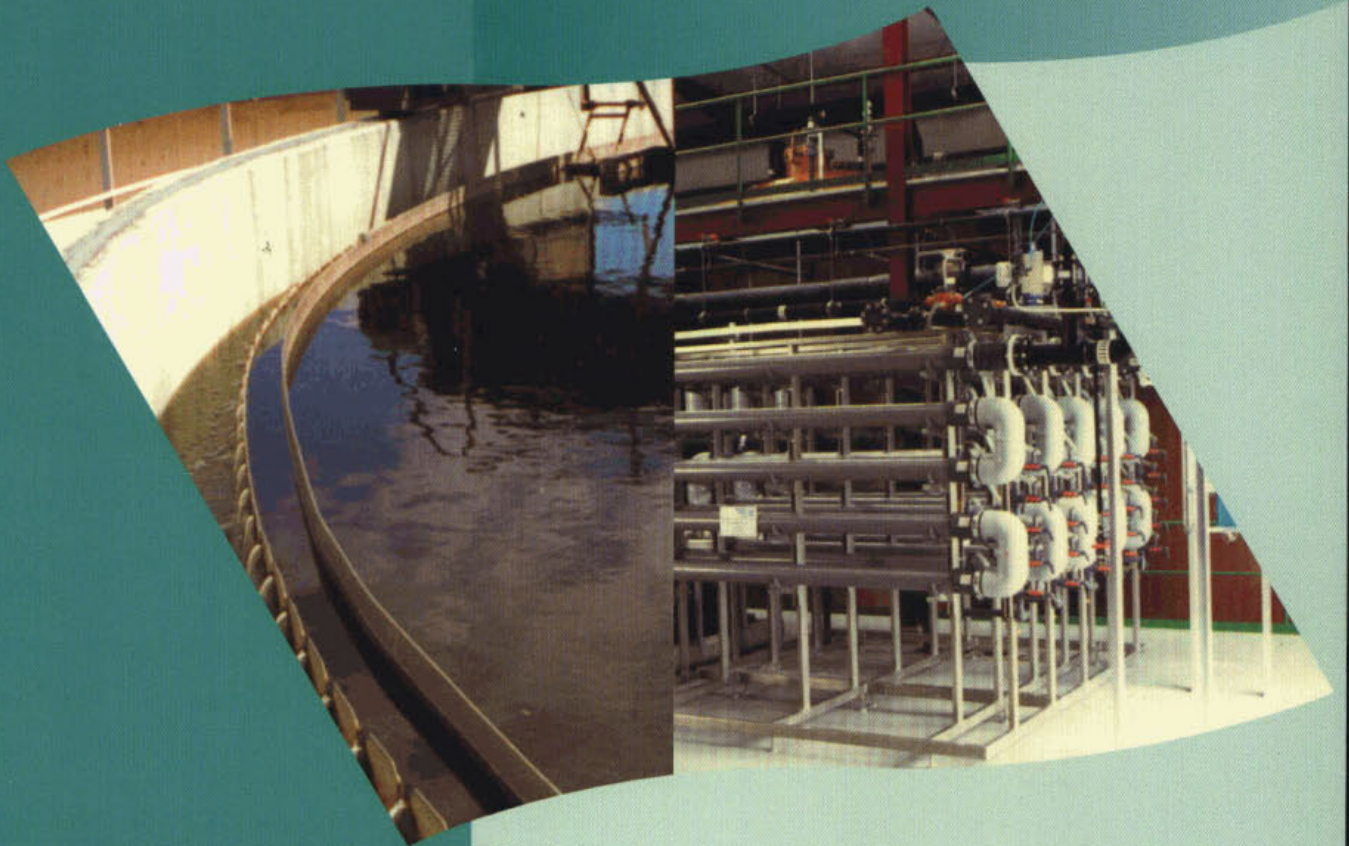


Mogelijkheden voor toepassing van membraanfiltratie op rwzi's



Mogelijkheden voor toepassing van membraanfiltratie op rwzi's

Arthur van Schendelstraat 816
Postbus 8090, 3503 RB Utrecht
Telefoon 030 232 11 99
Fax 030 232 17 66

Publicaties en het publicatie-
overzicht van de STOWA kunt u
uitsluitend bestellen bij:
Hageman Verpakkers BV
Postbus 281
2700 AC Zoetermeer
tel. 079 - 361 11 88
fax 079 - 361 39 27
o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.
ISBN 90.5773.045.06

98 34

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|---|----|
| | Inhoudsopgave | |
| | Ten geleide | |
| | Samenvatting | 1 |
| 1 | Inleiding | 4 |
| 2 | Doelstelling | 6 |
| 3 | Algemene aspecten van membraanfiltratie | 7 |
| 3.1 | Inleiding | 7 |
| 3.2 | Scheiding van vaste delen en water | 7 |
| 3.3 | Membraanflux | 8 |
| 3.4 | Membraanreiniging | 10 |
| 3.5 | Energieverbruik | 10 |
| 3.6 | Kosten van membraanscheiding | 11 |
| 4 | Membraanfiltratie in de waterzuivering | 13 |
| 4.1 | Inleiding | 13 |
| 4.2 | De toepassing van membraanfiltratie in rwzi's | 13 |
| 4.3 | Inventarisatie van membraansystemen als nagescha- kelde techniek | 15 |
| 4.3.1 | Filtratieprincipes | 15 |
| 4.3.2 | Systeemkentallen en onderlinge vergelijking | 17 |
| 4.4 | Inventarisatie van membraansystemen als geïntegreerde techniek | 19 |
| 4.4.1 | Slib/waterscheiding buiten de bioreactor | 19 |
| 4.4.2 | Slib/waterscheiding in de bioreactor | 21 |
| 4.4.3 | Systeemkentallen en onderlinge vergelijking | 22 |
| 4.5 | Overzicht van de verschillen van beide toepassingen | 25 |
| 4.6 | Alternatieven voor membraanfiltratie | 25 |
| 5 | Effecten van het toepassen van membraanfiltratie op rwzi's | 27 |
| 5.1 | Inleiding | 27 |
| 5.1.1 | Toepassingsmogelijkheden van membranen | 27 |
| 5.1.2 | Effecten van het toepassen van membraanfiltratie | 27 |
| 5.2 | Effect op het biologisch zuiveringsproces | 28 |
| 5.2.1 | Inleiding | 28 |
| 5.2.2 | Verhoging van het slibgehalte | 29 |
| 5.2.3 | Verandering van de slibstructuur | 29 |
| 5.2.4 | De slibgroei | 29 |
| 5.2.5 | Procesparameters (T, pH, O ₂) | 30 |
| 5.2.6 | Nitrificatie/denitrificatie | 31 |
| 5.2.7 | P-verwijdering | 32 |
| 5.2.8 | Slibbehandeling | 32 |
| 5.2.9 | Processtabiliteit | 32 |
| 5.3 | Effect op de effluentkwaliteit | 33 |
| 5.3.1 | Inleiding | 33 |
| 5.3.2 | De effluentkwaliteit | 34 |
| 5.3.3 | Mogelijkheden voor het toepassen van aan- vullende technieken | 34 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.4 | Overige aspecten | 35 |
| 5.4.1 | Inleiding | 35 |
| 5.4.2 | Noodzaak van voorfiltratie | 35 |
| 5.4.3 | Effect van de RWA/DWA-verhouding | 36 |
| 5.4.4 | Bedrijfsvoeringsaspecten | 36 |
| 6 | Technische consequenties en kosten | 38 |
| 6.1 | Inleiding | 38 |
| 6.2 | Selectie van de zuiveringsconcepten | 38 |
| 6.2.1 | Inleiding | 38 |
| 6.2.2 | Zuiveringsconcepten | 39 |
| 6.2.3 | Alternatieven | 40 |
| 6.3 | Algemene kenmerken van de zuiveringsconcepten | 40 |
| 6.4 | Uitgangspunten en dimensioneringsgrondslagen | 40 |
| 6.5 | Uitwerking van de kosten voor nieuwbouw | 44 |
| 6.6 | Uitwerking van de kosten voor uitbreiding | 44 |
| 7 | Gevoeligheidsanalyse | 48 |
| 7.1 | Algemeen | 48 |
| 7.2 | Direct aan membraanflux gerelateerde exploitatiekosten | 49 |
| 7.2.1 | Membraanflux | 49 |
| 7.2.2 | Energieverbruik van de membraanfiltratie | 50 |
| 7.2.3 | Standtijd van de membranen | 51 |
| 7.2.4 | Membraanprijs | 52 |
| 7.3 | Indirect aan membraanfiltratie gerelateerde kosten | 54 |
| 7.3.1 | RWA/DWA-verhouding | 54 |
| 7.3.2 | Slibverwerkingskosten | 55 |
| 7.3.3 | Opbrengst voor het effluent | 56 |
| 7.3.4 | Lengte van de persleiding | 57 |
| 8 | Evaluatie | 59 |
| 8.1 | Inleiding | 59 |
| 8.2 | Membraanfiltratie | 59 |
| 8.2.1 | Nageschakelde membraanfiltratie | 59 |
| 8.2.2 | Geïntegreerde membraanfiltratie | 60 |
| 8.2.3 | Kosten voor membraanfiltratie | 60 |
| 8.3 | Technologische en technische haalbaarheid van membraanfiltratie op rwzi's | 62 |
| 8.3.1 | Algemeen | 62 |
| 8.3.2 | Nageschakelde membraanfiltratie | 62 |
| 8.3.3 | Geïntegreerde membraanfiltratie | 63 |
| 8.3.4 | Kennishiaten bij het toepassen van membraanfiltratie op rwzi's | 64 |
| 8.4 | Economische haalbaarheid van membraanfiltratie op rwzi's | 66 |
| 8.4.1 | Algemeen | 66 |
| 8.4.2 | Resultaten van de gevoeligheidsanalyse | 66 |
| 8.5 | Toepassingsmogelijkheden van membraanfiltratie op rwzi's | 68 |
| 8.5.1 | Nageschakelde membraanfiltratie | 69 |
| 8.5.2 | Geïntegreerde membraanfiltratie | 69 |

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| 9 | Conclusies | 71 |
| | Literatuur | 73 |
| Bijlage I | Effecten van membraanfiltratie op het biologisch zuiveringsproces - toelichting | 77 |
| Bijlage II | Effecten van membraanfiltratie op de effluentkwaliteit - toelichting | 80 |
| Bijlage III | Uitwerking van de kosten voor nieuwbouw | 81 |
| Bijlage IV | Spreadsheetmodel - nageschakelde membraanfiltratie voor een rwzi met een capaciteit van 50.000 v.e. | 83 |
| Bijlage V | Spreadsheetmodel - geïntegreerde membraanfiltratie voor een uitbreiding van een rwzi van 50.000 v.e. naar 100.000 v.e. | 90 |
| Bijlage VI | Handleiding spreadsheetmodel | 98 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| 9 | Conclusies | 71 |
| | Literatuur | 73 |
| Bijlage I | Effecten van membraanfiltratie op het biologisch zuiveringsproces - toelichting | 77 |
| Bijlage II | Effecten van membraanfiltratie op de effluentkwaliteit - toelichting | 80 |
| Bijlage III | Uitwerking van de kosten voor nieuwbouw | 81 |
| Bijlage IV | Spreadsheetmodel - nageschakelde membraanfiltratie voor een rwzi met een capaciteit van 50.000 v.e. | 83 |
| Bijlage V | Spreadsheetmodel - geïntegreerde membraanfiltratie voor een uitbreiding van een rwzi van 50.000 v.e. naar 100.000 v.e. | 90 |
| Bijlage VI | Handleiding spreadsheetmodel | 98 |

Ten geleide

Alternatieve systemen voor de scheiding van biomassa en gezuiverd afvalwater genieten een toenemende interesse van het waterkwaliteitsbeheer. In dit kader komt de aandacht voor membraansystemen voor de scheiding van biomassa c.q. zwevend stof en water voort uit een aantal mogelijke voordelen van deze systemen: verbeterde effluentkwaliteit, verbeterde procesbeheersing en nieuwe zuiveringsconcepten.

Toepassing van membraanfiltratie als slib/waterscheiding maakt het mogelijk (i) effluent te hergebruiken voor doelen waar drinkwaterkwaliteit niet vereist is, (ii) effluent op gevoelig oppervlaktewater te lozen, (iii) de processtabiliteit te verhogen en de capaciteit te vergroten en (iv) minder slib te produceren.

In de thans voorliggende studie wordt 'de state of the art' van de membraanfiltratiesystemen in kaart gebracht, met hun sterke en zwakke punten, en wordt nagegaan onder welke omstandigheden de membraanfiltratiesystemen in de praktijk van de zuivering van huishoudelijk afvalwater een zinvolle rol kunnen spelen bij de hierboven genoemde toepassingsmogelijkheden. Daarbij is inzicht in de bedrijfs-economische kant onderbouwd met een bijgeleverd rekenprogramma.

Het onderzoek werd door het bestuur van de STOWA opgedragen aan Triqua B.V. te Wageningen (projectteam bestaande uit ir. L. van Dijk en ing. G.C.G. Roncken). Het project werd namens STOWA begeleid door een commissie bestaande uit ir. J. Ebbenhorst (voorzitter), ing. F.L.G. Besten, ir. A.H. Dirkzwager, ir. J.O.J. Duin, ir. P.C. Stamperius en ir. G.J.F.M. Vlekke.

Utrecht, september 1998

De directeur van de STOWA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruiff

Samenvatting

In de communale afvalwaterzuivering krijgen membraanfiltratietechnieken, zoals micro- en ultrafiltratie, de laatste jaren steeds meer aandacht. Membraanfiltratie kan in een biologische zuivering toegepast worden voor de polishing van het effluent (nageschakelde membraanfiltratie) en voor de slib/waterscheiding als vervanging van de nabezinktank (geïntegreerde membraanfiltratie). De aandacht voor de membraantechnologie komt voort uit een aantal potentiële voordelen. Deze voordelen richten zich enerzijds op de verbeterde effluentkwaliteit en anderzijds op een verbeterde procesbeheersing. Door membraanfiltratie op rwzi's toe te passen is het mogelijk om effluent te hergebruiken, effluent te lozen op gevoelig oppervlaktewater, de processtabiliteit van het zuiveringsproces te verhogen, minder slib te produceren en behandeld effluent te hergebruiken.

Door nieuwe ontwikkelingen op het gebied van membraanfiltratie zijn de kosten voor membraanfiltratie inmiddels aanzienlijk gedaald. Het toepassen van membraanfiltratie als geïntegreerde of als nageschakelde techniek op rwzi's komt met name door deze ontwikkelingen binnen bereik. In onderhavige studie wordt inzicht gegeven in de mogelijkheden voor het toepassen van membraanfiltratie op rwzi's. Hierbij wordt op basis van technische, technologische en economische aspecten vastgesteld onder welke omstandigheden de toepassing van membraanfiltratie op rwzi's interessant is.

Bij toepassing van membraanfiltratie als geïntegreerde techniek kan onderscheid worden gemaakt tussen een zogenaamd compactstelsel (een hoog drogestofgehalte van $\pm 30 \text{ kg/m}^3$ met een slibbelasting van 0,1 - 0,5 kg BZV/kg d.s. d) en een hyper laagbelast systeem (hoog drogestofgehalte van $\pm 30 \text{ kg/m}^3$ met een zeer lage slibbelasting van 0,01 - 0,05 kg BZV/kg d.s.d). Nageschakelde membraanfiltratie na een bestaande zuivering wordt voornamelijk toegepast voor het verbeteren van de effluentkwaliteit. Geïntegreerde membraanfiltratie als een compactstelsel wordt toegepast indien de zuiveringscapaciteit moet worden uitgebreid en een compacte bouwwijze noodzakelijk is. Geïntegreerde membraanfiltratie als een hyper laagbelast systeem kan worden toegepast ter verbetering van het zuiveringsproces en bijvoorbeeld voor het reduceren van de slibproductie. Bij de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie komt de effluentkwaliteit overeen met die van nageschakelde membraanfiltratie.

Naast de toepassing van cross-flow filtratie en dead-end filtratie zijn bij nageschakelde membraanfiltratie de laatste jaren nieuwe ontwikkelingen ingevoerd waarbij cross-flow filtratie wordt gecombineerd met dead-end filtratie: het zogenaamde hybride flow systeem. Voor geïntegreerde membraanfiltratie wordt tot op dit moment nog voornamelijk cross-flow filtratie met ultrafiltratie-membranen toegepast. Door gebruik te maken van een voldoende hoog turbulent stromingsprofiel en het regelmatig terugspoelen van de membranen kan voor geïntegreerde membraanfiltratie ook met microfiltratie over langere tijd een hoge flux worden gehandhaafd. Zo worden capillaire membranen en membraanplaten toegepast en kunnen buisvormige membranen semi cross-flow worden bedreven, waarbij in alle gevallen gebruik wordt gemaakt van beluchting voor het creëren van voldoende turbulentie.

Wanneer membraanfiltratie als nageschakelde techniek toegepast wordt, blijven de procescondities voor het biologische zuiveringsproces vrijwel ongewijzigd. De membraanfiltratie-unit wordt gebruikt voor een volledige verwijdering van zwevend stof, waardoor de effluentkwaliteit wordt verbeterd.

Door de toepassing van membranen als geïntegreerde techniek is het mogelijk om een hoog drogestofgehalte te handhaven. De volgende effecten kunnen optreden door toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's:

- het verbeteren van de effluentkwaliteit;
- het verlagen van de slibproductie;
- een toename van de temperatuur;
- het optimaliseren van het nitrificatie- en denitrificatieproces;
- het verhogen van de processtabiliteit.

Indien membraanfiltratie wordt toegepast op een rwzi zal in veel gevallen grove voorfiltratie van de toevoer naar de membraanunit moeten worden toegepast. Het onderhoud en de aandacht voor de bedrijfsvoering nemen enigszins toe in vergelijking met die voor een conventioneel zuiveringssysteem.

Voor de toepassing van membraanfiltratie op rwzi's zijn nog diverse kennishiaten aan te wijzen.

Bij nageschakelde membraanfiltratie richten die zich in de eerste plaats op de kwaliteit van het permeaat. Met name over de verwijdering van virussen, kiemen en prioritare stoffen is weinig bekend. Daarnaast kan de invloed van de concentraatstroom op de slibproductie en op het functioneren van de nabezinktank als een kennishiaat worden beschouwd.

Bij geïntegreerde membraanfiltratie gelden voor de kwaliteit van het permeaat dezelfde kennishiaten als bij nageschakelde membraanfiltratie. Daarnaast kan nog een aantal kennishiaten onderscheiden worden die betrekking hebben op het functioneren van het biologisch zuiveringsproces, zoals:

- de wijze van fosfaatverwijdering;
- het effect van accumulatie van specifieke verbindingen op de processtabiliteit;
- de ontwaterbaarheid van het slib uit een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie.

De technische en financiële consequenties voor het toepassen van membraanfiltratie zijn beoordeeld aan de hand van verschillende zuiveringsconcepten. Hierbij is uitgegaan van nieuwbouw, of van uitbreiding van bestaande zuiveringsinrichtingen voor drie verschillende capaciteiten (10.000, 50.000 en 150.000 v.e.). De kosten voor de toepassing van membraanfiltratie zijn hierbij vergeleken met een alternatief, waarbij door middel van uitbreiding van een conventionele zuivering het zelfde resultaat wordt bereikt. Voor de uitbreiding van bestaande zuiveringsinrichtingen is rekening gehouden met vermeden kosten voor uitbreiding en het aanleggen van een persleiding voor het verplaatsen van het lozingspunt en opbrengsten voor bijvoorbeeld het hergebruik van het effluent.

Op basis van de gehanteerde uitgangspunten blijkt dat nageschakelde membraanfiltratie economisch aantrekkelijk is. Met name voor de toepassing bij kleinere rwzi's is de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie een aantrekkelijk alternatief.

Geïntegreerde membraanfiltratie is alleen economisch aantrekkelijk voor zuiveringsinstallaties van maximaal 10.000 v.e. als dit systeem wordt uitgevoerd als een compactstelsel. Voor grotere rwzi's variëren de extra kosten van Hfl. 36,- per v.e. per jaar tot Hfl. 61,- per v.e. per jaar.

In een gevoeligheidsanalyse is de invloed van een aantal belangrijke parameters op de kosten van de geselecteerde zuiveringsconcepten onderzocht. Hierbij zijn parameters onderzocht die direct en indirect invloed hebben op de kosten van membraanfiltratie op rwzi's.

Van de direct aan membraanfiltratie gerelateerde kosten heeft met name de membraanflux een groot effect op de kosten. Ook de standtijd van de membranen en de membraanprijs bepalen de kosten voor membraanfiltratie in sterke mate. Het effect van het energieverbruik op de totale kosten is daarentegen gering.

De indirect aan membraanfiltratie gerelateerde kosten hebben een verschillende invloed op de extra kosten voor het toepassen van membraanfiltratie. Een verlaging van de RWA/DWA-verhouding heeft een gunstig effect op de extra kosten. De opbrengsten voor het effluent hebben een sterke invloed op de extra kosten. De vermeden aanleg van een persleiding voor het verleggen van het lozingspunt zijn alleen bij kleinere rwzi's doorslaggevend.

Algemeen kan gesteld worden dat de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie op rwzi's voor vrijwel alle zuiveringscapaciteiten interessant kan zijn. Het hybride flow-systeem is hier goed toepasbaar. Om nageschakelde membraanfiltratie economisch aantrekkelijk te laten zijn, zal aan minimaal één van de volgende randvoorwaarden voldaan moeten worden:

- alleen het DWA-debiet wordt behandeld;
- de opbrengst van het effluent bedraagt minimaal Hfl. 0,75 per m³.
- er worden kosten vermeden voor het aanleggen van een persleiding voor het verplaatsen van het lozingspunt (dit geldt met name voor kleinere rwzi's).

Geïntegreerde membraanfiltratie als een compact zuiveringssysteem lijkt goed toepasbaar voor rwzi's kleiner dan 10.000 v.e. De verschillende bestaande systemen voor geïntegreerde membraanfiltratie lijken daartoe geschikt op een rwzi. Om geïntegreerde membraanfiltratie economisch aantrekkelijk te laten zijn, zal aan minimaal één van de volgende randvoorwaarden voldaan moeten worden:

- de opbrengst van het effluent bedraagt minimaal Hfl 1,-- per m³;
- er worden kosten vermeden voor het aanleggen van een persleiding voor het verplaatsen van het lozingspunt;
- de RWA/DWA-verhouding wordt minimaal verlaagd tot een factor 3. Dit kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden door het gedeeltelijk bufferen van de RWA. Ook kunnen membraansystemen worden toegepast die tijdelijk in capaciteit verhoogd kunnen worden.

Op basis van de huidige stand der techniek en het inzicht in de kosten kunnen de volgende hoofdconclusies worden getrokken:

- Het toepassen van nageschakelde membraanfiltratie op rwzi's kan voor alle zuiveringscapaciteiten interessant zijn.
- De toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie is met name aantrekkelijk voor kleinere zuiveringscapaciteiten tot 10.000 v.e.
- Geïntegreerde membraanfiltratie heeft voornamelijk als hyper laagbelast systeem, in tegenstelling tot een compact systeem, weinig toepassingsmogelijkheden voor rwzi's. De belangrijke reden hiervoor is dat de specifieke (economische) voordelen van een hyper laagbelast zuiveringssysteem, zoals een zeer lage slibproductie en een hogere processtabiliteit onvoldoende opwegen tegen de kosten voor de membraanfiltratie.

1 Inleiding

Geavanceerde technologieën, als aanvulling op een bestaande technologie of ter vervanging van huidige technologische concepten genieten de laatste jaren een steeds grotere interesse binnen de afvalwaterzuivering. Een voorbeeld hiervan is membraanfiltratie. Membraanfiltratie kan in een biologische zuivering toegepast worden voor de slib/waterscheiding (vervanging van de nabezinktank). Hierbij wordt gesproken van geïntegreerde membraanfiltratie. Daarnaast kan membraanfiltratie gebruikt worden voor het polijsten van het effluent. Hierbij wordt membraanfiltratie achter de nabezinktank ingezet. In dit verband wordt gesproken van nageschakelde membraanfiltratie. De aandacht voor de membraantechnologie komt voort uit een aantal potentiële voordelen die deze systemen kunnen opleveren. Deze voordelen richten zich enerzijds op de verbeterde effluentwaliteit en anderzijds op de verbeterde procesbeheersing van de rwzi. Door membraanfiltratie op rwzi's toe te passen is het mogelijk om:

- effluent her te gebruiken als 'grijs water';
- effluent te lozen op gevoelig binnenwater;
- de processtabiliteit van het zuiveringsproces te verhogen (capaciteitsvergroting, optimaliseren van nitrificatie en denitrificatie en het voorkomen van slibbezinkingsproblemen);
- minder slib te produceren;
- grondwater aan te vullen (infiltreren van effluent in de bodem).

Deze voordelen zijn reeds geconstateerd in het RWZI-2000 onderzoek "Perspectives for the utilization of membrane-assisted sludge retention in municipal waste water treatment plants" [34]. Tevens werd geconstateerd dat bij het lager worden van de kosten voor membranen en het lager worden van de energiekosten voor membraanfiltratie deze technologie kansrijk is voor rwzi's.

Door nieuwe ontwikkelingen op het gebied van membraanfiltratie zijn de kosten voor membraanfiltratie inmiddels aanzienlijk gedaald. Het toepassen van membraanfiltratie als geïntegreerde of als nageschakelde techniek op rwzi's lijkt door met name deze ontwikkelingen en de eisen die gesteld worden aan rwzi's veelbelovend. Met name doordat door het toepassen van membraanfiltratie als geïntegreerde techniek voor slib/waterscheiding een nieuw zuiveringsconcept voor rwzi's gerealiseerd wordt, is het op dit moment nog niet geheel duidelijk onder welke specifieke omstandigheden het toepassen van membraanfiltratie aantrekkelijk is.

In onderhavig document wordt een studie naar de toepassing van membraanfiltratie op rwzi's als geïntegreerde en nageschakelde techniek uitgewerkt. Op basis van een deskstudie wordt een theoretische beschouwing gemaakt van de voor- en nadelen van het toepassen van verschillende membraanscheidingsystemen op rwzi's, inclusief technische, technologische en economische aspecten.

In hoofdstuk 2 is de doelstelling beschreven en worden de onderzoeksaspecten aangegeven. In hoofdstuk 3 wordt algemene theorie over membraanfiltratie gepresenteerd. De technische toepassingsmogelijkheden van membraanfiltratie in de waterzuivering komen in hoofdstuk 4 aan de orde. In hoofdstuk 5 worden de effecten van membraanfiltratie op het zuiveringsproces beschreven. In hoofdstuk 6 worden de zuiveringsconcepten gedefinieerd voor het beoordelen van de technische en economische haalbaarheid. De zuiveringsconcepten worden in hoofdstuk 7 uitgewerkt. In hoofdstuk 8 wordt een evaluatie uitgevoerd. De conclusies worden tenslotte in hoofdstuk 9 gepresenteerd.

Tevens is een rekenmodel in het spreadsheet-programma Excel 7.0 van Microsoft op diskette toegevoegd, zodat de economische haalbaarheid van membraanfiltratie op rwzi's voor specifieke situaties berekend kan worden. De basisgegevens en de uitgangspunten van het rekenmodel staan in hoofdstuk 6 en 7 opgenomen.

2 Doelstelling

De doelstelling van deze studie is inzicht te krijgen in de mogelijkheden voor het toepassen van membraanfiltratie als geïntegreerde of als nageschakelde techniek op rwzi's. Hierbij dient vastgesteld te worden onder welke omstandigheden toepassing van membraanfiltratie op rwzi's interessant is. Hiervoor worden de volgende aspecten onderzocht:

- de actuele ervaringen en ontwikkelingen op het gebied van membraanfiltratie in Nederland en in het buitenland;
- inventarisatie van membraansystemen als nageschakelde en als geïntegreerde techniek;
- effecten van het toepassen van membraansystemen als geïntegreerde techniek op rwzi's;
- effecten van het toepassen van membraansystemen als nageschakelde techniek op rwzi's;
- financiële aspecten van het toepassen van membraansystemen op rwzi's;
- het vaststellen van kennishiaten.

3 Algemene aspecten van membraanfiltratie

3.1 Inleiding

Membraanfiltratie wordt al geruime tijd binnen de procesindustrie toegepast. Binnen de waterzuiveringstechnologie worden microfiltratie en ultrafiltratie de laatste jaren steeds vaker toegepast voor het afscheiden van zwevend stof, polishing van effluent en voor de scheiding van slib en water in zogenaamde membraanbioreactoren. In dit hoofdstuk volgt een korte toelichting op de membraanfiltratietechnologie waarna in de volgende hoofdstukken dieper ingegaan wordt op de toepassing van membraanfiltratie als geïntegreerde techniek voor de slib/waterscheiding en als nageschakelde techniek binnen de waterzuivering.

Membraanfiltratie is een scheidingsmechanisme voor deeltjes dat primair gebaseerd is op deeltjesgrootte. Deeltjes met een grotere diameter dan de poriën in het membraan worden tegengehouden en deeltjes met een kleinere diameter passeren het membraan.

Er is een drijvende kracht nodig om stoffen door de nauwe membraanporiën te stuwen. Dit kan zijn een druk (Δp), maar ook een concentratieverschil (Δc) of een elektrisch spanningsverschil (ΔV). De verschillende soorten membraanprocessen kunnen worden ingedeeld op grond van de drijvende kracht en op grond van de poriediameter. Zo valt er onderscheid te maken tussen de drukgedreven membraanprocessen, zoals omgekeerde osmose (hyperfiltratie), nanofiltratie, ultrafiltratie en microfiltratie, en concentratie- of spanningsverschilgedreven processen, zoals osmose en dialyse, respectievelijk elektrodialyse.

3.2 Scheiding van vaste delen en water

Voor de scheiding van vaste delen en water worden drukgedreven membraanprocessen toegepast. De verschillende typen drukgedreven membraanfiltratieprocessen staan in tabel 1 weergegeven met daarin vermeld de poriegrootte en de transmembraandruk (drukverschil, ook wel TMP - trans membrane pressure genoemd).

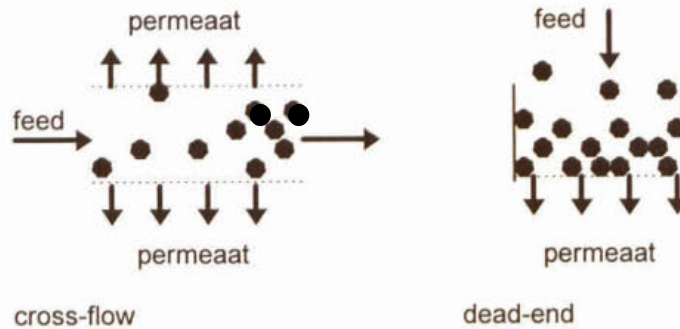
Tabel 1: Drukgedreven membraanfiltratietypen

| type | poriëngrootte | drukverschil |
|-------------------|----------------------------|--------------|
| microfiltratie | 0,1 - 1 μm | 0,2 - 4 bar |
| ultrafiltratie | 0,01 - 0,1 μm | 0,3 - 10 bar |
| nanofiltratie | 0,001 - 0,01 μm | 5 - 20 bar |
| omgekeerde osmose | < 0,001 μm | 10 - 150 bar |

De bekendste uitvoeringen van de drukbedreven membranen zijn:

- Buisvormige membranen - buizen met een diameter van 3-25 mm, waarbij het membraan aan de binnenzijde van de buis zit.
- Holle-vezelmembranen - vezels met een diameter van 1-2 mm, waarbij het membraan aan de buitenkant van de vezel zit.
- Plaatvormige membranen - membranen zitten als vlakke platen naast elkaar.

Daarnaast kunnen de membraansystemen in verschillende configuraties worden uitgevoerd. Hierbij speelt het stromingsregime langs het membraan een belangrijke rol. In hoofdzaak zijn twee configuraties te onderscheiden: cross-flow filtratie en dead-end filtratie. In afbeelding 1 wordt het principe van beide configuraties schematisch weergegeven.



Afbeelding 1: Principe van cross-flow filtratie en dead-end filtratie

Bij dead-end filtratie wordt een koek gevormd die regelmatig moet worden verwijderd, hetgeen resulteert in een batchgewijze procesvoering. Bij cross-flow filtratie wordt door middel van een turbulente stroming langs het membraanoppervlak de koekvorming zoveel mogelijk voorkomen.

Dead-end filtratie wordt toegepast voor minder zwaar vervuilde stromen (lage concentraties zwevend stof) of daar waar juist een hoge concentratiefactor (indikking) gewenst is. In alle gevallen dient het proces batchgewijs te worden bedreven. Indien een continu proces gewenst is wordt gekozen voor cross-flow filtratie. In vergelijking met dead-end filtratie wordt een minder hoge concentratiefactor bereikt, maar kunnen zwaarder vervuilde stromen eenvoudiger worden behandeld (b.v. scheiding van actiefslib en water).

3.3 Membraanflux

De membraanflux staat voor de hoeveelheid permeaat die per m^2 membraanoppervlak per tijdseenheid gefiltreerd wordt ($m^3/m^2 \cdot h$). De membraanflux bepaalt de hoeveelheid m^2 membraanoppervlak die geïnstalleerd moet worden om een bepaalde hoeveelheid vloeistof te filtreren. De membraanflux wordt in principe bepaald door de drijvende kracht en de totale membraanweerstand.

$$\phi = \Delta p / R_{tot}$$

waarin:

| | |
|------------|--|
| ϕ | - flux [$m^3/m^2 \cdot h$] |
| Δp | - drukverschil [N/m^2] |
| R_{tot} | - membraanweerstand [$m^2/kg \cdot h$] |

De totale membraanweerstand R_{tot} is opgebouwd uit een aantal deelweerstand:

$$R_{tot} = R_M + R_A + R_G + R_P + R_{CP}$$

waarin:

| | |
|----------|---|
| R_M | - membraanweerstand |
| R_A | - adsorptieweerstand |
| R_G | - gelweerstand |
| R_P | - weerstand ten gevolge van porieverstopping |
| R_{CP} | - weerstand ten gevolge van concentratiepolarisatie |

Membraanweerstand

Maatgevend voor de weerstand van het membraan zelf zijn:

- poriegrootte, porievorm en poriedichtheid;
- oppervlaktespanning van het membraan;
- elektrostatische- en oppervlaktepotentiaal.

De membraanweerstand kan geminimaliseerd worden door voor specifieke toepassingen het juiste membraantype te kiezen. Hierbij zijn naast poriegrootte en -verdeling ook de intermoleculaire krachten tussen membraan en (vloeistof)medium van belang.

Adsorptieweerstand

De adsorptie van molekulen op het membraanoppervlak kan een zeer grote invloed hebben op het membraanfiltratieproces. Met name door verandering van de oppervlaktespanning van het membraan door specifiek adsorberende stoffen kan de membraanflux sterk af- of toenemen. Ook hier bepaalt de juiste keuze van het type membraan voor een specifieke toepassing de uiteindelijke adsorptieweerstand.

Gelweerstand

De zogenaamde gelweerstand betreft een gellaag (biofouling of koekvorming) welke zich afzet op het membraanoppervlak. Bij het toepassen van membraanfiltratie voor slib/waterscheiding speelt de gelweerstand een belangrijke rol. Ophoping van eiwitten, colloïden, bacteriën en andere macromoleculaire stoffen in de voeding aan het membraan veroorzaken allerlei vormen van intermoleculaire interactie. Zo gaan bijvoorbeeld eiwitten onderling bindingen aan, "vlokken uit" en vormen een gellaag. De vorming van deze gellaag aan het membraanoppervlak gaat net zo lang door, totdat een evenwichtssituatie wordt bereikt. In deze situatie is de dikte van de gellaag constant. De aanvoer van vervuilende deeltjes is dan net zo groot als de afvoer van vervuilende deeltjes. De vervuiling zit opgehoopt bij het membraan in een dun laminair grenslaagje direct tegen het stilstaande membraan; dit laagje mengt niet met de turbulente bulkstroming en vermindert zodoende de permeaatflux. De mate van gellaagvorming is onder meer afhankelijk van de grootte van het drukverschil over het membraan. Zo kan het voorkomen dat een lagere druk een grotere flux geeft door een sterk verminderde gelweerstand. De gelweerstand kan daarnaast worden verminderd door het membraan regelmatig of continu te reinigen (zie paragraaf 3.4).

Weerstand door porieverstopping

Door de aanwezigheid van grote moleculen en kolloïdale deeltjes kunnen de poriën van een membraan verstopten, hetgeen tot een geringere membraanflux leidt. De kwaliteit van het membraan speelt hierbij vaak een rol. Naarmate een membraan "verouderd" neemt de verstoppingsgevoeligheid vaak toe. De mate van porieverstopping zal empirisch vastgesteld moeten worden. Porieverstopping kan deels door mechanische reinigingsmethoden (zie paragraaf 3.4) worden tegen gegaan. Daarnaast is de keuze van het juiste type membraan van belang.

Weerstand door concentratiepolarisatie

De weerstand door concentratiepolarisatie wordt bepaald door de concentratieverhoging van moleculen bij het membraanoppervlak en de daarmee samenhangende toename van de osmotische druk. Voor micro- en ultrafiltratie speelt dit een minder belangrijke rol dan bij nanofiltratie en met name bij omgekeerde osmose. De concentratiepolarisatie wordt geminimaliseerd door het aanbrengen van turbulente stroming.

3.4 Membraanreiniging

De hiervoor genoemde gelweerstand (biofouling, koekvorming) en weerstand ten gevolge van porieverstopping kan worden gezien als membraanvervuiling. Om de membraanflux op peil te houden, moet vervuiling in en op het membraan worden tegengegaan. Dit kan op hoofdlijnen op drie verschillende manieren worden uitgevoerd:

Chemische methode

Chemische reiniging wordt met name toegepast voor het verwijderen van biofouling of bijvoorbeeld kalkaanslag. Afhankelijk van de aard van de vervuiling kan chemische reiniging plaatsvinden met zuren, basen, detergentia en enzymatische middelen of een combinatie daarvan. Nog in ontwikkeling zijn de zelfreinigende membranen, die bij de productie zijn geïmpregneerd met een chemische substantie (enzymen), waardoor vervuiling minder snel hecht. Voor een chemische reiniging moet de membraanunit tijdelijk uit bedrijf worden genomen.

Mechanische methoden

De meest bekende toepassing van mechanische reiniging is het terugspoelen van membranen (backflush en -shocking). Mechanische reiniging wordt toegepast bij koekvorming of verstopping van de membraanporiën. Tijdens het gewone filtratieproces wordt er gedurende enkele seconden op de permeaatzijde van het membraan een druk of drukstoot gezet die hoger is dan de voedingsdruk. Daarmee wordt een eventuele gellaag of porieverstopping van het membraan afgeblazen. De verontreiniging wordt met de concentraatstroom meegevoerd.

Hydrodynamische methoden

Hydrodynamische methoden hebben, in tegenstelling tot de chemische en mechanische reiniging, een preventief karakter. Bij deze methoden speelt, naast 'overige' factoren als temperatuur, viscositeit, druk, pH en concentratie, de manier van vloeistofstroming de hoofdrol bij het oplossen en tegengaan van het vervuilingprobleem. Het is belangrijk dat de stroming zo turbulent mogelijk is, waardoor er grotere afschuifkrachten worden uitgeoefend op de gellaag. De laminaire grenslaag waarin deze gellaag ontstaat, blijft daardoor dunner.

De turbulentie kan worden vergroot door de stroomsnelheid te vergroten, door diverse blokkades aan te brengen en door het creëren van een instabiel stromingspatroon. Het creëren van een instabiel stromingspatroon en het handhaven van een hoge stroomsnelheid (of de combinatie hiervan) worden het meest toegepast. Door middel van het opvoeren van de stroomsnelheid (voedingsdebiet) wordt de turbulentie positief beïnvloed. Zoals al eerder is vermeld, spelen hierbij enkele parameters (temperatuur, viscositeit) een belangrijke rol. Het nadeel van *verhoogde stroomsnelheid* is een verhoogde activiteit van de voedingspomp en de direct hieraan gerelateerde energiekosten. De turbulentie kan ook worden verhoogd door de inbreng van lucht. Hierdoor kan de minimaal toegepaste stroomsnelheid (debiet) lager liggen, waardoor de energiekosten worden gereduceerd.

3.5 Energieverbruik

Membraanfiltratie vergt om de volgende redenen een relatief hoog energieverbruik:

- voorkomen van membraanvervuiling (verlagen van de membraanweerstand) door het creëren van een turbulent stromingsprofiel;
- het creëren van een drijvende kracht (drukverschil) over het membraan om een flux te genereren.

Het verkrijgen van een turbulent stromingsprofiel door een suspensie door een membraanbuis te sturen is mogelijk als de snelheid van het medium voldoende hoog is. Een turbulent stromingsprofiel is aanwezig als het getal van Reynolds groter is dan ongeveer 3.000 à 4.000 [7]. Het getal van Reynolds wordt als volgt berekend:

$$Re = (v \times \rho \times d) / \varepsilon$$

| | | |
|---------|---------------|--|
| waarin: | v | - stroomsnelheid in [m/s] |
| | ρ | - soortelijke massa van het vloeistofmedium [kg/m ³] |
| | d | - inwendige diameter van de buis [m] |
| | ε | - viscositeit [kg/m.s] |

Hieruit blijkt dat de mate van turbulentie evenredig toeneemt met de stroomsnelheid. Naarmate de turbulentie wordt verhoogd neemt de weerstand voor het verplaatsen van het vloeistofmedium langs het membraanoppervlak toe. Deze weerstand bestaat in hoofdzaak uit visceuze wrijving en het contact met de wand (wandruwheid). Naarmate de wrijving toeneemt, neemt het energieverbruik voor het verplaatsen van het vloeistofmedium toe. Het energieverbruik (benodigde vermogen) kan als volgt worden berekend:

$$P = (Q_v \times \Delta P) / \eta$$

| | | |
|---------|------------|--|
| waarin: | P | - benodigd vermogen [W] |
| | Q_v | - debiet van het vloeistofmedium [m ³ /h] |
| | ΔP | - te overwinnen drukverschil [N/m ²] |
| | η | - rendement van de motor [-] |

Het debiet van het vloeistofmedium en het drukverschil vertoont een lineair verband met de stroomsnelheid. Hieruit kan worden afgeleid dat het energieverbruik ongeveer kwadratisch toeneemt bij toenemende stroomsnelheid.

3.6 Kosten van membraanscheiding

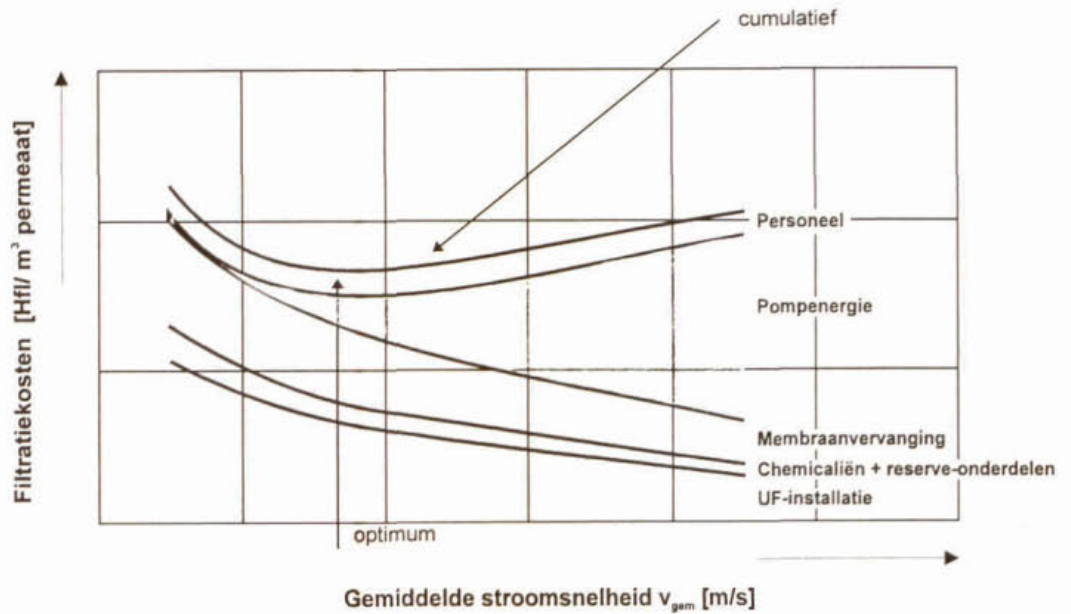
De totale exploitatiekosten benodigd voor membraanprocessen zijn over het algemeen opgebouwd uit de volgende deelkosten:

- afschrijvingen en rente;
- vervanging van membranen;
- (pomp)energie;
- chemicaliën en onderhoud;
- bediening/personeel.

Centraal binnen de drukgedreven membraanfiltratieprocessen staan de membraanflux en het energieverbruik. De membraanflux bepaalt de hoeveelheid m² membraanoppervlak die geïnstalleerd moet worden en is dus van invloed op de investeringskosten, de membraanvervangingskosten en de chemicaliënkosten voor reinigingsmiddelen. De energiekosten worden bepaald door het benodigde pompvermogen. Dit pompvermogen is nodig om voldoende drijvende kracht (druk) en turbulentie (stroomsnelheid) aan te brengen. De grootte van de drijvende kracht en de turbulentie hebben vervolgens weer invloed op de flux.

In afbeelding 2 is grafisch weergegeven hoe de exploitatiekosten van cross-flow membraanfiltratie veranderen bij een toenemende vloeistofstroomsnelheid (turbulentie) over de membranen [29]. Bij een bepaalde stroomsnelheid zijn de

kosten afzonderlijk per kostenpost (verschil tussen twee lijnen) en cumulatief (bovenste lijn) in de grafiek weergegeven. Het verschil tussen de verschillende lijnen geeft de kosten per kostenpost aan.



Afbeelding 2: Cumulatieve en afzonderlijke kosten van cross-flow membraanfiltratie als functie van de stroomsnelheid

Uit afbeelding 2 is af te leiden dat bij een lage stroomsnelheid de investeringskosten voor de installatie en de membraanvervangingskosten relatief hoog zijn. Dit wordt veroorzaakt doordat bij een lage stroomsnelheid slechts een lage flux kan worden gehandhaafd. Hierdoor dient een groot membraanoppervlak te worden geïnstalleerd. Indien een hoge stroomsnelheid wordt toegepast nemen de energiekosten voor de pomp sterk toe in vergelijking met de overige kosten. De membraanflux hierbij is hoger, hetgeen resulteert in een lagere investering en lagere membraanvervangingskosten.

Uit de cumulatieve kosten blijkt dat een optimum aanwezig is waarbij de totale kosten minimaal zijn. Voor het bepalen van de minimale kosten moet een evenwicht worden gevonden tussen het energieverbruik en een acceptabele membraanflux. Geconcludeerd kan worden dat de membraanflux en het energieverbruik een centrale rol spelen in het kostenaspect.

4 Membraanfiltratie in de waterzuivering

4.1 Inleiding

Membraanfiltratie zal bij (afval)waterbehandeling in de toekomst een belangrijke rol gaan spelen bij het sluiten van de waterkringloop. Voor waterbehandeling wordt membraanfiltratie momenteel op een aantal manieren toegepast:

- toepassingen in de procesindustrie;
- drinkwaterbereiding;
- in combinatie met biologische zuivering.

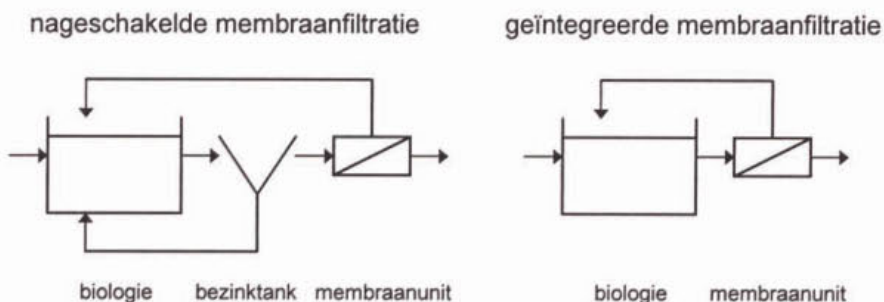
Bij de afvalwaterbehandeling in de procesindustrie wordt sinds enige tijd membraanfiltratie toegepast met als voordeel dat bijvoorbeeld produkten, grondstoffen en gezuiverd water kunnen worden teruggewonnen [27]. Het mes snijdt hierbij aan twee kanten: reductie van de vuillozing en hergebruik van waardevolle stoffen.

Door nieuwe ontwikkelingen en een forse daling van de membraankosten is membraanfiltratie een interessante techniek geworden voor het produceren van proces- en drinkwater [20]. In Nederland wordt inmiddels al op full-scale membraanfiltratie toegepast voor de productie van proceswater en de behandeling van spoelwater bij de drinkwaterproductie.

Door combinatie van technieken kunnen de toepassingsmogelijkheden van membraanfiltratie verder worden verbreed. Een voorbeeld van een combinatie-technologie is de combinatie van gangbare biologische zuiveringsprocessen met membraantechnologie. Hierbij bestaan twee mogelijkheden:

- membraantechnologie als nageschakelde techniek (behandeling van het effluent na de nabezinktank);
- membraantechnologie als geïntegreerde techniek (scheiding van slib en water in plaats van een nabezinktank).

In afbeelding 3 is een principeschets van de twee toepassingen van membraanfiltratie in een rwzi. Hierbij wordt de toepassing van membraanfiltratie als nageschakelde en geïntegreerde techniek gepresenteerd.



Afbeelding 3: Principeschets nageschakelde en geïntegreerde membraanfiltratie

4.2 De toepassing van membraanfiltratie in rwzi's

De redenen om membraanfiltratie in een rwzi toe te passen kunnen verschillend zijn. Bij de redenen voor toepassing van membraanfiltratie kan bij een geïntegreerde toepassing ook nog onderscheid worden gemaakt tussen een zogenaamd compact systeem en een hyper laagbelast systeem. Navolgende redenen kunnen worden aangegeven.

- Nageschakelde membraanfiltratie na een bestaande zuivering.
Bij nageschakelde membraanfiltratie wordt achter een conventionele zuivering membraanfiltratie geplaatst. Deze toepassing heeft in principe geen effect op de biologische zuivering. De voornaamste reden voor toepassing van nageschakelde membraanfiltratie is:
 - Verbetering van de effluentkwaliteit.

- Geïntegreerde membraanfiltratie als een compact systeem.
In een compact systeem wordt een hoog drogestofgehalte ($\pm 30 \text{ kg/m}^3$) gehandhaafd met een vergelijkbare of hogere slibbelasting dan in een communale zuivering wordt toegepast (0,1 - 0,5 kg BZV/kg d.s./d). Door de combinatie van een hoog drogestofgehalte en een hoge slibbelasting wordt een compact zuiveringssysteem gerealiseerd. Dit concept kan worden toegepast bij een bestaande zuivering, waarbij capaciteitsuitbreiding plaats moet vinden, of bij een nieuw te realiseren zuivering, waar behoefte is aan een compacte bouwwijze. Het biologische zuiveringsconcept wijkt slechts op enkele punten (hogere volumebelasting, hogere temperatuur) af van het conventionele zuiveringsconcept. De voornaamste redenen om geïntegreerde membraanfiltratie als een compact systeem toe te passen zijn:
 - uitbreiding van de zuiveringscapaciteit;
 - de keuze voor een compacte bouwwijze;
 - verbetering van de effluentkwaliteit.

- Geïntegreerde membraanfiltratie als een hyper laagbelast systeem.
In een hyper laagbelaste zuivering wordt een hoog drogestofgehalte ($\pm 30 \text{ kg / m}^3$) gehandhaafd terwijl een lagere slibbelasting wordt toegepast dan in een conventionele zuivering (0,01 - 0,05 kg BZV/kg d.s.d). Door de combinatie van een hoog droge stofgehalte met een lage slibbelasting zal de zuivering qua ruimtebeslag niet verschillen van een conventionele zuivering. Dit concept kan zowel bij een nieuw te bouwen zuivering als bij een bestaande zuivering worden toegepast. De voornaamste redenen om geïntegreerde membraanfiltratie als een hyper laagbelaste zuivering toe te passen zijn:
 - reduceren van de slibproductie;
 - verbeteren van de effluentkwaliteit;
 - optimalisatie van de nitrificatie/denitrificatie;
 - verhogen van de processtabiliteit.

Wanneer membraanfiltratie als nageschakelde techniek toegepast wordt, blijven de procescondities voor het biologische zuiveringsproces vrijwel ongewijzigd. De membraanfiltratie-unit wordt gebruikt voor een volledige verwijdering van zwevend stof, waardoor de effluentkwaliteit wordt verbeterd.

Voor de nabehandeling van effluent zijn de laatste jaren nieuwe ontwikkelingen ingevoerd waarbij cross-flow filtratie wordt gecombineerd met dead-end filtratie. Hierdoor is het energieverbruik aanzienlijk gedaald. Deze combinatie is mogelijk doordat het effluent slechts een geringe vervuiling aan zwevend stof bevat.

Indien membraanfiltratie als geïntegreerde techniek wordt toegepast, wordt de directe verbetering van de effluentkwaliteit gecombineerd met een mogelijke optimalisatie van het biologische zuiveringsproces. De combinatie van biologische zuivering en membraanfiltratie voor de scheiding van slib en water wordt als *combinatietechnologie* "membraanbioreactor" genoemd. In een membraan-

bioreactor wordt de slibstroom over een membraanfiltratie-unit geleid. Het filtraat wordt afgevoerd als effluent, het concentraat wordt teruggevoerd naar de beluchtingstank. Een membraanbioreactor onderscheidt zich van de conventionele biologische afvalwaterzuiveringen in hoofdzaak door een hoge biomassa-concentratie, een geringe slibproductie (afhankelijk van de slibbelasting) en een goede effluentkwaliteit [3,15].

Tot op dit moment wordt nog voornamelijk cross-flow filtratie met ultrafiltratie-membranen toegepast voor de vervanging van de nabezinktanks. Door gebruik te maken van een voldoende hoog turbulent stromingsprofiel en het regelmatig terugspoelen van de membranen kan voor geïntegreerde membraanfiltratie ook met microfiltratie over langere tijd een hoge flux worden gehandhaafd. Het voordeel van microfiltratie ten opzichte van ultrafiltratie is dat met een aanzienlijk lager drukverschil als drijvende kracht (1 bar i.p.v. 3 bar) een vergelijkbare flux haalbaar is. Zoals al aangegeven bij de hydrodynamische methoden voor het voorkomen van membraanvervuiling kan een instabiel (en daarmee turbulent) stromingsprofiel worden gecreëerd door het vloeistofmedium te mengen met lucht. Hierbij kan de stroomsnelheid aanzienlijk worden gereduceerd terwijl een hoge turbulentie gehandhaafd kan worden. Het energieverbruik kan hierdoor aanzienlijk worden teruggebracht.

In de volgende twee paragrafen wordt dieper ingegaan op de verschillende membraanfiltratiesystemen.

4.3 Inventarisatie van membraansystemen als nageschakelde techniek

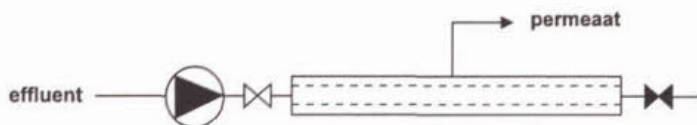
4.3.1 Filtratieprincipes

Dead-end filtratie

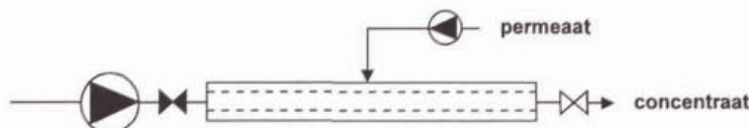
In afbeelding 4 wordt het principe van het dead-end systeem als nageschakelde membraanfiltratie schematisch weergegeven.

Bij het dead-end systeem kunnen capillaire of buisvormige membranen worden gebruikt, waarbij de membraanmodule aan één zijde wordt aangestroomd met effluent. De andere zijde van het membraan is afgesloten waardoor het effluent door het membraan heen wordt gedrukt. De achterblijvende vervuiling wordt regelmatig verwijderd door kortstondig een water- dan wel luchtdruk op de permeaatzijde te zetten, waarbij de vervuiling loskomt van het membraan en kan worden afgevoerd als reststroom (concentraat).

In bedrijf



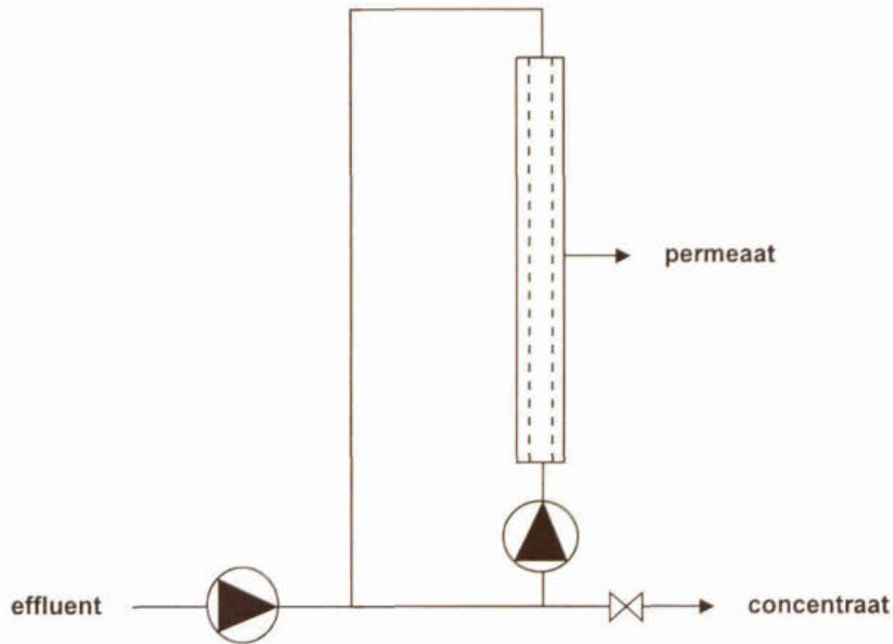
Terugspoelen



Afbeelding 4: Principeschets van dead-end membraanfiltratie

Cross-flow filtratie

In afbeelding 5 wordt het principe van het cross-flow systeem voor de nabehandeling van effluent schematisch weergegeven.



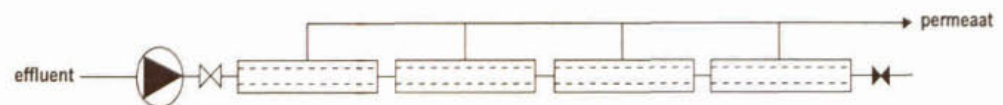
Afbeelding 5: Principeschets van cross-flow filtratie

Bij het (klassieke) cross-flow systeem wordt met een relatief hoge snelheid het slib/watermengsel door capillaire of buisvormige membranen geleid. De hoge snelheid in de membraanbuisjes levert een druk voor de productie van effluent en een turbulentie voor het direct tegengaan van vervuiling aan het membraanoppervlak. Hierdoor hoeven de membranen minder frequent teruggespoeld te worden en kan continu een vergaande concentrering plaatsvinden.

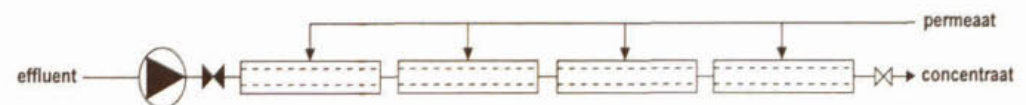
Hybride-flow filtratie

In afbeelding 6 wordt het principe van het hybride-flow systeem voor de filtratie van effluent schematisch weergegeven.

In bedrijf



Terugspoelen



Afbeelding 6: Principeschets van hybride-flow filtratie

In het hybride-flow systeem wordt dead-end filtratie gecombineerd met cross-flow membraanfiltratie. Bij het hybride-flow systeem worden meerdere membraanmodules achter elkaar geschakeld waarbij één zijde wordt aangestroomd met effluent en de

andere zijde is afgesloten. In deze configuratie wordt de eerste module aan de aanstroomzijde bedreven als cross-flow filtratie (met lage snelheid) waarbij dit gelijkmatig overgaat in dead-end filtratie naarmate meerdere membraanmodules doorlopen zijn. Na een bepaalde tijd wordt de achterblijvende vervuiling verwijderd door de membranen terug te spoelen met permeaat. De vervuiling wordt afgevoerd als reststroom (concentraat).

4.3.2 Systeemkentallen en onderlinge vergelijking

In tabel 2 wordt een technische indicatie gegeven van de hiervoor beschreven systemen. De gegevens zijn gebaseerd op beschikbare informatie uit de literatuur en gegevens van leveranciers. De literatuurverwijzingen zijn opgenomen in de tabel. Hieronder volgt een korte toelichting en een onderlinge vergelijking. De navolgende aspecten komen hierbij aan de orde:

- technische uitvoering;
- ervaring/ontwikkelingen;
- specifiek energieverbruik;
- membraanflux;
- bedrijfsvoeringskosten;
- membraankosten;
- standtijd van de membranen;
- bedrijfszekerheid.

Technische uitvoering

In alle systemen kunnen zowel microfiltratie- als ultrafiltratiemembranen worden toegepast. In dead-end en cross-flow kan gekozen worden voor buisvormige of capillaire membranen. In het hybride-flow systeem kunnen alleen buisvormige membranen worden toegepast.

Het verschil tussen cross-flow en dead-end filtratie is de wijze waarop de membranen worden aangestroomd. In het hybride-flow systeem wordt dit gecombineerd.

Bij de toepassing van dead-end filtratie is de hoogte van het drogestofgehalte gelimiteerd ($0,1 - 0,2 \text{ kg d.s./m}^3$) in verband met het dichtslaan van de membranen. Voor het cross-flow systeem kan een hoog drogestofgehalte (20 kg d.s./m^3) worden toegepast.

Ervaringen / specifiek energieverbruik

Met het cross-flow systeem is tot nu toe de meeste ervaring opgedaan. Het dead-end systeem en het hybride-flow systeem worden sinds enkele jaren getest en toegepast voor onder meer het opwerken van oppervlaktewater.

Bij filtratie met het dead-end systeem is het energieverbruik het laagst. Voor cross-flow filtratie wordt energie gebruikt om de membranen schoon te houden. Dit resulteert in een hoger energieverbruik.

Bedrijfsvoeringskosten / membraankosten / standtijd membranen

De kosten en de standtijd van de membranen zijn voor alle systemen vergelijkbaar. De bedrijfskosten zijn eveneens vergelijkbaar. Het cross-flow systeem kent een hoger energieverbruik, echter doordat een hogere membraanflux kan worden gehandhaafd zijn de investeringskosten (rente en afschrijving) en membraanvervangingskosten lager.

Tabel 2: Indicatie voor systeemkennaltallen van de verschillende systemen voor nageschakelde membraanfiltratie (peildatum 1997)

| kenmerk | dead-end | cross-flow | hybride |
|--|--|---|---|
| <p>technische uitvoering</p> <ul style="list-style-type: none"> * membraantype * aanstroming * trans membraan druk [bar] * max. drogestofconc. effluent[g/l] * max. drogestofconc. effluent[g/l] * productie van concentrat * concentratiefactor (maximaal) [%] | <p>buisvormig; 5 - 14 mm ; MF / UF</p> <p>capillaire; 1- 2 mm; MF</p> <p>tweezijdig</p> <p>0,4 - 1,0</p> <p>0,1 - 0,2 (afh. van cap. / buisv.)</p> <p>batchgewijs</p> <p>90 - 95</p> | <p>buisvormig; 5 - 14 mm ; MF / UF</p> <p>capillaire; 1- 2 mm; MF</p> <p>enkelzijdig</p> <p>1 - 6</p> <p>30</p> <p>continu</p> <p>90 - 95</p> | <p>buisvormig; 5 - 14 mm ; MF / UF</p> <p>enkelzijdig, wisselend</p> <p>0,4 - 1,0</p> <p>0,2</p> <p>batchgewijs</p> <p>90 -95</p> |
| ervaring / ontwikkelingsstadium | ongeveer 5 jaar toegepast in de praktijk, vele units geleverd in de proces- en waterindustrie | ongeveer 25 jaar toegepast in de praktijk, vele units geleverd in de proces- en (afval)waterindustrie | ongeveer 5 jaar in de praktijk toegepast, verschillende units in proces- en waterindustrie |
| specifiek energieverbruik [kWh / m ³ permeaat] | 0,05 - 0,2 | 2 - 4 | 0,1 - 0,3 |
| membraanflux [l/m ² . h] | 50 - 100 | 100 - 150 | 70 - 120 |
| bedrijfsvoeringskosten [f,- /m ³ permeaat] | 0,5 - 1,0 | 0,5 - 1,0 | 0,4 - 0,9 |
| membraankosten [f,- /m ²] | 250 (capillaire) | 250 (capillaire) | 350 (buisvormig) |
| standtijd van de membranen [jaar] | 4 (capillaire) - 5 (buisvormig) [37,38] | 4 (capillaire) - 5 (buisvormig) [37,38] | 4 (capillaire) - 5 (buisvormig) [38] |
| bedrijfszekerheid | gevoelig voor verstopping | ongevoelig voor verstoppingen | gevoelig voor verstopping |

MF - microfiltratie
UF - ultrafiltratie

Bedrijfszekerheid

Cross-flow membraanfiltratie geeft de hoogste bedrijfszekerheid. Vanwege de hoge energie-input is de kans op verstopping van de membraanbuisjes gering. Bij de overige systemen bestaat het gevaar van verstopping van membraanmodules door de toepassing van dead-end filtratie. Zodra het gehalte aan onopgelost materiaal te snel toeneemt, bijvoorbeeld bij uitspoeling van slib, kunnen de membraanmodules verstopten. Het herstel van de membraanmodules na een calamiteit vereist een grote inspanning.

Bij nageschakelde membraanfiltratie ontstaat een brijn. Dit brijn bestaat uit de onopgeloste bestanddelen die uit het effluent zijn verwijderd. Het brijn kan gezien worden als een soort afvalstof of kan worden teruggevoerd naar de zuiveringsinstallatie waar de onopgeloste bestanddelen uiteindelijk met het spuislib worden verwijderd.

4.4 Inventarisatie van membraansystemen als geïntegreerde techniek

Membraanfiltratie als geïntegreerde techniek kan op twee plaatsen in het zuiveringsproces worden toegepast:

- **Buiten de bioreactor.**
Het slib/watermengsel wordt buiten de bioreactor langs een membraanoppervlak geleid. De afscheiding van permeaat vindt plaats van binnen naar buiten (tubular membranen). Hierbij wordt overdruk toegepast als drijvende kracht.
Toegepaste systemen volgens dit principe zijn cross-flow en semi cross-flow.
- **In de bioreactor (submerged systemen).**
Het slib/watermengsel wordt in de bioreactor langs het membraan geleid. De afscheiding vindt in de meeste gevallen plaats van buiten naar binnen. Hierbij wordt vaak een onderdruk aan de binnenzijde van het membraan toegepast als drijvende kracht. Toegepaste systemen volgens dit principe zijn plaatvormige en capillaire membranen.

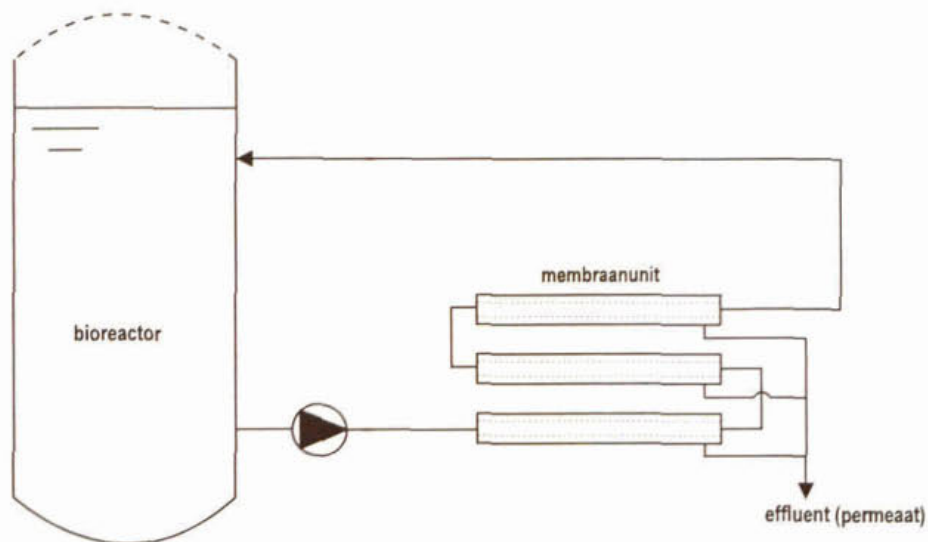
De verschillende systemen worden navolgend nader toegelicht.

4.4.1 Slib/waterscheiding buiten de bioreactor

Cross-flow systeem

In afbeelding 6 wordt het principe van cross-flow membraanfiltratie voor de slib/waterscheiding schematisch weergegeven.

Bij het cross-flow systeem worden buisvormige membraanmodules buiten de bioreactor gebruikt voor de slib/waterscheiding. Door middel van een voedingspomp wordt het slib/watermengsel met een relatief hoge snelheid door de membraanbuizen geleid. Als drijvende kracht voor de membraanscheiding wordt gebruik gemaakt van overdruk aan de slib/waterzijde, aangebracht door de voedingspomp. Het permeaat wordt van de binnenkant van de membraanbuizen door het membraan naar buiten geperst. Het concentraat wordt teruggevoerd naar de bioreactor.

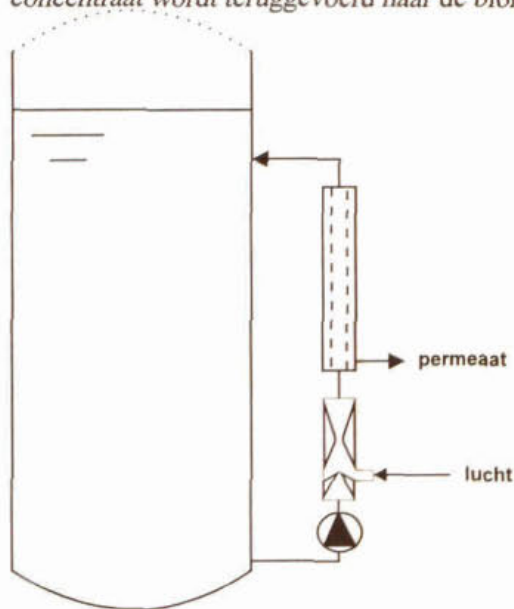


Afbeelding 6: Principeschets van cross-flow membraanfiltratie

Semi cross-flow systeem

In afbeelding 7 wordt het principe van het semi-cross flow systeem voor de slib/water scheiding schematisch weergegeven.

Het semi cross-flow systeem is een variant op het cross-flow systeem. Bij semi-cross-flow wordt, net als bij cross flow filtratie, door middel van een voedingspomp het slib/watermengsel door de membraanmodule geleid. In tegenstelling tot het cross flow systeem is de doorstroomsnelheid hierbij aanzienlijk lager. Voor het verkrijgen van voldoende turbulentie wordt vóór het intreden in de module lucht toegevoerd. Als drijvende kracht voor de membraanscheiding wordt ook hier overdruk aan de slib/waterzijde aangebracht door de voedingspomp. Het permeaat wordt van de binnenkant van de membraanbuizen door het membraan naar buiten geperst. Het concentraat wordt teruggevoerd naar de bioreactor.

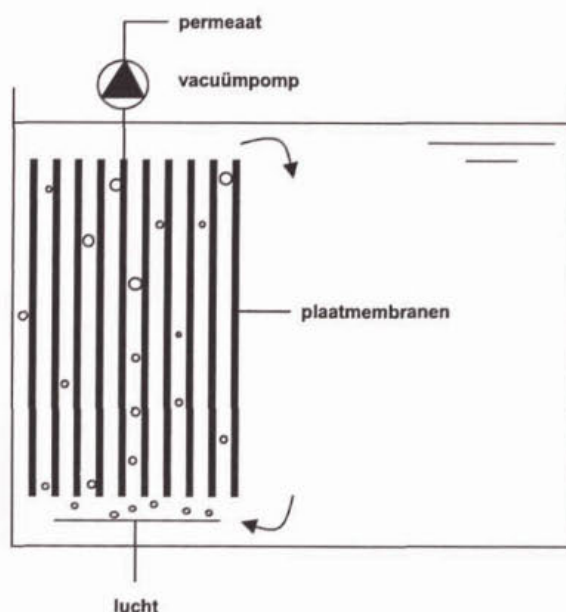


Afbeelding 7: Principeschets van het semi cross-flow systeem

4.4.2 Slib/waterscheiding in de reactor

Platensysteem

In afbeelding 8 wordt het principe van het platensysteem voor de slib/waterscheiding schematisch weergegeven.



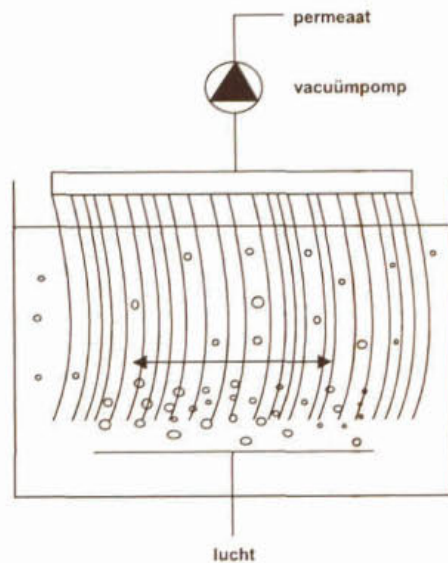
Afbeelding 8: Principeschets van het platensysteem

Bij het platensysteem worden membraanplaten vertikaal, op een relatief korte afstand van elkaar, in de bioreactor gehangen. Door middel van intensieve beluchting direct onder de membranen wordt een stroming langs de membraanplaten verkregen. Als drijvende kracht voor de membraanscheiding wordt gebruik gemaakt van een onderdruk (vacuüm) aan de permeatzijde. De aanstroming van de platen vindt aan de buitenkant plaats. Het permeaat wordt van buiten naar binnen gezogen.

Capillairsysteem

In afbeelding 9 wordt het principe van het capillairsysteem voor de slib/waterscheiding schematisch weergegeven.

Het capillairsysteem is een variant op de platen-reactor, waarbij het membraan niet bestaat uit een platenpakket maar uit een bundel compacte holle vezelmembranen die vrij in de bioreactor hangen. Door een intensieve beluchting toe te passen onder de membranen wordt een stroming langs het membraan verkregen. Turbulentie wordt verkregen door opstijgende luchtbellen. Als drijvende kracht voor de membraanscheiding wordt hier gebruik gemaakt van een onderdruk (vacuüm) aan de permeatzijde. De aanstroming van de membranen vindt aan de buitenkant plaats. Het permeaat wordt van buiten naar binnen gezogen.



Afbeelding 9: Principeschets van het capillairsysteem

4.4.3 Systeemkentalen en onderlinge vergelijking

In tabel 3 wordt een technische indicatie gegeven van de hiervoor beschreven systemen. De gegevens zijn gebaseerd op beschikbare informatie uit de literatuur en gegevens van leveranciers. De literatuurverwijzingen zijn opgenomen in de tabel. Navolgend wordt een korte toelichting en een onderlinge vergelijking gegeven. Hierin komen de volgende aspecten aan de orde:

- technische uitvoering;
- ervaring/ontwikkelingsstadium;
- specifiek energieverbruik;
- membraanflux;
- bedrijfsvoeringskosten;
- membraankosten;
- standtijd van de membranen;
- bedrijfszekerheid.

Technische uitvoering

Voor de technische uitvoering kan een aantal aspecten beschouwd worden. In tabel 3 wordt de uitvoering per membraanfiltratiesysteem gespecificeerd.

Bij cross-flow en semi-cross-flow membraanfiltratie kunnen zowel ultrafiltratie- als microfiltratie-membranen toegepast worden. Bij het platen- en het capillairsysteem kan alleen microfiltratie toegepast worden.

Doordat bij cross-flow en semi-cross-flow buisvormige membranen toegepast worden, is de flexibiliteit voor membraantype en leverancier erg groot. Bij capillaire- en platenmembranen is men gebonden aan één of enkele leveranciers.

Alleen bij cross-flow membraanfiltratie wordt geen lucht toegevoegd voor het verkrijgen van voldoende turbulentie. Hierdoor is een hogere stroomsnelheid nodig. De TMP (trans membrane pressure) ligt bij cross-flow membraanfiltratie het hoogst (1-6 bar), terwijl bij de andere systemen de TMP circa 0,1 - 1 bar bedraagt.

Het maximaal haalbare drogestofgehalte ligt bij cross-flow membraanfiltratie het hoogst op circa 30-40 kg/m³, terwijl bij de andere systemen het maximale drogestofgehalte 15-25 kg/m³ bedraagt.

Het aantal pompen en appendages is voor de verschillende systemen min of meer gelijk, zodat in dat opzicht voor elk systeem het onderhoud vergelijkbaar is. Voor de systemen (cross-flow, semi-cross-flow) die buiten de zuivering zijn geplaatst, is de toegankelijkheid het grootst. Hierdoor kan onderhoud aan deze systemen eenvoudiger zijn.

Ervaringen / specifiek energieverbruik

Met het cross-flow systeem is verreweg de meeste ervaring opgedaan. Het capillair- en het platensysteem zijn de laatste jaren ontwikkeld, waardoor nog relatief weinig ervaring met deze systemen is opgedaan. Het semi-cross-flow systeem is nieuw en heeft nog geen ful-scale ervaring. Bij de laatste systemen is het energieverbruik aanzienlijk gereduceerd, voor een deel ten koste van de membraanflux. Het nieuwe semi-cross-flow systeem geeft hierop weer een verbetering door met een relatief laag energieverbruik een redelijke flux te handhaven.

Membraanflux

De membraanflux van het cross-flow systeem is het hoogst, maar kent ook het hoogste energieverbruik. De membraanfluxen van het capillairsysteem en het platensysteem liggen aanzienlijk lager. De membraanflux van het semi-cross-flow systeem ligt ongeveer tussen voornoemde systemen in.

Bedrijfsvoeringskosten / membraankosten / standtijd van de membranen

De bedrijfskosten bestaan uit de aanschaf van de modules en de membranen, energiekosten en de vervangingskosten van de membranen. Het blijkt dat, uitgedrukt in totale kosten per m³, het cross-flow systeem het duurste systeem is. Dit wordt met name veroorzaakt door de hogere energiekosten. Voor het capillairsysteem en platensysteem zijn de kosten vergelijkbaar. De energiekosten zijn laag, maar er moet geïnvesteerd worden in meer membraanoppervlak waarmee ook de membraanvervangingskosten hoger liggen. Het semi-cross-flow systeem kent een relatief laag energieverbruik en heeft minder membraanoppervlak nodig. De kosten liggen iets lager dan de overige systemen.

Met de standtijd van de membranen van het capillairsysteem, het platensysteem en het semi-cross-flow systeem is nog onvoldoende tot geen ervaring. In tabel 3 is daarom een korte standtijd opgenomen. Gezien de lage drukken en de lage stroomsnelheden waarbij deze systemen bedreven worden, is de verwachting dat de standtijd van deze membranen hoger zullen zijn, waardoor de kosten verder zullen dalen. Bij een verhoging van de standtijd van de membranen bij de systemen semi-cross-flow, capillair en platen dalen de kosten aanzienlijk zodra de membraankosten verder dalen, waardoor die systemen dan ook aantrekkelijker worden.

Bedrijfszekerheid

Met het cross-flow systeem is op dit moment de meeste ervaring opgedaan. Deze systemen blijken in de praktijk probleemloos te functioneren [5]. Met de andere systemen is minder ervaring. Voordeel van het cross-flow systeem en het semi-cross-flow systeem zijn de regelbaarheid en de toegankelijkheid van deze systemen, zodat optredende verstoringen eenvoudig verholpen kunnen worden. Het capillairsysteem en het platensysteem daarentegen zijn ongevoelig voor verstopping van de modules in verband met de filtratierichting van buiten naar binnen.

Tabel 3: Indicatie van systeemkennalen van de verschillende filtratiesystemen voor geïntegreerde membraanfiltratie (peildatum 1997)

| kenmerk | membraanscheiding buiten de bioreactor | | membraanscheiding in de bioreactor | |
|--|--|--|---|--|
| | cross-flow | semi cross-flow | capillair | platen |
| technische uitvoering * membraantype * stroomsnelheid [m/s] * medium * trans membraan druk [bar] * max. drogestofconc.[g/l] * benodigdheden(pompen) | [36,42,46] buisv.; 5 - 14 mm; MF / UF 3,5 - 4,5 water 3 - 6; overdruk 30-40 voeding / terugspoelen | [1,36] buisv.; 5-14 mm; MF/UF 0,5- 2,0 lucht / water 0,4 - 1,0; overdruk 15-25 voeding / belucht. / terugsp. | [45,47] capillair ;1 - 2 mm; MF 0,1 - 0,6 lucht / water 0,1 - 0,8; overdruk 15-25 voeding / belucht. / terugsp. | [13,40] vlak; MF 0,1 - 0,6 lucht / water 0,1 - 0,6; overdruk 15-25 voeding / belucht. / terugsp. |
| ervaring / ontwikkelingsstadium | reeds 5 - 10 jaar in de praktijk toegepast, in Europa meer dan 40 units geleverd, wereldwijd veel referenties | eind ontwikkelingsstadium geen praktijkervaring | sinds enkele jaren (3) in de praktijk toegepast, in Europa ongeveer 10 units geleverd, wereldwijd enkele tientallen | sinds enkele jaren (5) in de praktijk toegepast, in Europa ongeveer 5 units geleverd, wereldwijd niet bekend |
| specifiek energieverbruik [kWh/m ³ permeaat] | [36,39,40] 3 - 7 | [1,39] 0,7 - 2 | [45,47] 0,2 - 1,0 | [39,40] 0,2 - 1,5 |
| membraanflux [l/m ² . h] | [36,42] 100 - 300 | [1,39] 40 - 70 | [45,47] 20 - 35 | [40] 30 - 45 |
| bedrijfsvoeringskosten [f,- /m ³ permeaat] | [39] 1,30 - 1,40 | [39] 1,00 - 1,10 | [39] 1,30 - 1,40 | [39] 1,20 - 1,30 |
| membraankosten [f,- /m ²] | [36] 350 | [36] 350 | [45,47] 250 | [40] 300 |
| standtijd van de membranen [jaar] | [36] 3 - 4 | [36] 2 - 3 | [45,47] 2 - 3 | [40] 2 - 3 |
| bedrijfszekerheid | goede regelbaarheid en toegankelijkheid | goede regelbaarheid en toegankelijkheid | membraanmodules minder gevoelig voor verstoppingen | membraanmodules minder gevoelig voor verstoppingen |

4.5 Overzicht van de verschillen tussen beide toepassingsgebieden

In de navolgende tabel wordt een kort overzicht gegeven van de verschillen tussen de toepassing van membraanfiltratie als nageschakelde techniek en de toepassing als geïntegreerde techniek.

Tabel 4: Vergelijking van nageschakelde en geïntegreerde membraanfiltratie in rwzi's.

| | nageschakelde membraanfiltratie | geïntegreerde membraanfiltratie |
|-------------------------|--|---|
| Redenen voor toepassing | effluentkwaliteit; | effluentkwaliteit; optimalisatie van de biologische zuivering; compacte bouw. |
| Beschikbare technieken | dead-end cross-flow hybride flow | cross-flow semi cross-flow submerged systemen |
| Ervaring | veel ervaring met cross-flow; enige ervaring met overige systemen. | veel ervaring met cross-flow; enige ervaring met submerged systemen; geen ervaring met semi cross-flow. |
| Bedrijfszekerheid | kans op verstopping van de membraanbuisjes bij slibuitspoeling. | weinig risico voor verstopping. |

4.6 Alternatieven voor membraanfiltratie

In plaats van membraanfiltratie kunnen ook alternatieven worden toegepast om hetzelfde doel (bijvoorbeeld capaciteitsvergroting, ontlasten van het oppervlaktewater) binnen het zuiveringsproces te bereiken. De voornaamste redenen voor het toepassen van membraanfiltratie zijn:

- verbetering van de effluentkwaliteit;
- technologische redenen / optimalisatie;
- de keuze voor een compacte bouwwijze.

De verbetering van de effluentkwaliteit is vaak noodzakelijk vanwege de gevoeligheid van het oppervlaktewater waarop het effluent van de rwzi wordt geloosd. Naast membraanfiltratie kan aan de gestelde effluenteisen in veel gevallen ook worden voldaan met andere technieken zoals bijvoorbeeld zandfiltratie. In sommige situaties kan de toepassing van een extra zuiveringstap worden voorkomen door het aanleggen van een persleiding naar minder gevoelig oppervlaktewater (verplaatsing van het lozingspunt).

De toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie om de technologische werking van de zuivering te optimaliseren hebben vrijwel allemaal direct te maken met het verhogen van het droge stofgehalte. Enkele technologische redenen voor de toepassing van membraanfiltratie zijn het reduceren van de slibproductie, de uitbreiding van de

zuiveringscapaciteit, de optimalisatie van de nitrificatie/denitrificatie en het verhogen van de processtabiliteit. Zonder membraanfiltratie kan hieraan worden voldaan door bijvoorbeeld uitbreiding van het beluchtingsvolume. Een alternatief voor de vermindering van de slibproductie is een extra investering in de slibverwerking.

Een compacte bouwwijze zonder membraanfiltratie is voor een nieuw te realiseren rwzi alleen mogelijk door het toepassen van alternatieve compacte zuiveringssystemen zoals bijvoorbeeld slib-op-drager systemen. Een aanzienlijke capaciteitsuitbreiding van een bestaande rwzi zonder uitbreiding van het beluchtingsvolume is alleen mogelijk met membraanfiltratie.

De mogelijke alternatieven voor het toepassen van membraanfiltratie staan in tabel 5 samengevat.

Tabel 5: Alternatieven voor membraanfiltratie

| Reden voor membraanfiltratie | Alternatief |
|-------------------------------|---|
| verbetering effluentkwaliteit | zandfiltratie, vlokfiltratie aanleggen persleiding |
| optimalisatie zuivering | uitbreiding beluchtingsvolume |
| verlaging slibproductie | uitbreiding slibverwerking |
| compacte bouwwijze | alternatieve compacte zuiveringssystemen |

5 Effecten van het toepassen van membraanfiltratie op rwzi's

5.1 Inleiding

Het toepassen van membraanfiltratie op rwzi's als nageschakelde techniek of als geïntegreerde techniek voor slib/waterscheiding heeft een groot aantal effecten op het gehele zuiveringsconcept. Deze zijn onder te verdelen in:

- effect op het biologisch zuiveringsproces;
- effect op de effluentkwaliteit;
- algemene aspecten.

5.1.1 Toepassingsmogelijkheden van membranen

Voor de toepassing van membraanfiltratie is de achtergrond van de keuze voor de toepassing van membraanfiltratie van belang. De voornaamste reden voor de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie is verbetering van de effluentkwaliteit. Naast verbetering van de effluentkwaliteit kunnen reductie van de slibproductie en capaciteitsuitbreiding redenen zijn voor toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie voor de slib/waterscheiding.

In hoofdzaak zijn drie toepassingsmogelijkheden te onderscheiden voor membraanfiltratie op rwzi's:

- nageschakelde membraanfiltratie (effluentpolishing);
- geïntegreerde membraanfiltratie met als doel reductie van de slibproductie (hyper laagbelast systeem);
- geïntegreerde membraanfiltratie met als doel verhoging van de zuiveringscapaciteit (compact systeem).

De keuze voor een specifieke toepassing is van invloed op het effect van de membraanfiltratie op het gehele zuiveringsproces. Bij de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie wordt alleen de effluentkwaliteit verbeterd en wordt het zuiveringsproces niet tot nauwelijks beïnvloed. Bij de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie wordt naast de verbetering van de effluentkwaliteit het biologische zuiveringsproces sterk beïnvloed. Door de toepassing van membraanfiltratie voor de slib/waterscheiding kan een hoger droge stofgehalte in de beluchtingstank worden gehandhaafd.

5.1.2 Effecten van het toepassen van membraanfiltratie

Effect op het biologisch zuiveringsproces

De belangrijkste invloeden van de toepassing van met name geïntegreerde membraanfiltratie op de biologische zuivering zijn:

- verhoging van de biomassaconcentratie;
- verandering van de slibstructuur
- reductie van de slibgroei;
- procesparameters (T, pH, O₂);
- nitrificatie/denitrificatie;
- P-verwijdering;
- slibbehandeling;
- processtabiliteit.

Effect op de effluentkwaliteit

Het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie en nageschakelde membraanfiltratie hebben vrijwel hetzelfde effect op de effluentkwaliteit. De keuze van het type membraanfilter bepaalt in hoge mate de effluentkwaliteit. Het effect van het toepassen van membraanfiltratie wordt beoordeeld voor:

- de effluentkwaliteit;
- mogelijkheden voor toepassen van aanvullende technieken.

Algemene aspecten

Naast het effect op het zuiveringsproces en het effect op de effluentkwaliteit is ook een aantal algemene aspecten te onderscheiden. Deze kunnen sterk verschillend zijn voor geïntegreerde en nageschakelde membraanfiltratie. Achtereenvolgens komen in dit hoofdstuk aan de orde:

- de noodzaak van voorfiltratie;
- RWA/DWA-verhouding;
- bedrijfsvoeringsaspecten.

In de navolgende paragrafen wordt uitgebreid op deze aspecten ingegaan, waarbij voor vrijwel elk aspect onderscheid gemaakt wordt voor nageschakelde membraanfiltratie en geïntegreerde membraanfiltratie als een compact systeem of een hyper laagbelast systeem.

5.2 Effect op het biologisch zuiveringsproces

5.2.1 Inleiding

De toepassing van membraanfiltratie als nageschakelde techniek heeft vrijwel geen invloed op het biologische zuiveringsproces. Het afvalwater wordt in een normale conventionele zuivering behandeld en het effluent passeert de membraanunit. Bij nageschakelde membraanfiltratie komt een brijn vrij als reststof. Dit brijn kan als afvalstof worden afgevoerd of geretourneerd naar de rwzi. Indien alleen DWA wordt behandeld heeft het retourneren van de brijn (concentraatstroom) nauwelijks tot geen effect op de hydraulische belasting van de nabezinktanks. Indien ook RWA wordt behandeld kan tijdelijke overbelasting van de nabezinktanks plaatsvinden. Het toepassen van membraanfiltratie als geïntegreerde techniek heeft wel een grote invloed op het biologisch zuiveringsproces. In tabel 6 wordt een overzicht gegeven van het effect van de verschillende systemen op het biologische zuiveringsproces.

Tabel 6: Effect van verschillende systemen op het biologisch zuiveringsproces

| | nageschakelde membraanfiltratie | geïntegreerde membraanfiltratie hyper laagbelast | geïntegreerde membraanfiltratie compact systeem |
|-------------------------------|------------------------------------|--|---|
| verhoging slibgehalte | o | x | x |
| slibgroei | o | x | o/x |
| procesparameters | o | o/x | x |
| nitrificatie / denitrificatie | o | x | o/x |
| slibbehandeling | o | x | x |
| processtabiliteit | o/x | x | x |

- x duidelijk effect
- o/x enig effect
- o geen effect

Uit de voorgaande tabel blijkt dat met name de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie van invloed is op de verschillende biologische aspecten. Navolgend wordt hier uitgebreid op ingegaan. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de toepassing als een hyper laagbelast systeem en een compact systeem.

5.2.2 Verhoging van het slibgehalte

Door het geïntegreerd toepassen van micro- of ultrafiltratie wordt de biomassa volledig teruggehouden in de biologische zuivering en kunnen hogere biomassaconcentraties worden gehandhaafd. Het drogestofgehalte is echter aan een maximum gebonden. Het drogestofgehalte in een biologische zuivering bepaalt de viscositeit van het slib/watermedium, die weer invloed heeft op de membraanflux.

Uit een onderzoek met cross-flow membraanfiltratie is aangetoond dat bij een toename van het drogestofgehalte van 5 kg d.s./m³ tot 33 kg d.s./m³ de viscositeit lineair een factor 15 toeneemt. De membraanflux daalt door deze toename geleidelijk, maar kan op een niveau > 100 l/m² · h gehandhaafd worden. Bij een verdere verhoging van het drogestofgehalte (tot 44 kg d.s./m³) neemt de viscositeit schijnbaar exponentieel toe en daalt de membraanflux snel tot < 70 l/m² · h [8].

De hiervoor genoemde experimenten zijn tot nu toe uitsluitend uitgevoerd met cross-flow membraanfiltratie. Voor toepassing van semi-cross-flow, capillair- en platensysteem zal het maximale drogestofgehalte waarschijnlijk lager liggen, omdat de viscositeit, vanwege de lagere energie-inbreng, een groter effect zal hebben op de membraanflux. Door leveranciers worden bereiken van 15 - 25 kg d.s./m³ opgegeven als maximaal drogestofgehalte [6, 13].

5.2.3 Verandering van de slibstructuur

Het actiefslib in een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie zal, in tegenstelling tot het actief slib in een conventionele zuivering met nabezinktank, vermoedelijk een andere structuur hebben. Er vindt zonder meer geen selectie meer plaats door bezinking. Op dit moment is op dit gebied nog nauwelijks onderzoek verricht. In een systeem met membraanfiltratie kunnen zich mogelijk bacteriën handhaven voor de afbraak van specifieke organismen die door de membranen worden teruggehouden in het systeem. Daarnaast schijnt dat protozoën zich moeilijk kunnen handhaven in een systeem met membraanfiltratie vanwege de hoge afschuifkrachten langs het membraanoppervlak. In full-scale installaties met capillaire membranen is echter aangetoond dat zich ook protozoën in een membraanbioreactor kunnen handhaven [17].

5.2.4 De slibgroei

Voor heterotrofe micro-organismen is organisch substraat zowel een koolstofbron als een energiebron [44]. Dit betekent dat het substraat zowel wordt gebruikt voor de groei (slibproductie) als voor onderhoud (maintenance).

Verschuivende procesparameters zijn van invloed op het energieverbruik voor maintenance. Ondanks het feit dat nog relatief weinig bekend is uit fundamenteel onderzoek over dit onderwerp kan worden aangegeven dat de slibbelasting en de temperatuur de belangrijkste factoren zijn waardoor de slibgroei wordt beïnvloed. Bij een lage slibbelasting wordt relatief meer energie voor maintenance gebruikt, waardoor de hoeveelheid substraatenergie die beschikbaar is voor slibgroei afneemt. Uit onderzoek is gebleken dat bij toenemende temperatuur het energieverbruik voor maintenance sterk toeneemt, waaruit geconcludeerd kan worden dat bij toenemende

temperatuur de netto slibproductie daalt [19]. Een nadere toelichting op de relatie tussen het (substraat)energieverbruik en de slibgroei is opgenomen in bijlage I.

Bij een hyper laagbelast systeem met geïntegreerde membraanfiltratie wordt een *lage slibbelasting toegepast voor het reduceren van de netto slibproductie*. Door de lage volumetrische belasting zal de bijdrage van een hogere temperatuur gering zijn (zie paragraaf 5.2.5).

Voor een compacte membraanbioreactor is de slibbelasting vrijwel vergelijkbaar met een conventionele zuivering. Hierbij draagt dan alleen het temperatuureffect bij in een lagere slibproductie.

Gedurende een proefonderzoek van 230 dagen met voorbezonken huishoudelijk afvalwater is bij een BZV-belasting van ongeveer 0,05 kg BZV/kg d.s. d een slibproductie gemeten van ongeveer 0,012 kg d.s./kg CZV_{verw}. Het gloeiverlies bleef hierbij constant op ongeveer 70% [8]. Eikelboom heeft voor de behandeling van voorbezonken huishoudelijk afvalwater gedurende een periode van ongeveer 1 jaar zelfs netto geen slibproductie gevonden [4]. Voor beide proefonderzoeken was de verlaging van de slibproductie een belangrijk punt van aandacht. De installaties werden derhalve zeer laagbelast. In beide gevallen werd gebruik gemaakt van voorbezonken afvalwater.

5.2.5 Procesparameters (T, pH, O₂)

Met name de verhoogde biomassaconcentratie is van invloed op de procesparameters temperatuur, zuurgraad en zuurstofgehalte.

Temperatuur

Uitgaande van een vergelijkbare slibbelasting en verwijderingsrendement, neemt de biologische warmteproductie per volume-eenheid toe bij een toename van de biomassaconcentratie. In bijlage I wordt op basis van een standaard zuivering berekend dat door verhoging van het drogestofgehalte van 4 kg d.s./m³ tot 20 kg d.s./m³ en een *gelijkblijvende slibbelasting van 0,2 kg BZV/kg d.s. . d. de temperatuur zal toenemen met 5-10 °C*. Deze temperatuurverhoging wordt veroorzaakt door biologische warmteproductie (CZV- en NKj-oxydatie). Naast de extra biologische warmte wordt ook extra energie ingebracht door de circulatie over het membraanfilter. Dit leidt eveneens tot een temperatuurtoename. Naarmate de membranen energetisch gunstiger kunnen worden bedreven neemt dit effect echter af. Een indicatie van de temperatuurtoename door de membraanfiltratie is moeilijk te geven omdat het specifieke energieverbruik van veel variabelen afhankelijk is.

In een hyper laagbelast systeem wordt een hoog drogestofgehalte gehandhaafd, maar wordt een lage slibbelasting toegepast. In vergelijking met een conventionele zuivering neemt de biologische warmteproductie enigszins toe door met name verdergaande oxydatie van CZV (lagere slibproductie).

Het temperatuureffect geldt vooral voor een hoogbelast compact systeem vanwege de combinatie van het hoge drogestofgehalte en een hoge slibbelasting (gelijk aan of hoger dan bij een conventionele zuivering). De hogere temperatuur die met een *membraanbioreactor kan worden gehandhaafd*, heeft met name een positieve invloed op de stikstofverwijdering en de slibproductie.

pH

Het toepassen van membraanfiltratie heeft geen directe invloed op de pH van de biologische zuivering. Hooguit aan het membraanoppervlak kan de pH variëren door concentratiepolarisatie. Vanwege de zeer korte verblijftijd van de actieve

biomassa aan het membraanoppervlak heeft dit geen invloed op het biologische zuiveringsproces.

Voor een hoogbelaste membraanbioreactor kan de verhoging van de biomassaconcentratie indirect wel van invloed zijn op de pH, indien de zuurstofoverdracht door de biomassaconcentratie wordt beïnvloed [2, 37].

Zuurstofoverdracht

De zuurstofoverdracht in een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie wordt beïnvloed door een groot aantal factoren. De voornaamste invloed is afkomstig van de biomassa, die in vergelijking met conventionele zuiveringsinstallaties aanzienlijk hoger is. Afhankelijk van de slibbelasting kan ook de zuurstofvraag per volume-eenheid aanzienlijk hoger zijn dan in een conventionele zuivering. In bijlage I worden enkele voorbeeldberekeningen uitgevoerd voor de zuurstofvraag bij verschillende slibbelastingen.

Voor een hyper laagbelast systeem met geïntegreerde membraanfiltratie blijkt dat de zuurstofvraag toeneemt (factor 1,8) in vergelijking met een conventioneel systeem bij gelijke volumetrische belasting. Dit wordt veroorzaakt doordat er netto minder slib aangroeit. Voor een hoogbelast compact systeem neemt de zuurstofvraag per volume-eenheid toe met een factor 7,5 door de hoge volumetrische belasting (hoger drogestofgehalte en gelijkblijvende slibbelasting). In een hoogbelast compact systeem of in systemen met oppervlaktebeluchting zullen de grenzen van het beluchtingssysteem al snel beperkend zijn voor de maximale zuiveringscapaciteit. Vanuit dit oogpunt is het handhaven van extreem hoge drogestofgehalten bij die omstandigheden ($> 30 \text{ kg / m}^3$) dan ook niet zinvol.

De invloed van de verhoogde viscositeit op de zuurstofoverdracht is moeilijk te kwantificeren. Door toename van de viscositeit neigen de luchtballen eerder tot coalescentie (samenklonteren). Dit legt een beperking op aan de maximale biomassaconcentratie. Op dit gebied is nog weinig onderzoek gedaan. Gezien enkele praktijkervaringen, waarbij zuurstofuitputtingen $> 60\%$ werden bereikt (onder overdruk bedreven bioreactoren), is de invloed van biomassaconcentratie tot 30 à 40 kg/m^3 gering [44].

5.2.6 Nitrificatie en denitrificatie

De mate van nitrificatie en denitrificatie is onder meer afhankelijk van:

- de ammonium-, nitriet-, en nitraatconcentraties;
- de zuurstofconcentratie;
- de pH;
- de temperatuur.

Daarnaast is het nitrificatieproces nog sterk afhankelijk van de slibleeftijd. Bij temperaturen lager dan $15 \text{ }^\circ\text{C}$ zijn vaak totale slibleeftijden noodzakelijk van meer dan 12 dagen. Bij toenemende temperatuur neemt de minimaal noodzakelijke slibleeftijd af, omdat de nitrificerende bacteriën dan sneller groeien.

In een zuivering met geïntegreerde membraanfiltratie vormt de slibleeftijd geen beperking voor het nitrificatieproces. In een hyper laagbelast systeem wordt een lagere slibproductie gehandhaafd waarmee een langere slibleeftijd wordt verkregen. In een hoogbelast compact systeem wordt, in vergelijking met een conventionele zuivering, een iets hogere temperatuur gehandhaafd, waardoor minder lange slibleeftijden nodig zijn.

De temperatuur heeft een positieve bijdrage op het nitrificatieproces. Het temperatuuroptimum voor mesofiele nitrificatie ligt bij ongeveer 38 °C. Tot ongeveer 38 °C neemt de activiteit van nitrificerende bacteriën toe. In een proefonderzoek naar de behandeling van stikstofrijke retourstromen op rwzi's met een membraanbioreactor zijn nitrificatiesnelheden gemeten van 0,3 - 0,6 kg N/kg d.s. . d. [37] bij een temperatuur van gemiddeld 35 °C. Voor de behandeling van huishoudelijk afvalwater is echter niet de nitrificatiesnelheid maar de slibleef tijd doorslaggevend.

Voor het denitrificatieproces geldt voor de relatie tussen de activiteit en de temperatuur dat er eveneens een temperatuuroptimum is bij ongeveer 38-40 °C. Uit onderzoek is gebleken dat in systemen met geïntegreerde membraanfiltratie, uitgevoerd als een hoogbelast compact systeem, de benodigde BZV / N-verhouding voor denitrificatie toeneemt [3]. Dit is waarschijnlijk toe te schrijven aan een zeer korte hydraulische verblijftijd in de denitrificatiereactor. Een deel van het BZV wordt intracellulair opgenomen en verademd in de beluchtingstank.

5.2.7 P-verwijdering

In de "Handleiding biologische fosfaatverwijdering" [35] wordt een aantal voorwaarden gegeven voor biologische fosfaatverwijdering. Hiertoe behoren onder meer:

- het creëren van een anaërobe verblijftijd;
- het bevorderen van een bepaalde CZV / N / P-verhouding;
- het produceren van voldoende slib.

Voor de meeste voorwaarden geldt dat deze niet afhankelijk zijn van het zuiveringssysteem en zowel in een conventionele zuivering met nabezinktank als in systemen met geïntegreerde membraanfiltratie geïntroduceerd kunnen worden.

Voor wat betreft slibproductie geldt dit niet voor een hyper laagbelast systeem met geïntegreerde membraanfiltratie. Uitgaande van 3 % P-opname in het slib is met dit systeem, door de lagere slibproductie, minder biologische P-verwijdering haalbaar dan in een conventionele zuivering. Voor vergaande P-verwijdering zijn derhalve extra maatregelen noodzakelijk. In bijlage I wordt een vergelijking gemaakt tussen de P-verwijdering in een conventionele zuivering en in een hyper laagbelaste membraanbioreactor. In een hoogbelast compact systeem vormt de slibproductie vrijwel geen beperking voor de P-verwijdering.

5.2.8 Slibbehandeling

Over behandeling van het slib uit een membraanbioreactor is nog weinig bekend. Dit vindt met name zijn oorzaak in de geringe slibproductie. Gezien het hoge drogestofgehalte is slibindikking niet meer noodzakelijk. De verwachting is echter dat verdere ontwaterbaarheid van het slib minder goed is in vergelijking met slib uit een conventionele zuivering. Dit wordt dan veroorzaakt doordat het slib uit een membraanbioreactor vrijwel geen vlokstructuur kent ten gevolge van de zogenaamde afschuifkrachten langs het membraanoppervlak.

5.2.9 Processtabiliteit

In systemen met nabezinking kunnen factoren als licht-slib of een procesverstoring (bijvoorbeeld de lozing van toxische verbindingen, pH-shock of sterke fluctuaties in belasting) het functioneren van de zuivering negatief beïnvloeden. Hierbij geldt dat

naast remming van de biologische activiteit van de micro-organismen vaak de uitspoeling van slib problemen veroorzaakt. Na het optreden van aanzienlijke slibuitspoeling of verstoring van het zuiveringsproces zal het zuiveringsrendement tijdelijk lager zijn. De capaciteit van de heterotrofe micro-organismen zal binnen enkele dagen hersteld zijn. Omdat de autotrofe nitrificeerders slechts langzaam aangroeien zal het enkele weken tot maanden kunnen duren voordat de nitrificatiecapaciteit hersteld is.

Indien nageschakelde membraanfiltratie wordt toegepast kan slibuitspoeling tot verstopping van de membranen leiden. Nageschakelde membraanfiltratie wordt gedimensioneerd voor een lage concentratie aan zwevend stof in het effluent. In geval van slibuitspoeling neemt de vracht aan zwevend stof in korte tijd sterk toe, en zal het membraanfiltratieproces direct ernstig worden verstoord.

Door toepassing van membraanfiltratie in plaats van een nabezinktank kan uitspoeling van micro-organismen niet meer optreden. De activiteit van het actief slib zal ten gevolge van een procesverstoring slechts tijdelijk afnemen door remming. Omdat geen slibuitspoeling optreedt zal tijdens een procesverstoring veel meer biologische activiteit in het systeem gehandhaafd blijven, waardoor het proces stabiel te bedrijven is. Dit geldt met name voor het nitrificatieproces en het handhaven van specifieke micro-organismen voor het omzetten van bepaalde specifieke vervuulende componenten. Daarnaast heeft de hoge biomassaconcentratie een betere opvangcapaciteit voor procesverstoring.

Door toepassing van membranen (geïntegreerd of nageschakeld) kunnen specifieke opgeloste componenten worden tegengehouden. Indien deze componenten een toxisch karakter hebben kan dit binnen een bepaalde tijd tot vergiftiging van de biomassa leiden. Componenten die het membraan niet passeren en niet biologisch worden afgebroken kunnen het systeem alleen verlaten met het spuislib. Voor toepassing van membraanfiltratie in een rwzi dient het effect van eventueel aanwezige toxische componenten op de biologische activiteit te worden onderzocht. In een hoogbelast compact systeem wordt een kortere hydraulische verblijftijd gehandhaafd (hoge volumetrische belasting). Dit kan in geval van toxische verbindingen in het influent sneller tot verstoring van het zuiveringsproces leiden.

5.3 Effect op de effluentkwaliteit

5.3.1 Inleiding

Membraanfiltratie (micro- en ultrafiltratie) kan worden toegepast voor het polissen van het effluent van rwzi's. Hierbij moet worden gedacht aan het afscheiden van algen, bacteriën, virussen en protozoën. In de Verenigde Staten en Groot-Brittannië zijn full-scale toepassingen bekend met nageschakelde membraanfiltratie, vaak in plaats van UV-desinfectie of chlorering. Ook in Nederland en Duitsland zijn op pilot-schaal experimenten uitgevoerd [14,30].

Bij de geïntegreerde toepassing van membraanfiltratie is het effect op de effluentkwaliteit vergelijkbaar met nageschakelde membraanfiltratie, voor zover hetzelfde type membraanfilter wordt toegepast. Een verschil dat kan optreden is de mate van gellaagvorming door het verschil in drogestofgehalte. Een hogere mate van gellaagvorming leidt, naast een slechte membraanflux, tot een betere effluentkwaliteit omdat de gellaag ook als een soort membraanfilter werkt.

In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan de effluentkwaliteit en de mogelijkheden voor hergebruik. Omdat het effect van geïntegreerde en nage-

schakelde membraanfiltratie op de effluentkwaliteit vergelijkbaar is, wordt tussen deze twee technieken geen specifiek onderscheid gemaakt.

5.3.2 De effluentkwaliteit

Een direct effect van de toepassing van membraanfiltratie is het afscheiden van specifieke stoffen. De volgende stoffen worden afgescheiden:

- **Zwevende stof**
Door de toepassing van membraanfiltratie is het effluent gegarandeerd vrij van zwevend stof. Hierdoor zijn eventuele aanvullende technieken (UV-desinfectie, elektrolyse, omgekeerde osmose) goed toe te passen. Voor hergebruik van effluent is het veelal noodzakelijk dat dit vrij van zwevend stof is.
- **Hoogmoleculaire verbindingen**
Bij het toepassen van membraanfiltratie kunnen hoogmoleculaire stoffen door het membraan worden tegengehouden. Hierdoor krijgen deze stoffen een grotere verblijftijd, waardoor verdergaande afbraak mogelijk is. Zo kunnen bijvoorbeeld PAK's worden afgescheiden en vergaand worden afgebroken.
Door dit effect is de effluentkwaliteit bij membraanbioreactoren over het algemeen beter dan bij conventionele zuiveringen. CZV- en Nkj-waarden liggen gemiddeld 10 -30 % lager [3, 43].
- **Bacteriën en virussen**
Het afscheidingsrendement voor algen, pathogene bacteriën, virussen en protozoën is afhankelijk van de verhouding tussen de grootte van de verschillende micro-organismen en van de poriediameter van het membraan.

Indirect is de toepassing van membraanfiltratie van invloed op de N- en P-verwijdering zoals aangegeven in de paragrafen 5.2.6 en 5.2.7.

In bijlage II is, op basis van praktijkervaringen, een overzicht opgenomen van de microbiologische effluentkwaliteit na membraanfiltratie.

Uit het overzicht in bijlage II blijkt dat algen, protozoën en een groot deel van de bacteriën met microfiltratie kunnen worden afgescheiden. Voor het verwijderen van kleinere bacteriën en virussen dient minstens ultrafiltratie te worden toegepast. In proefonderzoek is aangetoond dat in een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie ook met microfiltratie kleinere bacteriën en virussen kunnen worden afgescheiden. Als redenen hiervoor is aangegeven dat de gevormde gellaag ook als een soort filter functioneert [30].

Per definitie kan worden gesteld dat door de toepassing van membraanfiltratie een verbetering van de effluentkwaliteit kan worden verkregen. De kwaliteit wordt in hoofdzaak bepaald door het type membraan dat wordt toegepast. De effluentkwaliteit bij toepassing van membraanfiltratie als geïntegreerde techniek is mogelijk iets beter (door gellaagvorming) dan bij membraanfiltratie als nageschakelde techniek. De eisen welke worden gesteld aan het effluent bepalen het type membraanfilter dat moet worden toegepast.

5.3.3 Mogelijkheden voor het toepassen van aanvullende technieken

De mogelijkheden voor hergebruik van gezuiverd communaal afvalwater zijn afhankelijk van de technische mogelijkheden, de specifieke eisen die aan de waterkwaliteit worden gesteld en deels ook van de maatschappelijke acceptatie. In sommige gevallen kan het noodzakelijk zijn om het effluent van een

zuiveringsinstallatie met membraanfiltratie nog te behandelen met een aanvullende techniek.

Voor het vergaand verbeteren van de effluentkwaliteit bij waterzuiveringsinstallaties (verwijdering van zouten en bijvoorbeeld humuszuren) dient gebruik te worden gemaakt van technieken als bijvoorbeeld nanofiltratie, omgekeerde osmose, elektrolyse en oxydatietechnieken. Bij het toepassen van dergelijke technieken is de kwaliteit van het effluent van de waterzuivering (influent van de aanvullende techniek) van belang. Het gaat dan met name om de aanwezigheid van zwevend stof en organische verbindingen. Het zwevend stof kan bij nanofiltratie en omgekeerde osmose zorgen voor verstopping, bij elektrolyse treden vaak problemen op met aangroeiing van micro-organismen. De aanwezigheid van organische stoffen in het effluent zorgt bij de diverse oxydatietechnieken (chemisch, UV) voor extra energieverbruik.

Door toepassing van membraanfiltratie is het effluent vrij van zwevende stof en vrijwel vrij van organische componenten en kunnen aanvullende technieken relatief eenvoudig en vaak economisch gunstiger (investering en bedrijfsvoering) worden toegepast.

5.4 Overige aspecten

5.4.1 Inleiding

Naast het effect van membraanfiltratie op het biologisch zuiveringsproces en de effluentkwaliteit is ook een aantal andere aspecten van belang, zoals de noodzaak van voorfiltratie, RWA/DWA-verhouding en bedrijfsvoeringsaspecten. De overige aspecten die in deze paragraaf worden behandeld zijn van belang voor de wijze van toepassing van membraanfiltratie (geïntegreerd of nageschakeld). Hierbij wordt dan ook onderscheid gemaakt tussen geïntegreerde en nageschakelde membraanfiltratie.

5.4.2 Noodzaak van voorfiltratie

Het membraanoppervlak is zeer gevoelig voor fysieke beschadiging. Het is van belang zoveel mogelijk te voorkomen dat zand in de membranen terechtkomt, omdat dit de membranen kan beschadigen. Voorschakeling van een zandvang of een voorbezinktank is aan te bevelen bij de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie. Voor nageschakelde membraanfiltratie dient de nabezinktank als zandvang. Daarnaast kan verstopping van de membranenbuisjes plaatsvinden door vaste delen die in het te behandelen water aanwezig kunnen zijn (bijvoorbeeld takjes, bladeren). Dit geldt met name voor de typen van membraanfiltratie, waarbij de slib/water-scheiding van binnen naar buiten plaatsvindt. De diameter van de buisjes die worden toegepast varieert tussen 3 - 25 mm. Voorfiltratie van de toevoerstream naar de membraanunit is derhalve van groot belang.

Voor toepassing van nageschakelde membraanfiltratie dient de nabezinktank al als een belangrijke scheidingsstap. De toevoer naar de membraanunit is al relatief schoon. Om te voorkomen dat bladeren en takjes in de membraanunit terecht komen is een groffilter van 1-2 mm afdoende.

Indien membraanfiltratie als geïntegreerde technologie toegepast wordt, zal vaak naast voornoemde filtratiestap nog een tweede filtratie plaats moeten vinden. Bij systemen die zich in de buitenlucht bevinden, en waarin bladeren, takjes en dergelijke in de beluchtingsruimte terecht kunnen komen, moet in de toevoerleiding naar de membranen een extra filtratiestap ingebouwd worden. Dit geldt alleen voor

buisvormige membranen zoals toegepast bij het cross-flow systeem en het semi cross-flow systeem.

5.4.3 Effect van de RWA/DWA-verhouding

Het afvalwaterdebiet bepaalt de benodigde filtratiecapaciteit en dus het benodigde aantal m² membraanoppervlak voor de membraanfiltratiestap. Bij het toepassen van membraansystemen bij rwzi's moet rekening gehouden worden met aanzienlijke variaties in debiet ten gevolge van neerslag. Als kentel wordt hiervoor de verhouding RWA/DWA gebruikt. De verhouding RWA/DWA is niet voor alle rioolwaterzuiveringen gelijk maar wordt met name bepaald door het type riolering (gescheiden of gemengde rioolstelsels), het percentage van het ontvangende oppervlak dat verhard is en de overstortfrequenties. In Nederland varieert de verhouding RWA/DWA tussen 1,5 - 6 [12].

Bij conventionele zuiveringsinstallaties met nabezinking wordt de nabezinktank gedimensioneerd op het RWA-debiet. Indien een membraanunit wordt gedimensioneerd op basis van het RWA-debiet heeft deze unit een groot gedeelte van de tijd (tijdens DWA) een overcapaciteit. Ontwerpen op basis van een DWA-debiet betekent dat tijdens RWA het afvalwaterdebiet niet volledig kan worden verwerkt.

5.4.4 Bedrijfsvoeringsaspecten

Op het gebied van de bedrijfsvoering kunnen enkele aspecten onderscheiden worden:

- bediening;
- onderhoud;
- chemicaliënverbruik.

Bediening van zuiveringsinstallaties met membraanfiltratie vereist een hoeveelheid kennis op het gebied van filtratietechnieken. Dit geldt met name op het gebied van het functioneren van membranen, vervuiling van membranen en de benodigde reinigingstechnieken van de membranen. Gezien de huidige toepassingsgebieden van membraanfiltratie wijkt het noodzakelijke kennisniveau voor membraanfiltratie niet af van bijvoorbeeld standaard slibverwerkingstechnieken. Membraanunits zijn volledig geautomatiseerd. De reinigingsprocedures worden automatisch uitgevoerd op basis van vooraf ingestelde tijdsintervallen. Voor de operationele aspecten dient extra aandacht te worden besteed aan het regelmatig meten van de membraanflux en de transmembraandruk. Indien deze waarden afwijken van normale waarden dient het reinigingsprogramma te worden aangepast. Zodra het aanpassen van het reinigingsprogramma onvoldoende effect heeft, dienen de membranen te worden vervangen.

Bij de bedrijfsvoering dient voornamelijk rekening te worden gehouden met de volgende aspecten:

- onderhoud;
- reiniging van de membranen;
- membraanvervanging.

Het toepassen van membraanfiltratie vergt voornamelijk onderhoud aan pompen, het besturingssysteem en de membranen. Indien membraanfiltratie als nageschakelde techniek wordt toegepast wordt dit extra onderhoud toegevoegd aan het reguliere onderhoud aan de rwzi. Bij toepassing van geïntegreerde membraan-

filtratie vervalt het onderhoud aan de nabezinktanks. Het onderhoud aan een membraanunit is echter omvangrijker dan aan bezinktanks, waardoor in dit geval het totale onderhoud aan de rwzi zal toenemen.

Daarnaast geldt dat de membraanunit gevoelig is voor verstopping door bijvoorbeeld takken en bladeren. De voorfiltratiestap zal dan ook zorgvuldig onderhouden moeten worden.

Voor reiniging van de membranen worden vaak chemicaliën gebruikt. De noodzaak van chemicaliën en de verbruikshoeveelheid hangen van vele factoren af, zoals het afvalwater en het membraantype. Omdat op rwzi's niet altijd met chemicaliën wordt gewerkt vraagt dit extra kennis, veiligheid en werkzaamheden van de operators.

Na verloop van tijd zullen membranen zodanig vervuilen dat ze vervangen moeten worden. De frequentie waarmee membranen vervangen moeten worden hangt af van het type afvalwater en het type membraanfilter. Een indicatie van de frequentie van de membraanvervanging is gegeven in paragraaf 4.3.

6 Technische consequenties en kosten

6.1 Inleiding

Om de kosten en consequenties van de toepassing van membraanfiltratie op rwzi's te kunnen beoordelen wordt een aantal zuiveringsconcepten vastgesteld. Deze concepten worden gebaseerd op verschillende redenen voor het toepassen van membraanfiltratie op rwzi's, het voorkomen van de verschillende typen rwzi's en ervaringen.

Vervolgens worden in dit hoofdstuk deze zuiveringsconcepten uitgewerkt en de kosten voor de zuiveringsconcepten vastgesteld. Hierbij worden twee situaties uitgewerkt:

- realisatie van een nieuwe zuiveringsinrichting;
- uitbreiding van een bestaande zuiveringsinrichting.

Voor de realisatie van een nieuwe zuiveringsinrichting worden de kosten voor de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie en nageschakelde membraanfiltratie vergeleken met de kosten van een nieuwe conventionele zuiveringsinrichting. Hierbij wordt voor de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie alleen de compacte membraanbioreactor meegenomen, omdat een conventionele zuiveringsinrichting niet als een hyper laagbelast systeem kan worden uitgevoerd. De dimensionering en de berekening van de kosten worden voor alle varianten uitgevoerd volgende de hierna genoemde uitgangspunten. De kosten worden uitgedrukt in gulden per vervuilingseenheid (v.e. - berekend als 136 grom O₂).

Voor de uitbreiding van een bestaande zuiveringsinrichting worden de kosten vergeleken met een alternatief. Dit alternatief betreft de aanpassingen die uitgevoerd zouden moeten worden om op een andere wijze eveneens aan de doelstellingen van de uitbreiding te voldoen. De kosten voor de uitbreiding met membraanfiltratie worden dan vergeleken met de kosten die gemaakt moeten worden om de zuiveringsinrichting op een conventionele wijze aan te passen. Dit betreft een eventuele uitbreiding van de installatie en het aanleggen van een persleiding.

De extra kosten voor geïntegreerde membraanfiltratie en nageschakelde membraanfiltratie zijn onderling niet te vergelijken omdat het hier om twee verschillende concepten gaat.

6.2 Selectie van de zuiveringsconcepten

6.2.1 Inleiding

Bij een nieuw te bouwen zuiveringsinrichting kan membraanfiltratie in principe optimaal worden geïmplementeerd. Daarnaast kan membraanfiltratie op bestaande rwzi's toegepast worden. Die typen zuiveringen zullen beschouwd worden die het meest voorkomen. Hiervoor is een selectie gemaakt op basis van gegevens van het Centraal Bureau voor Statistiek (CBS) [49]. Het aantal verschillende typen biologische zuiveringssystemen in Nederland is aangegeven in tabel 7. Uit deze tabel blijkt dat aëratietanks, oxydatiesloten en carrousels de meest voorkomende zuiveringssystemen zijn. Daarnaast blijkt dat oxydatiesloten veel voorkomen met capaciteiten van 5.000 tot 20.000 v.e. Carrousels worden veel toegepast voor capaciteiten variërend van 20.000 tot 100.000 v.e., terwijl aëratietanks worden toegepast voor grotere capaciteiten.

Tabel 7: Overzicht van zuiveringssystemen in Nederland

| zuiveringssysteem | aantal | totale capaciteit [v.e.] |
|----------------------------|--------|-----------------------------|
| oxydatiebedden | 27 | 1.143.000 |
| aëratietanks/oxydatietanks | 120 | 11.584.000 |
| oxydatiesloten (continu) | 102 | 1.018.000 |
| carrousel | 113 | 6.222.000 |
| discontinue systemen | 12 | 12.000 |
| parallele inrichtingen | 10 | 618.000 |
| tweetrapsinrichtingen | 35 | 3.777.000 |
| compactinrichtingen | 1 | 8.000 |

6.2.2 Zuiveringsconcepten

Op basis van de verdeling van voorkomen, zoals gepresenteerd in tabel 6, zijn de volgende zuiveringen geselecteerd:

| | |
|-------------------|--------------|
| 1 - oxydatiesloot | 10.000 v.e. |
| 2 - carrousel | 50.000 v.e. |
| 3 - aëratietank | 150.000 v.e. |

Voor deze geselecteerde zuiveringssystemen wordt voor elke toepassingsmogelijkheid van membraanfiltratie een aantal concepten opgesteld. Voor elk zuiveringssysteem worden situaties met een nageschakelde en geïntegreerde membraanfiltratie beschouwd. Bij de geïntegreerde membraanfiltratie wordt tevens een onderscheid gemaakt in een hyper laagbelast systeem en een compact systeem. Bij de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie wordt ervan uitgegaan dat het slibgehalte met een factor 5 zal toenemen (van 4 kg/m³ naar 20 kg/m³). Voor de varianten waarbij geïntegreerde membraanfiltratie als een hyper laagbelast zuiveringssysteem wordt toegepast, zal de slibbelasting met ongeveer een factor 5 dalen tot 0,01 kg BZV/kg d.s.d. Voor de variant waarbij geïntegreerde membraanfiltratie als compact zuiveringssysteem wordt toegepast, is gekozen om zowel de slibbelasting te verlagen als de capaciteit van de zuivering te verhogen. Een capaciteitsverhoging met een factor 2 lijkt realistisch. Omdat het slibgehalte met een factor 5 stijgt zal de slibbelasting dan met een factor 2,5 dalen tot 0,02 kg BZV/kg d.s.d.

Voor de capaciteitsvergroting van de zuiveringsinrichtingen wordt gekozen voor een situatie waarbij twee verzorgingsgebieden worden samengevoegd. Hiervoor is een verdubbeling van de zuiveringscapaciteit noodzakelijk. Bij de zuiveringsinrichting van 150.000 v.e. echter wordt de capaciteit slechts met een factor 1,2 verhoogd, omdat verondersteld wordt dat bij een zuivering van een dergelijke capaciteit dit de meest voor de hand liggende optie is. Deze keuze is vooral het gevolg van de onaantrekkelijkheid van het samenvoegen van verzorgingsgebieden van deze omvang (hoge transportkosten) in het geval van centralisatie. Een toename van 20 % is vooral het gevolg van autonome uitbreiding binnen het eigen verzorgings-gebied. Doordat het drogestofgehalte met een factor 5 stijgt, zal de slibbelasting hier met ongeveer een factor 4 dalen.

Voornoemde overwegingen resulteren in de volgende varianten:

1 - Membraanfiltratie als nageschakelde techniek

- a oxydatiesloot 10.000 v.e.;
- b carrousel 50.000 v.e.;
- c aëratietank 150.000 v.e.

2 - Geïntegreerde membraanfiltratie als compactstelsel

- a oxydatiesloot, met een capaciteitsverhoging van 10.000 v.e. naar 20.000 v.e. in combinatie met een verlaging van de slibbelasting met een factor 2,5 ($S_b = 0,02$ kg BZV/kg d.s.d.);
- b carrousel, met capaciteitsverhoging van 50.000 v.e. naar 100.000 v.e. in combinatie met een verlaging van de slibbelasting met een factor 2,5 ($S_b = 0,02$ kg BZV/kg d.s.d.);
- c aëratietank, met capaciteitsverhoging van 150.000 v.e. naar 180.000 v.e. in combinatie met een verlaging van de slibbelasting met een factor 4 ($S_b = 0,012$ kg BZV/kg d.s.d.).

3 - Geïntegreerde membraanfiltratie met een hyper laagbelaste zuivering

- a oxydatiesloot, 10.000 v.e., met een verlaging van de slibbelasting met een factor 5 ($S_b = 0,01$ kg BZV/kg d.s.d.);
- b carrousel, 50.000 v.e., met een verlaging van de slibbelasting met een factor 5 ($S_b = 0,01$ kg BZV/kg d.s.d.);
- c aëratietank, 150.000 v.e., met een verlaging van de slibbelasting met een factor 5 ($S_b = 0,01$ kg BZV/kg d.s.d.).

6.2.3 Alternatieven

Voor een beoordeling van de technische consequenties en kosten wordt de toepassing van membraanfiltratie in de hiervoor genoemde zuiveringsvarianten vergeleken met een alternatief. De alternatieven voor de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie en geïntegreerde membraanfiltratie zijn verschillend:

- Voor de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie worden de kosten vergeleken met de vermeden kosten voor het aanleggen van een persleiding (verplaatsing van het lozingspunt). Als uitgangspunt voor de hier beschreven situatie geldt dat het effluent van de huidige rwzi, vanwege een onvoldoende kwaliteit, op deze locatie niet mag worden geloosd. De doelstelling van de uitbreiding is derhalve alleen het verbeteren van de effluentkwaliteit, waarbij het verleggen van het lozingspunt als alternatief kan worden beschouwd.
- Voor de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie worden de kosten vergeleken met de vermeden kosten voor een uitbreiding van de zuiveringsinrichting volgens een conventionele methode en het aanleggen van een persleiding. Als uitgangspunt geldt hier dat het zuiveringsproces moet worden geoptimaliseerd en dat het effluent van de huidige rwzi, vanwege de slechte kwaliteit, op deze locatie niet mag worden geloosd. De doelstelling van deze uitbreiding is het optimaliseren van het zuiveringsproces en het verbeteren van de effluentkwaliteit, waarbij een uitbreiding van de zuiveringsinrichting

(maximaal een verdubbeling van het beluchtingsvolume) en/of het verleggen van het lozingspunt als alternatieven worden beschouwd.

Zowel de uitbreidingen als de alternatieven worden in dit hoofdstuk maar voor één specifieke situatie gedefinieerd. Voor het verkrijgen van meer inzicht in de toepassing van membraanfiltratie onder andere condities (variatie in de parameters) wordt in hoofdstuk 7 een gevoeligheidsanalyse van de kosten uitgevoerd voor alle belangrijke parameters.

6.3 Algemene kenmerken van de zuiveringsconcepten

Voor de vergelijking van de alternatieven met de in paragraaf 6.2.2 genoemde concepten worden aan de geselecteerde zuiveringssystemen de volgende algemene kenmerken voor de basisprocesconfiguraties toegekend:

Oxydatiesloot (10.000 v.e.)

- geen zandvang;
- geen voorbezinking;
- borstelbeluchting;
- nitrificatie/denitrificatie aanwezig;
- chemische P-verwijdering;
- nabezinktank;
- externe slibverwerking.

Carrousel (50.000 v.e.)

- zandvang aanwezig;
- geen voorbezinking;
- puntbeluchting;
- nitrificatie/denitrificatie aanwezig;
- chemische P-verwijdering;
- nabezinktank;
- externe slibverwerking.

Aëratietank (150.000 v.e.)

- zandvang aanwezig;
- voorbezinking aanwezig;
- bellenbeluchting;
- nitrificatie/ beperkte denitrificatie aanwezig;
- chemische P-verwijdering;
- nabezinktank;
- externe slibverwerking.

Daarnaast worden voor de zuiverings-concepten de volgende uitgangspunten toegepast:

- Wanneer in de bestaande zuivering reeds een zandvang aanwezig is, wordt voor de geïntegreerde membraanfiltratie geen extra voorbezinktank gerealiseerd.
- Wanneer geïntegreerde membraanfiltratie wordt toegepast om een hyper laag-belast systeem te realiseren, geldt voor het alternatief dat de beluchtingruimte van de zuiveringsinrichting moet worden uitgebreid (maximaal een verdubbeling) om vergelijkbare doelstellingen zoals de verbetering van de nitrificatie te bereiken.

- Eén van de uitgangspunten voor het toepassen van membraanfiltratie is een onvoldoende effluentkwaliteit. Een alternatief hiervoor is het verleggen van het lozingspunt op minder gevoelig oppervlaktewater. Voor de lengte van de persleiding wordt 5.000 meter aangehouden.
- Na membraanfiltratie is de kwaliteit van het effluent zodanig dat dit kan worden hergebruikt. Voor de opbrengsten wordt in deze studie Hfl. 0,75 per m³ aangehouden.

6.4 Uitgangspunten en dimensioneringsgrondslagen

De zuiveringsvarianten zijn uitgewerkt in een spreadsheetmodel. Dit model is zodanig opgezet dat alle variabelen (zoals uitgangspunten, dimensioneringsgrondslagen en eenheidskosten) eenvoudig kunnen worden aangepast aan een specifieke situatie. De handleiding van het spreadsheetmodel is opgenomen in bijlage VI. Voor het opstellen van een beoordeling van de technische consequenties en de kosten worden navolgende uitgangspunten en dimensioneringsgrondslagen aangehouden.

Uitgangspunten voor het afvalwater

| | | |
|--|-----|----------|
| . RWA/DWA | 3 | - |
| . gemiddelde DWA-aanvoer in uren per dag | 12 | h/d |
| . vervuiling per v.e. | | |
| . afvalwater (DWA) | 150 | l/v.e. d |
| . TZV | 136 | g/v.e. d |
| . CZV | 90 | g/v.e. d |
| . CZV/BZV-verhouding | 2,5 | - |
| . NKj | 10 | g/v.e. d |
| . P-totaal | 1,5 | g/v.e. d |

Uitgangspunten voor de membraanfiltratie

Nageschakelde membraanfiltratie

| | | |
|------------------------------|-----|---------------------|
| . flux | 80 | l/m ² .h |
| . energieverbruik | 0,2 | kWh/m ³ |
| . standtijd van de membranen | 4 | jaar |

Geïntegreerde membraanfiltratie

| | | |
|------------------------------|----|---------------------|
| . flux | 40 | l/m ² .h |
| . energieverbruik | 1 | kWh/m ³ |
| . standtijd van de membranen | 4 | jaar |

Dimensioneringsgrondslagen voor de rwzi

| | oxydatiesloot | carrousel | aëratietank |
|--|---------------|-----------|-------------|
| . drogestofgehalte (kg/m ³) | 4 | 4 | 4 |
| . slibbelasting (kg BZV/kg d.s.d) | 0,05 | 0,05 | 0,15 |
| . slibproductie (kg d.s./kg BZV _{verw}) | 1 | 1 | 0,8 |
| . energieverbruik beluchting (kg O ₂ /kWh) | 1,5 | 1,5 | 2 |
| . CZV slib (kg CZV/kg d.s.) | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| . N-opname in slib (%) | 6 | 6 | 6 |
| . P-opname in slib (%) | 2 | 2 | 2 |
| . Me/P-verhouding (simultaan, mol/mol) | 1 | 1 | 1,5 |
| . oppervlaktebel. zandvang (m ³ /m ² .h) | 20 | 20 | 20 |
| . oppervlaktebel. VBT (m ³ /m ² .h) | - | - | 2 |
| . verwijdering CZV en BZV in VBT (%) | - | - | 30 |
| . verwijdering NKj in VBT (%) | - | - | 10 |
| . verwijdering P-tot in VBT (%) | - | - | 25 |

| | oxydatesloot | carrousel | aëratietank |
|--|--------------|-----------|-------------|
| . alfa factor bij 4 kg d.s./m ³ | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| . alfa factor bij 20 kg d.s./m ³ | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| . slibvolume-index (ml/g) | 150 | 150 | 150 |
| . ontwerp NBT volgens STOWA richtlijnen | | | |
| . lengte persleiding bij convent. rwzi (km) | 5 | 5 | 5 |
| . effluentkwaliteit voor een conventionele rwzi | | | |
| . CZV (mg/l) | 50 | 50 | 50 |
| . BZV (mg/l) | 3 | 3 | 3 |
| . N-totaal (mg/l) | 8 | 8 | 14 |
| . NKj (mg/l) | 4 | 4 | 4 |
| . NO ₃ -N (mg/l) | 4 | 4 | 10 |
| . P-totaal (mg/l) | 2 | 2 | 1 |
| . zwevend stof (mg/l) | 10 | 10 | 10 |
| . effluentkwaliteit na nageschakelde membraanfiltratie | | | |
| . CZV (mg/l) | 40 | 40 | 40 |
| . BZV (mg/l) | 2 | 2 | 2 |
| . N-totaal (mg/l) | 7 | 7 | 13 |
| . NKj (mg/l) | 3 | 3 | 3 |
| . NO ₃ -N | 4 | 4 | 10 |
| . P-totaal (mg/l) | 1,7 | 1,7 | 0,7 |
| . zwevend stof (mg/l) | 0 | 0 | 0 |
| . effluentkwaliteit na geïntegreerde membraanfiltratie | | | |
| . CZV (mg/l) | 25 | 25 | 25 |
| . BZV (mg/l) | 1 | 1 | 1 |
| . N-totaal (mg/l) | 5 | 5 | 5 |
| . NKj (mg/l) | 2 | 2 | 2 |
| . NO ₃ -N | 3 | 3 | 3 |
| . P-totaal (mg/l) | 1,7 | 1,7 | 0,7 |
| . zwevend stof (mg/l) | 0 | 0 | 0 |

Uitgangspunten voor de kosten

Investeringskosten

In het spreadsheetmodel zijn de investeringskosten (aanneemsom) uitgedrukt in een prijs per eenheid. Het model is zodanig opgebouwd dat de prijs per eenheid eenvoudig kan worden aangepast aan elke specifieke situatie. Daarnaast wordt van de volgende algemene kosten uitgegaan, als opslagpercentage over de kale aanneemsom:

| | | |
|---------------------|------|---|
| . bijkomende kosten | 10 | % |
| . onvoorzien | 5 | % |
| . advieskosten | 10 | % |
| . B.T.W. | 17,5 | % |

Exploitatiekosten

| | | |
|--|--------|---------------------|
| . rentevoet | 7 | % |
| . afschrijvingstermijn civiel | 30 | jaar |
| . afschrijvingstermijn E/M | 15 | jaar |
| . jaarlijks onderhoud civiel (% van de aanneemsom) | 0,5 | % |
| . jaarlijks onderhoud E/M (% van de aanneemsom) | 3 | % |
| . energie | 0,15 | Hfl./kWh |
| . chemicaliënkosten | | |
| ijzersulfaat (18% Fe) | 110 | Hfl./ton |
| reiniging voor nageschakelde membranen | 0,04 | Hfl./m ³ |
| . personeelskosten | 80.000 | Hfl./manjaar |

| | | |
|--|-------|---------------------|
| . slibverwerkingskosten | 1.250 | Hfl./ton d.s. |
| . lozingsheffing (rijksheffing, incl. korting) | 37,50 | Hfl./v.e. |
| . opbrengsten effluenthergebruik | 0,75 | Hfl./m ³ |
| . beluchtingsenergie als percentage van het totaal | 80 | % |

In de kostenberekeningen wordt ervan uitgegaan dat alleen het DWA-debiet wordt hergebruikt. De uitgangspunten voor de investeringskosten voor de verschillende onderdelen van de zuiveringsinrichting zijn opgenomen in de spreadsheetmodellen in bijlage IV en V [42].

6.5 Uitwerking van de kosten voor nieuwbouw

In tabel 8 is de dimensionering van de verschillende zuiveringsinrichtingen uitgewerkt. Voor de drie verschillende capaciteiten zijn een conventionele zuiveringsinrichting, een rwzi met geïntegreerde membraanfiltratie als compact systeem en een rwzi met nageschakelde membraanfiltratie uitgewerkt. In deze tabel zijn tevens de investeringskosten per v.e. en de exploitatiekosten per v.e. aangegeven. Een gedetailleerde uitwerking van de investeringskosten en de bedrijfsvoeringskosten voor de varianten van 50.000 v.e. is als voorbeeld opgenomen in bijlage III.

Tabel 8 geeft aan dat de aanleg van een persleiding met name zwaar doorweegt in de investeringskosten en de exploitatiekosten van de conventionele zuiveringsinrichting voor 10.000 v.e. Dit geeft een vertekend beeld voor de vergelijking van de drie systemen bij deze capaciteit.

De extra kosten voor nageschakelde membraanfiltratie komen voor een capaciteit van 50.000 v.e. overeen met de extra kosten die moeten worden gemaakt voor een persleiding. Voor een capaciteit van 150.000 v.e. lijkt het aanleggen van een persleiding iets aantrekkelijker.

Uit tabel 8 blijkt dat de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie voor nieuwbouw de duurste variant is. De kosten voor membraanfiltratie overschrijden in hoge mate de verdiensten door de compacte bouw en mogelijkheden voor hergebruik van het effluent. De hoge kosten worden met name veroorzaakt door de hoge electro/mechanische investering, de investering in de membranen en de membraanvervangingskosten. Hieruit blijkt dat de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie sterk afhankelijk is van specifieke uitgangspunten. In hoofdstuk 7 zal aan de hand van een gevoeligheidsanalyse worden uitgewerkt onder welke omstandigheden en in welke situaties geïntegreerde membraanfiltratie aantrekkelijk wordt.

6.6 Uitwerking van de kosten voor uitbreiding

In tabel 9 worden de kosten voor uitbreiding van een zuiveringsinrichting met nageschakelde membraanfiltratie gepresenteerd. De kosten die worden gepresenteerd zijn de investeringskosten, de vermeden kosten en de daaruit berekende 'extra' kosten ten opzichte van een alternatieve uitbreiding met een persleiding. De investeringskosten (en de vermeden investeringskosten) worden als een aanneemsom gepresenteerd, inclusief bijkomende kosten, advieskosten, onvoorzien en BTW. Het ontwerp van de membraanunits is gebaseerd op het RWA-debiet (RWA/DWA = 3). De extra kosten kunnen negatief zijn als nageschakelde membraanfiltratie goedkoper is dan een alternatieve uitbreiding. Naast de investeringskosten worden de exploitatiekosten op een vergelijkbare wijze gepresenteerd. In bijlage IV is het spreadsheet model voor de variant van 50.000 v.e. als voorbeeld opgenomen.

Tabel 8: Dimensionering en kosten van de geselecteerde varianten (nieuwbouw).

| | capaciteit 10.000 v.e. | | | capaciteit 50.000 v.e. | | | capaciteit 150.000 v.e. | | |
|--|------------------------|---------------|---------------|------------------------|---------------|---------------|-------------------------|---------------|---------------|
| | conventioneel | geïntegreerd | nageschakeld | conventioneel | geïntegreerd | nageschakeld | conventioneel | geïntegreerd | nageschakeld |
| DIMENSIONERING | | | | | | | | | |
| zandvanger [m2] | 0 | 19 | 0 | 94 | 94 | 94 | 281 | 281 | 281 |
| voorbezinktank [m2] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.813 | 0 | 2.813 |
| aeratie tank [m3] | 2.700 | 540 | 2.700 | 13.500 | 2.700 | 13.500 | 28.350 | 8.100 | 28.350 |
| beluchting [kW] | 45 | 53 | 45 | 223 | 265 | 223 | 603 | 597 | 603 |
| nabezinktank(s) [m2] | 563 | 0 | 619 | 2.647 | 0 | 2.912 | 7.941 | 0 | 8.735 |
| retourslibgemaal [m3/h] | 175 | 0 | 193 | 875 | 0 | 963 | 2.625 | 0 | 2.888 |
| membraanunit [m2] | 0 | 9.375 | 4.688 | 0 | 46.875 | 23.438 | 0 | 140.625 | 70.313 |
| persleiding [m] | 5.000 | 0 | 0 | 5.000 | 0 | 0 | 5.000 | 0 | 0 |
| INVESTERINGSKOSTEN voor RWA/DWA = 3 | | | | | | | | | |
| civiel (1) [Hfl/ve] | 1.662,00 | 87,00 | 242,00 | 525,00 | 87,00 | 244,00 | 318,00 | 87,00 | 228,00 |
| elektro/mech. (1) [Hfl/ve] | 211,00 | 465,00 | 322,00 | 106,00 | 464,00 | 316,00 | 118,00 | 462,00 | 344,00 |
| membranen (2) [Hfl/ve] | 0,00 | 386,00 | 193,00 | 0,00 | 386,00 | 193,00 | 0,00 | 385,00 | 193,00 |
| totaal [Hfl/ve] | 1.873,00 | 938,00 | 757,00 | 631,00 | 937,00 | 753,00 | 436,00 | 934,00 | 765,00 |
| EXPLOITATIEKOSTEN voor RWA/DWA = 3 | | | | | | | | | |
| totaal (3) [Hfl/ve] | 157,00 | 138,00 | 87,00 | 78,00 | 128,00 | 77,00 | 76,00 | 123,00 | 87,00 |

(1) - inclusief bijkomende kosten, onvoorzien, advieskosten en BTW

(2) - inclusief BTW

(3) - rente/afschrijving, onderhoud, energie, membraanvervanging, chemicaliën, slibverwerking, personeel, lozingsheffing en inkomsten voor effluenthergebruik

Tabel 9: Investerings- en exploitatiekosten voor nageschakelde membraanfiltratie (ontwerp op basis van RWA-debiet)

| | | oxydatiesloot [v.e.] | 10.000 | carrousel 50.000 | aëratietank 150.000 |
|--|------------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|
| Investeringskosten | Hfl./v.e. | | 440,- | 402,- | 367,- |
| Vermeden investeringskosten | Hfl./v.e. | | 1.438,- | 297,- | 107,- |
| Extra investeringskosten | Hfl./v.e. | | - 998,- | 105,- | 259,- |
| Exploitatiekosten | Hfl./v.e. | | 78,- | 68,- | 69,- |
| Vermeden kosten / verdiensten | Hfl. | | 132,- | 64,- | 52,- |
| Extra exploitatiekosten/besparingen | Hfl. | | - 54,- | 4,- | 17,- |

Voor de zuiveringsinrichting van 10.000 v.e. blijkt, overeenkomstig de nieuwbouw-situatie, dat nageschakelde membraanfiltratie aanzienlijk goedkoper is dan het aanleggen van een persleiding. Voor grotere capaciteiten komen de kosten voor nageschakelde membraanfiltratie overeen met de kosten voor de alternatieve oplossing.

In tabel 10 en 11 worden de extra kosten voor uitbreiding van een zuiveringsinrichting met geïntegreerde membraanfiltratie gepresenteerd. De kosten die worden gepresenteerd zijn de extra kosten ten opzichte van het vergroten van de gehele zuiveringsinrichting en het aanleggen van een persleiding. De extra kosten kunnen negatief zijn als de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie goedkoper is dan de alternatieve uitbreiding.

Tabel 10: Investerings- en exploitatiekosten voor uitbreiding met geïntegreerde membraanfiltratie voor een verlaging van de belasting met een factor 5. (ontwerp op basis van RWA-debiet)

| | | oxydatiesloot [v.e.] | 10.000 | carrousel 50.000 | aëratietank 150.000 |
|--|------------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|
| Investeringskosten | Hfl./v.e. | | 799,- | 725,- | 656,- |
| Vermeden investeringskosten | Hfl./v.e. | | 1.531,- | 391,- | 142,- |
| Extra investeringskosten | Hfl./v.e. | | - 732,- | 334,- | 514,- |
| Exploitatiekosten | Hfl./v.e. | | 141,- | 128,- | 119,- |
| Vermeden kosten / verdiensten | Hfl./v.e. | | 144,- | 75,- | 58,- |
| Extra exploitatiekosten/besparingen | Hfl./v.e. | | - 3,- | 53,- | 61,- |

Tabel 11: Investerings- en exploitatiekosten voor uitbreiding met geïntegreerde membraanfiltratie voor een verhoging van de capaciteit, gecombineerd met een verlaging van de belasting.

| | | oxydatiesloot [v.e.] | carrousel 50.000 | aëratietank 150.000 |
|--|------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|
| uitbreiding tot | [v.e.] | 20.000 | 100.000 | 180.000 |
| Investeringskosten | Hfl./v.e. | 801,- | 727,- | 660,- |
| Vermeden investeringskosten | Hfl./v.e. | 808,- | 229,- | 185,- |
| Extra investeringskosten | Hfl./v.e. | - 7,- | 498,- | 475,- |
| Exploitatiekosten | Hfl./v.e. | 139,- | 129,- | 120,- |
| Vermeden kosten / verdienen | Hfl./v.e. | 102,- | 67,- | 63,- |
| Extra exploitatiekosten/besparingen | Hfl./v.e. | 37,- | 62,- | 57,- |

In bijlage V is het spreadsheetmodel voor de variant van 50.000 v.e. met een verlaging van de slibbelasting als voorbeeld opgenomen.

De vergelijking voor een capaciteit van 10.000 v.e. wordt weer sterk beïnvloed doordat de aanleg van een persleiding als één van de alternatieven is gekozen. De vergelijking voor de hogere capaciteiten worden sterk beïnvloed door de hoge investeringen voor de membranen en het electro/mechanische gedeelte van de membraanfiltratie-installatie en de hoge membraanvervangingskosten.

De toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie zal sterk afhankelijk zijn van specifieke omstandigheden. De optimale configuratie zal per situatie moeten worden vastgesteld.

7 Gevoeligheidsanalyse

7.1 Algemeen

Op basis van de modelberekeningen van hoofdstuk 6 kan de economische haalbaarheid van membraanfiltratie bij rwzi's worden vastgesteld. Deze modelberekeningen zijn echter gebaseerd op één specifieke situatie. Door een aantal essentiële parameters te variëren kan de invloed van deze parameters op de kosten van de zuiveringsconcepten onderzocht worden. Hierbij wordt steeds één parameter gevarieerd, terwijl de andere parameters constant gehouden worden. Bij de gevoeligheidsanalyse wordt onderscheid gemaakt in parameters die direct en indirect effect hebben op de kosten voor het toepassen van membraanfiltratie. De parameters met direct effect op de kosten van membraanfiltratie worden vooral bepaald door technische ontwikkelingen op het gebied van membraanfiltratie, zoals de membraanflux, de standtijd van de membranen, het energieverbruik en de membraanprijs. De indirecte kosten worden veroorzaakt door externe factoren. Dit zijn parameters zoals de RWA/DWA-verhouding, de kosten voor slibverwerking, de opbrengsten voor het hergebruiken van effluent en de vermeden kosten van een persleiding.

Tabel 12 geeft de onderzochte parameters weer, inclusief het bereik waarin deze parameters gevarieerd zijn.

Tabel 12: Gevarieerde parameters

| Parameter | Variatie | Eenheid |
|-----------------------------------|-------------|------------------------|
| membraanflux | 20 - 120 | $l/m^2 \cdot h$ |
| energieverbruik membraanfiltratie | 0,2 - 3 | kWh/m^3 |
| membraanstandtijd | 2 - 8 | jaar |
| membraanprijs | 150 - 400 | Hfl/m^2 |
| RWA/DWA-verhouding | 1 - 6 | - |
| slibverwerkingskosten | 750 - 1.750 | $Hfl/ton \text{ d.s.}$ |
| effluentopbrengst | 0 - 2,50 | Hfl/m^3 |
| persleidinglengte | 0 - 10 | km |

De gevoeligheidsanalyse is per zuiveringsconcept uitgevoerd. In tabel 13 staan deze zuiveringsconcepten eergegeven. De nummering van de zuiveringsconcepten in tabel 13 wordt verder in deze gevoeligheidsanalyse aangehouden.

Navolgend wordt per te onderzoeken parameter de gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de diverse zuiveringsconcepten. Hierbij wordt de variatie in de desbetreffende parameter uitgezet tegen extra kosten ten opzichte van het zuiveringsconcept zonder membraanfiltratie, conform de berekeningen in hoofdstuk 6. De gepresenteerde kosten zijn de zogenaamde extra kosten: het verschil tussen de kosten voor de toepassing van membraanfiltratie en een alternatieve oplossing.

Nageschakelde en geïntegreerde membraanfiltratie worden voor elke parameter in een aparte grafiek weergegeven omdat de kosten van beide technieken niet vergelijkbaar zijn. In elke grafiek is met een verticale lijn het uitgangspunt voor de berekeningen uit hoofdstuk 6 aangegeven.

Tabel 13: Zuiveringsconcepten

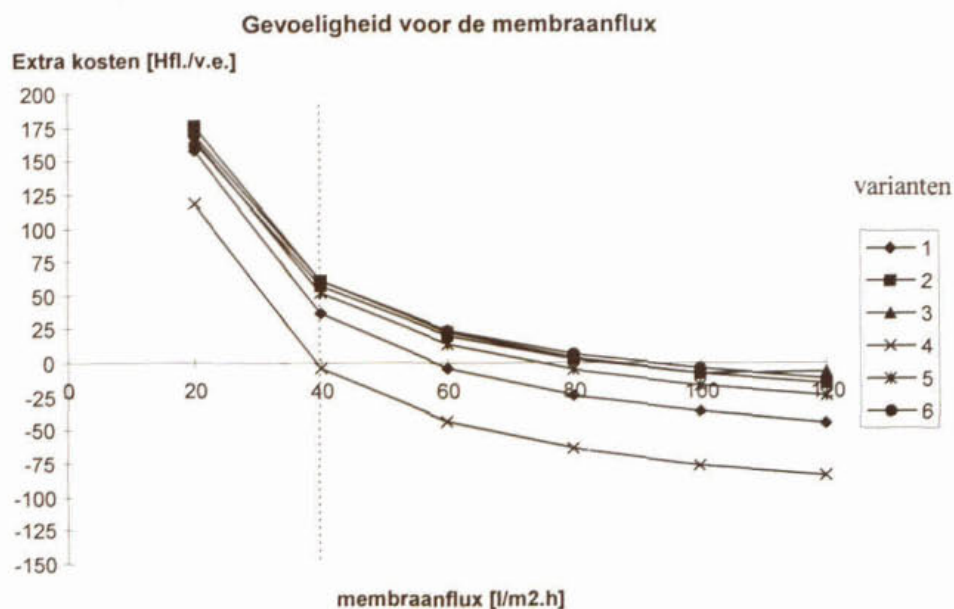
| Variant | Type zuivering | Capaciteit (v.e.) | Type membraanfiltratie |
|---------|----------------|-------------------|---|
| 1 | oxydatiesloot | 10.000 | geïntegreerd als compact systeem |
| 2 | carrousel | 50.000 | geïntegreerd als compact systeem |
| 3 | aëratietank | 150.000 | geïntegreerd als compact systeem |
| 4 | oxydatiesloot | 10.000 | geïntegreerd als hyper laagbelast systeem |
| 5 | carrousel | 50.000 | geïntegreerd als hyper laagbelast systeem |
| 6 | aëratietank | 150.000 | geïntegreerd als hyper laagbelast systeem |
| 7 | oxydatiesloot | 10.000 | nageschakeld |
| 8 | carrousel | 50.000 | nageschakeld |
| 9 | aëratietank | 150.000 | nageschakeld |

7.2 Direct aan membraanfiltratie gerelateerde exploitatiekosten

7.2.1 Membraanflux

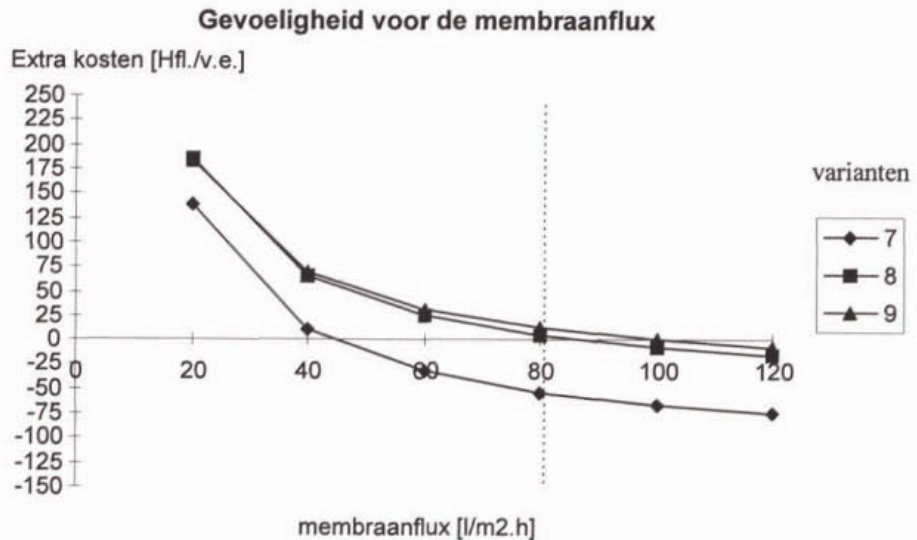
De membraanflux is een essentiële parameter voor de kosten van membraanfiltratie. In de literatuur worden, afhankelijk van het toegepaste systeem, membraanfluxen vermeld van 20 tot 150 l/m² . h., voor zowel geïntegreerde als nageschakelde membraanfiltratie. Het energieverbruik en extra kosten voor een rwzi staan in paragraaf 7.2.2 uitgewerkt.

De invloed van de membraanflux op de kosten van membraanfiltratie staat in afbeelding 10 weergegeven voor de geïntegreerde membraansystemen en in afbeelding 11 voor de nageschakelde membraansystemen. De nummers in de legenda verwijzen naar de nummers in tabel 13.



Afbeelding 10: De invloed van de membraanflux op de extra kosten voor het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie

De extra kosten voor het toepassen van membraanfiltratie zijn sterk afhankelijk van de membraanflux. De membraanflux is immers zowel bepalend voor de investering van de membraanfiltratieunit als voor de kosten voor membraanvervangning.



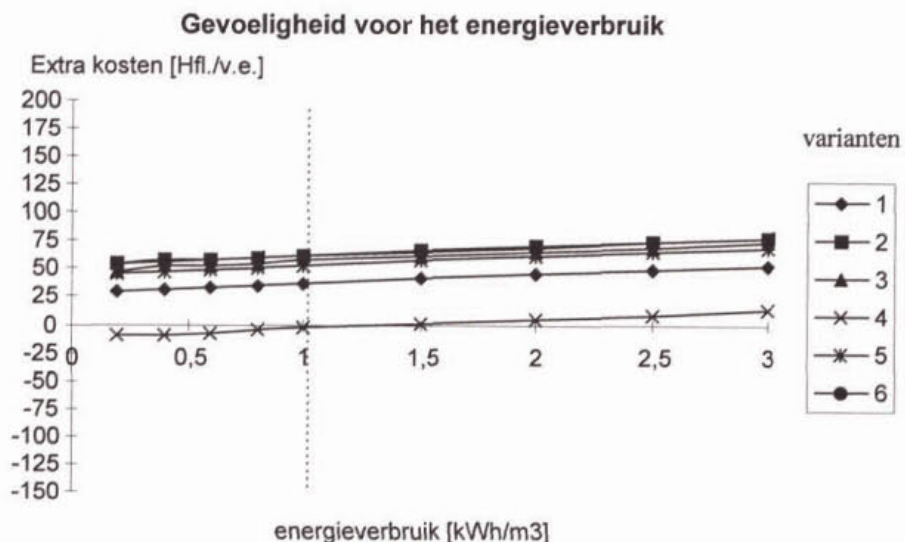
Afbeelding 11: De invloed van de membraanflux op de extra kosten voor het toepassen van nageschakelde membraanfiltratie

Bij geïntegreerde en nageschakelde membraanfiltratie moet de membraanflux, afhankelijk van de variant, minimaal 40 tot 80 l/m².h bedragen voor een economisch aantrekkelijke installatie.

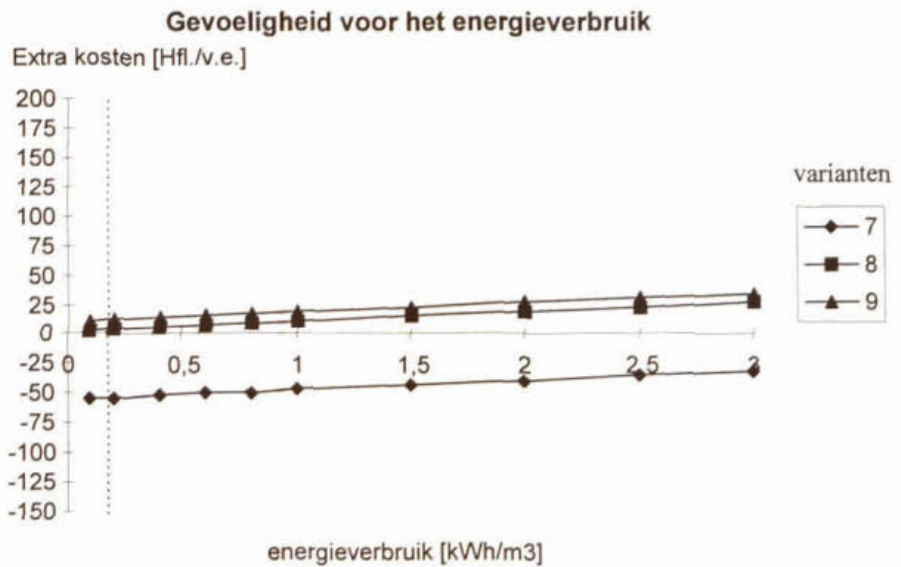
7.2.2 Energieverbruik van de membraanfiltratie

Het energieverbruik van membraanfiltratie wordt bepaald door de pompenergie. Op basis van gegevens uit de literatuur varieert het energieverbruik tussen 0,2 en 3 kWh/m³.

De invloed van het energieverbruik van membraanfiltratie op de extra kosten voor het toepassen van membraanfiltratie staat in afbeelding 12 weergegeven voor de geïntegreerde membraansystemen en in afbeelding 13 voor de nageschakelde membraansystemen.



Afbeelding 12: De invloed van het energieverbruik op de extra kosten voor het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie



Afbeelding 13: De invloed van het energieverbruik op de extra kosten voor het toepassen van nageschakelde membraanfiltratie

De invloed van het energieverbruik van membraanfiltratie op de extra kosten voor het toepassen van membraanfiltratie is vrij gering. Omdat de membraanflux en het energieverbruik voor een deel samen gaan kan het voordeliger zijn om te kiezen voor een hoger energieverbruik in combinatie met een hogere membraanflux.

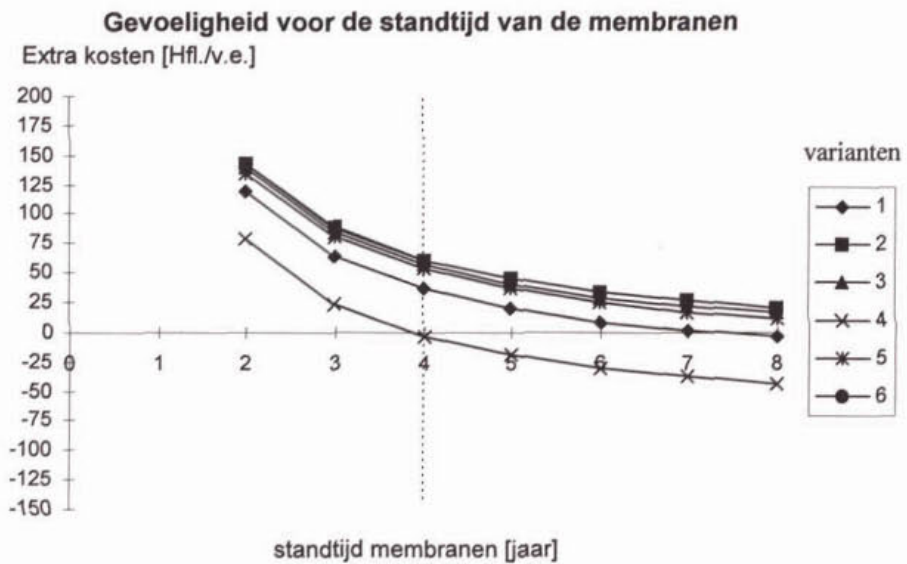
7.2.3 Standtijd van de membranen

De kosten voor membraanvervanging worden voor een belangrijk deel bepaald door de standtijd van de membranen. De verwachting is dat membraanstandtijden in de toekomst op kunnen lopen tot circa 10 jaar. De membraanstandtijd is in deze gevoeligheidsanalyse gevarieerd tussen 2 en 8 jaar.

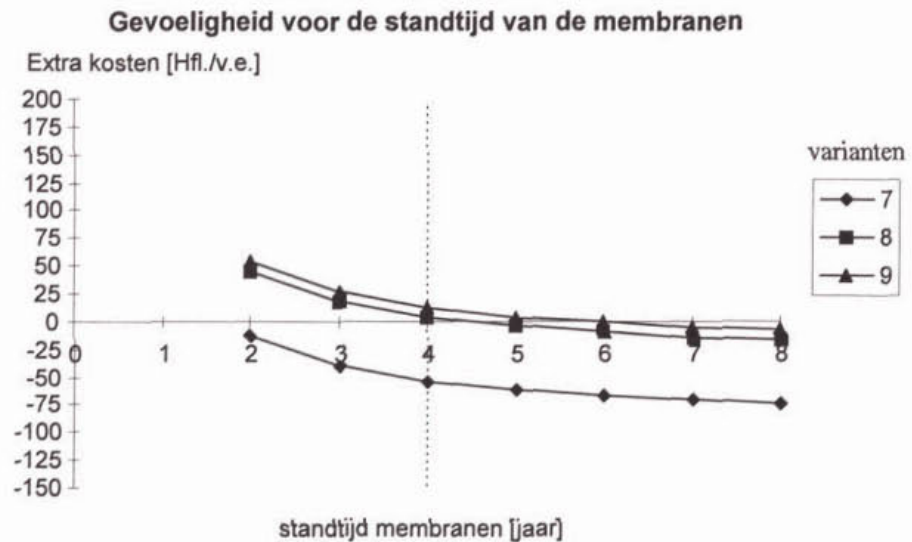
De invloed van de membraanstandtijd op de extra kosten voor het toepassen van membraanfiltratie volgt in afbeelding 14 voor de geïntegreerde membraansystemen en in afbeelding 15 voor de nageschakelde membraansystemen.

De standtijd van de membranen heeft een direct effect op de membraanvervangingskosten, die omgekeerd evenredig zijn met de membraanstandtijd. Hierdoor is het effect van de membraanstandtijd relatief groot bij standtijden van 2 tot 4 jaar en wordt het effect bij standtijden groter dan 4 jaar minder. Aangezien membraanfiltratie op rwzi's een nieuwe techniek is, is er nog weinig ervaring met lange standtijden. De langst gevonden standtijd bedraagt op dit moment ongeveer 4 tot 5 jaar.

Naast de standtijd van de membranen hebben ook de membraanflux en de membraanprijs invloed op de kosten voor membraanvervanging. Bij hogere membraanfluxen is het geïnstalleerde membraanoppervlak geringer en zijn de membraanvervangingskosten dus ook minder ten opzichte van de situatie met de lagere membraanflux. Het effect van de standtijd zal dus geringer zijn bij hoge membraanfluxen en groter zijn bij lage membraanfluxen.



Afbeelding 14 De invloed van de membraanstandtijd op de extra kosten voor het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie

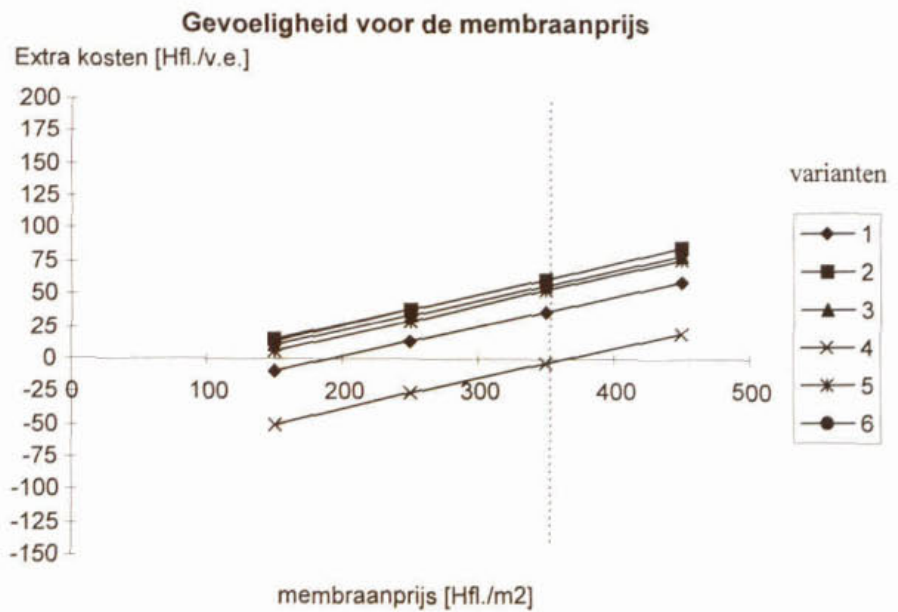


Afbeelding 15: De invloed van de membraanstandtijd op de extra kosten voor het toepassen van nageschakelde membraanfiltratie

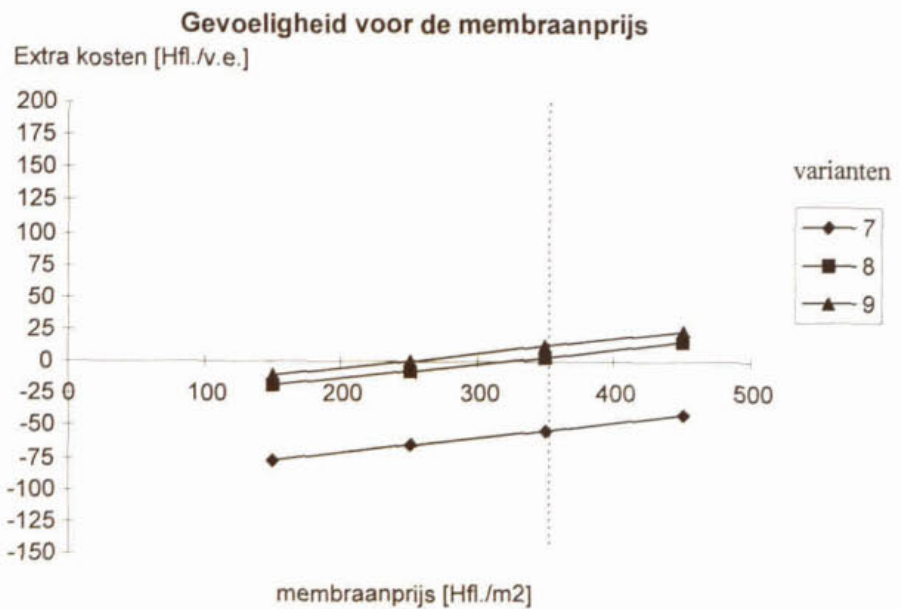
7.2.4 Membraanprijs

De membraanprijs is van invloed op de investeringskosten en ook direct van invloed op de bedrijfsvoeringskosten door de membraanvervanging. De membraanprijs is de laatste jaren sterk aan het dalen en de verwachting is dat de membraanprijs tot circa Hfl 150,-/m² zal dalen. De membraanprijs is in deze gevoeligheidsanalyse gevarieerd van Hfl 150,- tot Hfl 450,-/m².

De invloed van de membraanprijs op de extra kosten voor een rwzi wordt in afbeelding 16 weergegeven voor de geïntegreerde membraansystemen en in afbeelding 17 voor de nageschakelde membraansystemen.



Afbeelding 16 De invloed van de membraanprijs op de extra kosten voor het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie



Afbeelding 17: De invloed van de membraanprijs op de extra kosten voor het toepassen van nageschakelde membraanfiltratie

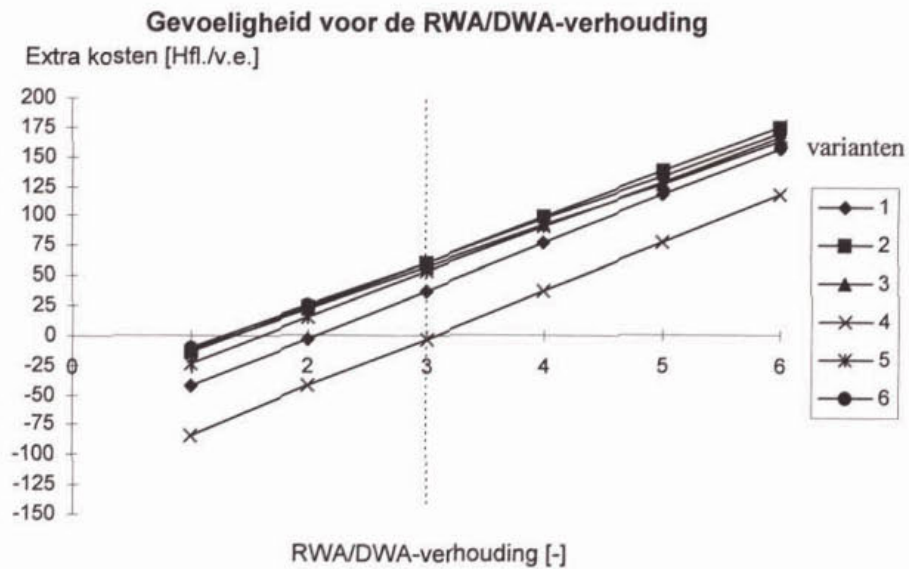
De extra kosten voor het toepassen van membraanfiltratie blijken lineair gerelateerd aan de membraanprijs die met name invloed heeft op de investeringsprijs voor de membraanfiltratie-unit en de membraanvervangingskosten. Net als bij de standtijd van de membranen is er een samenhang tussen de membraanflux en de membraanprijs en de extra kosten voor een rwzi. Bij een hoge flux en lange standtijden is het effect van de membraanprijs geringer dan bij een lage flux en korte standtijden.

7.3 Indirect aan membraanfiltratie gerelateerde kosten

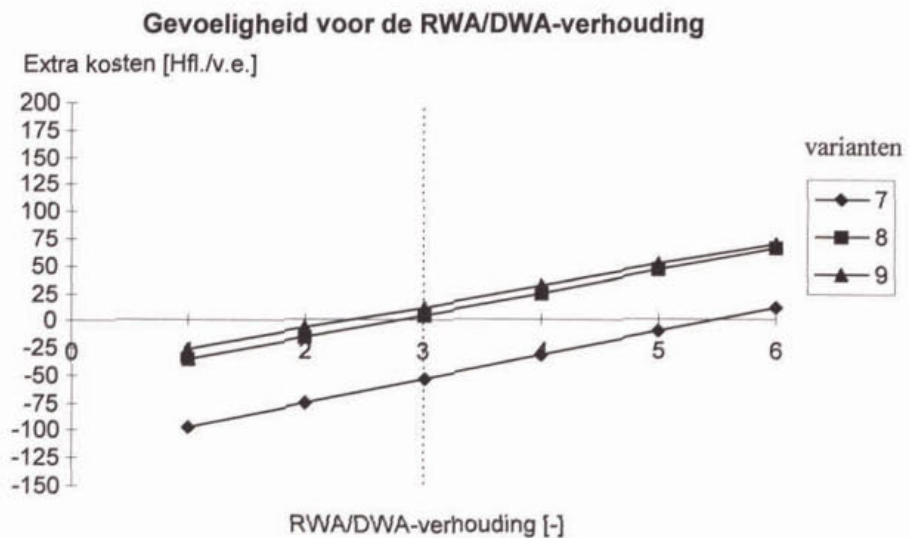
7.3.1 RWA/DWA-verhouding

Indien het RWA-debiet de basis vormt voor het ontwerp van de membraanunit, bepaalt de RWA/DWA-verhouding in grote mate het geïnstalleerde membraanoppervlak. Voor de gevoeligheidsanalyse is de RWA/DWA-verhouding gevarieerd tussen 1 en 6.

Afbeelding 18 toont de invloed van de RWA/DWA-verhouding op de extra kosten voor het toepassen van membraanfiltratie voor de geïntegreerde membraansystemen; afbeelding 19 doet dit voor de nageschakelde membraansystemen.



Afbeelding 18: De invloed van de RWA/DWA-verhouding als ontwerpgrondslag op de extra kosten voor het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie.



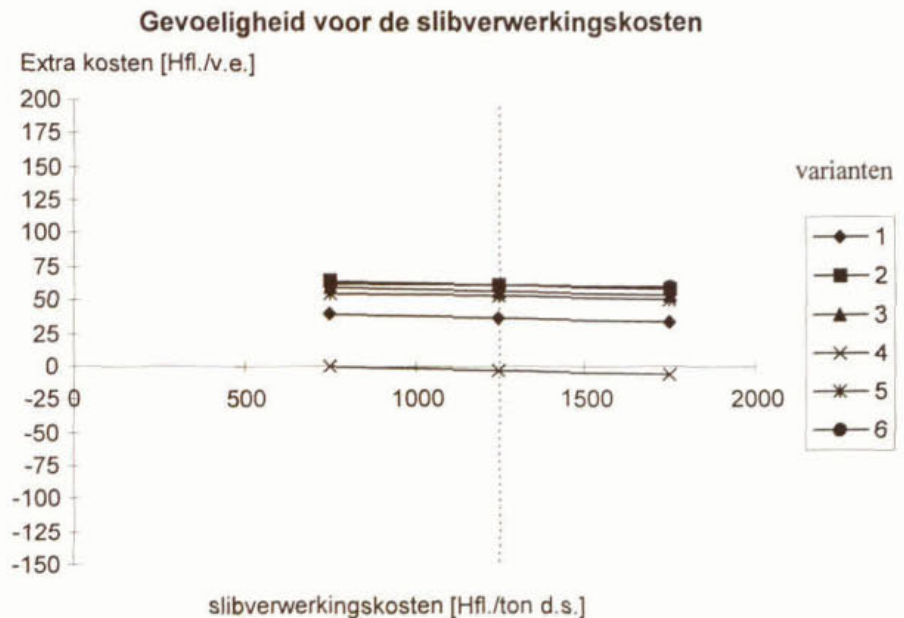
Afbeelding 19: De invloed van de RWA/DWA-verhouding als ontwerpgrondslag op de extra kosten voor het toepassen van nageschakelde membraanfiltratie.

De invloed van de RWA/DWA-verhouding op de extra kosten voor het toepassen van membraanfiltratie blijken voor zowel geïntegreerde als nageschakelde membraanfiltratie rechtevenredig. Een lage RWA/DWA-verhouding is dus gunstig voor het toepassen van membraanfiltratie. De RWA/DWA-verhouding kan voor geïntegreerde en nageschakelde membraanfiltratie op verschillende manieren worden verlaagd. Bij nageschakelde membraanfiltratie kan een deel van het effluent langs de membraanfiltratie-unit geleid worden tijdens RWA-aanvoer. Dit heeft wel consequenties voor de gemiddelde effluentkwaliteit. Bij geïntegreerde membraanfiltratie kan het effect van de RWA/DWA-verhouding op de kosten voor een deel opgevangen worden door tijdens RWA tijdelijk de stromingscondities door het membraan te veranderen waardoor een grotere flux ontstaat. Een voorbeeld hiervan is het tijdelijk toepassen van cross flow condities in het semi-cross-flow systeem. Het tijdelijk verhoogde energieverbruik kan dan gecompenseerd worden door een hogere flux.

7.3.2 Slibverwerkingskosten

Bij geïntegreerde membraanfiltratie zal de slibproductie afnemen ten gevolge van een verlaagde slibbelasting. In de gevoeligheidsanalyse zijn de slibverwerkingskosten gevarieerd van Hfl 750,-/ton d.s. tot Hfl 1.750,-/ton d.s.

De invloed van de slibverwerkingskosten op de extra kosten staat in afbeelding 20 weergegeven voor de geïntegreerde membraansystemen.



Afbeelding 20: De invloed van de slibverwerkingskosten op de extra kosten voor het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie

Aangezien er bij het nageschakelde membraanfiltratiesysteem nauwelijks invloed is op de slibproductie hebben de slibverwerkingskosten ook geen merkbare invloed op de extra kosten voor de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie.

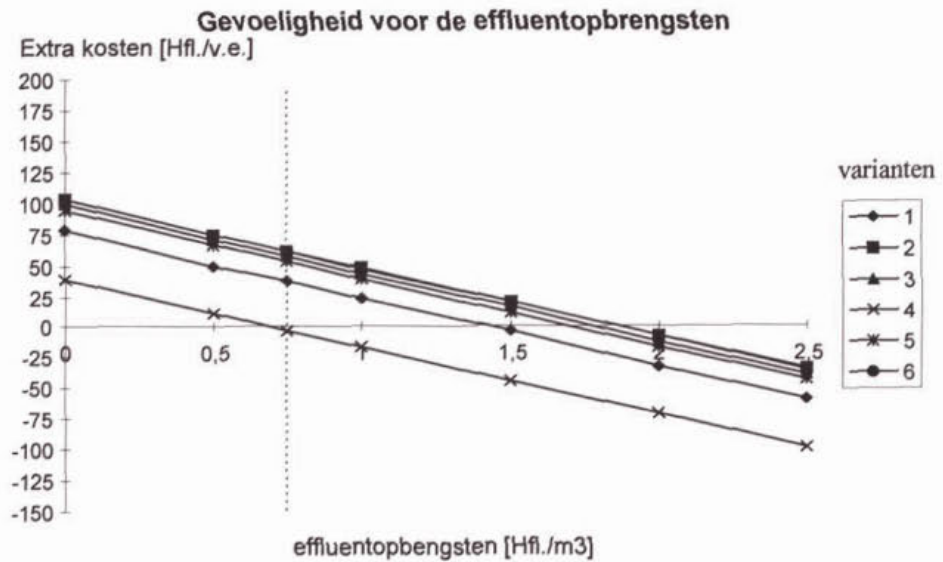
Dit is wel in enige mate het geval voor de geïntegreerde membraanfiltratiesystemen, waarbij de invloed het grootst is bij de hyper laagbelaste systemen en het kleinst bij de compacte systemen. Uit de afbeelding blijkt echter dat de slibverwerkingskosten

een marginale invloed hebben op de extra kosten voor de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie.

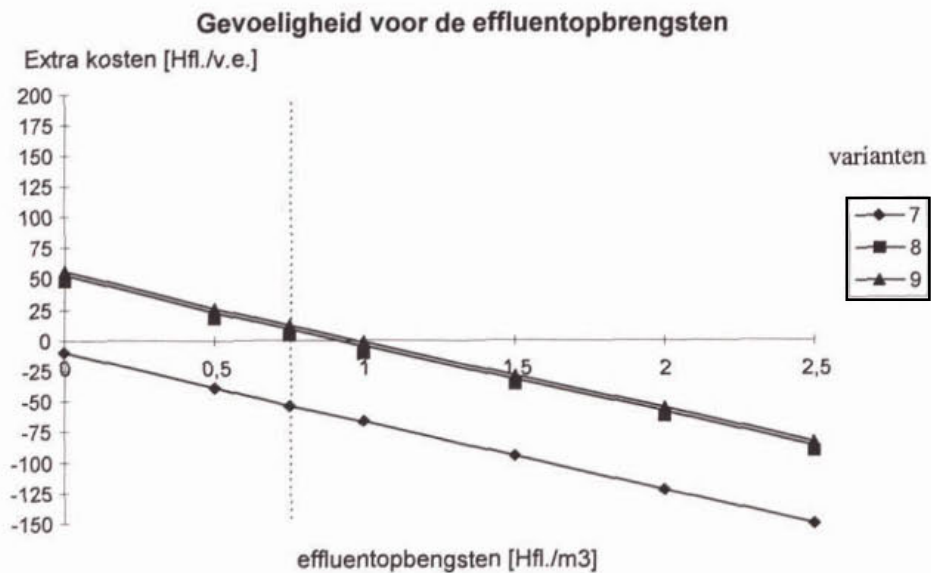
7.3.3 Opbrengst voor het effluent

Wanneer het effluent van een rwzi hergebruikt wordt, kan aan dit effluent een waarde toegekend worden. De waarde van dit effluent zal echter altijd lager zijn dan de prijs voor drinkwater. In de gevoeligheidsanalyse is de prijs gevarieerd van Hfl 0,-/m³ tot Hfl 2,50/m³.

De invloed van de effluentopbrengst op de extra kosten voor het toepassen van membraanfiltratie staat in afbeelding 21 weergegeven voor de geïntegreerde membraansystemen en in afbeelding 22 voor de nageschakelde membraansystemen.



Afbeelding 21: De invloed van de effluentopbrengst op de extra kosten voor het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie. (Alleen hergebruik DWA-debiet).



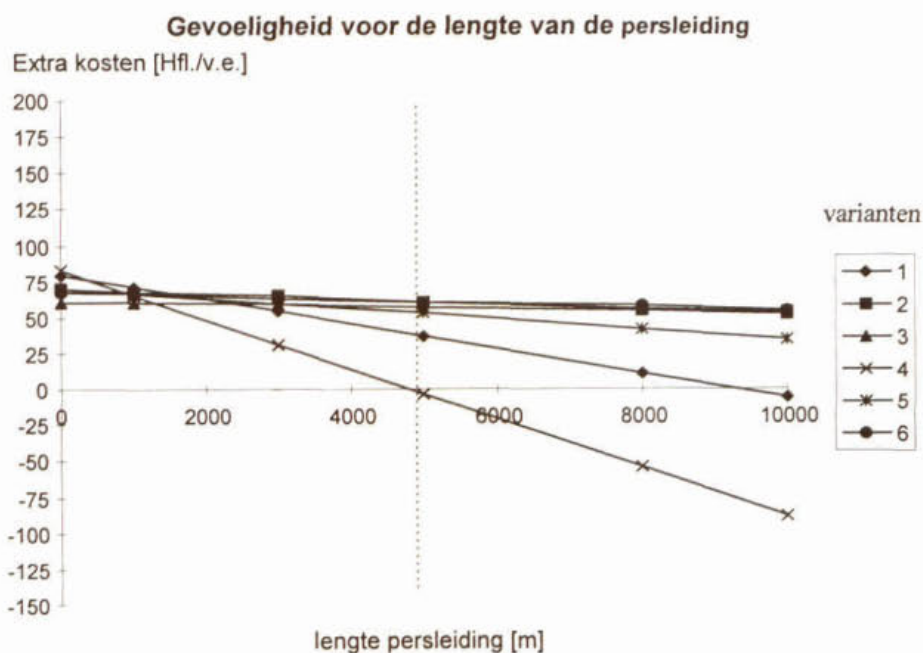
Afbeelding 22: De invloed van de effluentopbrengst op de extra kosten voor het toepassen van nageschakelde membraanfiltratie. (Alleen hergebruik DWA-debiet).

De extra kosten van membraanfiltratie blijken recht evenredig met de effluent-opbrengst. Voor geïntegreerde membraanfiltratie is er een voordeel wanneer het effluent, afhankelijk van de variant, meer dan Hfl 0,50/m³ tot Hfl 1,50/m³ opbrengt. Voor nageschakelde membraanfiltratie ligt dit tussen Hfl 0,-/m³ tot Hfl 1,-/m³.

7.3.4 Lengte van de persleiding

In sommige gevallen is het aanleggen van een persleiding een alternatief voor het toepassen van membraanfiltratie, waardoor het effluent op minder gevoelig oppervlaktewater geloosd kan worden. Bij het toepassen van membraanfiltratie op rwzi's kunnen de kosten voor een eventuele persleiding dus gezien worden als vermeden kosten. De hoogte van deze vermeden kosten wordt bepaald door de lengte van de persleiding. Voor de gevoeligheidsanalyse is de lengte van de persleiding gevarieerd tussen 0 en 10 km.

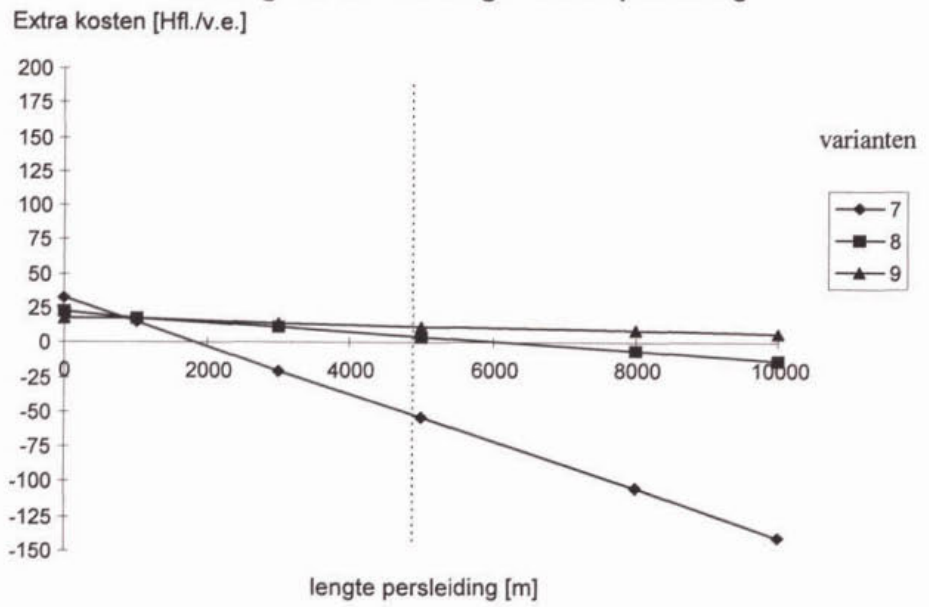
De invloed van de lengte van een vermeden persleiding op de extra kosten voor het toepassen van membraanfiltratie staat in afbeelding 23 weergegeven voor de geïntegreerde membraansystemen en in afbeelding 24 voor de nageschakelde membraansystemen.



Afbeelding 23: De invloed van de lengte van de persleiding op de extra kosten voor het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie

De lengte van de persleiding heeft vooral invloed op de zuiveringsvarianten met een capaciteit van 10.000 v.e. (variant 1,4 en 7). Bij grotere capaciteiten is de invloed van de lengte van de persleiding zeer gering.

Gevoeligheid voor de lengte van de persleiding



Afbeelding 24: De invloed van de lengte van de persleiding op de extra kosten voor het toepassen van nageschakelde membraanfiltratie

8 Evaluatie

8.1 Inleiding

Verbetering van de effluentkwaliteit, capaciteitsuitbreiding, reductie van de slibproductie en compacte bouw zijn voor de toekomst wellicht belangrijke argumenten om membraanfiltratie toe te passen op rwzi's. In hoofdzaak zijn drie toepassingsmogelijkheden te onderscheiden voor membraanfiltratie op rwzi's:

- nageschakelde membraanfiltratie (effluentpolishing);
- geïntegreerde membraanfiltratie met een zeer lage slibbelasting (hyper laagbelast systeem);
- geïntegreerde membraanfiltratie met een normale slibbelasting (compact-systeem).

Bij de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie wordt alleen de effluentkwaliteit verbeterd en wordt het zuiveringsproces niet tot nauwelijks beïnvloed. Als nageschakelde techniek kunnen de volgende membraansystemen worden ingezet:

- dead-end filtratie;
- cross-flow filtratie;
- hybride-flow filtratie.

Bij de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie wordt naast de verbetering van de effluentkwaliteit het biologische zuiveringsproces beïnvloed doordat een hoger drogestofgehalte in de beluchtingstank kan worden gehandhaafd. Membraanfiltratie als geïntegreerde techniek kan op twee plaatsen in het zuiveringsproces worden toegepast:

- Buiten de bioreactor:
 - cross-flow systeem;
 - semi cross-flow systeem.
- In de bioreactor (submerged systeem):
 - platensysteem;
 - capillairsysteem.

In dit hoofdstuk worden de stand van zaken op het gebied van membraanfiltratie, de technische en technologische haalbaarheid, de kennishiaten en de economische haalbaarheid geëvalueerd. Tenslotte worden de toepassingsmogelijkheden van membraanfiltratie op rwzi's aangegeven.

8.2 Membraanfiltratie

8.2.1 Nageschakelde membraanfiltratie

Voor de nabehandeling van effluent zijn de laatste jaren nieuwe ontwikkelingen ingevoerd waarbij cross-flow filtratie wordt gecombineerd met dead-end filtratie, het zogenaamde hybride-flow systeem. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de voordelen van het cross-flow systeem (minder verstoppingsgevoelig) en het dead-end systeem (laag energieverbruik). Het hybride-flow systeem wordt sinds enkele jaren getest en op praktijkschaal toegepast voor het opwerken van oppervlaktewater tot proceswater. Dit systeem wordt momenteel gezien als de stand der techniek voor nageschakelde membraanfiltratie.

Het hybride-flow systeem kent een laag energieverbruik van 0,1 - 0,3 kWh/m³, waarbij een membraanflux haalbaar is van 70 - 120 l/m².h. Door de toepassing van het dead-end principe wordt een belangrijke voorwaarde gesteld aan het drogestofgehalte. Om verstopping te voorkomen mag het drogestofgehalte niet hoger zijn dan ongeveer 0,2 g/l, waardoor dit systeem gevoelig is voor slibuitspoeling.

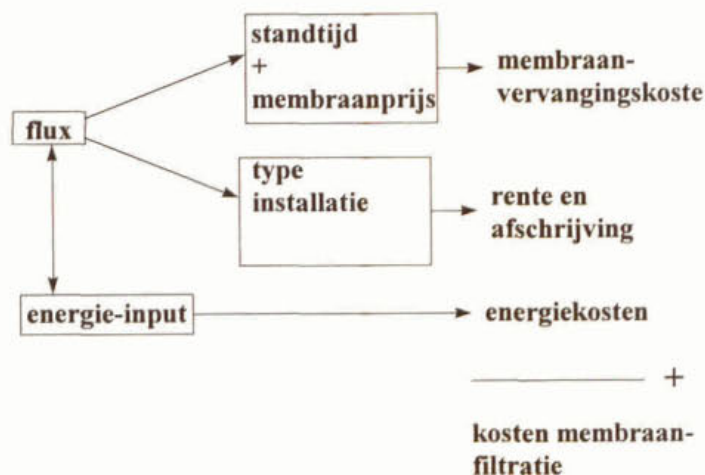
8.2.2 Geïntegreerde membraanfiltratie

De toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's is nieuw. Geïntegreerde membraanfiltratie wordt tot op heden met name toegepast bij de zuivering van industrieel afvalwater en percolatiewater van stortplaatsen. Voor de scheiding van slib en water zijn met het cross-flow systeem de meeste ervaringen opgedaan. Ook het platensysteem en capillairsysteem zijn inmiddels op praktijkschaal getest. Het semi cross-flow systeem is één van de nieuwe ontwikkelingen die op dit moment plaatsvinden.

Met het cross-flow systeem kan een hoge membraanflux worden gehandhaafd van meer dan 100 l/m².h bij een energieverbruik van ongeveer 7 kWh/m³. Het energieverbruik van het platensysteem en het capillairsysteem ligt met ongeveer 0,2 - 1,5 kWh/m³ lager, echter de membraanflux is eveneens laag (20 - 45 l/m² . h). Bij nieuwe systemen als het semi cross-flow systeem wordt getracht een hogere membraanflux te handhaven van 40 - 70 l/m².h, waarbij het energieverbruik slechts iets hoger is (0,7 - 2 kWh/m³).

8.2.3 Kosten voor membraanfiltratie

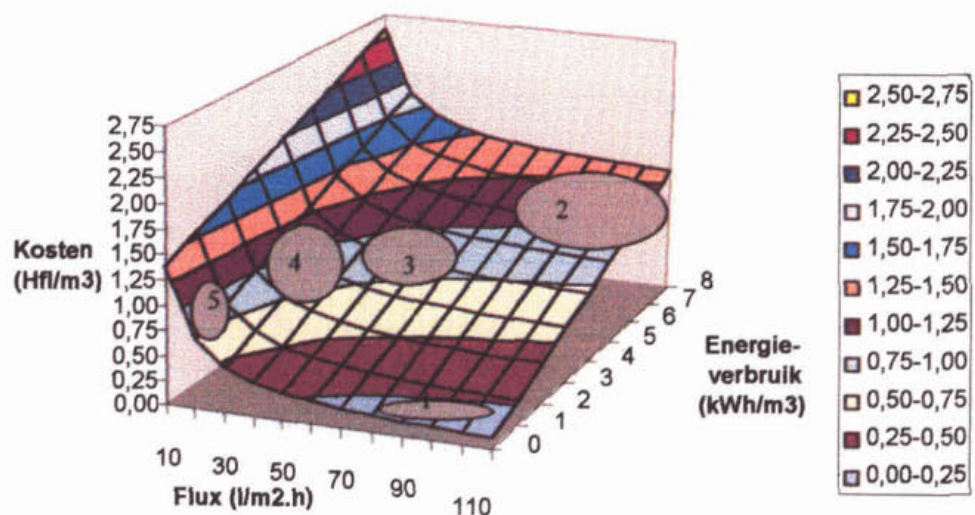
De operationele kosten voor membraanfiltratie worden in hoofdzaak bepaald door de som van de rente en afschrijving van de investering, de membraanvervangingskosten en de energiekosten. De membraanflux, membraanprijs, membraanstandtijd en het energieverbruik hangen onderling samen. De membraanflux bepaalt het te installeren membraanoppervlak, waardoor de investeringskosten en de membraanvervangingskosten worden bepaald. De membraanvervangingskosten worden tevens bepaald door de membraanprijs en de standtijd van de membranen. Daarnaast zijn het energieverbruik en de membraanflux met elkaar gecorreleerd. In afbeelding 25 staat de samenhang tussen de diverse parameters schematisch weergegeven.



Afbeelding 25: De samenhang tussen membraanflux, energie-input, membraanstandtijd, de membraanprijs voor de kosten van membraanfiltratie.

In afbeelding 26 wordt de verhouding tussen de kosten van de verschillende membraanfiltratiesystemen aangegeven. Voor de verschillende membraansystemen zijn in hoofdstuk 4 de bereiken aangegeven van de parameters die van invloed zijn op de operationele kosten. De in hoofdstuk 6 genoemde uitgangspunten zijn voor de kostenberekeningen voor afbeelding 26 gehanteerd, waarbij voor nageschakelde membraanfiltratie het hybride-flow systeem is opgenomen en geïntegreerde membraanfiltratie het cross-flow systeem, het semi cross-flow systeem, het platensysteem en het capillair systeem. De kosten worden uitgedrukt in Hfl./m³ permeaat. Het betreft hier alleen de directe kosten voor membraanfiltratie.

Voor nageschakelde membraanfiltratie is de optimale configuratie al zeer dicht benaderd met het hybride-flow systeem. De kosten voor dit systeem bedragen circa Hfl. 0,20 /m³ permeaat. Een verdere kostenverlaging voor dit systeem kan alleen bereikt worden door het toepassen van nieuwe membranen die een nog hogere flux leveren of door het dalen van de membraanprijs.



- 1 Nageschakeld - hybride flow
- 2 Geïntegreerd - cross-flow
- 3 Geïntegreerd - semi cross-flow
- 4 Geïntegreerd - platen systeem
- 5 Geïntegreerd - capillair systeem

Afbeelding 26: De relatie tussen membraanflux en energieverbruik enerzijds en de kosten voor membraanfiltratie anderzijds.

De verschillende geïntegreerde membraansystemen blijken globaal in hetzelfde kostengebied te liggen. De kosten variëren van Hfl. 0,75 tot Hfl. 1,25 per m³ permeaat. Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van geïntegreerde membraanfiltratie zullen zich vooral moeten richten op het verhogen van de membraanflux bij een relatief laag energieverbruik. Hierdoor zullen met name de

investeringskosten en de membraan-vervangingskosten afnemen. Het effect van alleen het energieverbruik op de kosten is minder groot.

8.3 Technologische en technische haalbaarheid van membraanfiltratie op rwzi's

8.3.1 Algemeen

Bij het toepassen van membraanfiltratie moet rekening gehouden worden met een aantal algemene aspecten, zoals de noodzaak van voorfiltratie, de RWA/DWA-verhouding en de bedrijfsvoeringsaspecten.

Voorfiltratie is zowel bij geïntegreerde als nageschakelde membraanfiltratie vaak noodzakelijk om verstopping van het membraansysteem tegen te gaan. De mate van voorfiltratie zal per systeem en situatie bekeken moeten worden. Zeker bij systemen waar buisvormige membranen worden toegepast moet verstopping van de membraanbuisjes door takjes of bladeren worden voorkomen.

De RWA/DWA-verhouding kan een grote rol spelen bij de kosten voor membraanfiltratie. Om het volledige RWA-debiet te kunnen behandelen dient voldoende membraanoppervlak te worden geïnstalleerd. Hiertoe moeten extra investeringskosten worden gemaakt. Het grootste gedeelte van de tijd zal echter alleen DWA-debiet worden behandeld. Deze extra kosten kunnen op verschillende manieren beheerst worden. In de eerste plaats kan overwogen worden om de RWA (gedeeltelijk) te bufferen en zodoende een meer gelijkmatige aanvoer in debiet te verkrijgen. Daarnaast is het aantrekkelijk om membraansystemen toe te passen die tijdelijk hun capaciteit kunnen vergroten door tijdelijk een hogere membraanflux te realiseren.

Bij de bedrijfsvoering voor membraanfiltratie kunnen bediening en onderhoud onderscheiden worden. Voor de bediening geldt dat kennis op het gebied van filtratietechnieken en reiniging van membranen aanwezig moet zijn. Het onderhoud beperkt zich voornamelijk tot de pompen, het besturingssysteem en de membranen. Het totale onderhoud op een rwzi zal door de toepassing van nageschakelde of geïntegreerde membraanfiltratie toenemen ten opzichte van conventionele zuiveringen.

8.3.2 Nageschakelde membraanfiltratie

Een belangrijke reden om membraanfiltratie op rwzi's toe te passen is het verbeteren van de effluentkwaliteit. Door het toepassen van micro- en ultrafiltratie wordt de effluentkwaliteit verbeterd ten aanzien van zwevend stof, CZV, hoogmoleculaire verbindingen, bacteriën en virussen.

Bij nageschakelde membraanfiltratie worden die stoffen afgescheiden die niet door de nabezinktank worden verwijderd en die groter zijn dan de poriediameter van het membraan. De concentraatstroom uit de membraanfiltratie wordt weer teruggevoerd naar de biologische zuivering. Het is nog onduidelijk welke invloed het terugvoeren van de concentraatstroom op het zuiveringsproces heeft. Er zijn in principe twee opties denkbaar: de stoffen uit de concentraatstroom worden ingevangen in de slibvlok en verwijderd via het surplusslib of deze stoffen accumuleren in het systeem. Wanneer dit laatste gebeurt kunnen er zowel effecten zijn op het biologische proces (beïnvloeding van de processtabiliteit) als op het membraanfiltratieproces.

Door het toepassen van nageschakelde membraanfiltratie is het effluent vrij van zwevend stof en vrijwel vrij van organische componenten. Hierdoor kunnen aanvullende technieken relatief eenvoudig en vaak economisch gunstig worden toegepast.

Op grond van ervaringen met membraanfiltratie voor de behandeling van oppervlaktewater en de testresultaten voor de nabehandeling van het effluent van rwzi's, kan worden geconcludeerd dat de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie op rwzi's in technisch en technologisch opzicht mogelijk is.

8.3.3 Geïntegreerde membraanfiltratie

Bij de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie is het effect op de effluentkwaliteit vergelijkbaar met het effect bij nageschakelde membraanfiltratie. Mogelijk is de effluentkwaliteit hier zelfs beter doordat geïntegreerde membraanfiltratie een duidelijk effect heeft op het biologische zuiveringsproces. De volgende effecten op het zuiveringsproces kunnen onderscheiden worden:

- Verhoging van het drogestofgehalte. In de biologische zuivering kunnen drogestofgehaltenes tot ongeveer 30 kg d.s./m³ worden gehandhaafd.
- Verandering van de slibstructuur. Anders dan bij het actief slib in een conventioneel actiefslibstelsysteem met nabezinking, zal het slib door de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie waarschijnlijk een andere structuur krijgen. Hierover is op dit moment echter nog weinig bekend.
- Het effect op de slibgroei. Door het handhaven van een lage slibbelasting kan de netto slibproductie worden gereduceerd. Dit geldt met name voor een hyper laagbelast systeem.
- De invloed op de procesparameters (T, pH, O₂). Het toepassen van een hoge volumetrische belasting resulteert in een temperatuuroptoeame en een hoger specifiek zuurstofverbruik per volume-eenheid. Dit geldt met name voor compact systemen. In een hyper laagbelast systeem neemt de totale zuurstofvraag toe door de toename van de slibmineralisatie. De pH wordt niet beïnvloed.
- Het effect op nitrificatie en denitrificatie. Door het verhogen van de slibleeftijd wordt met name het nitrificatieproces verbeterd. Voor het denitrificatieproces geldt dat waarschijnlijk een hogere CZV/N-verhouding moet worden aangehouden.
- Het effect op de P-verwijdering. In een hyper laagbelast systeem wordt minder fosfaat biologisch verwijderd door de reductie van de netto slibproductie.
- De gevolgen voor de slibbehandeling. Het slib in een membraanbioreactor kent geen vlokstructuur. Hierdoor is het mogelijk dat vergaande ontwatering van dit slib moeilijker is dan met slib uit een conventionele zuivering.
- De invloed op de processtabiliteit. De processtabiliteit neemt zonder meer toe doordat geen slibuitspoeling kan plaatsvinden. Daarnaast kunnen schokbelastingen beter worden opgevangen. Het risico van ophoping van toxische componenten is echter wel aanwezig.

De toepassing van cross-flow filtratie als geïntegreerde techniek is inmiddels bewezen voor de behandeling van industrieel afvalwater. Ook het platensysteem en het capillairsysteem zijn bewezen technieken voor deze toepassingen. Het membraanfiltratieproces voor de scheiding van slib en water in biologische zuiveringssystemen wordt nog steeds verder verbeterd. Het semi cross-flow systeem is hiervan een voorbeeld.

Uit technisch oogpunt kan worden geconcludeerd dat de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's haalbaar lijkt. Hierbij dient rekening te worden gehouden met enkele aspecten als de noodzaak van voorbehandeling en de RWA/DWA-verhouding.

8.3.4 Kennishiaten bij het toepassen van membraanfiltratie op rwzi's

Het toepassen van membraanfiltratie op rwzi's is nieuw. Binnen onder meer de procesindustrie wordt membraanfiltratie al geruime tijd toegepast. Ondanks de ruime ervaring met membraanfiltratie zijn er in technisch opzicht voor de toepassing op rwzi's nog kennishiaten.

Bij nageschakelde membraanfiltratie kan hybride-flow filtratie gezien worden als de stand der techniek. De belangrijkste kennishiaten die op dit moment worden geconstateerd zijn:

- het effect van slibuitspoeling uit de nabezinktank op het membraanfiltratieproces;
- de toe te passen reinigingsmethoden;
- het verloop/handhaven van de membraanflux op lange termijn.

Voor geïntegreerde membraanfiltratie is een aantal systemen toe te passen en zijn er nog verschillende systemen in ontwikkeling. Er is nog geen ervaring met geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's. De belangrijke onderzoeksvragen richten zich met name op:

- de haalbare membraanflux;
- het benodigde energieverbruik;
- de standtijd van de membranen;
- de flexibiliteit voor RWA/DWA-variaties;
- het bedieningsgemak.

De huidige kennis van de invloed van membraanfiltratie op het functioneren van de biologische zuivering komt voort uit proefonderzoeken die met name verricht zijn in het buitenland. Uit deze inventariserende studie blijkt dan ook dat er nog diverse kennishiaten bij deze toepassing zijn. De belangrijkste kennishiaten worden hieronder puntsgewijs behandeld.

- Kennis over de effluentkwaliteit. Met uitzondering van de verwijdering van zwevend stof is nog weinig bekend over de effluentkwaliteit door het toepassen van membraanfiltratie op rwzi's. Wanneer membraanfiltratie toegepast wordt om een effluent te verkrijgen dat ingezet kan worden als huishoud- of industriewater, of waarbij lozing op gevoelig oppervlaktewater plaatsvindt is kennis over de verwijdering van de navolgende parameters van belang:
 - virussen en kiemen;
 - prioritaire stoffen;
 - organisch gebonden nutriënten (N en P).

Deze kennishiaten gelden voor zowel nageschakelde als voor geïntegreerde membraanfiltratie.

- De invloed van accumulatie van stoffen op de processtabiliteit. Door het toepassen van membraanfiltratie kunnen stoffen in de biologische zuivering accumuleren die in een conventioneel systeem via de nabezinktank niet tegengehouden worden. In welke mate accumulatie van stoffen plaatsvindt en

wat het effect hiervan is op het biologisch zuiveringsproces, is niet bekend. In dit kader kunnen de volgende hiaten worden aangegeven:

- de mogelijke accumulatie van specifieke verbindingen en het effect van deze accumulatie op het biologische zuiveringsproces;
 - de invloed van accumulatie van specifieke stoffen op de kwaliteit van het surplusslib.
- Het effect van de concentraatstroom op het zuiveringsproces. In een systeem met nageschakelde membraanfiltratie wordt continu een concentraatstroom van ongeveer 10% van het afvalwaterdebiet teruggestuurd naar de biologische zuivering. Over het effect van deze retourstroom, en het daarin aanwezig zwevend stof, op de slibproductie en het functioneren van de nabezinktank is op dit moment nog vrijwel niets bekend.
 - Invloed op de fosfaatverwijdering. Bij een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie met een lagere slibbelasting kan, als gevolg van een geringe slibproductie, minder fosfaat biologisch worden verwijderd. Om aan de fosfaateisen te kunnen voldoen zal in veel gevallen chemische P-verwijdering noodzakelijk zijn. Hiermee is in een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie nog geen ervaring. Als belangrijkste kennishiaten kunnen de volgende punten worden genoemd:
 - de effecten van het chemische slib op het membraanfiltratieproces;
 - de verhouding tussen chemisch slib en biologisch slib en de invloed van deze verhouding op de biologische activiteit.

Bij geïntegreerde membraanfiltratie, toegepast als een hyper laagbelast systeem, kan ten gevolge van de zeer lage slibgroei chemische fosfaatverwijdering in de sliblijn problematisch zijn. Een mogelijke oplossing hiervoor zou biologische P-verwijdering in een zijlijn kunnen zijn. Het is echter onbekend hoe P-opname en P-release in een dergelijk systeem functioneren.

- Het effect van een verhoogde biomassaconcentratie op de zuurstofoverdracht. In een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie kan een biomassaconcentratie worden gehandhaafd van ongeveer 30 kg/m³. De viscositeit in de beluchtingsruimte zal hierdoor toenemen. Over het effect van een verhoogde biomassaconcentratie op de zuurstofoverdracht is nog weinig bekend.
- Verandering in de slibstructuur. Het actiefslib in een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie zal vermoedelijk een andere structuur met andere eigenschappen hebben dan bij een conventioneel proces. Op dit moment is op dit gebied nog nauwelijks onderzoek verricht en is nog vrijwel niets bekend over de structuur van actief slib in een rwzi met geïntegreerde membraanfiltratie.
- Slibbehandeling. Bij een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie, uitgevoerd als een hyper laagbelast systeem, zal weinig surplusslib worden geproduceerd. Het drogestofgehalte in het systeem is hoog, waardoor indikking van dit slib niet meer nodig is. Over de ontwaterbaarheid van dit slib is echter weinig bekend. De verwachting is dat de ontwaterbaarheid van dit slib minder goed is dan bij een conventionele zuivering, door het ontbreken van een vlokstructuur.

De bij nageschakelde membraanfiltratie geconstateerde kennishiaten richten zich in de eerste plaats op de kwaliteit van het permeaat. Met name over de verwijdering van virussen, kiemen en prioritaire stoffen is momenteel nog weinig bekend. Daarnaast kan de invloed van de concentraatstroom op de slibproductie en het functioneren van de nabezinktank als een kennishiaat worden beschouwd.

In technologisch opzicht biedt de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's veel perspectief. Onderzoek uitsluitend gericht op de consequenties voor het

biologisch zuiveringsproces is tot op heden nog weinig uitgevoerd. Dit leidt tot een aantal kennishiaten, waarvan de volgende de belangrijkste zijn voor de introductie van geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's:

- De invloed op de fosfaatverwijdering.
- Het effect van accumulatie van specifieke verbindingen op de processtabiliteit.
- De ontwaterbaarheid van het actiefslib uit een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie.

Evenals bij nageschakelde membraanfiltratie is de haalbare effluentkwaliteit met membraanfiltratie een belangrijk aspect.

8.4 Economische haalbaarheid van membraanfiltratie op rwzi's

8.4.1 Algemeen

Voor verschillende typen rwzi's met verschillende capaciteiten, variërend van 10.000 tot 150.000 v.e., zijn de totale kosten voor het toepassen van nageschakelde en geïntegreerde membraanfiltratie berekend. Bij geïntegreerde membraanfiltratie is onderscheid gemaakt tussen een compacte zuivering en een hyper laagbelaste zuivering. De operationele kosten zijn uitgedrukt in extra kosten per v.e. per jaar ten opzichte van een vergelijkbaar alternatief zonder membraanfiltratie. Deze alternatieven zijn voor de toepassing van nageschakelde en geïntegreerde membraanfiltratie verschillend:

- voor de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie zijn de kosten vergeleken met de vermeden kosten voor het aanleggen van een persleiding (verplaatsing lozingspunt);
- voor de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie zijn de kosten vergeleken met de vermeden kosten voor een uitbreiding volgens een conventionele methode en het aanleggen van een persleiding.

Daarnaast is rekening gehouden met een opbrengst van Hfl 0,75 per m³ effluent, op basis van DWA-debiet. De overige uitgangspunten voor de berekeningen staan in hoofdstuk 6 weergegeven. Uit de kostenvergelijking blijkt het volgende:

- Op basis van de genoemde uitgangspunten blijkt dat nageschakelde membraanfiltratie economisch aantrekkelijk is. Met name voor kleinere rwzi's is de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie goedkoper dan het alternatief: het (ver)leggen van een persleiding.
- Geïntegreerde membraanfiltratie is alleen economisch aantrekkelijk voor een zuiveringsinstallatie van 10.000 v.e. als dit systeem wordt uitgevoerd als een compactstelsel. Voor grotere rwzi's variëren de extra kosten van Hfl. 36,- per v.e. per jaar tot Hfl. 61,- per v.e. per jaar.

8.4.2 Resultaten van de gevoeligheidsanalyse

De berekende kosten zijn sterk afhankelijk van de gehanteerde uitgangspunten. In een gevoeligheidsanalyse is de invloed van de belangrijkste parameters op de kosten van de zuiveringsconcepten onderzocht.

Parameters die een direct effect hebben op de kosten van membraanfiltratie zijn:

- . membraanflux;
- . energieverbruik van de membraanfiltratie;
- . standtijd van de membranen;
- . membraanprijs.

Parameters die een indirect effect hebben op de kosten voor membraanfiltratie zijn:

- . RWA/DWA verhouding;
- . slibverwerkingskosten;
- . opbrengsten van het effluent;
- . lengte van de persleiding.

Aan de hand van de gevoeligheidsanalyse zijn de volgende inzichten verkregen:

- De membraanflux heeft een groot effect op de operationele kosten. Naarmate de membraanflux toeneemt neemt het te installeren membraanoppervlak af. De investeringskosten (rente en afschrijving) en de membraanvervangingskosten nemen hierdoor af.
 - . Nageschakelde membraanfiltratie wordt voor kleinere rwzi's interessant als de membraanflux $> 40 \text{ l/m}^2\cdot\text{h}$ is, voor grotere rwzi's wordt nageschakelde membraanfiltratie interessant als de membraanflux $> 80 \text{ l/m}^2\cdot\text{h}$ is.
 - . Geïntegreerde membraanfiltratie is voor kleinere rwzi's interessant als de membraanflux $> 40 - 60 \text{ l/m}^2\cdot\text{h}$ bedraagt en voor grotere rwzi's dient de membraanflux $> 80 \text{ l/m}^2\cdot\text{h}$ te bedragen.
- Het energieverbruik voor membraanfiltratie heeft weinig effect op de kosten. Voor zowel nageschakelde als geïntegreerde membraanfiltratie geldt dat een verdubbeling van het energieverbruik resulteert in een kostenverhoging van ongeveer 5 %.
- De standtijd van de membranen heeft een aanzienlijke invloed op de kosten doordat bij verlenging van de standtijd de membraanvervangingskosten worden verlaagd. In deze studie is uitgegaan van een standtijd van 4 jaar. Verlenging van de standtijd met één jaar resulteert in een verlaging van de totale kosten met ongeveer 20%.
- De membraanprijs heeft eveneens een aanzienlijke invloed op de kosten. Met name voor geïntegreerde membraanfiltratie is de invloed groot. Indien de membraanprijs wordt gehalveerd, worden de totale kosten met ongeveer 60% verlaagd.
- Evenals de membraanstandtijd, de membraanflux en de membraanprijs heeft de RWA/DWA-verhouding een grote invloed op de totale kosten. Bij een RWA/DWA-verhouding < 3 is nageschakelde membraanfiltratie aantrekkelijk voor rwzi's. Voor geïntegreerde membraanfiltratie geldt dat membraanfiltratie voor kleinere rwzi's interessant is bij een RWA/DWA-verhouding < 2 en voor grotere rwzi's bij een RWA/DWA-verhouding van 1,5.
- De hoogte van de slibverwerkingskosten heeft een geringe invloed op de totale kosten. Bij geïntegreerde membraanfiltratie resulteert een verdubbeling van de slibverwerkingskosten in een daling van ongeveer 9 % van de totale kosten. De slibverwerkingskosten zijn vrijwel niet van invloed op de kosten voor nageschakelde membraanfiltratie.
- De opbrengsten voor het effluent hebben een grote invloed op de kosten. Voor nageschakelde membraanfiltratie geldt dat vanaf een opbrengst van Hfl. 0,75 per m^3 (alleen DWA) de toepassing interessant is. Voor geïntegreerde membraanfiltratie varieert dit van Hfl. 0,75 per m^3 voor kleinere rwzi's tot

ongeveer Hfl. 1,75 voor grotere rwzi's om deze toepassing economisch interessant te maken.

- Voor kleine rwzi's zijn de kosten voor een persleiding van grote invloed op de totale kosten. Naar mate de rwzi groter wordt neemt deze invloed steeds verder af.

8.5 Toepassingsmogelijkheden van membraanfiltratie op rwzi's

Op basis van de conclusies uit de paragrafen 8.3 en 8.4 kunnen de toepassingsmogelijkheden van nageschakelde en geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's kwalitatief worden weergegeven. De resultaten worden gepresenteerd in de tabellen 14 en 15:

Tabel 14: Toepassingsmogelijkheden voor nageschakelde en geïntegreerde membraanfiltratie op nieuwe rwzi's.

| | kleine zuiveringen 10.000 v.e. | middelgrote zuiveringen 50.000 v.e. | grote zuiveringen 150.000 v.e. |
|---------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| nageschakelde membraanfiltratie | X | X | X/O |
| geïntegreerde membraanfiltratie | X/O | O | O |

X goede toepassingsmogelijkheden
 X/O redelijke toepassingsmogelijkheden
 O weinig toepassingsmogelijkheden

Tabel 15: Toepassingsmogelijkheden voor nageschakelde en geïntegreerde membraanfiltratie op bestaande rwzi's.

| | kleine zuiveringen 10.000 v.e. | middelgrote zuiveringen 50.000 v.e. | grote zuiveringen 150.000 v.e. |
|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| nageschakelde membraanfiltratie | X | X | X/O |
| geïntegreerde membraanfiltratie compactstelsel | X | X/O | O |
| hyper laagbelast systeem | O | O | O |

X goede toepassingsmogelijkheden
 X/O redelijke toepassingsmogelijkheden
 O weinig toepassingsmogelijkheden

8.5.1 Nageschakelde membraanfiltratie

De toepassing van nageschakelde membraanfiltratie op rwzi's lijkt voor vrijwel alle zuiveringscapaciteiten interessant. Het toe te passen membraanfiltratiesysteem zal hiervoor aan de volgende voorwaarden moeten voldoen:

- De membraanflux bedraagt minimaal 40 - 80 l/m².h.
- De membraanstandtijd is minimaal 2 - 4 jaar.
- Het energieverbruik is minder dan 3 kWh/m³.

Voor grotere rwzi's geldt dat de flux minimaal 80 l/m².h moet bedragen en de membraanstandtijd minimaal 4 jaar.

Het hybride flow systeem voldoet aan deze parameters. De membraanflux bedraagt meer dan 80 l/m².h en het energieverbruik bedraagt circa 0,2 kWh/m³. De standtijd van de membranen is, gezien de geringe ervaring, op dit moment niet bekend. De verwachting is wel dat een standtijd van 2 jaar haalbaar is.

Om de kosten voor de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie lager of tenminste gelijk te houden in vergelijking met een alternatief zal aan minimaal één van de volgende randvoorwaarden moeten worden voldaan. Deze randvoorwaarden zijn afhankelijk van de specifieke omstandigheden:

- Alleen het DWA-debiet wordt behandeld met nageschakelde membraanfiltratie (hierbij is de RWA/DWA-verhouding 1).
- De opbrengst van het effluent (DWA) bedraagt minimaal Hfl. 0,75/m³.
- Er worden kosten vermeden voor het aanleggen van een persleiding voor het verplaatsen van het lozingspunt (dit is met name doorslaggevend voor kleinere rwzi's).

Bij een eventueel mogelijke aanscherping van de effluenteisen past nageschakelde membraanfiltratie goed in een gefaseerde aanpak. Bij het toepassen van aanvullende technieken, zoals bijvoorbeeld omgekeerde osmose, die de effluentkwaliteit verder kunnen verbeteren, is voorbehandeling van het effluent door middel van micro- of ultrafiltratie vaak noodzakelijk.

8.5.2 Geïntegreerde membraanfiltratie

Geïntegreerde membraanfiltratie als een compact zuiveringssysteem is goed toepasbaar voor rwzi's kleiner dan 10.000 v.e. De toepassingsmogelijkheden voor grotere rwzi's zijn op dit moment nog sterk afhankelijk van specifieke lokale voorwaarden. De belangrijkste economische reden om geïntegreerde membraanfiltratie toe te passen als een compact zuiveringssysteem is dat kosten bespaard kunnen worden voor de uitbreiding van een bestaande rwzi. Ruimtegebrek, al of niet gecombineerd met specifieke eisen aan de effluentkwaliteit, is eveneens een belangrijk argument voor het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie op bestaande of nieuwe rwzi's. Voor de realisatie van een compacte zuivering zal het membraanfiltratiesysteem aan de volgende voorwaarden, of een combinatie daarvan, moeten voldoen:

- De membraanflux bedraagt minimaal 40 l/m².h bij kleinere rwzi's en minimaal 80 l/m².h bij grotere rwzi's.
- De membraanstandtijd is minimaal 4 jaar.
- Het energieverbruik is lager dan 3 kWh/m³.

Met het cross-flow systeem en semi cross-flow systeem lijken deze parameters haalbaar te zijn, waarbij bij het cross-flow systeem een hoger energieverbruik gerechtvaardigd wordt door een hogere membraanflux.

Om de kosten voor de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie als een compact zuiveringssysteem lager of tenminste gelijk te houden in vergelijking met die van een alternatief, zal aan minimaal één van de volgende randvoorwaarden moeten worden voldaan. Deze randvoorwaarden zijn afhankelijk van de specifieke omstandigheden.

- De opbrengst van het effluent (DWA) bedraagt minimaal Hfl 1,-/m³.
- Er worden kosten vermeden voor het aanleggen van een persleiding voor het verplaatsen van het lozingspunt.
- De RWA/DWA-verhouding wordt minimaal verlaagd tot een factor 3. Dit kan bijvoorbeeld plaatsvinden door het gedeeltelijk bufferen van het RWA. Ook kunnen membraansystemen worden toegepast die tijdelijk in capaciteit verhoogd kunnen worden.

Op basis van de huidige stand der techniek lijkt geïntegreerde membraanfiltratie als een hyper laagbelast systeem weinig toepassingsmogelijkheden te hebben voor rwzi's. De belangrijke reden hiervoor is dat de specifieke (economische) voordelen van een hyper laagbelast zuiveringssysteem, zoals een zeer lage slibproductie en een hogere processtabiliteit onvoldoende opwegen tegen de kosten voor membraanfiltratie.

In deze studie zijn de twee uiterste vormen van geïntegreerde membraanfiltratie beschreven:

- geïntegreerde membraanfiltratie als een hyper laagbelast systeem;
- geïntegreerde membraanfiltratie als een compactstelsysteem.

Voor het compactstelsysteem lijken toepassingsmogelijkheden voor rwzi's aanwezig, terwijl deze voor geïntegreerde membraanfiltratie als een hyper laagbelast systeem nog afwezig zijn. Voor geïntegreerde membraanfiltratie geldt echter dat er vele tussenvormen mogelijk zijn. In de praktijk zal vaak voor een tussenvorm worden gekozen, waarbij een hoge volumebelasting (compactstelsysteem) wordt gecombineerd met een lagere slibbelasting. Afhankelijk van specifieke omstandigheden kan geïntegreerde membraanfiltratie interessant zijn.

9 Conclusies

Op basis van de actuele ervaringen en ontwikkelingen op het gebied van membraanfiltratie op rwzi's in Nederland en in het buitenland kunnen de volgende conclusies worden getrokken voor de mogelijkheden voor het toepassen van nageschakelde en geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's.

- Het hybride-flow systeem wordt momenteel gezien als de stand der techniek voor nageschakelde membraanfiltratie. Voor geïntegreerde membraanfiltratie is een aantal systemen toe te passen als cross-flow membraanfiltratie, het platensysteem en het capillairsysteem. Daarnaast zijn verschillende systemen in ontwikkeling zoals het semi cross-flow systeem.
 - In technisch opzicht kunnen de volgende kennishiaten worden aangegeven voor de toepassing van nageschakelde membraanfiltratie op rwzi's:
 - het effect van slibuitspoeling uit de nabezinktank op het membraanfiltratieproces;
 - de toe te passen reinigingsmethoden;
 - het verloop/handhaven van de membraanflux op lange termijn.
 - Voor de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie worden in technisch opzicht de volgende kennishiaten geconstateerd:
 - de haalbare membraanflux;
 - het benodigde energieverbruik;
 - de standtijd van de membranen;
 - de flexibiliteit voor RWA/DWA-variaties;
 - het bedieningsgemak.
 - In technologisch opzicht worden de volgende aspecten als voornaamste kennishiaten geconstateerd voor de toepassing van geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's:
 - de invloed op de fosfaatverwijdering;
 - het effect van accumulatie van specifieke verbindingen op de processtabiliteit;
 - de ontwaterbaarheid van het actiefslib uit een systeem met geïntegreerde membraanfiltratie.
- De haalbare effluentkwaliteit is voor zowel nageschakelde membraanfiltratie als voor geïntegreerde membraanfiltratie nog een punt van aandacht.
- De economische haalbaarheid van membraanfiltratie op rwzi's is sterk situatieafhankelijk. De belangrijke aspecten hierbij die niet direct aan membraanfiltratie zijn gerelateerd, zijn:
 - de opbrengst van het effluent;
 - de RWA/DWA-verhouding;
 - het vermijden van een persleiding voor het verleggen van het lozingspunt.

- Het toepassen van nageschakelde membraanfiltratie op rwzi's kan voor alle zuiveringscapaciteiten interessant zijn.
- Het toepassen van geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's is alleen interessant voor rwzi's met een capaciteit < 10.000 v.e. en wanneer dit wordt uitgevoerd als

een compactstelsel. Geïntegreerde membraanfiltratie op rwzi's als hyper laagbelast systeem vindt nog weinig plaats.

- De kosten voor slibverwerking hebben bij geïntegreerde membraanfiltratie weinig invloed op de totale kosten voor membraanfiltratie.
- De economische haalbaarheid is sterk afhankelijk van parameters die direct invloed hebben op het membraanfiltratieproces:
 - de membraanflux heeft een groot effect op de operationele kosten;
 - de standtijd van de membranen en de membraanprijs hebben een aanzienlijke invloed op de kosten.
- Het energieverbruik voor membraanfiltratie heeft nauwelijks effect op de kosten.
- De toepassing van nageschakelde of geïntegreerde membraanfiltratie is interessant wanneer minimaal aan de volgende, direct aan membraanfiltratie gerelateerde voorwaarden, wordt voldaan:

| | Nageschakeld | Geïntegreerd |
|-------------------------------|--------------|--------------|
| Flux [$l/m^2 \cdot h$] | > 40 - 80 | > 40 |
| Standtijd membranen [jaar] | > 2 - 4 | > 4 |
| Energieverbruik [kWh/m^3] | < 3 | < 3 |

Met het hybride-flow systeem kan aan de bovenstaande voorwaarden voldaan worden.

- De toepassing van nageschakelde of geïntegreerde membraanfiltratie is interessant wanneer aan één van de volgende voorwaarden wordt voldaan die niet direct aan membraanfiltratie gerelateerd zijn:

| | Nageschakeld | Geïntegreerd |
|---|-------------------------------|-------------------------------|
| RWA/DWA-verhouding [-] | < 1 (alleen DWA) | < 3 |
| Effluentopbrengst [Hfl/m^3] | > 0,75 | > 1,- |
| Vermeden persleiding voor verleggen lozingspunt | met name voor kleinere rwzi's | met name voor kleinere rwzi's |

Literatuur

- 1 Bakx, T. en van Bree, R., 1997. *Optimalisatie membraanfiltratie, resultaten van een proefonderzoek.. Toegepast onderzoek naar de mogelijkheden om het membraanfiltratie proces in membraanbioreactoren verder te ontwikkelen.* Afstudeerproject HAS Den Bosch.
- 2 STOWA, 1996. *Enkelvoudig reaktor systeem voor ammoniumverwijdering via nitriet.* STOWA rapport 96-01.
- 3 Dijk, L. van en Roncken, G.C.G., 1994. *Combinatie van biologische afvalwaterzuivering en membraanfiltratie.* H₂O (27), nr. 2.
- 4 Eikelboom, D.H. et al., 1993. *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.
- 5 Frenzel, J., 1997. *Betriebserfahrungen mit Cross-Flow und Dead-End Filtration zur Biomasse- und Partikelzurückhaltung.* Möchlichkeiten und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung.
- 6 Glutek, B., 1995. *Zeeweed microfiltration membrane modules.* Zenon Environmental Inc. Burlington, Canada.
- 7 Granet, I., 1971. *Fluid mechanics for engineering technology.* Prentice Hall Career & Technology, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- 8 Günder, B., 1997. *Belebungsverfahren mit minimaler Überschußschlammproduktion.* Einsatz von Membranen in der Abwassertechnik. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. Band 145.
- 9 Holt, J.G., Krieg, N.R. et al., 1994. *Bergey's manual of determinative bacteriology.* Ninth edition, Williams and Wilkins, Baltimore, Maryland.
- 10 Hubert Stavoren bv, 1997. *Algemene produktinformatie Hybride Flow Filtratie.*
- 11 Kampf, R. et al., 1996. *Nabehandeling van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater in een moerassysteem met hylofyten en waterplanten, opzet van een vierjarig demonstratieproject op praktijkschaal op rwzi Evertsekoog.* H₂O (29), nr. 14.
- 12 Koot, A.C.J.. *Behandeling van afvalwater.* Uitgeverij Waltman, Delft.
- 13 Kraft, A. und Mende, U., 1996. *Niedrige Energie Membranverfahren zum Biomasserückhalt in Abwasserreinigungsanlagen; Einsatz von getauchten Membranen in der Abwasserreinigung.* Kulmbach Deutschland. (Brochure Wabag, wassertechnische Anlagen GmbH).
- 14 Kramer, J.F., 1997. *Membraanfiltratie van gezuiverd afvalwater.* Lezing Nationale Milieutechniekdag 1997, Den Haag.

- 15 Krauth, K. and Staab, K.F., 1993. *Pressurized bioreactor with membrane filtration for wastewater treatment*. *Wat.Res.*, 27, pp 405-411.
- 16 Kollbach, J.-St., et al., 1997. *Planerische Aspekte bei Membrananlagen zur Wasser- und Abwasseraufbereitung*. Möchlichkeiten und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung.
- 17 Lawrence, D.P., 1997. *MBR operational experience*. Symposium Membraanbioreactoren in de waterbehandeling. Apeldoorn 1997.
- 18 Liebeskind, M., 1997. *Mikrobiologische Aspekte beim Einsatz der Membrantechnologie*. Möchlichkeiten und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung.
- 19 Mainzer, S.E. and Hempfling, W.P., 1975. *Effects of growth temperature on yield and maintenance during glucose-limited continious colture of E-coli*. *Job* 126/1, 251-256.
- 20 Merks, C.W.A.M. et al., 1996. *Membraantechnologie gaat uit oogpunt van kwaliteit, milieu en kosten concurreren met conventionele technieken*. Verslag KIWA-workshop 'Membraantechnologie'. *H₂O*, 21, pp 649-651.
- 21 Möslang, H., 1997. *ZeeWeed: getauchte Mikrofiltrationsmembranen zur Biomassenabtrennung in der kommunalen Abwasserbehandlung*. Möchlichkeiten und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung.
- 22 Nooijen, W.F.J.M., 1997. *Microfiltratie: sleutel voor nieuwe deuren*. Lezing Nationale Milieutechniekdag 1997, Den Haag.
- 23 Pankhania, M., et al., 1994. *Hollow fibre bioreactors for wastewater treatment using bubbleless membrane aeration*. *Wat. Res.* Vol. 28, No. 10. Pp 2233-2236.
- 24 Rautenbach, R., 1995. *Membranverfahren, Vorlesungsunterlagen in 2 Teilen*. Institut für Verfahrenstechnik, RWTH Aachen.
- 25 Rautenbach, R., et al., 1997. *Entwicklung des Plattenmoduls für die Ultrafiltration von biologischen Abwassern*. Möchlichkeiten und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung.
- 26 Rienks, J. en Meinema, K., 1995. *Inventarisatie en evaluatie van technieken voor het polijsten van rwzi-effluent*. *H₂O* (28), nr. 18.
- 27 Roncken, G.C.G. et al, 1996. *Gesloten kringlopen zijn de toekomst. Technologische oplossingen om de industriële waterkringloop te sluiten*. MilieuMarkt, september 1996, p.p. 43-47.
- 28 Roncken, G.C.G., 1997. *Erfahrungen aus der Niederlanden mit der Membrantechnik bei der Abwasserreinigung*. Einsatz von Membranen in der Abwassertechnik. Stuttgartar Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. Band 145.

- 29 Rouweler, J.W., 1995. *Membraanprocessen in de voedingsmiddelen-, milieu- en biotechnologie*. Dictaat Agrarische Hogeschool Den Bosch. 's Hertogenbosch, dict.nr. 6.58.2.2.
- 30 Sarfert, F., et al., 1997. *Membranfiltration zur Keim- und P-Elimination im Ablauf kommunaler Kläranlagen*. Möchlichkeiten und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung.
- 31 Schippers, J.C. en Kruithof, J.C., 1997. *Membraanfiltratie over 10 tot 25 jaar - Behandeling van oppervlaktewater*. H₂O (30), nr. 6.
- 32 Schreijer, M. en Kampf, R., 1995. *Nabehandeling van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater in een moerassysteem; vooronderzoek*. H₂O (28), nr. 11.
- 33 STORA, 1988. *Keuze en kosten van rioolwaterzuiveringsinrichtingen als functie van effluenteisen*. Rapport 88-02, Stora, Den Haag.
- 34 STORA/RIZA, 1991. *Perspectives for the utilization of membrane-assisted sludge retention in municipal waste water treatment plants*.
- 35 STORA, 1992. Handleiding biologische fosfaatverwijdering. Programma PN-1992, Stora.
- 36 Stork Friesland b.v., 1996. *Produktinformatie Stork Hybrid Flow System*. Stork Friesland b.v., Gorredijk.
- 37 STOWA, 1995. *Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen. Praktijkonderzoek aan de membraanbioreactor bij het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk*. ISBN nr. 90.74476.33.3.
- 38 Ven, J.F.G.M., van der, et al., 1997. *Membraanfiltratie. De technologie om de waterkringloop te sluiten*. De Klaarmeester, nr. 2, pp 15-24.
- 39 Voßenkaul, K. und Rautenbach, R., 1997. *Konzepte für Ultrafiltrationsanlagen - Modulbauformen und Betriebsweisen*. Möchlichkeiten und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung.
- 40 WABAG Technische Anlagen GmbH. Produktblad.
- 41 Wagner, F., 1997. *Erfahrungen mit Membranbioreaktoren in der Praxis*. Möchlichkeiten und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung.
- 42 Wehrle Werk AG, 1996. Aktuelles. Ausgabe Februar 1996, nr. 3. Emmendingen.
- 43 Wienands, H., 1995. *Auslegung und Betrieb von Membranbioreaktoren bei der Behandlung von Sickerwässern aus Haus- und Sondermülldeponien*. Vortrag.
- 44 Wiesmann, U., 1986. *Kinetics of aerobic sewage treatment deduced from decomposition of organic compounds and nitrification processes*. Chemie-Ingenieur-Technik Vol. 58, No. 6, pp. 464-474.

- 45 X-flow Membrane Filtration, 1996. *Produktinformatie Micro- & Ultrafiltratie*. X-Flow, Almelo.
- 46 Yamagiwa, K., et al., 1991. *Activated sludge treatment of small-scale wastewater by a plunging liquid jet bioreactor with cross-flow filtration*. *Bioresource Technology* 37, pp 215-222.
- 47 Zenon, 1995. Algemene produktinformatie
- 48 Zhang, B., et al., 1997. *Floc size ditribution and bacterial activities in membrane separation activated sludge processes for small-scale wastewater treatment/reclamation*. *Wat.Sci. Tech.* Vol. 35, No. 6, pp 37-44.
- 49 CBS, 1997. *Waterkwaliteitsbeheer. Deel B, zuivering van afvalwater, 1995*. Centraal Bureau voor Statistiek, Voorburg/Heerlen.



Bijlage I: Effecten van membraanfiltratie op het biologisch zuiveringsproces - toelichting

Effecten op de slibgroei - substraatverbruik

De energie voor maintenance wordt gebruikt voor een scala van energieverbruikende reacties [8], zoals bijvoorbeeld:

- continue vernieuwing van celmateriaal;
- osmotische arbeid om concentratieverschillen tussen de cel en de omgeving in evenwicht te houden;
- transport van substraat;
- in stand houden van bijvoorbeeld enzymatische activiteiten;
- in stand houden van pH-evenwichten.

Op het energieverbruik van maintenance zijn verschillende procesparameters van invloed. De voornaamste zijn de slibbelasting en de temperatuur.

- Slibbelasting
Het energieverbruik voor maintenance is in hoofdzaak afhankelijk van de biomassa-concentratie. Bij een verlaging van de substraatvracht bij gelijkblijvende biomassaconcentratie (verlaging van de slibbelasting) zal een vrijwel gelijke hoeveelheid energie worden verbruikt voor maintenance. De hoeveelheid energie die beschikbaar is voor slibgroei neemt hierdoor af. Door verlaging van de slibbelasting kan derhalve de netto slibgroei worden geremd.
- Temperatuur
Uit onderzoek [19] is gebleken dat bij toenemende temperatuur het energieverbruik voor maintenance sterk toeneemt. Hiervoor wordt de mogelijke verklaring gegeven dat meer energie nodig is voor het in stand houden van concentratieverschillen tussen de cel en de omgeving. Dit is noodzakelijk doordat de diffusiesnelheden sterk toenemen bij temperatuurverhoging. Geconcludeerd kan worden dat bij toenemende temperatuur de netto biomassa-productie daalt.

Procesparameters - toelichting temperatuurstoename

Per m³ reactorvolume kan de extra energie-inbreng eenvoudig worden berekend voor een systeem met 20 kg d.s./m³ in vergelijking met een systeem met 4 kg d.s./m³. Hiervoor worden de volgende uitgangspunten gehanteerd [3]:

- | | | |
|----------------------------------|---------------|-----------------------------|
| ● Energie biologische omzetting: | nitrificatie: | 26.660 kJ/kg N |
| | CZV-oxydatie: | 14.065 kJ/kg O ₂ |
| ● CZV-verwijdering: | | 0,2 kg CZV/kg d.s..d |
| ● NKj-verwijdering: | | 0,01 kg NKj/kg d.s..d |

Voor een drogestofgehalte van 20 kg d.s./m³ kan worden berekend dat 774 W per m³ reactorvolume aan biologische energie wordt geproduceerd, bij een drogestofgehalte van 4 kg/m³ wordt slechts 154 W per m³ reactorvolume geproduceerd. Indien wordt uitgegaan van geen warmteverlies naar de omgeving resulteert dit in een toename van de temperatuur van 13,6 °C per dag. Vanwege het feit dat bij een hogere temperatuur de warmteverliezen naar de omgeving toenemen, zal de temperatuurverhoging stabiliseren bij een verschil in temperatuur van naar schatting 5 - 10 °C. De warmteverliezen via de wanden zijn, bij een gelijke

systeemtemperatuur, bij een membraanbioreactor kleiner dan bij een conventionele zuivering vanwege de compacte bouw.

Procesparameters - toelichting zuurstofoverdracht

Voor het verkrijgen van een indicatie van de verhoogde zuurstofvraag door enerzijds een hogere volumetrische belasting en anderzijds door een lagere slibproductie worden navolgend enkele voorbeelden uitgewerkt.

Voor een laagbelaste huishoudelijke zuiveringsinstallatie gelden in het algemeen de volgende belastingen [12]:

- BZV-belasting 0,04 kg BZV/kg d.s..d
- CZV-belasting 0,10 kg CZV/kg d.s..d
- drogestofgehalte 4 kg d.s./m³
- volumetrische belasting 0,40 kg CZV/m³.d

Uitgaande van een slibyield van 0,5 kg d.s./kg CZV_{verw} bedraagt de specifieke zuurstofvraag ongeveer 0,2 kg O₂/m³.d.

Het verhogen van de biomassaconcentratie in een biologische zuivering kan om meerdere redenen plaatsvinden:

- verlagen van de slibproductie door verlaging van de slibbelasting;
- verhogen van de zuiveringscapaciteit.

Verlagen van de slibproductie

Voor het verlagen van de slibproductie wordt de slibbelasting verlaagd door het verhogen van de biomassaconcentratie terwijl de volumetrische belasting gelijk blijft. Dit kan bijvoorbeeld leiden tot navolgende belastingen:

- BZV-belasting 0,005 kg BZV/kg d.s..d
- CZV-belasting 0,013 kg CZV/kg d.s..d
- drogestofgehalte 30 kg d.s./m³
- volumetrische belasting 0,40 kg CZV/m³.d

Gezien het feit dat de slibyield zal afnemen (bijvoorbeeld 0,1 kg d.s./kg CZV_{verw}), zal de specifieke zuurstofvraag toenemen tot ongeveer 0,36 kg O₂/m³.d..

Verhogen van de capaciteit

Indien alleen de zuiveringscapaciteit moet worden verhoogd en de slibproductie gelijk wordt gehouden, wordt de biomassaconcentratie verhoogd terwijl de volumetrische belasting evenredig toeneemt. Dit kan bijvoorbeeld leiden tot navolgende belastingen:

- BZV-belasting 0,04 kg BZV/kg d.s..d
- CZV-belasting 0,10 kg CZV/kg d.s..d
- drogestofgehalte 30 kg d.s./m³
- volumetrische belasting 3,0 kg CZV/m³.d

Ervan uitgaande dat de slibyield constant blijft (0,5 kg d.s./kg CZV_{verw}) zal de specifieke zuurstofvraag toenemen tot ongeveer 1,5 kg O₂/m³.d..

Door toename van de biomassaconcentratie wordt de zuurstofvraag in de zuivering verhoogd. Zowel in een laagbelast systeem (veelal oppervlakte beluchting) als in een hoogbelaste zuivering (veelal bellenbeluchting) zullen de grenzen van het beluchtingssysteem al relatief snel beperkend zijn voor de maximale zuiveringscapaciteit. Vanuit dit oogpunt is het handhaven van extreem hoge biomassaconcentraties (> 30 kg d.s./m³) dan ook niet zinvol.

P-verwijdering - vergelijking conventioneel / hoogbelaste MBR

Over het algemeen zal in een hyper laagbelaste membraanbioreactor minder slib geproduceerd worden. Uitgaande van 3 % P-opname in het slib is met deze membraanbioreactor minder biologische P-verwijdering haalbaar dan in een conventionele zuivering als men uitgaat van navolgende gemiddelde belastingen en slibproductie:

| | | |
|--------------------------|----------------|--------------------|
| Conventionele zuivering: | CZV-vracht | 10.000 kg/d |
| | slibproductie | 0,5 kg d.s./kg CZV |
| | P-verwijdering | 150 kg/d |
| Membraanbioreactor: | CZV-vracht | 10.000 kg/d |
| | slibproductie | 0,1 kg d.s./kg CZV |
| | P-verwijdering | 30 kg/d |

Op basis van bovenstaande vergelijking kan worden gesteld dat biologische P-verwijdering in de hoofdstroom in membraan bioreactoren praktisch niet mogelijk is, vanwege de lage slibproductie.

Voor P-verwijdering in een hyper laagbelaste membraanbioreactor dient te worden uitgegaan van chemische P-verwijdering (precipitatie) of biologische P-verwijdering met een P-releasestap in de zijstroom, gevolgd door chemische verwijdering. Bij chemische P-verwijdering kan voor-, simultane of nageschakelde P-verwijdering toegepast worden.

In een membraanbioreactor is biologische P-verwijdering mogelijk in combinatie met P-release en chemische precipitatie in een zijstroom. Hiertoe zal een aparte membraanunit geplaatst moeten worden om het P-rijke water van het slib te scheiden. Door middel van precipitatie kan het fosfaat uit het gefiltreerde water afgescheiden worden.

Bijlage II: Effecten van membraanfiltratie op de effluentkwaliteit - toelichting

Praktijkresultaten van de effluentkwaliteit na membraanfiltratie

Bij de poriediameter dient altijd rekening te worden gehouden met een zekere variatie en mogelijke beschadigingen van het membraan. Over het algemeen kan worden uitgegaan van de volgende poriegrootten per membraantype [25]:

- microfiltratie 0,08 - 1,2 μm
- ultrafiltratie 0,008 - 0,1 μm

Voor de micro-organismen is zowel de lengte als de breedte van het organisme van belang. Een indicatie van diameters van een aantal belangrijke micro-organismen wordt gepresenteerd in tabel A [18].

Tabel A: Afmetingen van verschillende micro-organismen

| Micro-organisme | Lengte [μm] | Breedte [μm] | |
|-----------------|---|------------------------------|------|
| Algen | Kiezelalg (<i>Synedra acus</i>) | 500 | 1,9 |
| | Blauwalg (<i>Aphanizomenon gracile</i>) | 60 | 2 |
| | Groenalg (<i>Chlorococcum infusionum</i>) | 10 | 10 |
| Protozoën | <i>Paramecium caudatum</i> | 180 | 45 |
| | <i>Giardia lamblia</i> | 12 | 5 |
| | <i>Cryptosporidium parvum</i> | 7 | 4 |
| Bacteriën | E-coli | 1,1 | 2,0 |
| | <i>Nitrobacter winogradskyi</i> | 0,6 | 1,0 |
| | <i>Pseudomonas aeruginosa</i> | 0,5 | 1,5 |
| Virussen | Hondsdoelheid | 0,3 | 0,1 |
| | Adenovirus (Hepatitis A + E) | 0,06 | 0,09 |
| | Enterovirus (Polio etc.) | 0,02 | 0,02 |

Uit bovenstaand overzicht blijkt dat algen, protozoën en een groot deel van de bacteriën met microfiltratie kunnen worden afgescheiden. Voor het verwijderen van kleinere bacteriën en virussen dient minstens ultrafiltratie te worden toegepast.

Bijlage III: Uitwerking van de kosten voor nieuwbouw

Investeringskosten voor een capaciteit van 50.000 v.e.

| | conventionele zuivering [Hfl.] | geïntegreerde membr.filtr. [Hfl.] | nageschakelde membr.filtr. [Hfl.] |
|---------------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Civiele investering | | | |
| . zandvanger | 188.000 | 188.000 | 188.000 |
| . voorbezinktank | 0 | 0 | 0 |
| . aëratietank | 4.725.000 | 945.000 | 4.725.000 |
| . nabezinktank | 1.482.000 | 0 | 1.631.000 |
| . retourslibgemaal | 96.000 | 0 | 106.000 |
| . terreinleidingen | 740.000 | 740.000 | 740.000 |
| . diversen | 1.185.000 | 1.185.000 | 1.188.000 |
| . persleiding | 10.000.000 | 0 | 0 |
| . subtotaal | 18.416.000 | 3.058.000 | 8.575.000 |
| Electromechanische investering | | | |
| . zandvanger | 188.000 | 188.000 | 188.000 |
| . voorbezinktank | 0 | 0 | 0 |
| . beluchting | 256.000 | 305.000 | 256.000 |
| . nabezinktank | 575.000 | 0 | 603.000 |
| . retourslibgemaal | 88.000 | 0 | 96.000 |
| . terreinleidingen | 82.000 | 82.000 | 82.000 |
| . elektrische installatie | 855.000 | 855.000 | 855.000 |
| . diversen | 805.000 | 805.000 | 805.000 |
| . membraanunit | 0 | 14.063.000 | 8.203.000 |
| . persleiding | 875.000 | 0 | 0 |
| . subtotaal | 3.724.000 | 16.298.000 | 11.085.000 |
| Investing voor membranen | | | |
| . membranen | 0 | 16.406.000 | 8.203.000 |
| . bijkomende kosten | 2.214.000 | 1.935.000 | 1.966.000 |
| . onvoorzien | 1.107.000 | 968.000 | 983.000 |
| . advieskosten | 2.214.000 | 1.935.000 | 1.966.000 |
| . BTW | 3.875.000 | 6.258.000 | 4.877.000 |
| TOTAAL INVESTERING | 31.550.000 | 46.858.000 | 37.655.000 |
| | | | |
| totaal investering per v.e. | 631 | 937 | 753 |

Exploitatiekosten voor een capaciteit van 50.000 v.e.

| | conventionele zuivering [Hfl./jaar] | geïntegreerde membr.filtr. [Hfl./jaar] | nageschakelde membr.filtr. [Hfl./jaar] |
|--|---|--|--|
| . rente/afschrijving civiel | 1.484.000 | 246.000 | 691.000 |
| . rente/afschrijving e/m | 300.000 | 1.313.000 | 894.000 |
| . onderhoud civiel | 92.000 | 15.000 | 43.000 |
| . onderhoud e/m | 112.000 | 489.000 | 333.000 |
| . energie | 263.000 | 720.000 | 345.000 |
| . membraanvervanging | 0 | 4.102.000 | 2.051.000 |
| . chemicaliën | 2.000 | 3.000 | 6.000 |
| . slibverwerkingskosten | 1.244.000 | 1.248.000 | 1.251.000 |
| . personeel | 240.000 | 320.000 | 320.000 |
| . lozingsheffing | 141.000 | 0 | 0 |
| . hergebruik van effluent | 0 | - 2.053.000 | - 2.053.000 |
| TOTAAL | 3.878.000 | 6.403.000 | 3.880.000 |
| | | | |
| totale bedrijfsvoeringskosten per v.e. | 78 | 128 | 78 |

**Bijlage IV: Spreadsheetmodel - nagescha-
kelde membraanfiltratie voor een rwzi met een
capaciteit van 50.000 v.e.**

MODELBEREKENINGEN VOOR NAGESCHAKELDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| stelsel | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | nagesch. membr.filtr. |

| | | BESTAAND | UITBREIDING | |
|---|----------------------|----------|-------------|-----|
| ALGEMENE GEGEVENS/UITGANGSPUNTEN | | | | |
| BIOLOGISCHE ZUIVERING | | | | |
| . Capaciteit | v.e. | : | 50.000 | |
| . Slibgehalte (biologisch) | kg ds/m ³ | : | 4 | |
| . Slibbelasting | kg BZV/(kg ds.d) | : | 0,050 | |
| . Slibproductie | kg d.s./kg BZV | : | 1,0 | |
| . CZV biologisch slib | kg CZV/kg d.s. | : | 1,0 | |
| . N-opname in slib | % | : | 6 | |
| . P-opname in slib | % | : | 2 | |
| . Temperatuur | gr.C | : | 15 | |
| | | | | |
| MEMBRAANFILTRATIE | | | | |
| . Membraanflux | l/m ² h | : | 80 | |
| . Energieverbruik | kWh/m ³ | : | 0,2 | |
| . Standtijd | jaar | : | 4 | |
| . Concentratiefactor | - | : | 10 | |
| | | | | |
| AFVALWATERGEGEVENS | | | | |
| AANVOER | | | | |
| . Gemiddelde aanvoer per uur (DWA) | m ³ /h | : | 625 | |
| . Gem. aantal aanvoeren per dag | h/d | : | 12 | |
| . Gemiddelde aanvoer per dag (DWA) | m ³ /d | : | 7.500 | |
| . RWA/DWA-verhouding | - | : | 3 | |
| . Maximale aanvoer (rwa) per uur | m ³ /h | : | 1.875 | |
| . CZV-belasting | kg/d | : | 4.500 | |
| . BZV-belasting | kg/d | : | 1.800 | |
| . Kj-N-belasting | kg/d | : | 500 | |
| . P-totaal-belasting | kg/d | : | 75 | |
| . BZV/Kj-N | - | : | 3,6 | |
| | | | | |
| EFFLUENTKWALITEIT | | | | |
| . CZV | mg/l | : | 50 | 40 |
| . BZV | mg/l | : | 3 | 2 |
| . N-totaal (jaargemiddelde) | mg/l | : | 8 | 7 |
| . Kj-N | mg/l | : | 4 | 3 |
| . NO ₃ -N | mg/l | : | 4 | 4 |
| . P-totaal | mg/l | : | 2 | 1,7 |
| . zwevend stof | mg/l | : | 10 | 0 |

MODELBEREKENINGEN VOOR NAGESCHAKELDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | nagesch. membr.filtr. |

BESTAAND

UITBREIDING

RWZI DIMENSIONERING

In dit model komen alleen de voor de vergelijking en berekeningen van belang zijnde aspecten aan de orde.

BELUCHTINGSBASSIN

Ontwerp

oxydatiesloot = 1
 carrousel = 2
 aeratietank = 3

| | | | | |
|---------------------------------|------------------|---|-------|-------|
| . Type beluchtingsbassin | - | : | 2 | 2 |
| . BZV-vracht | kg/d | : | 1.800 | 1.800 |
| . Slibgehalte | kg/m3 | : | 4,0 | 4,0 |
| . Slibbelasting | kg BZV/(kg ds.d) | : | 0,050 | 0,050 |
| . Totaal volume | m3 | : | 9.000 | 9.000 |
| . Verblijftijd bij gem. aanvoer | h | : | 14,4 | 14,4 |
| . Verblijftijd bij max. aanvoer | h | : | 4,8 | 4,8 |
| . Ruimtebelasting | kg BZV/m3.d | : | 0,20 | 0,20 |
| . Slibproductie biologisch | kg d.s./d | : | 1.800 | 1.800 |
| . Afscheiding membraanfiltratie | kg d.s./d | : | 0 | 75 |
| . Uitspoeling zwevend stof | kg d.s./d | : | 75 | 0 |
| . Slibleeftijd | d | : | 19,2 | 19,2 |

Nitrificatie

| | | | | |
|--------------------|--------|---|-----|-----|
| . Kj-N belasting | kg N/d | : | 500 | 500 |
| . N in surplusslib | kg N/d | : | 108 | 116 |
| . NKj in effluent | kg N/d | : | 30 | 23 |
| . Te nitrificeren | kg N/d | : | 362 | 362 |

Denitrificatie

| | | | | |
|-----------------------|--------|---|-----|-----|
| . Nitraat in effluent | mg N/l | : | 30 | 30 |
| . Te denitrificeren | kg N/d | : | 332 | 332 |

Dimensies

| | | | | |
|-------------------------------|----|---|-------|-------|
| . Volume beluchtingsbassin | m3 | : | 9.000 | 9.000 |
| . Volume denitrificatieruimte | m3 | : | 0 | 0 |
| . Totaal volume | m3 | : | 9.000 | 9.000 |

NABEZINKTANK

Ontwerp volgens STOWA richtlijnen

| | | | | |
|-------------------------------------|-------|---|-------|-------|
| . Maximale aanvoer | m3/h | : | 1.875 | 2.083 |
| . Gemiddelde aanvoer | m3/h | : | 625 | 694 |
| . Volume beluchting (totaal) | m3 | : | 9.000 | 9.000 |
| . Slib volume index | ml/g | : | 150 | 150 |
| . Slibgehalte beluchting (Ga) | kg/m3 | : | 4,0 | 4,0 |
| . Min. slibgehalte beluchting RWA | kg/m3 | : | 2,8 | 2,8 |
| . Slibvolume bij gem aanvoer (VSv) | ml/l | : | 600 | 600 |
| . Max slibbuffering bij max aanvoer | % | : | 30 | 30 |
| . Min. slibvolume bij max aanvoer | ml/l | : | 420 | 420 |
| . Conc. gebuf. slib in NBT bij RWA | kg/m3 | : | 3,2 | 3,2 |
| . Bodemhelling | m/m | : | 0,08 | 0,08 |
| . Aantal nabezinktanks | - | : | 2 | 3 |

MODELBEREKENINGEN VOOR NAGESCHAKELDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | nagesch. membr.filtr. |

| | | | BESTAAND | UITBREIDING |
|------------------------------------|-------------------------------------|---|----------|-------------|
| Dimensies | | | | |
| . Berekende oppervlaktebelasting | m ³ /(m ² .h) | : | 0,71 | 0,71 |
| . Berekend bezinkoppervlak totaal | m ² | : | 2.647 | 2.941 |
| . Extra bezinkoppervlak | m ² | : | 0 | 294 |
| . Diameter bestaande bezinktank(s) | m | : | 41,1 | 41,1 |
| . Diameter nieuwe bezinktank(s) | m | : | | 19,4 |
| . Kantdiepte | m | : | 2,0 | 2,0 |
| . Omloopgootbreedte | m | : | 0,8 | 0,8 |

MEMBRAANFILTRATIE

Ontwerp

Voor het ontwerp binnen deze opzet wordt uitgegaan van algemene aannamen voor de flux, de standtijd en het energieverbruik.

| | | | |
|-----------------------------|--------------------|---|-----|
| . Membraanflux | l/m ² h | : | 80 |
| . Standtijd | jaar | : | 4 |
| . Specifiek energieverbruik | kWh/m ³ | : | 0,2 |

Dimensies

| | | | |
|-------------------------------|-------------------|---|--------|
| . Membraanoppervlak min (DWA) | m ² | : | 7.813 |
| . Membraanoppervlak max (RWA) | m ² | : | 23.438 |
| . Energieverbruik per jaar | MWh/jaar | : | 548 |
| . Concentraatdebiet (gem) | m ³ /d | : | 833 |
| . Concentraatdebiet (gem) | m ³ /h | : | 69 |
| . Concentraatdebiet (max) | m ³ /h | : | 208 |
| . Permeaatdebiet (gemiddeld) | m ³ /d | : | 7.500 |

MODELBEREKENINGEN VOOR NAGESCHAKELDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | nagesch. membr.filtr. |

UITGANGSPUNTEN VOOR DE KOSTENBEREKENINGEN

INVESTERINGSKOSTEN

| | | |
|--|-------------------|-------|
| . Membraanfiltratie - electro/mechnische investering | Hfl./m2 oppervlak | 300 |
| . Membraanfiltratie - investering membranen | Hfl./m2 oppervlak | 350 |
| . Bezinktank - civiele investering | Hfl./m2 oppervlak | 560 |
| . Bezinktank - electro/mechnische investering | Hfl./m diameter | 7.000 |
| . Persleiding - civiele investering | Hfl./m lengte | 2.000 |
| . Persleiding - electro/mechanische investering | Hfl./kW | 3.500 |
| . Bijkomende kosten | % | 10 |
| . Onvoorzien | % | 5 |
| . Advieskosten | % | 10 |
| . BTW | % | 17,5 |

EXPLOITATIEKOSTEN

| | | |
|--|---------------|--------|
| . Rentevoet | % | 7,0 |
| . Afschrijvingstermijn civiel | jaar | 30 |
| . Afschrijvingstermijn electro/mechanisch | jaar | 15 |
| . Jaarlijkse onderhoudskosten civiel | % | 0,5 |
| . Jaarlijkse onderhoudskosten electro/mechanisch | % | 3,0 |
| . Energiekosten | Hfl./kWh | 0,15 |
| . Personeelskosten | Hfl./manjaar | 80.000 |
| . Slibverwerkingskosten | Hfl./ton d.s. | 1.250 |
| . Chemicaliënkosten voor membraanfiltratie | Hfl./m3 | 0,04 |
| . Lozingsheffing | Hfl./v.e. | 32,50 |
| . Opbrengsten effluenthergebruik | Hfl./m3 | 0,75 |

Algemene uitgangspunten t.b.v. kostenberekeningen

| | | |
|--------------------------------------|---------|-------|
| . Extra personeel membraanfiltratie | manjaar | 1,0 |
| . Membraanstandtijd | jaar | 4 |
| . Lengte vermeden persleiding | m | 5.000 |
| . Energieverbruik persleiding | kWh/m3 | 0,20 |
| . Geïnstalleerd vermogen persleiding | kW | 125 |

MODELBEREKENINGEN VOOR NAGESCHAKELDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| stelsiem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | nagesch. membr.filtr. |

KOSTENINDICATIE - INVESTERINGSKOSTEN

| | | | |
|----------------------------|------|--|------------|
| . Uitbreiding nabezinktank | | | |
| civiel | Hfl. | | 164.706 |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 135.461 |
| . Membraanfiltratie | | | |
| membranen | Hfl. | | 8.203.125 |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 7.031.250 |
| | | | + |
| . SUBTOTAAL AANNEEMSOM | Hfl. | | 15.534.542 |

VERMEDEN INVESTERINGSKOSTEN (Aanneemsom)

| | | | |
|------------------------|------|--|------------|
| . Persleiding | | | |
| civiel | Hfl. | | 10.000.000 |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 437.500 |
| | | | + |
| . SUBTOTAAL AANNEEMSOM | Hfl. | | 10.437.500 |

EXTRA INVESTERINGSKOSTEN

| | | | |
|---------------------------------|-------------|--|------------------|
| . Aanneemsom Civiel | Hfl. | | -9.835.294 |
| . Aanneemsom Electro/mechanisch | Hfl. | | 6.729.211 |
| . Inkoop Membranen | Hfl. | | 8.203.125 |
| . Bijkomende kosten | Hfl. | | -310.608 |
| . Onvoorzien | Hfl. | | -155.304 |
| . Advieskosten | Hfl. | | -310.608 |
| . BTW | Hfl. | | 891.982 |
| | | | + |
| TOTAAL | Hfl. | | 5.212.503 |

MODELBEREKENINGEN VOOR NAGESCHAKELDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | nagesch. membr.filtr. |

KOSTENINDICATIE - EXPLOITATIEKOSTEN

| | | |
|--|-----------|-----------|
| . Rente en afschrijving civiel | Hfl./jaar | 13.273 |
| . Rente en afschrijving electro/mechanisch | Hfl./jaar | 786.866 |
| . Onderhoud civiel | Hfl./jaar | 824 |
| . Onderhoud electro/mechanisch | Hfl./jaar | 215.001 |
| . Energie | Hfl./jaar | 82.125 |
| . Membraanvervanging | Hfl./jaar | 2.050.781 |
| . Extra chemicaliën | Hfl./jaar | 131.400 |
| . Slibverwerkingskosten | Hfl./jaar | 34.219 |
| . Personeel | Hfl./jaar | 80.000 |
| . Lozingsheffing | Hfl./jaar | 0 |
| | | + |
| . SUBTOTAAL | Hfl./jaar | 3.394.489 |

VERMEDEN KOSTEN / VERDIENSTEN

| | | |
|--|-----------|-----------|
| . Rente en afschrijving civiel | Hfl./jaar | 805.864 |
| . Rente en afschrijving electro/mechanisch | Hfl./jaar | 48.035 |
| . Onderhoud civiel | Hfl./jaar | 50.000 |
| . Onderhoud electro/mechanisch | Hfl./jaar | 13.125 |
| . Energie | Hfl./jaar | 82.125 |
| . Lozingsheffing | Hfl./jaar | 50.668 |
| . Effluenthergebruik | Hfl./jaar | 2.053.125 |
| | | + |
| . SUBTOTAAL | Hfl./jaar | 3.102.942 |

EXTRA EXPLOITATIEKOSTEN / BESPARINGEN

| | | |
|--|-----------|------------|
| . Rente en afschrijving civiel | Hfl./jaar | -792.591 |
| . Rente en afschrijving electro/mechanisch | Hfl./jaar | 738.831 |
| . Onderhoud civiel | Hfl./jaar | -49.176 |
| . Onderhoud electro/mechanisch | Hfl./jaar | 201.876 |
| . Energie | Hfl./jaar | 0 |
| . Membraanvervanging | Hfl./jaar | 2.050.781 |
| . Extra chemicaliën | Hfl./jaar | 131.400 |
| . Personeel | Hfl./jaar | 80.000 |
| . Slibverwerkingskosten | Hfl./jaar | 34.219 |
| . Lozingsheffing | Hfl./jaar | -50.668 |
| . Effluenthergebruik | Hfl./jaar | -2.053.125 |
| | | + |

| | | |
|---------------|------------------|----------------|
| TOTAAL | Hfl./jaar | 291.547 |
| | Hfl./v.e. | 5,83 |

**Bijlage V: Spreadsheetmodel - geïntegreerde
membraanfiltratie voor een verlaging van de
slibbelasting op een rwzi van 50.000 v.e.**

MODELBEREKENINGEN VOOR GEINTEGREERDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | 50.000 verl. slibbel. |

| | | BESTAAND | UITBREIDING |
|---|------------------------|----------|-------------|
| ALGEMENE GEGEVENS/UITGANGSPUNTEN | | | |
| REDEN VOOR UITBREIDING | | | |
| (capaciteit=1, slibbelasting=2) | | | 2 |
| BIOLOGISCHE ZUIVERING | | | |
| . Capaciteit | v.e. | 50.000 | 50.000 |
| . Slibgehalte (biologisch) | kg ds/m ³ | 4 | 20 |
| . Slibbelasting | kg BZV/(kg ds.d) | 0,050 | 0,010 |
| . Slibproductie | kg d.s./kg BZV | 1,0 | 0,32 |
| . Energieverbruik beluchting | | | |
| borstel/puntbeluchting | kg O ₂ /kWh | 1,5 | 1,5 |
| bellenbeluchting | kg O ₂ /kWh | 2,0 | 2,0 |
| . CZV biologisch slib | kg CZV/kg d.s. | 1,0 | 1,0 |
| . N-opname in slib | % | 6 | 6 |
| . P-opname in slib | % | 2 | 2 |
| . Netto Me/P-verhouding (sim) | mol/mol | 1 | 1 |
| . Temperatuur | gr.C | 15 | 17 |
| . Zandvang aanwezig | ja=1, nee=0 | 1 | 1 |
| . Voorbezinktank aanwezig | ja=1, nee=0 | 0 | 0 |
| MEMBRAANFILTRATIE | | | |
| . Membraanflux | l/m ² h | | 40 |
| . Energieverbruik | kWh/m ³ | | 1,0 |
| . Standtijd | jaar | | 4 |
| AFVALWATERGEGEVENS | | | |
| AANVOER | | | |
| . Gemiddelde aanvoer per uur (DWA) | m ³ /h | 625 | 625 |
| . Gem aantal aanvoeruren per dag | h/d | 12 | 12 |
| . Gemiddelde aanvoer per dag (DWA) | m ³ /d | 7.500 | 7.500 |
| . RWA/DWA verhouding | - | 3 | 3 |
| . Maximale aanvoer (rwa) | m ³ /h | 1.875 | 1.875 |
| . CZV-belasting | kg/d | 4.500 | 4.500 |
| . BZV-belasting | kg/d | 1.800 | 1.800 |
| . Kj-N-belasting | kg/d | 500 | 500 |
| . P-totaal-belasting | kg/d | 75 | 75 |
| . BZV/Kj-N | - | 3,6 | 3,6 |
| EFFLUENTKWALITEIT | | | |
| . CZV | | 50 | 25 |
| . BZV | | 3 | 1 |
| . N-totaal (jaargemiddelde) | | 8 | 5 |
| . Kj-N | | 4 | 2 |
| . NO ₃ -N | | 4 | 3 |
| . P-totaal | | 2 | 1,7 |
| . Zwevend stof | | 10 | 0 |

MODELBEREKENINGEN VOOR GEINTEGREERDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | 50.000 verl. slibbel. |

BESTAAND

UITBREIDING

RWZI-DIMENSIONERING

In dit model komen alleen de voor de vergelijking en berekeningen van belang zijnde aspecten aan de orde.

ZANDVANG

| | | | | |
|------------------------|---------|---|-------|-------|
| . Capaciteit maximaal | m3/h | : | 1.875 | 1.875 |
| . Capaciteit minimaal | m3/h | : | 625 | 625 |
| . Aantal eenheden | - | : | 1 | 1 |
| . Oppervlaktebelasting | m3/m2.h | : | 20 | 20 |
| . Oppervlakte totaal | m2 | : | 94 | 94 |

VOORBEZINKING

| | | | | |
|---------------------------------------|-----------|---|-------|-------|
| . Maximale aanvoer | m3/h | : | 0 | 0 |
| . Gemiddelde aanvoer | m3/h | : | 0 | 0 |
| . Aantal voorbezinktanks | - | : | 0 | 0 |
| . Oppervlaktebelasting (DWA) | m3/(m2.h) | : | 2 | 2 |
| . Berekend bezinkoppervlakte | m2 | : | 0 | 0 |
| . Diameter bezinktank(s) | m | : | 0 | 0 |
| . CZV-belasting na voorbezinking | kg/d | : | 4.500 | 4.500 |
| . BZV-belasting na voorbezinking | kg/d | : | 1.800 | 1.800 |
| . Kj-N-belasting na voorbezinking | kg/d | : | 500 | 500 |
| . P-totaal-belasting na voorbezinking | kg/d | : | 75 | 75 |
| . Slibverwijdering in voorbezinking | kg/d | : | 0 | 0 |

BELUCHTINGSBASSIN

Ontwerp

oxydatiesloot = 1
 carrousel = 2
 aeratietank = 3

| | | | | |
|---------------------------------|------------------|---|-------|-------|
| . Type beluchtingsbassin | - | : | 2 | 2 |
| . BZV-vracht | kg/d | : | 1.800 | 1.800 |
| . Slibgehalte | kg/m3 | : | 4 | 20 |
| . Slibbelasting | kg BZV/(kg ds.d) | : | 0,050 | 0,010 |
| . Totaal volume | m3 | : | 9.000 | 9.000 |
| . Verblijftijd bij gem. aanvoer | h | : | 14,4 | 14,4 |
| . Verblijftijd bij max. aanvoer | h | : | 4,8 | 4,8 |
| . Ruimtebelasting | kg BZV/m3.d | : | 0,20 | 0,20 |
| . Slibproductie biologisch | kg d.s./d | : | 1.800 | 576 |
| . Chemische slibproductie | kg d.s./d | : | 105 | 223 |
| . Totale slibproductie | kg d.s./d | : | 1.905 | 799 |
| . Slibleeftijd | d | : | 17,9 | 176,2 |

Chemische P-verwijdering

| | | | | |
|-------------------------------|------------------|---|------|------|
| . Biologische P-verwijdering | kg P/d | : | 36,0 | 11,5 |
| . P in effluent | kg P/d | : | 15,0 | 12,8 |
| . Chemisch te verwijderen P | kg P/d | : | 24,0 | 50,7 |
| . Chemicaliënverbruik (FeSO4) | kg/d | : | 215 | 455 |
| . Specifieke slibproductie | kg d.s./kg Pverw | : | 4,39 | 4,39 |
| . Chemische slibproductie | kg d.s./d | : | 105 | 223 |

MODELBEREKENINGEN VOOR GEINTEGREERDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | 50.000 verl. slibbel. |

vervolg RWZI-DIMENSIONERING

BESTAAND

UITBREIDING

Nitrificatie

| | | | | |
|--------------------|--------|---|-----|-----|
| . Kj-N belasting | kg N/d | : | 500 | 500 |
| . N in surplusslib | kg N/d | : | 108 | 35 |
| . NKj in effluent | kg N/d | : | 30 | 15 |
| . Te nitrificeren | kg N/d | : | 362 | 450 |

Denitrificatie

| | | | | |
|-----------------------|------------------------|---|-----|-----|
| . Nitraat in effluent | mg NO ₃ N/l | : | 60 | 38 |
| . Te denitrificeren | kg NO ₃ N/d | : | 302 | 413 |

Dimensies

| | | | | |
|-------------------------------|----------------|---|-------|-------|
| . Volume beluchttingsbassin | m ³ | : | 9.000 | 9.000 |
| . Volume denitrificatieruimte | m ³ | : | 0 | 0 |
| . Totaal volume | m ³ | : | 9.000 | 9.000 |

Zuurstofgebruik

| | | | | |
|------------------------------|--|---|-------|--------|
| . Nitrificatie-coefficient | kg O ₂ /kg Kj-N | : | 4,57 | 4,57 |
| . Denitrificatie-coefficient | kg O ₂ /kg NO ₃ -N | : | 2,86 | 2,86 |
| . CZV en BZV verademing | kg O ₂ /d | : | 2.325 | 3.737 |
| . Stikstofoxidatie | kg O ₂ /d | : | 1.654 | 2.059 |
| . Nitraatreductie | kg O ₂ /d | : | -864 | -1.181 |
| . Totaal zuurstofgebruik | kg O ₂ /d | : | 3.116 | 4.614 |
| . Zuurstofverbruik in 20 uur | kg O ₂ /h | : | 156 | 231 |

Zuurstoftoevoervermogen

| | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|---|-------|-------|
| . Zuurstofconcentratie (actueel) | mg O ₂ /l | : | 1,5 | 1,5 |
| . Zuurstofconcentratie (maximaal) | mg O ₂ /l | : | 10,1 | 9,7 |
| . Zuurstofoverdrachtsfactor | - | : | 1,17 | 1,18 |
| . Zuurstoftoevoer in afvalwater | kg O ₂ /d | : | 3.657 | 5.455 |
| . Alpha factor | - | : | 0,9 | 0,8 |
| . Zuurstoftoevoer schoon water: | kg O ₂ /d | : | 4.063 | 6.819 |
| . Zuurstoftoevoer in 20 uur | kg O ₂ /h | : | 203 | 341 |
| . OC/load | kg O ₂ /kg BZV | : | 2,7 | 4,5 |

Energiegebruik beluchting

| | | | | | |
|----------------------------|------------------------|---|--------------------|-------|--|
| | | | borstelbeluchting= | 1 | |
| | | | puntbeluchting= | 2 | |
| | | | bellenbeluchting= | 3 | |
| . Type beluchting | - | : | 2 | 2 | |
| . Zuurstofinbrengrendement | kg O ₂ /kWh | : | 1,5 | 1,5 | |
| . Geïnstalleerd vermogen | kW | : | 135 | 227 | |
| . Energieverbruik | MWh/jaar | : | 989 | 1.659 | |

MODELBEREKENINGEN VOOR GEINTEGREERDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | 50.000 verl. slibbel. |

vervolg RWZI-DIMENSIONERING

BESTAAND

UITBREIDING

NABEZINKTANK

Ontwerp volgens STOWA richtlijnen

| | | | |
|-------------------------------------|-------------------|---|-------|
| . Maximale aanvoer | m ³ /h | : | 1.875 |
| . Gemiddelde aanvoer | m ³ /h | : | 625 |
| . Volume beluchting (totaal) | m ³ | : | 9.000 |
| . Slib Volume Index | ml/g | : | 150 |
| . Slibgehalte beluchting (Ga) | kg/m ³ | : | 4,0 |
| . Min. slibgehalte beluchting RWA | kg/m ³ | : | 2,8 |
| . Slibvolume bij gem aanvoer (VSv) | ml/l | : | 600 |
| . Max slibbuffering bij max aanvoer | % | : | 30 |
| . Min. slibvolume bij max aanvoer | ml/l | : | 420 |
| . Conc. gebuf. slib in NBT bij RWA | kg/m ³ | : | 3,2 |
| . Bodemhelling | m/m | : | 0,08 |
| . Aantal nabezinktanks (nieuw) | - | : | 2 |

Dimensies

| | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|---|-------|
| . Berekende oppervlaktebelasting | m ³ /(m ² .h) | : | 0,71 |
| . Berekend bezinkoppervlak | m ² | : | 2.647 |
| . Diameter bezinktank(s) | m | : | 41,1 |
| . Kantdiepte | m | : | 2,0 |
| . Omloopgootbreedte | m | : | 0,8 |
| . Mesbelasting bij gem. aanvoer | m ³ /(m.h) | : | 2,5 |
| . Mesbelasting bij max. aanvoer | m ³ /(m.h) | : | 7,6 |

MEMBRAANFILTRATIE

Ontwerp

Voor het ontwerp binnen deze opzet wordt uitgegaan van algemene aannamen voor de flux, de standtijd en het energieverbruik.

| | | | |
|-----------------------------|--------------------|---|-----|
| . Membraanflux | l/m ² h | : | 40 |
| . Standtijd | jaar | : | 4 |
| . Specifiek energieverbruik | kWh/m ³ | : | 1,0 |

Dimensies

| | | | |
|-------------------------------|----------------|---|--------|
| . Membraanoppervlak min (DWA) | m ² | : | 15.625 |
| . Membraanoppervlak max (RWA) | m ² | : | 46.875 |
| . Energieverbruik per jaar | MWh/jaar | : | 2.738 |

MODELBEREKENINGEN VOOR GEINTEGREERDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | 50.000 verl. slibbel. |

UITGANGSPUNTEN VOOR DE KOSTENBEREKENINGEN

INVESTERINGSKOSTEN

| | | |
|--|-----------------------|-------|
| . Zandvang - civiele investering | Hfl./m2 oppervlak | 2.000 |
| . Zandvang - electro/mechnische investering | Hfl./m3.h aanvoer | 100 |
| . Bezinktank - civiele investering | Hfl./m2 oppervlak | 560 |
| . Bezinktank - electro/mechnische investering | Hfl./m diameter | 7.000 |
| . Beluchttingscapaciteit - electro/mechanische investering | Hfl./kW geïnstalleerd | 1.150 |
| . Beluchttingsruimte - civiele investering | Hfl./m3 volume | 350 |
| . Chemicaliëndosering - electro/mechanische investering | Hfl./kg.d | 200 |
| . Membraanfiltratie - electro/mechnische investering | Hfl./m2 oppervlak | 250 |
| . Membraanfiltratie - investering membranen | Hfl./m2 oppervlak | 350 |
| . Persleiding - civiele investering | Hfl./m | 2.000 |
| . Persleiding - electro/mechanische investering | Hfl./kW geïnstalleerd | 3.500 |
| . Bijkomende kosten | % | 10 |
| . Onvoorzien | % | 5 |
| . Advieskosten | % | 10 |
| . BTW | % | 17,5 |

EXPLOITATIEKOSTEN

| | | |
|--|---------------|--------|
| . Rentevoet | % | 7,0 |
| . Afschrijvingstermijn civiel | jaar | 30 |
| . Afschrijvingstermijn electro/mechanisch | jaar | 15 |
| . Jaarlijkse onderhoudskosten civiel | % | 0,5 |
| . Jaarlijkse onderhoudskosten electro/mechanisch | % | 3,0 |
| . Energiekosten | Hfl./kWh | 0,15 |
| . Personeelskosten | Hfl./manjaar | 80.000 |
| . Chemicaliënkosten (FeSO4) | Hfl./ton | 110 |
| . Slibverwerkingskosten | Hfl./ton d.s. | 1.250 |
| . Lozingsheffing | Hfl./v.e. | 32,50 |
| . Opbrengsten effluenthergebruik | Hfl./m3 | 0,75 |

Algemene uitgangspunten t.b.v. kostenberekeningen

| | | |
|--|---------|-------|
| . Extra personeel membraanfiltratie | manjaar | 1 |
| . Membraanstandtijd | jaar | 4 |
| . Lengte vermeden persleiding | m | 5.000 |
| . Energieverbruik persleiding | kWh/m3 | 0,20 |
| . Geïnstalleerd vermogen persleiding | kW | 125 |
| . Beluchttingsenergie als % van totaal energie (ex mem.) | % | 80 |
| . Vermeden uitbreiding van de beluchtingstank | % | 100 |

MODELBEREKENINGEN VOOR GEINTEGREERDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | 50.000 verl. slibbel. |

KOSTENINDICATIE - INVESTERINGSKOSTEN

| | | | |
|-----------------------------|------|--|------------|
| . Zandvang | | | |
| civiel | Hfl. | | 0 |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 0 |
| . Voorbezinktank | | | |
| civiel | Hfl. | | 0 |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 0 |
| . Beluchttingscapaciteit | | | |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 105.636 |
| . Extra chemicaliëndosering | | | |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 47.942 |
| . Membraanfiltratie | | | |
| membranen | Hfl. | | 16.406.250 |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 11.718.750 |
| | | | + |
| . SUBTOTAAL AANNEEMSOM | Hfl. | | 28.278.577 |

VERMEDEN INVESTERINGSKOSTEN (Aanneemsom)

| | | | |
|-----------------------------|------|--|------------|
| . Beluchttingsruimte | | | |
| civiel | Hfl. | | 3.150.000 |
| . Beluchttingscapaciteit | | | |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 66.022 |
| . Extra chemicaliëndosering | | | |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 29.963 |
| . Nabezinktank | | | |
| civiel | Hfl. | | 0 |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 0 |
| . Persleiding | | | |
| civiel | Hfl. | | 10.000.000 |
| electro/mechanisch | Hfl. | | 437.500 |
| | | | + |
| . SUBTOTAAL AANNEEMSOM | Hfl. | | 13.683.486 |

EXTRA INVESTERINGSKOSTEN

| | | | |
|---------------------------------|-------------|--|-------------------|
| . Aanneemsom Civiel | Hfl. | | -13.150.000 |
| . Aanneemsom Electro/mechanisch | Hfl. | | 11.338.841 |
| . Inkoop Membranen | Hfl. | | 16.406.250 |
| . Bijkomende kosten | Hfl. | | -181.116 |
| . Onvoorzien | Hfl. | | -90.558 |
| . Advieskosten | Hfl. | | -181.116 |
| . BTW | Hfl. | | 2.554.141 |
| | | | + |
| TOTAAL | Hfl. | | 16.696.443 |

MODELBEREKENINGEN VOOR GEINTEGREERDE MEMBRAANFILTRATIE

| | | | |
|------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| systeem | carrousel | capaciteit [v.e.] | 50.000 |
| beluchting | puntbeluchting | uitbreiding [v.e.] | 50.000 verl. slibbel. |

KOSTENINDICATIE - EXPLOITATIEKOSTEN

| | | |
|--|-----------|-----------|
| . Rente en afschrijving civiel | Hfl./jaar | 0 |
| . Rente en afschrijving electro/mechanisch | Hfl./jaar | 1.303.518 |
| . Onderhoud civiel | Hfl./jaar | 0 |
| . Onderhoud electro/mechanisch | Hfl./jaar | 356.170 |
| . Energie | Hfl./jaar | 536.354 |
| . Membraanvervanging | Hfl./jaar | 4.101.563 |
| . Extra chemicaliën | Hfl./jaar | 9.624 |
| . Slibverwerkingskosten | Hfl./jaar | 0 |
| . Personeel | Hfl./jaar | 80.000 |
| . Lozingsheffing | Hfl./jaar | 0 |
| | | + |
| . SUBTOTAAL | Hfl./jaar | 6.387.229 |

VERMEDEN KOSTEN / VERDIENSTEN

| | | |
|--|-----------|-----------|
| . Rente en afschrijving civiel | Hfl./jaar | 1.059.711 |
| . Rente en afschrijving electro/mechanisch | Hfl./jaar | 58.574 |
| . Onderhoud civiel | Hfl./jaar | 65.750 |
| . Onderhoud electro/mechanisch | Hfl./jaar | 16.005 |
| . Energie | Hfl./jaar | 144.990 |
| . Extra chemicaliën | Hfl./jaar | 6.015 |
| . Slibverwerkingskosten | Hfl./jaar | 315.570 |
| . Lozingsheffing | Hfl./jaar | 50.668 |
| . Hergebruik effluent | Hfl./jaar | 2.053.125 |
| | | + |
| . SUBTOTAAL | Hfl./jaar | 3.770.407 |

EXTRA EXPLOITATIEKOSTEN / BESPARINGEN

| | | |
|--|-----------|------------|
| . Rente en afschrijving civiel | Hfl./jaar | -1.059.711 |
| . Rente en afschrijving electro/mechanisch | Hfl./jaar | 1.244.944 |
| . Onderhoud civiel | Hfl./jaar | -65.750 |
| . Onderhoud electro/mechanisch | Hfl./jaar | 340.165 |
| . Energie | Hfl./jaar | 391.365 |
| . Membraanvervanging | Hfl./jaar | 4.101.563 |
| . Extra chemicaliën | Hfl./jaar | 3.609 |
| . Personeel | Hfl./jaar | 80.000 |
| . Slibverwerkingskosten | Hfl./jaar | -315.570 |
| . Lozingsheffing | Hfl./jaar | -50.668 |
| . Effluenthergebruik | Hfl./jaar | -2.053.125 |
| | | + |

| | | |
|---------------|------------------|------------------|
| TOTAAL | Hfl./jaar | 2.616.822 |
| | Hfl./v.e. | 52,34 |

Bijlage VI: Handleiding spreadsheetmodel

1 Algemeen

De spreadsheet programma's "*Model rwzi STOWA geïntegreerd*" en "*Model rwzi STOWA nageschakeld*" zijn opgebouwd in Excel 7.0.

De modellen zijn gemaakt voor de kostenberekening in deze rapportage, waarbij drie standaard rwzi's van 10.000 v.e., 50.000 v.e. en 150.000 v.e. als standaard hebben gediend. Het model kan in beperkte mate worden toegepast voor berekeningen aan rwzi's die vanwege specifieke omstandigheden afwijken van de in dit rapport geformuleerde standaard rwzi's. De resultaten van de berekeningen dienen derhalve als indicatief te worden beschouwd.

2 Installeren

Een handleiding voor het installeren is op de diskette opgenomen als txt-file.

- Kopieer "Modellen.EXE" naar een eigen directory op de harde schijf van uw PC.
- Dubbelklik op "Modellen.EXE" in de door u aangegeven directory.
- De bestanden "*Model rwzi STOWA geïntegreerd*" en "*Model rwzi STOWA nageschakeld*" worden nu automatisch uitgepakt en in de door u aangegeven directory op de harde schijf van uw PC geplaatst.
- Stop deze procedure, nadat het uitpakken is afgerond, door op het kruis in de rechterbovenhoek van het DOS-scherm te klikken.
- U kunt nu vanuit Excel 7.0 deze bestanden oproepen, of u kunt door dubbelklik op één van deze bestanden het Excel 7.0 programma starten.

3 Opbouw spreadsheet programma's

De programma's bestaan elk uit drie tabbladen:

- uitgangspunten
- kostenoverzicht
- berekeningen

In het tabblad 'uitgangspunten' kunnen de belangrijkste uitgangspunten voor de dimensionering van de rwzi en de kostenberekeningen worden ingevuld. Het 'kostenoverzicht' is een samenvatting van de kostenberekeningen. In het tabblad 'berekeningen' staan alle berekeningen voor de dimensionering en de kosten op een rij.

Het tabblad 'uitgangspunten' is het enige tabblad waarin de gebruiker veranderingen kan aanbrengen. Deze handleiding richt zich dan ook met name op dit blad.

4 Invullen tabblad 'uitgangspunten'

4.1 Kop

In de koptekst kunnen de volgende gegevens worden ingevuld:

- | | |
|---------------------|------------------------|
| - systeem | type zuivering of naam |
| - beluchting | type beluchting |
| - capaciteit [v.e.] | zuiveringscapaciteit |
| - uitbreiding | wijze van uitbreiding |

De gegevens die op deze plaats worden ingevuld worden in het gehele document als koptekst meegenomen.

4.2 Algemene gegevens / uitgangspunten

Hier worden de uitgangspunten voor de dimensionering van de rwzi aangegeven

Voor het systeem met geïntegreerde membraanfiltratie dient rekening te worden gehouden met de volgende bijzonderheden:

- reden van uitbreiding 1 = vergroten van de capaciteit
 2 = verlagen van de slibbelasting
 indien niet bekend dient 2 te worden ingevuld

- type beluchtingsbassin 1 = oxydatiesloot
 2 = carrousel
 3 = aeratietank

- type beluchtingssysteem 1 = borstelbeluchting
 2 = puntbeluchting
 3 = bellenbeluchting

Vervolgens dienen voor de bestaande rwzi en voor de uitbreiding alle noodzakelijke gegevens (gekleurde vakjes) te worden ingevuld. In de spreadsheet voor geïntegreerde membraanfiltratie dient, in geval van geen capaciteitsuitbreiding, toch de vuilvracht en debiet te worden ingevuld.

4.3 Afvalwatergegevens

In de gegevens met betrekking tot de aanvoer worden alleen gegevens gerelateerd aan v.e. ingevuld.

De gegevens met betrekking tot de effluentkwaliteit zijn afhankelijk per situatie. De reeds ingevulde cijfers kunnen als uitgangspunten dienen.

4.4 Uitgangspunten voor de kostenberekeningen

De uitgangspunten voor de kostenberekeningen zijn deels afhankelijk van plaatselijke omstandigheden. De reeds ingevulde cijfers kunnen als uitgangspunten dienen.

5 Printen

Nadat alle uitgangspunten zijn ingevuld worden de berekeningen automatisch op de tabbladen "Kostenoverzicht" en "Berekeningen" uitgevoerd. Deze bladen kunnen vervolgens worden uitgeprint.

De standaard printerinstelling is HP Laserjet. De printerinstelling en het afdrukbereik is in Excel in te stellen onder de Optie Bestand, keuzes Afdrukbereik en Afdrukken.