken concentraties hangt af van de gekozen (en in de praktijk haalbare) procescondities, met name de opbrengst (recovery) van de membraaninstallatie. Ook de voedingsdruk is van belang. Deze zal erg hoog zijn vanwege de hoge osmotische druk van urine (circa 8-10 bar voor 3 maal verdunde urine).

Of deze scheiding in twee stromen voordelen biedt, is twijfelachtig. Immers wanneer het aanwezige fosfaat direct gebonden wordt in een struvietprecipitatie, zal het supernatant vergelijkbaar zijn met het ammoniumrijke permeaat. Wel zal dit permeaat nog alle geneesmiddelen bevatten.

#### **SCHAALGROOTTE**

Er is geen ondergrens aan de schaalgrootte.

#### **PROCESOMSTANDIGHEDEN**

Nanofiltratie zal bij een relatief hoge druk moeten worden toegepast, vanwege de hoge osmotische druk van de urine. De uiteindelijke opbrengst van de installatie hangt sterk af van de gekozen procescondities, de exacte samenstelling van de urine en de membraankeuze.

Bij nanofiltratie migreert het water. Ureum (molecuulgewicht 60,1 g/mol) en ammonium worden slecht verwijderd door nanofiltratie.

#### **BELASTBAARHEID**

De uiteindelijk bewerkstelligde scheiding is afhankelijk van de membraankeuze en de procesomstandigheden. Uit het onderzoek van Pronk *et al.* (2007) blijkt dat ureum niet, ammonium gedeeltelijk en P vrijwel volledig door het membraan wordt tegengehouden.

#### **HULPSTOFFEN**

De optimale retentie bij NF wordt bereikt bij pH 6 à 7. Dit betekent dat de pH van gehydrolyseerde urine fors verlaagd moet worden door het toepassen van een zuurdosering. Vanwege het bufferend vermogen van de urine wordt verwacht dat het zuurverbruik hoog zal zijn. Andere benodigde hulpstoffen zijn mogelijk anti-scalants of dispergeermiddelen om membraanvervuiling te reduceren. Daarnaast zijn reinigingschemicaliën nodig om de membranen te reinigen.

#### **STAND VAN DE TECHNIEK**

De techniek is volwassen. Ervaring met ontwerp en toepassing op urine is echter maar beperkt beschikbaar.

**GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Bij filtratie is er slechts sprake van het verplaatsen van de verontreinigingen. Bovendien is het bekend dat ureum in separaat ingezamelde urine snel wordt omgezet in tot ammonium. En ammonium wordt slechts deels tegengehouden bij nanofiltratie. Nanofiltratie wordt niet als waardevol gezien voor het Urimob concept.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

Ook voor decentrale stationaire voorbehandeling kan filtratie niet als waardevolle techniek worden beschouwd.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Voor decentrale stationaire behandeling kan filtratie evenmin als waardevolle techniek worden beschouwd.

**GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Voor centrale stationaire behandeling kan filtratie ook niet als waardevolle techniek worden beschouwd.

**3.2.6 ELECTRODIALYSE**

Een variant op de membraanfiltratie is electrodialyse (ED). Er vindt scheiding plaats over een membraan onder invloed van een elektrisch veld. De opgeloste ionen en nutriënten worden door het elektrische veld onttrokken aan de urine in het concentraat, de geneesmiddelen en hormonen blijven achter in het diluaat.

Het concentraat kan biologisch worden verwerkt, in combinatie met struvietvorming voor P-verwijdering, of direct worden benut als vloeibare N, P meststof. Deze laatste optie is getest in Zwitserland (Larsen en Lienert, 2007). Voor de biologische verwerking van het concentraat zijn de N-gehaltes dusdanig hoog, dat moderne N-verwijdering-technieken (SHARON, *Anammoxians*-varianten) niet toepasbaar zijn.

Het ED proces is door Pronk *et al.* onderzocht voor behandeling van gehydrolyseerde urine. In eerste instantie is ED op labschaal onderzocht (Pronk *et al.*, 2006b). Uit dit onderzoek blijkt dat ED vooral een concentreringstechniek is. Concentreringsfactoren tot 3,3 zijn experimenteel aangetoond. Ook CZV wordt door ED geconcentreerd. CZV bestaat voor een groot deel uit organische zuren, aminozuren en koolhydraten die ook in ionogene vorm aanwezig zijn. In het labonderzoek is ook de verwijdering van geneesmiddelen en hormonen getest. Het bleek dat deze stoffen sterk konden adsorberen en migreren door de membranen, waardoor de scheiding in de tijd afnam (de concentratie in het concentraat neemt geleidelijk toe). Omdat de concentraties van deze stoffen in urine in de praktijk veel lager zijn dan in dit onderzoek gedoseerd, is de verwachting van de Pronk dat toepassing van ED onder "normale" omstandigheden gedurende lange tijd geen last zal ondervinden van deze adsorptie.

Ook is een langdurig pilotonderzoek uitgevoerd (Pronk *et al.*, 2007). Hierbij zijn concentreringsfactoren tot 4,1 aangetoond. De pilot plant had een capaciteit van circa 40 l/d en produceerde ongeveer 28 l/d diluaat en 12 l/d concentraat. In de installatie waren 20 celparen aanwezig met een totaal effectief membraanoppervlak van 3,6 m<sup>2</sup>. Omdat de scheiding van de verontreinigingen naar diluaat en concentraat niet volledig is, kunnen op beide stromen aanvullende behandelingen nodig zijn.

Voorthuizen *et al.* (2008) vergeleken electrodialyse, omgekeerde osmose en ionenwisseling voor de behandeling van synthetisch zwart water. Zij melden, dat de concentratie, waarin



nutriënten met ED konden worden teruggewonnen worden beperkt door het optreden van organische vervuiling en het optreden van scaling. Zij concluderen, dat geen van de technieken als aantrekkelijk kunnen worden gezien. Voor de Nederlandse situatie lijkt het hun zinvoller, om bij decentrale zuivering alleen fosfaat terug te winnen (bijvoorbeeld met struvietprecipitatie) en zij stellen, dat voor de (aansluitende) stikstofverwijdering het gebruik van biologische technieken met Anammox het meest aangewezen lijkt.

Electrodialyse en struvietprecipitatie zijn de enige manieren om de nutriënten te scheiden van geneesmiddelen en hormonen. Van deze twee is electrodialyse de duurdere methode.

### **SCHAALGROOTTE**

Er is geen ondergrens aan de schaalgrootte.

### **PROCESOMSTANDIGHEDEN**

Electrodialyse verbruikt elektrische energie. Er moet voor gebruik in een mobiele unit voldoende vermogen beschikbaar zijn. Verwacht wordt, dat daarvoor een externe aansluiting nodig is, waardoor ED niet tijdens het rijden kan worden toegepast. Het totale energieverbruik wordt bepaald door de elektrische energie van het scheidingsproces en de pompenergie voor circulatie van de vloeistofstromen.

Ter bescherming van de membranen dient een voorfiltratie (terugspoelbaar screenfilter) te worden toegepast. De medicijnresten en hormonen kunnen adsorberen aan het gebruikte membraan, waarbij uiteindelijk doorbraak kan optreden.

### **BELASTBAARHEID**

ED kan hoog worden belast. De verwachting is dat maximaal 90% van de nutriëntvrucht in het concentraat terecht komt. Het diluaat bevat in ieder geval de resterende 10 % en de aanwezige hormonen en geneesmiddelen. Op volumebasis is de scheiding echter minder. Van de te behandelen urine wordt circa 65% omgezet in diluaat en 30% in concentraat. De overige 5% van het volume komt terecht in de electrodespoeling (Pronk *et al.*, 2006b). De resulterende concentreringsfactor bedraagt daarmee circa 3. De waterflux bedraagt circa 5-10 l/m<sup>2</sup>.d.

Het elektriciteitsverbruik kan worden gesteld op 30 kWh per m<sup>3</sup>. Het energieverbruik wordt voornamelijk bepaald door de weerstand van de membraanstack en de recirculatiepompen.

### **HULPSTOFFEN**

Bij ED wordt een elektrolyt (HCl, NaCl) toegepast als electrodespoeling. Deze zal periodiek moeten worden verversd. Daarnaast zullen stoffen voor membraanreiniging nodig zijn.

### **STAND VAN DE TECHNIEK**

De techniek is volwassen. EAWAG voert specifiek voor urine een demonstratieproject uit.

### **GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Middels ED wordt een volumereductie van circa 60% bereikt en wordt de verwijdering van geneesmiddelen en hormonen gerealiseerd. Het concentraat (circa 30% van het totale volume), dat 90% van de nutriënten uit de urine bevat, kan worden ingezet als vloeibare meststof (onder voorbehoud van restricties ingevolge de regelgeving). Omdat een groot deel van het CZV en de aanwezige hormonen en geneesmiddelen in het diluaat blijft, is ook een behandeling van het diluaat nodig. Ozon is hiervoor effectief. De kosten voor electrodialyse zijn hoger dan voor struvietvorming. Daarnaast is een hoog elektrisch vermogen nodig om

het proces te laten verlopen. Dit betekent dat een externe elektrische aansluiting nodig is in een mobiel concept. Daardoor lijkt toepassing van ED voor Urimob niet geschikt.

#### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

ED kan worden ingezet voor het concentreren van nutriënten. Het volume van de te transporteren urine wordt daarmee verkleind tot 30% van het originele volume. De stationaire behandeling zal vooral gericht zijn op het scheiden en de omzetting van hormonen en geneesmiddelen in het diluaat, alvorens dit te lozen op het riool.

Het concentraat, dat het grootste deel van de nutriënten bevat, zal worden opgeslagen en periodiek met een Urimob worden opgehaald en behandeld, bijvoorbeeld met struvietprecipitatie.

#### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

ED kan als geschikt worden beschouwd voor decentrale stationaire behandeling, maar struviet precipitatie is goedkoper en verbruikt minder energie. Het voordeel van minder volume door ED is voor decentrale stationaire behandeling niet van belang.

#### **GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

ED kan als geschikt worden beschouwd voor centrale stationaire behandeling, maar struviet precipitatie is goedkoper en verbruikt minder energie. Het voordeel van minder volume door ED is voor centrale stationaire behandeling niet van belang.

### **3.2.7 NITRIFICERENDE FILTRATIE**

Ammonium kan worden verwijderd in een nitrificerend trickling filter. Bij de productie van drinkwater met trickling filters is het haalbaar (praktijkervaring) om een concentratie van 12 mg/l  $\text{NH}_4\text{-N}$  te nitrificeren en een specifieke conversiesnelheid van 300 g  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$  te bereiken, mits er geen limitaties optreden (o.a. voldoende doortrekventilatie voor zuurstofinbreng en koolzuurontgassing) (De Vet, 2007). De beperking ligt hier bij de  $\text{NO}_3^-$  norm voor drinkwater.

Boller en Gujer (1986) rapporteren over de inzet van trickling filters voor tertiaire effluentbehandeling. Afhankelijk van het pakkingmateriaal rapporteren ze specifieke omzettingssnelheden tussen 67 en 286 g  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ . In een hoogbelast systeem, bijvoorbeeld bij de verwijdering van ammonium-N uit urine, zal zuurstoflimitering optreden, waardoor trickling filters niet geschikt zijn voor urinebehandeling. Zoals het onderzoek van Boller en Gujer aan toont kunnen ze wel ingezet worden als laatste polishing filtratie.

#### **SCHAALGROOTTE**

Er is geen ondergrens aan de schaalgrootte.

#### **PROCESOMSTANDIGHEDEN**

Filtratiesnelheden van 2-3 m/h, bedhoogten tot 6 m en een recirculatieverhouding (R/Q) van 10 (is bij lage belasting meer dan voldoende voor  $\text{O}_2$ -inbreng en zorgt ook voor goede pH verhoging). Per gram  $\text{NH}_4\text{-N}$  is 4,33 g zuurstof nodig of wel circa 15 liter lucht (1 atm). (Wezernak en Gannon, 1967)

#### **BELASTBAARHEID**

Trickling filters voor ammoniumverwijdering uit grondwater halen een conversiesnelheid van 300 g  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ . Verwacht wordt dat alternatieve filtermaterialen gebruikt moeten worden in plaats van zand om voldoende aanhechtingspunten voor de benodigde biomassa te bieden.

De technieken zijn vooral geschikt voor laag belast water (drinkwater, effluent polishing). Voor hoog belast water (als het normale influent van een rwzi en voor urine) zijn trickling filters niet geschikt.

#### **HULPSTOFFEN**

Nitrificatie is een zuurvormend proces. Mogelijk dat pH controle (dosering van een base) nodig is.

#### **STAND VAN DE TECHNIEK**

Trickling filters zijn operationeel in de drinkwaterproductie. In verband met de relatief lage toelaatbare belasting per eenheid van reactorvolume is het voor zwaarder belast afvalwater geen geschikte techniek.

#### **GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Voor het Urimob concept worden de technieken ongeschikt geacht.

#### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

De technieken zijn niet geschikt als behandelingsstap.

#### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De technieken zijn niet geschikt als behandelingsstap.

#### **GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De technieken kunnen mogelijk als polishing filtratie voor rest-ammonium worden ingezet op een centrale behandeling. Als hoofdbehandelstap zijn de technieken niet geschikt.

### **3.2.8 ADSORPTIE AAN ACTIEVE KOOL**

Actieve kool bindt voornamelijk organische stoffen hormonen en medicijnresten, mogelijk ook enig CZV. Opgeloste zouten worden niet verwijderd (Ganrot *et al.* 2007). Het verwijderingsrendement en adsorptiecapaciteit van de kool is sterk afhankelijk van de polariteit van de stoffen en hun onderlinge concurrentie als gevolg van concentratieverschillen. Sterk polaire stoffen zoals onder andere de meeste medicijnresten zullen slecht adsorberen aan de actieve kool.

Voor medicijnresten in rwzi effluent kan tot meer dan 90% reductie worden behaald (Ternes 2005). Elders worden lagere verwijderingen gerapporteerd, waarbij de verwijdering van medicijn tot medicijn ook verschilt. Bij een korte empty bed contact tijd (EBCT) van 5 minuten, was voor een koollaag van 0,5 m in een zandfilter de range 10 - 50% en het gemiddelde 24%. Voor hormoonachtige stoffen werden betere rendementen gehaald, gemeten als oestrogene activiteit in beta-estradiolequivalenten (EEQ) was het gemiddelde rendement 84% (Wortel *et al.*, 2007). Bij een langere EBCT (circa 1 uur), gevolgd door ozonoxidatie, werden over de combinatie beduidend hogere EEQ verwijderingsrendementen behaald (>95%) (Wortel *et al.*, 2008). De verwijdering over de individuele stappen is niet bekend.

Actieve kool kan worden toegepast in de vorm van poederkool of als granulaire kool in een filterbed. Toepassing van poederkool brengt met zich mee dat de kool ook weer moet worden afgescheiden. De gebruikte kool blijft dan over als afval dat moet worden afgevoerd. Bij toe-

passing van actieve koolfiltratie zal de kool na verloop van tijd verzadigd raken en moeten worden vervangen. De gebruikte kool kan dan worden geregenereerd of worden afgevoerd.

#### **SCHAALGROOTTE**

Het proces is stabiel op kleine schaal.

#### **PROCESOMSTANDIGHEDEN**

Er worden geen speciale eisen aan de procesomstandigheden gesteld voor wat betreft de temperatuur. Belangrijke parameters voor de toepassing van actief kool zijn parameters als de belaadbaarheid, de empty bed contact tijd (EBCT) en het doorslagvolume. Deze parameters zijn voor de behandeling van separaat ingezamelde urine niet bekend.

#### **BELASTBAARHEID**

Over de adsorptiecapaciteit van de kool in deze toepassing is niet veel bekend. Verwacht wordt, dat het aanwezige CZV sterk zal concurreren met de (minder polaire) medicijnresten en hormoongelijke stoffen. De vereiste dosering (poederkool) of regeneratiefrequentie (koolfilters) is naar verwachting dan ook hoog.

#### **HULPSTOFFEN**

Er zijn bij actief kool filtratie geen hulpstoffen vereist.

#### **STAND VAN DE TECHNIEK**

Actief kool wordt ingezet voor de verwijdering van een groot aantal stoffen uit water zowel als lucht. In algemene zin is er sprake van een volwassen techniek. Maar er zijn geen toepassingen bekend van de behandeling van separaat ingezamelde urine. Op laboratoriumschaal is kool getest (Ganrot et al, 2007), waarbij bleek dat kool bijdroeg aan de verlaging van stikstof en geurstoffen. Ook bleek door behandeling met kool een positief effect te hebben op de acute toxiciteit voor *Daphna Magna*. Vanwege de hoge belasting wordt verwacht dat kool alleen geschikt is voor nabehandeling.

#### **GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

De inzet van actief kool in de nabehandeling is vermoedelijk haalbaar.

#### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

De inzet van actief kool in de nabehandeling is vermoedelijk haalbaar.

#### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De inzet van actief kool in de nabehandeling is vermoedelijk haalbaar.

#### **GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De inzet van actief kool in de nabehandeling is vermoedelijk haalbaar.

### **3.2.9 PRECIPITATIE VAN FOSFOR ALS FOSFAAT**

De van oudsher in waterzuiveringen toegepaste manier, om fosfaat te laten neerslaan is precipitatie met metaalionen als Fe(II), Fe(III) of Al(III). Deze wijze van binding van fosfaat is niet reversibel, zodat dit materiaal niet geschikt is als fosfaatmeststof. In biologische installaties ontstaat een slib, dat 3 - 4 % (m/m, ds) fosfor bevat. Vanuit traditionele waterzuiveringen is

de afzet naar de landbouw in Nederland echter tot stilstand gekomen, voornamelijk vanwege het Besluit Overige Organische Meststoffen (BOOM, 1998).

Ook met calcium kan een neerslag worden gevormd door de dosering van kalk of van calciumhydroxide bij pH 9 of hoger. Eén uitvoeringsvorm is de fluidized bed Cristalactor van DHV (Van Dijk en Braakensiek, 1984). In dergelijke reactoren wordt entmateriaal (zand, calci) gebruikt om de korrelvorming te versnellen. Een andere vorm is toepassing van een slibprecipitatie.

De calcium-route wordt zelden gevolgd om bedrijfseconomische maar ook om operationele redenen. Hoewel deze laatste niet nader omschreven zijn, is de verwachting dat dit te maken heeft met het neerslaan van fosfaten na de behandeling door nog aanwezige oververzadiging. Ook het beheer van het pelletbed (aftappen van pellets en aanvullen entmateriaal) op kleine schaal is een lastig aspect. Tenslotte wordt vermeld dat een pelletreactor moeilijk discontinu kan worden bedreven. Het stopzetten van de reactor kan tot verstopping leiden van de doseerpunten of zelfs tot het samengroeien van de pellets, waardoor een nieuwe opstart onmogelijk wordt. Verder wordt als nadeel genoemd, dat door deze techniek wel de P maar niet de N voor hergebruik beschikbaar komt.

#### **SCHAALGROOTTE**

Precipitatie zou ook op kleine schaal een stabiel proces moeten zijn. Maar er is hierover geen literatuur gevonden.

#### **PROCESOMSTANDIGHEDEN**

Geen nadere gegevens beschikbaar.

#### **BELASTBAARHEID**

Geen nadere gegevens beschikbaar.

#### **HULPSTOFFEN**

Geen nader onderzoek naar gedaan in het kader van deze studie.

#### **STAND VAN DE TECHNIEK**

Geen nader onderzoek naar gedaan in het kader van deze studie.

#### **GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Precipitatie van alleen fosfaat wordt niet doelmatig geacht binnen het Urimobconcept.

#### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

Precipitatie van alleen fosfaat wordt niet doelmatig geacht binnen het concept.

#### **GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Precipitatie van alleen fosfaat wordt niet doelmatig geacht binnen het concept.

#### **GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Precipitatie van alleen fosfaat wordt niet doelmatig geacht binnen het concept.

### 3.2.10 PRECIPITATIE VAN FOSFOR ALS STRUVIET

Om zowel fosfaat-P als ammonium-N voor hergebruik terug te winnen kunnen deze stoffen worden neergeslagen als magnesiumammoniumfosfaat (struviet, engelse afkorting: MAP; magnesium ammonium phosphate,  $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Door hydrolyse van ureum ontstaat ammonium en wordt de pH verhoogd. Udert *et al.* (2003) hebben aangetoond dat struvietprecipitatie, naast het ontstaan van andere calciumfosfaten zoals hydroxyapatiet, spontaan kan plaatsvinden met de in de urine aanwezige magnesium. Hoewel weinig bekend is over de kinetiek van struvietprecipitatie, wordt verwacht dat heterogene nucleatie een belangrijke rol speelt. Batchexperimenten van Maurer *et al.* (2006) geven aan dat struvietvorming plaatsvindt zonder inductieperiode en het een snel proces is.

Naast ammoniumstruviet kan er zich uit urine ook kaliumstruviet vormen. De vorming van ammoniumstruviet vindt evenwel eerder en bij lagere pH (8 - 9) plaats. De vorming van kaliumstruviet vindt plaats bij hogere pH (9 - 10). Bij een te lage pH (onder de 8) vindt er geen struvietvorming meer plaats, maar de vorming van magnesiumfosfaat.

Bij struvietprecipitatie worden fosfaat en ammonium in equimolaire hoeveelheden gebonden. In gehydrolyseerde urine is beduidend minder fosfaat dan ammonium aanwezig. De hoeveelheid struviet, die gevormd kan worden, wordt gelimiteerd door de hoeveelheid fosfaat. Indien een verdergaande verwijdering van stikstof door struvietvorming gewenst is, dient extra orthofosfaat te worden gedoseerd.

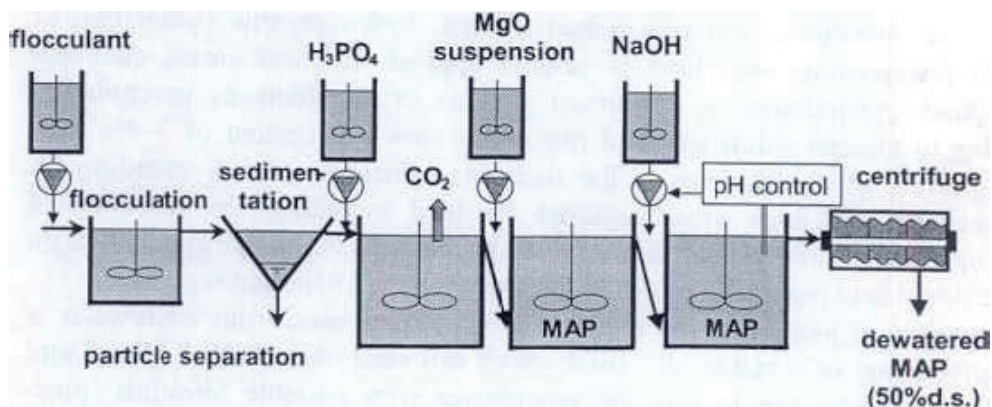
Het gevormde struviet heeft een hoge zuiverheid. Verontreinigingen in de oplossing worden niet opgenomen in het struvietkristal. Dit betekent dat na kristallisatie een supernatant overblijft waarin de meeste verontreinigingen zoals hormonen en andere organische stoffen, evenals de meeste zouten nog aanwezig zijn.

Siegriest *et al.* rapporteren over de procesgang van struvietprecipitatie. Voor een optimale struvietvorming is een tamelijk gecompliceerde procesgang vereist, zoals weergegeven in onderstaande figuur. Door toepassing van fosfaatdosering is een verwijdering tot ca 90% van de aanwezige stikstof mogelijk.

Voor de behandeling van gehydrolyseerde urine lijkt struvietvorming een belangrijke oplossing. Daarbij geldt, dat dan slechts een deel van de ammonium wordt gebonden, tenzij er fosfaat wordt gedoseerd. Indien er geen fosfaat wordt gedoseerd, is een additionele techniek nodig voor de verdere verwijdering van ammonium.

FIGUUR 2.1

STROOMSCHEMA VAN EEN STRUVIET PRECIPITATIE INSTALLATIE (BRON: SIEGRIST 1992)



**SCHAALGROOTTE**

Precipitatie is op grotere zowel als kleine schaal inzetbaar.

**PROCESOMSTANDIGHEDEN**

Gegeven het snelle verloop van de reactie is een verblijftijd van 30 - 60 minuten als voldoende in te schatten (in de literatuur is er sprake van 20 - 120 minuten).

Op grote schaal is het ontstaan van verstoppingen een regelmatig terugkerend probleem. Verwacht kan worden, dat deze problemen op kleinere schaal groter worden.

**BELASTBAARHEID**

Bij een continu proces, een reactor van 5 m<sup>3</sup> en een verblijftijd van 30 - 60 minuten is de capaciteit te stellen op 10 - 5 m<sup>3</sup>/uur. Uitgaande van een maximale capaciteit van 1.000 l/uur volstaat al een reactorvolume van 1 m<sup>3</sup>. Als ervoor wordt gekozen, om niet gedurende 24 uur te werken, maar gedurende 8 uur dient het reactorvolume hoger te zijn, 3 m<sup>3</sup>.

**HULPSTOFFEN**

Er is een equimolaire tot lichte overdosering van MgO of MgCl<sub>2</sub> nodig. Bij het gebruik van MgO (in suspensie) is het voordeel, dat er nauwelijks sprake is van pH beïnvloeding. Het voordeel van MgCl<sub>2</sub> (als oplossing) is, dat het makkelijker hanteerbaar is en minder snel tot verstoppingen leidt. Het nadeel is de resulterende verzuring. De optimale pH voor struvietvorming wordt wel gegeven als 8 - 10. Bij daling van de pH tot onder de 8 - 8,5 is NaOH dosering nodig. De extra chloridebelasting is vanwege de in de urine al aanwezige chloride minder relevant. Indien er gekozen wordt voor de verwijdering van ammonium via struviet dient tevens orthofosfaat te worden gedoseerd. Gebruikelijk is de dosering van H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. In verband met de pH beïnvloeding kan dan dosering van loog nodig zijn, om de struvietvorming in voldoende mate te laten plaatsvinden. Het alternatief is de dosering van zouten als NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> of Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>.

**STAND VAN DE TECHNIEK**

Struvietprecipitatie is nog geen volwassen techniek te noemen. Wel is veel literatuur over kinetiek en thermodynamische gegevens beschikbaar. Ook op praktijkschaal wordt struvietprecipitatie toegepast (bijvoorbeeld bij de verwerking van kalvergieter in Putten, hoewel de optimalisatie nog steeds veel aandacht vergt).

**GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Gegeven de op mobiele schaal mogelijke capaciteit lijkt struviet precipitatie te passen in het Urimobconcept. De mogelijke uitvoeringsvorm voor Urimob zal nader onderzocht moeten worden. Daarnaast is een verdere verwerking van het gevormde struviet nodig als het als meststof wordt ingezet. Deze verwerking houdt met name in het verder drogen en vormen van granulaat.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

Ook na decentrale stationaire voorbehandeling lijkt struviet precipitatie in mobiele vorm tot de mogelijkheden te behoren.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Struvietprecipitatie in de vorm van een decentrale stationaire behandeling lijkt mogelijk. Een aandachtspunt is de procesbewaking, meer in het bijzonder de (veronderstelde) verhoogde gevoeligheid voor verstoppingen bij toepassing op kleine schaal.

### GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Struvietprecipitatie in de vorm van een centrale stationaire behandeling lijkt mogelijk. Een aandachtspunt is de procesbewaking, meer in het bijzonder de (veronderstelde) verhoogde gevoeligheid voor verstoppingen bij toepassing op kleine schaal. Vanuit dit standpunt bezien is centrale stationaire behandeling, door de wat hogere schaalgrootte, aantrekkelijker dan decentrale stationaire behandeling.

#### 3.2.11 OZON

De behandeling van separaat ingezameld urine met ozon leidt tot de oxidatie van CZV en ammonium. Ook sporen van medicijnresten en hormoonachtige stoffen worden geoxideerd. Maar de dosering dient te worden afgestemd op het totale gehalte aan oxideerbare componenten. Escher *et al.* (2006) geven aan dat ozon een aantal geneesmiddelen en hormonen (Carbamazepine, diclofenac, ibuprofen, propranolol, sulfamethoxazole, estradiol) weliswaar volledig uit urine verwijdert, maar dat na ozonisatie (dosis 0,6 – 1,3 g/l) nog enige toxiciteit in een algen test aantoonbaar blijft. Zij concluderen daaruit dat ozon de genoemde stoffen niet volledig afbreekt, maar dat er metabolieten achterblijven. In de literatuur wordt gemeld, dat ozon (het reagens ozon zelf plus OH• radicalen als secundair reagens) de voorkeur heeft boven advanced oxidation (reagens OH• radicalen), omdat ozon in urine directer reageert met microverontreinigingen. Er gaat bijgevolg een minder groot deel verloren aan de matrix (Mauer, 2006). Bahr *et al.* (2007) hebben aangetoond dat een groot aantal hormonen en geneesmiddelen effectief door ozon konden worden verwijderd uit secundair effluent. Additie van waterstofperoxide leverde in de meeste gevallen geen winst op. Bij een aantal stoffen, met name de röntgencontrastmedia, was een verhoogde omzetting waar te nemen bij toepassing van waterstofperoxide. Ozonoxidatie leidt niet tot verwijdering van fosfaat en nitraat.

#### SCHAALGROOTTE

Het proces is ook op kleine schaal stabiel.

#### PROCESOMSTANDIGHEDEN

Als eerste schatting voor de vereiste ozondosering voor onbehandelde urine kan worden aangehouden: ozon =  $2/3 \times \text{CZV}$ . Dit is echter een *worst-case*; in de praktijk zal de dosis lager zijn, omdat niet alle CZV omgezet hoeft te worden om tot een effectieve verwijdering van de organische microverontreinigingen te komen. Het energieverbruik kan worden geschat op 7-10 kWh/kg O<sub>3</sub>.

Bij het proces kan in de praktijk sterke schuimvorming optreden ten gevolge van aanwezige organische stof (bijvoorbeeld eiwitten). De schuimvorming kan worden tegengegaan door voorfiltratie toe te passen.

Volgens de literatuur kan in gezuiverd communaal afvalwater met een CZV van 40 mg/l (verhouding CZV/DOC = 3,6) met een dosis van 1 mg O<sub>3</sub>/mg DOC een afbraak van medicijnresten tot onder de aantoonbaarheidsgrens worden verkregen (Bahr *et al.* 2007). Een dosis van 15 mg O<sub>3</sub>/l gaf een CZV reductie van ongeveer 25% en verwijderde nagenoeg alle medicijnresten. Dit impliceert dat ozon vooral geschikt is als nabehandeling van urine, omdat voor onbehandelde urine een zeer hoge dosis nodig is.

#### BELASTBAARHEID

De belastbaarheid dient te worden vastgesteld op basis van onderzoek. In de onderhavige studie is uitgegaan van  $2/3 \times \text{CZV}$  indien geen biologische stap voor de ozon aanwezig is en ongeveer 30 mg O<sub>3</sub>/l (2-voudige van de studie van Bahr *et al.* 2007) na een actief slib systeem.



Een belangrijk aandachtspunt voor het vaststellen van de capaciteit in een praktijkinstallatie is de afbraaksnelheid, die weer in belangrijke mate wordt bepaald door de haalbare stofoverdracht. Deze is niet bekend. Veelal wordt gewerkt met kolomen van 2 meter of hoger.

### HULPSTOFFEN

De vereiste hulpstoffen zijn zuurstof of gedroogde lucht.

### STAND VAN DE TECHNIEK

De toepassing van ozon is een volwassen techniek. Maar voor de toepassing op verdunde urine dan wel biologisch behandelde verdunde urine ontbreekt informatie over de vereiste dosering.

### GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT

Voor de behandeling van 1 - 2 m<sup>3</sup> urine per uur met een CZV van 2270 mg/l is nodig  $2/3 * 2270 * (1 - 2) / 1.000 = 1,5 - 3$  kg ozon per uur. Dit vereist een forse installatie, die gevoed zal moeten worden met zuurstof en 20 - 40 kWh vermogen vraagt. Om dit te realiseren in mobiel bedrijf is technisch lastig en erg duur. Verder geeft de mobiele behandeling meer veiligheidsrisico's dan de stationaire behandeling. Ozon is niet toepasbaar in het Urimob concept.

### GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB

Bij een debiet in de voorbehandeling van 1,5 l verdunde urine per uur met een CZV van 2270 mg/l is nodig  $2/3 * 2,270 * 1,5 = 2,27$  g ozon per uur, met een elektrische verbruik van circa 25 Wh. Dit is een bijzonder kleine installatie. De toepassing van ozon is geschikt als decentrale stationaire voorbehandeling.

Indien de voorbehandeling bestaat uit een biologische zuiveringsstap, zal het CZV beduidend lager zijn, vergelijkbaar met RWZI effluent. Het CZV gehalte wordt daarom op 100 mg/l O<sub>2</sub> gesteld. Uit Bahr *et al.* (2007) volgt dan dat kan worden volstaan met een ozondosis van circa 30 mg/l ofwel 45 mg ozon per uur.

Als in dit concept de ozonbehandeling in de Urimob stap plaats vindt, gelden echter dezelfde restricties als in het Urimob concept. De toepassing van ozon is niet geschikt als mobiele behandeling.

Als nabehandeling van decentraal behandelde urine zou met een veel lagere ozon dosis volstaan kunnen worden, waardoor mobiele ozonisatie mogelijk is. Er blijven echter belangrijke veiligheidsrisico's bestaan bij het gebruik van ozon in een mobiele toepassing.

### GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Bij een debiet van 1,5 l verdunde urine per uur met een CZV van 2270 mg/l is nodig  $2/3 * 2,270 * 1,5 = 2,27$  g ozon per uur. De stationaire behandeling geeft minder veiligheidsrisico's dan de mobiele behandeling. De toepassing van ozon is geschikt als decentrale stationaire behandeling.

Indien ozon als nabehandeling wordt toegepast, dus nadat het CZV op andere wijze al vergraand is verwijderd, dan zal de vereiste ozon dosis vele malen lager liggen (mg in plaats van grammen). Bij een verlaging van het CZV gehalte tot 300 mg/l O<sub>2</sub> kan de ozondosis worden gereduceerd tot circa 30 mg/l. Het totale ozonverbruik wordt dan  $1,5 \text{ l/h} * 30 \text{ mg/l} = 45 \text{ mg/h}$ .

### GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

Bij een debiet van 25 l verdunde urine per uur met een CZV van 2270 mg/l is nodig  $2/3 * 2,270 * 25 = 38$  g ozon per uur (0,3 - 0,4 kWh). De toepassing van ozon is geschikt als centrale stationaire behandeling.

De inzet van ozon als nabehandeling, nadat het CZV op andere wijze al vergaand is verwijderd zal resulteren in een lagere ozon behoefte. Een eerste inschatting kan zijn, dat dan ongeveer 1 gram ozon per uur al voldoende is. Hiervoor ontbreken echter nog testresultaten. Bij een CZV gehalte van 300 mg/l O<sub>2</sub> wordt de ozondosis 30 mg/l. Dit betekent een ozonverbruik van 25 l/h \* 30 mg/l = 750 mg/h.

### 3.2.12 GEAVANCEERDE OXIDATIE

Onder geavanceerde oxidatie (AO) wordt verstaan een oxidatie met hydroxyl radicalen (OH<sup>-</sup>). Deze radicalen ontstaan o.a. bij toepassing van de volgende combinaties: UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Ozon/UV en Ozon/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Hydroxylradicalen zijn uiterst reactief en reageren aselectief met alle aanwezige organische stoffen. Er is geen ervaring met AO voor verwijdering van medicijnresten uit urine, maar aangenomen kan worden, dat er een reactie zal optreden. De verwachting is echter dat er veel concurrentie is met de aanwezige CZV. Dit betekent, dat er hoge doseringen nodig zijn. Toepassing van AO voor verwerking van urine lijkt pas mogelijk na een vergaande verwijdering van CZV en is dan met name geschikt voor een verdere oxidatie van hormonen en medicijnen. De toepassing van UV wordt verder belemmerd door de hoge absorptie van UV licht door urine.

#### SCHAALGROOTTE

Het proces is ook op kleine schaal stabiel.

#### PROCESOMSTANDIGHEDEN

De vereiste doseringen van ozon/peroxide of van UV zijn niet bekend. Vermoedelijk zijn er hoge doseringen nodig. In een Duitse studie op gezuiverd communaal afvalwater werden peroxide/ozon verhoudingen van 0,4-1,0 mg/mg gebruikt (Bahr *et al.* 2004). Dit was echter minder effectief dan alleen behandeling met ozon met betrekking tot de afbraak van medicijnresten. De meeste winst wordt behaald bij de afbraak van röntgencontrastmedia.

#### BELASTBAARHEID

Over de belastbaarheid zijn geen gegevens bekend.

#### HULPSTOFFEN

Waterstofperoxide.

#### STAND VAN DE TECHNIEK

De techniek is volwassen.

#### GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT

De geschiktheid voor Urimob wordt als laag ingeschat, vanwege het hoge (door het CZV gehalte gedecideerde) verbruik. Mauer (2006) geeft aan, dat ozon/peroxide niet als geschikte techniek kan worden beschouwd, terwijl UV afvalt vanwege de hoge adsorptie. De resultaten van Bahr *et al.* (2002) pakken ook niet gunstig uit ten aanzien van AO.

#### GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB

De geschiktheid wordt als laag ingeschat, vanwege het hoge (door het CZV gehalte gedecideerde) verbruik.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De geschiktheid voor decentrale stationaire behandeling wordt als laag ingeschat, om dezelfde reden als in de voorafgaande concepten.

*Geschiktheid voor centrale stationaire behandeling*

De geschiktheid voor centrale stationaire behandeling wordt als laag ingeschat, om dezelfde reden als in de eerder behandelde concepten.

**3.2.13 CHLOOR**

Chloorgas is zeer reactief (evenals chloordioxide). Het leidt tot afbraak van CZV en omzetting van ammonium in stikstofgas (breekpuntchloring). Nitraat en fosfaat worden niet verwijderd. Een belangrijk nadeel van deze middelen is, dat het om zeer reactieve gasvormige stoffen gaat. Bijgevolg zijn de risico's voor het mobiel werken met deze stoffen op voorhand als hoog in te schatten. Dit is reden, om de toepassing in geen van de concepten te overwegen.

**3.2.14 NATRIUMHYPOCHLORIET**

Natriumhypochloriet (NaClO) is een sterk oxidatiemiddel. Maar in tegenstelling tot chloorgas is het een oplossing in water (in lagere concentraties voor huishoudelijke toepassing is het middel bekend als bleekwater). Hierdoor is het gebruik minder risicovol. Maar er blijft een risico, dat er chloorgas vrijkomt. Hypochloriet oxideert veelal eerst CZV en daarna ureum en ammonium (tot nitraat). Hypochloriet reageert niet met fosfaat. De werking op medicijnen en hormonen is niet / onvolledig bekend. De vorming van gechloreerde nevenproducten dient verder te worden onderzocht.

**SCHAALGROOTTE**

Het proces is ook op kleine schaal stabiel.

**PROCESOMSTANDIGHEDEN**

Benodigde hoeveelheid: 1 mol ClO<sup>-</sup> levert ½ mol O<sub>2</sub>.

**BELASTBAARHEID**

Te bepalen op basis van eventuele testen.

**HULPSTOFFEN**

Er zijn bij werken in basisch milieu geen hulpstoffen vereist.

**STAND VAN DE TECHNIEK**

De toepassing van hypochloriet is een volwassen techniek. Maar voor de behandeling van separaat ingezamelde urine is er sprake van een nieuwe techniek.

**GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Naar verwachting is het chemicaliën verbruik te hoog, om de techniek geschikt te laten zijn voor het Urimobconcept. Ook de toename in de zoutlast van het effluent is een nadeel.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

Het oordeel m.b.t. de toepasbaarheid in het Urimob concept geldt ook voor de decentrale stationaire voorbehandeling. Als nabehandelingstechniek (verwijdering van medicijnresten en hormonen na de eerdere verwijdering van zuurstofvragende componenten) zijn er wellicht wel mogelijkheden. De (t.o.v. Urimob wel verminderde) toename van de zoutlast blijft een nadeel.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Ook voor decentrale stationaire behandeling wordt het gebruik van hypochloriet als hoofd-behandeling niet als geschikt gezien, maar is de inzet als nabehandelingstechniek wellicht wel mogelijk. De (verminderde) toename van de zoutlast blijft een nadeel.

**GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

Voor centrale stationaire behandeling wordt hypochloriet eveneens alleen als mogelijk geschikte nabehandelingstechniek gezien. De (verminderde) toename van de zoutlast blijft een nadeel.

**3.2.15 UV**

Met UV-behandeling is veel ervaring als methode voor desinfectie. Als referentie voor afvalwaterbehandeling is literatuur beschikbaar, voor urine is nog geen ervaring opgedaan. Een belangrijk punt is, dat de vloeistof voldoende doorlatend moet zijn voor de gekozen golf-lengte.

UV licht zorgt voor een reductieve omgeving. Het heeft daardoor geen invloed op CZV. Ook ammonium wordt niet verwijderd en eventueel aanwezig nitraat wordt gereduceerd tot nitriet. In het algemeen kan worden gesteld, dat UV geen effect zal hebben op medicijnen of hormonen, tenzij er specifieke stoffen door fotolyse kunnen worden omgezet.

**SCHAALGROOTTE**

Het proces is ook op kleine schaal stabiel.

**PROCESOMSTANDIGHEDEN**

De vereiste doseringen zijn niet bekend.

**BELASTBAARHEID**

De belastbaarheid is niet bekend.

**HULPSTOFFEN**

In principe zijn geen hulpstoffen nodig. Voor UV is een goede doorlatendheid van het water nodig. Voor zover veroorzaakt door bijvoorbeeld troebeling of kleurstoffen kunnen aanvullende stappen worden toegepast.

**STAND VAN DE TECHNIEK**

De techniek is volwassen.

**GESCHIKTHEID VOOR HET MOBIELE URIMOB CONCEPT**

Verwacht wordt, dat de indringing van het UV-licht onvoldoende zal zijn, om het proces efficiënt te laten werken.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB**

De geschiktheid voor decentrale stationaire voorbehandeling, gevolgd door Urimob wordt hetzelfde beoordeeld als de geschiktheid voor de toepassingen in het Urimob concept.

**GESCHIKTHEID VOOR DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De geschiktheid voor decentrale stationaire behandeling wordt hetzelfde beoordeeld als de geschiktheid voor de toepassingen in het voorafgaande concept.

**GESCHIKTHEID VOOR CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De geschiktheid voor centrale stationaire behandeling wordt hetzelfde beoordeeld als de geschiktheid voor de toepassingen in de andere concepten.

## 4

## VERKENNING MOGELIJKE VARIANTEN

## 4.1 MOGELIJKE COMBINATIES VAN PROCESSEN

De biologische noch de chemisch/fysische technieken alleen leiden tot het gewenste eindresultaat (vergaande verwijdering van N en P, of terugwinning van P en eventueel N, en verwijdering van hormonen en geneesmiddelen). Voor een adequate behandeling van de urine zijn combinaties van technieken derhalve noodzakelijk. In onderstaande tabel zijn de belangrijkste resultaten uit hoofdstuk 3 samengevat.

	Urinob	Decentraal + mobiel	Decentraal	Centraal	Opmerkingen bij inzet voor de verwerking van 3 maal verdunde urine
Conventionele nitrificatie-denitrificatie	-	+	+	+	nog P, hormonen en geneesmiddelen verwijderen; uit te voeren als MBR
SHARON	-	+/-	+/-	+/-	zuurstofinbreng limitatief; nog P, hormonen en geneesmiddelen
Anammox	-	-	-	-	niet inzetbaar als zelfstandige techniek
SHARON/Anammox	-	-	-	-	stabiliteitsproblemen, 2 reactoren nodig
One Step Anammox	-	-	-	+/-	zuurstofinbreng limitatief, korrels gevoelig voor neerslagen; deskundige bediening nodig; nog hormonen en geneesmiddelen
DEMON	-	+/-	+/-	+	deskundige bediening nodig; nog hormonen en geneesmiddelen
Strippen	-	-	-	-	groot volume, veel loog en veel energie
Ionenwisseling	-	-	-	-	beperkte adsorptie capaciteit
Concentreren (verdampen/vriesdooien)	-	-	-	-	geen rest warmte/energie beschikbaar, mobiele uitvoering niet uitvoerbaar
Concentreren (electrodialyse)	-	+/-	-	-	onvolledige scheiding van componenten, energieverbruik hoog, voordeel als voorbehandeling is minder volume voor vervoer
Trickling filter	-	-	-	-	niet geschikt voor hoge belasting
Actieve kool	+	+	+	+	uitsluitend als nabehandeling
Precipitatie fosfor als hydroxyapatiet	-	-	-	-	niet geschikt als meststof, wellicht wel als grondstof voor P-productie
Precipitatie fosfor als struviet	+/-	+	+	+	bezinking na precipitatie in mobiel systeem lastig
Ozon	-	-	+	+	niet mobiel, wel stationair toepasbaar
Advanced oxidation	-	-	-	-	vereist zeer hoge dosis i.v.m. scavenging
Natriumhypochloriet	-	-	-	-	hoog verbruik, risico's
UV	-	-	-	-	UV doorlaatbaarheid te gering

In dit hoofdstuk worden verschillende varianten geschetst en beoordeeld. Elke variant bestaat uit een combinatie van technieken. Opgemerkt moet worden dat een aantal technieken nog niet voorbij de laboratoriumfase is gekomen (Mauer 2006).

## 4.2 HET MOBIELE URIMOB CONCEPT

De doelstelling van het mobiele Urimob concept is de kleinschalige mobiele verwerking, gericht op de verwijdering van N, P, hormonen en geneesmiddelen, met mogelijke terugwinning van N en P. Specifiek voor het Urimob concept resten alleen (combinaties van) fysisch chemische technieken. De volgende varianten kunnen worden genoemd.

### 4.2.1 VARIANT 1: HERGEBRUIK N ÉN P.

Variant 1 is gericht op maximaal hergebruik van P én N. Deze variant is niet gericht op de verwijdering van CZV en (rest)N. Maar het gebruik van een oxidatiestap, bedoeld voor de verwijdering van medicijnen/hormonen, resulteert óók in de verwijdering van (het merendeel van) het CZV. Het gehalte aan (rest)N-totaal veranderd door de oxidatie niet. De stappen zijn:

- 1 eventueel indikken;
- 2 doseren fosforzuur;
- 3 struvietvorming;
- 4 chemische oxidatie met ozon;
- 5 eventueel nabehandeling met actief kool.

### 4.2.2 VARIANT 2: HERGEBRUIK P.

Variant 2 is gericht op maximaal hergebruik van P. Ook in deze variant is de verwijdering van CZV geen doel, maar vind plaats door de opgenomen chemische oxidatie stap, gericht op de verwijdering van medicijnen/hormonen:

- 1 struvietvorming;
- 2 chemische oxidatie met ozon;
- 3 eventueel nabehandelen met actief kool.

Op voorhand kunnen bij deze varianten de volgende onderzoeksvragen worden geformuleerd:

- struvietprecipitatie:
  - struvietvormingkinetiek;
  - verwijderingrendement;
  - bezinkbaarheid struviet;
  - zuiverheid struviet;
- ozonisatie:
  - ozonverbruik;
  - afname CZV;
  - stofoverdracht;
  - omzetting hormonen en geneesmiddelen;
- samenstelling behandelde urine.

Bepalend voor de haalbaarheid is de toepasbaarheid van oxidatie met behulp van ozon. De vereiste ozonproductie is niet realiseerbaar in mobiel bedrijf. Verder resulteert behandeling met actief kool alleen niet in volledige (c.q. vergaande) verwijdering van medicijnresten en hormonen. En de verwijdering (bezinking) van struviet is in mobiel bedrijf niet mogelijk.

**Conclusie: Om deze redenen valt het Urimob-concept af als realiseerbaar concept.**

### 4.3 DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB

De doelstelling van de decentrale stationaire voorbehandeling is de verwijdering van N. De mobiele vervolgstap (Urimob) is gericht op de verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen, met mogelijke terugwinning van P.

De inzetbare biologische technieken met de aanvullend in te zetten fysisch chemische technieken zijn:

#### 4.3.1 VARIANT 1: CONVENTIONEEL

Conventionele denitrificatie-nitrificatie (MBR), aan te vullen met verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen middels:

- struvietprecipitatie;
- ozon en eventueel actief kool;

#### 4.3.2 VARIANT 2: SHARON

SHARON, mits de verdunde urine verder wordt verdund; aan te vullen met verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen middels:

- struvietprecipitatie;
- ozon en eventueel actief kool.

Nog openstaande onderzoeksvragen zijn:

- SHARON:
  - testen van het influent op toepasbaarheid;
  - oplossen van het probleem van de vereiste verdunning;
  - verkrijgbaarheid kleine plaatbeluchters;
- struvietprecipitatie: als bij het Urimob concept;
- ozonisatie: als bij het Urimob concept;
- actief kool: belaadbaarheid, ECB en effectiviteit.

Bepalend voor de haalbaarheid van variant 1 zijn de toepasbaarheid van mobiele struvietprecipitatie en van de mobiele oxidatie met ozon. Beide technieken zijn niet toepasbaar. De behandeling met alleen actieve kool resulteert niet in volledige (c.q. vergaande) verwijdering van medicijnresten en hormonen. Om deze redenen valt variant 1 af.

Bij methode 2 is de ozonbehoefte door de voorafgaande biologische stap geringer. Een mobiele behandeling met ozon komt dan wat vereiste dosering betreft dichterbij, maar deze techniek wordt nog steeds als niet geschikt voor mobiele toepassing beschouwd. Omdat ook de bezwaren tegen de andere processtappen blijven gelden, valt methode 2 eveneens af.

Decentrale stationaire voorbehandeling, gevolgd door Urimob, gericht op de geformuleerde doelstellingen, valt derhalve af als realiseerbaar concept.

**Conclusie: Om deze redenen vallen beide varianten af als realiseerbaar concept.**

Overwogen zou nog kunnen worden, om de struvietprecipitatie niet mobiel, maar decentraal stationair uit te voeren. De bezwaren tegen de mobiele struvietprecipitatie vervallen dan. Maar omdat de problemen met de mobiele ozonbehandeling blijven bestaan is deze tussenvariant (tussen Decentraal stationaire voorbehandeling en Decentrale stationaire behandeling) niet te beschouwen als een realiseerbare optie.



#### 4.4 DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

De doelstelling van de decentrale stationaire behandeling is de verwijdering van N, P, hormonen en geneesmiddelen, met mogelijke terugwinning van N en P. De volgende varianten kunnen worden genoemd.

##### 4.4.1 VARIANT 1: N EN P VERWIJDERING

Deze variant is gericht op de verwijdering van N en P. De inzetbare biologische technieken met de aanvullend in te zetten fysisch chemische technieken zijn:

1. Conventionele denitrificatie-nitrificatie (als MBR); aan te vullen met verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen middels:
  - a. struvietprecipitatie;
  - b. ozon en eventueel actief kool;
2. SHARON, mits de verdunde urine verder wordt verdund; dan wel DEMON, aan te vullen met verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen middels:
  - a. struvietprecipitatie;
  - b. ozon en eventueel actief kool.

##### 4.4.2 VARIANT 2: N EN P TERUGWINNING

Deze variant is gericht op de terugwinning van N en P. Ten opzichte van variant 1 dient daarvoor de volgorde van de processtappen te worden aangepast:

1. Struvietvorming middels:
  - a. de aanpak met alleen MgO dosering (maximale P terugwinning) of
  - b. MgO en aanvullende P-dosering (maximale P én N terugwinning);
2. Na stap 1 a (en eventueel ook na stap 1 b) biologische (rest) N verwijdering middels:
  - a. conventionele aanpak (MBR);
  - b. of SHARON (eventueel na verdunning), One Step Anammox of DEMON;
3. Nabehandeling middels ozon en eventueel actief kool.

In beide varianten zijn nog openstaande onderzoeksvragen:

- SHARON, One Step Anammox, DEMON:
  - testen van het influent op toepasbaarheid;
  - oplossen van het probleem van de eventueel vereiste verdunning;
  - verkrijgbaarheid kleine plaatbeluchters;
- struvietprecipitatie: als bij het Urimob concept;
- ozonisatie: als bij het Urimob concept;
- actief kool: belaadbaarheid, EBCT en effectiviteit.

Bepalend voor de haalbaarheid van de verschillende subvarianten is in ieder geval de haalbaarheid van de kleinschalige toepassing van de verschillende processtappen. Op voorhand lijken daarvoor geen beletselen aanwezig te zijn. Beide varianten worden wat dat betreft technisch haalbaar geacht. De conventionele denitrificatie-nitrificatie (m.b.v. een MBR) kan als meest zekere techniek worden beschouwd voor hoog N-belaste urine. Bij lagere belasting (m.a.w. gereduceerde N-last, bereikt in stap 1 b door de P-dosering) kan de belasting te laag zijn voor de toepassing van SHARON, DEMON of One Step Anammox. Als ondergrens voor SHARON wordt wel de range 300 – 400 mg N/l gehanteerd. Voor DEMON en One Step Anammox wordt als ondergrens wel 100 mg N/l genoemd. De ondergrens voor DEMON en One Step Anammox is echter minder zeker, dan die voor SHARON.

**Conclusie: Beide varianten zijn haalbaar.**

De resulterende Decentrale stationaire varianten met de grootste te verwachten kans op goede werking zijn:

- variant 1: subvariant 1 met de stappen a en b (verwijdering van N en P);
- variant 2: subvariant 1 met stap a en dan met de stappen 2 a en 3 (verwijderen van N, terugwinnen van P);
- variant 2: subvariant 1 met stap b en dan met de stappen 2 a en 3 (terugwinnen van N, terugwinnen van P).

#### 4.5 CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

De doelstelling van de centrale stationaire behandeling is de verwijdering van N, P, hormonen en geneesmiddelen, met mogelijke terugwinning van N en P. Daarbij wordt gedacht aan tot maximaal 5 behandelingslocaties in Nederland. De transportafstand tot een centrale unit ligt daarbij in de orde van 50 km. Voor Centrale stationaire behandeling kunnen dezelfde technieken worden gebruikt als voor Decentrale stationaire behandeling, waarbij alleen de schaalgrootte verschilt. De volgende varianten kunnen worden genoemd.

##### 4.5.1 VARIANT 1: N EN P VERWIJDERING

In variant 1 wordt gestreefd naar N en P verwijdering. De inzetbare biologische technieken met de aanvullend in te zetten fysisch chemische technieken zijn:

1. conventionele denitrificatie-nitrificatie (MBR); aan te vullen met verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen middels:
  - a. struvietprecipitatie;
  - b. ozon en eventueel actief kool;
2. SHARON, mits de verdunde urine verder wordt verdund; dan wel DEMON, aan te vullen met verwijdering van P, hormonen en geneesmiddelen middels:
  - a. struvietprecipitatie;
  - b. ozon en eventueel actief kool.

##### 4.5.2 VARIANT 2: N EN P TERUGWINNING

Deze variant is gericht op de N en P terugwinning. Ten opzichte van variant 1 dient daarvoor de volgorde van de processtappen te worden aangepast:

1. struvietvorming middels:
  - a. de klassieke aanpak of
  - b. na aanvullende P-dosering;
2. na stap 1 a (en eventueel ook na stap 1 b) biologische (rest) N verwijdering middels:
  - a. conventionele aanpak, MBR;
  - b. SHARON (eventueel na verdunning), One Step Anammox of DEMON;
3. nabehandeling middels ozon en eventueel actief kool.

In beide varianten zijn nog openstaande onderzoeksvragen:

- SHARON, One Step Anammox, DEMON;
- testen van het influent op toepasbaarheid;
- oplossen van het probleem van de eventueel vereiste verdunning;
- verkrijgbaarheid kleine plaatbeluchters;
- struvietprecipitatie: als bij het Urimob concept;
- ozonisatie: als bij het Urimob concept;
- actief kool: belaadbaarheid, EBCT en effectiviteit.

Bepalend voor de haalbaarheid van de verschillende subvarianten is in ieder geval de haalbaarheid van de kleinschalige toepassing van de verschillende processtappen. Op voorhand lijken daarvoor geen beletselen aanwezig te zijn. Beide varianten worden wat dat betreft technisch haalbaar geacht. De conventionele denitrificatie-nitrificatie, m.b.v. een MBR kan als meest zekere techniek worden beschouwd voor hoog N-belaste urine. Bij lagere belasting (m.a.w. gereduceerde N-last, bereikt in stap 1 b door de P dosering) kan de belasting te laag zijn voor de toepassing van SHARON, DEMON of One Step Anammox. Als ondergrens voor SHARON wordt wel de range 300 – 400 mg N/l gehanteerd. Voor DEMON en One Step Anammox wordt als ondergrens wel 100 mg N/l genoemd. De ondergrens voor DEMON en One Step Anammox is echter minder zeker, dan die voor SHARON.

**Conclusie: beide varianten zijn haalbaar.**

De resulterende Centrale stationaire varianten met de grootste te verwachten kans op goede werking zijn:

- variant 1: subvariant 1 met de stappen a en b (verwijdering van N en P);
- variant 2: subvariant 1 met stap a en dan met de stappen 2 a en 3 (verwijderen van N, terugwinnen van P);
- variant 2: subvariant 1 met stap b en dan met de stappen 2 a en 3 (terugwinnen van N, terugwinnen van P).

#### 4.6 ADDITIONELE VARIANT MET DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING

In dit additionele concept wordt afgeweken van de eerder geformuleerde doelstellingen. Deze variant is gericht op een vergaande volumereductie waardoor de transportkosten worden verminderd. Door de toepassing van decentrale stationaire electro-dialyse wordt bereikt dat het nog te vervoeren volume sterk wordt gereduceerd.

##### 4.6.1 VARIANT 1:

Decentrale stationaire electro-dialyse waarbij 60 – 70 % van de vloeibare urine met de hormonen en geneesmiddelen achterblijft en behandeld wordt met ozon en eventueel actief kool. De overige geconcentreerde 40 - 30 % bevat het merendeel van de nutriënten en kan:

- a. mobiel worden behandeld (struvietprecipitatie, eventueel met fosforzuur dosering);
- b. of eventueel direct worden afgezet als vloeibare meststof (dus de vervolgbehandeling blijft achterwege).

##### 4.6.2 VARIANT 2:

Decentrale stationaire electro-dialyse waarbij 60 - 70 % van de vloeibare urine met hormonen en geneesmiddelen achterblijft en behandeld wordt met ozon en eventueel actief kool. De overige geconcentreerde 40 - 30 % wordt:

- c. centraal behandeld middels struvietprecipitatie, gevolgd door biologische N verwijdering;
- d. centraal behandeld middels struvietprecipitatie ná aanvullende P-dosering, eventueel gevolgd door aanvullende biologische N verwijdering;
- e. centraal behandeld middels struvietprecipitatie ná aanvullende P-dosering, waarna de verwijdering van eventueel resterend N plaats vindt in de RWZI;
- f. of eventueel direct afgezet als vloeibare meststof.

Onderzoeksvragen zijn:

- al dan niet verhoogde afzetting van urinesteen door de indikking (struvietprecipitatie op ongewenste plekken, resulterend in verstoppingen);
- toelaatbaarheid van het zout in het concentraat (en dus eventueel in de mest);
- regelgeving met betrekking tot de toepassing van meststoffen.

Bepalend voor de haalbaarheid is voor:

- alle varianten het daadwerkelijke gedrag van de componenten in urine bij electrolyse (verdeling CZV, adsorptie van hormonen en geneesmiddelen aan de membranen met geleidelijke doorbraak door het membraan);
- variant 1 a de toepasbaarheid van mobiele struvietprecipitatie;
- variant 1 b de mogelijkheid, om het restvolume binnen de bestaande regels daadwerkelijk als meststof af te zetten;
- variant 2 a de haalbaarheid van de centrale struvietprecipitatie;
- variant 2 b de haalbaarheid van de centrale biologische N-verwijdering;
- variant 2 d de mogelijkheid, om het restvolume binnen de bestaande regels daadwerkelijk als meststof af te zetten.

Inzake de afzet als meststof ontbreekt op dit moment een helder wettelijk kader. Vermoedelijk is er sprake van “lozing van afvalwater in de bodem”, althans voor onverdunde urine. Bij opslag onder 20 C kunnen bacteriofagen in urine overleven. Geadviseerd wordt, om verdunde urine gedurende 6 maanden bij meer dan 20 C op te slaan (Vinneras *et al*, 2008). EAWAG heeft een demonstratieproject waarbij urine uit de Kantonbibliotheek wordt behandeld met ED en past ozon toe voor desinfectie (Larsen *et al*, 2007). Het product wordt als meststof onder de naam Urexit op de markt gebracht.

De behandelde urine is een product, de behandeling is bewust gericht op het produceren van een meststof. Maar voor de afzet als meststof is toelating als meststof nodig, conform het “Protocol beoordeling Stoffen Meststoffenwet”. Anderzijds kent het Ministerie van Landbouw de mogelijkheid van demonstratieprojecten. Een andere mogelijkheid is de verwerking tot kunstmest. In dat geval dient te worden gestreefd naar toelating als “EEG-meststof”. Vermoedelijk is er sprake van een moeilijk en langdurig toelatingstraject.

Samenvattend dient te worden gesteld, dat de directe afzet als mest zowel als de indirecte afzet als kunstmest op dit moment niet mogelijk is. In het kader van de onderhavige studie zijn de mogelijkheden voor toepassing op kortere of langere termijn (demonstratieprojecten respectievelijk EEG-meststof) niet verder onderzocht.

**Conclusie: Varianten 1 a en b en 2 d vallen af; de varianten 2 a, 2 b en 2 c lijken op dit moment het meest haalbaar.**

# 5

## UITWERKING VAN DE GESELECTEERDE VARIANTEN

In dit hoofdstuk wordt voor de geselecteerde varianten nader ingegaan op:

- de stroomschema('s);
- de kosten.

### 5.1 MOBIELE URIMOB CONCEPT

Zoals besproken in paragraaf 4.2 valt het Urimob concept af als realiseerbaar concept.

### 5.2 DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING, GEVOLGD DOOR URIMOB

Zoals besproken in paragraaf 4.3 valt decentrale stationaire behandeling, gevolgd door Urimob (mobiele vervolgbehandeling), af als realiseerbaar concept.

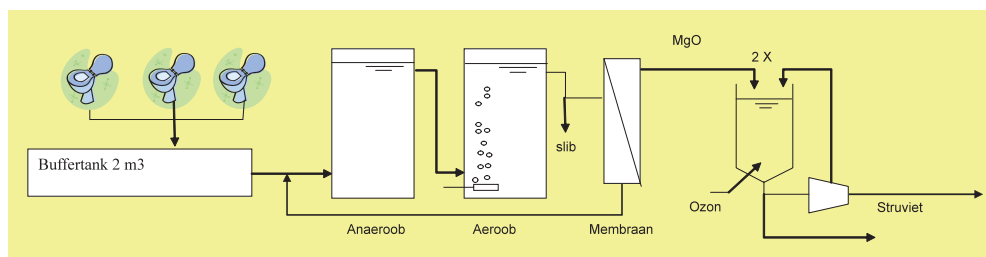
### 5.3 DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

#### 5.3.1 DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING, VARIANT 1

Deze variant is gericht op de maximale verwijdering van N en terugwinning van P. De processtappen zijn:

1. conventionele denitrificatie-nitrificatie (MBR);
2. struvietprecipitatie;
3. ozon en eventueel actief kool;

Doordat de biologische N-verwijdering geschakeld is vóór de fysisch-chemische P verwijdering wordt de CZV-inbouw in de gevormde struviet geminimaliseerd.

**STROOMSCHEMA****GRONDSLAGEN**

Beschrijving	continue denitrificatie-nitrificatie in MBR, batch proces voor struvietvorming en ozonisatie, dosering MgO, verwijdering struviet, ozonisatie supernatant
Debiet	1,5 l/h
Ammoniumgehalte urine	1.760 mg N/l (125,7 mmol N/l)
o-Fosfaatgehalte urine	120 mg P/l (3,9 mmol P/l)
CZV	2.270 mg O <sub>2</sub> /l, na bioloog 100 mg/l
Verdere detaillering:	Appendix 1

**INVESTERINGSKOSTEN**

MBR	€	13.200
struvietprecipitatie	-	4.300
ozonstap	-	3.800 (continue, dan schaal g/h)
actief kool stap	-	50
investering totaal	-	21.350
kapitaalskosten	€/m <sup>3</sup>	157 (annuïteit 15 j, 5%/j)

**VARIABELE KOSTEN**

zuivering	€/m <sup>3</sup>	18
struvietprecipitatie	-	12
ozonstap	-	43
actief kool stap	-	53
bediening, onderhoud	-	21
vervoer	-	457

**TOTALE KOSTEN**

totaal	€/m <sup>3</sup>	761
totaal ex vervoer	€/m <sup>3</sup>	304

De kosten kunnen slechts als indicatie worden gezien. De installatie is te kleinschalig om betrouwbaar te kunnen rammen. Om een en ander in perspectief te plaatsen: het maakt voor de variabele kosten aanmerkelijk uit, of de verlichting in de ruimte van de zuivering wel of niet blijft ingeschakeld. De hoge vervoerskosten vloeien voort uit de aanname, dat er per jaar 3.000 km moet worden gereden, om een geringe hoeveelheid behandelde urine af te voeren. Uiteraard dient te worden gekozen voor lozing op het riool.

### 5.3.2 DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING, VARIANT 2.1.A

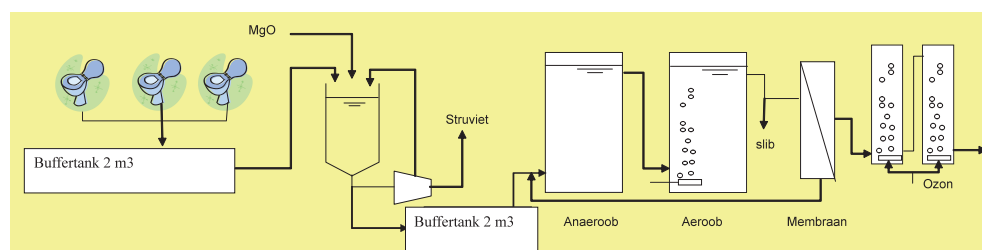
Deze variant is gericht op de maximale terugwinning van P en vergaande verwijdering van N. Ten opzichte van de Decentrale stationaire variant 1 dient daarvoor de volgorde van de processtappen te worden aangepast:

- 1 struvietvorming middels magnesium dosering;
- 2 biologische rest-N verwijdering middels conventionele aanpak (MBR);
- 3 nabehandeling middels ozon en eventueel actief kool.

Doordat de P verwijdering geschakeld is voor de biologische N-verwijdering is er ten opzichte van variant 1 meer kans op inbouw van CZV in de gevormde struviet. De aanwezigheid van organisch materiaal kan belemmerend werken op de afzetmogelijkheden.

Na de precipitatie is nog meer dan 1.500 mg/l ammonium (en 5 mg/l rest-fosfaat) aanwezig. Het ammonium wordt door middel van nitrificatie/denitrificatie biologisch verwijderd. Tot slot zal door ozonisatie vervolgens de eventueel overgebleven ammonium omgezet worden in nitraat en zal een deel van het rest-CZV oxideren. Bovendien zullen ook hormonen en geneesmiddelen op deze wijze worden verwijderd.

#### STROOMSCHEMA



#### GRONDSLAGEN

Beschrijving	dosering MgO, verwijdering struviet in batchproces, continue denitrificatie-nitrificatie in MBR, ozonisatie
Debiet	1,5 l/h
N-NH <sub>4</sub> , ingaand	1.760 mg N/l (125,7 mmol N/l)
N-NH <sub>4</sub> , na struvietstap	> 1.500 mg N/l
o-Fosfaatgehalte urine	120 mg P/l (3,9 mmol P/l)
CZV	in 2.270 mg O <sub>2</sub> /l; uit 100 mg O <sub>2</sub> /l
Verdere detaillering:	vergelijkbaar met variant 1 in Appendix 1

#### INVESTERINGSKOSTEN

De investeringskosten zijn vergelijkbaar met de investeringskosten van de Decentrale stationaire behandeling, variant 1.

#### VARIABLE KOSTEN

De variabele kosten zijn vergelijkbaar met de variabele kosten van de Decentrale stationaire behandeling, variant 1.

#### TOTALE KOSTEN

De totale kosten zijn vergelijkbaar met de totale kosten van de Decentrale stationaire behandeling, variant 1: 304 €/m<sup>3</sup>.

### 5.3.3 DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING, VARIANT 2.1.B

Deze variant is gericht op de maximale terugwinning van P én N. Ten opzichte van de Decentrale stationaire variant 2.1.a dient daarvoor aanvullend een P-dosering te worden toegepast.

De stappen zijn:

- 1 struvietvorming middels magnesiumdosering en P-dosering;
- 2 biologische rest-N verwijdering middels conventionele aanpak (MBR);
- 3 nabehandeling middels ozon en eventueel actief kool.

Aan de urine wordt ortho-fosfaat gedoseerd in de vorm van een oplossing van trinatrium fosfaat. Dit heeft de voorkeur boven het doseren van fosforzuur, omdat fosforzuur de pH sterk beïnvloed. De urine wordt vervolgens een vlokkendeken kristallisator ingeleid, waar  $MgO$  of  $MgCl_2$  wordt toegevoegd om de kristallisatie van struviet te initiëren. Struviet wordt in de vorm van een vlokkendeken gevormd en als slib afgetapt. Het supernatant en het struviet kunnen vervolgens door een decanter of centrifuge gescheiden, waarna het supernatant wordt teruggeleid in de reactor. Op de onderhavige schaalgrootte is een (zakken)filter echter vermoedelijk een beter alternatief.

Het heeft de voorkeur om bij de struvietprecipitatie fosfaat te doseren tot licht onder de equimolaire verhouding tussen P en N. Op deze wijze kan 80 – 90 % van de nutriënten uit de urine worden verwijderd. Dit betekent dat na precipitatie nog circa 150 mg/l ammonium en 5 mg/l fosfaat aanwezig is.

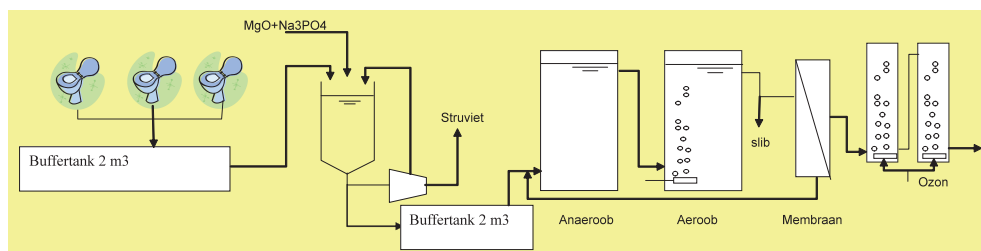
Na de biologische behandeling worden hormonen en geneesmiddelen verwijderd met behulp van ozon.

De behandelde urine wordt vervolgens opgeslagen in een buffervat en kan worden geloosd. De behandelde urine zal voornamelijk bestaan uit een geconcentreerde zoutoplossing.

Doordat de struvietvorming plaats vindt voordat er stikstof is verwijderd is er een verhoogde kans op de inbouw van CZV in de struviet. De aanwezigheid van organisch materiaal in de struviet kan nadelig zijn voor de afzetmogelijkheden.

Naar de uitwerking is variant 2.1.b gelijkwaardig aan 2.1.a, behoudens de fosfaatdosering.

#### STROOMSCHEMA



#### GRONDSLAGEN

Beschrijving	dosering $MgO$ en $Na_3PO_4$ , verwijdering struviet, continue denitrificatie-nitrificatie in MBR, ozonisatie supernatant
Debiet	1,5 l/h
N-NH <sub>4</sub> , ingaande urine	1.760 mg N/l (125,7 mmol N/l)
N-NH <sub>4</sub> , ingaand MBR:	150 mg N/l
o-Fosfaatgehalte urine:	120 mg P/l (3,9 mmol P/l)
o-Fosfaatgehalte MBR:	5 mg P/l
CZV	in 2.270 mg O <sub>2</sub> /l; uit 100 mg O <sub>2</sub> /l
Verdere detaillering:	vergelijkbaar met variant 1 in Appendix 1 (MBR volumina echter circa 10 maal kleiner)



**INVESTERINGSKOSTEN**

Door de lagere N-last kan de MBR ruwweg een factor 10 kleiner worden gemaakt. Door schaalnadeel effecten daalt de investering echter minder dan een factor 10. De kapitaalskosten per m<sup>3</sup> nemen hierdoor toe.

De omvang van de installatie is vergelijkbaar met een laboratorium opstelling. De technische realiseerbaarheid als permanente opstelling wordt ingeschat als laag.

**VARIABELE KOSTEN**

De variabele kosten nemen nog toe door de aanvullende P-dosering. Voor een verwijdering van 85% van de N is een dosering van 104 mMol P/l nodig. Berekend als fosforzuur komt dit overeen met 10,2 g fosforzuur/l. De variabele kosten nemen hierdoor toe met 8,40 /m<sup>3</sup>.

**TOTALE KOSTEN**

Ten opzichte van de Decentrale stationaire behandeling variant 1 en 2.1.a nemen de totale kosten per m<sup>3</sup> indicatief met 25 - 50% toe tot in de orde van 400 /m<sup>3</sup>.

**5.4 CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING**

De doelstelling van de centrale stationaire behandeling is de verwijdering van N, P, hormonen en geneesmiddelen, met mogelijke terugwinning van N en P. Daarbij wordt gedacht aan tot maximaal 5 behandelingslocaties in Nederland. De centrale urine behandelingen zijn in principe gelijk aan de decentrale behandelingsmogelijkheden. Operationele voordelen zijn te verwachten vanwege de schaalgrootte en vanwege de (snellere) beschikbaarheid van deskundig personeel op een centrale behandelingslocatie.

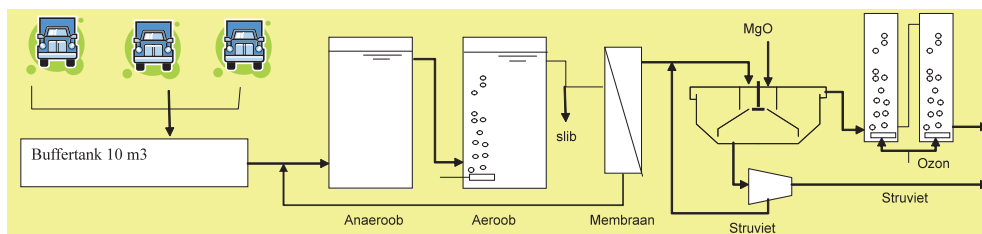
**5.4.1 CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING, VARIANT 1**

Deze variant is gericht op de maximale verwijdering van N en terugwinning van P. Als haalbare variant is geformuleerd:

- 1 conventionele denitrificatie-nitrificatie (MBR);
- 2 struvietprecipitatie;
- 3 ozon en eventueel actief kool.

In deze variant wordt de urine opgehaald en centraal behandeld. Uitgegaan is van een centrale behandelingscapaciteit van 25 l/h, hetgeen ruwweg overeenkomt met 15 à 16 adressen. Het systeem gaat uit van een membraanbioreactor voor verwijdering van N. Vervolgens vindt een struvietprecipitatie plaats in slibdeken en wordt het supernatant geozoniseerd voor verwijdering van geneesmiddelen en hormonen. Mogelijk is een bypass noodzakelijk om te zorgen voor voldoende NH<sub>4</sub> bij de struvietvorming.

Doordat er eerst stikstof verwijdering plaats vindt en pas daarna struvietvorming is er een lagere kans op de inbouw van CZV in de struviet. De resulterende lagere aanwezigheid van organisch materiaal in de struviet kan voordelig zijn voor de afzetmogelijkheden.

**STROOMSCHEMA****GRONDSLAGEN**

Beschrijving	Urine ophalen op 15 à 16 adressen en vervolgens centraal behandelen met continue denitrificatie-nitrificatie in MBR, struvietvorming en ozonisatie
Debiet	25 l/h
Ammoniumgehalte urine	1.760 mg N/l (125,7 mmol N/l)
o-Fosfaatgehalte urine	120 mg P/l (3,9 mmol P/l)
CZV	in 2.270 mg O <sub>2</sub> /l; uit 100 mg O <sub>2</sub> /l
Verdere detaillering	Appendix 2

**INVESTERINGSKOSTEN**

MBR	€	22.200
struvietprecipitatie	-	5.000
ozonstap	-	4.500 (continue, dan schaal g/h)
actief kool stap	-	50
investering totaal	-	31.750
kapitaalskosten	€/m <sup>3</sup>	14 (annuïteit 15 j, 5%/j)

**VARIABELE KOSTEN**

zuivering	€/m <sup>3</sup>	3
struvietprecipitatie	-	1
ozonstap	-	43
actief kool stap	-	38
bediening, onderhoud	-	1
vervoer	-	22

**TOTALE KOSTEN**

totaal	€/m <sup>3</sup>	122
totaal ex vervoer	€/m <sup>3</sup>	100

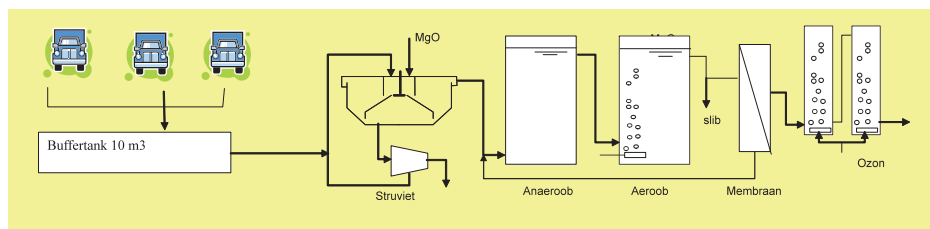
**5.4.2 CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING, VARIANT 2.1.A**

Deze Centrale stationaire variant is gericht op de maximale terugwinning van P en vergaande verwijdering van N. Ten opzichte van de Centrale stationaire variant 1 dient daarvoor de volgorde van de processtappen te worden aangepast.

- 1 struvietvorming middels magnesium dosering;
- 2 biologische rest-N verwijdering middels MBR;
- 3 nabehandeling middels ozon en eventueel actief kool.

Doordat de struvietvorming plaats vindt voordat er stikstof is verwijderd is er een verhoogde kans op de inbouw van CZV in de struviet. De aanwezigheid van organisch materiaal in de struviet kan nadelig zijn voor de afzetmogelijkheden.

### STROOMSCHEMA



### GRONDSLAGEN

Beschrijving	Urine ophalen op 15 à 16 adressen en vervolgens centraal behandelen middels struvietvorming met MgO dosering, continue denitrificatie-nitrificatie in MBR en ozon
Debiet	25 l/h
Ammoniumgehalte urine	1.760 mg N/l (125,7 mmol N/l)
o-Fosfaatgehalte urine	120 mg P/l (3,9 mmol P/l)
CZV	2.270 mg O <sub>2</sub> /l, na MBR 100 mg/l
Verdere detaillering	Appendix 2

### INVESTERINGSKOSTEN

De investeringskosten zijn vergelijkbaar met Centrale stationaire behandeling, variant 1.

### VARIABELE KOSTEN

De variabele kosten zijn vergelijkbaar met Centrale stationaire behandeling, variant 1.

### TOTALE KOSTEN

De totale kosten zijn vergelijkbaar met de totale kosten van de Centrale stationaire behandeling, variant 1: 100 /m<sup>3</sup>.

#### 5.4.3 CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING, VARIANT 2.1.B

Deze variant is gericht op de maximale terugwinning van P én N. Ten opzichte van de Centrale stationaire variant 2.1.a dient daarvoor aanvullend P te worden gedoseerd. De stappen zijn:

- 1 struvietvorming middels de magnesium dosering en aanvullende P-dosering;
- 2 biologische rest-N verwijdering middels conventionele aanpak(MBR);
- 3 nabehandeling middels ozon en eventueel actief kool.

Er wordt ortho-fosfaat gedoseerd in de vorm van een oplossing van trinatrium fosfaat. Dit heeft de voorkeur boven het doseren van fosforzuur, omdat fosforzuur de pH sterk beïnvloed. De urine wordt vervolgens een vlokkendeken kristallisator ingeleid, waar MgO of MgCl<sub>2</sub> wordt toegevoegd om de kristallisatie van struviet te initiëren. Struviet wordt in de vorm van een vlokkendeken gevormd en als slib afgetapt. Het supernatant en het struviet worden vervolgens door een decanter of centrifuge gescheiden, waarna het supernatant wordt teruggeleid in de reactor.

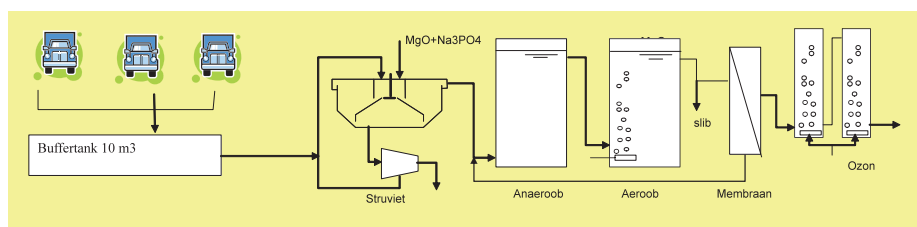
Het heeft de voorkeur om bij de struvietprecipitatie fosfaat te doseren tot licht onder de equimolaire verhouding tussen P en N. Op deze wijze kan 80 – 90 % van de nutriënten uit de urine worden verwijderd. Dit betekent dat na precipitatie nog circa 150 mg/l ammonium en 5 mg/l fosfaat aanwezig is.

Na de biologische behandeling wordt het effluent behandeld met ozongas, waarbij het resterend CZV wordt omgezet en de microverontreinigingen worden geoxideerd. De behandelde urine wordt vervolgens opgeslagen in een buffer en kan worden geloosd. De behandelde urine zal voornamelijk bestaan uit een geconcentreerde zoutoplossing.

Doordat er eerst stikstof verwijdering plaats vindt en pas daarna struvietvorming is er een lagere kans op de inbouw van CZV in de struviet. De resulterende lagere aanwezigheid van organisch materiaal in de struviet kan voordelig zijn voor de afzetmogelijkheden.

Naar de uitwerking is variant 2.1.b gelijkwaardig aan 2.1.a. Het enige verschil is de fosfaatdoserings.

### STROOMSCHEMA



### GRONDSLAGEN

Beschrijving	Urine ophalen op 15 à 16 adressen en vervolgens centraal behandelen middels struvietvorming na P en MgO dosering, continue denitrificatie-nitrificatie in MBR en ozon
Debiet	25 l/h
N-NH <sub>4</sub> , ingaand	1.760 mg N/l (125,7 mmol N/l)
N-NH <sub>4</sub> , na struvietstap	150 mg N/l
o-Fosfaatgehalte urine	120 mg P/l (3,9 mmol P/l)
CZV	2.270 mg O <sub>2</sub> /l
Verdere detaillering	Appendix 2, behoudens kleinere reactorvolumina voor de MBR

### INVESTERINGSKOSTEN

Door de lagere N-last kan de MBR ruwweg een factor 10 kleiner worden gemaakt. Door schaalnadeel effecten daalt de investering echter minder dan een factor 10. Indicatief zullen de kosten liggen op het niveau van de decentrale stationaire variant, circa € 13.200. Voor de MBR dalen de kapitaalkosten per m<sup>3</sup>. De overige investeringen blijven vergelijkbaar. De resulterende kapitaalslasten dalen tot 10 €/m<sup>3</sup> (was 14 €/m<sup>3</sup>).

### VARIABELE KOSTEN

De variabele kosten nemen toe door de aanvullende P-dosering. Voor een verwijdering van 85% van de N is een dosering van 104 mMol P/l nodig. Berekend als fosforzuur komt dit overeen met 10,2 g fosforzuur/l. De variabele kosten nemen hierdoor toe met 8,40 €/m<sup>3</sup>.

## TOTALE KOSTEN

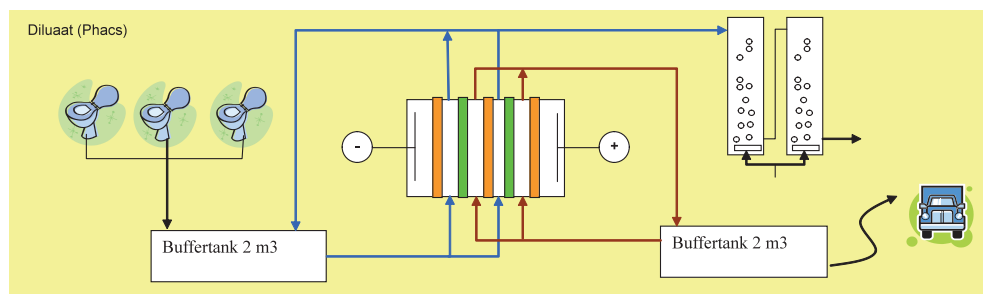
Ten opzichte van de Centrale stationaire behandeling variant 1 en 2.1.a nemen de totale kosten per m<sup>3</sup> toe tot in de orde van 120 €/m<sup>3</sup>.

## 5.5 ADDITIONELE ELECTRODIALYSE VARIANT MET DECENTRALE STATIONAIRE VOORBEHANDELING EN CENTRALE NABEHANDELING

Zoals in paragraaf 3.2.5 besproken wordt bij de additionele Electrodialyse varianten afgeweken van de in paragraaf 1.1 geformuleerde doelstellingen. Van de in paragraaf 3.2.5 besproken ED-varianten lijken de varianten 2a, 2b en 2c op dit moment het meest haalbaar. In deze paragraaf wordt voor de kostenindicatie variant 2b nader uitgewerkt. Variant 2 b is een behandeling in 2 stappen:

- decentrale stationaire voorbehandeling: electrodialyse van de urine en ozonbehandeling van het diluaat (maximaal 65% van het volume, minimaal 10% van N, P en CZV, maximaal 90% van de hormonen en geneesmiddelen), eventueel nog aangevuld met een actief kool behandeling. Dit diluaat wordt na behandeling geloosd op het riool;
- centrale behandeling van het concentraat (minimaal circa 30% van het volume, maximaal 90% van het N, P en CZV) middels struviet neerslag, voor maximale N terugwinning na aanvullende P-dosering;
- 5% van het volume komt vrij als electrodespoeling. Deze wordt direct geloosd op het riool. De samenstelling is niet bekend.

### STROOMSCHEMA



decentrale behandelingsstap: scheiden van de stroom en behandelen van diluaat met ozon, gevolgd door centrale stap: behandeling van concentraat

### GRONDSLAGEN

Beschrijving

Scheiding van N, P, hormonen en medicijnresten door ED. Het diluaat met ozon behandelen voor verwijdering van hormonen en medicijnresten en met de electrodespoeling lozen op het riool, het concentraat op 15 à 16 adressen ophalen en vervolgens centraal behandelen middels struvietvorming na P en MgO dosering. De resterende CZV bevattende stroom wordt geloosd op het riool

Decentraal

Influent

1,5 l/h

Ammoniumgehalte urine

1.760 mg N/l (125,7 mmol N/l)

o-Fosfaatgehalte urine

120 mg P/l (3,9 mmol P/l)

CZV in urine

2.270 mg O<sub>2</sub>/l

te doseren HCl, NaCl

PM

te doseren detergent

PM

## Effluent

- electrodespoeling 0,08 l/uur, onbekende samenstelling (HCl, NaCl, detergent)
- diluaat 0,98 l/uur
  - ammonium 271 mg N/l
  - o-fosfaat 18 mg P/l
  - CZV 349 mg O<sub>2</sub>/l
- concentraat 0,45 l/uur
  - ammonium 5.280 mg N/l
  - o-fosfaat 360 mg P/l
  - CZV 6.810 mg O<sub>2</sub>/l

## Centraal

Debiet	7,5 l/h
N-NH <sub>4</sub> , ingaand	5.280 mg N/l
o-Fosfaatgehalte, ingaand	360 mg P/l
o-Fosfaat doseren	11.066 mg P/l voor maximale N terugwinning
MgO doseren	10.320 mg/l voor maximale N terugwinning,
N-NH <sub>4</sub> , na struvietstap	120 mg N/l bij maximale N terugwinning

Verdere detaillering Appendix 3

**INVESTERINGSKOSTEN**

decentrale ED en O <sub>3</sub>	€	36.500	
centrale struvietprecipitatie	-	11.500	(voor 16 decentrale aanbieders)
investering totaal	-	37.000	(per aanbieder)
kapitaalskosten	€/m <sup>3</sup>	3.587	(annuïteit 15 j, 5%/j)

**VARIABLE KOSTEN**

decentrale ED en O <sub>3</sub>	€/m <sup>3</sup>	53	(inclusief membraanvervanging)
centrale struvietprecipitatie	-	15	
bediening, onderhoud	-	27	
vervoer	-	122	

**TOTALE KOSTEN**

totaal	€/m <sup>3</sup>	491
totaal ex vervoer	€/m <sup>3</sup>	369

Bij de kosten dient te worden opgemerkt, dat de hier uitgewerkte variant de ED variant met vergaande P én N terugwinning is. Dit vereist fosfaatdosering in de struvietstap. In deze stap zijn de variabele kosten hierdoor hoger, dan wanneer wordt volstaan met alleen terugwinning van P. Indien van N-terugwinning wordt afgezien dient echter aanvullend een (biologische) stikstofverwijdering te worden gerealiseerd, waardoor de kapitaalskosten stijgen. Binnen de variant zijn de kapitaalskosten en variabele kosten voor de decentrale ED en ozonisatie steeds de hoogste posten.

# 6

## PERSPECTIEVEN

### 6.1 CONCLUSIES

1. De doelstellingen (verwijderen en zo mogelijk terugwinnen van N en P en verwijderen van hormonen en medicijnen) zijn te ambitieus voor het oorspronkelijke Urimob concept (de mobiele urineverwerking). Een mobiel concept blijkt om meerdere redenen technisch niet realiseerbaar. Zowel biologische processen als fysische/chemische processen werken niet of slecht in mobiel bedrijf.
2. Datzelfde geldt ook voor de optie waarbij wordt uitgegaan van een decentrale voorbehandeling gevolgd door een mobiele nabehandeling.
3. De doelstellingen zijn wél haalbaar met een decentrale of centrale stationaire behandeling. Er zijn meerdere varianten beschikbaar die onderling verschillen in de mate waarin zowel N als P herbruikbaar worden teruggewonnen.
4. In alle uitgewerkte varianten wordt P teruggewonnen. Varianten waarbij struviet als tweede stap wordt gewonnen hebben de voorkeur omdat dan minder organisch materiaal wordt ingesloten.
5. Bij de separate behandeling van urine lijkt het schaalvoordeel bij de kostencalculaties evident. Bij de gehanteerde uitgangspunten zijn de kosten voor de verwerking van 1 m<sup>3</sup> urine bij een centrale behandeling circa 3x lager dan bij een decentrale behandeling.
6. De toegevoegde variant Electrodialyse richt zich vooral op concentratie van de urinevloeistof gevolgd door een nabehandeling. Een directe toepassing van het concentraat als meststof lijkt momenteel wettelijk niet mogelijk en is om die reden in dit onderzoek afgevallen. Bij een volledige terugwinning van N én P in combinatie met Electrodialyse liggen de kosten op een zelfde nivo als bij de volledige terugwinning van N én P bij de decentrale urinebehandeling, wel zijn de kosten voor het transport lager.

De resultaten van de uitgewerkte varianten zijn ter illustratie nog kort samengevat in onderstaande tabel

variant	€	kwal. P	N	kosten T / j	kosten transport	kosten zuivering
				per M3	per M3	per M3
mobiel	n	n	n	n	n	n
voorbeh. + mobiel	n	n	n	n	n	n
Decentraal var. 1	+	goed	-	€ 761,00	€ 457,00	€ 304,00
Decentraal var. 2.1.a	+	matig	-	€ 761,00	€ 457,00	€ 304,00
Decentraal var. 2.1.b	+	matig	+			€ 400,00
Centraal var. 1	+	goed	-	€ 122,00	€ 22,00	€ 100,00
Centraal var. 2.1.a	+	matig	-	€ 122,00	€ 22,00	€ 100,00
Centraal var. 2.1.b	+	matig	+			€ 120,00
Electrolyse 2.b	+		+	€ 491,00	€ 122,00	€ 369,00

"-" is verwijdering

"+" is winning

## 6.2 OVERWEGINGEN / DISCUSSIE

Het onderzoek had aanvankelijk als doel vooral te kijken naar mobiele verwerkingstechnieken. Gaandeweg heeft het onderzoek zich ontwikkeld tot een algemene inventarisatie van de behandelingsopties voor urine op verschillende schaalniveaus en voor verschillende omstandigheden en met verschillende doelstellingen. Uiteindelijk zijn de meest kansrijke varianten technisch en financieel uitgewerkt. Dat geeft een waardevolle eerste inschatting van de mogelijk gewenste ontwikkelingen op korte termijn. Er zijn echter ook kanttekeningen te plaatsen.

### KENNISONTWIKKELING

De studie is nadrukkelijk een quick-scan waarbij gebruik is gemaakt van algemene kentallen en aannames. Wijzigingen in de kentallen of de aannames kunnen gevolgen hebben voor de resultaten. Het kan dan gaan om de verdere stijging van de energieprijzen of het toestaan van urine (Urevit) als meststof. Ook onze kennis over de optimale schaalgrootte van de onderzochte technieken is in ontwikkeling. Dit betekent dat de studie indicatief van aard is. De studie geeft aan welke beschikbare technieken op dit moment het beste zouden kunnen worden toegepast.

### BIJ AFWEGING MEERDERE MAATSCHAPPELIJKE WAARDEN BELANGRIJK

De studie heeft zich primair gericht op het in beeld brengen van de technologische configuraties met een globale kostenindicatie. De uiteindelijke keuze voor een systeem zal van veel meer factoren afhangen. De Carbonfootprint, het energieverbruik en andere duurzaamheidsaspecten zoals het verwijderen van medicijnresten kunnen eveneens een belangrijke rol gaan spelen.



### DE KEUZE VAN HET TRANSPORTSISTEEM

De studie heeft zich gericht op een systeem waarbij de urine via korte leidingen in een tank wordt opgeslagen waarna de urine of de behandelde urine per as wordt getransporteerd. Die keuze had ook te maken met de nog erg incidenteel gelegen en zeer kleine pilotprojecten. Zeker in nieuwe situaties waarbij in grotere gebieden urine apart wordt ingezameld kan transport per leiding in de toekomst een reële optie worden. Uiteraard is de keuze voor het transportsysteem van invloed op de verwerkingsmogelijkheden van de ingezamelde urine. Interessant zou de gedachte kunnen zijn van een leiding waarin een deel van het verwerkingsproces plaats vindt. Een in de recente discussie genoemde optie is dat een deel van de denitrificatie na de struflievorming en nitrificatie wellicht in het riool zou kunnen plaatsvinden.

### VERGELIJKING MET CONVENTIONELE ZUIVERING

De studie richt zich op een kostenvergelijking tussen de verschillende varianten maar geeft tevens aan wat de referentieprijs is voor de verwerking van 1 m<sup>3</sup> verdunde urine in de conventionele zuivering. Het is verleidelijk deze kosten met elkaar te vergelijken. Om die vergelijking echter goed te kunnen maken zou bij de berekening van de conventionele kosten ook een calculatie moeten worden opgenomen voor het verwijderen van medicijnresten en hormoonstroomverstorende stoffen.

Vergelijken we echter de prijs van de centrale stationaire installatie (€ 100,= per m<sup>3</sup> excl. transport) en trekken we daar de kosten voor ozon en actief kool van af (€ 81,= per m<sup>3</sup>) dan bedragen de kosten voor de verwerking van 1 m<sup>3</sup> urine nog maar € 19,=. Dit ligt redelijk in lijn met de berekende referentieprijs van € 16,=.

Ook de omgekeerde berekening is natuurlijk interessant. Welke kosten zou je moeten maken om dezelfde hoeveelheid medicijnen en hormoonstroomverstorende stoffen uit conventioneel afvalwater te verwijderen? Behandeling van geconcentreerde deelstromen is zeker concurrerend ten opzichte van behandeling van verdunde mengstromen.

### DE GEDEFINIEERDE SCHAALGROOTE VOOR EEN CENTRALE BEHANDELING

De centrale behandeling is gedefinieerd op een omvang van 15 - 20 m<sup>3</sup> per maand. Dit is een productie die door een woonwijk van circa 125 - 170 mensen (50 - 75 woningen) wordt gerealiseerd. Op dit moment zijn er meerdere woningbouwprojecten in voorbereiding waar vanuit duurzaamheidvoorstellen zijn gedaan voor het toepassen van nieuwe sanitatie. Het betreft locaties van 1200 (Sneek, Harinxmaland) tot 7000 (Utrecht Rijnenburg) woningen. Het ligt in de lijn der verwachting dat de berekende kostprijs nog verder kan worden verlaagd indien projecten op deze schaal inderdaad worden gerealiseerd.

### 6.3 AANBEVELINGEN

- 1 Aanbevolen wordt vanwege de technische complicaties om af te zien van het verder werken aan mobiele urineverwerkingsconcepten.
- 2 Indien op korte termijn een verwerkingsunit moet worden gerealiseerd voor de verwerking van de op de verschillende locaties separaat ingezamelde urine dan is een centrale oplossing volgens variant 1 (conventionele denitrificatie-nitrificatie, aangevuld met struvietprecipitatie en ozon) op basis van de aannamen, het meest kosteneffectief. Niettemin verdient het aanbeveling na te gaan of deze variant ook uit oogpunt van duurzaamheid en klimaat/energieverbruik wel goed scoort. Een bredere afweging dan alleen een technologische haalbaarheid en kostenanalyse is gewenst.
- 3 Gelet op de snelle ontwikkelingen op het gebied van het duurzaam bouwen en de schaal-sprong die nu gemaakt wordt is het gewenst na te gaan wat de invloed is van de schaal op de vergelijking van de verschillende varianten. Daarbij zou als aanname kunnen worden gesteld dat transport via een leiding gebeurd en dat de verwerking van de urine op een schaal van 1.000 tot 10.000 woningen plaats vindt. Daarbij is het tevens interessant na te gaan welk deel van het verwerkingsproces voor of tijdens het transport in de leiding zou kunnen plaatsvinden.
- 4 Er is nog onduidelijkheid omtrent de belastbaarheid van de verschillende Anamox-installaties (Demon, Sharon, Canon). Nader onderzoek naar hun werking met een influent bestaande uit verdunde urine is gewenst.
- 5 Om in de toekomst tot goede vergelijkingen te komen tussen de behandeling van urine in een conventioneel afvalwatersysteem en separaat ingezamelde urine is het gewenst uit te gaan van gelijke normen voor het verwijderen van met name medicijnresten en hormoonstelsel-verstorende stoffen.

# LITERATUUR

- Bán, Z. & Dave, G. (2004), 'Laboratory studies on recovery of N and P from human urine through struvite crystallisation and zeolite adsorption', *Environmental technology* **25** (1), 111–121.
- Boller, M. & Gujer, W. (1986), 'Nitrification in tertiary trickling filters followed by deep-bed filters', *Water Research* **20** (11), 1363–1373.
- De Vet, Weren J.M. (2007), persoonlijke mededeling.
- EPA (2000), 'Waste Water Technology Fact Sheet, Ammonia Stripping', EPA 832-F-00-019.
- Gujer, W. & Boller, M. (1986), 'Design of a nitrifying tertiary trickling filter based on theoretical concepts', *Water Research* **20** (11), 1353–1362.
- Horan, N.J., Lowe, P. & Stentiford, E.I. (1994), 'Nutrient Removal from Wastewaters', CRC Press, 1994.
- Larsen, T. A. & Lienert, J. (2007), 'Novaquatis final report. NoMix — A new approach to urban water management', EAWAG.
- Lind, B.; Ban, Z. & Byden, S. (2000), 'Nutrient recovery from human urine by struvite crystallization with ammonia adsorption on zeolite and wollastonite', *Bioresource Technol.* **73** (2), 169 – 174.
- Mauer, M., Pronk, W. & Larsen, T.A. (2006), Treatment processes for source-separated urine, *Water Research* **40**, 3151-3166.
- Mels, A. (2007) Persoonlijke communicatie.
- Pronk, W.; Palmquist, H.; Biebow, M. & Boller, M. (2006a), 'Nanofiltration for the separation of pharmaceuticals from nutrients in source-separated urine', *Water Research* **40** (7), 1405–1412.
- Pronk, W.; Biebow, M. & Boller, M. (2006b), 'Electrodialysis for Recovering Salts from a Urine Solution Containing Micropollutants', *Environmental Science & Technology* **40** (7), 2414 -2420.
- Pronk, W.; Zuleeg, S.; Lienert, J.; Escher, B.; Koller, M.; Berner, A.; Koch, G. & Boller, M., (2007), 'Pilot experiments with electrodialysis and ozonation for the production of a fertiliser from urine', *Water Science and Technology* **56** (5), 219--227.
- Rauch, W.; Brockmann, D.; Peters, I.; Larsen, T. A. & Gujer, W. (2003), 'Combining urine separation with waste design: an analysis using a stochastic model for urine production.', *Water research* **37** (3), 681 – 689.
- Siegrist, H., Gajcy, D., Sulzer, S., Roeleveld, P., Oschwald, R., Frischknecht, H., Pfund, D., Morgeli, B. & Hungerbihler, E. (1992), 'Nitrogen elimination from digester supernatant with magnesium-ammonium-phosphate precipitation'. In Chemical Water and Wastewater Treatment II, Gothenburg Symposium, 28-30 September 1992, Nice, Springer- Verlag, Berlin.
- STOWA (2001), 'Separate urine collection and treatment', 2001-39.
- STOWA (2005), 'Desar, options for separate treatment of urine', 2005-11.
- STOWA (2005), 'Anaerobic treatment of concentrated wastewaters in desar concepts', 2005-14.
- STOWA (2006), 'Anders omgaan met huishoudelijk afvalwater', 2006-18.

- STOWA (2008), 'SHARON-Anammoxsystemen, evaluatie van rejectiewaterbehandeling op slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk', 2008-18.
- Ternes, T. (2005), 'Assessment of technologies for the removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCP) in sewage and drinking water facilities to improve the indirect potable water reuse'. Detailed report related to the overall project duration: January 1st, 2001 to June 30th, 2004 of the EU-project POSEIDON. August 2004, version January 18th 2005. [www.eu-poseidon.com](http://www.eu-poseidon.com) (17 juni 2005).
- Udert, K.; Larsen, T.; Biebow, M. & Gujer, W. (2003), 'Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system', *Water Research* **37** (11), 2571–2582.
- Udert, K. M.; Larsen, T. A. & Gujer, W. (2006), 'Fate of major compounds in source-separated urine', *Water science and technology*, **54** (11-12), 413 – 420.
- Van Dijk, J.C. & Braakensiek, H. (1984), 'Phosphate removal by crystallization in a fluidized bed', *Water Sci Technol* **17**, 133–142.
- Van Hulle, S.W.H. & Vanrolleghem, P.A. (2006), 'Titrimetrische monitoring van een laboschaal SHARON-Anammox proces', *Afvalwaterwetenschap* **5** (3), aug. 2006, 154-164
- Vinneras, B., Nordin, A., Niwagaba, C. & Nyberg, K. (2008), 'Inactivation of bacteria and viruses in human urine depending on temperature and dilution rate', *Water research*, **42**, 4067-4074.
- Voedingscentrum (2008), 'De vochtbalans', [www.voedingscentrum.nl](http://www.voedingscentrum.nl), update 26 maart 2008.
- Volcke, E.I.P. (2006), 'Modelling, analysis and control of partial nitritation in a SHARON reactor', proefschrift Universiteit van Gent.
- Voorthuizen, E. van, Zwijnenburg, A. & Meer, W. van der (2008), 'Terugwinnen van nutriënten uit zwart water vanuit een Nederlands perspectief', *Afvalwaterwetenschap* **7** (3), 160 – 168.
- Wezernak, C. & Gannon, J. (1967), 'Oxygen-nitrogen relationships in autotrophic nitrification', *Appl. Microbiol.* **15**, 1211–1215.
- Wieland, P.O. (1994), 'Designing for human presence in space — an introduction to environmental control and life support systems', Technical report (RP-1324), NASA, Appendix E/F; pages 227–251. (<http://trs.nis.nasa.gov/archive/00000204/01/rp1324.pdf>).
- Wilsenach, J.A. (2006), 'Treatment of source separated urine and its effects on wastewater systems', thesis.
- Wortel, N. & Van Dalen, R. (2007), 'Zandfiltratie op rwzi Hardewijk', *Neerslag* 2007/1, 1-11.
- Wortel, N. (2008), persoonlijke mededeling.



## APPENDIX 1

## DECENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

**INDICATIEF ONTWERP VAN DECENTRALE STATIONAIRE DENITRIFICATIE - NITRIFICATIE, MBR**

capaciteit	0,036 m <sup>3</sup> /dag, 1.200 mg N/l
opstelling	denitrificatie - nitrificatie, recirculatie
nitrificatietank	360 l
natte hoogte tank	1,5 m
denitrificatietank	180 l
C-bron dosering methanol	0,2 l/dag
recirculatiefactor	>= 20
slibgehalte	10 g ds/l
zuurstofbehoefte in beluchte reactor	maximaal 25 g/uur
beluchting:	1,6 Nm <sup>3</sup> /uur
beluchteroppervlak	0,13 m <sup>2</sup>
influentbuffer	>=100 l
effluentbuffer	2 m <sup>3</sup> of direct door naar de vervolgstap
membraanoppervlak	0,07 m <sup>2</sup>
membraanflux	20 l/m <sup>2</sup> .h
slibbuffer	PM

**INDICATIEF ONTWERP VAN DE STRUVIETPRECIPITATIE**

capaciteit	0,036 m <sup>3</sup> /dag
tank met roerwerk	500 l
natte hoogte tank	1,5 m
decanter	PM (op deze schaal voldoet een filter)

**INDICATIEF ONTWERP VAN DE OZONSTAP**

tank	100 l
natte hoogte tank	1,5 m
ozondosering	0,03 g/l

**INDICATIEF ONTWERP VAN DE ACTIEF KOOL STAP**

EBCT	15 min
bedafmetingen	werken met patronen, verbruik circa 1 kg AK/j

**DOSERINGEN**

Na <sub>3</sub> PO <sub>3</sub> (oplossing)	39,9 kg/2 m <sup>3</sup>
MgO (poeder of slurrie)	10,1 kg/2 m <sup>3</sup>
O <sub>3</sub>	3,0 kg/2 m <sup>3</sup>

**TRANSPORT**

adressen	40
gemiddelde afstand	25 km (maximale actieradius 50 km)
dieserverbruik	20 L/100 km
aantal bezoeken	3 per jaar per adres
totaal gereden afstand	3.000 km
diesel	600 L

**OPBRENGSTEN**

struviet	61,7 kg (bij 100 % precipitatie rendement)
----------	--

## APPENDIX 2

## CENTRALE STATIONAIRE BEHANDELING

**INDICATIEF ONTWERP VAN CENTRALE DENITRIFICATIE - NITRIFICATIE, MBR**

capaciteit	0,6 m <sup>3</sup> /dag, 1.200 mg N/l
nitrificatietank	6 m <sup>3</sup>
natte hoogte tank	5 m
denitrificatietank	3 m <sup>3</sup>
C-bron dosering methanol	3 l/dag
recirculatiefactor	>= 20
slibgehalte	10 g ds/l
zuurstofbehoefte beluchte reactor	maximaal 420 g/uur
beluchting	8 Nm <sup>3</sup> /uur
beluchteroppervlak	0,6 m <sup>2</sup>
influentbuffer	>= 4 m <sup>3</sup>
effluentbuffer	geen, of gering, bijvoorbeeld 2 m <sup>3</sup>
membraanoppervlak	1,25 m <sup>2</sup>
membraanflux	20 l/m <sup>2</sup> .h
slibbuffer	PM

**INDICATIEF ONTWERP VAN DE STRUVIETPRECIPITATIE OP CENTRALE LOCATIE**

oppervlaktebelasting	5-10 m/h
tank	2,5 m <sup>3</sup>
decanter/centrifuge	vermoedelijk is een filterzak voldoende

**INDICATIEF ONTWERP VAN DE OZONSTAP**

tank	250 m <sup>3</sup>
natte hoogte tank	5 m
ozondosering	0,03 g O <sub>3</sub> /l

**INDICATIEF ONTWERP VAN DE ACTIEF KOOL STAP**

EBCT	15 min
bedafmetingen	niet realiseerbaar als filterbed, werken met patronen, verbruik circa 12 kg AK/j

**DOSERINGEN**

Na <sub>3</sub> PO <sub>3</sub> (oplossing)	39,9 kg/2 m <sup>3</sup>
MgO (poeder/slurrie)	0,085 kg/d



**TRANSPORT**

adressen	16
gemiddelde afstand	25 km (maximale actieradius 50 km)
dieserverbruik	20 L/100 km
aantal bezoeken	6 per jaar per adres
totaal gereden afstand	2.400 km
diesel	480 L

**OPBRENGSTEN**

Struviet	0,5 kg/d (ex kristalwater)
----------	----------------------------

## APPENDIX 3

# DECENTRALE ED, GEVOLGD DOOR CENTRALE STRUVIETPRECIPITATIE

**INDICATIEF ONTWERP VAN DECENTRALE ED**

capaciteit	1,5 l/uur
inlaatbuffer	2 m <sup>3</sup>
terugspoelbaar screenfilter	PM
ED, effectief membraanoppervlak	33 m <sup>2</sup>
elektriciteitsgebruik ED	30 Wh/l
behandeling en opslag elektrolyt	PM
buffer concentraat	2 m <sup>3</sup>

**OZONSTAP**

tank	65 l
natte hoogte tank	1,5 m
ozondosering	0,23 g/l

**TRANSPORT NAAR CENTRALE VERWERKING**

adressen	16
gemiddelde afstand	25 km (maximale actieradius 50 km)
dieselverbruik	20 L/100 km
aantal bezoeken	2 per jaar per adres
totaal gereden afstand	800 km
diesel	160 L

**INDICATIEF ONTWERP VAN DE STRUVIETPRECIPITATIE OP CENTRALE LOCATIE**

oppervlaktebelasting	5-10 m/uur
tank	0,75 m <sup>3</sup>
decanter/centrifuge	vermoedelijk is een filterzak voldoende

**DOSERINGEN**

Na <sub>3</sub> PO <sub>3</sub> (poeder, in oplossing)	10 kg/d
MgO (poeder, in slurrie)	1,9 kg/d

**OPBRENGSTEN**

Struviet	9 kg/d (ex kristalwater)
----------	--------------------------

