

1995-08\_stikstofrijke-retourstromen-evaluatie

**stowa**

**Behandeling van stikstofrijke  
retourstromen  
op rioolwaterzuiveringsinrichtingen**

Evaluatie van Nederlandse praktijkonderzoeken

95-08

## Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen



Evaluatie van Nederlandse praktijkonderzoeken

95-08

Publicaties en het publicatieoverzicht  
van de Stowa kunt u uitsluitend  
bestellen bij:  
Hageman Verpakkers BV  
Postbus 281  
2700 AC Zoetermeer  
tel. 079-611188  
fax 079-613927  
o.v.v. ISBN- of bestelnummer en  
een duidelijk afleveradres.  
ISBN nr. 90.74476.34.1

|       |                                              |      |
|-------|----------------------------------------------|------|
|       | TEN GELEIDE                                  | iiii |
| 1     | SAMENVATTING                                 | 1    |
| 2     | INLEIDING                                    | 6    |
| 3     | SYSTEMEN                                     | 9    |
| 3.1   | Inleiding                                    | 9    |
| 3.2   | Membraan-bioreactor                          | 9    |
| 3.2.1 | <i>Beschrijving van de techniek</i>          | 9    |
| 3.2.2 | <i>Beschrijving van de proefinstallatie</i>  | 10   |
| 3.3   | Airliftreactor                               | 11   |
| 3.3.1 | <i>Beschrijving van de techniek</i>          | 11   |
| 3.3.2 | <i>Beschrijving van de proefinstallatie</i>  | 12   |
| 3.4   | Ammoniak-strippen                            | 13   |
| 3.4.1 | <i>Beschrijving van de techniek</i>          | 13   |
| 3.4.2 | <i>Beschrijving van de proefinstallaties</i> | 14   |
| 3.5   | MAP/CAFR-proces                              | 18   |
| 3.5.1 | <i>Beschrijving van de techniek</i>          | 18   |
| 3.5.2 | <i>Beschrijving van de proefinstallatie</i>  | 18   |
| 3.6   | Ervaring                                     | 19   |
| 3.7   | Onderzoekslocaties                           | 20   |
| 3.8   | Onderzoeksaspecten                           | 22   |
| 4     | BEDRIJFSVOERING                              | 24   |
| 4.1   | Inleiding                                    | 24   |
| 4.2   | Membraan-bioreactor                          | 24   |
| 4.3   | Airliftreactor                               | 25   |
| 4.4   | Ammoniakstrippen                             | 26   |
| 4.5   | MAP/CAFR-proces                              | 26   |
| 5     | RESULTATEN                                   | 28   |
| 5.1   | Inleiding                                    | 28   |
| 5.2   | Membraan-bioreactor                          | 28   |
| 5.2.1 | <i>Inleiding</i>                             | 28   |
| 5.2.2 | <i>Stikstofverwijdering</i>                  | 29   |
| 5.2.3 | <i>Verwijderingsrendementen</i>              | 31   |
| 5.2.4 | <i>Drogestofgehalte en slibaangroei</i>      | 31   |
| 5.2.5 | <i>Nitrietroute</i>                          | 32   |
| 5.2.6 | <i>Chemicaliënverbruik</i>                   | 33   |
| 5.2.7 | <i>Membraanfiltratie</i>                     | 33   |
| 5.3   | Airliftreactor                               | 34   |
| 5.3.1 | <i>Inleiding</i>                             | 34   |
| 5.3.2 | <i>Stikstofverwijdering</i>                  | 34   |

|       |                                                      |    |
|-------|------------------------------------------------------|----|
| 5.3.3 | <i>Verwijderingsrendementen</i>                      | 36 |
| 5.3.4 | <i>Drogestofgehalte en slibaangroei</i>              | 36 |
| 5.3.5 | <i>Chemicaliënverbruik</i>                           | 37 |
| 5.4   | <i>Luchtstrippen</i>                                 | 37 |
| 5.4.1 | <i>Invloed van de procescondities</i>                | 38 |
| 5.4.2 | <i>Invloed van de ammoniumconcentratie</i>           | 40 |
| 5.4.3 | <i>Werking van de scrubber</i>                       | 40 |
| 5.4.4 | <i>Werking van de katalytische verbranding</i>       | 41 |
| 5.4.5 | <i>Werking van de flocculatie/precipitatie</i>       | 41 |
| 5.4.6 | <i>Chemicaliënverbruik</i>                           | 41 |
| 5.5   | <i>Stoomstrippen</i>                                 | 41 |
| 5.5.1 | <i>Inleiding</i>                                     | 41 |
| 5.5.2 | <i>Invloed van de ammoniumingangsconcentratie</i>    | 42 |
| 5.5.3 | <i>Invloed van de procescondities</i>                | 42 |
| 5.5.4 | <i>Voorbehandeling</i>                               | 43 |
| 5.5.5 | <i>Kwaliteit van het ammoniakale water</i>           | 43 |
| 5.5.6 | <i>Chemicaliënverbruik</i>                           | 43 |
| 5.6   | <i>MAP/CAFR-proces</i>                               | 44 |
| 5.6.1 | <i>Inleiding</i>                                     | 44 |
| 5.6.2 | <i>Invloed van de procescondities</i>                | 44 |
| 5.6.3 | <i>Opwerking en recirculatie van het MAP-slib</i>    | 44 |
| 5.6.4 | <i>Algemene toepasbaarheid van het systeem</i>       | 45 |
| 5.6.5 | <i>Voorbehandeling van het stikstofhoudend water</i> | 45 |
| 5.6.6 | <i>Chemicaliënverbruik</i>                           | 45 |
| 6     | <b>TOEPASSING IN DE NEDERLANDSE PRAKTIJK</b>         | 46 |
| 6.1   | <i>Inleiding</i>                                     | 46 |
| 6.2   | <i>Membraan-bioreactor</i>                           | 47 |
| 6.2.1 | <i>Ontwerpcriteria</i>                               | 47 |
| 6.2.2 | <i>Dimensioneringsvoorbeelden</i>                    | 48 |
| 6.2.3 | <i>Kosten</i>                                        | 48 |
| 6.3   | <i>Airliftreactor</i>                                | 49 |
| 6.3.1 | <i>Ontwerpcriteria</i>                               | 49 |
| 6.3.2 | <i>Dimensioneringsvoorbeelden</i>                    | 50 |
| 6.3.3 | <i>Kosten</i>                                        | 50 |
| 6.4   | <i>Luchtstrippen</i>                                 | 51 |
| 6.4.1 | <i>Ontwerpcriteria</i>                               | 51 |
| 6.4.2 | <i>Dimensioneringsvoorbeelden</i>                    | 52 |
| 6.4.3 | <i>Kosten</i>                                        | 52 |
| 6.5   | <i>Stoomstrippen</i>                                 | 53 |
| 6.5.1 | <i>Ontwerpcriteria</i>                               | 53 |
| 6.5.2 | <i>Dimensioneringsvoorbeelden</i>                    | 53 |
| 6.5.3 | <i>Kosten</i>                                        | 54 |
| 6.6   | <i>MAP/CAFR-proces</i>                               | 55 |
| 6.6.1 | <i>Ontwerpcriteria</i>                               | 55 |
| 6.6.2 | <i>Dimensioneringsvoorbeelden</i>                    | 55 |
| 6.6.3 | <i>Kosten</i>                                        | 55 |
| 7     | <b>EVALUATIE EN CONCLUSIES</b>                       | 57 |
| 7.1   | <i>Inleiding</i>                                     | 57 |

|       |                                              |    |
|-------|----------------------------------------------|----|
| 7.2   | Membraan-bioreactor                          | 57 |
| 7.2.1 | <i>Bedrijfsvoering</i>                       | 57 |
| 7.2.2 | <i>Resultaten</i>                            | 57 |
| 7.2.3 | <i>Toepassing in de Nederlandse praktijk</i> | 58 |
| 7.3   | Airliftreactor                               | 58 |
| 7.3.1 | <i>Bedrijfsvoering</i>                       | 58 |
| 7.3.2 | <i>Resultaten</i>                            | 58 |
| 7.3.3 | <i>Toepassing in de Nederlandse praktijk</i> | 59 |
| 7.4   | Strippen                                     | 59 |
| 7.4.1 | <i>Bedrijfsvoering</i>                       | 59 |
| 7.4.2 | <i>Resultaten</i>                            | 59 |
| 7.4.3 | <i>Toepassing in de Nederlandse praktijk</i> | 59 |
| 7.5   | MAP/CAFR-proces                              | 60 |
| 7.5.1 | <i>Bedrijfsvoering</i>                       | 60 |
| 7.5.2 | <i>Resultaten</i>                            | 60 |
| 7.5.3 | <i>Toepassing in de Nederlandse praktijk</i> | 60 |
| 7.6   | Onderlinge vergelijking behandelingsmethoden | 61 |
| 7.6.1 | <i>Kosten</i>                                | 61 |
| 7.6.2 | <i>Ruimtebeslag</i>                          | 62 |
| 7.6.3 | <i>Chemicaliënverbruik</i>                   | 62 |
| 7.6.4 | <i>Energieverbruik</i>                       | 63 |
| 7.6.5 | <i>Reststoffenproblematiek</i>               | 63 |
| 7.6.6 | <i>Eenvoud van de bedrijfsvoering</i>        | 64 |
| 7.6.7 | <i>Ervaring met de methode</i>               | 64 |
| 7.6.8 | <i>Bedrijfszekerheid</i>                     | 64 |
| 7.6.9 | <i>Eenvoud van de bouw</i>                   | 64 |
| 7.7   | Conclusies                                   | 64 |

|   |             |    |
|---|-------------|----|
| 8 | REFERENTIES | 66 |
|---|-------------|----|

## Ten geleide

Door de aangescherpte stikstofeis, die vanaf 1998 voor het effluent van bestaande rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's) zal gelden, zal voor sommige rwzi's capaciteitsuitbreiding onvermijdelijk zijn. Voor andere rwzi's, die de eis van  $N_{\text{tot}} \leq 10 \text{ mg/l}$  niet halen, kunnen relatief kleine aanpassingen van het zuiveringssysteem wellicht al voldoende zijn.

De behandeling van interne stikstofrijke retourstromen, vrijkomend bij de slibverwerking na de slibgisting, biedt hier een mogelijkheid om met zo min mogelijk kosten en ruimtebeslag de stikstofeis alsnog te kunnen halen. Stikstofverwijdering uit dit retourwater - een relatief zeer geringe hoeveelheid met een relatief grote stikstofvracht - kan de stikstofbelasting op de bestaande rwzi met 10 tot 20% verlagen.

In 1994 is door een combinatie van waterkwaliteitsbeheerders, ingenieursbureaus en de STOWA een aantal behandelingsmethoden voor het stikstofrijke retourwater in de praktijk op pilot plant-schaal onderzocht:

- de membraanbioreactor op de slibverwerkingsinstallatie Sluisjesdijk door het zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden en Grontmij N.V.;
- de driefasen-airliftreactor op de rwzi Utrecht door de provincie Utrecht, Paques en DHV;
- het lucht- en stoomstrippen van ammoniak op de rwzi Utrecht door de provincie Utrecht en DHV;
- het stoomstrippen van ammoniak op de rwzi Amsterdam-Oost door de Dienst Riolerings en Waterhuishouding Amsterdam (met financiële participatie van het hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier);
- het MAP/CAFR-proces op de rwzi Utrecht door de provincie Utrecht en DHV.

Het geheel van de praktijkonderzoeken werd in opdracht van de STOWA gecoördineerd door DHV Water B.V. (projectteam bestaande uit ing. P.C.A.M. van Helvoort, ir. R.J. van der Kuij en ir. H.F. van der Roest).

De onderzoeken zijn alle in separate STOWA-rapporten gepubliceerd; ook over de afzetmogelijkheden van de reststoffen, die met name bij de fysisch/chemische behandelingsmethoden vrijkomen, is in dit kader door de STOWA gerapporteerd.

Het onderhavige rapport geeft op de punten mogelijkheden, beperkingen en kosten voor toepassing in de Nederlandse praktijk, een evaluatie van alle voornoemde praktijkonderzoeken. Deze overkoepelende rapportage werd voor de STOWA verzorgd door ing. P.C.A.M. van Helvoort, ir. J.M. Janus en ir. R.J. van der Kuij van DHV Water B.V. De resultaten van het praktijkonderzoek rechtvaardigen een verantwoorde keuze uit de beschikbare technieken en opschaling daarvan.

De werkzaamheden werden namens de STOWA begeleid door een commissie bestaande uit ir. J. Ebbenhorst (voorzitter), ir. S.G. van der Kooij, ir. A. Mulder, ing. G.B.J. Rijs, ing. A.A.J.C. Schellen, ir. P.C. Stamperius en mw. ir. M.J.L. van de Vondervoort.

Utrecht, mei 1995

De directeur van de STOWA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

### Algemeen

Vanaf 1998 zullen de bestaande rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's) aan strengere effluenteisen voor N moeten voldoen. Door de verscherpte stikstofeis zal voor sommige rwzi's uitbreiding van de capaciteit onvermijdelijk zijn. Voor andere, die net niet aan de eisen voldoen, kunnen relatief kleine aanpassingen wellicht voldoende zijn. Er wordt thans gezocht naar alternatieven, waarmee met zo min mogelijk kosten en ruimtebeslag aan de eisen kan worden voldaan.

Een veelbelovend alternatief vormt de behandeling van interne retourstromen, die vrijkomen uit de slibverwerking na de slibgisting.

Het gaat hierbij om een geringe hoeveelheid water, waarmee een relatief grote stikstofvracht naar de waterlijn van de rwzi wordt teruggevoerd. Separate behandeling van dit stikstofrijke retourwater zal de stikstofbelasting op de bestaande rwzi met 10 tot 20% verlagen, en zodoende de effluentkwaliteit verbeteren.

Het RIZA/STOWA-rapport "Stikstofverwijdering uit interne stromen op rwzi's" van december 1992 bevat een gerichte literatuurstudie naar de mogelijke behandelingstechnieken voor het stikstofrijke water.

Onder meer op basis van deze literatuurverkenning zijn de volgende systemen voor onderzoek op kleine praktijkschaal geselecteerd:

- de membraan-bioractor;
- de airliftréactor;
- het ammoniakstripproces (luchtstripper en stoomstripper);
- het MAP/CAFR-proces.

Dit praktijkonderzoek diende om van de geselecteerde systemen een beoordeling te geven van de mogelijkheden, beperkingen en kosten voor toepassing in de Nederlandse praktijk.

In het onderhavige rapport wordt een evaluatie gegeven van alle praktijkonderzoeken die in de periode januari 1994 tot oktober 1994 op de rwzi's Amsterdam-Oost en Utrecht en de slibverwerkingsinstallatie Sluisjesdijk zijn uitgevoerd aan de voornoemde systemen.

### Toepasbaarheid van de systemen

Van de onderzochte systemen kunnen de membraan-bioreactor, de airliftréactor, de stripprocessen (lucht of stoom) en het MAP-proces op praktijkschaal worden toegepast voor de behandeling van stikstofrijk retourwater, mits wordt voldaan aan een aantal randvoorwaarden voor de bedrijfsvoering. Van de genoemde systemen zijn in het praktijkonderzoek voldoende resultaten verkregen om praktijkinstallaties te dimensioneren, met uitzondering van het CAFR-systeem.

### Membraan-bioreactor

#### *Bedrijfsvoering*

De randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering zijn:

- een goede temperatuurbeheersing;
- een betrouwbare pH-regeling;
- een goede regeling van de methanoldosering;
- een stabiele membraanflux;
- een continue voeding van het biologisch systeem.

### *Resultaten*

Tijdens het onderzoek is in de membraan-bioreactor een zeer vergaande en stabiele N(Kj)-verwijdering gerealiseerd. Naast nitrificatie is ook vergaande denitrificatie mogelijk, waarbij zowel de nitraatroute als de nitrietroute kunnen worden bedreven. Het methanolverbruik bij de nitraatroute was 2,6 kg/kg  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$  en bij de nitrietroute 1,6 kg/kg  $\text{NO}_2\text{-N}_{\text{verw}}$ .

### *Toepassing in de Nederlandse praktijk*

De resultaten van de praktijkproef kunnen goed worden gebruikt voor het dimensioneren van praktijkinstallaties. De maximale stikstofvolumebelasting van de nitrificatiereactor bedraagt 4,4 kg N(Kj)/(m<sup>3</sup><sub>reactor</sub>·d) en van de denitrificatiereactor 9,8 kg N(Kj)/(m<sup>3</sup><sub>reactor</sub>·d). Het membraanoppervlak wordt bepaald door de gemiddelde membraanflux van 116 l/(m<sup>2</sup>·h).

De exploitatiekosten van de membraan-bioreactor zijn lager naarmate de stikstofconcentratie in het te behandelen water hoger is. De exploitatiekosten per kg N (Kj)<sub>verw</sub> bedragen voor een installatie van 100.000 i.e. f 16,70 - f 24,70 bij de nitraatroute en f 16,20 - f 24,30 bij de nitrietroute.

Voor een installatie van 400.000 i.e. bedragen de kosten per kg N(Kj)<sub>verw</sub> f 9,20 - f 14,20 bij de nitraatroute, respectievelijk f 8,60 - f 13,80 bij de nitrietroute.

## **Airliftreactor**

### *Bedrijfsvoering*

De randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering zijn:

- een goede pH-regeling;
- een gegarandeerde luchtinbreng;
- een continue voeding van het biologisch systeem;
- een continue anti-schuimdosering;
- een goede regeling van de methanoldosering.

### *Resultaten*

Tijdens het onderzoek heeft zich een aantal storingen voorgedaan, die gevolgen hadden voor het verloop van de proeven. De storingen hadden elk te maken met de uitvoering van de pilot-plant reactor en kunnen in een goed ontworpen praktijkinstallatie worden voorkomen.

In de airlift-reactor is oxydatie van stikstof door nitrificatie goed mogelijk. Het is mogelijk gebleken om een stabiele nitrificatie te handhaven. Het drogestofgehalte in de biofilm is hierbij 6-8 kg o.d.s./m<sup>3</sup>. In de airliftreactor heeft geen gericht onderzoek naar de mogelijkheden van denitrificatie plaatsgevonden.

### *Toepassing in de Nederlandse praktijk*

De resultaten van de praktijkproef kunnen goed worden gebruikt voor het dimensioneren van praktijkinstallaties.

De maximale stikstofvolumebelasting bedraagt 3,3 kg N(Kj)/(m<sup>3</sup><sub>reactor</sub>·d).

In de airliftreactor wordt de stikstof alleen genitrificeerd. Voor een volledige stikstofverwijdering is een separate denitrificatiestap noodzakelijk.

De exploitatiekosten van de airliftreactor met een separate denitrificatiestap worden slechts in geringe mate beïnvloed door de stikstofconcentratie voor het te behandelen water.

De exploitatiekosten van een installatie van 100.000 i.e. bedragen f 23,00 - f 24,70 per kg N(Kj)<sub>verw</sub> en voor een installatie van 400.000 i.e. f 12,40 - f 13,60 per kg N(Kj)<sub>verw</sub>.

Wanneer de denitrificatie in de bestaande rwzi kan plaatsvinden, vervalt de separate denitrificatiestap. In dat geval dalen de kosten per kg  $N(Kj)_{\text{verw}}$  voor een installatie van 100.000 i.e. tot f 15,90 - f 16,90 en voor een installatie van 400.000 i.e. tot f 8,20 - f 9,00.

## Strippen

### *Bedrijfsvoering*

De randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering zijn:

- een voorbehandeling, waarin het in het stikstofrijke water aanwezige bicarbonaat vrijwel volledig wordt verwijderd;
- een betrouwbare pH-regeling.

### *Resultaten*

Tijdens de onderzoeken naar lucht- en stoomstrippen is veel informatie verkregen over de invloed van de procescondities (pH, temperatuur, gas/vloeistof-verhoudingen) op de  $NH_4$ -N-verwijdering.

Voor het luchtstripproces is de minimaal benodigde pH afhankelijk van de striptemperatuur: bij 20°C is een pH van minimaal 10,5 nodig, terwijl bij 50°C de pH minimaal 9,5 dient te zijn. Bij het stoomstripproces is een pH van minimaal 9,0 voldoende.

Voor de behandeling van de ammoniakrijke striplucht in een scrubber moet de pH van de scrubbervloeistof minimaal 3,5 zijn. Bij katalytische verbranding van de ammoniakrijke striplucht moet de verbrandingstemperatuur tussen 280 en 300 °C liggen.

Bij het stoomstripproces kan een ammoniakale oplossing van ongeveer 25 gew.% worden verkregen door het concentreren van de ammoniakrijke stoom in een rectificeerkolom.

### *Toepassing in de Nederlandse praktijk*

Op basis van de proefresultaten is het goed mogelijk om praktijkinstallaties voor het luchtstripproces en het stoomstripproces te dimensioneren. Voor de verschillende procescondities kan de hoogte van een overdrachtstrap worden bepaald. Het aantal overdrachtstrappen is afhankelijk van het gewenste verwijderingsrendement.

Bij een striptemperatuur van 20°C is zowel de diameter van de stripkolom als de totale hoogte ervan groter dan bij een striptemperatuur van 50°C. De diameter van de scrubber is gelijk aan de diameter van de stripkolom, terwijl de hoogte enkele meters minder is.

Stoomstripinstallaties kunnen worden uitgevoerd met volledige externe stoomopwekking of met vergaande stoomopwekking uit gestript water door warmteterugwinning. De diameter van de stoomstripkolom is kleiner dan die van luchtstripinstallaties.

Het is economisch aantrekkelijker om het luchtstrippen bij verhoogde temperatuur (50°C) uit te voeren. De exploitatiekosten bedragen afhankelijk van de ingangsstikstofconcentratie voor een installatie van 100.000 i.e. f 17,90 - f 22,80 per kg  $N(Kj)_{\text{verw}}$ . Voor een installatie van 400.000 i.e. zijn de exploitatiekosten lager en bedragen f 7,60 - f 11,20 per kg  $N(Kj)_{\text{verw}}$ .

Voor het stoomstripproces zijn de exploitatiekosten voor een installatie van 100.000 i.e. f 17,90 - f 28,20 per kg  $N(Kj)_{\text{verw}}$ , bij uitvoering van volledige externe stoomopwekking en f 21,20 - f 31,20 per kg  $N(Kj)_{\text{verw}}$ , bij uitvoering met verdichting en sproeiverdamping. Voor een installatie van 400.000 i.e. zijn de exploitatiekosten f 8,20 - f 18,40 per kg  $N(Kj)_{\text{verw}}$ , voor een installatie met volledige externe stoomopwekking en f 7,70 - f 14,30 per kg  $N(Kj)_{\text{verw}}$ , voor een installatie met verdichting en sproeiverdamping.

## MAP/CAFR-proces

### *Bedrijfsvoering*

De randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering van het MAP-proces zijn:

- voorbehandeling van het stikstofrijke water, waarin zwevende stof vergaand wordt verwijderd;
- een continue meting van het ammoniakstikstofgehalte in het te behandelen water;
- een betrouwbare pH-meting.

De randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering van het opwerkingsdeel van het CAFR-proces kunnen op basis van dit onderzoek niet worden aangegeven.

### *Resultaten*

Uit het onderzoek is gebleken, dat bij keuze van de juiste procescondities (pH, molaire N:P:Mg-verhouding) een vergaande  $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering ( $\approx 90\%$ ) mogelijk is.

De verblijftijd in de reactor moet minimaal 20 minuten bedragen, terwijl de drogestofbelasting van de bezinktank lager moet zijn dan  $10 \text{ kg d.s.}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ .

Het geproduceerde MAP-slib is van goede kwaliteit.

Ten aanzien van de opwerking en hergebruik van het MAP-slib zijn alleen bruikbare resultaten op laboratoriumschaal verkregen.

### *Toepassing in de Nederlandse praktijk*

De resultaten van het onderzoek kunnen goed worden gebruikt voor het dimensioneren van praktijkinstallaties voor het MAP-proces.

De exploitatiekosten worden slechts in geringe mate beïnvloed door het stikstofgehalte in het te behandelen water. Voor een installatie van 100.000 i.e. bedragen de exploitatielasten  $f 29,10 - f 29,40$  per  $\text{kg N(Kj)}_{\text{verw.}}$ .

Voor een installatie van 400.000 i.e. zijn de exploitatielasten lager en bedragen deze  $f 13,60 - f 14,50$  per  $\text{kg N(Kj)}_{\text{verw.}}$ .

## Conclusies

Op basis van de evaluatie van de uitgevoerde onderzoeken kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd:

- De onderzochte systemen kunnen, op het CAFR-proces na, worden toegepast op praktijkschaal, mits wordt voldaan aan de randvoorwaarden voor de bedrijfsvoering.
- Het rendement van de stikstofverwijdering bedraagt bij een goed ontwerp:
  - . voor de membraan-bioreactor : 100% voor nitrificatie, 85% voor denitrificatie
  - . voor de airliftreactor : 90% voor nitrificatie, 90% voor denitrificatie
  - . voor de stripprocessen : 95% voor  $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering
  - . voor het MAP-proces : 90% voor  $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering

- De exploitatiekosten zijn sterk afhankelijk van de capaciteit van de rwzi en locatiespecifieke factoren (beschikbaarheid van warmte of stoom) en bedragen in het gunstigste geval rond f 18,- per kg N(Kj)<sub>verw.</sub> voor een installatie van 100.000 i.e. en rond f 8,- per kg N(Kj)<sub>verw.</sub> voor een installatie van 400.000 i.e.
- Er kan tussen de verschillende methoden niet of nauwelijks onderscheid worden gemaakt in ruimtebeslag en eenvoud van de bouw.  
De eenvoudigste bedrijfsvoering vindt plaats bij het MAP-proces en het luchtstripproces. De biologische systemen (membraan-bioreactor, airliftreactor) sluiten het best aan bij de op rwzi's aanwezige ervaring.  
De fysisch-chemische methoden worden bedrijfszekerder beoordeeld dan de biologische methoden. Bij de airliftreactor is het potentiële risico op langdurige verstoring bij verlies van de biologische activiteit groter.  
Praktijkervaring met behandeling van stikstofrijke retourstromen op rwzi's bestaat alleen met luchtstrippen.  
Het chemicaliënverbruik is het hoogst bij het MAP-proces en het luchtstripproces en het laagst bij de membraan-bioreactor. Het energieverbruik is het hoogst bij het stoomstripproces en het laagst bij het MAP-proces.  
De reststoffenproblematiek speelt bij de fysisch-chemische methoden het sterkst bij het MAP-proces en het luchtstripproces.

Bovenstaande conclusies zijn gebaseerd op de resultaten van het onderzoek op pilot-plantschaal en op de rekenexercities voor standaard-rwzi's. Door lokale omstandigheden kan de keuze voor een bepaalde methode worden beïnvloed.

Op 1 september 1992 is de AMvB van kracht geworden waarin grenzen worden gesteld aan de lozing van totaal-stikstof met het effluent van rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's). De hierin gestelde grenswaarden zijn:

- 10 mg totaal-N/l voor rwzi's met een ontwerpcapaciteit  $\geq 20.000$  i.e. (op basis van 54 gram BZV);
- 15 mg totaal-N/l voor rwzi's met een ontwerpcapaciteit  $< 20.000$  i.e. (op basis van 54 gram BZV).

De grenswaarden voor nieuwe rwzi's gelden met ingang van 1 september 1992, voor bestaande rwzi's gaan ze in per 1 januari 1998. Nieuwe rwzi's met simultane defosfatering mogen echter tot 1 januari 1995 een grenswaarde aanhouden van 15 mg totaal-N/l. In de AMvB van 1 september 1992 is aangegeven dat de concentratie totaal-stikstof in het te lozen afvalwater moet worden bepaald als jaargemiddelde.

De beheerder kan van de grenswaarden voor bestaande niet uit te breiden rwzi's afwijken als het zuiveringsrendement van totaal-stikstof tenminste 75% bedraagt voor alle in het beheersgebied aanwezige rwzi's gezamenlijk. Dit zuiveringsrendement wordt berekend met de totaal aangevoerde en totaal afgevoerde vracht aan totaal-stikstof per jaar.

De invoering van de grenswaarden betekent dat een groot aantal rwzi's zal moeten worden aangepast. Separate behandeling van interne stikstofrijke stromen kan hieraan een bijdrage leveren. Met name het water, dat bij de slibverwerking van uitgegist slib vrijkomt, bevat hoge concentraties aan ammonium-stikstof en kan 10-20% van de totale stikstofvracht van de rwzi uitmaken [1]. Een aantal waterkwaliteitsbeheerders (Riolering en Waterhuishouding Amsterdam, Provincie Utrecht, Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden en het Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier) heeft concrete plannen om op rwzi's (Amsterdam-Oost, Utrecht, Sluisjesdijk, Beverwijk) daadwerkelijk de behandeling van stikstofrijke retourstromen ter hand te nemen.

In een aantal bureaustudies zijn in een eerder stadium verschillende behandelingstechnieken met elkaar vergeleken en op basis van kosten en niet in kosten uit te drukken factoren beoordeeld [2]. Zie ook tabel 1.

**Tabel 1**  
In beschouwing genomen behandelingstechnieken

| techniek                                                                                                                 | HH US | RWZI 2000<br>[2] | Utrecht | ZS HEW |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------|---------|--------|
| membraan-bioreactor                                                                                                      | ●     | ●                | ●       | ●      |
| luchtstrippen                                                                                                            | ●     | ●                | ●       | ●      |
| CAFR-proces                                                                                                              | ●     | ●                | ●       | ●      |
| airlift-reactor                                                                                                          | ○     | ●                | ●       | ●      |
| biorotor                                                                                                                 |       | ○                |         |        |
| ○ in beschouwing genomen;<br>● in beschouwing genomen en interessant bevonden voor toepassing op de betreffende locatie. |       |                  |         |        |

Op basis van de resultaten van de bureaustudies blijkt, dat een viertal werkwijzen interessant is voor de behandeling van stikstofrijke stromen op rwzi's:

- hooggesuspendeerd actiefslibstelsysteem met ultrafiltratie (membraan-bioreactor);
- $\text{NH}_3$ -strippen;

- precipitatie van magnesiumammoniumfosfaat (MAP) met recirculatie (CAFR-proces);
- airliftreactor.

De (financieel) optimale methode van  $\text{NH}_3$ -strippen kan per locatie verschillen. Afhankelijk van onder meer de temperatuur van het te behandelen water en andere locale omstandigheden kan worden gekozen voor luchtstrippen of voor stoomstrippen.

Teneinde de mogelijke behandelingstechnieken te dimensioneren en onderling te kunnen vergelijken is onderzoek op semi-technische schaal uitgevoerd.

De geselecteerde behandelingsmethoden zijn op drie verschillende locaties onderzocht. Een overzicht van de locaties en behandelingstechnieken is samengevat in tabel 2.

**Tabel 2**  
**Overzicht van de onderzoekslocaties**

| onderzoekslocaties                      | behandelingstechnieken                                                                               |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| slibverwerkingsinstallatie Sluisjesdijk | - membraan-bioreactor                                                                                |
| RWZI Utrecht                            | - airlift-reactor<br>- $\text{NH}_3$ -strippen (lucht/stoom met stoomgenerator)<br>- CAFR/MAP-proces |
| RWZI Amsterdam-Oost                     | - $\text{NH}_3$ -strippen (stoom met sproeiverdamping)                                               |

In figuur 1 is het kader van het STOWA-onderzoek schematisch weergegeven.

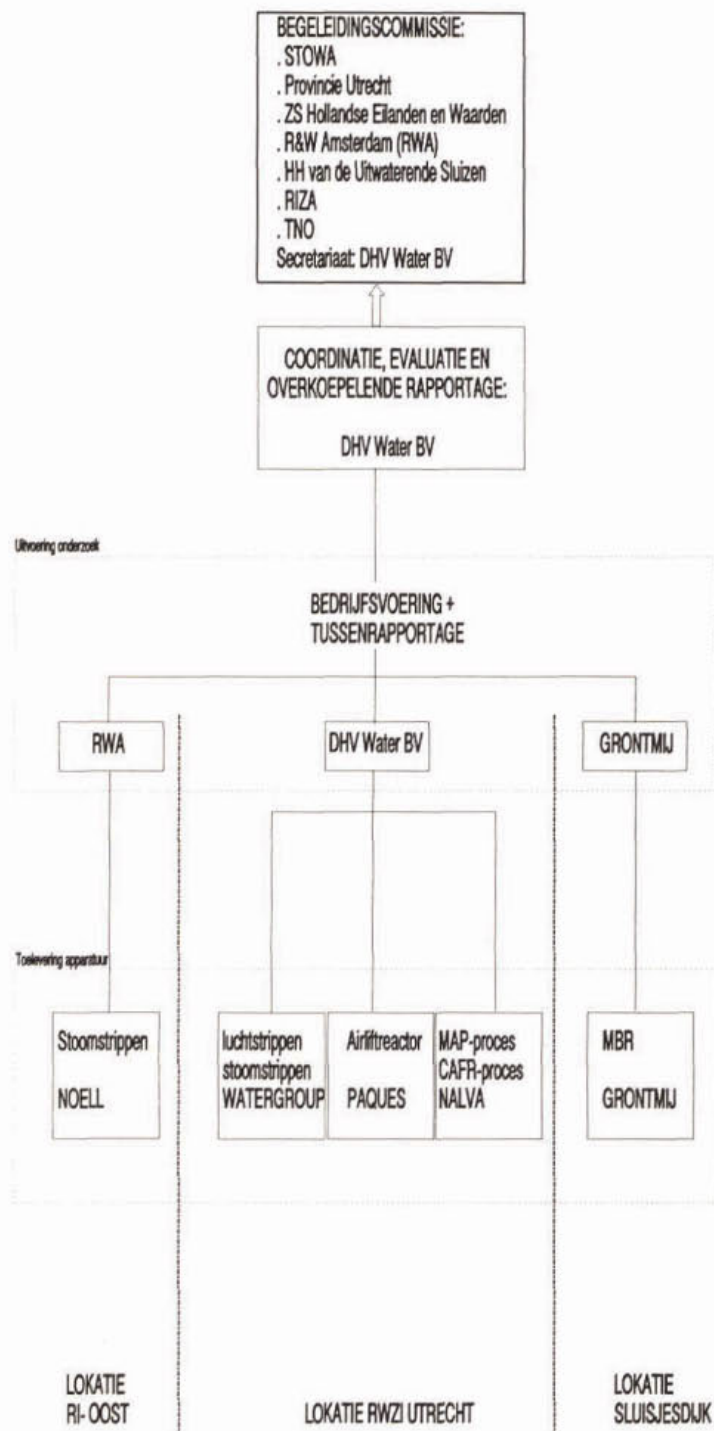
De onderzoeken hadden tot doel inzicht te geven in de mogelijkheden, beperkingen en kosten van de beproefde technieken in de Nederlandse praktijk met de nadruk op de volgende aspecten:

- algemene toepasbaarheid;
- dimensioneringsgrondslagen;
- stichtings- en exploitatiekosten;
- bedrijfsvoeringsaspecten;
- gevoeligheden van de systemen.

Van de verschillende praktijkonderzoeken zijn separate rapporten [3, 4, 5, 6, 7] verschenen. In deze rapporten is voor elke behandelingsmethode afzonderlijk ingegaan op de resultaten, bedrijfsvoeringsaspecten, dimensioneringsgrondslagen en kosten.

Daarnaast is een bureaustudie uitgevoerd naar de hergebruiksmogelijkheden van de restprodukten die vrijkomen bij de  $\text{NH}_3$ -stripprocessen, het MAP- en het CAFR-proces [8].

Het onderhavige rapport bevat een overkoepelende evaluatie van de verschillende uitgevoerde praktijkonderzoeken. In hoofdstuk 3 zijn de onderzochte systemen en de onderzoekslocaties op hoofdkenmerken beschreven. Daarnaast is aangegeven welke aspecten met de verschillende systemen zijn onderzocht en met welk doel. Hoofdstuk 4 gaat in op de bedrijfsvoeringsaspecten. De voornaamste resultaten zijn weergegeven in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 geeft de interpretatie van de resultaten gericht op toepassing in de Nederlandse praktijksituatie. Tevens is hierin voor een aantal standaard-rwzi's een kostenraming opgenomen. Tot slot bevat hoofdstuk 7 een evaluatie van de resultaten en een beschrijving van de conclusies.



**Figuur 1**  
 Schematische weergave van het kader van het STOWA-onderzoek naar behandeling van stikstofrijke retourstromen

### 3 SYSTEMEN

#### 3.1 Inleiding

De geselecteerde systemen zijn onderzocht op drie verschillende onderzoekslocaties. In dit hoofdstuk is een korte beschrijving van de onderzochte technieken, van de gebruikte proefinstallaties, alsmede van de onderzochte aspecten opgenomen.

#### 3.2 Membraan-bioreactor

##### 3.2.1 *Beschrijving van de techniek*

De membraan-bioreactor is een compact afvalwaterzuiveringssysteem, waarin biologische zuiveringsprocessen zijn gecombineerd met biomassa-retentie met behulp van membraanfilters [9, 10]. Dit biedt de mogelijkheid om hoge biomassa-concentraties te handhaven. In vergelijking met een conventioneel actief-slibstelsel biedt de membraan-bioreactor op de hierna genoemde aspecten een aantal voordelen.

##### *Verbeterde zuurstofoverdracht*

De zuurstofoverdracht in de beluchtingstank is efficiënter vergeleken met een conventioneel beluchtingssysteem doordat het systeem onder druk wordt bedreven. Hierdoor is het mogelijk om ondanks de hoge volumetrische belasting en daardoor hoge zuurstofbehoefte toch voldoende zuurstof toe te voeren aan het proces.

##### *Hoge omzettingssnelheden*

Mede vanwege de hoge biomassa-concentraties ontstaat een hoge volumetrische omzettingssnelheid. Vanwege de hoge volumebelasting vindt een relatief hoge biologische warmteproductie per volume-eenheid plaats. Daarnaast vindt een grote energiedissipatie plaats bij het membraanfiltratieproces. Hierdoor wordt het systeem bij temperaturen van 33-38°C bedreven. De groei en activiteit van met name nitrificerende bacteriën is optimaal binnen dit temperatuurstraject.

##### *Geringe slibproductie*

Ten gevolge van de hoge temperatuur en de relatief lage slibbelasting (hoog drogestofgehalte) is de slibleeftijd hoog en treedt een vergaande mineralisatie op. Hierdoor is de surplus-slibproductie laag.

##### *Effluentkwaliteit*

Het gebruik van ultrafiltratiemembranen voor de slib-waterscheiding heeft een positief effect op de kwaliteit van het effluent. Het effluent is vrij van zwevende stof. Verder worden hoog-moleculaire (soms moeilijk afbreekbare) organische stoffen door de ultrafiltratiemembranen goed tegengehouden. De verblijftijd van deze stoffen in het systeem wordt hierdoor verhoogd, met als gevolg een verdergaande afbraak.

##### *Beheersbare luchtmissie*

Het gehele systeem wordt op druk gehouden door de ingebrachte lucht en de geproduceerde gassen, zoals stikstofgas en CO<sub>2</sub>, via een reduceerventiel af te laten. Hierdoor is het relatief eenvoudig deze lucht te behandelen, wanneer dit nodig is uit oogpunt van geuremissie. Daarnaast is de luchthoeveelheid aanzienlijk kleiner dan bij conventionele zuiveringssystemen vanwege de efficiëntere zuurstofoverdracht.

### 3.2.2 Beschrijving van de proefinstallatie

In figuur 2 is een proces-flowschema van de membraan-bioreactor weergegeven.

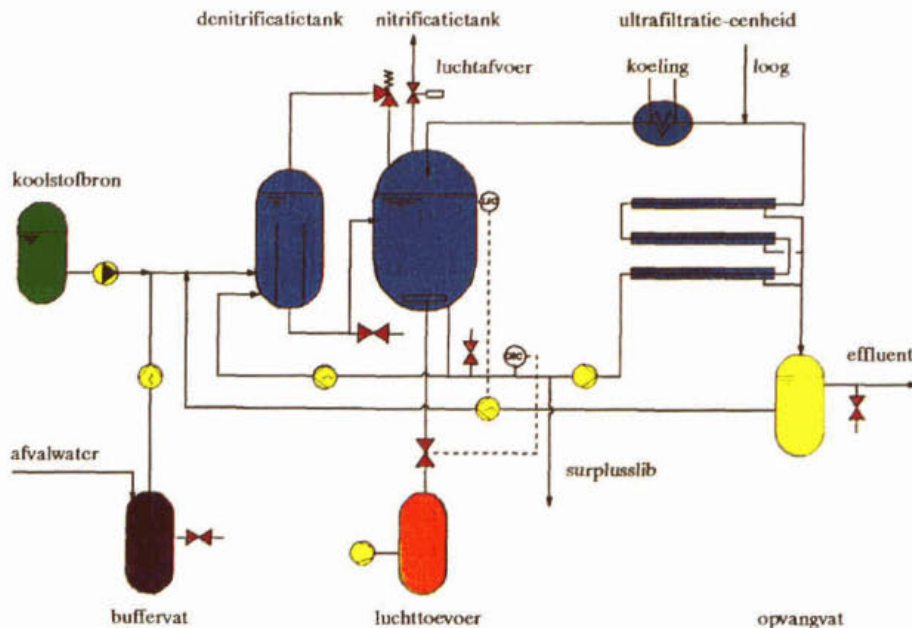
De voornaamste procesonderdelen van de proefinstallatie zijn:

- denitrificatietank, volume 350 l;
- nitrificatietank, volume 1.000 l;
- membraanunit, cross-flow ultrafiltratie, oppervlakte 0,5-4,3 m<sup>2</sup>.

De reactor kan worden bedreven bij een systeemdruk van 2-5 bar, terwijl de werkdruk van de membraanfiltratie in het gebied van 2-8 bar valt.

Het stikstofrijke water is afkomstig van de ontwateringscentrifuges en wordt voorbehandeld om de hoeveelheid zwevend stof te verlagen. Het voorbehandelde water wordt via de voorgeschakelde denitrificatiereactor in de nitrificatietank gebracht, waar de gereduceerde stikstofverbindingen worden geoxideerd. Door recirculatie van het slib/watermengsel uit de beluchtingstank wordt nitraat naar de denitrificatietank gevoerd. De denitrificatie vindt plaats met behulp van dosering van een koolstofbron.

De inhoud van de nitrificatietank wordt door een ultrafiltratie-unit gerecirculeerd. Hierin vindt de scheiding tussen slib en water plaats. Het filtraat verlaat de installatie als effluent, terwijl het concentraat wordt teruggevoerd naar de beluchtingstank. Surplusslib kan via een spuikraan worden afgelaten.



Figuur 2  
Proces-flowschema van de membraan-bioreactor

Een overzicht van de opstelling is weergegeven in figuur 3.



Figuur 3

Overzicht van de proefinstallatie met de membraan-bioreactor op de slibverwerkingsinstallatie Sluisjesdijk

### 3.3 Airliftreactor

#### 3.3.1 Beschrijving van de techniek

De drie-fasen airliftreactor is een compact biologisch afvalwaterzuiveringssysteem, waarin de biomassa aan dragermateriaal is gehecht. Hierdoor is het mogelijk om hoge biomassaconcentraties in de reactor te handhaven. De airliftreactor is een gefluidiseerd bedsysteem, waarbij zowel lucht als water onderin de reactor worden gebracht [11, 12]. In vergelijking met een conventioneel actief-slibstelsel biedt de airliftreactor op de hierna genoemde aspecten een aantal voordelen.

##### *Hoge volumebelasting*

Door de hogere biomassaconcentratie kunnen bij gelijkblijvende zuiveringsprestaties hogere volumebelastingen worden toegepast.

##### *Geringe slibproductie*

De biomassa-yield van het aan dragermateriaal gehecht slib is lager in vergelijking met een gesuspendeerd actief-slibstelsel bij een vergelijkbare slibbelasting [10].

##### *Ruimtebesparing*

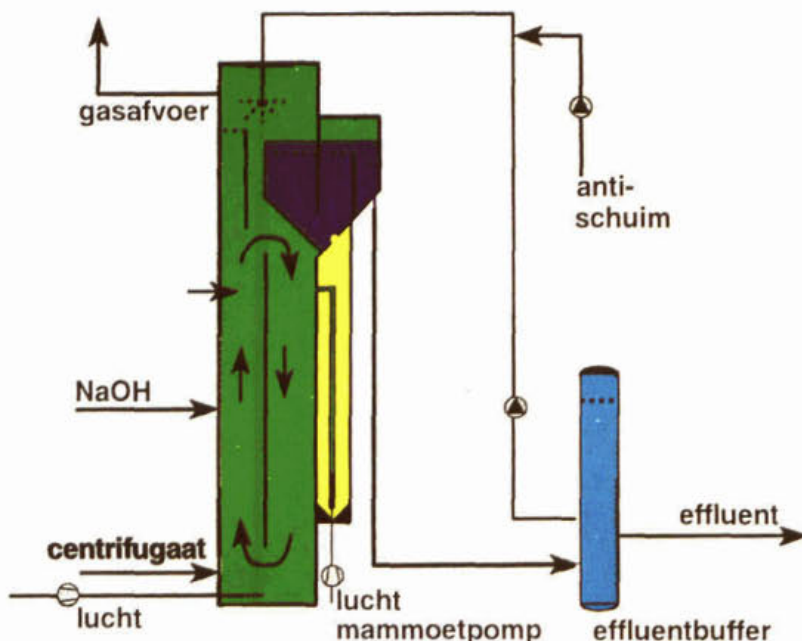
De hoge uitvoering van de airliftreactor in combinatie met de hoge biomassa-concentratie resulteert in een gering ruimtebeslag.

##### *Beheersbare luchtmissie*

Door de goede bezinkingseigenschappen van het begroeide dragermateriaal is het lucht/water-grensvlak van de bezinker gering. Een eventueel noodzakelijke luchtbehandeling is daarom relatief eenvoudig door afdekking te realiseren.

### 3.3.2 Beschrijving van de proefinstallatie

Een proces-flowschema van de airliftreactor is weergegeven in figuur 4.



Figuur 4  
Proces-flowschema van de airlift-reactor

De voornaamste onderdelen van de proefinstallatie zijn:

- reactor, volume (totaal)  $3,4 \text{ m}^3$ , waarvan  $2,2 \text{ m}^3$  aëroob en  $1,2 \text{ m}^3$  anoxisch. De vloeistofhoogte van de reactor bedraagt  $7,5 \text{ m}$ ;
- drie-fasenscheider;
- compressor, capaciteit  $45 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ;
- mammoetpomp, recirculatie-debiet  $10\text{-}20 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Het stikstofrijke water is het centrifugaat van de ontwateringsmachines. Het water wordt voorbehandeld door bezinking en afscheiding van drijfslaag.

Het voorbehandelde water wordt naar de onderzijde van de "riser" gepompt. Ook de luchtinblazing vindt onderin de "riser" plaats, waardoor hierin een opwaartse stroming ontstaat. In de "downcomer" vindt de neerwaartse stroming van de recirculatie plaats. Een gedeelte van het dragermateriaal/water/lucht-mengsel stroomt over in de drie-fasenscheider. De lucht wordt hierin afgescheiden naar de atmosfeer. Het dragermateriaal bezinkt, waarna het in het niet-beluchte anoxische deel van de reactor komt. In dit deel van de reactor kan een externe koolstofbron worden gedoseerd. Vanuit de anoxische ruimte wordt het dragermateriaal/water-mengsel naar het aërobe deel van de reactor teruggevoerd. Het gezuiverde water stort in de bezinker over naar de effluentbuffer.

Een overzicht van de opstelling is weergegeven in figuur 5.



Figuur 5  
Overzicht van de proefinstallatie met de airlift-reactor op de rwzi Utrecht

### 3.4 Ammoniak-strippen

#### 3.4.1 Beschrijving van de techniek

Een groot deel van de stikstof in de te behandelen retourstroom is in de vorm van ammonium aanwezig. Door de pH van de vloeistof te verhogen verschuift het dissociatie-evenwicht van ammonium/ammoniak naar de ammoniakzijde. Ammoniak is een in water goed oplosbaar gas en in deze vorm stripbaar. Hiervoor wordt de waterstroom in contact gebracht met een gasfase. De gasfase is arm aan ammoniak, waardoor ten gevolge van het concentratieverschil ammoniakoverdracht naar de gasfase optreedt [13, 14].

Een gebruikelijke uitvoeringsvorm van het stripproces is een striptoren. Hierin wordt in het algemeen water in tegenstroom in contact gebracht met de gasfase. Om het uitwisselend oppervlak te vergroten is in de striptoren een pakking aangebracht.

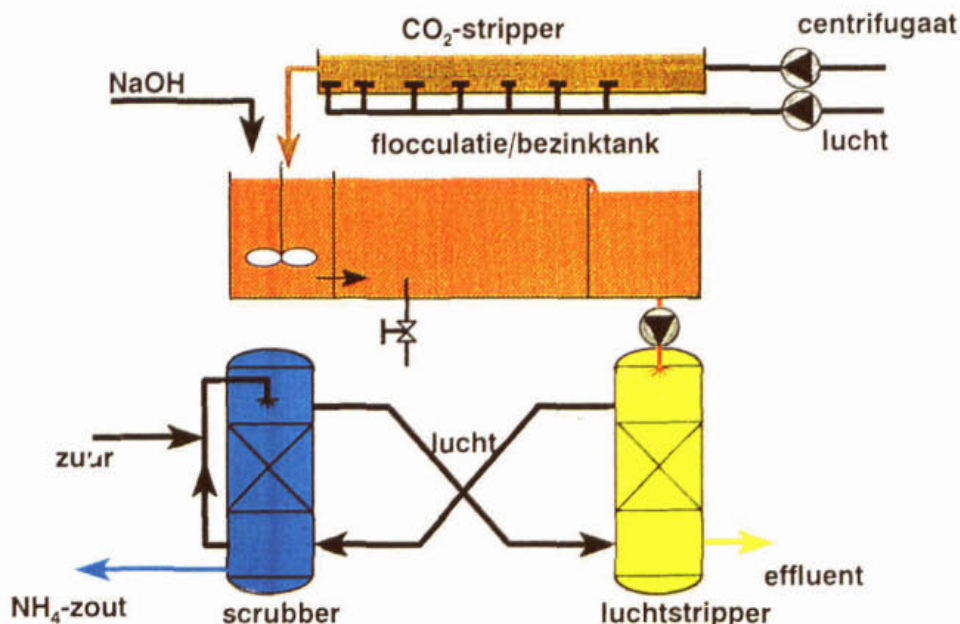
Bij het stripproces wordt onderscheid gemaakt tussen luchtstrippen en stoomstrippen. De gasfase bij deze processen bestaat respectievelijk uit lucht en uit stoom.

Het voornaamste verschil tussen de genoemde twee typen stripprocessen bestaat uit de nabehandeling van de ammoniakrijke gasfase. Bij luchtstrippen bestaat deze meestal uit het wassen met een zuur, waarbij een ammoniumzout ontstaat. Ook is het mogelijk om de ammoniakhoudende lucht (katalytisch) te verbranden, zodat geen reststoffen ontstaan [15]. Bij stroomstrippen wordt de ammoniakrijke stoom gecondenseerd, waarna de ammoniakale oplossing door reflux in een rectificeerkolom wordt geconcentreerd.

### 3.4.2 Beschrijving van de proefinstallaties

#### Luchtstrippen

Een proces-flowschema van het luchtstripproces is weergegeven in figuur 6.



Figuur 6  
Proces-flowschema van de luchtstripper

De voornaamste onderdelen van de proefinstallatie zijn:

- voorbehandeling (flocculatie/precipitatie);
- strippkolom;
- scrubber;
- katalytische verbrandingsinstallatie.

Het stikstofrijke water is het centrifugaat van de ontwateringsmachines. In de flocculatie/precipitatie-tank vindt de pH-instelling van het water plaats. Door de hoge pH treedt vlokvorming van zwevende stof op en worden neerslagen gevormd van calciumcarbonaat en calciumfosfaat. Door bezinking worden deze vlokken en neerslagen afgescheiden. Voor de instelling van de gewenste temperatuur van het stripproces wordt het water door een warmtewisselaar gevoerd. De striptoren is een gepakte kolom van 2 meter hoogte. Het water wordt bovenin de striptoren gevoerd, terwijl de lucht onderin de striptoren wordt geblazen. De ammoniakrijke lucht wordt in de scrubber door een zure oplossing geleid, waarna de lucht wordt teruggevoerd naar de striptoren. Er is dus sprake van een gesloten luchtcircuit.

In de verbrandingsinstallatie wordt de ammoniakrijke lucht omgezet in stikstof en water. De ammoniakrijke lucht wordt hierbij opgewarmd tot 270-330°C.

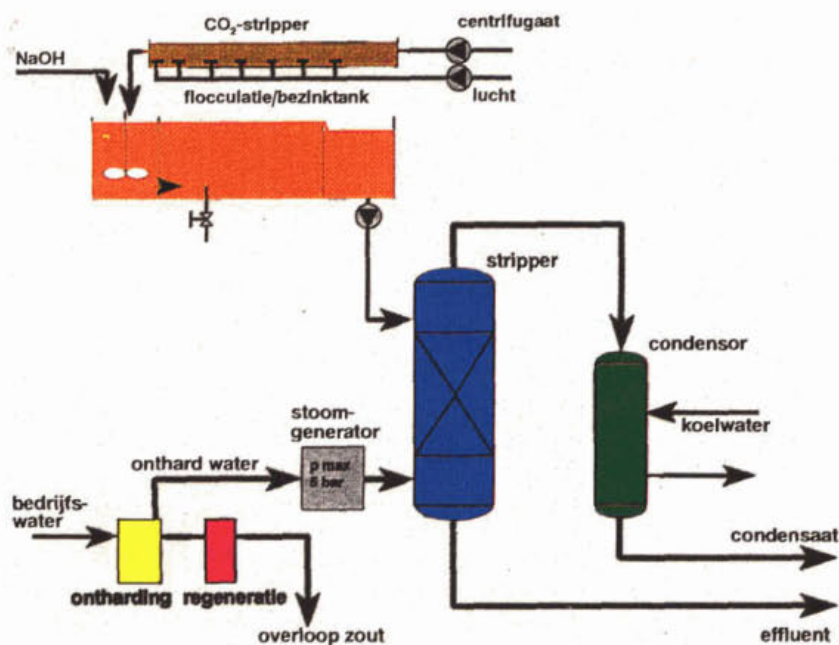
Een overzicht van de opstelling is weergegeven in figuur 7.



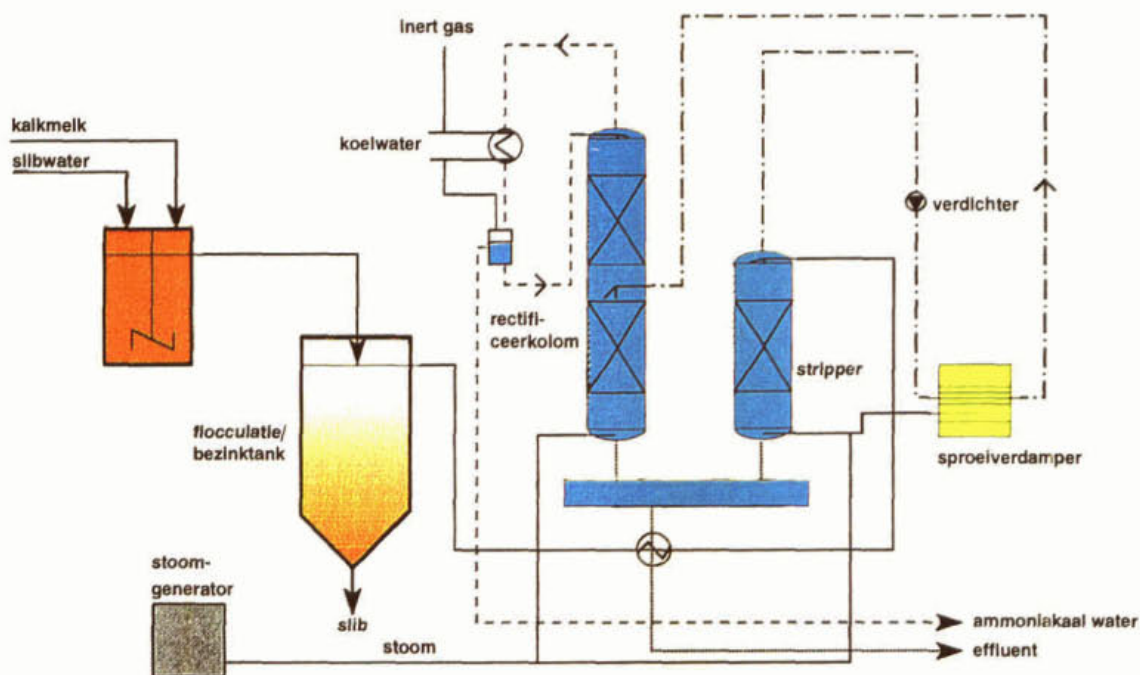
Figuur 7  
Overzicht van de proefinstallatie met luchtstrippen op de rwzi Utrecht

### *Stoomstrippen*

De proces-flowschema's van de voor het onderzoek gebruikte proefinstallaties op de rwzi Utrecht en de rwzi Amsterdam-Oost zijn respectievelijk weergegeven in de figuren 8 en 9. De voornaamste kenmerken van de installaties zijn samengevat in tabel 3.



Figuur 8  
Proces-flowschema van de stoomstripinstallatie op de rwzi Utrecht



Figuur 9  
Proces-flowschema van de stoomstripinstallatie op de rwzi Amsterdam-Oost

Tabel 3  
Hoofdkenmerken van de stoomstripinstallaties

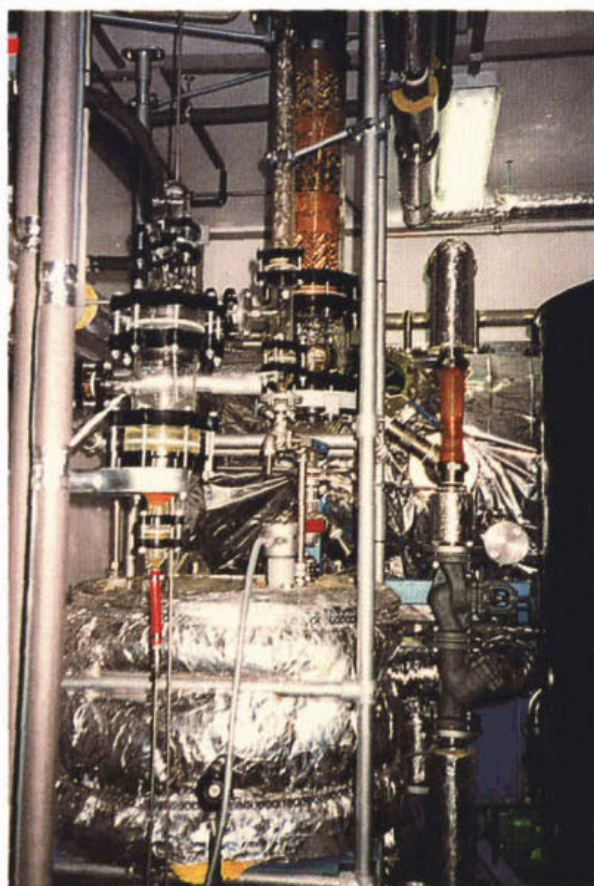
|                                                | rwzi Amsterdam-Oost                     | rwzi Utrecht                            |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| stikstofrijk water                             | centrifugaat + filtraat<br>filterpersen | centrifugaat                            |
| voorbehandeling<br>chemicaliën                 | floculatatie-sedimentatie<br>kalkmelk   | floculatatie-sedimentatie<br>natronloog |
| stripkolom<br>diameter<br>hoogte pakking       | 0,15 m<br>3,0 m                         | 0,4 m<br>3,5 m                          |
| rectificeerkolom<br>diameter<br>hoogte pakking | 0,4 m<br>2 m + 1,5 m                    | -<br>-                                  |
| condensor<br>verdichter/sproeiverdamper        | ja<br>ja                                | ja<br>-                                 |

Het stikstofrijke water wordt na voorbehandeling bovenin de stripkolom gepompt, terwijl onderin de stripkolom de stoom wordt ingevoerd.

De ammoniakrijke stoom verlaat de kolom aan de bovenzijde. Op de rwzi Utrecht is de stoom alleen gecondenseerd tot een ammoniakale oplossing met lage concentratie, terwijl op de rwzi Amsterdam-Oost de ammoniakale stoom in een blower zover wordt verdicht, dat de condensatietemperatuur boven het kookpunt van het gestrippte slibwater ligt.



**Figuur 10**  
**Overzicht van de proefinstallatie voor het stoomstrippen op de rwzi Utrecht**



**Figuur 11**  
**Overzicht van de proefinstallatie voor het stoomstrippen op de rwzi Amsterdam-Oost**

De condensatiewarmte van de ammoniakdamp wordt in een sproeiverdamper gebruikt om stoom uit het gestripte slibwater te produceren. Op deze wijze wordt voor een groot gedeelte (ongeveer 70%) in de voor het stripproces benodigde stoom voorzien.

De gecondenseerde ammoniakale oplossing wordt in de rectificeerkolom verwarmd. Hierdoor wordt het ammoniak weer in dampfase gebracht.

De ammoniakrijke damp wordt gecondenseerd en gedeeltelijk gerecirculeerd naar de rectificeerkolom.

Met de rectificeerkolom kan de ammoniakale oplossing worden geconcentreerd tot ongeveer 25%.

Een overzicht van de opstelling op de rwzi Utrecht, respectievelijk de rwzi Amsterdam-Oost, is gegeven in de figuren 10 en 11.

### 3.5 MAP/CAFR-proces

#### 3.5.1 *Beschrijving van de techniek*

Het MAP-proces is gebaseerd op de vorming van het onoplosbare magnesiumammoniumfosfaat (MAP). Aan het te behandelen ammoniumrijke water worden magnesium en fosfaat toegevoegd, waarna de juiste pH wordt ingesteld. Omdat het oplosbaarheidsproduct van MAP wordt overschreden, slaat deze verbinding in de vorm van kristallen neer. De gevormde kristallen worden vervolgens door bezinking afgescheiden [16].

Een uitbreiding van het MAP-proces is het CAFR-proces (Chemische Ammonium Fällung und Rezyklierung). Hierin wordt een gedeelte van het magnesiumammoniumfosfaat opgewerkt tot voor het MAP-proces herbruikbare chemicaliën [17]. In de opwerkingsstap wordt het gevormde MAP verwarmd, waardoor het ontleedt in magnesiumhydrofosfaat en ammonium. Door de pH te verhogen kan het ammonium als ammoniak worden gestript. De hierbij gevormde ammoniakrijke damp kan door wassing met zuur als ammoniumzout of door condensatie en concentratie als ammoniakale oplossing worden vastgelegd. Het magnesiumhydrofosfaat kan opnieuw worden gebruikt voor de vorming van MAP. Er is dus sprake van een recirculatie van magnesium en fosfaat. Aan deze recirculatie zijn grenzen gesteld vanwege ophoping van verontreinigingen in het MAP-slib. Een deel van het geproduceerde MAP-slib moet daarom worden gespuid en suppletie van magnesium en fosfaat is noodzakelijk.

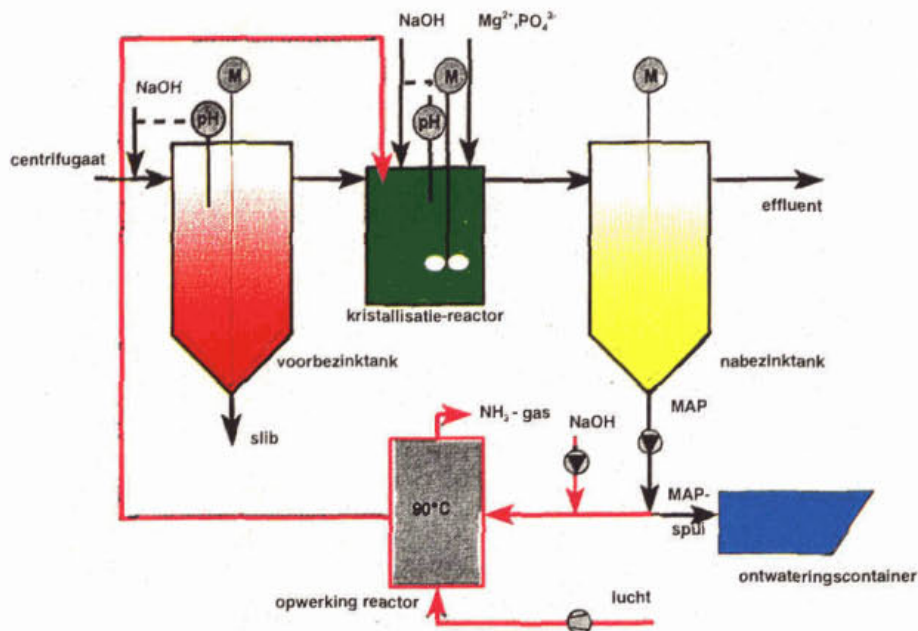
#### 3.5.2 *Beschrijving van de proefinstallatie*

In figuur 12 is een proces-flowschema van het MAP/CAFR-proces weergegeven en in figuur 12 een overzicht van de proefinstallatie.

De voornaamste onderdelen van de proefinstallatie zijn:

- voorbezinktank, volume 1,2 m<sup>3</sup>;
- reactievat voor ammoniumprecipitatie, volume 0,4 m<sup>3</sup>;
- nabezinktank, volume 1,2 m<sup>3</sup>;
- opwerkingsreactor, volume 0,6 m<sup>3</sup>.

Als stikstofrijk water wordt centrifugaat van de ontwateringsmachines van de rwzi Utrecht gebruikt. Door pH-verhoging en poly-electrolietdosering vindt vlokvorming plaats. De gevormde vlokken worden in de voorbezinktank afgescheiden. Het voorbehandelde water stroomt naar het geroerde reactievat, waar dosering van chemicaliën en pH-regeling plaatsvinden. In de reactor vindt vorming van MAP plaats.



Figuur 12  
Proces-flowschema van het MAP/CAFR-proces



Figuur 13  
Overzicht van de proefinstallatie voor het MAP/CAFR-proces op de rwzi Utrecht

Het MAP-rijke water stroomt naar de bezinktank, waarin het MAP wordt afgescheiden van het behandelde water. Het bezonken MAP-slib kan of naar de opwerkingsreactor worden verpompt of naar een ontwateringscontainer worden gespuid.

In de toevoer naar de opwerkingsreactor wordt natronloog gedoseerd om de gewenste pH-waarde van de opwerking in te stellen. In de reactor wordt de MAP-houdende slurry verwarmd tot 80 à 90°C. De vrijgemaakte ammoniak wordt met behulp van lucht uit het reactie-

mengsel gestript. De resterende magnesiumfosfaathoudende slurry wordt naar de MAP-reactor teruggevoerd.

### 3.6 Ervaring

In tabel 4 staan de toepassingen en de ervaringen van de geselecteerde behandelingstechnieken samengevat weergegeven.

Uit dit overzicht blijkt, dat alleen het luchtstripproces in de praktijk al wordt toegepast voor de behandeling van stikstofrijke retourstromen op rwzi's [18].

Met het MAP-proces bestaat er enige ervaring op laboratoriumschaal [19]. Terugwinning van MAP is daarbij echter niet in beschouwing genomen.

De overige behandelingstechnieken zijn op praktijkschaal gerealiseerd, maar niet voor de behandeling van stikstofrijke retourstromen op rwzi's. De membraan-bioreactor wordt voornamelijk toegepast voor de behandeling van percolatiewater en verschillende soorten industrieel afvalwater (onder andere van de lederindustrie en farmaceutische industrie) [20].

Tabel 4

Samenvattend overzicht van de ervaringen met de geselecteerde technieken

| technieken                                                                       | huishoudelijk afvalwater | N-rijke stromen |        |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------|--------|
|                                                                                  |                          | op rwzi's       | elders |
| membraan-bioreactor                                                              | ○                        |                 | ●      |
| airlift-reactor                                                                  |                          |                 | ●      |
| NH <sub>3</sub> -strippen:                                                       |                          |                 |        |
| - luchtstrippen                                                                  |                          | ●               | ●      |
| - stoomstrippen                                                                  |                          |                 | ●      |
| CAFR/MAP-proces                                                                  | ○                        | ○               | ○      |
| ● ervaring op praktijkschaal<br>○ ervaring op laboratorium of pilot-plant schaal |                          |                 |        |

De airliftreactor wordt in de praktijk toegepast voor industriële afvalwaterbehandeling (fermentatie-industrie, brouwerij). Met ammoniakstrippen bestaat ook praktijkervaring in de mestbehandeling, de behandeling van waswater uit rookgasinstallaties, de percolatiewaterzuivering en in de behandeling van diverse geconcentreerde stromen in de industrie.

### 3.7 Onderzoekslocaties

De in het kader van het praktijkonderzoek in aanmerking komende onderzoekslocaties kunnen worden ingedeeld naar de volgende aspecten:

- temperatuur van het te behandelen water;
- concentratie N, P, CZV en zwevend stof in het te behandelen water;
- type zuiveringssysteem;
- slibverwerkingsmethode.

In tabel 5 is dit voor de vier eerder genoemde mogelijke onderzoekslocaties samengevat.

Tabel 5

Samenvattend overzicht van de voor het onderzoek in aanmerking komende onderzoekslocaties

|                                                                                                                                                                                                      | Amsterdam     | Beverwijk       | Sluisjesdijk | Utrecht |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------|--------------|---------|
| systeem                                                                                                                                                                                              | AS            | AS (+OB)        | AS-AS        | AS-AS   |
| slibverwerking:                                                                                                                                                                                      |               |                 |              |         |
| - gravitatie indikking                                                                                                                                                                               | ●             | ●               | ●            | ●       |
| - mechanische indikking                                                                                                                                                                              |               | ●               | ○            |         |
| - gisting                                                                                                                                                                                            | ●             | ●               | ●            | ●       |
| - kamerfilterpersen                                                                                                                                                                                  | ●             |                 |              |         |
| - centrifuges                                                                                                                                                                                        | ●             | ●               | ●            | ●       |
| - droging                                                                                                                                                                                            | ○             | ○               |              |         |
| debiet [m <sup>3</sup> /d]                                                                                                                                                                           | 1.300 (+ 275) | 330 (+ 550)     | 1.000        | 960     |
| CZV [mg/l]                                                                                                                                                                                           | 500 - 1.000   | 1.800 (+ 6.200) | 900          | 480     |
| N <sub>Kj</sub> [mg/l]                                                                                                                                                                               | 600 - 800     | 700 (+ 1.800)   | 1.200        | 500     |
| P <sub>tot</sub> [mg/l]                                                                                                                                                                              | 30 - 60       | 40 (+ 490)      | 40           | 0       |
| zwevend stof [mg/l]                                                                                                                                                                                  | ≤ 1.000       | 370 (+ 5.100)   | 300          | 630     |
| temperatuur                                                                                                                                                                                          | laag (→ hoog) | laag (→ hoog)   | laag         | laag    |
| ● huidige situatie<br>○ in de nabije toekomst te realiseren<br>tussen haakjes zijn de verwachte debieten en concentraties van de condensaatstroom vermeld na realisatie van de slibdrooginstallaties |               |                 |              |         |

#### Temperatuur

Afhankelijk van de slibverwerkingsmethode kan de temperatuur van het te behandelen water per locatie verschillen. Na slibgisting bedraagt de temperatuur van de slibstroom over het algemeen ongeveer 30°C.

De temperatuur van de condensaatstromen afkomstig van de slibdrooginstallaties bedraagt naar verwachting 40 à 60 °C.

#### Concentraties

De CZV- en N<sub>Kj</sub>-concentraties verschillen voor de rwzi's onderling. Met name op de rwzi Dokhaven worden relatief hoge concentraties gemeten.

De fosfaat- en zwevendstof-concentraties vertonen slechts geringe verschillen.

Door toepassing van slibdroging kunnen de concentraties aanzienlijk toenemen.

#### Zuiveringssysteem

Op basis van tabel 7 is een effect van het type zuiveringssysteem op de (verwachte) samenstelling van het te behandelen water niet eenduidig vast te stellen. Naar verwachting spelen andere factoren, zoals de slibverwerkingsmethode, een belangrijker rol.

#### Slibverwerkingsmethode

Door mechanische voorindikking en met name aanvullende (centrale) slibdroging wordt een aanzienlijke toename van de CZV- en N-concentraties c.q. vrachten verwacht. Omdat met name de slibdroging niet vóór de onderzoeksperiode is gerealiseerd, is deze situatie benaderd door bijvoorbeeld verwarmen van de waterstroom en doseren van stikstof in de vorm van ureum of een ammoniumzout.

In het kader van het praktijkonderzoek naar de behandeling van stikstofrijke retourstromen is gestreefd naar een vergelijking tussen de verschillende technieken en de in beschouwing genomen locaties. Daarbij was het noodzakelijk ook voor andere rwzi's gegevens af te kunnen leiden voor het ontwerp en de toepasbaarheid van deze technieken.

Bij systeemvergelijking is onderzoek op één locatie aantrekkelijk. Voor een algehele verbreding achter zou onderzoek met één of meer technieken op een groot aantal locaties moeten plaatsvinden.

Deze laatste mogelijkheid is uitermate kostbaar en niet haalbaar. Bovendien zal altijd een vertaling moeten plaatsvinden naar locaties die niet in beschouwing zijn genomen.

Na onderlinge afweging is mede gezien de onderzoeksplannen van de betrokken waterkwaliteitsbeheerders besloten om het praktijkonderzoek uit te voeren op de volgende locaties:

|                                         |   |                                                                                    |
|-----------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------|
| slibverwerkingsinstallatie Sluisjesdijk | : | membraan-bioreactor                                                                |
| rwzi Utrecht                            | : | airliftreactor, ammoniakstrippen (lucht/stoom met stoomgenerator), MAP/CAFR-proces |
| rwzi Amsterdam-Oost                     | : | stoomstrippen met sproeiverdamper                                                  |

### 3.8 Onderzoeksaspecten

De voornaamste onderzoeksaspecten voor de onderzochte technieken zijn samengevat in tabel 6. Daarnaast zijn er voor iedere afzonderlijke behandelingstechniek specifieke onderzoeksaspecten geformuleerd.

Tabel 6

Samenvattend overzicht van de onderzoeksaspecten van de beschouwde technieken

| techniek                  | onderzoeksdoel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Membraan-bioreactor       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- toepasbaarheid bij N-rijke retourstromen</li> <li>- afleiden van dimensioneringsgrondslagen</li> <li>- noodzaak van voorbehandeling</li> <li>- kosten</li> <li>- bedrijfsvoeringsaspecten</li> </ul>                                                                                                                               |
| Airlift-reactor           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- toepasbaarheid bij N-rijke retourstromen</li> <li>- afleiden van dimensioneringsgrondslagen</li> <li>- mogelijkheden van aanvullende denitrificatie</li> <li>- kosten</li> <li>- bedrijfsvoeringsaspecten</li> </ul>                                                                                                               |
| NH <sub>3</sub> -strippen | <ul style="list-style-type: none"> <li>- afleiden van dimensioneringsgrondslagen</li> <li>- noodzaak van voorbehandeling</li> <li>- consequenties van stripmethode: <ul style="list-style-type: none"> <li>. luchtstripper</li> <li>. stoomstripper</li> </ul> </li> <li>- hergebruik van het afvalprodukt</li> <li>- kosten</li> <li>- bedrijfsvoeringsaspecten</li> </ul> |
| MAP/CAFR-proces           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- toepasbaarheid bij N-rijke retourstromen</li> <li>- afleiden van dimensioneringsgrondslagen</li> <li>- terugwinning</li> <li>- hergebruik van het afvalprodukt</li> <li>- kosten</li> <li>- bedrijfsvoeringsaspecten</li> </ul>                                                                                                    |

De genoemde aspecten "afleiden van dimensioneringsgrondslagen" en "kosten" hebben betrekking op algemene uitgangspunten voor bredere toepassing (andere temperaturen,

concentraties). In de verschillende onderzoeken is hiertoe de concentratie ammonium-stikstof in het te behandelen water gevarieerd, waarbij drie bereiken zijn onderzocht:

- |   |       |   |       |       |
|---|-------|---|-------|-------|
| - | 500   | - | 600   | mg/l; |
| - | 1.000 | - | 1.200 | mg/l; |
| - | 1.800 | - | 2.000 | mg/l. |

Hergebruik van restprodukten speelt bij de fysisch/chemische technieken een belangrijke rol en is separaat in een reststoffenstudie [8] uitgewerkt. De resultaten zijn in dit onderhavige rapport meegenomen.

## 4 BEDRIJFSVOERING

### 4.1 Inleiding

De verschillende methoden voor de behandeling van stikstofrijk water zijn onderzocht op semi-technische schaal. Hierdoor is niet alleen inzicht verkregen in de technologische prestaties van de systemen, maar is ook veel ervaring opgedaan met de bedrijfsvoeringstechnische aspecten. Een aantal storingen in de bedrijfsvoering is terug te voeren op oorzaken, die te maken hebben met de uitvoering van de proefinstallatie. Een praktijkinstallatie zal zodanig worden uitgevoerd, dat deze storingen kunnen worden voorkomen.

Dit hoofdstuk geeft alleen die bedrijfsvoeringsaspecten weer, die van belang zijn bij toepassing van de behandelingsmethoden in de praktijk.

### 4.2 Membraan-bioreactor

#### *Voorbehandeling*

In de membraan-bioreactor wordt de aanwezige zwevende stof in de aanvoer volledig teruggehouden in het biologisch systeem. Dit is geen probleem voor de stikstofverwijdering, omdat de groeisnelheid van de nitrificerende organismen bij de heersende temperatuur van ongeveer 33°C dermate hoog is, dat zelfs bij lage slibleeftijden volledige nitrificatie mogelijk is. Het is noodzakelijk om grove verontreinigingen (bijvoorbeeld stukjes plastic en haren) te verwijderen om verstopping of beschadiging van de membranen en vervuiling van meetsensoren te voorkomen. Het is goed mogelijk gebleken om hiervoor een zelfreinigende zeef toe te passen.

#### *Buffering*

Uitval van voeding naar het biologische systeem kan leiden tot verlies van biologische activiteit. Buffering van voeding is daarom van belang in gevallen, dat de aanvoer van stikstofrijk water, bijvoorbeeld door storingen in de ontwateringsmachines, kan stagneren. De buffercapaciteit kan beperkt blijven, omdat het mogelijk is onder deze omstandigheden de bioreactor op een minimaal voedingsniveau te bedienen.

#### *Temperatuurbeheersing*

In de membraan-bioreactor is bij normale bedrijfsvoering vanwege de biologische warmteproductie bij de hoge volumetrische belasting en vanwege de energiedissipatie bij de ultra-filtratie een overschot aan warmte. Dit overschot moet door koeling worden weggenomen om te voorkomen dat de temperatuur oploopt tot waarden buiten het voor nitrificeerders optimale traject van 33 tot 38 °C.

#### *pH-regeling*

Bij het nitrificatieproces wordt alkaliteit verbruikt. Afhankelijk van de mate van denitrificatie wordt dit alkaliteitsverlies gedeeltelijk gecompenseerd. Dosering van loog is in elk geval noodzakelijk om de pH binnen het voor de nitrificeerders optimale traject te houden. Een betrouwbare pH-regeling is daarom van groot belang.

#### *Methanoldosering*

Bij denitrificatie is dosering van een externe koolstofbron (bijvoorbeeld methanol) noodzakelijk. Deze dosering moet zijn afgestemd op de nitraatvracht naar de denitrificatiereactor. Door regelmatige meting van de nitraat- en de methanolconcentratie moet op onder- dan wel overdosering worden gecontroleerd.

### *Membraanscheiding*

De toelaatbare hydraulische belasting van de membraan-bioreactor wordt bepaald door de membraanflux. Uit het onderzoek is gebleken, dat na een snelle daling van de flux bij het inzetten van nieuwe membranen de membraanflux zich na ongeveer een week weer op een stabiel niveau handhaaft. Op basis van duurproeven wordt ingeschat, dat bij continue belasting van de ultra-filtratie-unit deze maximaal eens in de drie maanden moet worden gereinigd met behulp van loog of zuur. De membranen zijn uitgevoerd als parallelle straten, waardoor reiniging per straat mogelijk is, zonder de complete installatie te stoppen.

## **4.3 Airliftreactor**

### *Voorbehandeling*

De aanwezige zwevende stof in de aanvoer naar de airliftreactor wordt in principe volledig met de afloop van de reactor afgevoerd. Bij hoge zwevendstofconcentraties, zoals die kunnen voorkomen in het stikstofrijke water van centrifuges, kan echter tevens verlies van dragermateriaal optreden. Daarnaast is het noodzakelijk om grove verontreinigingen te verwijderen om vervuiling van meetsondes te voorkomen. Evenals bij de membraan-bioreactor is het hier ook goed mogelijk om zelfreinigende zeven toe te passen.

### *Buffering*

De airliftreactor is evenals de membraan-bioreactor een biologisch systeem. Om verlies van biologische activiteit te voorkomen, is in dit geval dan ook eveneens buffering noodzakelijk. Het is tevens noodzakelijk een reserve voedingspomp te installeren.

### *pH-regeling*

Om de pH binnen het gewenste gebied te houden, is evenals bij de membraan-bioreactor een goede en betrouwbare pH-regeling noodzakelijk. Het installeren van een regeling, gebaseerd op twee meetsondes, wordt in dit geval als voldoende beschouwd.

### *Anti-schuimdosering*

Boven het ontgassingsgedeelte van de drie-fasenscheider kan sterke schuimvorming optreden. Dit houdt mogelijk verband met de aanwezigheid van restanten poly-electrolyet in het stikstofrijke water. Bij een te grote mate van schuimvorming treedt verlies van dragermateriaal uit de reactor op. Om de schuimvorming in de hand te houden is dosering van anti-schuim in combinatie met versproeiing van effluent op het wateroppervlak noodzakelijk.

### *Beluchting*

De luchtinbreng heeft bij de airliftreactor de functies van zuurstofinbreng en drijvende kracht voor de stroming. Bij uitval van de beluchting zakt het dragermateriaal uit, hetgeen leidt tot verstopping en afsterving van de biofilm. Het is daarom noodzakelijk om voldoende reservecapaciteit van de compressoren te installeren.

### *Methanoldosering*

Denitrificatie is in het kader van het onderzoek niet meegenomen en zal in een aparte nageschakelde processtap moeten worden gerealiseerd.

Bij denitrificatie is dosering van een externe koolstofbron (bijvoorbeeld methanol) noodzakelijk. Deze dosering moet zijn afgestemd op de nitraatvracht naar de denitrificatiereactor.

Door regelmatige meting van de nitraat- en de methanolconcentratie moet op onder- dan wel overdosering worden gecontroleerd.

#### 4.4 Ammoniakstrippen

##### *Voorbehandeling*

In het stikstofrijke water is naast ammoniumstikstof onder meer bicarbonaat en calcium aanwezig. Bij de verhoogde pH van het stripproces ontstaat calciumcarbonaat, dat op diverse plaatsen (warmtewisselaar, leidingen, stripkolom) leidt tot ongewenste afzettingen (scaling). Hierdoor neemt de bedrijfstijd van de installatie af. Om scaling te verwijderen is het immers noodzakelijk om de aangegroeide onderdelen met een zure oplossing te verwijderen. Scaling kan worden voorkomen door de hiervoor verantwoordelijke componenten zoveel mogelijk vooraf te verwijderen.

Verwijdering van calcium door precipitatie als calciumcarbonaat is in principe mogelijk, maar alleen bij gebruik van het relatief dure natronloog. Verder bestaat er in het geval van stoomstrippen kans op afzetting van ammoniumcarbonaat.

Bicarbonaat kan op verschillende manieren worden verwijderd. Een optie is om na verlagen van de pH het koolzuur uit het water te strippen. Uit oogpunt van proceseenvoud, kosten en chemicaliënverbruik is dit minder aantrekkelijk. Vergaande verwijdering van bicarbonaat is ook mogelijk door de pH te verhogen en calcium te doseren. Hierbij worden geen extra chemicaliën verbruikt, omdat de pH-verhoging ook voor het stripproces noodzakelijk is.

Door de dosering van het relatief goedkope kalk wordt naast calciumcarbonaat ook calciumfosfaat neergeslagen. Tevens wordt een groot deel van het aanwezige zwevend stof uitgevlokt. De gevormde neerslagen en vlokken worden in een (afgedichte) bezinktank verwijderd.

Het afgescheiden slib wordt teruggevoerd naar de slibverwerking. Deze voorbehandeling wordt bij de gerealiseerde praktijkinstallaties voor de behandeling van stikstofrijke retourstromen reeds toegepast [20].

##### *pH-regeling*

Instelling van de juiste pH is voor het rendement van het stripproces van groot belang. Een goede en betrouwbare pH-regeling is daarom noodzakelijk. In dit geval wordt een regeling in twee trappen geïnstalleerd, waarbij de pH in eerste instantie in de flocculatie/bezinktank wordt geregeld en de instelling op de gewenste waarde voor het stripproces plaatsvindt in de toevoerleiding van de striptoren naar de warmtewisselaar.

##### *Buffering*

Om tijdelijke uitval van de stripinstallatie (storingen; schoonmaken met zuur) te overbruggen kan het stikstofrijke water worden gebufferd. Het volume van de buffer is afgestemd op minimaal 4 uur buffertijd.

#### 4.5 MAP/CAFR-proces

##### *Voorbehandeling*

Om ongewenste afzettingen in de procesonderdelen en insluiting van verontreinigingen in het MAP-slib zoveel mogelijk te voorkomen wordt het stikstofrijke water voorbehandeld. Het doel hiervan is om het aanwezige zwevend stof evenals de aanwezige calcium-ionen te verwijderen. Hiertoe wordt de pH met behulp van natronloog verhoogd. Het gevormde calciumcarbonaat/calciumfosfaatneerslag alsmede het uitgevlokte zwevend stof worden in een bezinktank afgescheiden. Het bezonken slib wordt teruggevoerd naar de slibverwerking.

##### *Chemicaliëndosering*

De instelling van de juiste molaire N:P:Mg verhouding is van groot belang voor het rendement van het MAP/CAFR-proces. De ammoniumconcentraties in het aangevoerde stikstofrijke water kunnen variëren. Om de chemicaliëndosering hierop af te stemmen is continue meting

van het ammoniumgehalte in de toevoer noodzakelijk. Hiervoor wordt een betrouwbare ammoniummonitor toegepast [21].

#### *pH-regeling*

De instelling van de juiste pH is van groot belang voor het rendement van het MAP/CAFR-proces. Hiervoor is een goede en betrouwbare instelling van de pH noodzakelijk. In dit geval wordt de pH in twee stappen ingesteld. In eerste instantie wordt door loogdosering de pH in de voorbehandeling geregeld, terwijl de instelling van de juiste pH voor het MAP-proces in de reactor plaatsvindt.

#### *Buffering*

Om tijdelijke uitval van de installatie (storingen; schoonmaken met zuur) te overbruggen kan het stikstofrijke water worden gebufferd. Het volume van de buffer is afgestemd op minimaal 4 uur buffertijd.

## 5 RESULTATEN

### 5.1 Inleiding

De resultaten van de praktijkonderzoeken van de verschillende onderzochte systemen zijn beschreven per systeem, voor zover deze relevant zijn voor het opstellen van de ontwerprichtlijnen voor de Nederlandse praktijk. Meer gedetailleerde informatie over de resultaten is vastgelegd in de afzonderlijke rapportages van de praktijkonderzoeken [3, 4, 5, 6, 7, 22].

### 5.2 Membraan-bioreactor

#### 5.2.1 Inleiding

Tijdens het onderzoek zijn drie duurproeven uitgevoerd, met onderling verschillende stikstofgehalten in het stikstofrijke water. Tijdens elke duurproef is onderscheid gemaakt tussen een periode met alleen nitrificatie en een periode met nitrificatie en denitrificatie.

De voornaamste gegevens van de duurproeven zijn samengevat in tabel 7.

Tabel 7

Samenvatting van de gegevens van de duurproeven met de membraan-bioreactor

| periode       | ingangsconcentratie<br>N (Kj) (mg/l) | denitrificatieperiode | temp<br>(°C) | overdruk<br>(bar) | pH  | drogestofgehalte<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |      |
|---------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------|-----|------------------------------------------|------|
|               |                                      |                       |              |                   |     | min                                      | max  |
| 01/04 - 03/06 | 611                                  | 23/04 - 03/06         | 33           | 3                 | 8,2 | 3,9                                      | 17   |
| 16/06 - 19/08 | 946                                  | 19/07 - 19/08         | 33           | 3                 | 6,8 | 7                                        | 20,7 |
| 12/09 - 31/10 | 2040                                 | 12/09 - 06/10         | 33           | 3                 | 6,8 | 14,1                                     | 24,1 |

|           | nitraatroute |                          | nitrietroute             |
|-----------|--------------|--------------------------|--------------------------|
| januari   | inregelen    |                          |                          |
| februari  | adaptatie    | verkenpend<br>onderzoek  |                          |
| maart     |              |                          |                          |
| april     | duurproef 1  | additioneel<br>onderzoek |                          |
| mei       |              |                          |                          |
| juni      | duurproef 2  |                          |                          |
| juli      |              |                          |                          |
| augustus  |              |                          |                          |
| september | duurproef 3  |                          |                          |
| oktober   |              |                          |                          |
| november  |              |                          | oriënterend<br>onderzoek |
| december  |              |                          | duurproef                |
| januari   |              |                          |                          |
| februari  |              |                          |                          |

Figuur 14

Tijdschema van het onderzoek met de membraan-bioreactor op de locatie Sluisjesdijk

Naast de duurproeven is er additioneel onderzoek uitgevoerd aan de volgende aspecten:

- membraanfiltratie;
- zuurstoftoevoervermogen;
- temperatuurbeheersing;
- invloed van zwevend stof in het influent.

Na beëindiging van het reguliere onderzoek is aanvullend onderzoek met de membraan-bioreactor uitgevoerd naar de nitrificatie/denitrificatie via de zogenaamde nitrietroute [22].

In figuur 14 is een tijdschema van het onderzoek met de membraan-bioreactor weergegeven.

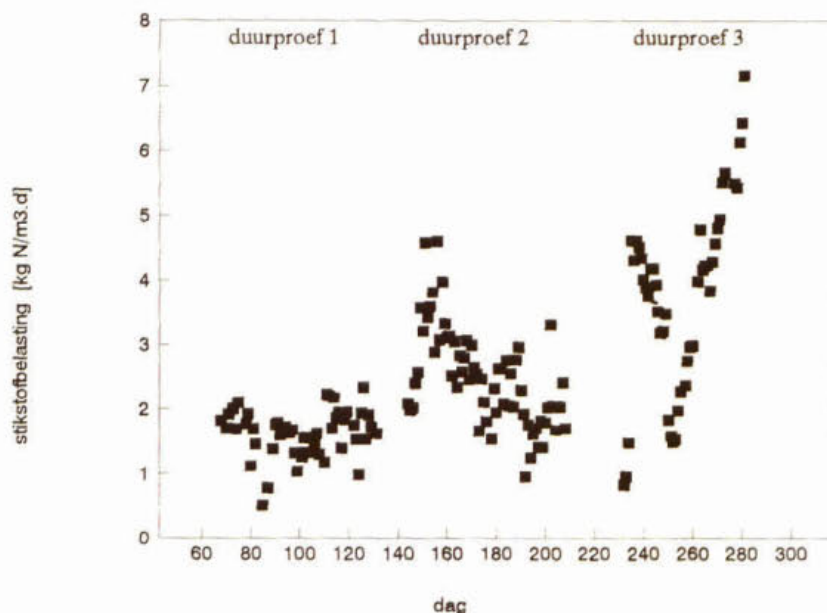
### 5.2.2 Stikstofverwijdering

#### Nitrificatie

Tijdens de verschillende duurproeven is de stikstofbelasting van de membraan-bioreactor telkens tot een maximum opgevoerd. Hierbij werd continu een N(Kj)-verwijderingsrendement behaald van ruim 99 %. In alle duurproeven bleek, door middel van respiratiemetingen, dat de nitrificatiecapaciteit van het actief-slib in de membraan-bioreactor nog verder kon worden opgevoerd. Verdere verhoging van de stikstofbelasting werd in de proefinstallatie echter beperkt door:

- de maximale membraanflux van de proefinstallatie bij lage ingangskoncentratie stikstof (duurproef 1);
- de maximale zuurstofinbreng bij hogere ingangskoncentraties stikstof (duurproef 2) vanwege de geometrie van de beluchtingstank van de proefinstallatie voor een optimale zuurstofoverdracht. Om deze beperking op te heffen is tijdens duurproef 3 additioneel zuivere zuurstof toegevoegd.

In figuur 15 is de N(Kj)-belasting als functie van de tijd gedurende de drie duurproeven weergegeven.



Figuur 15  
Verloop van de N(Kj)-belasting gedurende de drie duurproeven

In tabel 8 is de gemiddelde en de maximale stikstofbelasting per duurproef weergegeven alsmede de maximale nitrificatiecapaciteit zoals bepaald met de respiratiemeter.

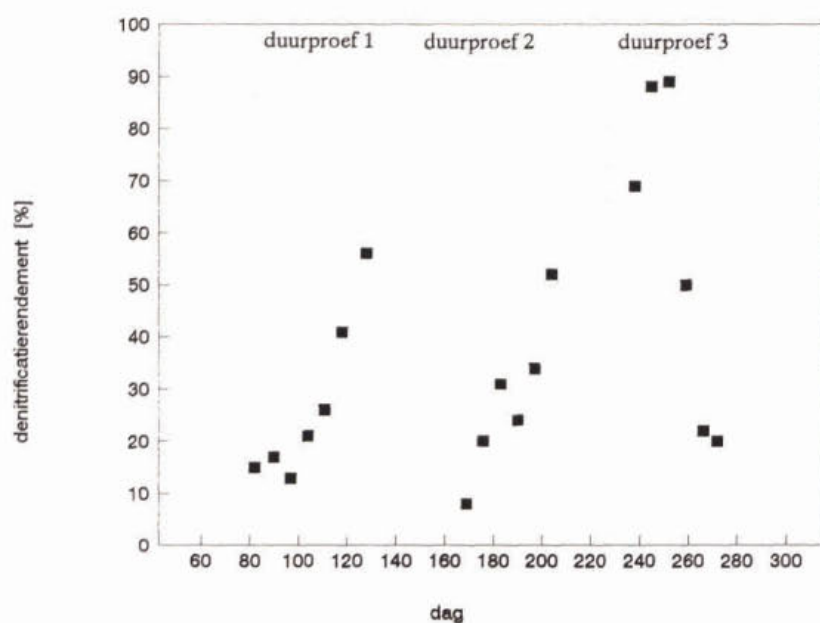
Tabel 8  
Resultaten van de N(Kj)-verwijdering

| duurproef | stikstofverwijdering MBR<br>(kg N(Kj)/(m <sup>3</sup> .d)) |      | stikstofverwijdering respirometer<br>(kg N(Kj)/(m <sup>3</sup> .d)) |
|-----------|------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------|
|           | gem.                                                       | max. |                                                                     |
| 1         | 1,6                                                        | 2,2  | 3                                                                   |
| 2         | 2,5                                                        | 4,4  | 6                                                                   |
| 3         | 4,0                                                        | 7,2  | 9,5                                                                 |

### Denitrificatie

Het stikstofrijke water bevat onvoldoende BZV voor denitrificatie, zodat dosering van externe koolstofbron noodzakelijk is. In het onderzoek is hiervoor methanol toegepast. Tijdens duurproef 1 en 2 bleek een periode van ongeveer 20 dagen noodzakelijk voor de adaptatie van het actief-slib aan methanol.

In figuur 16 is het denitrificatierendement als functie van de tijd gedurende de drie duurproeven weergegeven. Vanwege de lange adaptatietijd is bij duurproef 1 en 2 het rendement opgevoerd tot respectievelijk 56 en 51 %. Tijdens duurproef 3 is het denitrificatierendement opgevoerd tot 89%, waarna in de laatste periode van deze duurproef zonder denitrificatie is gewerkt.



Figuur 16  
Verloop van het denitrificatierendement gedurende de drie duurproeven

Tijdens duurproef 3 zijn de procesomstandigheden voor denitrificatie zodanig ingesteld dat deze periode als representatief mag worden beschouwd voor een full-scale installatie. De denitrificatiecapaciteit bedroeg tijdens deze periode 0,49 kg NO<sub>3</sub>-N/kg d.s.

### 5.2.3 Verwijderingsrendementen

De verwijdering van N(Kj),  $\text{NH}_4\text{-N}$ , BZV en zwevend stof met de membraan-bioreactor is gedurende de gehele onderzoeksperiode volledig geweest. De gemiddelde verwijderingsrendementen per duurproef zijn samengevat in tabel 9.

Tabel 9

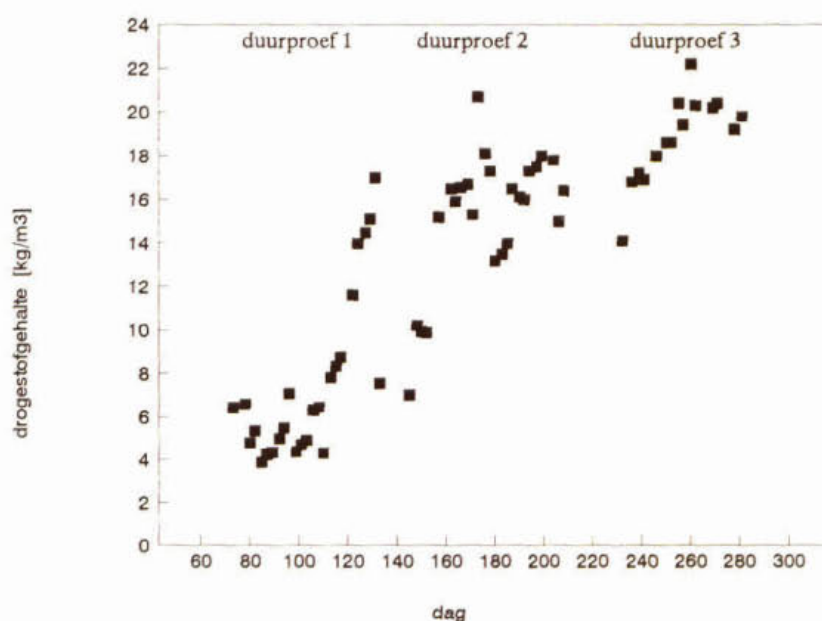
Gemiddelde verwijderingsrendementen met de membraan-bioreactor

| parameter              | verwijderingsrendement (%) |             |             |
|------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
|                        | duurproef 1                | duurproef 2 | duurproef 3 |
| CZV                    | 83,2                       | 85,9        | 84,7        |
| BZV                    | 97,6                       | 98,8        | 98,7        |
| N(Kj)                  | 99,9                       | 99,9        | 99,6        |
| $\text{NH}_4\text{-N}$ | 99,9                       | 99,8        | 99,6        |
| P-tot                  | 33,3                       | 34,6        | 33,3        |
| zwevend stof           | 100,0                      | 100,0       | 100,0       |

### 5.2.4 Drogestofgehalte en slibaangroei

Elke duurproef is gestart met een relatief laag drogestofgehalte zodat door het nauwkeurig volgen van de slibaangroei de yieldfactoren konden worden vastgesteld. Het drogestofgehalte werd vervolgens constant gehouden rond een waarde van  $20 \text{ kg/m}^3$  door het spuien van surpluslib.

In figuur 17 is het drogestofgehalte als functie van de tijd gedurende de drie duurproeven weergegeven.



Figuur 17

Verloop van het drogestofgehalte gedurende de drie duurproeven

Tijdens elke duurproef is de netto slibtoename berekend voor de periode met nitrificatie en de periode met nitrificatie en denitrificatie. Op basis van deze waarden zijn de yield-factoren berekend voor de autotrofe en heterotrofe organismen voor het stikstofrijke retourwater. Hieruit zijn de navolgende relaties afgeleid tussen de yield-factor en de slibbelasting.

Yield-factor voor heterotrofe organismen (bereik slibbelasting 0,17 - 0,41 kg CZV(kg d.s.d))

$$Y_H = 0,046 + 1,02 \cdot 10^{-4} \cdot S_{b-CZV}$$

Yield-factor voor autotrofe organismen (bereik slibbelasting 0,15 - 0,26 kg N(Kj)(kg d.s.d))

$$Y_A = 7,95 \cdot 10^{-4} \cdot S_{b-NKj} - 0,101$$

#### 5.2.5 Nitrietroute

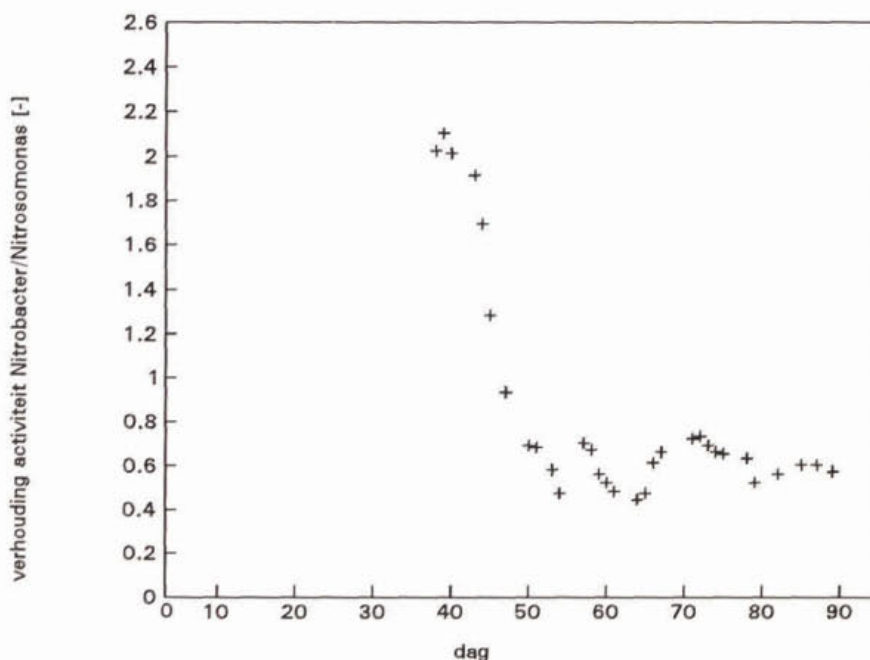
Tijdens het onderzoek is de nitrietroute geïnitieerd door toepassing van de volgende procesomstandigheden:

- hoge pH (8,5);
- hoge  $\text{NH}_4\text{-N}$  concentratie (100 mg N/l);
- hoge slibbelasting (0,3 kg N/kg oDS.d);
- lage  $\text{O}_2$ -concentratie (0,5 mg  $\text{O}_2$ /l).

Gebleken is dat de initiëring onder deze condities zonder problemen op gang komt. Binnen enkele dagen ontstaat nitrietophoping en neemt de verhouding tussen de activiteiten van Nitrobacter en Nitrosomonas snel af.

De handhaving van de nitrietroute kon worden bewerkstelligd door tijdens de initiëring van de nitrietroute het gevormde nitriet direct weg te vangen door het nitriet te denitrificeren.

De verhouding tussen de activiteiten van Nitrobacter en Nitrosomonas is een maat voor het aandeel van de nitrietroute. Zodra de verhouding Nitrobacter/Nitrosomonas < 1 is, wordt in de installatie nitriet opgehoopt. In figuur 18 is het verloop van de verhouding Nitrobacter/Nitrosomonas gedurende het onderzoek weergegeven.



Figuur 18  
Verloop van de verhouding tussen Nitrobacter en Nitrosomonas

### 5.2.6 Chemicaliënverbruik

In de membraan-bioreactor wordt loog en in geval van denitrificatie ook methanol verbruikt. In tabel 10 zijn de belangrijkste factoren die het loog- en methanolverbruik bepalen samengevat.

**Tabel 10**  
**Bepalende factoren voor loog- en methanolverbruik**

| loogverbruik                                                                                                                 | methanolverbruik                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| mate van nitrificatie<br>mate van denitrificatie<br>alkaliteit van het afvalwater<br>procescondities (luchtdebiet, druk, pH) | mate van denitrificatie<br>nitriet/nitraatroute<br>bruto yield van het denitrificatieproces<br>over/onderdosering van methanol of methanolopslag<br>als reservestof |

Het loogverbruik kan theoretisch worden berekend op grond van de alkaliteitsverandering bij het nitrificatie/denitrificatieproces en een  $\text{CO}_2$ -balans. De theoretische berekening is getoetst aan het loogverbruik tijdens de drie duurproeven. Hieruit blijkt dat de theoretische berekening goed kan worden gebruikt voor de bepaling van het loogverbruik. Het loogverbruik bij volledige nitrificatie, 85 % denitrificatie en een pH van 6,8 is relatief laag (5 - 7,5 mol  $\text{OH}^-$  per kg  $\text{N}_{\text{verw}}$ ).

Het methanolverbruik wordt met name bepaald door de wijze waarop de nitrificatie/denitrificatie verloopt. De nitrificatie/denitrificatie kan volledig via nitraat of volgens een kortere route via nitriet verlopen.

#### *Nitraatroute*

Tijdens de duurproeven is voor de behandeling van het stikstofrijke retourwater met de membraan-bioreactor het volgende verband voor het methanolverbruik vastgesteld:

nitraatroute : 2,6 kg methanol/kg  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$

#### *Nitrietroute*

Tijdens het aanvullende onderzoek [22] naar de nitrificatie/denitrificatie via de nitrietroute is gebleken dat het methanolverbruik aanzienlijk lager is. Daarnaast is de zuurstofvraag voor het nitrificatieproces ook aanzienlijk lager. Het actuele zuurstofgehalte in de bioreactor is tijdens het onderzoek gehandhaafd op een concentratie < 0,5 mg  $\text{O}_2/\text{l}$ . Dit is nog eens extra gunstig gebleken voor de zuurstofoverdracht en het methanolverbruik. Het nitrificatierendement bleef onder deze omstandigheden gehandhaafd op meer dan 90 %.

Voor de nitrificatie/denitrificatie van het stikstofrijke retourwater via de nitrietroute is het volgende verband voor het methanolverbruik vastgesteld:

nitrietroute : 1,6 kg methanol/kg  $\text{NO}_2\text{-N}_{\text{verw}}$

### 5.2.7 Membraanfiltratie

Tijdens het onderzoek is een aantal membranen getest. De geschiktheid van de membranen voor de slib/waterscheiding binnen deze toepassing uit zich in de flux ( $\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ), het energieverbruik en de levensduur. Het hydrofiele polysulfon membraan MPL2 werd het meest geschikt bevonden.

Uit het additioneel uitgevoerd onderzoek naar membraanfiltratie is het volgende gebleken:

- De gemiddelde flux door het MPL2-membraan bedraagt 116 l/(m<sup>2</sup>.h); hierbij varieerde de flux van ongeveer 80 - 155 l/(m<sup>2</sup>.h). De schommelingen waren voornamelijk te wijten aan de bedrijfsvoering van de proefinstallatie.
- Het drogestofgehalte is tot een concentratie van 20-22 kg/m<sup>3</sup> in de membraan-bioreactor nauwelijks van invloed op de membraanflux.
- De minimale stroomsnelheid over de membranen dient 4,5 m/s te bedragen.
- Het energieverbruik bedraagt 4,6 kWh/m<sup>3</sup><sub>permeaat</sub> bij een gemiddelde flux van 116 l/(m<sup>2</sup>.h).

### 5.3 Airliftreactor

#### 5.3.1 Inleiding

In dit onderzoek heeft de nadruk gelegen op het vaststellen van de nitrificatiecapaciteit bij verschillende procescondities. Het onderzoek kan worden verdeeld in de volgende fasen:

1. Startperiode: hierin is een nitrificerende populatie in de biofilm gekweekt.
2. Maximalisatie van de nitrificatie: onderzoek bij lage ammoniumstikstofgehalten in het water.
3. Onderzoek bij verhoogde ammoniumstikstofgehalten in het water.

De voornaamste gegevens van de perioden zijn samengevat in tabel 11.

Tabel 11

Indeling van het onderzoek met de airliftreactor

| periode       | ingangskon.<br>N (Kj) (mg/l) | temp<br>°C | pH  | slibgehalte (kg org. d.s./m <sup>3</sup> ) |     |
|---------------|------------------------------|------------|-----|--------------------------------------------|-----|
|               |                              |            |     | min                                        | max |
| 03/01 - 31/05 | 363                          | 18,6       | 7,5 | 0                                          | 2,9 |
| 01/06 - 30/09 | 361                          | 24,6       | 7,9 | 1,0                                        | 7,0 |
| 01/10 - 02/11 | 420-850                      | 22,3       | 7,7 | 7,1                                        | 7,9 |

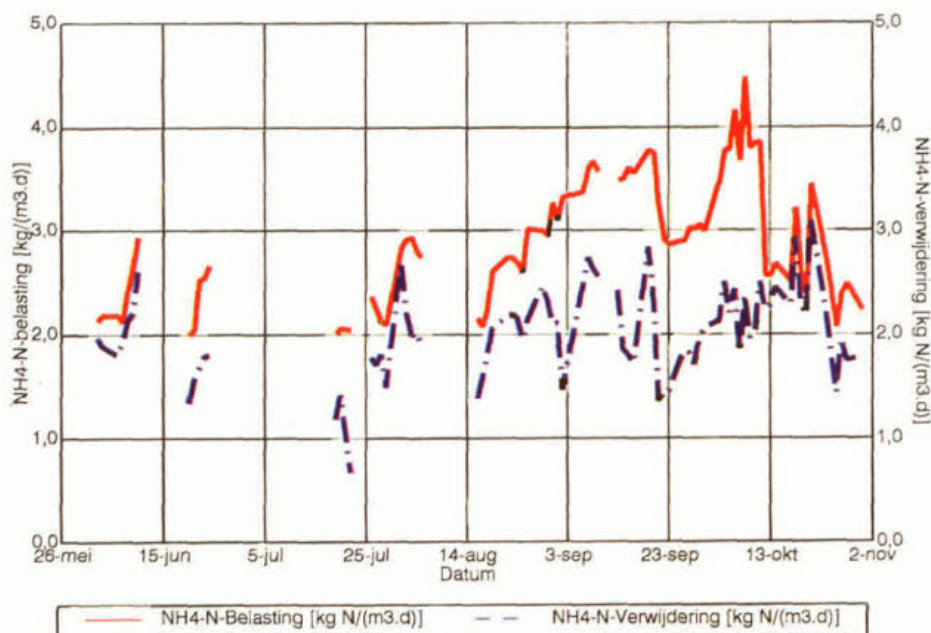
Daarnaast is er additioneel onderzoek uitgevoerd aan de volgende aspecten:

- biofilmonderzoek (microscopisch)
- activiteitsmetingen (nitrificatie/denitrificatie)

#### 5.3.2 Stikstofverwijdering

##### Nitrificatie

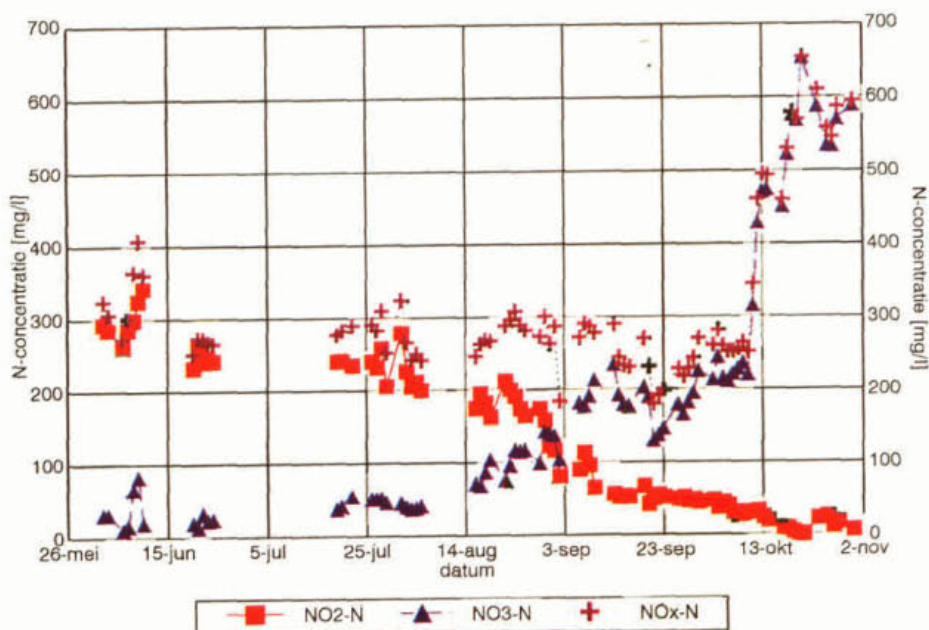
Nadat zich een goed nitrificerende biofilm heeft gevormd, is de N-belasting verder opgevoerd door verhoging van het influentdebiet. De nitrificatiecapaciteit nam toe, evenals de begroeiing op het dragermateriaal. In figuur 19 zijn de NH<sub>4</sub>-N-belasting en de NH<sub>4</sub>-N-verwijdering als functie van de tijd weergegeven. Hieruit blijkt dat de NH<sub>4</sub>-N-verwijdering relatief sterk heeft gefluctueerd. Deze fluctuaties zijn toe te schrijven aan een aantal storingen.



**Figuur 19**  
Verloop van de  $\text{NH}_4\text{-N}$  belasting en de  $\text{NH}_4\text{-N}$  verwijdering

In figuur 20 zijn de concentraties  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  en  $\text{NO}_x\text{-N}$  in het effluent als functie van de tijd weergegeven. Uit deze afbeelding blijkt dat tot begin september het grootste gedeelte van de geproduceerde  $\text{NO}_x\text{-N}$  uit nitriet bestond. In deze periode vond bij de heersende procescondities (pH, rest-ammoniumconcentratie) een selectieve inhibitie van de omzetting van nitriet naar nitraat plaats. Er is voor deze "nitriet-route" gekozen, omdat deze een aantal duidelijke voordelen kent.

Vanaf begin augustus neemt de nitraatconcentratie gestaag toe, totdat uiteindelijk vrijwel alle  $\text{NO}_x\text{-N}$  uit nitraat bestaat.



**Figuur 20**  
Verloop van de  $\text{NO}_2\text{-N}$ -,  $\text{NO}_3\text{-N}$ - en  $\text{NO}_x\text{-N}$ -concentratie als functie van de tijd

De maximale nitrificatie in de proefinstallatie werd beperkt door de maximale zuurstofinbreng. De maximale stikstofomzetting in de proefinstallatie bedroeg 3 kg N/(m<sup>3</sup>.d). De gemiddelde NH<sub>4</sub>-N-verwijdering in de periode met vergaande nitrificatie bedroeg 2,3-2,6 kg N/(m<sup>3</sup>.d).

#### Denitrificatie

Tijdens het onderzoek is zonder aanvullende dosering van een koolstofbron in het denitrificatiecompartiment van de reactor geen nitraatverwijdering geconstateerd. Het onderzoek naar denitrificatie met een externe koolstofbron kon binnen de beschikbare onderzoeksperiode niet worden uitgevoerd.

#### 5.3.3 Verwijderingsrendementen

De gemiddelde zuiveringsrendementen in de periode met maximale nitrificatie zijn samengevat in tabel 12.

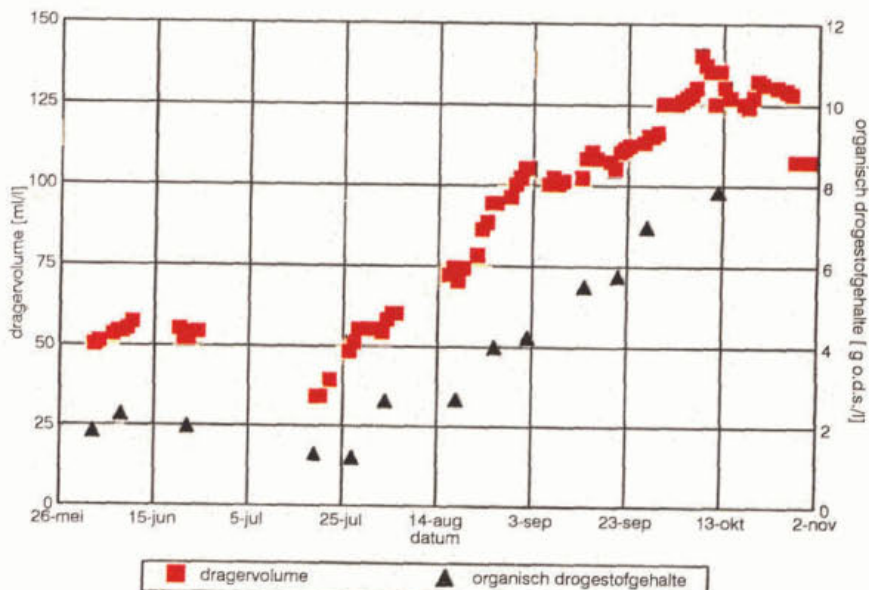
Tabel 12

Gemiddelde zuiveringsrendementen met de airliftreactor

| parameter         | concentratie in het stikstofrijk water (mg/l) | verwijderingsrendement (%) |
|-------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| CZV (gefiltreerd) | 130                                           | 69                         |
| BZV (gefiltreerd) | 10                                            | 71                         |
| P-totaal          | 24                                            | 25                         |

Het gehalte zwevend stof in het effluent van de airliftreactor is hoger dan het gehalte zwevend stof in het influent. Dit is voornamelijk het gevolg van biofilmafslag door afschuring. De stijging in het gehalte zwevend stof bedraagt gemiddeld 55 mg/l.

#### 5.3.4 Drogestofgehalte en slibaangroei



Figuur 21

Verloop van het volume aan dragermateriaal en de organische drogestofconcentratie als functie van de tijd

In figuur 21 is het volume (begroeid) dragermateriaal alsmede de organische drogestofconcentratie als functie van de tijd weergegeven. Vanaf begin augustus is sprake van een sterke toename van beide parameters. Dit wordt verklaard uit een gewijzigde biofilmsamenstelling. In eerste instantie is hierin vrijwel alleen *Nitrosomonas* aanwezig en loopt de groei van *Nitrobacter* achter. In de loop van de tijd treedt de reeds eerder genoemde wijziging in de stikstofoxydatie op (van nitrietroute naar nitraatroute), waarbij ook de biofilmsamenstelling verandert. Uiteindelijk is een evenwichtssituatie bereikt, met een vrijwel constante concentratie begroeid dragermateriaal.

Op basis van de netto stikstoftoename is de yield-factor van de autotrofe organismen berekend op  $0,14 \text{ kg org. d.s.}/(\text{kg NH}_4\text{-N})_{\text{verw}}$ .

#### 5.3.5 Chemicaliënverbruik

In de airliftreactor wordt loog verbruikt. Voor de factoren die van invloed zijn op het loogverbruik wordt verwezen naar tabel 10. Het loogverbruik in de proefinstallatie kwam overeen met  $1,1 \text{ mol}$  per mol  $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}$ . De aanwezige alkaliteit in het afvalwater in combinatie met de  $\text{CO}_2$ -balans resulteerde in een besparing van 45% op het loogverbruik ten opzichte van volledige compensatie van het alkaliteitsverlies bij nitrificatie ( $2 \text{ mol}$  per mol  $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}$ ).

Door de relatief hoge beluchtingsintensiteit vindt, mede door de aanwezigheid van polyelektrolyet in het influent, aan het wateroppervlak van de airliftreactor sterke schuimvorming plaats. Dit is ongewenst, omdat hierdoor overlast in de omgeving en verlies van dragermateriaal uit de reactor kunnen optreden. Om de schuimvorming te bestrijden wordt het wateroppervlak van de airliftreactor besproeid met effluent van de airliftreactor, waaraan een anti-schuimmiddel is toegevoegd. Tijdens het onderzoek is per dag gemiddeld 1-2 liter anti-schuim (verdund tot 20 p.p.m.) verbruikt.

### 5.4 Luchtstrippen

Het uitgevoerde onderzoek kan als volgt worden onderverdeeld:

1. invloed van de procescondities (pH, temperatuur, gas/waterverhouding) op het stikstofverwijderingsrendement bij lage ammoniumconcentraties;
2. als 1., maar bij verhoogde ammoniumconcentraties van 1.000-1.200 en 1.800-2.000 mg N/l;
3. werking van de scrubber voor de behandeling van ammoniakrijke lucht;
4. werking van de katalytische naverbranding voor de behandeling van ammoniakrijke lucht.

Daarnaast is additioneel onderzoek uitgevoerd naar werking van flocculatie/precipitatie en aangroei en scaling.

In figuur 22 is in een tijdschema de indeling van de genoemde deelonderzoeken weergegeven.

|           | luchtstrippen                                 |                                           | stoomstrippen              |                                           |
|-----------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|
| januari   |                                               |                                           |                            |                                           |
| februari  | onderzoek<br>temperatuur<br>lucht/water-verh. | onderzoek<br>flocculatie/<br>precipitatie |                            |                                           |
| maart     | N-concentratie<br>en pH                       | onderzoek<br>noodzaak<br>voorbehandeling  |                            |                                           |
| april     |                                               |                                           |                            |                                           |
| mei       |                                               |                                           | onderzoek<br>restprodukten |                                           |
| juni      |                                               | onderzoek<br>katalytische<br>verbranding  |                            |                                           |
| juli      |                                               |                                           | onderzoek<br>scrubber      |                                           |
| augustus  |                                               |                                           | onderzoek<br>restprodukten | onderzoek<br>pH                           |
| september |                                               | onderzoek<br>noodzaak<br>voorbehandeling  |                            | stoom/water-verh.<br>en<br>N-concentratie |
| oktober   |                                               |                                           |                            | aangroei<br>en<br>scaling                 |

Figuur 22

Tijdschema van het onderzoek naar lucht- en stoomstrippen op de rwzi Utrecht (1994)

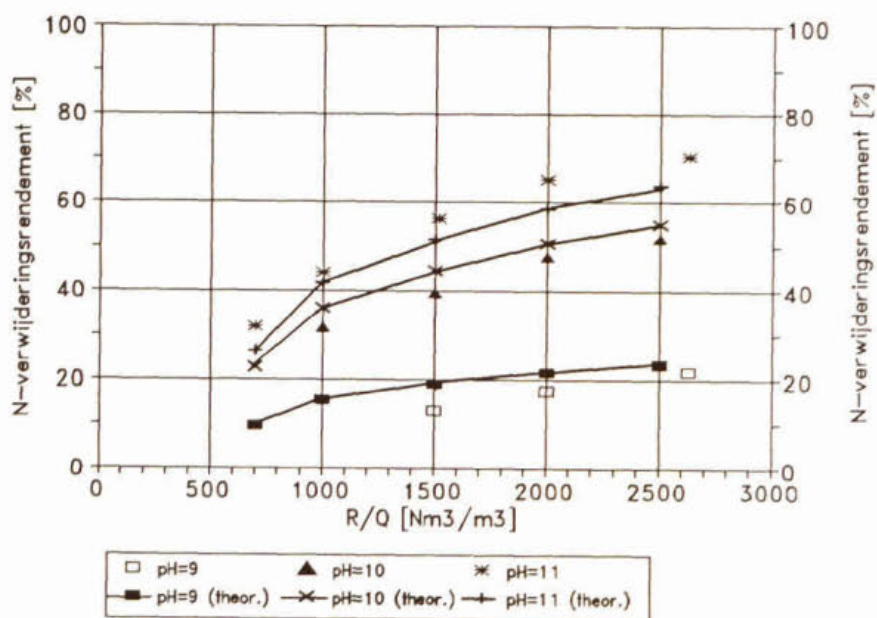
#### 5.4.1 Invloed van de procescondities

De metingen aan de luchtstripper zijn uitgevoerd bij verschillende pH's en verschillende lucht/water-verhoudingen (R/Q). In de figuren 23 en 24 zijn de resultaten van de metingen met lage ammoniumconcentratie bij 25°C respectievelijk 50°C grafisch weergegeven.

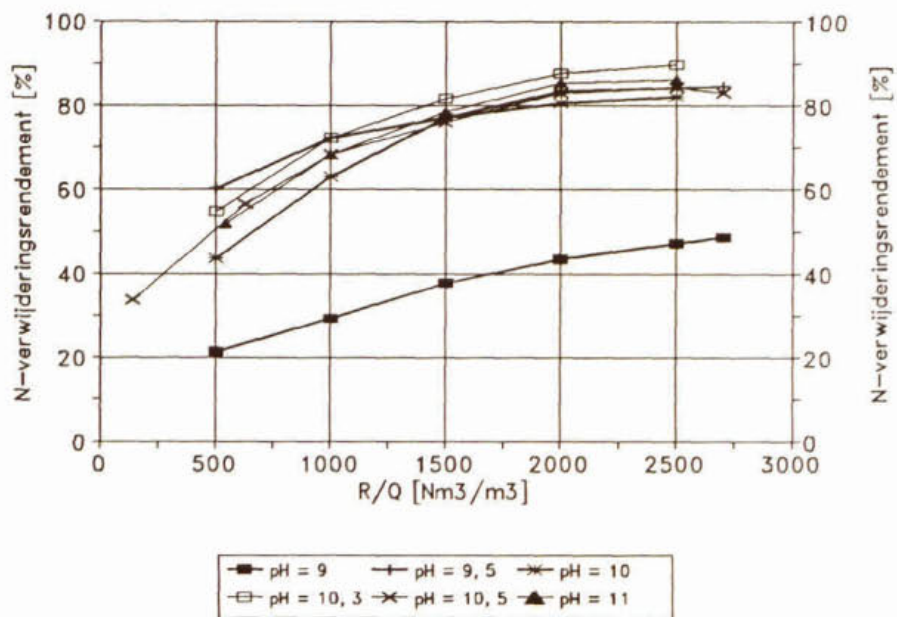
De resultaten zijn vergeleken met voorspelde waarden afkomstig van een computermodel van een striptoren. In figuur 23 zijn zowel de theoretisch als de gemeten waarden weergegeven.

Uit de goede overeenstemming kan worden geconcludeerd dat de aanwezigheid van andere componenten dan ammonium in het onderzochte water geen merkbare invloed heeft op het stripproces.

De resultaten zijn gebruikt om randvoorwaarden voor de procescondities te formuleren; deze zijn samengevat in tabel 13.



Figuur 23  
NH<sub>4</sub>-N-verwijderingsrendement als functie van R/Q bij een temperatuur van 25°C (NH<sub>4</sub>-N = 400 mg/l)



Figuur 24  
NH<sub>4</sub>-N-verwijderingsrendement als functie van R/Q bij een temperatuur van 50°C (NH<sub>4</sub>-N = 400 mg/l)

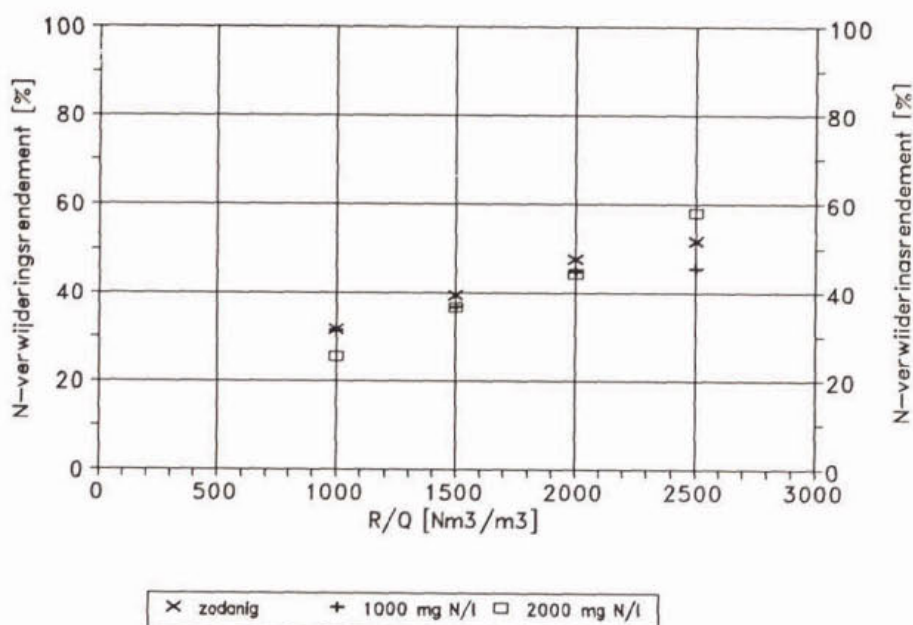
Tabel 13

Procescondities voor het luchtstripproces

| parameter   | eenheid                         | waarde       |            |
|-------------|---------------------------------|--------------|------------|
| temperatuur | °C                              | 25           | 50         |
| pH          | -                               | $\geq 10,5$  | $\geq 9,5$ |
| R/Q         | Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | $\geq 2.000$ | 1.000      |

#### 5.4.2 Invloed van de ammoniumconcentratie

In figuur 25 zijn de resultaten van de metingen bij verschillende ingangskoncentraties aan ammonium, een pH-waarde van 10,5 en een temperatuur van 25°C samengevat.



Figuur 25

Samenvatting van de meetresultaten bij een striptemperatuur van 25°C en een pH van 10,5

Uit de resultaten blijkt dat het NH<sub>4</sub>-N-verwijderingsrendement nagenoeg onafhankelijk is van de ingangskoncentratie, hetgeen ook in overeenstemming is met de theorie.

#### 5.4.3 Werking van de scrubber

In de scrubber wordt de ammoniakhoudende lucht uit de stripkolom in contact gebracht met een zuur, waardoor de ammoniak chemisch wordt gebonden als ammoniumzout in de scrubbervloeistof. In het kader van het onderzoek zijn zwavelzuur en fosforzuur toegepast.

Omdat de uitgaande lucht van de scrubber wordt gebruikt als ingaande lucht voor de stripkolom, is een vrijwel volledige ammoniakverwijdering uit de in de scrubber behandelde lucht van groot belang. Verhoogde ammoniakconcentraties in de retourlucht hebben een negatieve invloed op de NH<sub>4</sub>-N-verwijdering in de stripkolom.

Uit de resultaten blijkt dat bij pH-waarden tot ongeveer 3-3,5 de ammoniak vrijwel volledig uit de behandelde lucht is verwijderd. Bij een pH-waarde van 4 is de NH<sub>3</sub>-concentratie < 10 ppm. Boven een pH-waarde van 4 neemt de NH<sub>3</sub>-concentratie toe.

De (verzadigde) scrubbervloeistoffen zijn geanalyseerd. De resultaten hiervan zijn gebruikt voor het onderzoek naar de afzet van reststoffen [8].

#### 5.4.4 *Werking van de katalytische verbranding*

In de katalytische verbrandingsinstallatie wordt de ammoniakhoudende lucht verbrand tot stikstof en water. Daarnaast kan de verbrandingslucht ook stikstofoxyden ( $\text{NO}_x$ ) bevatten. Aan de emissie van  $\text{NO}_x$  worden wettelijk eisen gesteld [23].

In het onderzoek naar de katalytische verbranding is met name aandacht besteed aan de invloed van de verbrandingstemperatuur in het gebied van 260-320°C.

De resultaten kunnen als volgt worden samengevat:

- de  $\text{NH}_3$ -verwijdering uit de lucht neemt toe met stijgende temperatuur;
- de  $\text{NO}_x$ -concentratie in de verbrandingslucht neemt toe met stijgende temperatuur;
- het temperatuurtraject, waarbij voldaan wordt aan de emissie-voorwaarden voor  $\text{NO}_x$  en waarbij tevens een vrijwel volledige  $\text{NH}_3$ -verwijdering wordt bereikt, loopt van 280-300°C.

#### 5.4.5 *Werking van de flocculatie/precipitatie*

De voorbehandeling van een stripperinstallatie is gericht op het voorkomen van met name verstoppings- en scalingsproblemen.

In de voorbehandeling moeten derhalve met name carbonaat en zwevend stof worden verwijderd. De verwijdering van carbonaat vindt plaats door precipitatie als calciumcarbonaat. Het aanwezige koolzuur is volledig in de vorm van carbonaat aanwezig bij hogere pH-waarden. Neveneffect van de pH-verhoging is een uitvlokking van het zwevend stof.

Tijdens het onderzoek is zowel op pilot-plantschaal als op laboratoriumschaal aandacht besteed aan de voorbehandeling door flocculatie/precipitatie.

Uit de resultaten blijkt een vergaande verwijdering van zwevend stof mogelijk bij pH-waarden > 10. Het gehalte aan zwevend stof na flocculatie/precipitatie bedroeg gemiddeld 20 mg/l.

In de voorbehandeling vindt tevens verwijdering plaats van fosfaat en CZV.

#### 5.4.6 *Chemicaliënverbruik*

Bij het luchtstripproces worden chemicaliën gebruikt voor het instellen van de pH en de binding van ammoniak in de scrubber. De economisch meest aantrekkelijke chemicaliën hiervoor zijn kalk respectievelijk zwavelzuur.

Het kalkverbruik is sterk afhankelijk van de gehalten aan bicarbonaat en ammonium in het te behandelen water. Het zwavelzuurverbruik wordt bepaald door de maximaal realiseerbare ammoniumsulfaatconcentratie in de scrubber.

### 5.5 *Stoomstrippen*

#### 5.5.1 *Inleiding*

Het onderzoek is op twee locaties (rwzi Amsterdam-Oost en rwzi Utrecht) uitgevoerd. Het uitgevoerde onderzoek op de rwzi Amsterdam-Oost is als volgt onderverdeeld:

1. Invloed van de ammoniumingangsconcentratie op het stikstofverwijderingsrendement en op de condensaatkwaliteit.
2. Invloed van de pH op het stikstofverwijderingsrendement.
3. Werking van de voorbehandeling.
4. Beoordeling van de kwaliteit van het ammoniakaal water.
5. Gebruik van warmte.

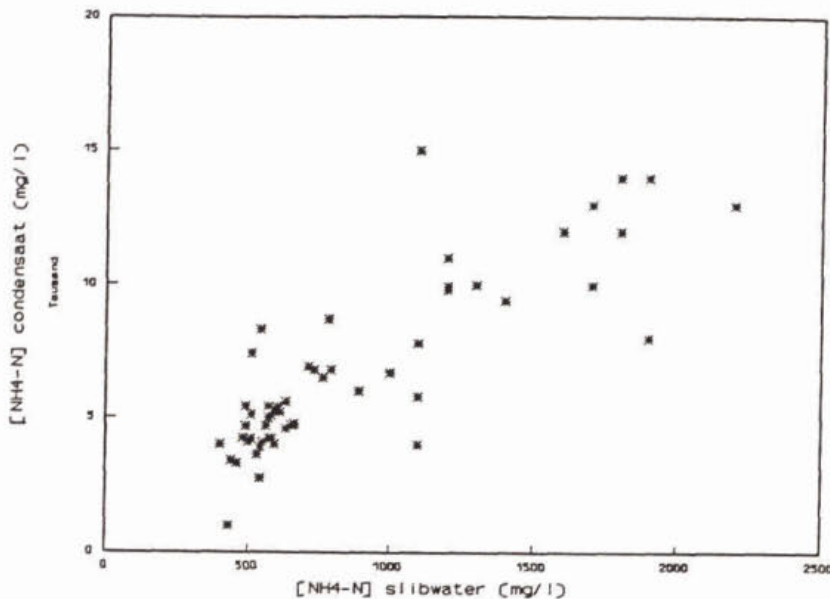
Het onderzoek op de rwzi Utrecht is gericht geweest op de invloed van procescondities (pH, stoom/water-verhouding) op het stikstofverwijderingsrendement. Daarnaast is op laboratorium-schaal onderzoek verricht naar concentrering van het condensaat.

#### 5.5.2 *Invloed van de ammoniumingangconcentratie*

De proefinstallatie op de rwzi Amsterdam-Oost werkte bij een vaste stoom/water-verhouding van ongeveer 113 kg/m<sup>3</sup> water.

Bij een pH-waarde van 11 is de werking van de installatie onderzocht bij drie verschillende ammoniumconcentraties in het te behandelen water in het traject van 500-2000 mg NH<sub>4</sub>-N/l. Het ammoniumstikstofverwijderingsrendement was gemiddeld 91%, onafhankelijk van de ingangconcentratie. Dit is in overeenstemming met de theorie.

De ammoniumconcentratie in het te behandelen water heeft wel een sterke invloed op de ammoniakconcentratie in het condensaat na de stripkolom. De resultaten zijn weergegeven in figuur 26.

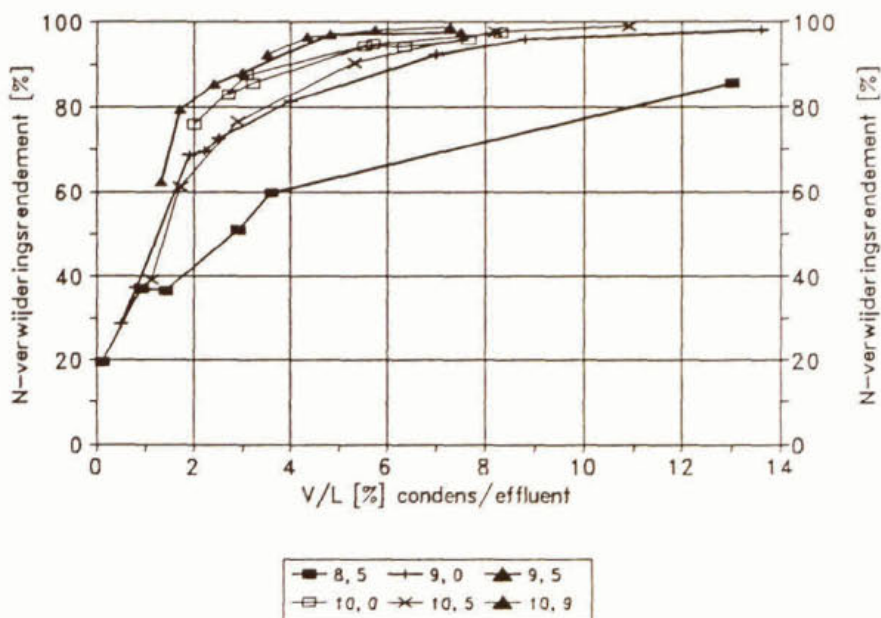


Figuur 26  
Relatie tussen de ammoniakconcentratie in het condensaat en de ammoniumconcentratie in het te behandelen water

Uit figuur 25 blijkt, dat de ammoniakconcentratie in het condensaat vrijwel recht evenredig is met de ammoniumconcentratie in het te behandelen water.

#### 5.5.3 *Invloed van de procescondities*

Op de rwzi Utrecht is de invloed van de pH en de stoom/water-verhouding op het stikstofverwijderingsrendement onderzocht. Voor een ammoniumconcentratie in het te behandelen water van 1000 mg/l zijn de resultaten weergegeven in figuur 27.



Figuur 27

$\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijderingsrendement als functie van de verhouding stoom/influent bij verschillende pH-waarden

Uit de resultaten kan worden geconcludeerd, dat vanaf een pH-waarde van 9 het stikstofverwijderingsrendement onafhankelijk is van de pH.

Dit is in overeenstemming met de resultaten van het onderzoek op de rwzi Amsterdam-Oost, waar in het pH-bereik van 10 tot 12 geen invloed op het verwijderingsrendement werd gevonden.

De resultaten kunnen tevens worden gebruikt voor de keuze van de minimaal benodigde stoom/water-verhouding.

#### 5.5.4 Voorbehandeling

Vanwege de hoge temperaturen treedt in een stoomstripinstallatie sneller scaling op dan in een luchtstripinstallatie. De voorbehandeling is daarom met name gericht op de verwijdering van carbonaat. Hiervoor is op de rwzi Amsterdam-Oost flocculatie/precipitatie met kalkmelk toegepast. Bij de voorbehandeling worden naast carbonaat ook zwevend stof en fosfaat verwijderd. In de proefinstallatie bedroeg bij een dosering van  $3,3 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{m}^3$  de totale slibproductie (calciumcarbonaat, calciumfosfaat en zwevende stof)  $4,5 \text{ kg d.s./m}^3$ .

#### 5.5.5 Kwaliteit van het ammoniakale water

Het geconcentreerde ammoniakale water, dat in de proefinstallatie op de rwzi Amsterdam-Oost werd geproduceerd, had een ammoniakgehalte van 25-27 gewichts%. Het condensaat van de stoomstripper van de rwzi Utrecht is op laboratoriumschaal geconcentreerd tot 27 gewichts% ammoniak. De geconcentreerde ammoniakale oplossingen zijn geanalyseerd op de gehalten aan zware metalen, CZV en zwevend stof. De resultaten zijn gebruikt voor het onderzoek naar de afzet van reststoffen [8].

#### 5.5.6 Chemicaliënverbruik

Bij het stoomstripproces wordt een base gebruikt om de pH in te stellen. Het is economisch het meest aantrekkelijk om hiervoor  $\text{Ca(OH)}_2$  te gebruiken. Het specifieke verbruik is afhankelijk van de gehalten aan bicarbonaat en ammonium in het te behandelen water.

## 5.6 MAP/CAFR-proces

### 5.6.1 Inleiding

Het onderzoek naar het MAP/CAFR-proces is onderverdeeld in:

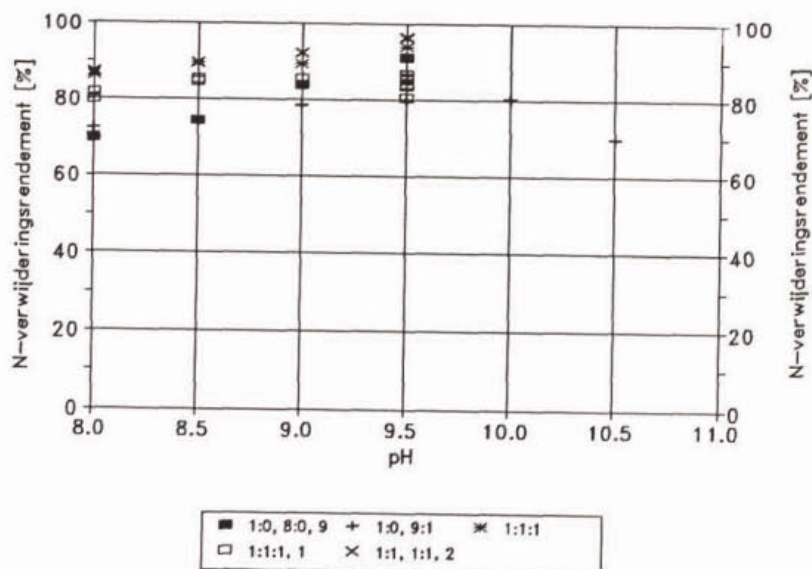
1. Invloed van de procescondities (pH, molaire N:P:Mg-verhouding, entkristalconcentratie).
2. Opwerking en recirculatie van het MAP-slib.
3. Algemene toepasbaarheid bij verhoogde ammoniumconcentraties.

Daarnaast heeft additioneel onderzoek plaatsgevonden naar de voorbehandeling van het stikstofhoudende water.

### 5.6.2 Invloed van de procescondities

Het onderzoek naar de invloed van de pH en de molaire N:P:Mg-verhouding is zowel in de proefinstallatie als op laboratoriumschaal uitgevoerd.

In figuur 28 zijn de resultaten van het onderzoek in de pilot-plant installatie weergegeven.



Figuur 28

NH<sub>4</sub>-N-verwijdering bij verschillende molaire verhoudingen en pH's

Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat de optimale pH-waarde uit oogpunt van NH<sub>4</sub>-N-verwijdering 9,5 bedraagt. De hoogste NH<sub>4</sub>-N-verwijdering wordt bereikt bij een molaire verhouding N:P:Mg van 1:1,1:1,2. Dit is conform de verwachting, omdat zowel P als Mg in overmaat zijn gedoseerd.

Uit het onderzoek naar de invloed van de entkristalconcentratie is gebleken, dat in het concentratiebereik van 10-20 kg/m<sup>3</sup> de entkristalconcentratie geen invloed heeft op het NH<sub>4</sub>-N-verwijderingsrendement.

### 5.6.3 Opwerking en recirculatie van het MAP-slib

Bij het CAFR-proces wordt de productie van MAP-slib en het chemicaliënverbruik gereduceerd door het MAP-slib op te werken. Bij hoge temperatuur (> 80°C) valt het MAP-kristal

uiteen. Door de pH te verhogen wordt het vrije ammonium omgezet in ammoniak, dat vervolgens kan worden gestript. Het resterende  $\text{MgHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  en/of  $\text{MgNaPO}_4 \cdot \text{x H}_2\text{O}$  wordt teruggevoerd naar de kristallisatiereactor. Dit onderzoek heeft zowel op laboratoriumschaal als op pilot-plant schaal plaatsgevonden.

Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat voor een volledige  $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering uit het MAP-slib een temperatuur van meer dan  $80^\circ\text{C}$  en een pH-waarde boven de 12,75 vereist zijn.

Het onderzoek naar het hergebruik van het opgewerkte MAP-slib in het CAFR-proces is uitgevoerd op pilot-plant schaal en op laboratoriumschaal. Het bleek echter niet goed mogelijk om in de opwerkingsreactor van de pilot-plant het uit het MAP-slib vrijgemaakte  $\text{NH}_3$  met voldoende rendement te strippen, zodat het CAFR-proces alleen op laboratoriumschaal kon worden onderzocht. Het onderzoek heeft zich daarbij toegespitst op het vaststellen van de activiteit van de opgewerkte chemicaliën. Hieruit bleek, dat de opgewerkte  $\text{MgHPO}_4$ -houdende slurry goed herbruikbaar is voor MAP-vorming.

#### 5.6.4 *Algemene toepasbaarheid van het systeem*

Het MAP-proces is eveneens uitgevoerd met verhoogde N-concentraties. Hiertoe is ammoniumchloride aan het centraat toegevoegd. De test is uitgevoerd bij een molaire N:P:Mg-verhouding van 1:1:1,1 en  $\text{pH} = 9$ . Het debiet tijdens deze proeven heeft  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  bedragen. De concentratie was opgevoerd tot 1.000 en 1.800 mg N/l.

Uit de resultaten blijkt dat de N-concentratie niet of nauwelijks invloed heeft op het verwijderingsrendement.

#### 5.6.5 *Voorbehandeling van het stikstofhoudend water*

In het centraat komt nog een hoeveelheid zwevend stof voor, die niet door bezinking is af te scheiden. In het reactievat van het MAP-proces vindt door het toevoegen van natronloog wel flocculatie plaats.

Het gevormde MAP-slib bevat op deze manier een relatief hoog gehalte aan verontreinigingen. Dit is te ondervangen door het stikstofhoudende water door flocculatie/precipitatie voor te behandelen. Hierbij wordt een gedeelte van de natronloog gedoseerd tot een pH-waarde van ongeveer 9. Bij deze pH vlokt een groot gedeelte van de zwevende stoffen uit, waarna deze in een bezinktank worden afgescheiden.

Naast verwijdering van zwevend stof vindt er in de voorbehandeling ook verwijdering plaats van fosfaat, carbonaat en calcium.

#### 5.6.6 *Chemicaliënverbruik*

In het MAP-proces worden als chemicaliën gebruikt:

- magnesiumoxyde of magnesiumchloride;
- fosforzuur;
- natronloog.

Het is economisch het meest aantrekkelijk om uit te gaan van de afzonderlijke chemicaliën magnesiumoxyde of magnesiumchloride en fosforzuur. Nadelen hiervan zijn de noodzakelijke opslagvoorzieningen en handling, terwijl voor een goede beschikbaarheid van het magnesium het oplossen van het magnesiumoxyde of het magnesiumchloride in fosforzuur noodzakelijk is. Dit vraagt een extra tank met de nodige regelvoorzieningen.

Het natronloogverbruik voor het instellen van de gewenste pH (9,5) is afhankelijk van de buffercapaciteit van het centrifugaat en de dosering van fosforzuur. Voor het centrifugaat van de rwzi Utrecht was het verbruik gemiddeld 5 - 10 ml/l van 20%  $\text{Na(OH)}$ .

## 6 TOEPASSING IN DE NEDERLANDSE PRAKTIJK

### 6.1 Inleiding

Op basis van de resultaten uit het praktijkonderzoek zijn per systeem dimensioneringsgrondslagen opgesteld. Met behulp van de dimensioneringsgrondslagen zijn installaties ontworpen voor de behandeling van stikstofrijke retourstromen van twee rwzi's met verschillende capaciteit (100.000 i.e. en 400.000 i.e.) en voor drie verschillende stikstofconcentraties in het te behandelen water. Van elke installatie is een raming opgesteld van de stichtings- en de exploitatiekosten. De stichtingskosten zijn geraamd met een nauwkeurigheidsmarge van ongeveer 25%. Bij de exploitatiekosten is voor de berekening van de kapitaalslasten uitgegaan van annuïtaire afschrijving. De gehanteerde rentevoet alsmede het prijsniveau van de variabele kosten zijn hierbij gesteld op het peil van maart 1995.

#### *Stichtingskosten*

Voor de raming van de bouwkosten is in een aantal gevallen mede gebruik gemaakt van ramingen van de leveranciers. Bij de raming van de stichtingskosten zijn de volgende opslagfactoren in rekening gebracht:

- bijkomende kosten 10%;
- onvoorzien 10%;
- advieskosten 10%;
- BTW 17,5%.

#### *Exploitatiekosten*

Bij de raming van de exploitatiekosten zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- rentevoet 8%;
- afschrijvingstermijn civiel 30 jaar;
- afschrijvingstermijn mechanisch/elektrisch 15 jaar;
- annuïteit civiel 8,9%;
- annuïteit mechanisch/elektrisch 11,7%;
- onderhoud civiel 0,5% van de aanneemsom;
- onderhoud mechanisch/elektrisch 3% van de aanneemsom;
- energiekosten f 0,15/kWh;
- stoomkosten f 50,-/ton;
- aardgas f 0,51/Nm<sup>3</sup>;
- chemicaliënkosten (excl. BTW):
  - . CaO f 230,-/ton
  - . loog (33% NaOH) f 270,-/ton;
  - . zwavelzuur (96%) f 175,-/ton;
  - . fosforzuur (75%) f 500,-/ton;
  - . salpeterzuur (60%) f 200,-/ton;
  - . methanol f 650,-/ton;
  - . magnesiumoxyde f 450,-/ton;
- personeelskosten f 80.000,-/manjaar;
- opbrengst van de geproduceerde chemicaliën (inclusief transportkosten):
  - . ammoniakal water (25%) f 75,-/ton;
  - . ammoniumsulfaat f 0,-/ton;
  - . ammoniumfosfaat (45%) f 85,-/ton;
  - . ammoniumnitraat (50%) f 50,-/ton;
  - . MAP-slib (30% d.s.) f 17,-/ton;
- membraanvervanging;
  - . standtijd 2 jaar;

. kosten f 800,-/m<sup>2</sup>.

#### Standaard-rwzi's

In de dimensioneringsvoorbeelden is uitgegaan van de behandeling van het stikstofrijke retourwater van een zuivering van 100.000 i.e. en van een zuivering van 400.000 i.e. Voor de stikstofconcentratie in het te behandelen water is uitgegaan van drie verschillende concentraties uit het concentratiebereik, dat in de Nederlandse praktijk afhankelijk van de rwzi en het type slibverwerking kan voorkomen. In tabel 14 zijn de voornaamste gegevens van het stikstofrijke retourwater voor de standaard-rwzi's samengevat.

**Tabel 14**  
Uitgangspunten voor de standaard-rwzi's

| parameter             | eenheid                 | waarde  |       |       |         |       |       |
|-----------------------|-------------------------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| capaciteit            | i.e.                    | 100.000 |       |       | 400.000 |       |       |
| totaal-stikstof       | kg N/d                  | 95      |       |       | 380     |       |       |
| ammoniumstikstof      | kg NH <sub>4</sub> -N/d | 90      |       |       | 360     |       |       |
| temperatuur           | °C                      | 20      |       |       | 20      |       |       |
| variant               | -                       | 1       | 2     | 3     | 4       | 5     | 6     |
| debiet                | m <sup>3</sup> /d       | 50      | 100   | 200   | 200     | 400   | 800   |
| stikstofconcentratie  | g/m <sup>3</sup>        | 1.900   | 950   | 475   | 1.900   | 950   | 475   |
| ammoniumconcentratie  | g/m <sup>3</sup>        | 1.800   | 900   | 450   | 1.800   | 900   | 450   |
| drogestofconcentratie | g/m <sup>3</sup>        | 1.000   | 1.000 | 1.000 | 1.000   | 1.000 | 1.000 |
| alkaliteit            | mmol/l                  | 136     | 68    | 34    | 136     | 68    | 34    |

#### Kosten per kilogram verwijderde stikstof

Het principe van de stikstofverwijdering bij de biologische technieken en bij de fysisch-chemische technieken is verschillend. Bij de biologische technieken vindt oxydatie van ammonium tot nitriet of nitraat plaats, waarna de geoxydeerde stikstofverbindingen via denitrificatie worden omgezet. De stikstofverwijdering vindt hierbij dus in twee processtappen plaats. Bij de fysisch-chemische technieken vindt ammoniumverwijdering in één processtap plaats. Om de kosten van de verschillende behandelingstechnieken onderling te vergelijken worden deze omgerekend naar de kosten per kilogram verwijderde Kjeldahl-stikstof. Op deze wijze komt het best tot uitdrukking dat het doel van de behandeling van de retourstromen de verlaging van de Kjeldahl-stikstofbelasting van de rwzi is.

## 6.2 Membraan-bioreactor

### 6.2.1 Ontwerpcriteria

Bij toepassing van de membraan-bioreactor voor de behandeling van stikstofrijk retourwater is de nitrificatie- en denitrificatiecapaciteit afhankelijk van:

- het drogestofgehalte;
- het zuurstofinbrengvermogen.

Het drogestofgehalte heeft invloed op de viscositeit en de zuurstofoverdracht. Een te hoge viscositeit is ongewenst vanwege de insluiting van luchtballen in de vloeistof. Het drogestofgehalte heeft ook invloed op de alpha-factor en daarmee op de zuurstofoverdracht. De nitrificatiecapaciteit van de membraan-bioreactor wordt begrensd door de maximaal mogelijke zuurstofoverdracht onder praktijkcondities. Deze wordt bepaald door de procescondities (temperatuur, druk, drogestofgehalte). Bij een reactortemperatuur van 33°C, een reactorover-

druk van 3 bar en een drogestofgehalte kan theoretisch worden afgeleid dat de maximale zuurstofoverdracht in de membraan-bioreactor  $2,3 \text{ kg O}_2/(\text{m}^3_{\text{reactor}} \cdot \text{h})$  bedraagt. Voor het ontwerp van de membraan-bioreactor wordt uitgegaan van een zuurstofoverdracht (OTR) van  $1 \text{ kg O}_2/(\text{m}^3_{\text{reactor}} \cdot \text{h})$ . De maximale nitrificatiecapaciteit van de membraan-bioreactor bij zuurstoflimitering wordt op grond van het onderzoek op  $4,4 \text{ kg N(Kj)}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$  gesteld, de maximale denitrificatiecapaciteit bij een drogestofgehalte van  $20 \text{ kg}/\text{m}^3$  op  $9,8 \text{ kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ .

De denitrificatiegraad is afhankelijk van de recirculatie van de nitrificatiereactor naar de denitrificatiereactor:

$$\text{RF} = \eta / (100 - \eta)$$

waarin: RF = recirculatiefactor (-)  
 $\eta$  = denitrificatierendement (%)

Voor een denitrificatierendement van 85% is derhalve een minimale recirculatiefactor van 5,7 noodzakelijk.

De dimensioneringsgrondslagen voor de membraan-bioreactor staan samengevat in tabel 15. Deze dimensionering is zodanig uitgevoerd dat, de membraan-bioreactor zowel via de nitraat- als de nitrietroute kan worden bedreven.

**Tabel 15**  
**Dimensioneringsgrondslagen voor de membraan-bioreactor**

|                            |                                                             |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Voorbehandeling</b>     |                                                             |
| - zeefinstallatie          |                                                             |
| - influentbuffer           | HVT = 1 dag                                                 |
| <b>Membraan-bioreactor</b> |                                                             |
| - overdruk                 | 3 bar                                                       |
| - temperatuur              | 33°C                                                        |
| - pH                       | 6,8                                                         |
| - nitrificatiecapaciteit   | 4,4 kg N/(m <sup>3</sup> ·d)                                |
| - nitrificatierendement    | ≈ 100%                                                      |
| - denitrificatiecapaciteit | 9,8 kg N/(m <sup>3</sup> ·d)                                |
| - denitrificatierendement  | 85%                                                         |
| - zuurstofinbrengvermogen  | 1 kg O <sub>2</sub> /(m <sup>3</sup> <sub>reactor</sub> ·h) |
| <b>Membraanfiltratie</b>   |                                                             |
| - membraanflux             | 116 l/m <sup>2</sup> ·h                                     |
| - energieverbruik          | 4,6 kWh/m <sup>3</sup> <sub>water</sub>                     |

### 6.2.2 Dimensioneringsvoorbeelden

De dimensionering voor de hoofdonderdelen van de verschillende varianten van de standaard-rwzi's is samengevat in tabel 16.

### 6.2.3 Kosten

Een overzicht van de stichtingskosten, de exploitatiekosten en de kosten per kg N(Kj)-verwijderd staan samengevat in tabel 17.

Bij uitvoering van de membraan-bioreactor met een denitrificatietank is een aanzienlijke besparing op het loogverbruik mogelijk in vergelijking met de situatie zonder denitrificatie.

Bij de gehanteerde prijzen voor loog en methanol is het voordeliger om het stikstofrijke water in de membraan-bioreactor zo ver mogelijk te denitrificeren dan alleen te nitrificeren en gebruik te maken van eventuele denitrificatiecapaciteit in de rwzi.

**Tabel 16**  
Dimensionering van de hoofdonderdelen voor de varianten met de membraan-bioreactor

| onderdeel                      | eenheid            | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     |
|--------------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|-------|
| pompinstallatie                | m <sup>3</sup> /h  | 2,1  | 4,2  | 8,3  | 8,3  | 16,7 | 33,3  |
| zeef                           | m <sup>3</sup> /h  | 2,1  | 4,2  | 8,3  | 8,3  | 16,7 | 33,3  |
| influentbuffer                 | m <sup>3</sup>     | 50   | 100  | 200  | 200  | 400  | 800   |
| pompinstallatie                | m <sup>3</sup> /h  | 2,1  | 4,2  | 8,3  | 8,3  | 16,7 | 33,3  |
| nitrificatiereactor            | m <sup>3</sup>     | 37   | 37   | 37   | 9,3  | 93   | 93    |
| compressorcapaciteit           | Nm <sup>3</sup> /h | 183  | 189  | 203  | 731  | 756  | 811   |
| denitrificatiereactor          | m <sup>3</sup>     | 16   | 16   | 16   | 54   | 54   | 54    |
| membraanoppervlak              | m <sup>2</sup>     | 19   | 37   | 74   | 74   | 147  | 293   |
| koeling                        | kW                 | 52   | 52   | 53   | 230  | 232  | 235   |
| methanolopslag                 | m <sup>3</sup>     | 10   | 10   | 10   | 25   | 25   | 25    |
| loogopslag                     | m <sup>3</sup>     | 5    | 5    | 5    | 15   | 15   | 15    |
| <b>nitraatroute</b>            |                    |      |      |      |      |      |       |
| methanolverbruik               | ton/d              | 0,19 | 0,18 | 0,16 | 0,77 | 0,73 | 0,65  |
| loogverbruik                   | ton/d              | 0,22 | 0,34 | 0,52 | 0,88 | 1,36 | 2,08  |
| energie voor koeling           | kW                 | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 2,3  | 2,3  | 2,3   |
| energie voor beluchting        | kW                 | 15,3 | 15,9 | 17,0 | 61,3 | 63,5 | 68,0  |
| energie voor membraanfiltratie | kW                 | 9,6  | 19,3 | 38,5 | 38,5 | 77,0 | 154,0 |
| <b>nitrietroute</b>            |                    |      |      |      |      |      |       |
| methanolverbruik               | ton/d              | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 0,47 | 0,45 | 0,40  |
| loogverbruik                   | ton/d              | 0,26 | 0,34 | 0,50 | 0,88 | 1,46 | 1,97  |
| energie voor koeling           | kW                 | 0,4  | 0,4  | 0,4  | 1,7  | 1,8  | 1,9   |
| energie voor beluchting        | kW                 | 11,7 | 12,1 | 13,4 | 45,1 | 48,3 | 54,3  |
| energie voor membraanfiltratie | kW                 | 9,6  | 19,3 | 38,5 | 38,5 | 77,0 | 154,0 |

**Tabel 17**  
Kostenoverzicht (in guldens) van de membraan-bioreactor voor de standaard-rwzi's

| variant<br>(nr.) | capaciteit<br>(i.e.) | NH <sub>4</sub> -N-<br>conc.<br>(mg/l) | stichtings-<br>kosten | exploitatie-<br>kosten | kosten per kg<br>N(kj)verw. | exploitatie-<br>kosten | kosten per kg<br>N(kj)verw. |
|------------------|----------------------|----------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|
|                  |                      |                                        |                       | nitraatroute           |                             | nitrietroute           |                             |
| 1                | 100.000              | 1800                                   | 3.060.000             | 580.000                | 16,70                       | 550.000                | 16,20                       |
| 2                | 100.000              | 900                                    | 3.600.000             | 690.000                | 19,80                       | 650.000                | 19,30                       |
| 3                | 100.000              | 450                                    | 4.520.000             | 860.000                | 24,70                       | 820.000                | 24,30                       |
| 4                | 400.000              | 1800                                   | 5.490.000             | 1.280.000              | 9,20                        | 1.170.000              | 8,60                        |
| 5                | 400.000              | 900                                    | 6.770.000             | 1.570.000              | 11,30                       | 1.470.000              | 10,80                       |
| 6                | 400.000              | 450                                    | 8.070.000             | 1.970.000              | 14,20                       | 1.880.000              | 13,80                       |

## 6.3 Airliftreactor

### 6.3.1 Ontwerpcriteria

Op basis van het onderzoek is de nitrificatiecapaciteit van de proefinstallatie vastgesteld op 2,3 kg NH<sub>4</sub>-N/(m<sup>3</sup>.d). Deze waarde wordt bepaald door de maximale zuurstofoverdracht. Voor de opschaling naar een praktijkinstallatie moet rekening worden gehouden met een verschil in zuurstofoverdracht tussen de pilot-plantinstallatie (hoogte 7 meter) en de praktijkinstallatie

(hoogte 15 meter). Deze verhoogde zuurstofoverdracht resulteert in een hogere nitrificatiecapaciteit in de praktijkreactor. Voor de maximale zuurstofoverdracht is de maximale superficiële gassnelheid in de reactor maatgevend. Voor het ontwerp van een airlift-reactor is hiervoor een waarde van 0,05 m/s aangehouden. De maximale zuurstofoverdracht (OTR) bedraagt dan 0,70 kg O<sub>2</sub>/(m<sup>3</sup><sub>reactor</sub>·h). Bij deze zuurstofoverdracht is op basis van de proefresultaten de nitrificatiecapaciteit 3,3 kg NH<sub>4</sub>-N/(m<sup>3</sup>·d). Voor het ontwerp wordt gerekend met een veiligheidsfactor van ongeveer 10% en wordt de nitrificatiecapaciteit op 3 kg NH<sub>4</sub>-N/(m<sup>3</sup>·d) gesteld, hetgeen bij een NH<sub>4</sub>-N-verwijderingsrendement van 90% overeenkomt met een NH<sub>4</sub>-N-belasting van 3,3 kg NH<sub>4</sub>-N/(m<sup>3</sup>·d).

Op basis van de onderzoeksresultaten is het niet mogelijk om een airlift-reactor te ontwerpen, waarin zowel nitrificatie als denitrificatie plaatsvindt. Voor de denitrificatie wordt daarom uitgegaan van een separate nageschakelde denitrificatie. Deze wordt gerealiseerd in een denitrificatiereactor met bezinktank en retourslibpomp. Omdat het water onvoldoende BZV bevat voor denitrificatie wordt een externe koolstofbron (methanol) gedoseerd.

De dimensioneringsgrondslagen voor de airliftreactor en de denitrificatietank staan samengevat in tabel 18.

**Tabel 18**  
Dimensioneringsgrondslagen voor de airliftreactor

|                              |                                                               |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Voorbehandeling</b>       |                                                               |
| - zeefinstallatie            |                                                               |
| - buffer                     | HVT = 1 dag                                                   |
| <b>Airliftreactor</b>        |                                                               |
| - hoogte                     | 15 meter                                                      |
| - temperatuur                | ≥ 20°C                                                        |
| - pH                         | 6,8                                                           |
| - nitrificatiecapaciteit     | 3 kg N/(m <sup>3</sup> ·d)                                    |
| - stikstofbelasting          | 3,3 kg N/(m <sup>3</sup> ·d)                                  |
| - nitrificatierendement      | 90%                                                           |
| - zuurstofinbrengvermogen    | 0,7 kg O <sub>2</sub> /(m <sup>3</sup> <sub>reactor</sub> ·h) |
| <b>Denitrificatiereactor</b> |                                                               |
| - slibgehalte                | 4 kg/m <sup>3</sup>                                           |
| - denitrificatiesnelheid     | 0,24 kg NO <sub>3</sub> -N/(kg d.s.d)                         |
| <b>Bezinktank</b>            |                                                               |
| - oppervlaktebelasting       | 0,6 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)                       |
| - retourslibverhouding       | 1                                                             |

### 6.3.2 Dimensioneringsvoorbeelden

De dimensionering van de hoofdonderdelen van de verschillende varianten van de standaard-rwzi's is samengevat in tabel 19.

### 6.3.3 Kosten

Een overzicht van de stichtingskosten, de exploitatiekosten en de kosten per kg N(Kj)-verwijderd, staan samengevat in tabel 20. Omdat bij toepassing van de airliftreactor de denitrificatie in een separate reactor plaatsvindt, is het voordelig om gebruikt te maken van de aanwezige denitrificatiecapaciteit in de rwzi. De kostenconsequenties hiervan zijn eveneens weergegeven in tabel 20.

Tabel 19

Dimensionering van de hoofdonderdelen voor de varianten met de airliftreactor

| onderdeel               | eenheid            | 1       | 2       | 3       | 4        | 5        | 6        |
|-------------------------|--------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| pompinstallatie         | m <sup>3</sup> /h  | 2,1     | 4,2     | 8,3     | 8,3      | 16,7     | 33,3     |
| zeef                    | m <sup>3</sup> /h  | 2,1     | 4,2     | 8,3     | 8,3      | 16,7     | 33,3     |
| influentbuffer          | m <sup>3</sup>     | 50      | 100     | 200     | 200      | 400      | 800      |
| pompinstallatie         | m <sup>3</sup> /h  | 2 x 2,1 | 2 x 4,2 | 2 x 8,3 | 2 x 8,3  | 2 x 16,7 | 2 x 33,3 |
| airliftreactor          | m <sup>3</sup>     | 27      | 27      | 27      | 109      | 109      | 109      |
| compressorcapaciteit    | Nm <sup>3</sup> /h | 2 x 325 | 2 x 325 | 2 x 325 | 2 x 1300 | 2 x 1300 | 2 x 1300 |
| loogopslag              | m <sup>3</sup>     | 5       | 5       | 5       | 15       | 15       | 15       |
| denitrificatietank      | m <sup>3</sup>     | 120     | 120     | 120     | 480      | 480      | 480      |
| bezinktank              | m <sup>2</sup>     | 3,5     | 7       | 14      | 14       | 28       | 56       |
| retourslibpomp          | m <sup>3</sup> /h  | 2,1     | 4,2     | 8,3     | 8,3      | 16,7     | 33,3     |
| methanolopslag          | m <sup>3</sup>     | 10      | 10      | 10      | 25       | 25       | 25       |
| methanolverbruik        | ton/d              | 0,22    | 0,22    | 0,22    | 0,88     | 0,88     | 0,88     |
| loogverbruik            | ton/d              | 0,27    | 0,27    | 0,31    | 1,07     | 1,07     | 1,22     |
| energie voor de airlift | kW                 | 26      | 26      | 26      | 74       | 74       | 74       |

Tabel 20

Kostenoverzicht (in gulden) van de airliftreactor voor de standaard-rwzi's

| variant<br>(nr.) | capaciteit<br>(i.e.) | NH <sub>4</sub> -N-<br>conc.<br>(mg/l) | nitrificatie + denitrificatie |                        |                                           | alleen nitrificatie   |                        |                                           |
|------------------|----------------------|----------------------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------------|
|                  |                      |                                        | stichtings-<br>kosten         | exploitatie-<br>kosten | kosten per<br>kg<br>N(Kj) <sub>verw</sub> | stichtings-<br>kosten | exploitatie-<br>kosten | kosten per<br>kg<br>N(Kj) <sub>verw</sub> |
| 1                | 100.000              | 1800                                   | 3.400.000                     | 680.000                | 23,00                                     | 2.230.000             | 470.000                | 15,90                                     |
| 2                | 100.000              | 900                                    | 3.490.000                     | 690.000                | 23,30                                     | 2.260.000             | 470.000                | 15,90                                     |
| 3                | 100.000              | 450                                    | 3.650.000                     | 730.000                | 24,70                                     | 2.370.000             | 500.000                | 16,90                                     |
| 4                | 400.000              | 1800                                   | 5.360.000                     | 1.470.000              | 12,40                                     | 3.240.000             | 970.000                | 8,20                                      |
| 5                | 400.000              | 900                                    | 5.590.000                     | 1.500.000              | 12,70                                     | 3.370.000             | 980.000                | 8,30                                      |
| 6                | 400.000              | 450                                    | 5.970.000                     | 1.610.000              | 13,60                                     | 3.530.000             | 1.060.000              | 9,00                                      |

## 6.4 Luchtstrippen

### 6.4.1 Ontwerpcriteria

Het is goed mogelijk om op basis van de resultaten van het onderzoek de procescondities voor het luchtstripproces te definiëren.

De maatgevende parameters voor de procescondities zijn de temperatuur, de pH en de lucht/water-verhouding (R/Q). De onderzoeksresultaten zijn bewerkt om tot een keuze van de randvoorwaarden voor de procescondities te komen, die resulteren in een economisch ontwerp van de stripkolom. Hierbij wordt de totale hoogte van de stripkolom bepaald door het produkt van een specifieke hoogte van een overdrachtstap (HTU) en het aantal benodigde overdrachtstappen (NTU).

Op basis van de proefresultaten wordt een combinatie van procescondities gekozen, die resulteert in een HTU-waarde van 0,7-1,0 m. Het aantal overdrachtstappen (NTU) wordt bepaald door het gewenste NH<sub>4</sub>-N-verwijderingsrendement.

De dimensionering van de voorbeelden is gebaseerd op een NH<sub>4</sub>-N-verwijderingsrendement van 95%.

De dimensioneringsgrondslagen van de luchtstripper staan samengevat in tabel 21.

**Tabel 21**  
Dimensioneringsgrondslagen voor de luchtstripper en de scrubber

|                               |                                                  |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>Voorbehandeling</b>        |                                                  |
| - influentbuffer              |                                                  |
| - flocculatie/sedimentatie    | HVT = 4 uur                                      |
| - pH                          | ≥ 10,5                                           |
| <b>Luchtstripper</b>          |                                                  |
| - superficiële gassnelheid    | ≥ 2 m/s                                          |
| - maximale vloeistofbelasting | ≤ 4 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .h) bij 25°C |
|                               | ≤ 8 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .h) bij 50°C |
| - HTU (m)                     | < 1,0                                            |
|                               | > 0,7                                            |
| <b>Luchtbehandeling</b>       |                                                  |
| Scrubber                      | pH < 3,5                                         |

#### 6.4.2 Dimensioneringsvoorbeelden

De dimensionering van de hoofdonderdelen van de verschillende varianten van de standaard-rwzi's is samengevat in tabel 22.

De stripinstallaties zijn gedimensioneerd voor twee stripluchttemperaturen (20°C en 50°C).

**Tabel 22**  
Dimensionering van de hoofdonderdelen voor de varianten

| onderdeel                 | eenheid            | 1     | 2      | 3      | 4      | 5      | 6       |
|---------------------------|--------------------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
| pompinstallatie           | m <sup>3</sup> /h  | 2,1   | 4,2    | 8,3    | 8,3    | 16,7   | 33,3    |
| influentbuffer            | m <sup>3</sup>     | 10    | 20     | 40     | 40     | 80     | 160     |
| pompinstallatie           | m <sup>3</sup>     | 2,1   | 4,2    | 8,3    | 8,3    | 16,7   | 33,3    |
| flocculator/lamellensepa- |                    |       |        |        |        |        |         |
| rator                     | m <sup>3</sup> /h  | 2,1   | 4,2    | 8,3    | 8,3    | 16,7   | 33,3    |
| pompinstallatie           | m <sup>3</sup> /h  | 2,1   | 4,2    | 8,3    | 8,3    | 16,7   | 33,3    |
| diameter stripkolom(20°C) | mm                 | 1000  | 1400   | 2000   | 2000   | 2800   | 4000    |
| hoogte stripkolom (20°C)  | m                  | 14,5  | 13,0   | 15,0   | 14,0   | 15,5   | 18,5    |
| compressor (20°C)         | Nm <sup>3</sup> /h | 6.400 | 12.500 | 25.000 | 25.000 | 50.000 | 100.000 |
| diameter stripkolom(50°C) | mm                 | 500   | 800    | 1100   | 1100   | 1500   | 2100    |
| hoogte stripkolom (50°C)  | m                  | 11,1  | 11,5   | 12,0   | 12,0   | 12,5   | 14,0    |
| compressor (50°C)         | Nm <sup>3</sup> /h | 1.600 | 3.200  | 6.200  | 6.200  | 12.500 | 25.000  |
| diameter scrubber (20°C)  | mm                 | 1000  | 1400   | 2000   | 2000   | 2800   | 4000    |
| hoogte scrubber (20°C)    | m                  | 10,0  | 10,5   | 11,0   | 12,0   | 13,0   | 14,5    |
| diameter scrubber (50°C)  | mm                 | 500   | 800    | 1100   | 1100   | 1500   | 2100    |
| hoogte scrubber (50°C)    | m                  | 10,0  | 10,0   | 10,0   | 11,0   | 11,5   | 12,0    |
| kalkverbruik              | ton/d              | 0,54  | 0,54   | 0,54   | 2,15   | 2,15   | 2,15    |
| zwavelzuurverbruik        | ton/d              | 0,31  | 0,31   | 0,31   | 1,23   | 1,23   | 1,23    |
| energieverbruik (20°C)    | kW                 | 6,0   | 10,3   | 21,4   | 21,9   | 41,4   | 86,4    |
| energieverbruik (50°C)    | kW                 | 1,9   | 4,0    | 7,7    | 7,7    | 16,8   | 29,2    |
| aardgasverbruik (50°C)    | Nm <sup>3</sup> /d | 75    | 150    | 300    | 300    | 600    | 1200    |

#### 6.4.3 Kosten

Een overzicht van de stichtingskosten, de exploitatiekosten en de kosten per kg N(Kj)-verwijderd staan samengevat in tabel 23.

Tabel 23

Kostenoverzicht (in guldens) van de luchtstripinstallaties (bij 20°C en 50°C) voor de standaard-rwzi's

| variant (nr.) | capaciteit (i.e.) | NH <sub>4</sub> -N-conc. (mg/l) | strip-temperatuur (°C) | stichtings-kosten | exploitatie-kosten | kosten per kg N(Kj) <sub>verw</sub> |
|---------------|-------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1             | 100.000           | 1800                            | 20                     | 3.880.000         | 650.000            | 20,80                               |
| 1             | 100.000           | 1800                            | 50                     | 3.200.000         | 560.000            | 17,90                               |
| 2             | 100.000           | 900                             | 20                     | 4.310.000         | 720.000            | 23,10                               |
| 2             | 100.000           | 900                             | 50                     | 3.490.000         | 620.000            | 19,90                               |
| 3             | 100.000           | 450                             | 20                     | 5.260.000         | 870.000            | 27,90                               |
| 3             | 100.000           | 450                             | 50                     | 3.880.000         | 710.000            | 22,80                               |
| 4             | 400.000           | 1800                            | 20                     | 5.370.000         | 1.110.000          | 8,90                                |
| 4             | 400.000           | 1800                            | 50                     | 3.970.000         | 950.000            | 7,60                                |
| 5             | 400.000           | 900                             | 20                     | 6.650.000         | 1.320.000          | 10,60                               |
| 5             | 400.000           | 900                             | 50                     | 4.700.000         | 1.120.000          | 9,00                                |
| 6             | 400.000           | 450                             | 20                     | 9.650.000         | 1.800.000          | 14,40                               |
| 6             | 400.000           | 450                             | 50                     | 5.770.000         | 1.400.000          | 11,20                               |

## 6.5 Stoomstrippen

### 6.5.1 Ontwerpcriteria

Het ontwerp van een stoomstripkolom vindt op analoge wijze plaats aan dat van een luchtstripkolom, namelijk door het produkt van de hoogte van een overdrachtsstap (bepaald door de procescondities van pH en stoom/water-verhouding) en het aantal overdrachtsstappen (bepaald door het rendement).

De voornaamste verschillen van deze stripkolom met de luchtstripper zijn:

- de diameter van de kolom is een factor 4 à 5 kleiner, vanwege het ontbreken van geforceerde luchtdoorvoer;
- de hoogte van het strippergedeelte is lager vanwege de lagere hoogte per overdrachts-trap (HTU). De stoomstripper moet evenwel, om de gewenste ammoniakconcentratie in het condensaat te verkrijgen, voorzien zijn van een concentreringsgedeelte, de "rectificeerkolom". Dit onderdeel wordt om kosten te besparen in dezelfde kolom ingebouwd als het stripperdeel. De totale hoogte van de stoomstripkolom is daarmee, afhankelijk van de capaciteit van de installatie, gelijk aan of hoger dan de luchtstripkolom.

De dimensionering van de rectificeerkolom wordt bepaald door de condensbelasting, de ingangconcentratie NH<sub>4</sub>-N in de te behandelen vloeistof en de gewenste concentratie NH<sub>3</sub> in het produkt. De maximaal bereikbare NH<sub>3</sub>-concentratie is afhankelijk van de temperatuur van het beschikbare koelmedium en de druk. Bij atmosferische druk en een koelwatertemperatuur van 20-25°C is een oplossing van 20-25 gewichts% NH<sub>3</sub> mogelijk.

De voor het proces benodigde stoom kan volledig worden opgewekt met een externe stoomgenerator of grotendeels uit het behandelde water, door terugwinning van warmte uit de ammoniakhoudende stoom door toepassing van een verdichter en een sproeiverdamper, aangevuld met extern opgewekte stoom.

### 6.5.2 Dimensioneringsvoorbeelden

De voorbehandeling van de stoomstripinstallatie (pompinstallatie, influentbuffer, pompinstallatie, flocculator/lamellenseparator, pompinstallatie) is identiek aan die van een luchtstripinstallatie (zie tabel 24). De dimensionering van de stoomstripkolom en de rectificeerkolom van de

verschillende varianten van de standaard-rwzi's is samengevat in tabel 24. Hierin is de dimensionering weergegeven van een installatie met stoomopwekking via verdichting en sproeiverdamping en die voor een installatie met volledige externe stoomopwekking.

**Tabel 24**

**Dimensionering van de stripkolom en de rectificeerkolom van een stoomstripinstallatie voor de onderscheiden varianten**

| onderdeel                                       | eenheid | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     |
|-------------------------------------------------|---------|------|------|------|------|------|-------|
| <b>systeem met verdichting/sproeiverdamping</b> |         |      |      |      |      |      |       |
| diameter stoomstripkolom                        | mm      | 250  | 350  | 500  | 500  | 700  | 1000  |
| hoogte stoomstripkolom                          | m       | 6,8  | 5,7  | 4,7  | 6,8  | 5,7  | 4,7   |
| diameter rectificeerkolom                       | mm      | 100  | 250  | 200  | 200  | 300  | 400   |
| hoogte rectificeerkolom                         | m       | 11   | 11   | 11   | 11   | 11   | 11    |
| kalkverbruik                                    | ton/d   | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 2,15 | 2,15 | 2,15  |
| stoomverbruik                                   | ton/d   | 0,8  | 1,7  | 3,6  | 3,3  | 6,8  | 14,4  |
| energieverbruik                                 | kW      | 26,0 | 36,5 | 46,5 | 69,1 | 98,2 | 136,8 |
| <b>systeem met externe stoomopwekking</b>       |         |      |      |      |      |      |       |
| diameter stoomstripkolom                        | mm      | 200  | 300  | 400  | 400  | 600  | 900   |
| hoogte stoomstripkolom + rectificeerkolom       | m       | 14   | 14   | 15   | 14   | 14,5 | 15    |
| kalkverbruik                                    | ton/d   | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 2,15 | 2,15 | 2,15  |
| stoomverbruik                                   | ton/d   | 5,2  | 10,2 | 2,00 | 20,4 | 40,4 | 80,0  |
| energieverbruik                                 | kW      | 1,4  | 2,2  | 4,1  | 4,0  | 8,2  | 16,5  |

### 6.5.3 Kosten

Een overzicht van de stichtingskosten, exploitatiekosten en de kosten per kg N(Kj)-verwijderd is samengevat in tabel 25.

**Tabel 25**

**Kostenoverzicht van de stoomstripinstallatie (met en zonder verdichter/sproeiverdamper) voor de standaard-rwzi's**

| variant (nr.) | capaciteit (i.e.) | NH <sub>4</sub> -N-conc. (mg/l) | verdichter/sproeiverdamper | stichtingskosten | exploitatiekosten | kosten per kg N(Kj) <sub>verw</sub> |
|---------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 1             | 100.000           | 1800                            | ja                         | 4.120.000        | 690.000           | 21,20                               |
| 2             | 100.000           | 900                             | ja                         | 4.320.000        | 750.000           | 24,30                               |
| 3             | 100.000           | 450                             | ja                         | 4.700.000        | 850.000           | 31,20                               |
| 4             | 400.000           | 1800                            | ja                         | 4.730.000        | 1.010.000         | 7,70                                |
| 5             | 400.000           | 900                             | ja                         | 5.520.000        | 1.220.000         | 9,80                                |
| 6             | 400.000           | 450                             | ja                         | 6.620.000        | 1.570.000         | 14,30                               |
| 1             | 100.000           | 1800                            | nee                        | 2.840.000        | 560.000           | 17,90                               |
| 2             | 100.000           | 900                             | nee                        | 2.940.000        | 670.000           | 21,50                               |
| 3             | 100.000           | 450                             | nee                        | 3.130.000        | 880.000           | 28,20                               |
| 4             | 400.000           | 1800                            | nee                        | 3.120.000        | 1.020.000         | 8,20                                |
| 5             | 400.000           | 900                             | nee                        | 3.540.000        | 1.440.000         | 11,50                               |
| 6             | 400.000           | 450                             | nee                        | 4.440.000        | 2.300.000         | 18,40                               |

## 6.6 MAP/CAFR-proces

### 6.6.1 Ontwerpcriteria

Op basis van de verkregen proefresultaten is het ontwerp van het MAP-proces voor de behandeling van stikstofrijk water goed mogelijk. Het rendement wordt bepaald door de procescondities pH en molaire N:P:Mg-verhouding.

Hoewel de  $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijderingsrendementen in principe iets toenemen met stijgende molaire P:N- en Mg:N-verhoudingen, wordt met het oog op besparing van chemicaliënkosten en van minimalisatie van fosfaatvrucht in het behandelde retourwater gekozen voor een molaire N:P:Mg-verhouding van 1:1:1.

De voor het proces optimale pH bedraagt 9,5. De dimensioneringsgrondslagen voor het MAP-proces staan samengevat in tabel 26.

**Tabel 26**  
Dimensioneringsgrondslagen voor het MAP-proces

|                            |                                                                     |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>Voorbehandeling</b>     |                                                                     |
| - influentbuffer           |                                                                     |
| - flocculatie/sedimentatie | HVT = 4 uur                                                         |
| <b>MAP-proces</b>          |                                                                     |
| - reactievat               | verblijftijd $\geq 20$ minuten                                      |
| - molaire verhouding       | N:P:Mg = 1:1:1                                                      |
| - pH                       | = 9,5                                                               |
| - bezinktank               | drogestofbelasting $\leq 10 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ |
| <b>MAP-slibontwatering</b> |                                                                     |
| - zeefbandpers             |                                                                     |

Op basis van het onderzoek is de dimensionering van het opwerkingsdeel van de installatie niet mogelijk.

### 6.6.2 Dimensioneringsvoorbeelden

De dimensionering van de hoofdonderdelen voor de verschillende varianten van de standaard-rwzi's is samengevat in tabel 27. Voor de dimensionering van het CAFR-proces is hierbij uitgegaan van opwerking van het MAP-slib met het stoomstripproces.

### 6.6.3 Kosten

Een overzicht van de stichtingskosten, de exploitatiekosten en de kosten per kg N(Kj)-verwijderd voor het MAP-proces en het CAFR-proces staan samengevat in tabel 28.

Tabel 27

Dimensionering van de hoofdonderdelen van de varianten

| onderdeel                         | eenheid           | 1      | 2      | 3      | 4    | 5    | 6    |
|-----------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|------|------|------|
| pompinstallatie                   | m <sup>3</sup> /h | 2,1    | 4,2    | 8,3    | 8,3  | 16,7 | 33,3 |
| influentbuffer                    | m <sup>3</sup>    | 10     | 20     | 40     | 40   | 80   | 160  |
| pompinstallatie                   | m <sup>3</sup> /h | 2,1    | 4,2    | 8,3    | 8,3  | 16,7 | 33,3 |
| flocculator/lamellenseparator     | m <sup>3</sup> /h |        |        |        |      |      |      |
| pompinstallatie                   | m <sup>3</sup> /h | 2,1    | 4,2    | 8,3    | 8,3  | 16,7 | 33,3 |
| reactor                           | m <sup>3</sup>    | 0,7    | 1,4    | 2,8    | 2,8  | 5,6  | 11,2 |
| bezinktank                        | m <sup>2</sup>    | 7      | 7      | 7      | 28   | 28   | 28   |
| loogopslag                        | m <sup>3</sup>    | 30     | 30     | 30     | 30   | 30   | 30   |
| fosforzuuropslag                  | m <sup>3</sup>    | 10     | 10     | 10     | 30   | 30   | 30   |
| magnesiumoxydeopslag              | m <sup>3</sup>    | 10     | 10     | 10     | 30   | 30   | 30   |
| zeefbandpers MAP-proces           | m <sup>3</sup> /h | 5      | 5      | 5      | 20   | 20   | 20   |
| stoomstripper CAFR-proces         |                   |        |        |        |      |      |      |
| - diameter                        | mm                | 200    | 200    | 200    | 400  | 300  | 300  |
| - hoogte                          | m                 | 12     | 12     | 12     | 412  | 12   | 12   |
| zeefbandpers CAFR-proces          | m <sup>3</sup> /h | -      | -      | -      | 5    | 5    | 5    |
| ontwateringscontainer CAFR-proces | m <sup>3</sup>    | 2 x 20 | 2 x 20 | 2 x 20 | -    | -    | -    |
| natronloogverbruik MAP            | ton/d             | 0,21   | 0,22   | 0,22   | 0,84 | 0,87 | 0,89 |
| magnesiumoxydeverbruik MAP        | ton/d             | 0,26   | 0,26   | 0,26   | 1,04 | 1,04 | 1,04 |
| fosforzuurverbruik MAP            | ton/d             | 0,63   | 0,63   | 0,63   | 2,52 | 2,52 | 2,52 |
| natronloogverbruik CAFR           | ton/d             | 0,39   | 0,40   | 0,41   | 1,56 | 1,59 | 1,62 |
| magnesiumoxydeverbruik CAFR       | ton/d             | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,31 | 0,31 | 0,31 |
| fosforzuurverbruik CAFR           | ton/d             | 0,19   | 0,19   | 0,19   | 0,76 | 0,76 | 0,76 |
| energieverbruik MAP               | kW                | 2,1    | 2,5    | 2,9    | 4,0  | 4,2  | 4,4  |
| energieverbruik CAFR              | kW                | 2,1    | 2,5    | 2,9    | 4,0  | 4,2  | 4,4  |
| stoomverbruik CAFR                | ton/d             | 3,0    | 3,0    | 3,0    | 11,6 | 11,6 | 11,6 |

Tabel 28

Kostenoverzicht van het MAP/CAFR-proces voor de standaard-rwzi's

| variant (nr.) | capaciteit (i.e.) | NH <sub>4</sub> -N-conc. (mg/l) | MAP/CAFR | stichtingskosten | exploitatiekosten | kosten per kg N <sub>verw</sub> |
|---------------|-------------------|---------------------------------|----------|------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1             | 100.000           | 1800                            | MAP      | 4.000.000        | 860.000           | 29,10                           |
| 2             | 100.000           | 900                             | MAP      | 4.000.000        | 860.000           | 29,10                           |
| 3             | 100.000           | 450                             | MAP      | 4.050.000        | 870.000           | 29,40                           |
| 4             | 400.000           | 1800                            | MAP      | 4.370.000        | 1.610.000         | 13,60                           |
| 5             | 400.000           | 900                             | MAP      | 4.820.000        | 1.670.000         | 14,10                           |
| 6             | 400.000           | 450                             | MAP      | 5.020.000        | 1.710.000         | 14,50                           |
| 1             | 100.000           | 1800                            | CAFR     | 4.690.000        | 960.000           | 32,50                           |
| 2             | 100.000           | 900                             | CAFR     | 4.690.000        | 960.000           | 32,50                           |
| 3             | 100.000           | 450                             | CAFR     | 4.740.000        | 960.000           | 32,80                           |
| 4             | 400.000           | 1800                            | CAFR     | 5.880.000        | 1.820.000         | 15,40                           |
| 5             | 400.000           | 900                             | CAFR     | 6.340.000        | 1.880.000         | 15,90                           |
| 6             | 400.000           | 450                             | CAFR     | 6.540.000        | 1.920.000         | 16,20                           |

## 7 EVALUATIE EN CONCLUSIES

### 7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de voornaamste conclusies uit de praktijkonderzoeken eerst per onderzocht systeem samengevat (§ 7.2 t/m 7.5). Vervolgens vindt een vergelijking plaats tussen de verschillende systemen (§ 7.6) op de volgende criteria:

- kosten;
- ruimtebeslag;
- chemicaliënverbruik;
- energieverbruik;
- reststoffenproblematiek;
- eenvoud van de bedrijfsvoering;
- ervaring met de methode;
- bedrijfszekerheid;
- eenvoud van de bouw.

### 7.2 Membraan-bioreactor

#### 7.2.1 Bedrijfsvoering

De randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering zijn:

- een goede temperatuurbeheersing;
- een betrouwbare pH-regeling;
- een goede regeling van de methanoldosering;
- een stabiele membraanflux;
- een continue voeding van het biologisch systeem.

#### 7.2.2 Resultaten

Tijdens het onderzoek is in de membraan-bioreactor een zeer vergaande en stabiele N(Kj)-verwijdering gerealiseerd. Beperkingen in de maximaal realiseerbare N(Kj)-verwijdering zijn terug te voeren op beperkingen van de pilot-plantinstallatie, en zijn in een goed ontworpen praktijkinstallatie niet van toepassing.

In de membraan-bioreactor is naast nitrificatie ook denitrificatie mogelijk. Hiervoor moet een externe koolstofbron worden gedoseerd. Het methanolverbruik tijdens het onderzoek was 2,6 kg/kg  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ .

De mate van denitrificatie wordt bepaald door de recirculatie van nitraathoudend water uit de nitrificatiereactor naar de denitrificatietank. Een denitrificatierendement van 85% is haalbaar gebleken.

Onderzoek naar de nitrietroute heeft uitgewezen dat gedurende de onderzoeksduur de nitrietroute stabiel kon worden bedreven. Het is gebleken, dat de verhouding tussen *Nitrobacter* en *Nitrosomonas* beneden een waarde van 0,5 te handhaven was. Tijdens het onderzoek naar de nitrietroute is het methanolverbruik vastgesteld op 1,6 kg/kg  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ . Ten opzichte van de nitraatroute bleken de volumetrische stikstofbelastingen voor nitrificatie en denitrificatie niet te veranderen.

Voor de membraanscheiding toonde het hydrofiele MPL2-membraan van polysulfon zich het meest geschikt.

### 7.2.3 Toepassing in de Nederlandse praktijk

De resultaten van de praktijkproef kunnen goed worden gebruikt voor het dimensioneren van praktijkinstallaties. In de dimensionering van de membraan-bioreactor is de maximale zuurstofoverdracht bepalend voor de maximale stikstofvolumebelasting van het systeem. Hiervoor is een waarde van  $4,4 \text{ kg N(Kj)}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  vastgesteld.

Voor de denitrificatiecapaciteit is de maximale drogestofconcentratie maatgevend. Deze wordt met het oog op de viscositeit begrensd op  $20 \text{ kg}/\text{m}^3$ , waarbij de denitrificatiecapaciteit  $9,8 \text{ kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3_{\text{reactor}} \cdot \text{d})$  bedraagt.

Het membraanoppervlak wordt bepaald door de gemiddelde membraanflux van  $116 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ .

De exploitatiekosten van de membraan-bioreactor zijn lager naarmate de stikstofconcentratie in het te behandelen water hoger is.

Bij hogere stikstofconcentraties is bij dezelfde stikstofvracht minder membraanoppervlak nodig, hetgeen de exploitatiekosten reduceert.

De exploitatiekosten bedragen voor een installatie van 100.000 i.e.  $f 16,70 - f 24,70$  per kg  $\text{N(Kj)}_{\text{verw.}}$  bij de nitraatroute en  $f 16,20 - f 24,30$  bij de nitrietroute.

Bij een installatie van 400.000 i.e. zijn de exploitatiekosten per kg verwijderd stikstof aanzienlijk lager en bedragen deze  $f 9,20 - f 14,20$  per kg  $\text{N(Kj)}_{\text{verw.}}$  bij de nitraatroute en  $f 8,60 - f 13,80$  bij de nitrietroute.

De voornaamste aandachtspunten voor nader onderzoek bij toepassing van de membraan-bioreactor voor de behandeling van stikstofrijke retourstromen zijn:

- minimalisatie van het energieverbruik voor de membraanfiltratie;
- continu handhaven van de nitrietroute.

## 7.3 Airliftreactor

### 7.3.1 Bedrijfsvoering

De randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering zijn:

- een goede pH-regeling;
- een gegarandeerde luchtinbreng;
- een continue voeding van het biologisch systeem;
- een continue anti-schuim-dosering;
- een goede regeling van de methanoldosering.

### 7.3.2 Resultaten

Tijdens het onderzoek heeft zich een aantal storingen voorgedaan, die gevolgen hadden voor het verloop van de proeven. De storingen hadden elk te maken met de uitvoering van de pilot-plant reactor en kunnen in een goed ontworpen praktijkinstallatie worden voorkomen.

In de airliftreactor is oxydatie van stikstof door nitrificatie goed mogelijk. Het is mogelijk gebleken om een stabiele nitrificatie te handhaven. Het drogestofgehalte in de biofilm is hierbij  $6-8 \text{ kg o.d.s.}/\text{m}^3$ .

In de airliftreactor heeft geen gericht onderzoek naar de mogelijkheden van denitrificatie plaatsgevonden.

### 7.3.3 Toepassing in de Nederlandse praktijk

De resultaten van de praktijkproef kunnen goed worden gebruikt voor het dimensioneren van praktijkinstallaties. In de dimensionering van de airliftreactor is de maximale zuurstofoverdracht bepalend voor de maximale stikstofvolumebelasting van het systeem.

Hiervoor is een waarde van  $3,3 \text{ kg N(Kj)}/(\text{m}^3_{\text{reactor}} \cdot \text{d})$  vastgesteld.

In de airliftreactor wordt de stikstof alleen genitrificeerd. Voor een volledige stikstofverwijdering is een separate denitrificatiestap noodzakelijk.

De exploitatiekosten van de airliftreactor met een separate denitrificatiestap worden slechts in geringe mate beïnvloed door de stikstofconcentratie van het te behandelen water.

De exploitatiekosten van een installatie van 100.000 i.e. bedragen  $f 23,00 - f 24,70$  per  $\text{kg N(Kj)}_{\text{verw}}$ .

Bij een installatie van 400.000 i.e. zijn de exploitatiekosten per  $\text{kg}$  verwijderd stikstof aanzienlijk lager en bedragen deze  $f 12,40 - f 13,60$  per  $\text{kg N(Kj)}_{\text{verw}}$ .

Wanneer de denitrificatie in de bestaande rwzi kan plaatsvinden, vervalt de separate denitrificatiestap. In dat geval dalen de kosten per  $\text{kg N(Kj)}_{\text{verw}}$  voor een installatie van 100.000 i.e. tot  $f 15,90 - f 16,90$  en voor een installatie van 400.000 i.e. tot  $f 8,20 - f 9,00$ .

De voornaamste aandachtspunten voor nader onderzoek bij toepassing van de airliftreactor voor de behandeling van stikstofrijke retourstromen zijn:

- voorkomen van onthechting van de biofilm;
- mogelijk van denitrificatie in de anoxische zone van de airliftreactor.

## 7.4 Strippen

### 7.4.1 Bedrijfsvoering

De randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering zijn:

- een voorbehandeling, waarin het in het stikstofrijke water aanwezige bicarbonaat vrijwel volledig wordt verwijderd;
- een betrouwbare pH-regeling.

### 7.4.2 Resultaten

Tijdens de onderzoeken naar lucht- en stoomstrippen is veel informatie verkregen over de invloed van de procescondities (pH, temperatuur, gas/vloeistof-verhoudingen) op de  $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering.

Voor het luchtstripproces is de minimaal benodigde pH afhankelijk van de striptemperatuur: bij  $20^\circ\text{C}$  is een pH van minimaal 10,5 nodig, terwijl bij  $50^\circ\text{C}$  de pH minimaal 9,5 dient te zijn. Bij het stoomstripproces is een pH van minimaal 9,0 voldoende.

Voor de behandeling van de ammoniakrijke striplucht in een scrubber moet de pH van de scrubbervloeistof minimaal 3,5 zijn. Bij katalytische verbranding van de ammoniakrijke striplucht moet de verbrandingstemperatuur tussen  $280$  en  $300^\circ\text{C}$  liggen.

Bij het stoomstripproces kan een ammoniakale oplossing van ongeveer 25 gew.% worden verkregen door het concentreren van de ammoniakrijke stoom in een rectificeerkolom.

### 7.4.3 Toepassing in de Nederlandse praktijk

Op basis van de proefresultaten is het goed mogelijk om praktijkinstallaties voor het luchtstripproces en het stoomstripproces te dimensioneren. Voor de verschillende procescondities kan de

hoogte van een overdrachtstrap worden bepaald. Het aantal overdachtstrappen is afhankelijk van het gewenste verwijderingsrendement.

Bij een striptemperatuur van 20°C is zowel de diameter van de stripkolom als de totale hoogte ervan groter dan bij een striptemperatuur van 50°C. De diameter van de scrubber is gelijk aan de diameter van de stripkolom, terwijl de hoogte enkele meters minder is.

Stoomstripinstallaties kunnen worden uitgevoerd met volledige externe stoomopwekking of met vergaande stoomopwekking uit gestript water door warmteterugwinning. De diameter van de stroomstripkolom is kleiner dan die van luchtstripinstallaties.

Het is economisch aantrekkelijker om het luchtstrippen bij verhoogde temperatuur (50°C) uit te voeren. De exploitatiekosten bedragen afhankelijk van de ingangsstikstofconcentratie voor een installatie van 100.000 i.e. f 17,90 - f 22,80 per kg N(Kj)<sub>verw.</sub> Voor een installatie van 400.000 i.e. zijn de exploitatiekosten lager en bedragen f 7,60 - f 11,20 per kg N(Kj)<sub>verw.</sub>

Voor het stoomstripproces zijn de exploitatiekosten voor een installatie van 100.000 i.e. f 17,90 - f 28,20 per kg N(Kj)<sub>verw.</sub> bij uitvoering met volledige externe stoomopwekking en f 21,20 - f 31,20 per kg N(Kj)<sub>verw.</sub> bij uitvoering met verdichting en sproeiverdamping. Voor een installatie van 400.000 i.e. zijn de exploitatiekosten f 8,20 - f 18,40 per kg N(Kj)<sub>verw.</sub> voor een installatie met volledige externe stoomopwekking en f 7,70 - f 14,30 per kg N(Kj)<sub>verw.</sub> voor een installatie met verdichting en sproeiverdamping.

## **7.5 MAP/CAFR-proces**

### **7.5.1 Bedrijfsvoering**

De randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering van het MAP-proces zijn:

- voorbehandeling van het stikstofrijke water, waarin zwevende stof vergaand wordt verwijderd;
- een continue meting van het ammoniakstikstofgehalte in het te behandelen water;
- een betrouwbare pH-meting.

De randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering van het opwerkingsdeel van het CAFR-proces kunnen op basis van dit onderzoek niet worden aangegeven.

### **7.5.2 Resultaten**

Uit het onderzoek is gebleken, dat bij keuze van de juiste procescondities (pH, molaire N:P:Mg-verhouding) een vergaande NH<sub>4</sub>-N-verwijdering (≈ 90%) mogelijk is.

De verblijftijd in de reactor moet minimaal 20 minuten bedragen, terwijl de drogestofbelasting van de bezinktank lager moet zijn dan 10 kg d.s./m<sup>2</sup>.h).

Het geproduceerde MAP-slib is van goede kwaliteit.

Ten aanzien van de opwerking en hergebruik van het MAP-slib zijn alleen bruikbare resultaten op laboratoriumschaal verkregen.

### **7.5.3 Toepassing in de Nederlandse praktijk**

De resultaten van het onderzoek kunnen goed worden gebruikt voor het dimensioneren van praktijkinstallaties voor het MAP-proces.

De exploitatiekosten worden slechts in geringe mate beïnvloed door het stikstofgehalte in het te behandelen water. Voor een installatie van 100.000 i.e. bedragen de exploitatielasten  $f$  29,10 -  $f$  29,40 per kg N(Kj)<sub>verw.</sub>

Voor een installatie van 400.000 i.e. zijn de exploitatielasten lager en bedragen deze  $f$  13,60 -  $f$  14,50 per kg N(Kj)<sub>verw.</sub>

Voor het MAP-proces zijn geen bijzondere aandachtspunten voor nader onderzoek aanwezig. Voor het CAFR-proces is nader onderzoek naar het opwerkingsdeel van het MAP-slib zonder meer noodzakelijk.

## 7.6 Onderlinge vergelijking behandelingsmethoden

### 7.6.1 Kosten

In tabel 29 zijn de exploitatiekosten per kg N(Kj)<sub>verw.</sub> van de verschillende behandelingsmethoden voor de onderscheiden standaard-rwzi's samengevat.

Tabel 29

Overzicht van de kosten per kg N(Kj)<sub>verw.</sub> voor de verschillende behandelingsmethoden

| Capaciteit rwzi<br>NH <sub>4</sub> -N-concentratie | (i.e.)<br>(mg/l) | 100.000<br>1800 | 100.000<br>900 | 100.000<br>450 | 400.000<br>1800 | 400.000<br>900 | 400.000<br>450 |
|----------------------------------------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| membraan-bioreactor                                |                  |                 |                |                |                 |                |                |
| . nitraatroute                                     |                  | 16,70           | 19,80          | 24,70          | 9,20            | 11,30          | 14,20          |
| . nitrietroute                                     |                  | 16,20           | 19,30          | 24,30          | 8,60            | 10,80          | 13,80          |
| airliftreactor                                     |                  |                 |                |                |                 |                |                |
| . met denitrificatiestap                           |                  | 23,00           | 23,30          | 24,70          | 12,40           | 12,70          | 13,60          |
| . zonder denitrificatiestap                        |                  | 15,90           | 15,90          | 16,90          | 8,20            | 8,30           | 9,00           |
| luchtstripper 20°C                                 |                  | 20,80           | 23,10          | 27,90          | 8,90            | 10,60          | 14,40          |
| luchtstripper 50°C                                 |                  | 17,90           | 19,90          | 22,80          | 7,60            | 9,00           | 11,20          |
| stoomstripper-sproeiverdamper                      |                  | 21,20           | 24,30          | 31,20          | 7,70            | 9,80           | 14,30          |
| stoomstripper-stoomgenerator                       |                  | 17,90           | 21,50          | 28,20          | 8,20            | 11,50          | 18,40          |
| MAP                                                |                  | 29,40           | 29,10          | 29,40          | 13,60           | 14,10          | 14,50          |
| CAFR                                               |                  | 32,50           | 32,50          | 32,80          | 15,40           | 15,90          | 16,20          |

Uit het kostenoverzicht blijkt het volgende:

- Voor een installatie met een capaciteit van 100.000 i.e. zijn per kg N(Kj)<sub>verw.</sub> de kosten tenminste een factor 1,8 hoger dan voor een installatie met een capaciteit van 400.000 i.e.
- Van de biologische methoden zijn de kosten van de membraan-bioreactor lager dan van de airliftreactor met separate denitrificatie. Wanneer geen separate denitrificatiestap nodig is, zijn de kosten van de airliftreactor lager.
- Van de fysisch-chemische methoden zijn de kosten van het MAP-proces en het CAFR-proces altijd hoger dan van de stripprocessen.
- Voor luchtstrippen is een verhoogde luchttemperatuur economisch aantrekkelijk.
- Voor het stoomstripproces is verdichting/sproeiverdampen alleen aantrekkelijk bij een rwzi-capaciteit van 400.000 i.e.
- Voor een rwzi met een capaciteit van 100.000 i.e. zijn uit kosten oogpunt het luchtstrippen bij 50°C, stoomstrippen met externe stoomopwekking en de membraan-bioreactor het meest aantrekkelijk. Wanneer denitrificatie in de bestaande rwzi mogelijk is, komt de airliftreactor eveneens in aanmerking.
- Voor een rwzi met een capaciteit van 400.000 i.e. zijn uit kosten oogpunt de stripprocessen (lucht bij 50°C, stoom) het meest aantrekkelijk. Bij hoge stikstofconcentraties komt

de membraan-bioreactor ook in aanmerking. Wanneer denitrificatie in de bestaande rwzi mogelijk is, is de airliftreactor ook aantrekkelijk.

### 7.6.2 Ruimtebeslag

Het ruimtebeslag van de installaties (inclusief bedrijfsgebouw) is samengevat in tabel 30.

**Tabel 30**  
Ruimtebeslag (in m<sup>2</sup>) van de gedimensioneerde installaties

| Capaciteit rwzi<br>NH <sub>4</sub> -N-concentratie | (i.e.)<br>(mg/l) | 100.000<br>1800 | 100.000<br>900 | 100.000<br>450 | 400.000<br>1800 | 400.000<br>900 | 400.000<br>450 |
|----------------------------------------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| membraan-bioreactor                                |                  | 170             | 170            | 170            | 220             | 220            | 220            |
| airliftreactor met denitrificatiestap              |                  |                 |                |                |                 |                |                |
| airliftreactor zonder denitrificatie               |                  | 200             | 220            | 240            | 280             | 300            | 320            |
| luchtstripper 20°C                                 |                  |                 |                |                |                 |                |                |
| luchtstripper 50°C                                 |                  | 140             | 140            | 150            | 150             | 150            | 150            |
| stoomstripper-sproeiverdamper                      |                  | 125             | 140            | 170            | 170             | 225            | 345            |
| stoomstripper-stoomgenerator                       |                  | 125             | 135            | 150            | 150             | 180            | 220            |
| MAP                                                |                  | 120             | 120            | 120            | 130             | 130            | 130            |
| CAFR                                               |                  | 120             | 120            | 120            | 130             | 130            | 130            |
|                                                    |                  | 150             | 150            | 150            | 200             | 200            | 200            |
|                                                    |                  | 180             | 180            | 180            | 240             | 240            | 240            |

Uit het overzicht blijkt, dat verschillen in ruimtebeslag gering zijn en er bij alle systemen sprake is van een compacte bouw. Bij de membraan-bioreactor is het ruimtebeslag voor de nitrietroute gelijk aan dat voor de nitraatroute.

### 7.6.3 Chemicaliënverbruik

In tabel 31 is voor de verschillende behandelingsmethoden het chemicaliënverbruik per kg N-(Kj)<sub>verw</sub> samengevat. Hierbij is voor het chemicaliënverbruik onderscheid gemaakt in eenheden loog (natronloog, kalk, magnesiumoxyde), eenheden zuur (zwavelzuur, fosforzuur) en overige componenten (methanol).

**Tabel 31**  
Chemicaliënverbruik per kg N(Kj)<sub>verw</sub>.

| methode              | loog<br>(mol/kg) | zuur<br>(mol/kg) | methanol<br>(kg/kg) |
|----------------------|------------------|------------------|---------------------|
| membraan-bioreactor: |                  |                  |                     |
| . nitraatroute       | 19-45            | -                | 2,6                 |
| . nitrietroute       | 19-45            | -                | 1,6                 |
| airliftreactor       | 92-105           | -                | 3                   |
| luchtstripper        | 224              | 74               | -                   |
| stoomstripper        | 224              | -                | -                   |
| MAP                  | 224              | 238              | -                   |
| CAFR                 | 168              | 71               | -                   |

Uit het overzicht blijkt, dat het chemicaliënverbruik het hoogst is bij het MAP-proces en het luchtstripproces, en het laagst bij de membraan-bioreactor.

### 7.6.4 Energieverbruik

In tabel 32 is voor de verschillende behandelingsmethoden het energieverbruik (electriciteit, aardgas, stoom) per kg N(Kj)<sub>verw</sub> samengevat.

Tabel 32  
Energieverbruik per kg N(Kj)<sub>verw.</sub>

| methode                       | electriciteit<br>(kWh/kg) | aardgas<br>(Nm <sup>3</sup> /kg) | stoom<br>(kg/kg) |
|-------------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------|
| membraan-bioreactor           |                           |                                  |                  |
| . nitraatroutte               | 6,5-14                    | -                                | -                |
| . nitrietroutte               | 5,5-13                    | -                                | -                |
| airliftreactor                | 9,4                       | -                                | -                |
| luchtstripper (20°C)          | 1,5-6,0                   | -                                | -                |
| luchtstripper (50°C)          | 0,5-2,2                   | 0,9-3,6                          | -                |
| stoomstripper-sproeiverdamper | 7,7-13,7                  | -                                | 10- 44           |
| stoomstripper-stoomgenerator  | 0,4-1,2                   | -                                | 60-234           |
| MAP                           | 0,6                       | -                                | -                |
| CAFR                          | 0,6                       | -                                | 36               |

Uit het overzicht blijkt, dat het MAP-proces het laagste energieverbruik heeft en het stoomstripproces het hoogste.

#### 7.6.5 Reststoffenproblematiek

Bij de fysisch-chemische behandelingsmethoden (stripprocessen, MAP-proces en CAFR-proces) ontstaan verschillende reststoffen. Over de afzetmogelijkheden hiervan is een separaat rapport [8] verschenen. In dit rapport zijn de afzetmogelijkheden, alsmede de te verwachten opbrengsten van de verschillende reststoffen aangegeven. Voor de restprodukten, die ontstaan bij luchtstrippen, lijken de beste afzetmogelijkheden aanwezig in de kunstmestindustrie. Hierbij bestaat met name belangstelling voor ammoniumnitraat en in mindere mate voor ammoniumfosfaat. Ammoniumsulfaat is het minst in trek en heeft geen economische waarde. Uit kosten oogpunt is het verbruik van zwavelzuur, waarbij ammoniumsulfaat wordt geproduceerd, toch het meest aantrekkelijk.

Bij gebruik van salpeterzuur, waarbij ammoniumnitraat wordt geproduceerd, nemen de kosten per kg N(Kj)<sub>verw</sub> bij luchtstrippen toe met ongeveer f 0,50 bij 100.000 i.e. en f 0,30 bij 400.000 i.e.

Afzet van ammonia, dat wordt geproduceerd bij stoomstrippen is kansrijk bij de NO<sub>x</sub>-installaties. Hierbij brengt het ongeveer de helft van de prijs van commerciële ammonia op. Deze opbrengst vertegenwoordigt overigens slechts een zeer gering percentage (ongeveer 1,5%) van de totale exploitatiekosten van het stoomstrippen.

De belangstelling voor MAP vanuit de industrie is redelijk. De economische waarde van MAP is sterk wisselend. Als uitgangspunt kan worden genomen dat de afzet van MAP minimaal kostenneutraal kan geschieden.

In de praktijk zullen bij realisering van installaties, waarbij reststoffen ontstaan, door de waterkwaliteitsbeheerders langjarige contracten moeten worden afgesloten om de afzet van de reststoffen te garanderen.

Hierdoor worden de fysisch-chemische behandelingsmethoden in dit opzicht als gevoeliger beoordeeld dan de biologische behandelingsmethoden (membraan-bioreactor, airliftreactor).

Bij deze laatste methoden ontstaat weliswaar ook een reststof (biologisch slib), maar dit kan in de bestaande slibverwerking van de rwzi's zonder problemen worden verwerkt.

#### 7.6.6 *Eenvoud van de bedrijfsvoering*

Bij de eenvoud van de bedrijfsvoering kan enerzijds worden gekeken naar de mate van complexiteit van de behandelingsmethode op zich, anderzijds naar de aansluiting van de behandelingsmethode bij de aanwezige ervaring van de bedrijfsvoerders van rwzi's.

Het MAP-proces en het luchtstripproces zijn uit oogpunt van geringe complexiteit het meest aantrekkelijk. Het stoomstrippen en het CAFR-proces kunnen als de meest complexe processen worden aangemerkt.

De membraan-bioreactor en de airliftreactor bevinden zich qua complexiteit tussen deze twee groepen processen.

Wanneer wordt gekeken naar de aansluiting bij de aanwezige ervaring bij bedrijfsvoerders worden de biologische systemen gunstiger beoordeeld dan de fysisch-chemische behandelingsmethoden.

#### 7.6.7 *Ervaring met de methode*

Van de beschouwde behandelingsmethoden bestaat voor de behandeling van stikstofrijk retourwater alleen met luchtstrippen ervaring op praktijkschaal.

#### 7.6.8 *Bedrijfszekerheid*

Onder bedrijfszekerheid wordt het potentiële risico op langdurige verstoring van het proces verstaan.

In dit opzicht wordt de airliftreactor het minst gunstig beoordeeld. Na een storing, waarbij de activiteit in de biofilm verdwijnt, zal het geruime tijd (ongeveer drie weken) duren, voordat de stikstofverwijdering weer op het oude niveau is hersteld.

In mindere mate geldt dit ook voor de membraan-bioreactor. Het herstel van de biologische activiteit is hier sneller.

Bij beide biologische methoden is dit wellicht te ondervangen door voldoende biologisch actief materiaal stand-by te houden.

De bedrijfszekerheid van de fysisch-chemische methoden wordt gunstiger beoordeeld. Storingen hebben hier een meer tijdelijk karakter en kunnen in principe snel worden hersteld.

#### 7.6.9 *Eenvoud van de bouw*

Voor alle installaties is de bouw relatief eenvoudig te realiseren. Afhankelijk van de levertijd van de mechanisch/elektrische apparatuur zal de bouwtijd ongeveer 6-12 maanden bedragen.

### 7.7 **Conclusies**

- De onderzochte systemen kunnen, op het CAFR-proces na, worden toegepast op praktijkschaal, mits wordt voldaan aan de randvoorwaarden voor de bedrijfsvoering.
- Het rendement van de stikstofverwijdering bedraagt bij een goed ontwerp:
  - voor de membraanreactor: 100% voor nitrificatie, 85% voor denitrificatie
  - voor de airliftreactor : 90% voor nitrificatie, 90% voor denitrificatie
  - voor de stripprocessen : 95% voor  $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering
  - voor het MAP-proces : 90% voor  $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering
- De exploitatiekosten zijn sterk afhankelijk van de capaciteit van de rwzi en locatiespecifieke factoren (beschikbaarheid van warmte of stoom) en bedragen in het gunstigste geval rond f 18,- per kg  $\text{N(Kj)}_{\text{verw}}$ , voor een installatie van 100.000 i.e. en rond f 8,- per kg  $\text{N(Kj)}_{\text{verw}}$ , voor een installatie van 400.000 i.e.

- Er kan tussen de verschillende methoden niet of nauwelijks onderscheid worden gemaakt in ruimtebeslag en eenvoud van de bouw.  
De eenvoudigste bedrijfsvoering vindt plaats bij het MAP-proces en het luchtstripproces. De biologische systemen (membraan-bioreactor, airliftreactor) sluiten het best aan bij de op rwzi's aanwezige ervaring.  
De fysisch-chemische methoden worden als bedrijfszekerder beoordeeld dan de biologische methoden. Bij de airlift-reactor is het potentiële risico op langdurige verstoring van de biologische activiteit groter.  
Praktijkervaring met behandeling van stikstofrijke stromen bestaat alleen met luchtstrippen.  
Het chemicaliënverbruik is het hoogst bij het MAP-proces en het luchtstripproces en het laagst bij de membraan-bioreactor. Het energieverbruik is het hoogst bij het stoomstripproces en het laagst bij het MAP-proces.  
De reststoffenproblematiek speelt bij de fysisch-chemische methoden het sterkst bij het MAP-proces en het luchtstripproces.

De genoemde conclusies zijn gebaseerd op de resultaten van het onderzoek op pilot-plantschaal en op de rekenexercities voor standaard-rwzi's. Door lokale omstandigheden kan de keuze voor een bepaalde methode worden beïnvloed.

1. RIZA/STOWA  
De invloed van interne stromen op de stikstofhuishouding bij rwzi's.  
Werkdocument RWZI 2000 91-05W
2. RIZA/STOWA  
Stikstofverwijdering uit interne stromen op rwzi's.  
Rapport RWZI 2000 92-09
3. STOWA  
Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen.  
Praktijkonderzoek aan de membraan-bioreactor bij de slibverwerkingsinstallatie Sluisjesdijk.  
Rapport 95-09
4. STOWA  
Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen.  
Praktijkonderzoek aan de airliftreactor bij de rwzi Utrecht.  
Rapport 95-10
5. STOWA  
Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen.  
Praktijkonderzoek aan stoomstrippen met dampverdichting bij de rwzi Amsterdam-Oost.  
Rapport 95-11
6. STOWA  
Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen.  
Praktijkonderzoek aan lucht- en stoomstripinstallaties bij de rwzi Utrecht.  
Rapport 95-12
7. STOWA  
Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen.  
Praktijkonderzoek aan het MAP/CAFR-proces bij de rwzi Utrecht.  
Rapport 95-13
8. STOWA  
Afzetmogelijkheden voor de reststoffen van strippen en MAP-proces.  
Rapport 95-14
9. Dijk, L. van en G.C.G. Roncken  
Combinatie van biologische afvalwaterzuivering en membraantechnologie.  
H<sub>2</sub>O, 27/1994, p. 41-48
10. Eikelboom, D.H. e.a.  
High performance bioreactor: a physiological approach to wastewater treatment with zero sludge production by complete retention.  
Japan-Netherlands Workshop on integrated water management, Miyazaki Japan, October 1993.

11. Heynen, J.J.  
Biologisch anaëroob-aërobe afvalwaterzuivering bij Gist-Brocades. Eindrapport 1977-1986.  
Publicatiereeks milieubeheer, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 1988
12. RIZA/STOWA  
Ontwikkeling van een slib-op-drager systeem voor de aerobe zuivering van stedelijk afvalwater.  
Fase II: Onderzoek naar de processtabiliteit en optimalisatie van het zuiveringsrendement.  
RWZI 2000, 92-07
13. Maier, K.H.  
Aus dem Wasser herausgestrippt.  
Schweizer Maschinenmarkt, 21/1992, p. 40-46
14. Thorndahl, U.  
Betriebserfahrungen mit einer chemisch-physikalischen Behandlung zur Verminderung der Rückbelastung der Kläranlage mit Stickstoff.
15. Rautenbach, R. e.a.  
Ammoniakrecycling aus dem Prozesswasser der Schlammwässerung.  
Korrespondenz Abwasser, 41/1994, p. 576-584
16. Schulze-Rettmer, R.  
The simultaneous chemical precipitation of ammonium and phosphate in the form of magnesium-ammonium-phosphate.  
Wat.Sci.Techn., 23/1991, p. 659-667
17. Schulze-Rettmer, R. en R. Blank  
Chemische Fällung von Ammonium mit Magnesiumphosphat unter Kreislaufführung des Fällmittels.  
Korrespondenz Abwasser, 4/1992, p. 550-559
18. Thøgersen, T.  
Stickstoffentfernung aus Schlammwässern der Zentralkläranlage Frederikshavn/Dänemark  
gwf-Wasser/Abwasser, 133/1992, p. 384-388
19. Seyfried, C.F., H. Scheer en C. Ranks  
Anwendungsbereiche und -grenzen der Magnesium-Ammonium-Phosphatfällung in der Abwasserreinigung.  
Abwassertechnik, 44/1993, p. 35-40
20. Wagner, F. en H. Wienands  
Biologie und Membrantechnik zur Abwasserreinigung.  
Wasser Abwasser Praxis, 2/1992
21. STOWA  
Monitoren voor P en N.  
Rapport STOWA 93-04.

22. STOWA  
Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen.  
Praktijkonderzoek aan de nitrietroute met de membraan-bioreactor bij de slibverwer-  
kingsinstallatie Sluisjesdijk  
Rapport 95-15
23. Besluit luchtemissie afvalverbranding.  
Staatsblad 21 januari 1993.

