

BUNDELING INTERNATIONALE MBR- ONDERZOEKSRESULTATEN



RAPPORT

2012
08

BUNDELING INTERNATIONALE
MBR-ONDERZOEKSRESULTATEN

RAPPORT

2012

08

ISBN 978.90.5773.544.8



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

PROJECTUITVOERING

F. van den Berg van Saparoea - Witteveen+Bos
R. Smit - Witteveen+Bos
A. van Nieuwenhuijzen - Witteveen+Bos

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

S. Geilvoet - Hoogheemraadschap van Rijnland
H. Ellenbroek - Waterschap Regge en Dinkel
P. Schyns - Waterschap Rijn en IJssel
C. Ruiken - Waternet
R. Borgerink - Pentair - Norit
C. Uijterlinde - STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA STOWA 2011-08

ISBN 978.90.5773.544.8

COPYRIGHT De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

DISCLAIMER Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

SAMENVATTING

Membraanbioreactortechnologie is uitgegroeid tot één van de belangrijkste technologieën als alternatief voor een conventioneel actief-slibstelsysteem met nabezinktanks. De voordelen van MBR-technologie ten opzichte van het conventionele actief-slibproces zijn gerelateerd aan het gebruik van membranen in plaats van een nabezinktank en/of mediafilter. Hierdoor is een hogere slibconcentratie mogelijk, kan compacter gebouwd worden en is er een verbeterde effluentkwaliteit door het gebruik van een membraan als barrière. Tevens kunnen geavanceerde afvalwaterbehandeling en recycling van communaal afvalwater na een membraan-systeem plaatsvinden.

Door strengere eisen met betrekking tot effluentkwaliteit en sterke groei in de toepassingen van waterhergebruik is de toepassing van MBR-technologie de laatste tien jaar internationaal sterk toegenomen. Door deze ontwikkelingen heeft de Europese Commissie besloten om de ontwikkeling van MBR-technologie in Europa te promoten door financiering van drie onderzoeksprojecten, die volledig gericht zijn op onderzoek, ontwikkeling, capaciteitsvergroting en technologie-uitwisseling voor veelbelovende afvalwaterzuiveringstechnieken op basis van MBR. De drie projecten, AMEDEUS, EUROMBRA, MBR-Train zijn ondersteund door drie verschillende financieringsinstrumenten van de EU binnen het 6de-kader onderzoeksprogramma. De onderzoeksprojecten zijn parallel aan elkaar uitgevoerd tussen oktober 2005 en begin 2010.

Ongeveer 50 Europese en Internationale instituten en bedrijven zijn actief betrokken geweest bij de projecten en bundelden hun inspanningen en activiteiten in het onderzoekscluster "MBR-Network". Met een totaal budget van ca. € 15 miljoen, waarvan ruim € 9 miljoen gefinancierd werden door de Europese Commissie, vertegenwoordigden de projecten de grootste gecoördineerde onderzoeksinspanning naar MBR-technologie ter wereld. Binnen de activiteiten van het onderzoekscluster werden belangrijke technologische doorbraken, procesverbetering, kennis- en capaciteitsuitwisseling, ontwerp en realisatie op het gebied van MBR-technologie gerealiseerd. Dit leidt uiteindelijk tot een betere acceptatie en concurrentiepositie en een bredere inzetbaarheid van de MBR-technologie voor communale toepassingsgebieden en een versterking van de concurrentiepositie van de Europese MBR-technologiebedrijven.

De impact van MBR-Network op de ontwikkeling van MBR-technologie is ook te zien aan de hand van de publicatiereeks over MBR-technologie die tussen 2005 en 2011 voornamelijk vanuit de onderzoeksinstanties kwam die betrokken waren bij MBR-Network. Gelieerde instanties zoals ATV-DWA en GWRC putten tevens uit de MBR-Network kennis, zo blijkt uit een nadere inventarisatie van uitgevoerde en lopende onderzoekstrajecten van deze organisaties. Dit geldt in bepaalde mate ook voor de STOWA. Parallel aan de Europese onderzoeksinspanningen heeft STOWA de afgelopen jaren veel onderzoek geïnitieerd, begeleid en gepubliceerd met betrekking tot MBR-technologie. Rapportages over marktverkenning, ontwerp-handboek en de demonstratie-installaties MBR Varsseveld, MBR Heenvliet en MBR Ootmarsum zijn daarbij de laatste waardevolle producten. Momenteel wordt ook het MBR-project op RWZI

Glanerbrug door STOWA ondersteund. Ook zijn binnen het wereldwijde onderzoeksplatform Global water Research Coalition (GWRC) en de Duitse vereniging voor Water, Afvalwater en Afval (DWA, voorheen ATV-DWA) allerlei onderzoeken met betrekking tot MBR-technologie uitgevoerd.

In opdracht van de STOWA is besloten om alle kennis en beschikbare informatie omtrent de MBR-technologie, beschreven in het MBR-network project, het GWRC en DWA, tot één integraal STOWA-rapport samen te bundelen. De resultaten van de verschillende onderzoeken zijn in negen subthema's onderverdeeld:

- Membranen en membraanconfiguraties
- Ontwerp van MBR-installaties
- MBR-concepten
- Membraanvervuiling
- Membraanreiniging
- Modelleren en sturing
- Energie
- Kosten
- Overige aspecten

In elk van de subthema's worden de nieuwste technologische bevindingen en procesverbeteringen op het desbetreffende thema in subparagrafen beschreven.

DE STOWA IN HET KORT

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

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

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

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

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

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

Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl

BUNDELING INTERNATIONALE MBR- ONDERZOEKSRESULTATEN

INHOUD

	STOWA IN HET KORT	
	AFKORTINGEN	1
	BEGRIPPENLIJST	3
1	INLEIDING	5
1.1	Achtergrond	5
1.2	Doelstelling en Doelgroep	5
1.3	Uitgangspunten	6
1.4	Leeswijzer	6
1.5	MBR-network website	7
2	MBR ANNO 2011	8
2.1	Inleiding	8
2.2	Nederland	8
2.3	Europa	8
2.4	Wereldniveau	9
3	EUROPESE ONDERZOEKSPROJECTEN	10
3.1	MBR-Network	10
3.2	AMEDEUS	11
3.3	EUROMBRA	12
3.4	MBR-TRAIN	12
3.5	GWRC	13
3.6	DWA	13

4	COMPILATIE VAN RESULTATEN	14
4.1	Inleiding	14
4.2	Membranen en membraanconfiguraties	15
4.2.1	Membranen	15
4.2.2	Membraanconfiguraties	16
4.3	Ontwerp van MBR-installatie	19
4.3.1	Standaardisatie	19
4.3.2	containerisatie	19
4.3.3	DUAL of Hybride configuratie	20
4.3.4	Hybride MBR	20
4.4	Nieuwe MBR-concepten	21
4.4.1	Innovatie filtratieconcepten	21
4.4.2	Ultrafiltratie holle vezel membranen	22
4.4.3	FiSh membranen	23
4.4.4	Vlakke plaatmembranen	23
4.4.5	EPBR proces volgens het ENREM-Project	24
4.4.6	Biofilm-MBR of MBBR	25
4.4.7	Airlift MBR	25
4.5	Membraanvervuiling	26
4.5.1	Reductie membaanvervuiling door chemische toevoegingen	26
4.5.2	IFsm methode	26
4.5.3	EPS detectiesystemen	27
4.5.4	overige	28
4.6	Membraanreiniging	29
4.6.1	Verbeteren membraanreiniging	29
4.6.2	Reinigingsstrategieën	29
4.6.3	Membraanreiniging met Propyleenkorrels	30
4.7	Modellering en sturing	30
4.7.1	MBR modellering	30
4.7.2	ASM modellering MBR bioreactors	31
4.7.3	ACS model	31
4.7.4	Failure mode analysis In SMBR-systemen	32
4.7.5	CFD model	32
4.8	Energie	32
4.9	Kosten	33
4.10	Overige Aspecten	35
4.10.1	Slibeigenschappen	35
4.10.2	DFC-methode	35
4.10.3	On-line meetsensoren als indicator voor membraanvervuiling	36
4.10.4	Slibontwatering en filtreerbaarheid in communale MBR's	37
4.10.5	Slibverwerking en beheer	37
4.11	MBR-onderzoeken GWRC	38
4.12	MBR-onderzoeken DWA	39

5	TERUGKOPPELING NAAR DO'S EN DONT'S MBR	40
5.1	Inleiding	40
5.2	Aanvullingen uit Europees onderzoek	40
5.2.1	Influentsamenstelling	40
5.2.2	Voorbehandeling	41
5.2.3	Biologie	41
5.2.4	Membranen	41
5.2.5	Slibproductie	41
6	CONCLUSIES	42
7	REFERENTIES	44
8	BIJLAGEN	49
1	REFERENTIES MBR-INSTALLATIE VOOR HUISHOUELIJK AFVALWATER	51
2	INTERNATIONALE ONDERZOEKSPROJECTEN	65
3	BESLISBOOM VOOR ONDERGEDOMPELDE MEMBRANEN	73
4	GETESTE CHEMICALIËN MBT MEMBRAANVERVUILING	75
5	VERGELIJKING VAN VERSCHILLENDE SENSOREN	77
6	VORMEN EN WERKING VAN CHEMISCHE SCHOONMAAKMIDDELEN OP MEMBRANEN	79
7	BIJKOMENDE OPERATIONELE KOSTEN MBR-SYSTEEM T.O.V. CAS-SYSTEEM	81

AFKORTINGEN

2D-EEMS	Techniek om opgeloste organische stoffen te analyseren (2D excitation emission matrix fluorescence spectroscopy)
3D-EEMS	Techniek om membraanvervuiling te analyseren (3D excitation emission matrix fluorescence spectroscopy)
ACS	Advances Control System
AMEDEUS	Accelerate Membrane Development for Urban Sewage Purification
ASM	Actief-slib modellering
AS-MBR	Actief-slib membraan bioreactor (Activated sludge membrane bioreactor)
AT	Aeratie tank
ATV	Verenging op het gebied van afvalwatertechniek
ATV-DVWK	Duitse vereniging voor water, afvalwater en afval
AWZI	Afvalwaterzuiveringsinstallatie
BFM	Berlijnse filtratie methode
BF-MBR	Biofilm Membraan bioreactor
CA-membranen	Cellulose acetaat membranen
CAS	Conventionele actief-slibsystemen
CEN	Centre Europeen de normalisation
CFD	Computational Fluid Dynamics
COD/CZV	Chemisch zuurstofverbruik (Chemical oxygen demand)
CWA	CEN Workshop Agreement
D	Eindrapport (Deliverable report)
DFCm	Delft Filtratiekarakterisering methode (Delft Filtration Characterisation method)
DGGE	Denaturing Gel Electrophoresis
DVWK	Duitse vereniging voor watermanagement en hydrocultuur
DWA	Duitse vereniging voor water, afvalwater en afval
DWA	Droogweeraanvoer
EBPR	Nieuwe afvalwatertechnologie die de MBR technologie combineert met een verbeterde biologische fosfaatverwijdering (Enhanced Biological Phosphorus removal)
ENREM	Onderzoeksproject demonstreren van een nieuwe afvalwaterzuiveringsinstallatie proces gebaseerd op de technologie van membraanbioreactor (MBR), voor een betere biologische nutriëntenverwijdering. (Enhanced Nutrient REmoval in Membranebioreactors)
EPS	Extracellulaire polymeerstoffen
EPS-SIA	Specifieke on-line methode om membraanvervuiling te detecteren (Extracellular Polymeric Substances-Sequential Injection Analysis)
FISH	Techniek waarbij chromosoom(delen) aangekleurd worden en vervolgens onder de fluorescentie microscoop bestudeerd kunnen worden (Fluorescence In Situ Hybridisation)
F/M ratio	Benodigd om de juiste hoeveelheid micro-organismen in een systeem te bepalen (food/mass ratio)
GWRC	Global Water Research Cooperation
i.e.	Inwonerequivalent (als 136 g TZV/d; 150 g TZV/g of 54 g BZV/d)
IFSM	Een nieuwe experimentele protocol dat in staat is om de invloed van vele verschillende membraaneigenschappen op vervuiling te vergelijken. (Improved Flux-Step Method)

IWA	International Water Association
KRW	Kaderrichtlijn water
MBR	Membraan bioreactor
MBR-VFM	Specifieke on-line methode om membraanvervuiling te detecteren.
MD	Membraandestillatie
MDBR	Membraandestillatie bioreactor
MF	Microfiltratie: Filtratie van deeltjes tot 0,05 µm
MLSS	Concentratie onopgeloste bestanddelen in het slibwatermengsel (Mixed liquor suspended solids)
MWCO	Poriëgrootte van het membraan (Molecular weight cut off)
NOM	Het organisch materiaal aanwezig in oppervlakte- of grondwater (Natural Organic Matter)
PAH	Poly (allylamine hydrochloride)
PDADMAC	Polydiallyldimethyl-ammonium chloride
PEI	Polyethyleneimine
PES-membranen	Polyethersulfon membranen
PS	Polysacchariden concentratie
PS-membranen	Polysulfone membranen
PVDF-membranen	Polyvinylidenefluoride membranen
PWP	De flux verkregen met zuiver water per eenheid van transmembraan druk. (Pure Water Permeability)
RO	Omgekeerde osmose (reverse osmosis)
RWA	Regenwataaraanvoer
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinrichting
SADm	Specifieke beluchtingsvraag gericht op het membraanoppervlak (Specific aeration demand membrane area)
SEC-DOC	Techniek om membraanvervuiling te analyseren (Size-exclusion chromatography met dissolved organic carbon detection)
SMBR	Ondergedompelde membraan bioreactor (Submerged Membrane Bioreactor)
SMP	Opgelost microbiëel product (Soluble microbial products)
SRT	Slib retentietijd (Sludge retention time)
SS	Zwevende stof (suspended solids)
STREP	Special Targeted Research Program
TBR	Textiel bioreactoren
TMP	Transmembraandruk
UF	Ultrafiltratie: Filtratie van deeltjes tot 0,005 µm
v.e.	Vervuilingseenheid
WHD	Waterschap Hollandse Delta
WP	Werkpakket (work package)
WRF	WaterReuse Foundation

BEGRIPPENLIJST

Begrip	Symbool	Eenheid	Omschrijving
Air-cycling			Alternerende beluchting tussen de cassettes
Alfa-factor / α -factor	α	[-]	De verhouding tussen de zuurstofoverdracht in het actiefslib en in schoonwater
Backpulse (back-flush)			Periodieke omkering van de permeaatstroom door het membraan met als doel de verwijdering van vervuiling van het membraanoppervlak en poriën
Cleaning in place			Reinigingssysteem waarbij de te reinigen onderdelen binnen de procesconfiguratie, dus zonder uitbouw, kunnen worden gereinigd En CIP-tank is een opslagvat voor permeaat om het spoelen van de membranen mogelijk te maken
Cross flow (dwarsstroom)			Vloeistofstroom die parallel loopt aan het membraan en dus loodrecht staat op de stroomrichting van het permeaat
Desinfectie			Behandeling van afvalwater, bijvoorbeeld middels membraanfiltratie, om het aantal pathogene micro-organismen tot onder vastgestelde grenzen te laten afnemen
Flux	F	[L/(m ² .h)]	De hoeveelheid permeaat die per tijdseenheid door een membraanoppervlak wordt geleid
Flux-Bruto	F _{bruto}	[L/(m ² .h)]	De actuele flux tijdens permeaatonttrekking
Flux-Kritisch		[L/(m ² .h)]	De flux waaronder de permeabiliteitsafname verwaarloosbaar is
Flux-Maximum		[L/(m ² .h)]	De netto flux bij de maximale hydraulische belasting, wanneer 1 membraantank buiten bedrijf is (= 50 L/(m ² .h))
Flux-minimum		[L/(m ² .h)]	De netto flux bij de minimale capaciteit van de permeaatpomp (≈ 10 L/(m ² .h))
Flux-Netto	F _{netto}	[L/(m ² .h)]	De gemiddelde permeaatonttrekking over een langere periode, waarbij het produktieverlies ten gevolge van de back-pulse wordt verdisconteerd
Flux-Ontwerp		[L/(m ² .h)]	De netto flux bij de maximale hydraulische belasting, wanneer alle membraantanks in bedrijf zijn (= 37,5 L/(m ² .h))
Flux-Optimum		[L/(m ² .h)]	De netto flux waarbij de membranen optimaal functioneren (≈ 20 L/(m ² .h))
Hybride-MBR			Een MBR die een deel van de influenttoevoer behandelt. de rest van de influentaanvoer wordt in een conventionele rwzi behandeld
Hydrofoob			Waterafstotend. tegenovergestelde van hydrofiel
intensive cleaning (of intensieve reiniging)	IC		Reinigingsmethode waarbij de gehele membraantank met reinigungsoplossing wordt gevuld met als doel om het membraan op de oorspronkelijke permeabiliteit terug te brengen
Koekfiltratie (cake filtration)			Filtratie door een uit slibvlokken en macromoleculen bestaande poreuze filterkoek op het membraanoppervlak. de filterkoek wordt opgebouwd door permeaatonttrekking via het membraan waardoor concentratieverhoging plaatsvindt van de gesuspendeerde deeltjes en macromoleculen op het membraanoppervlak
Macro-vervuiling			Vervuiling van het membraan door grove delen uit het afvalwater (b.v. haren, vezels), het actiefslib (b.v. anaërobe slibbrokjes) of de omgeving (b.v. ingevallen bladeren)
Maintenance cleaning (of onderhoudsreiniging)	MC		Een reinigungsprocedure, bestaande uit een oxidatieve en een zure reiniging, waarbij een chemicaliënoplossing met een lage concentratie via de membranen wordt teruggespoeld in een (gedeeltelijk) lege membraantank. Deze reiniging heeft een preventief karakter
Membraan			Een filter met kleine poriën, dat onder andere wordt toegepast om actiefslib en gezuiverd effluent van elkaar te scheiden
Membraanbioreactor	MBR		Gesuspendeerd actief-slibstelsysteem waarbij de scheiding van actiefslib en het gezuiverde effluent plaatsvindt met behulp van membranen in plaats van door nabezinktanks
Membraancassette			Eenheid bestaande uit meerdere membraanelementen
Membraanelement			Kleinste membraaneenheid bestaande uit membranen en een permeaatverzamelheader
Membraantank			Ruimte waarin de membraancassettes zich bevinden
Microfiltratie			Filtratie van deeltjes tot 0,05 µm

Begrip	Symbool	Eenheid	Omschrijving
Paraatmode			Procesinstelling waarbij geen permeaatonttrekking plaats vindt De beluchting (discontinuu) en de recirculatiepomp zijn wel in bedrijf
Permeaat			Benaming voor het product dat door een membraan stroomt en wordt afgevoerd: het effluent van een membraaninstallatie
Permeaatcyclus			Cyclus waarin achtereenvolgens permeaatonttrekking en permeaat-terugspoeling (back-pulse) plaatsvindt
Permeabiliteit (bij de actuele temperatuur)	P (XX°C)	[l/(m ² h.bar)]	De actuele bruto flux gedeeld door de transmembraandruk (TMD) over het membraan. $Perm = F_{bruto} / TMD$ De permeabiliteit van een membraan is een maat van de weerstand, die het membraan biedt aan het water dat door het membraanoppervlak stroomt onder invloed van de drijvende kracht (TMD), die op het water wordt uitgeoefend
permeabiliteit (gecorrigeerd)	P (15°C)	[l/(m ² .h.bar)]	De gestandaardiseerde permeabiliteit, uitgedrukt bij een temperatuur van 15 °C. het betreft een correctie voor de toename van de viscositeit bij lagere temperaturen
Proces mode			Procesinstelling waarbij de permeaatonttrekking, de beluchting en de recirculatiepompen in bedrijf zijn
Relaxatie			Met ontspanning of relaxatie wordt bedoeld dat in actief bedrijf de membranen gedurende een bepaalde tijd zonder (noemenswaardig) drukverschil over het membraan worden bedreven. dit heeft een reinigend effect op het membraan
Retentaat			Het retentaat is de vloeistofstroom in een extern opgesteld membraan die na permeaatonttrekking weer wordt teruggevoerd naar de aëratietank
Sequentiële beluchting			Alternierende beluchting binnen een cassette
Simulatie-unit			Pilotinstallatie
Skid.			Een membraanstraat met één of meer tubulaire membraanmodules
Slibbelasting		[g cZv/(g DS.d)]	De hoeveelheid verontreiniging die aan het actiefslib per eenheid van massa en tijd wordt toegevoerd
Slibleeftijd		[d]	De hoeveelheid slib gedeeld door de hoeveelheid verwijderd slib door spui of effluent. het betreft de tijd die slib ter beschikking heeft om zich volledig te vervangen
transmembraandruk	TMD	[mbar of kPa]	De drukval over het membraan, tussen de actiefslibzijde en de permeaatzijde. Het is de drijvende kracht waardoor de filtratie door de membranen plaatsvindt. (10 mbar = 1 kPa)
UF			Filtratie van deeltjes tot 0,005 µm
Volledige Mbr			Een MBR die de volledige influenttoevoer van een rwzi behandelt, zowel bij dwa als rwa

1

INLEIDING

1.1 ACHTERGROND

Eind 2009 is het Europese onderzoeksprogramma MBR-Network na een looptijd van 4,5 jaar afgerond. De onderzoeksresultaten van drie onderzoeksconsortia (EUROMBRA, AMEDEUS en MBR-TRAIN) zijn deels gepresenteerd op conferenties en deels gepubliceerd op het project-eigen webportaal www.mbr-network.eu. Echter, de informatie is nogal versnipperd en alleen in Engelse taal beschikbaar. Door budgetbeperkingen is de kennisassimilatie en bundeling van de uitkomsten van het MBR-Network project enigszins beperkt. Vanuit Nederland heeft voornamelijk de Technische Universiteit Delft (leerstoel Afvalwaterbehandeling van de vakgroep Gezondheidstechniek) in samenwerking met het Waterschap Hollandse Delta, UNESCO-IHE (leerstoel Water and Wastewater Treatment) en Witteveen+Bos een prominente bijdrage geleverd aan deze projecten.

Parallel aan de Europese onderzoeksinspanningen heeft STOWA de afgelopen jaren veel onderzoek geïnitieerd, begeleid en gepubliceerd met betrekking tot MBR-technologie. Rapportages over marktverkenning, ontwerphandboek en de demonstratie-installaties MBR Varsseveld, MBR Heenvliet en MBR Ootmarsum zijn daarbij de laatste waardevolle producten. Momenteel wordt ook het MBR-project op RWZI Glanerbrug door STOWA ondersteund. Ook STOWA heeft besloten om MBR-onderzoek te beperken en het MBR-platform af te ronden. De kennis vanuit STOWA is goed gedocumenteerd in de STOWA-rapportages[11][12][6].

Ook zijn naast de STOWA en Europese MBR-network, MBR-onderzoeken uitgevoerd door de Duitse vereniging voor Water, Afvalwater en Afval (DWA, voorheen ATV-DWA) en de Global Water Research Coalition (GWRC).

Om de voor Nederland relevante informatie vanuit de Europese MBR-onderzoeken, te extraheren en vast te leggen is een aanzienlijke inspanning nodig. Hiervoor is door de STOWA Programma Commissie Afvalwatersystemen besloten om de informatie vanuit de werkpakketten (WP) van de Europese onderzoeksprojecten toegankelijk en in Nederlandse taal inzichtelijk te maken door één integrale rapportage over het gehele onderzoeksveld op te stellen.

1.2 DOELSTELLING EN DOELGROEP

Doel van het project is het bundelen en toegankelijk maken van de meest recente informatie over MBR-technologie met betrekking tot huishoudelijk afvalwater, vanuit internationale onderzoeksprojecten (MBR-Network, DWA en GWRC) voor de Nederlandse waterschappen, adviesbureau's en onderwijs- en onderzoeksinstituten en bedrijven.

De bundeling van de verschillende internationale MBR-onderzoeksresultaten leveren voor de volgende groepen een interessante meerwaarde:

- Technologen bij waterkwaliteitsbeheerders, industriële bedrijven en adviesbureau's;
- Onderzoekers;
- Organisaties die toepassing van een MBR-technologie overwegen.

1.3 UITGANGSPUNTEN

Voor deze rapportage is gebruik gemaakt van de in de Europese onderzoeken vergaarde en geproduceerde informatie en de recente publicaties vanuit DWA en GWRC. De resultaten zijn niet altijd algemeen toepasbaar en kunnen voor specifieke situatie of locaties geldig zijn, zonder dat een direct vertaling naar andere praktijkinstallatie mogelijk of nuttig is. Relevant in deze zijn ook de Nederlandse MBR-onderzoeken in STOWA-verband, zoals:

- STOWA 2009-35 Ervaringen met Hybride MBR Heenvliet;
- STOWA 2009-36 Ervaringen met Hybride MBR Ootmarsum;
- STOWA 2008-08 Ontwerp- en beheersaspecten van een MBR voor de behandeling van huishoudelijk afvalwater;
- STOWA 2008-W-01 Ervaringen met MBR voor individuele behandeling van afvalwater;
- STOWA 2007-23 Ervaringen met nageschakelde MBR op RWZI Leeuwarden; verwijdering van hormoonverstorende stoffen, geneesmiddelen en andere microverontreinigingen;
- STOWA 2006-16 MBR proefinstallatie RWZI Hilversum;
- STOWA 2006-05/06 MBR rapport Varsseveld;
- STOWA 2005-24/25 GWRC; Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater treatment; State of Science Report.

1.4 LEESWIJZER

In hoofdstuk 2 is een beschrijving gegeven van de opbouw van het 'MBR-Network', waarbij een onderverdeling is gemaakt voor de drie onderzoeksconsortia. In hoofdstuk 3 is de beschikbare kennis uit het MBR-Network per onderwerp opgesteld. De resultaten van de Europese onderzoeken zijn in negen subthema's onderverdeeld in hoofdstuk 4:

- Membranen en membraanconfiguraties;
- Ontwerp van MBR-installaties;
- MBR-concepten;
- Membraanvervuiling;
- Membraanreiniging;
- Modelleren en sturing;
- Energie;
- Kosten;
- Overige aspecten.

Hoofdstuk 5 geeft een aanvulling op de in STOWA-verband opgestelde Do's and Don'ts (STOWA 2008-08) waarna in hoofdstuk 6 conclusies worden getrokken. De uitgebreide referentielijst is opgenomen als hoofdstuk 7.

1.5 MBR-NETWORK WEBSITE

Op het volgend internetadres is alle achtergrondinformatie met betrekking tot de EUROMBRA, AMEDEUS en MBR-TRAIN te vinden: www.mbr-network.eu.

Indien geïnteresseerd kan men via de site naar downloads om vervolgens het pdf-bestand Book of proceedings Final MBR-Network Workshop te downloaden waarin een uitgebreide beschrijving van onderzoeksresultaten is opgenomen.

2

MBR ANNO 2011

2.1 INLEIDING

De onderzoeken rondom MBR-technologie in Europees verband zijn met name uitgevoerd tussen 2005 en 2010. Over deze periode heeft de toepassing van MBR-installaties zich in Nederland en daarbuiten verder ontwikkeld. Deze ontwikkeling verloopt echter niet geheel parallel aan elkaar. De internationale MBR-markt is vele malen groter dan de toepassing in Nederland, zeker als het gaat om toepassing in de huishoudelijke afvalwatermarkt. Een overzicht van MBR-installaties gerealiseerd tussen 2001 en 2007 is weergegeven in bijlage 1.

2.2 NEDERLAND

In Nederland zijn momenteel vijf rioolwaterzuiveringsinrichtingen voor huishoudelijk afvalwater voorzien van MBR-technologie:

- MBR Varsseveld (zie STOWA-rapporten MBR Varsseveld en Waterschap Rijn en IJssel);
- MBR Heenvliet (zie STOWA-rapport MBR Heenvliet en Waterschap Hollandse Delta);
- MBR Ootmarsum (zie STOWA-rapport MBR Ootmarsum en Waterschap Regge en Dinkel);
- MBR De Drie Ambachten (zie Waterschap Scheldestromen en Evides Industriewater);
- MBR Glanerbrug (zie lopend STOWA-project MBR Glanerbrug en Waterschap Regge en Dinkel);

Over de MBR's Varsseveld, Heenvliet en Ootmarsum is in STOWA-verband veel onderzoek verricht en zijn uitgebreide rapportages opgesteld (zie ook referentielijst). Anno 2011 werken MBR Varsseveld, MBR Heenvliet en MBR Ootmarsum naar verwachting. MBR De Drie Ambachten zit nog in het eerste jaar na opstart en MBR Glanerbrug is als onderzoeks- en demonstratieinstallatie in testmodus werkzaam.

Op industrieel afvalwater zijn in Nederland en internationaal vele verschillende uitvoeringsvormen van MBR-concepten toegepast op zeer kleine ($50 \text{ m}^3/\text{d}$) tot grote ($> 10.000 \text{ m}^3/\text{d}$).

2.3 EUROPA

In Europa heeft de inzet MBR-technologie op communale RWZI's zich tussen 2005 en 2010 vooral in Duitsland en het Verenigd Koninkrijk doorgezet. Daarnaast zijn op kleinere schaal MBR-installaties in het Middellandse-Zeegebied voor effluentopwerking tot realisatie gekomen. In Italië worden MBR-installaties veelal toegepast op installaties waar zowel communaal als industrieel afvalwater worden behandeld (in een verhouding 1:1).

2.4 WERELDNIVEAU

Wereldwijd is de MBR-technologie nog steeds aan het groeien; de toepassing van membraan-technieken heeft ook internationaal te lijden onder de wereldwijde financiële crisis en nieuwe inzichten met betrekking tot de effluenteisen. De sterke groei uit de jaren 2000 - 2008 lijkt enigszins voorbij.

Vooraf in aride gebieden en het Midden-Oosten, maar ook in Zuid-Oost-Azie en Australië worden grote hoeveelheden membraanoppervlak verkocht. Dit gebeurt overwegend als membraanfiltratie voor opwerking van effluent maar ook voor MBR-toepassing. In de Verenigde Staten wordt MBR sporadisch toegepast, waarbij op kleinere schaal voor toepassingen in zogenaamde sewer-miningprojecten (water onttrekken uit het riool voor irrigatiedoeleinden). Ook zijn er pilots opgezet voor de toepassing van membranen in de anaerobe zuivering (anaerobe MBR).

De grootste groei in verkoop van membranen liggen in industriële toepassingen (waterhergebruik), effluentpolishing, voorbehandeling voor omgekeerde osmose, drinkwater en ontzoutingsinstallaties.

3

EUROPESE ONDERZOEKSPROJECTEN

3.1 MBR-NETWORK

Begin 2005 heeft de Europese Commissie besloten om de ontwikkeling van Membraan BioReactor (MBR)-technologie in Europa te promoten. Dit is gedaan door financiering van drie onderzoeksprojecten die volledig gericht zijn op onderzoek, ontwikkeling, capaciteitsvergroting en technologie-uitwisseling voor veelbelovende afvalwaterzuiveringstechnieken. De projecten, AMEDEUS, EUROMBRA en MBR-TRAIN werden ondersteund door drie verschillende financieringsinstrumenten van de EU binnen het 6^{de}-kader van het onderzoeksprogramma. De onderzoeksprojecten zijn parallel aan elkaar uitgevoerd tussen oktober 2005 en december 2009. Ongeveer 50 Europese en internationale instituten en bedrijven zijn actief betrokken bij de projecten en hebben inspanningen en activiteiten gebundeld in het cluster “MBR-Network”. Met een totaal budget van ruim €15 miljoen, waarvan ruim € 9 miljoen is gefinancierd door de Europese Commissie, vertegenwoordigt MBR-Network de grootste gecoördineerde onderzoeksinspanning naar MBR-technologie ter wereld.

Dit uitgebreide onderzoeksnetwerk is tot stand gekomen doordat in de tender binnen het ‘Special Targeted Research Program’ (STREP) naar MBR de twee onderzoeksconsortia EUROMBRA en AMEDEUS gelijkwaardig hoog scoorden. De EU besloot met verdubbeling van het totale budget om beide consortia te financieren onder voorwaarde dat zij samen zouden werken via zogenaamde ‘Liaison Groups’. Parallel aan de STREP procedure liep de selectie van een Marie Curie Fellowship Program waaruit MBR-TRAIN als winnaar naar voren kwam. MBR-TRAIN is zodoende opgenomen in het MBR-Network om zo efficiënt mogelijk met de onderzoeksfaciliteiten en geldstromen om te springen.

De gezamenlijke onderzoekslijnen binnen het MBR-Network richten zich op belangrijke technologische doorbraken, procesverbetering, kennis- en capaciteitsuitwisseling, ontwerp en realisatie op het gebied van MBR-technologie. Doel is uiteindelijk om te komen tot een bredere toepasbaarheid van MBR en een verbeterde concurrentiepositie van het Europese bedrijfsleven op MBR-gebied.

Nederland is in het MBR-Network vertegenwoordigd via EUROMBRA door de Technische Universiteit Delft, UNESCO-IHE, het Waterschap Hollandse Delta en Witteveen+Bos. In MBR-TRAIN participeren UNESCO-IHE en de TU Delft met ieder drie onderzoeksprogramma's. STOWA heeft als beoordelaar van onderzoeksresultaten een essentiële bijdrage geleverd. De Nederlandse bijdrage wordt internationaal zeer gewaardeerd. Nederland heeft een belangrijke bijdrage geleverd bij de ontwikkeling en toepassing van de MBR-technologie voor huishoudelijke afvalwaterbehandeling. De pionierende promotie- en onderzoeksinspanningen in STOWA-verband door o.a. DHV, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier; Waterschap Rijn en IJssel en Waterschap Regge en Dinkel heeft zijn vruchten afgeworpen. Het is echter niet zo dat we er nu zijn. In vergelijking met de ontwikkeling van het actief-slibproces leven we nu misschien in de jaren 50 van de vorige eeuw. Toepassing van MBR wordt overwogen

maar wordt nog niet grootschalig toegepast. Ook in Nederland moet niet de gedachte (blijven) heersen dat we het hier allemaal weten. Want wat vooral een belangrijk resultaat van het MBR-Network is, is dat over de grenzen heen gekeken kan worden. Zowel op het niveau van onderzoekers als ook van de eindgebruikers. Onderlinge kennis- en informatie uitwisseling heeft al diverse operationele knelpunten bij ontwerp, opstart en bedrijf van verschillende MBR's opgelost.

Binnen de activiteiten van het cluster "MBR-Network" zijn belangrijke technologische doorbraken, procesverbetering, kennis- en capaciteitsuitwisseling, ontwerp en realisatie op het gebied van MBR technologie bereikt. Dit leidt uiteindelijk tot een betere acceptatie en een betere concurrentiepositie van de Europese MBR-technologie en een bredere inzetbaarheid van de MBR-technologie voor zowel communale als industriële toepassingsgebieden. De drie projecten AMEDEUS, EUROMBRA en MBR-TRAIN, waar het cluster uit bestaat zijn in de onderstaande paragrafen kort toegelicht.

Dat MBR-technologie ook voor Nederland waardevol is bewijst de toepassing op verschillende communale en industriële installaties. De realisatieprojecten op RWZI De Drie Ambachten (Terneuzen) van Waterschap Scheldestromen, Norit en Evides Industriewater en het momenteel lopende realisatietraject op RWZI Glanerbrug van Waterschap Regge en Dinkel en Norit zijn daarvan uitstekende voorbeelden.

Zie voor nadere toelichtingen van de onderzoeksconsortia bijlage 2.

3.2 AMEDEUS

AMEDEUS "Accelerate Membrane Development for Urban Sewage Purification" is een STREP project van de EU binnen het prioriteitsgebied "Global Change and Ecosystems". De doorlooptijd van AMEDEUS liep van 01/10/2005 tot en met 30/09/2008. De coördinatie was in handen van het Water Berlijn- KompetenzCentrum onder leiding van dr. Boris Lesjean. Het totale budget is 5,9 miljoen EUR, inclusief 3,0 miljoen EUR Europese subsidie en 0,2 miljoen EUR van de Australische overheid.

In de afgelopen tien jaar zijn membraanbioreactoren in toenemende mate toegepast om communaal afvalwater te zuiveren. Ondanks de toepassing van ondergedompelde membranen, blijven MBR-systemen in de meeste gevallen duurder dan conventionele processen. Daarnaast bestaat de Europese communale MBR-markt vandaag de dag uit een duopolie van twee niet-Europese producenten (Zenon en Kubota), ondanks de vele initiatieven om een lokale MBR-markt te creëren.

Het AMEDEUS-onderzoeksproject richtte zich vooral op het stimuleren van Europese membraanleveranciers en kennisontwikkeling om Europese MBR-filtratie-technologieën beter te laten concurreren. Tevens was het doel een toenemende acceptatie voor toepassing van het MBR-proces door het verlagen van zowel de investerings- als operationele kosten. Er is onderscheid gemaakt in twee markten voor MBR-technologie in Europa: de bouw van kleine installaties (50 tot 2.000 i.e.) en middelgrote installaties (tot 100.000 i.e.), zie bijlage 2.

3.3 EUROMBRA

EUROMBRA staat voor “Membrane bioreactor technology (MBR) with an EU perspective for advanced municipal wastewater treatment strategies for the 21st century”, en is net als het AMEDEUS-project een STREP project van de EU binnen het prioriteitsgebied “Global Change and Ecosystems” en werd parallel aan AMEDEUS uitgevoerd onder coördinatie van de Norwegian University of Science and Technology - Trondheim onder leiding van prof.dr. Tor Ovel Leiknes. EUROMBRA had een projectduur van drie jaar, in de periode van 1/10/2005 tot en met 30/9/2008. Het totale budget was 4,2 miljoen EUR, inclusief 3,0 miljoen EUR Europese subsidie en 0,2 miljoen EUR van de Australische overheid.

EUROMBRA gaat uit van de veronderstelling dat de drinkwatervoorraad in de wereld schaarser wordt. In 2025 zal een derde van de mensheid (ca. 3 miljard mensen) worden geconfronteerd met ernstige waterschaarste. Het doel van dit project is het leveren van een bijdrage in de vermindering van de waterschaarste. De bescherming van water in de Europese Unie is aangemoedigd door de Kaderrichtlijn water (KRW). Het doel van de KRW is om waterreserves (kwaliteit en kwantiteit) te beschermen door middel van een geïntegreerd waterbeheerbeleid. De behandeling van afvalwater is een belangrijk aspect in het waterbeheerbeleid. Efficiënte en kosteffectieve waterzuiveringsprocessen zijn nodig om water te zuiveren, waarna het weer kan worden opgenomen in de watercyclus. De ontwikkeling en toepassing van MBR-systemen om ‘full-scale’ communaal afvalwater te zuiveren is de meest recente en belangrijkste technische vooruitgang in termen van biologische afvalwaterbehandeling.

De algemene doelstelling van EUROMBRA is een kosteneffectieve en duurzame oplossing te ontwikkelen voor nieuwe, efficiënte en geavanceerde communale afvalwaterzuiveringen gebaseerd op MBR-technologie. Gedurende het project is hierop ingespeeld door middel van een veelzijdig, gecoördineerd en coherent onderzoeksprogramma, dat expliciet is gekoppeld aan een van de belangrijkste beperkingen in MBR-technologie, namelijk membraanvervuiling en -verstopping. Dit is gekwantificeerd op micro-, meso- en macroschaal. De sleutel tot succes van het onderzoeksprogramma is het gebruiken van specialistische kennis en het uitvoeren van experimenten waarin de belangrijkste aspecten van zowel het systeemontwerp als de operationele facetten aan elkaar zijn gekoppeld, zie bijlage 2.

3.4 MBR-TRAIN

MBR-TRAIN staat voor “Process optimisation and fouling control in membrane bioreactors for waste water and drinking water treatment” is een Marie Curie beurs voor ‘Early Stage Research Training’ en had een doorlooptijd van 01/01/2006 tot en met 31/12/2009. De coördinatie was in handen van de Universiteit van Aken (RWTH), Afdeling ‘Chemical Engineering’ met als contactpersoon dr. Rita Hochstrat. Het totale budget is EUR 2,05 miljoen.

Het is bewezen dat membraanvervuiling een groot nadeel is voor duurzame MBR toepassing. MBR-TRAIN heeft zich gewijd aan onderzoek om membraanvervuiling in kaart te brengen zodat beheersstrategieën ontwikkeld kunnen worden. Het gaat hierbij om zowel de biologische als de fysisch-technische aspecten van dit fenomeen.

Het algemene doel van MBR-train is het optimaliseren van de werking van de MBR. Hierbij is er, onder andere, rekening gehouden met membraan types, materialen en configuratie, operationele instellingen en het economische aspect. De bevindingen zijn gebruikt om de modellering van de MBR te ontwikkelen, zodat de prestaties van een MBR-zuivering

beter voorspeld kunnen worden. De reikwijdte van onderzoeksprojecten varieert van laboratoriumschaal experimentele set-ups en pilot installaties tot operationele full-scale installaties.

Het ontwikkelen van MBR-technologie is een interdisciplinaire taak. Om inzicht te krijgen in wederzijdse interacties van het biologische systeem en de membraanscheiding, is kennis vereist in diverse deelgebieden zoals analytische scheikunde, microbiologie, polymeren en oppervlakte wetenschappen, stromingsleer, systeemtechnologie en civiele wetenschappen. Vandaar dat het consortium van MBR-TRAIN bestaat uit 10 partners uit de water-industrie, onderzoeksinstituten en universiteiten in heel Europa welke een dwarsdoorsnede vertegenwoordigen van relevante disciplines, sectoren en regio's, zie bijlage 2.

3.5 GWRC

De Global Water Research Coalition (GWRC) is een non-profit organisatie met een wereldwijde samenwerkingsverband in het verzamelen en verspreiden van kennis op het gebied van water. De voordelen die de GWRC haar leden biedt, is het geven van informatie en kennis op het gebied van wateronderzoek. De coalitie richt zich op de watervoorziening en vraagstukken op afvalwater en duurzame bronnen: de communale watercyclus, zie bijlage 2.

3.6 DWA

De DWA (Duitse vereniging voor water, afvalwater en afval), heeft als doel het ondersteunen en samenbrengen van specialisten actief in de water- en afvalwaterindustrie. De DWA is een non profit organisatie, die exclusief de publieke behoeften van de Duitse overheid nastreeft in de zogenaamde 'abgabeordnung'.

4

COMPILATIE VAN RESULTATEN

4.1 INLEIDING

De compilatie van onderzoeksresultaten van de drie Europese MBR-onderzoeken is thematisch gerangschikt. Hiervoor zijn de eindrapporten van de verschillende onderzoeken gebruikt welke zijn gebaseerd op de thematische werkpakketen van de onderzoeksprojecten. De thema's zijn in dit hoofdstuk nader toegelicht met de uitkomsten vanuit de verschillende werkpakketen. Per onderdeel is een beschrijving gegeven van de meest actuele informatie.

TABEL 1 THEMAS MBR-ONDERZOEKEN

Thema	AMEDEUS	EUROMBRA	MBR-TRAIN
Membranen en membraanconfiguraties	WP1 Textiel voor MBR filtratie	WP2 Membraan module	WP5 Toepassing van MBR modellen in full-scale installaties
	WP6 Toepassing van ondergedompelde modules binnen of buiten de reactor		WP7 Invloed van chemische reinigingsmiddelen op membraanmateriaal
			WP15 Invloed van membraan materiaaleigenschappen op vervuiling bij MBR's
Ontwerp van MBR-installaties	WP7 Ontwerp van een reeks gestandaardiseerde MBR-units in containerformaat	WP4 Procesconfiguratie	WP3 Prestatievergelijking van de procesvoering op full-scale van ondergedompelde holle vezels en plaatmembranen
	WP9 Ontwerp en bedrijfsvoering van tweeledige MBR-configuratie voor het verbeteren van de zuivering		WP9 Vergelijk van de operationele processen van drie full-scale MBR's
			WP19 Effect van dynamische veranderingen van het voedingswater op operationele parameters van MBR's
MBR-concepten	WP3 Ontwikkeling van 4 innovatieve MBR-technologieën en het optimaliseren van de reiniging	WP8 MBR case studies	WP8 Optimalisatie van full-scale MBR bedrijfsvoering voor gedecentraliseerde behandeling
	WP4 Analyseren van MBR-standaardisatie		WP14 Beheersing van vervuiling in een MBR op huishoudelijk afvalwater

Membraanvervuiling	WP2 Membraanvervuilingsstrategieën en on-line sensoren ter indicatie van vervuiling	WP5 Opstellen voedingswater karakteristiek en MBR monitoring	WP6 Karakterisering en beoordeling van de filtreerbaarheid van MBR's WP10 Onderzoek van membraanvervuiling door colloïdale deeltjes en opgeloste organische stoffen WP11 experimenteel en theoretisch onderzoek naar de invloed van permeaatterugspoelingen op vervuiling WP13 Procesoptimalisatie en biomassa karakterisering
Membraanreiniging	WP3 ontwikkeling van 4 innovatieve MBR-technologieën en het optimaliseren van de reiniging	WP3 Operationele werking van de beluchting en membranen WP6 Reinigingsprotocollen	WP7 Invloed van chemische reinigingsmiddelen op membranen
Modellering en sturing	WP5 Biologische modellering van MBR systemen en het effect van voorbezinking WP8 Geavanceerde data-acquisitie, toezicht en besturingssysteem voor MBR systemen	WP5 Opstellen karakteristiek van het voedingswater en MBR monitoring	WP1 MBR dataverwerking en meet en regeltechniek WP2 Modellering van het EPBR proces in een MBR WP12 CFD simulatietoepassingen op MBR systemen WP18 Mathematische modellering en procescontrole van MBR's
Energie	-	WP3 Operationele werking van de beluchting en membranen	WP9 Vergelijking van de operationele processen van drie full-scale MBR's
Kosten	-	-	WP4 Optimalisatie van operationele kosten in een full-scale MBR
Overige aspecten	-	WP7 Concentraat / slibverwerking	WP16 Het lot van persistente organische verontreinigende stoffen in MBR's voor drinkwater doeleinden WP17 Hoge afschuifkracht keramische air-lift MBR's voor slibbehandeling

4.2 MEMBRANEN EN MEMBRAANCONFIGURATIES

4.2.1 MEMBRANEN

MATERIAAL

De materialen voor membranen (UF en MF) variëren van polyvinylidendifloride (PVDF), polyethyleen (PE), Polyethersulfon (PES), polypropyleen (PP) en polysulfon (PS) en in mindere mate keramiek. De poriegrootten van deze materialen variëren binnen een range van 0,02 µm tot 0,5 µm. Het betreft de conventionele microporeuze membranen. Als aanvulling op deze standaardmaterialen is onderzoek uitgevoerd naar (non-woven) textiel als filtratie materiaal, de zogenaamde textiel bioreactoren (TBR). Textiel worden al veelvuldig gebruikt voor de verwijdering van deeltjes die groter zijn dan 1 µm.

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat textiel beperkend is ten opzichte van de conventionele MBR-materialen. Dit wordt door meerdere verschillen veroorzaakt. Ten eerste, textiel heeft een grotere poriegrootte. Om deze beperking tegen te gaan, kan textiel worden behandeld met een coating van nanoweb en plasma. De behandelde TBR lieten betere resultaten zien dan de onbehandelde en grove gewezen TBR. Ondanks dat de prestaties met behandeld TBR beter zijn dan onbehandeld TBR bleek de effluentkwaliteit met de conventionele MBR beter dan met de TBR. Specificaties over de TBR met coating en de uitgevoerde experimenten met bijbehorende parameters zijn te vinden in het Final activity report van AMEDEUS [1], Final MBR-Network workshop [51] en WP1 Textiel voor MBR filtratie [3].

Door Wetsus, UTtwente en WUR is onderzoek uitgevoerd naar de beste membraaneigenschappen met betrekking tot vervuiling. Verschillende membranen variërend in materiaal, poriegrootte, structuur en hydrofobe eigenschappen zijn gebruikt om deze membraaneigenschappen te selecteren. Uit het onderzoek kwam naar voren dat de hydrofiele polyvinylidenefluoride (PVDF) membraan, met een poriegrootte van 0,2 μm , de beste membraaneigenschappen heeft. Het resultaat van het onderzoek is ook afhankelijk van de membraanconfiguratie (vlakke plaat/buis/holle vezel) en de bedrijfsinstellingen/configuratie. In dit artikel is dit niet meegenomen. Ook de kritische flux en de irreversibele flux waren het hoogst in dit membraan [29]. Dit onderzoek is tevens verder toegelicht in paragraaf 4.5.2.

4.2.2 MEMBRAANCONFIGURATIES

INTERNE EN EXTERNE ONDERGEDOMPELDE MEMBRANEN

Er zijn met name twee verschillende configuraties van ondergedompelde membranen beschouwd, te weten:

- De intern ondergedompelde membranen.

Dit betreft een configuratie waarbij de membranen binnen in de tank zijn ondergedompeld onder het actief-slib. De membranen zijn hierbij rechtstreeks opgenomen in het beluchte gedeelte van de biologische tank.

- De extern ondergedompelde membranen.

In deze configuratie zijn de membranen in een aparte tank, naast de beluchte tank (filtratietank), ondergedompeld. In deze aparte tank vindt alleen het scheidingsproces tussen water en slib plaats.

Het belangrijkste verschil in het ontwerp voor extern in vergelijking tot intern ondergedompelde membranen, is de extra benodigde compartimentering. Ook moet een extra pomp worden geïmplementeerd om actief-slib te verpompen tussen de beluchte reactor en de filtratietank.

Uit het onderzoek kwam naar voren dat extern ondergedompelde membranen de voorkeur hebben in het geval:

- De membranen achteraf worden toegepast aan een bestaand ontwerp;
- Voor RWZI's met een middelgrote tot grote capaciteit met hoge piekfactoren;
- Wanneer strenge eisen worden gesteld met betrekkingen tot nutriënten.

De intern ondergedompelde membranen worden veelal toegepast voor kleinere RWZI's waarbij plaatmembranen worden toegepast en bij MBR-systemen waarbij alleen CZV of BZV-verwijdering van essentieel belang is. Voor situaties waarbij anoxische cycli worden afgewisseld met een aerobe toestand in dezelfde tank, is een extern ondergedompelde configuratie de enige mogelijkheid.

De extern ondergedompelde configuratie biedt de hoogste flexibiliteit voor de bedrijfsvoering. Zowel de uiteindelijke operationele- als de investeringskosten zijn voor deze configuratie echter circa 30% hoger dan voor intern ondergedompelde membranen binnen het uitgevoerde onderzoek [56].

Ook is een beslissingsboom opgesteld die als hulpmiddel kan dienen tussen de keuze voor een membraanconfiguratie. Deze beslissingsboom is te vinden in het rapport WP6, D38 van AMEDEUS [4] en is weergegeven in bijlage 3.

FILTRATIE

De mate van vervuiling en reiniging op een MBR wordt mede bepaald door de eigenschappen en het ontwerp van de membranen. Zodoende is binnen het EUROMBRA-project (WP2) verder onderzoek uitgevoerd naar de impact van membranen, kenmerken van membraanmodules en bedrijfsvoering op de mate van filtratie door een MBR-systeem [29]. De algemene doelstelling van deze studie was het identificeren van analytische middelen om de invloed te kunnen evalueren van (i) de membraanproductie en (ii) membraancoating op de poriënstructuur en de oppervlakte-eigenschappen van het membraan. Ook zijn hydrodynamische omstandigheden onderzocht op lab- en pilot schaal en met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) simulaties.

Uit dit onderzoek kwamen verschillende conclusies naar voren. In de onderstaande opsomming worden deze conclusies kort toegelicht met bronverwijzingen naar de volledige artikelen:

- Een significante verlaging van de verblijftijd in combinatie met een verlaging van één van de belangrijkste chemicaliën, die wordt gebruikt in de chemische nabehandeling, leiden tot een hogere puur water permeabiliteit (PWP). Ook wel gedefinieerd als het volume water dat per tijdseenheid door een membraan passeert. Verbeterde afscheiding, uitgedrukt als een hogere moleculair weight cut off (MWCO), van meer dan 99% van de opgeloste stof (TSS) is bereikt met membranen met een fijnere poriegrootte (<100 nm); terwijl de permeabiliteit nauwelijks afneemt. Het volledige artikel is te vinden in bron [14].
- Oppervlakte-eigenschappen van bestaande en gemodificeerde plaat- en holle vezelmembranen zijn op de verwijdering van het totaal organisch stof gehalte (TOC) met elkaar vergeleken. De oppervlakte-eigenschappen van gemodificeerde platen zijn door middel van de "layer by layer" techniek gemodificeerd. De uiteindelijke resultaten in procenten van deze verwijdering in het totaal organisch stof gehalte bedragen voor de bestaande plaat- en holle vezel membranen 15% en voor de gemodificeerde membranen tussen de 30% en 50%. Hieruit kan worden geconcludeerd dat gemodificeerde membranen betere prestaties leveren in het verwijderen van de TOC-gehalten. De volledige artikelen zijn te vinden in de bronnen [15, 16].
- De 'Cross-flow' filtratiestudies hebben bij een gelijkblijvende transmembraandruk (TMP) aangetoond dat de permeaatflux snel afneemt tijdens de eerste fase van het experiment, totdat een evenwicht is bereikt tussen de depositie en de onttrekking, die gekenmerkt wordt door een constante flux gedurende de tijd. Deze lange-termijn permeaatflux neemt toe met een stijgende 'cross-flow' snelheid, een dalende droge stof concentratie, een

daling van de gemiddelde deeltjesgrootte en een dalende dynamische viscositeit. De lange termijn permeaatflux is onafhankelijk van TMP-variaties [17][29].

- Onderzoek en observatietechnieken hebben aangetoond dat de intensiteit van de vezelbeweging van de ondergedompelde membranen hoger wordt bij een intensere beluchting en een lagere pakkingdichtheid van de membraanmodules [18][29].

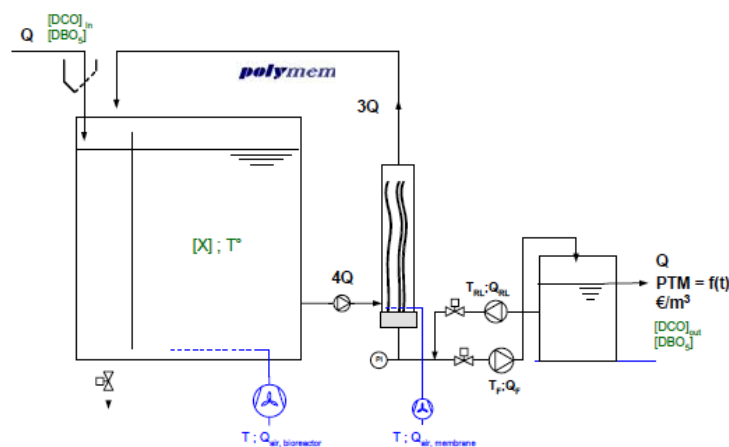
OPTIMALISATIE VAN HET MBR-CONCEPT

De eerste generatie MBR-systemen (1970) zijn gebaseerd op externe modules, waarin 'cross flow' filtraties over tubulaire membranen plaatsvinden. Deze generatie MBR's hebben een hoog energieverbruik en zijn duur in implementatie. Tweede generatie MBR-systemen (1985) hebben membraanmodules geïntegreerd in het systeem. Filtratie vindt plaats door middel van 'dead-end' filtratie. Reiniging wordt continu onder hoge snelheid, lage druk en grote hoeveelheden water, ook wel 'air scouring' genoemd, en met periodieke terugspoeling uitgevoerd. Deze tweede generatie MBR-systemen zijn kosteffectief en verminderen membraanvervuiling. Daarentegen is het onderhoud (chemisch reinigen, integriteitstesten en membraanreparaties) en het vervangen van ondergedompelde membranen zeer arbeidsintensief en ongezonder voor de werknemers.

Binnen het EUROMBRA-project is een nieuwe MBR-configuratie ontwikkeld die is gebaseerd op de beste eigenschappen van twee voorgaande generaties MBR-systemen. Het idee achter dit nieuwe concept is gebaseerd op kosteffectieve 'dead-end' filtratie en het plaatsen van de membraanmodule buiten de bioreactor, zie Figuur 1.

FIGUUR 1

IMMEM, MBR PILOT PID



Het doel van dit onderzoek is om een efficiënter MBR-concept te krijgen door:

- Het vinden van de juiste materialen, porieverdeling, poriegrootte en dimensies van de holle vezels;
- Een optimale configuratie van de module gericht op de dimensies, pakkingdichtheid en verdeling van de holle vezelbundels in de module;
- Onderzoeken van de optimale procesparameters voor deze configuratie;
- Ontwikkelen van een strategie voor membraanbeluchting door gebruik te maken van herhaalbare beluchtingscyclussen.

Uiteindelijk heeft de leverancier een nieuw MBR-concept ontwikkeld, het zogenaamde Ultrafiltratie Holle Vezel Membraan concept (IMMEM genaamd). Als membraanmateriaal is polysulfon toegepast. De nieuwe PolyMem module bestaat uit bundels van holle vezels geor-

dend en verpakt in een carter, dit is tevens uitgewerkt in paragraaf 4.4.2. Deze configuratie vergemakkelijkt de controle van het membraan op volledigheid en het herstel van beschadigde holle vezels. De beluchting van de membranen is gekanaliseerd. Het actief-slib wordt gefiltreerd van de buitenkant naar de binnenkant van de holle vezels.

Er zijn membraanfluxen van 10 l/m².h behaald. Onderhoud van de membranen vindt buiten de reactor plaats. Optimalisaties van de filtratiecyclussen en chemische reinigingstrategieën zijn uitgevoerd, waardoor lage aereatiesnelheden tijdens filtratie en hoge aereatiesnelheden tijdens het terugspoelen leiden tot een verbeterde controle van membraanvervuiling en een vermindering in de benodigde hoeveelheid beluchting [31]. In de uiteindelijke presentatie van de onderzoeksresultaten nuanceren ze deze presentaties echter aanzienlijk [1].

4.3 ONTWERP VAN MBR-INSTALLATIE

4.3.1 STANDAARDISATIE

Door vergroting van de kosteneffectiviteit van MBR-installaties in het productieproces, bij realisatie en bedrijfsvoering kan standaardisatie bijdragen aan een betere concurrentiepositie van de MBR-technologie.

De partners van AMEDEUS hebben een analyse gemaakt om de potentie, technische mogelijkheden, marktbelangen en verwachtingen te identificeren, met als doel de MBR technologie op de Europese markt te standaardiseren. De uitkomsten van deze analyse zijn gebundeld in 'the White Paper'. Dit rapport is beoordeeld door vertegenwoordigers van de Europese MBR-industrie. Het rapport wordt beschouwd als een discussie document ten behoeve van de MBR-standaardisatie in Europa. Mede dankzij dit document is de bewustwording en interesse in het onderwerp verhoogd. Ook heeft het geresulteerd in een initiatief in het vormen van formele procedures voor de standaardisatie samen met de CEN (Centre Europeen de Normalisation). Tijdens de beoordeling van vertegenwoordigers is het besloten dat een initiatief wordt genomen ten behoeve van de standaardisatie voor ondergedompelde (submerged) membranen. De uitkomsten hiervan, de CEN workshop Agreement (CWA) is gepubliceerd in de CEN Workshop Agreement, welke is gepubliceerd in 2008 (CWA, 2008) [52] [1].

4.3.2 CONTAINERISATIE

De productie van een MBR-installatie kan worden gestandaardiseerd in afmetingen, membraanoppervlak en reactorvolume. Bijvoorbeeld kan de gehele RWZI-unit worden uitgevoerd als een container-MBR. Door een dergelijke standaardisatie kunnen de productiekosten en uiteindelijk de investeringskosten van een MBR worden verlaagd. Dit is vooral geschikt voor kleine decentrale toepassingen (50 tot 2.000 i.e.).

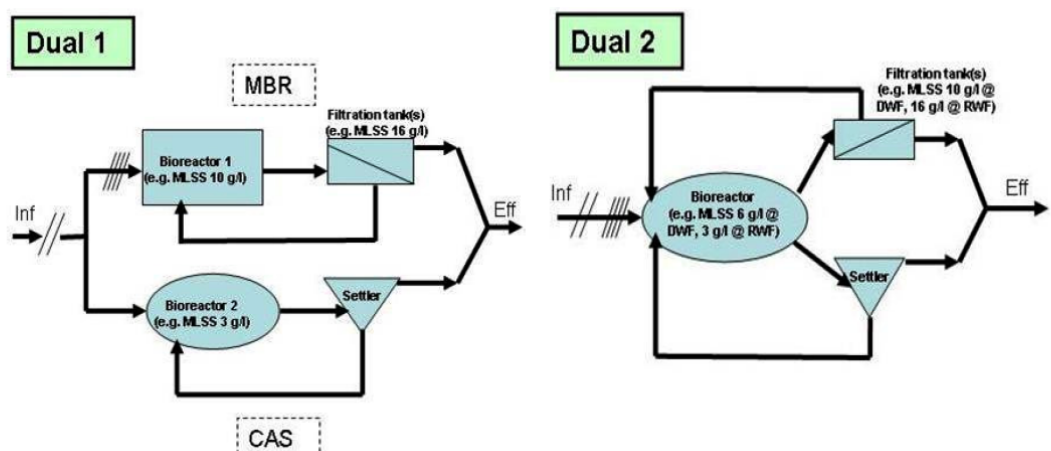
Een dergelijke MBR-unit, inclusief MBR-modules, bestaat uit een stalen of plastic container. Voor AWZI-units waarbij de benodigde capaciteit groter is dan 200 i.e., blijkt voorbehandeling met een trommelzeef in de container noodzakelijk. De containerunits zijn ontworpen voor container-MBR's voor capaciteiten van 50, 100, 200 en 500 i.e.. Grotere systemen tot 2.000 i.e. kunnen worden gecombineerd uit de kleinere units. Voor grotere toepassing tot 10.000 i.e. is een standaardoplossing alleen mogelijk voor de filtratie-unit. Specificaties over de exacte configuratie en dimensioneringsgegevens zijn verder uiteengezet in Final activity report van AMEDEUS [1].

4.3.3 DUAL OF HYBRIDE CONFIGURATIE

Strengere lozingseisen en verhoogde biologische en hydraulische belastingen leiden tot de noodzaak om bestaande capaciteiten van communale zuiveringsinstallaties uit te breiden. Vanwege de beperkte oppervlakte en voortdurende ontwikkelingen in efficiëntie en duurzaamheid van nieuwe zuiveringstechnologieën, is de toepassing van een membraanbioreactor (MBR) een aantrekkelijk alternatief. MBR-systemen brengen echter hoge investeringskosten met zich mee. De DUAL-configuraties, van (bestaande) conventionele actief-slib (CAS) systemen met (nieuwbouw) MBR-systemen, zijn een middel om investeringskosten te minimaliseren. Naar aanleiding van dit concept heeft het bedrijf Aquafin een technische haalbaarheid uitgevoerd op twee verschillende concepten: Dual 1 en Dual 2, zie Figuur 2. Dual 1 betreft twee aparte beluchtingstanks, bij Dual 2 wordt de beluchtingstank gedeeld, waarna slib scheiding plaatsvindt in een aparte MBR en NBT-tank. De MBR is gedimensioneerd op DWA-stroom, in het geval van RWA (of piekaanvoer) wordt deze behandeld door de conventionele AT.

FIGUUR 2

CONFIGURATIE, DUAL 1 EN CONFIGURATIE DUAL 2



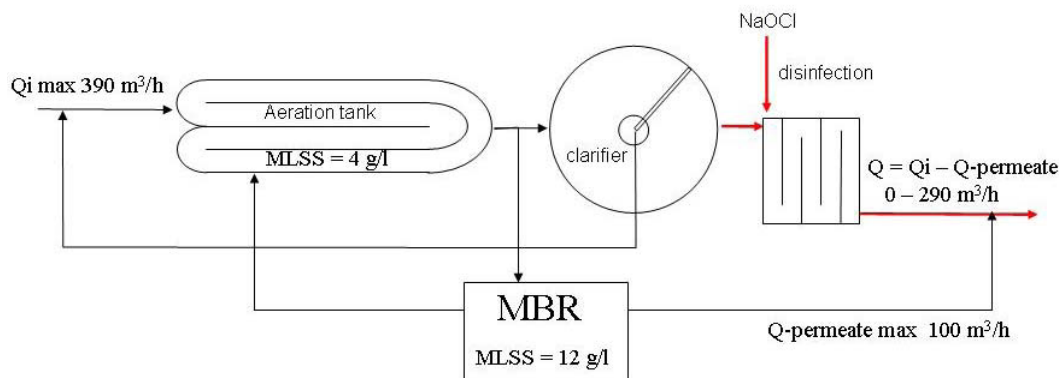
Onderzoek naar Dual 1 en Dual 2 op RWZI Schilde toonde aan dat optimalisatie tot een hybride MBR de effluentkwaliteit verbeterd. De uitkomsten zijn echter nog wel plaatsafhankelijk. Uit de haalbaarheidstesten van het Dual 2 concept is gebleken dat de dynamische droog- en regenwateraanvoeren, op pilot scale, verwerkt kunnen worden met behoud van de gestelde effluentkwaliteit. Door deze uitkomsten lijkt het systeem veel belovend. Verder onderzoek hiernaar wordt nog uitgevoerd. Meer details over deze concepten is gepubliceerd in de Final activity report van AMEDEUS [1], MBR-Network workshop [32].

4.3.4 HYBRIDE MBR

De rioolwaterzuiveringsinstallatie Heenvliet (RWZI Heenvliet) werd oorspronkelijk ontworpen om 8.950 i.e. te behandelen. Door de RWZI te upgraden naar een hybride MBR-systeem is de capaciteit gestegen tot 13.000 i.e. (390 m³/h). De nieuw geïnstalleerde MBR behandelt ongeveer 25% van de maximale hydraulische capaciteit, die gelijk is aan het DWA (droogweerafvoer). Tijdens regenwaterafvoer (RWA) wordt de resterende afvalwaterstroom naar de conventionele nabezinktank geleid. Door de combinatie van de beide sub-systemen in termen van hydraulische en biologische belastingen is het hybride concept geoptimaliseerd. De configuratie van het hybride systeem is weergegeven in Figuur 3.

FIGUUR 3

DEBIETVERDELING OVER NABEZINKTANK EN/OF MEMBRANEN



Een van de voordelen van het hybride concept is het economisch voordelig gebruik van de membranen. In tegenstelling tot MBR-systemen kunnen de membranen in een hybride MBR-systeem continu bedreven worden. Een van de onderwerpen in het onderzoek uitgevoerd door het Waterschap Hollandse Delta (WHD) is de ontwikkeling van membraanprestaties onder hoge hydraulische belastingen en de frequentie van membraanreiniging.

Na een drie jaar durend experiment kan worden geconcludeerd dat de membranen in het hybride systeem in tegenstelling tot MBR-systemen economisch voordeliger zijn in verband met een continue bedrijfsvoering. De kwaliteit van het slib was goed, zowel in het MBR-systeem als in de nabezinktank. In 2,5 jaar tijd zijn de membranen vijf keer gereinigd met citroenzuur en hypochloriet. Een punt van aandacht in een verdere optimalisatie is de reductie van het energieverbruik. Het systeem verbruikt meer energie in vergelijking tot een conventioneel systeem mede door het gebruik van 'air scouring' om de membranen te reinigen [37]. Naast de hybrideinstallatie te Heenvliet zijn er nog twee hybridesystemen in Nederland, namelijk de hybrideinstallaties te Ootmarsum en Glanerbrug.

4.4 NIEUWE MBR-CONCEPTEN

4.4.1 INNOVATIE FILTRATIECONCEPTEN

Een belangrijk doel van het onderzoeksconsortium was het ontwikkelen van nieuwe MBR-filtratieconcepten die commercieel toegepast kunnen worden. Hiertoe zijn drie verschillende membraanontwerpen onderzocht, welke afkomstig zijn van de projectpartners A3 Water Solutions, Polymem en Inge. Van deze drie verschillende ontwerpen is ook de hydraulische bedrijfsvoering geoptimaliseerd bij gemiddelde biologische omstandigheden.

De plaatmembranen van A3 Water Solutions waren al ontwikkeld en getest voordat het onderzoeksconsortium begon met het onderzoek. Deze MBR functioneerde zonder problemen, trad geen scheur- of klontvorming op van /of op de membranen. Ook is het mogelijk om de plaatmembranen dubbel uit te voeren (double-deck), hierdoor kan de benodigde hoeveelheid lucht per membraanoppervlak worden verlaagd. Ook de hydraulische bedrijfsvoering is geoptimaliseerd. Bij een flux van 25 L/m².h en een lage SADm-waarde van 0,2 Nm³/hm², kon de vervuiling over de membranen goed worden beheerst. Dit is verder uitgewerkt in paragraaf 4.4.4. De membranen van Polymem en Inge, respectievelijk Ultrafiltratie holle vezel membranen en FiSh membraan concept (zie ook paragraaf 4.4.2 en 4.4.3.), waren nieuw ontwikkelde membraansystemen. Nadeel van deze membranen was de hoge weerstand. Dit resulteerde in het scheuren van de membranen waardoor het permeaat vervuult raakte. Hierna zijn Polymem

membranen getest met een grotere diameter. Deze membranen bleken wel in staat om te bedrijven in een MBR. Voor het trekken van conclusies en voor het optimaliseren van de hydraulische bedrijfsvoering is echter meer onderzoek noodzakelijk. Ook bleek de pakkingdichtheid van de Polymem membranen te hoog, waardoor slib en andere deeltjes tussen de membranen bleef hangen. De Inge membranen hadden een ruw oppervlak, waardoor slibdeeltjes en dergelijke aan het oppervlak bleef hangen. De netto flux voor de nieuwste Inge membranen lag rond de 20 L/hm² bij een relatief lage SADm van 0,4 Nm³/hm². Deze waarde kan verder worden geoptimaliseerd als geen slibdeeltjes en dergelijke meer aan het membraanoppervlak blijven hangen. Het is niet mogelijk geweest om de beluchting van de MBR-systemen met Polymem en Inge te optimaliseren. Geconcludeerd wordt dat de membranen van Polymem en Inge nog verder onderzocht en geoptimaliseerd moeten worden [1].

4.4.2 ULTRAFILTRATIE HOLLE VEZEL MEMBRANEN

Tijdens het AMEDEUS-project heeft Polymem nieuwe moduleconcepten ontwikkeld. De moduleconcepten zijn gebaseerd op ultrafiltratie door polysulfon holle vezel membranen. Bij de ontwikkeling van de vezelconfiguratie werd bewust gekozen om geen textielversterkte middelen te gebruiken, om twee redenen: de lage prijs van de vezel en de mogelijkheid van het werken met kleine vezeldiameters (1,47 mm - 2,38 mm), wat leidt tot hogere dichtheden. De uiteindelijk ontwikkelde modules bestaan uit meerdere bundels van holle vezel membranen, zie Figuur 4.

FIGUUR 4

POLYMEM MODULE



Drie verschillende bundelconfiguraties in combinatie met vezeldiameters tussen 1,47-2,38 mm van Polymem werden onderzocht op het Anjou Recherche.

De membranen van de bundelconfiguraties met een vezeldiameter van 1,47 mm waren onderhevig aan breukschade. De membranen met een vezeldiameter van 2,38 mm braken niet, maar na circa 2 maanden trad echter wel verstopping op. Er kon echter wel worden geconcludeerd dat de vezels met een diameter van 2,38 mm beter fungeerden dan die met een diameter van 1,47 mm. Het is echter wel noodzakelijk dat extra onderzoek wordt uitgevoerd om de bundelconfiguratie en de beluchtingssystemen verder te optimaliseren om zodoende slibophopingen binnenin de membranen tegen te gaan.

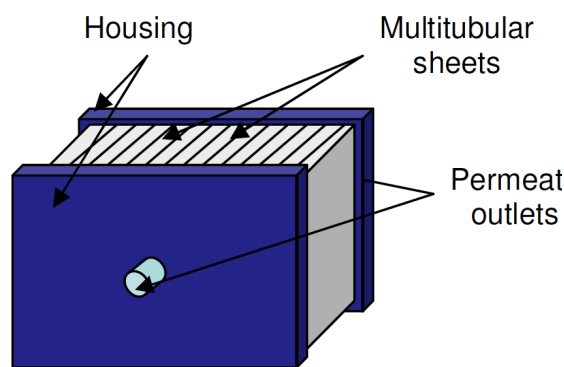
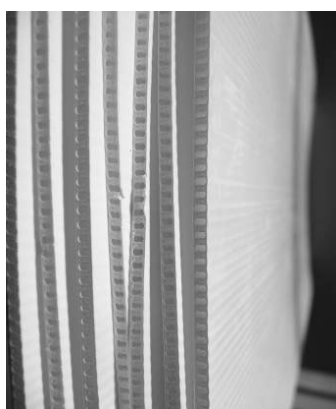
4.4.3 FISH MEMBRANEN

In het AMEDEUS-project heeft het Duitse partnerbedrijf Inge gewerkt aan de ontwikkeling van een nieuw membraanontwerp. De voorgestelde technologie combineert de voordelen van de meer gangbare holle vezel configuratie met die van de plaat membraan. Het resultaat is een plaatmembraan dat is opgebouwd uit gecombineerde holle vezels, dit wordt aangeduid met de term Fibre Sheet, of FiSh, zie Figuur 5. Enkele voordelen die het gebruik van het FiSh kan bewerkstelligen zijn

- Er treden geen verstoppingproblemen op in tegenstelling tot holle vezel membranen;
- In tegenstelling tot plaatmembranen kan het membraan worden teruggespoeld onder hoge terugspoelsnelheden;
- Het gebruik en/of frequentie van de grove bellenbeluchting onder de membraanmodules kan worden verminderd.

FIGUUR 5

FISH MEMBRANEN, LAAT DE STRUCTUUR VAN DE AANGESLOTEN HOLLE VEZELS ZIEN



De voordelen van de Fish kunnen tevens leiden tot een verlaging van het energieverbruik. Dit zou een noemenswaardig voordeel zijn in het gebruik van MBR-systemen. De Fish is uiteindelijk ook succesvol getest op pilot scale. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het FiSh membraan goede eigenschappen bezit met betrekking tot porositeit, permeabiliteit en resistentie tegen vervuiling. De uitkomsten betreffen tevens gedegen basis voor een membraanmodule en een bruikbaar eerste ontwerp van het systeem [33].

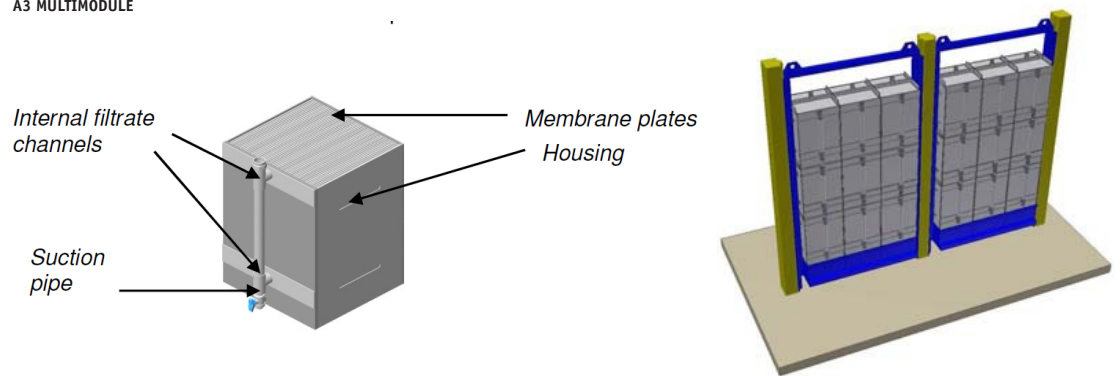
4.4.4 VLAKKE PLAATMEMBRANEN

Voor het gebruik in MBR-toepassingen heeft het Duitse partnerbedrijf A3 water Solutions een aangepaste plaat moduleconcept ontworpen, zie Figuur 6. Door de voordelen van dit concept kunnen de modulen beter verdeeld en gerangschikt worden. Ook is de filtratie door de membranen verbeterd en is het systeem eenvoudiger in gebruik en onderhoud. In samenwerking met het Duitse partnerbedrijf A3 water solutions en het onderzoekscentrum Anjou research van Veolia water zijn experimenten met het moduleconcept opgezet. Deze experimenten beschrijven de drie aspecten van een nieuw plaat MBR-filtratiesysteem:

- Het effect van een dubbel of trippel configuratie (2 of 3 modulen boven op elkaar geplaatst, Figuur 6;
- Het optimaliseren van de hydraulische prestaties in het verkrijgen van hoge filtraties en het minimaliseren van de beluchting;
- Het effect van biologische stressfactoren en hoge piekbelastingen op de membraanprestaties.

FIGUUR 6

A3 MULTIMODULE



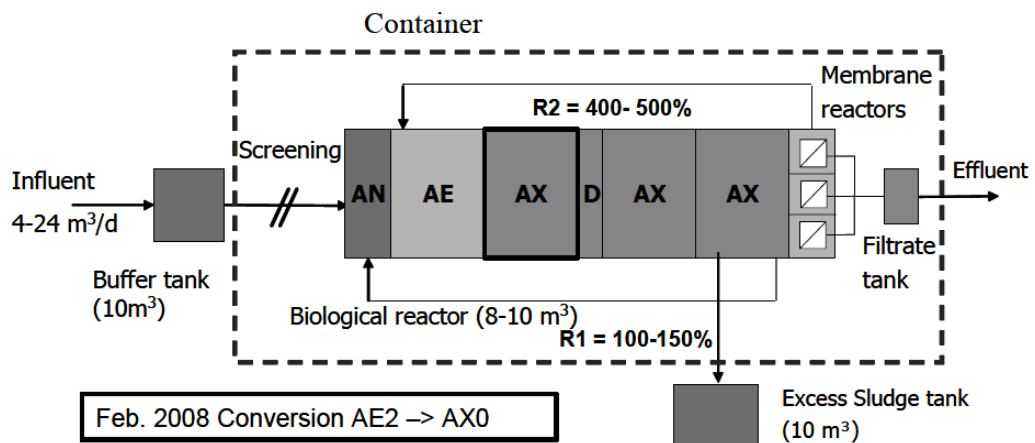
Uit de experimenten kwam naar voren dat de optimale flux gelijk is aan $25,5 \text{ l/m}^2\cdot\text{h}$ (procescondities: MLSS: 11 g/l ; SRT: 28 dagen; F/M ratio: $0,12 \text{ kg COD/kg MLSS/d}$). Deze optimale flux is in combinatie met een relatief lage membraanbeluchtingssnelheid van $0,2 \text{ Nm}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ (komt overeen met een specifieke hoeveelheid lucht van $8 \text{ Nm}^3/\text{m}^3_{\text{permeaat}}$) [19]. Tevens kan door het gebruik van aangepaste reinigingsstrategieën voor plaatmembranen een hoge permeabiliteit tussen de $500 \text{ á } 600 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$ worden gehandhaafd [34].

4.4.5 EPBR PROCES VOLGENS HET ENREM-PROJECT

Tijdens het 3,5 jaar durende ENREM-project (Enhanced Nutrient REMoval in Membrane-bioreactors) in Berlijn-Margaretenhöhe werd een nieuw en gepatenteerd proces onderzocht ten behoeve van de haalbaarheid van hoge effluenteisen, opgelegd door het Waterschap te Berlijn. Het biologische proces in het desbetreffende MBR-systeem combineert de biologische defosfatering, EPBR (enhanced biological phosphorus removal) met voordennitrificatie, zonder toevoeging van een koolstofbron. Dit resulteert in een Bio-P proces tot zeer lage fosfaat concentraties. De configuratie van het systeem is weergegeven in Figuur 7. Het MBR-systeem gaf hoge verwijderingsefficiënties voor CZV ($>95\%$), fosfaat ($>99\%$) en stikstof (98%) [35].

FIGUUR 7

EPBR PROCES



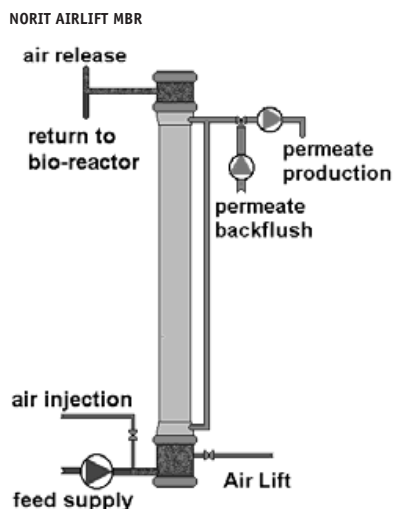
4.4.6 BIOFILM-MBR OF MBBR

Het koppelen van biofilmreactoren met membraansystemen, BF-MBR (biofilm membrane bioreactor) is een interessante ontwikkeling als alternatief voor een actief-slib MBR-systeem, AS-MBR (activated sludge membrane bioreactor). Een biofilm-MBR vermindert het gehalte aan opgeloste bestanddelen, dit kan ervoor zorgen dat problemen, zoals hoge viscositeit en membraanverstopping worden voorkomen. De BF-MBR proces met een bewegend slib-op-dragersysteem (moving-bed biofilm) is binnen het EUROMBRA-project bestudeerd. Drie verschillende biofilm-membraan procesontwerpen en configuraties zijn ontwikkeld en experimenteel geëvalueerd op energie-efficiënte en slibafvoer. Problemen van membraanverstoppingen werden niet gesignaleerd en de kosten voor de slibafvoer konden worden gereduceerd [36].

4.4.7 AIRLIFT MBR

Investerings in de afvalwaterzuiveringsinstallatie Terneuzen zijn op dit moment gaande om de effluentkwaliteit te verbeteren. Momenteel wordt het effluent opgewerkt tot gedemineraliseerd water middels 'reverse osmosis' (RO) in de Deco installatie van Evides industriewater, dit wordt vervolgens hergebruikt door DOW chemical Terneuzen. Begin 2010 zal het hergebruik van het effluent verdubbeld worden en daarom zal de RWZI Terneuzen (De Drie Ambachten) in 2009 ge-upgrade en geïntegreerd worden met een MBR-systeem. De MBR-systeem zal een nominale hydraulische capaciteit van 400 m³/uur krijgen en een maximale hydraulische capaciteit van 620 m³/uur. Het permeaat van de MBR wordt gevoed aan de RO-installatie van de Deco-installatie voor opwerking tot gedemineraliseerd water, welke hergebruikt wordt als voedingswater voor de ketel. Een Norit MBR airlift proefinstallatie is geïnstalleerd om data te genereren voor een full-scale MBR airlift systeem, zie Figuur 8.

FIGUUR 8



Eén van de grote voordelen van de Airlift MBR technologie is dat de membranen buiten de bioreactor in een schoon en droog systeem geplaatst zijn. Het afvalwater bevindt zich binnenin de membranen in plaats van erbuiten, waardoor het probleem van het onderhoud van de elementen die zijn ondergedompeld in geactiveerd slib wordt verminderd. Als gevolg daarvan zijn de membranen eenvoudig toegankelijk en kunnen ze worden gereinigd zonder het slib aan te hoeven raken of te ruiken. Bovendien werkt het hele proces efficiënter doordat het MBR-systeem volledig gescheiden is van de bioreactor. In tegenstelling tot traditionele MBR's maakt het Norit Airlift™ MBR principe gebruik van luchtballen in plaats van pompen om de druk door het ultra-filtratiemembraan te leveren. Hierdoor is het energieverbruik minder dan 0,25 kWh/m³.

In dit onderzoek wordt de haalbaarheid en maximale en operationele flux door het membraan van de Airlift MBR proefinstallatie onderzocht. Ook wordt de biologische membraanvervuiling op de RO membranen in de Deco installatie van zowel het permeaat van de MBR als het effluent van de AWZI Terneuzen onderzocht op verschillende operationele parameters. De Airlift proefinstallatie zal in eerste instantie bedreven worden als een hybride MBR, maar zal later omgezet worden naar een parallelle MBR bedrijfsvoering. Momenteel is de proefinstallatie nog in volle gang. De resultaten die tot nu toe bekend zijn bleken zeer hoopvol. Het slib van de MBR zorgde voor een extra beschermend laagje op de membranen, zodat de deeltjes beter werden tegengehouden. Een bruto flux van 35-60 l/m².uur werd in de proefinstallatie gehaald en het water uit de MBR bleek bovendien zeer geschikt voor de Deco opwerkingsinstallatie [58][59].

4.5 MEMBRAANVERVUILING

4.5.1 REDUCTIE MEMBRAANVERVUILING DOOR CHEMISCHE TOEVOEGINGEN

Om de flux door de membranen te verbeteren en om membraanvervuiling zoveel mogelijk tegen te gaan zijn experimenten uitgevoerd met 30 verschillende te doseren chemicaliën. De effecten van (één) van deze chemicaliën kunnen worden onderverdeeld in twee verschillende mechanismen. Het eerste mechanisme fungeert als een vlokformingsmiddel dat na doseren resulteert in grotere slibvlokken. Het tweede mechanisme is gebaseerd op adsorptie, waarbij vervuiling wordt geadsorbeerd.

De chemicaliën zijn getest in bekerglasproeven en getoetst aan de hand van SMP-verwijdering (soluble microbial products), deeltjesgrootteverdeling, membraanvervuiling, biotoxische invloed en benodigde doseerconcentratie. De belangrijkste resultaten zijn weergegeven in een tabel in bijlage 4. De drie best presterende chemicaliën zijn op praktijkschaal getoetst, dit zijn twee synthetische kationische polymeren en een biopolymeer. Het biopolymeer was niet in staat de filtratie-eigenschappen te verbeteren. De twee cationische polymeren waren wel in staat om de piek in de transmembraandruk te vertragen en de benodigdheden voor chemische reinigen te verminderen. Hierdoor is vermindering van membraanvervuiling door middel van de chemische toevoeging van kationische polymeren aangetoond [1] [25]. De operationele kosten van de chemicaliëndosering lagen rond de 0,6-2,5 EUR per m³ onttrokken (overtollig) slib. De kosten per m³ behandeld water variëren sterk en zijn afhankelijk van de SRT. Voor een gemiddelde SRT van 20 dagen, zijn de operationele kosten van polymeren gelijk aan circa 1-3 EURcent per m³ onttrokken afvalwater, dit is circa 10% van de totale operationele kostenpost van een grotere MBR (Varsseveld of Nordkanal). De totale kosten behorend bij een MBR-systeem zijn verder uiteengezet in paragraaf 4.9.

4.5.2 IFSM METHODE

Membraanvervuiling wordt beïnvloed door operationele condities, influente eigenschappen en membraaneigenschappen. Wetsus, UTWente en Wageningen Universiteit hebben een onderzoek uitgevoerd met als doel het selecteren van de beste membraaneigenschappen voor een MBR-systeem.

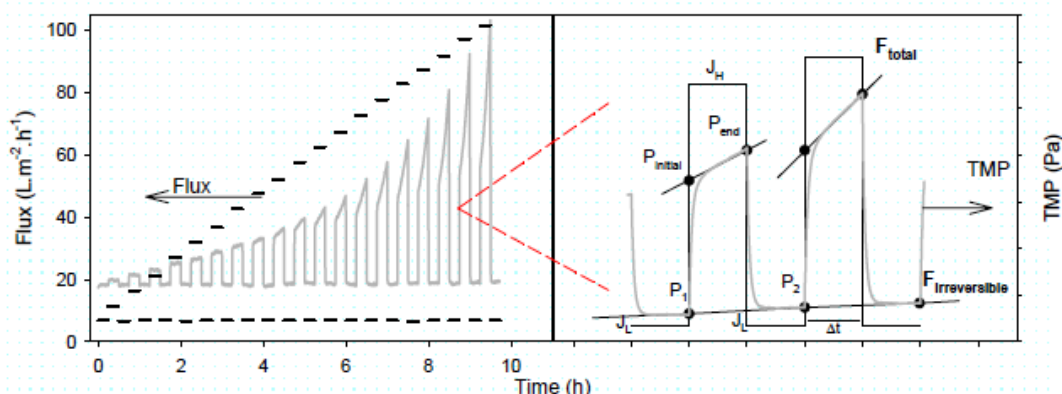
Verschiedende membranen variërend in materiaal, poriegrootte, structuur en hydrofobe eigenschappen zijn gebruikt om de beste membraaneigenschappen te selecteren. In dit onderzoek worden de prestaties van zeven verschillende membranen bestudeerd. De membranen zijn getest op membraanvervuiling door middel van de 'improved flux-step method' (IFSM), zie Figuur 9. Toelichting op Figuur 9 is te vinden in het 'Final MBR-Network Workshop' [13].

De membranen die zijn getest zijn:

- Hydrofiële polyvinylidenefluoride (PVDF) membranen met een poriegrootte van 0,02; 0,05; 0,1 en 0,2 μm ;
- Hydrofobe PVDF membraan met een poriegrootte van 0,1 μm ,

FIGUUR 9

DE IMPROVED FLUX-STEP METHOD (IFSM)



In de grafiek wordt de flux uitgezet tegen de tijd en transmembraandruk. Na elke filtratiestap bij flux J_H wordt een referentie flux J_L toegepast, die kan worden beschouwd als een vorm van relaxatie. Uit de grafiek is te zien dat het verschil tussen de transmembraandruk (P_{begin} tot P_{eind}) groter wordt, bij een verhoging in de flux over een bepaalde duur. Ook is te zien dat de irreversible fouling toeneemt ($F_{\text{irreversibele}}$) na elke filtratiestap.

De improved flux-methode bepaald het effect van de verschillende membraaneigenschappen op de maximale waterflux die kan worden bereikt door een membraan. IFSM laat niet alleen resultaten van de totale membraanvervuiling met de kritische flux zien, maar ook de irreversibele membraanvervuiling met de daarbij behorende irreversibele kritische flux. De hydrofiële polyvinylidenefluoride (PVDF) membranen met een poriegrootte van 0,2 μm heeft de beste membraaneigenschappen met betrekking op vervuiling. De kritische flux en de irreversibele flux waren het hoogst in dit membraan.

4.5.3 EPS DETECTIESYSTEMEN

Extracellulaire polymeerstoffen (EPS) zijn één van de belangrijkste factoren van membraanvervuiling. EPS wordt gevormd door de biologische activiteit in waterslib mengsel in de membraanbioreactor. De hoeveelheid en samenstelling van EPS hangt daarom sterk af van de vorming van microbiologische populaties in de reactor. Een techniek om een snelle en betrouwbare samenstelling van complexe media, zoals het actief-slib in biologische systemen te krijgen is 2D-fluorescence spectroscopy. Deze techniek kan worden toegepast om online het bioproces te monitoren zonder deze te beïnvloeden. Met behulp van het 2D-fluorescence spectroscopy, in combinatie met statische modellen, kan de activiteit en de prestatie van een MBR worden gemonitord. Met behulp van dit monitoringsysteem is het mogelijk om snel in te grijpen in het geval een verslechtering of achteruitgang van de prestaties optreedt [25].

Om microbiële populaties ontwikkeld in het actief-slib van een MBR-systeem te karakteriseren worden twee verschillende moleculaire technieken gebruikt, Fluorescence In Situ Hybridisation (FISH) en Denaturing Gel Electrophoresis (DGGE). De informatie die volgt uit deze technieken heeft betrekking op de microbiële structuur van de populatie en de bijbehorende dynamiek waarmee de verschillende soorten slib met elkaar vergeleken kunnen wor-

den. Deze informatie geeft inzicht in de vervuiling van de membranen, welke van nut kan zijn voor het ontwikkelen van monitoringsprocessen en optimalisatie strategieën [25].

In aanvullend onderzoek is tevens de invloed van verschillende factoren die de EPS beïnvloeden onderzocht op membraanvervuiling. Ook is het EPS gekarakteriseerd met behulp van '3D excitation emission matrix fluorescence spectroscopy' (3D-EEM), (meer informatie over de EEM is te vinden in de volgende artikelen: [25]; [27]) en 'Size-exclusion chromatography met dissolved organic carbon detection' (SEC-DOC). De specifieke resultaten zijn te vinden in het bijbehorende artikel [27]. Correlaties tussen verschillende MBR-systemen waren moeilijk te vinden.

Onderzoek uitgevoerd in de full scale MBR-systeem Heenvliet is gericht op de identificatie van membraanvervuiling door middel van een slibanalyse. Slibmonsters werden verzameld uit het full-scale MBR-systeem over een periode van 6 maanden. De slib- en permeaatmonsters werden na voorfiltratie (0,45 µm) geanalyseerd met behulp van een combinatie van DOC, SEC-DOC en EEM spectra. Uit de analyses van de slibmonsters werd EPS geïdentificeerd en polysaccharide- tot 70% en eiwitconcentraties tot 59% werden in de membranen vastgehouden. Uiteindelijk kon geen directe correlatie aangetoond worden tussen de permeabiliteitsreductie en EPS-concentratie in the 'full-scale' MBR [27].

4.5.4 OVERIGE

Een van de meest gebruikte technieken om membraanvervuiling te reduceren en controleren is het gebruik van beluchting (air sparging) over het membraanoppervlak, waardoor lokale schuifspanningen ontstaan. Schuifspanningen reduceren membraanvervuiling doordat lucht langs het membraanoppervlak wordt geschuurd en het creëert een hydraulische verdeling over de membraanvezels. Een andere methode om membraanvervuiling te reduceren is het gebruik van ondersteunende vloeistoffen (support media). Deze vloeistoffen worden toegevoegd in de reactor. Om het effect van ondersteunende vloeistoffen met verschillende areatiesnelheden op membraanvervuiling te onderzoeken is een experiment opgezet. De aanwezigheid van een ondersteunende vloeistof, zoals een kaolin-kleisuspensie leverde niet alleen een vermindering in membraanvervuiling op, maar ook een verandering in de deeltjesvorming op het membraanoppervlak [28].

Organische piekbelastingen worden verondersteld invloed uit te oefenen op de permeabiliteit (membraanvervuiling) en kwaliteit van het effluent. Om de onderlinge relatie tussen membraanvervuiling en piekbelastingen aan te tonen, zijn verschillende soorten organische substraten gedoseerd. Door deze dosering wordt een maximale belasting van biologisch afbreekbare C-bronnen direct in contact gebracht met het membraan om membraanvervuiling te initiëren.

De hoge F/M-verhoudingen, die veroorzaakt worden door hoge organische piekbelastingen, hebben slechts een geringe invloed op membraanvervuiling in vergelijking met andere niet-geïdentificeerde factoren, zoals slibkenmerken of seizoensschommelingen. Uiteindelijk heeft deze studie geen significante relatie aangetoond tussen hoge piekbelastingen en membraanvervuiling [38].

4.6 MEMBRAANREINIGING

4.6.1 VERBETEREN MEMBRAANREINIGING

Onderzoek op lab- en pilotschaal is uitgevoerd om chemicaliën te vinden die een alternatief bieden voor chloor bij de chemische reiniging van de membranen. De alternatieve chemicaliën zijn getest op membraantypen van A3 Water Solutions, Polymem en Inge. Uit het onderzoek kwam naar voren dat de samenstelling van de vervuiling aan de binnenkant van de membranen afhankelijk is van het type membraan en de bedrijfsvoering. Daarnaast bleek efficiëntie van de verschillende reinigingschemicaliën afhankelijk te zijn van het type membraan. Hierdoor is het noodzakelijk dat reinigingsprotocollen worden aangepast per membraan en opgesteld per reinigingschemicalie.

Chloor is een efficiënt reinigingsmiddel dat toegepast kan worden op alle membranen. De effectiviteit van chloor wordt wel beïnvloed door ophopend slib op het membraanoppervlak. Dit bleek echter ook het geval voor de alternatieve reinigingschemicaliën. Uiteindelijk kan het worden geconcludeerd dat waterstofperoxide het beste alternatief is voor chloor. Waterstofperoxide werkt het best wanneer het wordt gecombineerd met een terugspoelstap, hierdoor komen de reinigingschemicaliën direct in contact met de vervuiling binnenin de membraanporiën, zonder dat de vervuiling aan buitenkant van de membranen wordt beïnvloed. Het werkzame bestanddeel in chloor en waterstofperoxide is de aanwezigheid van sterke oxidatoren. Echter, regelmatig gebruik van sterke oxidatoren kan het membraanoppervlak beschadigen.

Om negatieve invloeden op het milieu te minimaliseren is het beter om in plaats van sterke oxidatoren enzymen toe te passen. Verder onderzoek naar enzymen moet nog worden uitgevoerd. Als aanvulling en verifiëring op de uitkomsten wordt geadviseerd om extra testen uit te voeren op full-scale [1][40].

4.6.2 REINIGINGSSTRATEGIEËN

Vervuiling is een inherent verschijnsel in alle membraansystemen. Een van de belangrijkste parameters tot duurzame exploitatie van een MBR is het beheersen van membraanvervuiling. Membraanvervuiling op korte termijn wordt voor een groot deel veroorzaakt door de manier van bedrijfsvoering. Bij membraanvervuiling op korte termijn wordt het membraan meestal schoongemaakt door gebruik te maken van terugspoelen op verschillende intervallen of spoelen met lucht. Membraanvervuiling op lange termijn kan worden gezien als de vervuiling die niet hydraulisch wordt verwijderd. Bij membraanvervuiling op lange termijn wordt vaak gebruik gemaakt van intensieve schoonmaakprocedures, zoals het reinigen met chemische middelen. Het reinigen van membraanvervuiling op lange termijn kan door middel van fysische en chemische reinigingsmethoden. Fysische reiniging maakt gebruik van hoge afschuifkrachten, verandering van de stromingspatronen rond het membraan, wassen met een combinatie van lucht en water (air scouring) en door beweging (trillingen, ultrasound) om eventuele afzettingen op het membraanoppervlak te voorkomen. Organische en anorganische vervuiling kan alleen worden verwijderd door chemische reiniging. De doelen in werkpakket 6 (cleaning protocols) uit het EUROMBRA-project zijn:

- Het opzetten van een samenvatting van potentiële reinigingstrategieën;
- Het definiëren van schoonmaakprotocollen als een functie van het MBR ontwerp en bedrijfsvoering;
- Het maken van een rapport voor het beheer van afval en de daarbij horende restproducten na het chemisch reinigen;
- Het onderzoeken van de effecten van de reinigingsstrategieën/protocollen op de membraanleeftijd.

Uiteindelijk is een formulier opgesteld waarin de volgende punten zijn beschreven.

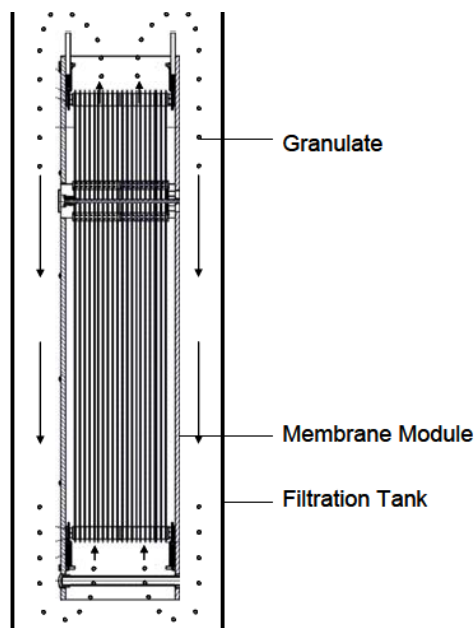
- Het gebruikte MBR-systeem;
- Mechanische en chemische reinigingsstrategieën.

Het formulier beschrijft de opgesomde punten om (irreversibele) langdurige vervuiling beter te kunnen bestrijden [41].

4.6.3 MEMBRAANREINIGING MET PROPYLEENKORRELS

Door het partnerbedrijf Microdyn-Nadir is een onderzoek met als doel het ontwikkelen van een verbeterd reinigingsproces om de hoeveelheid reinigingsmiddelen, geproduceerde bijproducten en onderhoudskosten te verminderen. Het onderzoek werd uitgevoerd door gebruik te maken van Bio-Cell modules. Deze modules bestaan uit gecombineerde plaat-polymeermembranen met terugspoelmogelijkheden. Het reinigingsproces werd verbeterd door polypropyleenkorrels aan de filtratietank toe te voegen. De polypropyleenkorrels worden met behulp van circulaties door de module en door middel van 'crossflow' langs het membraan geleidt, waardoor membraanvervuiling door middel van het continue schuren van de korrels op het membraanoppervlak aanzienlijk wordt verminderd, zie Figuur 10.

FIGUUR 10 SCHEMATISCHE CIRCULATIE VAN POLYPROPYLEENKORRELS IN DE FILTRATIE-TANK



Uit pilottesten met toevoeging van polypropyleenkorrels is continu reinigen zonder chemicaliën mogelijk. Het gebruik van polypropyleenkorrels lijkt geen invloed te hebben op de effluentkwaliteit [39].

4.7 MODELLERING EN STURING

4.7.1 MBR MODELLERING

Is het huidige kennisniveau van actief-slibmodellering (ASM) modellering op voldoende niveau om conventionele actief-slibsystemen (CAS) om te bouwen naar MBR-systemen? Dit onderzoek geeft een samenvatting van de belangrijkste bevindingen uit literatuur en beschrijft door middel van richtlijnen de werking van ASM-modellering in MBR-systemen. Het onderzoek is

onderverdeeld op basis van een paar fundamentele aspecten tussen CAS- en MBR-systemen, zoals de relevante verschillen van ASM-modellering met betrekking tot MBR-systemen, afbreeksnelheid van het chemisch zuurstofverbruik, verschillen van de biokinetische parameters en de integratie van soluble microbial products (SMP) - exopolymeric substances (EPS) concepten in biologisch modellen. Uiteindelijk zijn de verschillen, nieuwste stand van zaken en tekortkomingen per genoemd aspect met betrekking tot CAS modellering samengevat. Deze samenvatting moet fungeren als een gids voor de toekomst van de modellering van een MBR-systeem. De samenvatting wordt uitgebreid beschreven in het Final MBR-Network shop [42].

4.7.2 ASM MODELLERING MBR BIOREACTORS

Binnen het AMEDEUS-project is het biologisch actief-slibmodel (ASM), ontwikkeld door IWA, gekalibreerd voor het MBR proces. Het model is gekalibreerd aan een groot scala aan operationele omstandigheden zoals slibverblijftijd en temperatuur, maar ook op de influentkarakteristiek van het afvalwater. De kalibratie werd uitgevoerd in twee MBR-pilots met dezelfde operationele condities:

- De eerste pilot werd gevoed met ruw gezeefd (1 mm maaswijdte) communaal afvalwater;
- De tweede pilot werd gevoed met voorbezonken communaal afvalwater.

Op basis van veranderingen in slibverblijftijden (SRT van 15 dagen en 40 dagen) werden de limiterende factoren van het ASM-model op een breed spectrum van operationele condities gevalideerd en geïdentificeerd. Bij een slibleeftijd van 15 dagen werkt het gekalibreerde model goed voor verschillende influentkarakteristieken met dezelfde kinetische parameters. Bij een slibleeftijd van 40 dagen kon het biologische proces niet juist worden gekalibreerd waarna modellering niet mogelijk was. Dit werd veroorzaakt door de grenzen en randvoorwaarden van het ASM-model. Uit dit onderzoek kan worden geconcludeerd dat het ASM-model toepasbaar is bij lage SRT's. Indien de SRT's langer zijn, is het model niet meer toepasbaar en zal het hybridemodel ASM-ESP gebruikt moeten worden [43][1][44][45].

4.7.3 ACS MODEL

Een geavanceerd controle systeem (ACS) is ontwikkeld om data te verkrijgen voor het optimaliseren of het dynamisch in de gaten houden van de filtratiecapaciteiten in de MBR. Een dergelijk systeem kan voordelen en inzichten geven met betrekking tot operationele parameters, procesverstoringen, onderhoud, MBR-reiniging(procedures), intensiteit van de beluchting etc. Door de data acquisitie en het dynamisch sturen van het proces kunnen zodoende operationele kosten worden bespaard. Daarnaast kan de druk en belasting op membranen worden verminderd waardoor deze langer meegaan.

Het ontwikkelde ACS is gevalideerd op een MBR pilot. De ACS had een begrijpelijke userinterface en was in staat tot het loggen van gegevens van variërende operationele omstandigheden. Een demonstratie liet zien dat MBR-VFM metingen kon worden gecorreleerd aan de online permeabiliteit. Dit maakt deze meting geschikt als input parameter voor ACS. Daarnaast kwam uit de demonstratie naar voren dat 20% bezuinigd kon worden op de benodigde membraanbeluchting. Dit ging echter ook gepaard met een sterkere verlaging in de permeabiliteit. Gedetailleerde onderzoeksresultaten met betrekking tot de testen voor MBR-VFM zijn weergegeven in het deelrapport D51 [1][46].

4.7.4 FAILURE MODE ANALYSIS IN SMBR-SYSTEMEN

Ondanks de interesse van onderzoekers in MBR-technologie en de significante operationele ervaring is weinig informatie beschikbaar over de vele gebreken en storingen van MBR-systemen. Een van de belangrijkste technologische uitdaging is de beheersing van membraanvervuiling. In dit onderzoek worden vier 'full scale' communale waterzuiveringsinstallaties met ondergedompelde Zenon (ZeeWeed 500) membranen, submerged membrane bioreactors (SMBR) geëvalueerd op zuiveringsefficiëntie, betrouwbaarheid van de bedrijfsvoering, membraanvervuiling en de belangrijkste reden voor het optreden van systeemstoringen. Om de zwakke zones van een operationeel SMBR-systeem te karakteriseren is gebruik gemaakt van een 'failure mode' analyse.

Uit de analyse is naar voren gekomen dat membraanvervuiling en beschadiging het grootste risico is in het niet goed functioneren van een SMBR-systeem. De belangrijkste oorzaken van het slecht functioneren van de membranen in een SMBR-systeem zijn:

- Inefficiënte voorzuivering, vet en ander fijn materiaal worden niet tot slecht afgevangen;
- Verslechtering van de eigenschappen van het actief-slib, dit kan worden veroorzaakt door een tekort aan zuurstof of hoge zout en toxische belastingen.

PLC- en SCADA- systemen blijken betrouwbare sturingsystemen voor het besturen van een SMBR-systeem [47].

4.7.5 CFD MODEL

Huidige ontwerpmodellen voor MBR-systemen, zijn niet altijd toepasbaar op MBR-systemen. Een van de grootste nadelen van het actief-slib model zijn de menzeigenschappen, die gebaseerd zijn op complete menging of propstroom. Dit resulteert in een overschatting van de mengenergie en uiteindelijk in een onjuiste inschatting van de verwijderingsefficiënties van nutriënten.

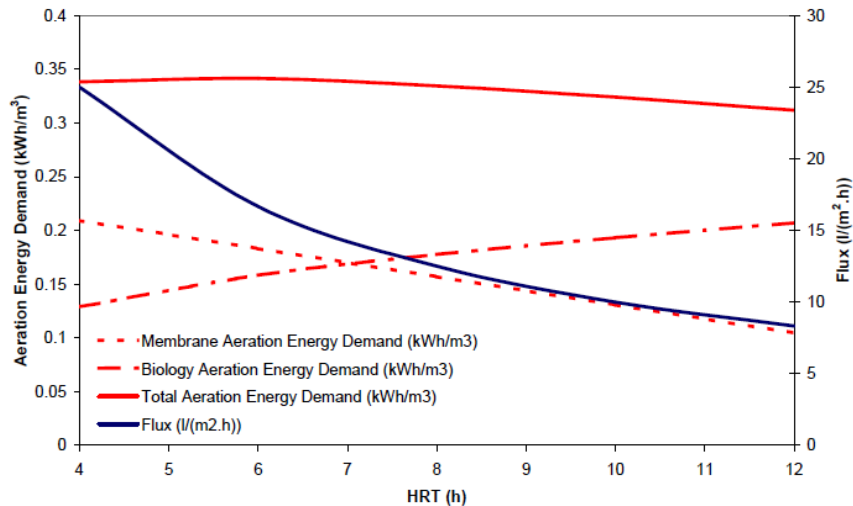
Het doel van dit onderzoek is het ontwerpen van een model, op basis van numerieke stromingsleerssoftware (CFD), om een beter inzicht te krijgen op de invloed van membraanconfiguraties, zoals plaat versus holle vezel en op de stromingspatronen van een MBR-systeem. Uiteindelijk is een CFD-model ontwikkeld die de invloed van membraanconfiguraties op de stromingspatronen en mengefficiëntie van een MBR-systeem kan voorspellen. Uit de CFD-modellering kwam naar voren dat het gebruik van een holle vezel membraanmodule energie-efficiënter is dan een plaatmembraanmodule. Het ontwikkelde CFD-model heeft het ontwerp van een MBR aanzienlijk verbeterd met het oog op de energie-efficiëntie van het mengsysteem bij een vastgestelde effluentwaarde [48].

4.8 ENERGIE

De beluchting, benodigd voor membraanreiniging en zuurstofvraag voor het in stand houden van de biologische processen, is verantwoordelijk voor 60-70% van de totale energiebehoefte in een MBR-systeem [53]. Om de totale energiebehoefte in een MBR-systeem terug te dringen is de beheersing van de beluchtingbehoefte essentieel. In dit onderzoek gefinancierd door MBR-TRAIN en EUROMBRA wordt een eenvoudig wiskundig model gepresenteerd voor MBR-beluchting. Het model heeft aangetoond dat aanzienlijke verlaging in beluchtingenergie kan worden verkregen door een verlaging van de flux en de benodigde membraanbeluchting, ook wel 'proportionele beluchting' genoemd. Dit is ook toegelicht in Figuur 11 [54].

FIGUUR 11

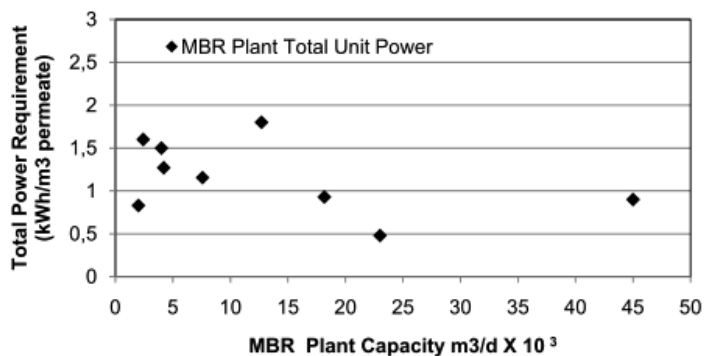
BELUCHTINGSENERGIE UITGEZET TEGEN DE FLUX EN HRT



Een van de uitdagingen in de MBR-technologie is het beheersen van het relatief hoge energieverbruik in vergelijking met de CAS-technologie. Uit een enquête gehouden onder participanten van de WaterReuse Foundation (WRF) genoemd in rapport [67] is de vraag gesteld om de totale energieverbruik van hun MBR-installatie te beschrijven. Het energieverbruik van een CAS-installatie, inclusief nitrificatie en mediafiltratie en een debiet van 4.000 m³ per dag is ongeveer 0,7 kWh/m³. Het energieverbruik van de MBR installaties, gedocumenteerd uit de WRF-enquête hebben een energieverbruik van 0,48 tot 1,8 kWh/m³ permeaat. Hieruit blijkt dat het energieverbruik van een MBR hoger ligt ten opzichte van een conventioneel actief-slibstelsysteem, zie figuur 12 Totaal energieverbruik MBR-installaties gerapporteerd uit de WRF enquête.

FIGUUR 12

TOTAAL ENERGIEVERBUK MBR-INSTALLATIES GERAPPORTEERD UIT DE WRF ENQUÊTE



Zie ook Figuur 14 voor specifieke energieverbruiken voor MBR-installaties en conventionele installaties binnen Erftverband.

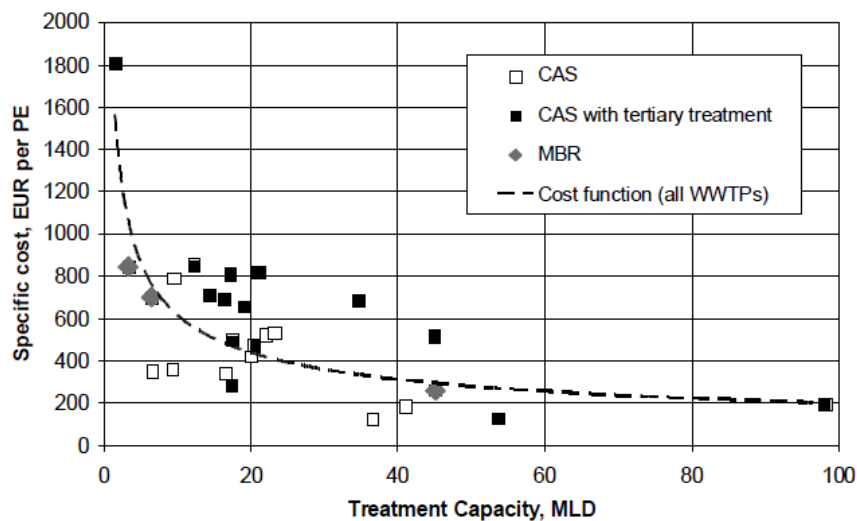
4.9 KOSTEN

Sinds 1999 beheert het Duitse waterschap Erftverband, partner van het MBR-netwerk, drie full-scale MBR-installaties (Rödingen, Glessen en Nordkanal). Erftverband is binnen EUROMBRA een onderzoek gestart om actuele investering- en operationele kosten van MBR-systemen te vergelijken met conventionele actief-slibsystemen (CAS). In Figuur 13 zijn actuele investeringskosten van 26 communale zuiveringsinstallaties, die Erftverband beheert weergegeven met

daarin de MBR-installaties. De investeringskosten van een MBR-systeem kunnen gemiddeld lager zijn dan die van een CAS-systeem. Door besparing op nabezinktankoppervlak en compactere bouwmethoden worden binnen Erftverband op investeringskosten relatief gunstige MBR-installatie gerealiseerd. Hierbij zijn de grondkosten nog niet eens in rekening gebracht aangezien het terrein reeds in eigendom van het verband was.

Daarbij dient opgemerkt te worden dat conventionele actiefslibsystemen met nabezinktanks in Duitsland relatief duur gebouwd worden met veel overcapaciteit en veiligheidsmarges vanwege andere type regelgeving.

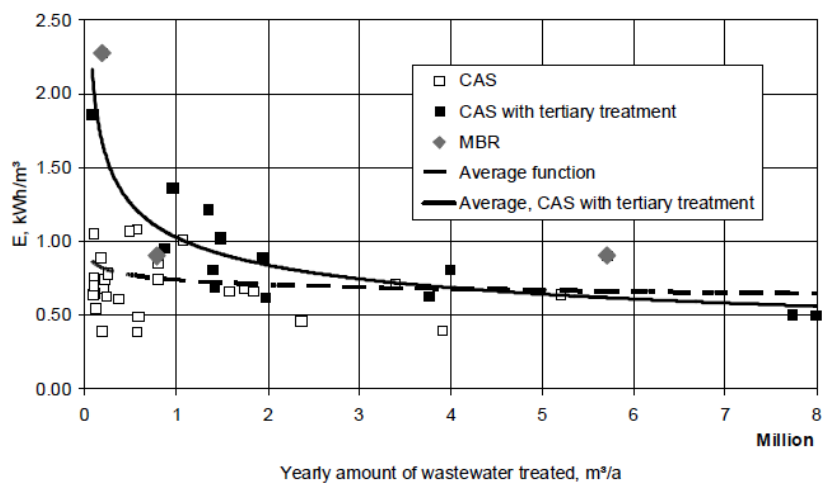
FIGUUR 13 SPECIFIEKE INVESTERINGSKOSTEN ERFTVERBAND RWZI'S



De operationele kosten van MBR-systemen zijn hoger dan die voor de CAS-systemen, dit heeft voornamelijk te maken met de hoge energieconsumptie van MBR-systemen (30% van de operationele kosten), maar ook met membraanreinigingskosten en hoger opgeleid personeel.

In Figuur 14 worden de energiebehoeftes van de communale Erftverband RWZI's weergegeven.

FIGUUR 14 SPECIFIEKE ENERGIECONSUMPTIE PER M³ BEHANDELD AFVALWATER



Uiteindelijk kan worden geconcludeerd dat de afschrijvingskosten van MBR-systemen economisch gunstig zijn in vergelijking tot conventionele technologieën, mits ze vergeleken worden op basis van een vergelijkbare effluentkwaliteit. Indien het effluentkwaliteit geen rol speelt, is een conventionele technologie goedkoper. Mede door ruimtebesparing en de lage kosten in de constructie van een MBR-systeem zijn de investeringskosten gelijk of lager dan die van een conventioneel systeem. Om de economische efficiëntie van een MBR-systeem op lange-termijn te garanderen is het noodzakelijk om de energie-efficiëntie en membraanleef-tijd te verhogen en de kosten voor membraanvervanging te verlagen [49].

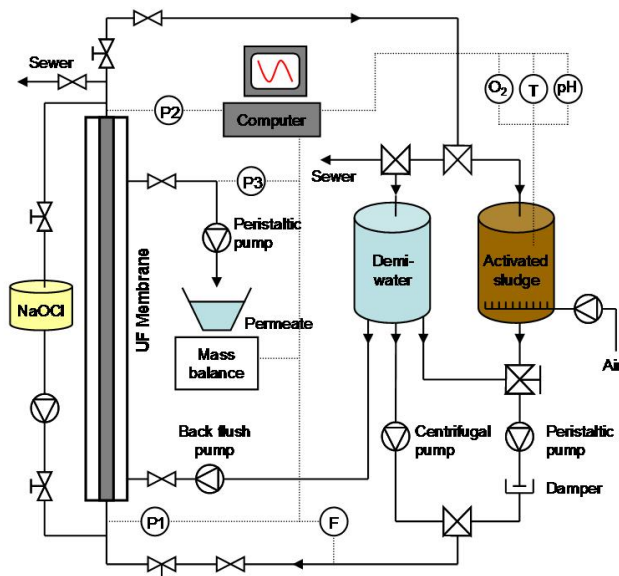
4.10 OVERIGE ASPECTEN

4.10.1 SLIBEIGENSCHAPPEN

Met het MBR proces is hoogwaardige effluentkwaliteit haalbaar, maar de toepassing ervan wordt echter belemmerd door de hoge operationele kosten die zijn gerelateerd aan het onvermijdelijke probleem van membraanvervuiling (verslechtering van het filtratieproces door de accumulatie van bestanddelen op het oppervlak of in de poriën van het membraan). Om MBR een financieel haalbaar alternatief te laten zijn is meer kennis van het complexe membraanvervuiling proces benodigd. Zowel EUROMBRA als AMEDEUS hebben hier veel aandacht aan besteed.

FIGUUR 15

DFCM-INSTALLATIE



4.10.2 DFC-METHODE

In full-scale MBR-installaties worden enorme verschillen in de doorlaatbaarheid van membranen gevonden. Veel van deze verschillen worden veroorzaakt door de verschillen in filtreerbaarheid van het MBR-slib. Met de TU Delft Filtratiekarakterisering methode (DFCm) is het mogelijk om de filtreerbaarheid van het MBR-slib uit te drukken in een genormaliseerde parameter, waardoor de verschillen in filtreerbaarheid kunnen worden gedefinieerd en geëvalueerd. In het kader van de MBR-TRAIN en EUROMBRA-projecten zijn op tien verschillende MBR-locaties filtratietesten uitgevoerd om interessante relaties en verschillen aan te tonen tussen deze locaties.

De DFCm methode is een effectief middel om de verschillende relaties en verbanden tussen de filtreerbaarheid van het MBR-slib op de doorlaatbaarheid van de membranen te onderzoeken. Uit de DFCm is gebleken dat vlokvorming en het uiteenvallen van vlokken (deflocculatie) belangrijke processen zijn in het creëren van goed filtreerbaar MBR-slib[49].

In het proefschrift “The Delft Filtration Characterisation method (DFCm)” wordt een methode beschreven waarmee de filtreerbaarheid van actief-slib uit elke willekeurige MBR beoordeeld kan worden. De DFCm heeft zich bewezen als een goede methode om de invloed van de actief-slib filtreerbaarheid in het filtratieproces in kaart te brengen. Dit is van belang, want een goede filtreerbaarheid kan beschouwd worden als de eerste vereiste voor een efficiënt MBR filtratieproces [50].

4.10.3 ON-LINE MEETSENSOREN ALS INDICATOR VOOR MEMBRAANVERVUILING

Binnen het AMEDEUS-project zijn twee online-meetsensoren ontwikkeld om de samenstelling en de omvang van membraanvervuiling te monitoren. Met behulp van deze online meetsensoren kan membraanvervuiling dynamisch worden gecontroleerd en de membraanfiltratieflux worden verbeterd.

De eerste online sensor is gebaseerd op een fysische test, de zogenaamde MBR-VFM (VITO vervuiling meting). Toelichting op de fysische test is te vinden in het ‘Final MBR-Network workshop’ [20]. De tweede online sensor betreft een chemische analyse van de organische vervuilingsdeeltjes in het slib, dit betreft de fotometrische EPS-SIA-sensor. Toelichting op de chemische analyse is te vinden in het ‘Final MBR-Network workshop’ [21].

Beide online meetsensoren hebben voor- en nadelen. Daarnaast vullen de twee systemen elkaar aan. Hierdoor kan een combinatie van de twee sensoren in MBR interessant zijn voor de monitoring van (membraan)vervuiling. In bijlage 5 zijn in een tabel de verschillende eigenschappen van de online meetsensoren nauwkeurig weergegeven [1].

Op basis van het onderzoek van Rosenberger et al. [23], is in talrijke studies is geprobeerd de relatie tussen de polysachariden concentratie (PS), in het supernatant van actief-slib, en de lange termijnvervuiling in membraanbioreactoren te achterhalen. In sommige studies konden deze lineaire relaties worden aangetoond, terwijl in andere studies deze niet te achterhalen zijn, Drews et al [22]. Jammer genoeg zijn de meeste studies onder verschillende omstandigheden uitgevoerd (verschillende membranen, SRT, hydraulische randvoorwaarden en verschil in influent) en zijn daarom zelden vergelijkbaar.

Om een zo groot mogelijk overzicht van vergelijkbare resultaten in verschillende MBR-systemen te krijgen, is in 2007, in Berlijn, een grootschalige monitoringscampagne opgericht in vier verschillende MBR-systemen. In deze systemen zijn vijftien verschillende parameters tien maanden lang wekelijks gemonitord om de eigenschappen van het water slibmengsel (mixed liquor) in MBR-systemen te onderzoeken. Uiteindelijk is het de bedoeling om een universele parameter te verkrijgen om snel een indicatie van zowel korte- als lange termijn membraanvervuiling aan te kunnen tonen en deze automatisch door een online sensor te monitoren. Hiermee kan het systeem tijdig aangepast worden om membraanvervuiling zoveel mogelijk te beperken.

De neiging van membraanvervuiling veroorzaakt door slibmonsters uit MBR-systemen werd online gemeten door de in situ Berlijnse filtratie methode (BFM). De BFM meet de kritische flux van het actieve slib in het MBR-systeem. De BFM detecteerde irreversibele membraanvervuiling in het systeem, zodra de kans op membraanvervuiling aanwezig was. Jammer genoeg is het niet mogelijk om een universele parameter uit slibmonsters van MBR-systemen, die de neiging van membraanvervuiling veroorzaakt aan te wijzen. In het ‘Final MBRR-Network workshop’ wordt deze techniek uitgebreid beschreven [24].

4.10.4 SLIBONTWATERING EN FILTREERBAARHEID IN COMMUNALE MBR'S

Ondanks de grote belangstelling van wetenschappers en operators in MBR-technologie op het gebied van effluentkwaliteit, retro-fitting/up-grading potentieel en membraanvervuiling, is maar weinig informatie beschikbaar ten aanzien van de ontwatering en filtreerbaarheid van surplusslib. Binnen het EUROMBRA-project is een onderzoek uitgevoerd met als doel: het maken van een samenvatting van de meest opvallende uitkomsten uit een twee jaar durende monitoringsstudie op de ontwatering en filtreerbaarheid van surplusslib in een grote 'pilot scale' MBR voor huishoudelijke afvalwaterbehandeling. Op de uitkomsten van de monitoringstudie is een statistische analyse uitgevoerd, om mogelijke correlaties tussen deze parameters te beoordelen. Bovendien zijn de resultaten van 54 ontwateringstesten uitgevoerd op pilot schaal met filterpers. Hierbij zijn de gevolgen van de verschillende operationele parameters (polymeertype en -dosering en druk) op het uiteindelijke drogestofgehalte besproken. Een overmaat aan slibmonsters zijn over een periode van twee jaar verzameld en geanalyseerd op de ontwatering, filtreerbaarheid en bezinking.

Alle bovenstaande eigenschappen hebben een negatieve correlatie met de temperatuur. De reden voor deze negatieve correlatie is de negatieve correlatie van de temperatuur zelf met de concentratie van organische stoffen in de vloeistoffase van het slib.

Experimenten uitgevoerd in de 'pilot-scale' filterpers hebben aangetoond dat MBR-slib ontwaterd kan worden met dezelfde ontwateringsfaciliteiten in een conventionele actief-slibinstallatie. Uiteindelijk bleek dat het type polymeer met een gestructureerde polyelectrolyt de belangrijkste parameter op het droge stofgehalte van het ontwaterd slib was. De dosering en druk hadden geen invloed op het droge stof gehalte [55].

4.10.5 SLIBVERWERKING EN BEHEER

Membran bioreactoren vervangen niet alleen de bezinkeigenschappen van een nabezink-tank door middel van het toepassen van filtratie, maar modificeren ook de biologische processen. Hierdoor kan het proces onder hogere slibverblijftijden, slibgehalten en lagere slibbelastingen opereren met als resultaat een lagere slibproductie. Slibverwerking is een belangrijk aspect in waterzuiveringsinstallaties en de lage slibproductie van een MBR-systeem is vaak genoemd als het voornaamste voordeel van dit proces.

Er is een onderzoek uitgevoerd om slibproducties in verschillende MBR-systemen te voorspellen. Binnen dit onderzoek zijn drie verschillende modelconcepten opgezet. Het eerste model is gebaseerd op de massabalans voor het chemisch zuurstofverbruik (CZV). Het tweede model is gebaseerd op de massabalans van de organische stoffen en het derde model op het actiefslib model (ASM). De eerste twee modellen zijn simpel, gericht op 'steady state' condities en vooral gericht op een directe toepassing voor in het veld. Het derde model richt zich op de voorspelling van de slibproductie onder dynamisch condities. De drie voorgestelde modellen zijn gekalibreerd en gevalideerd op data verkregen uit 'pilot-scale' installaties van Universiteit Trento (UNITN).

Het is aangetoond dat het eerste model betrouwbaar is in de verschillende onderzoeksstudies. Het tweede model heeft aangetoond betrouwbaar te zijn met een over- of onderschattingsfout van 15% in de uitgevoerde onderzoeksstudies. Om correcte voorspellingen te doen, moet het model worden aangepast aan de 'steady state' condities. Tijdens het opstarten van het proces kunnen de SRT waarden namelijk niet als constant worden beschouwd. Uit de onderzoeksstudies is tevens gebleken dat het simpelste ASM (ASM 1) model niet betrouwbaar was als het substraatopslagmechanisme een belangrijke rol speelt. Het substraatopslagmechanisme speelt

namelijk een belangrijke rol in het voorspellen van de slibproductie in MBR-systemen. Uit dit gegeven is een uitgebreide versie van het ASM-model ontworpen (ASM 3). Ook zijn modellen ontworpen voor het voorspellen van de slibproductie in anaerobe MBR-systemen. In werkpakket 7 (WP 7), D15 en D18 is meer informatie te vinden over de beschrijving en resultaten van het gebruik van deze modellen [2].

4.11 MBR-ONDERZOEKEN GWRC

De GWRC heeft in 2004 een vergelijking opgesteld tussen de ontwikkeling van MBR-technologie in Europa en de VS [5]. Vandaaruit zijn enkele speerpunten op het gebied van MBR gedefinieerd; zoals permaatkwaliteit en bedrijfsvoering. In de vergadering van de GWRC Raad van Bestuur van november 2007 te Sydney, is besloten om het onderzoeksgebied water en energie op te nemen in de onderzoeksagenda. Vanuit dit kader is een workshop georganiseerd om de huidige stand van kennis en lopende activiteiten te herzien. Ook is een gefaseerde onderzoeksstrategie ontwikkeld. In deze onderzoekstrategie zijn verschillende onderzoeken opgestart om MBR-systemen op het gebied van energieverbruik rendabeler te maken. Veel van deze onderzoeken moeten nog worden opgestart of zijn nog lopend en niet afgerond. De projecten die afgerond zijn leveren geen of weinig vernieuwde input op de informatie beschreven uit de MBR-compilatie vanuit de MBR-networkactiviteiten. De GWRC-activiteiten sluiten veelal aan op de onderwerpen zoals hiervoor benoemd. Hieronder volgt een korte opsomming en indien mogelijk toelichting van de projecten:

- Het gebruik van nanotechnologie in membranen om het energieverbruik in water- en afvalwatertoepassingen te verbeteren. (Project in uitvoering, duur project: 10 jaar);
- Het voorkomen van membraanvervuiling (2007-2009), in nauwe relatie tot MBR-Network;
- Membraan bioreactor (demo plant) (2006-heden).

De installatie is in gebruik sinds december 2006 en wordt bedreven op membraanfluxen van 25 l/m².h en een energieconsumptie van 0,5 - 0,6 kWh/m³. Uit dit onderzoek kan worden geconcludeerd dat de energieverbruik ongeveer 0,3 kWh/m³ lager is in vergelijking tot de huidige stand van zaken in MBR bedrijfsvoering;

- Hydrodynamische studie op holle-vezel membranen om energieverbruik en membraanvervuiling te minimaliseren. (onderzoek in uitvoering, resultaten volgen);
- Pilottesten op een membraandestillatie bioreactor (MDBR) voor afvalwater terugwinning (onderzoek in uitvoering).

De MDBR proces vervangt de filtratiemembranen van conventionele MBRs met membraandestillatie membranen (MD). De grote voordelen van MDBR zijn:

- De MD membranen verplaatsen het permeaat als damp. Dit heeft tot gevolg dat de kwaliteit van het permeaat zeer hoog is. Het CZV-gehalte valt te verwaarlozen;
- Het proces wordt bedreven onder atmosferische druk en vraagt een relatief laag niveau van elektriciteit voor de circulatie en luchttoevoer in tegenstelling tot de RO-stap in een conventionele terugwinning;
- De MDBR wordt bedreven op temperaturen < 60 graden.

Het verwachte voordeel van dit project is een nieuw MBR-systeem geschikt voor terugwinning van het afvalwater zonder gebruikt te maken van een RO-systeem. Verwacht wordt dat het systeem zowel een verlaging in de kosten als in het energetisch rendement teweeg brengt [61][62][63].

4.12 MBR-ONDERZOEKEN DWA

Lange tijd was Duitsland voorloper op het gebied van membraanonderzoek in Europa. Vanuit de DWA-ATV-werkgroepen is veel vooruitstrevend onderzoek uitgevoerd en zijn richtlijnen opgesteld om MBR-installaties te ontwerpen, te bouwen en te bedienen. Tot 2005 was ATV samen met STOWA voorloper in Europa als het gaat om MBR-onderzoek. Na 2005 heeft ATV zich vooral aangesloten bij ontwikkelingen vanuit het MBR-Network, waar vele Duitse instituten bij betrokken waren. Veel van de ATV-DWA-onderzoeken leveren net als de onderzoeken van het GWRC geen tot weinig extra informatie op in vergelijking tot de MBR-compilatie van de MBR-network projecten en een relatief groot gedeelte van deze onderzoeken zijn gericht op de industriële afvalwaterbranche. Ook zijn sommige onderzoeken al vertaald en meegenomen in het MBR-Networkproject of uitgevoerd in STOWA-verband, zoals het EPBR-proces, beschreven in paragraaf 4.4.5 en het belang van een intensieve voorbehandeling voor een optimale werking van een MBR-systeem beschreven in het STOWA-rapport onderzoek MBR Varsseveld [6][68].

In bijlage 6 is een door de DWA opgestelde tabel van verschillende reinigingsmiddelen en specifieke werking op membraanvervuiling bijgevoegd.

In bijlage 7 zijn de bijkomende operationele kosten van een MBR-systeem in vergelijking tot een CAS systeem bijgevoegd [68], deze sluiten sterk aan bij de kostenanalyse van Erftverband.

De titels van de communale MBR-projecten/onderzoeken van het DWA van 2007 tot heden zullen in het kort worden gesommeerd [64][65][66]:

Projecten 2007:

- Verwijdering van enteropathogene virussen en bacteriën uit het afvalwater met behulp van membraanbioreactor-technologie;
- Verwijdering van somatische en F-specifieke bacteriofagen, virussen en enteropathogenen uit afvalwater met behulp van membraanbioreactor-technologie.

Projecten 2008:

- Membraanbioreactoren in de communale afvalwaterbehandeling;
- Verbetering en beheersing van de membraanfiltratieprestaties door middel van vloeibare reinigingsmiddelen.

Projecten 2009:

- Studies over het gebruik van wervelbedreactoren in het MBR-proces.

Projecten 2011:

- Cross-flow beluchting in het MBR-proces.

5

TERUGKOPPELING NAAR DO'S EN DONT'S MBR

5.1 INLEIDING

In het STOWA-rapport 'Ontwerp- en beheersaspecten van een MBR voor de behandeling van huishoudelijk afvalwater'(STOWA 2008-08), zijn de kritische ontwerp- en beheerspunten van een MBR-installatie benoemd. Deze ontwerp- en beheerspunten zijn gebaseerd op de ervaringen van ontwerpers en bedrijfsvoerders tot 2008 van de MBR-installaties in Varsseveld, Heenvliet en Ootmarsum en de destijds in planningsfase verkerende installaties in Hilversum en Alkmaar.

5.2 AANVULLINGEN UIT EUROPEES ONDERZOEK

In het STOWA-rapport 2008-08 zijn de aandachtspunten samengevat in een tabel. Hierbij is een onderverdeling gemaakt tussen de randvoorwaarden, kritische ontwerpapunten en richtlijnen voor de verschillende onderdelen van de met MBR uitgeruste rwzi. Aanvullend onderzoek van 2008-2010 is niet in het desbetreffende rapport en samenvattende tabel opgenomen. In Tabel 2 is de samenvattende tabel uit het STOWA-rapport 2008-08 aangevuld met inzichten vanuit de MBR-Network-studies, GWRC en DWA (2008 - 2010).

TABEL 2 RICHTLIJNEN STOWA-RAPPORT 2008-08

	richtlijnen/randvoorwaarden	ontwerppunten	richtlijn
Influent	STOWA 2001-24 Bepaling ontwerpcapaciteit		
Voorbehandeling	type membraanmodule samenstelling afvalwater	afscheidingsdiameter microzeef mate van redundantie rendement	holle vezel: < 1-2 mm, platen 2-3 mm, extern 2 mm. 100% redundantie Houdt rekening met 30% extra BZV verwijdering
Biologie	P-verwijdering methode van Scheer N-verwijdering HSA methode	hydraulica, menging en beluchting compartimentering	Hydraulische berekeningen, CFD
Membranen	Membraanoppervlak	ontwerpfase	overleg met membraanleverancier over ontwerpfase en aanvoerpatroon in voorontwerp
	temperatuur aanvoerpatroon	hydraulica en luchtverdeling membranen Uitwisselbaarheid	hydraulische berekeningen en CFD aandacht bij aanbesteding

Ten opzichte van de in 2008 door STOWA gepresenteerde aandachtspunten zijn de volgende onderwerpen door het Europese onderzoek nader uitgewerkt of aangevuld.

5.2.1 INFLUENTSAMENSTELLING

De samenstelling van het afvalwater is bepalend voor de filterbaarheid en daarmee de werking van de MBR. Geadviseerd wordt om altijd een influentfractionering uit te voeren.

5.2.2 VOORBEHANDELING

De Europese onderzoeken vragen extra aandacht voor de juiste keuze en ontwerp van de voorbehandeling om haren, zwevende stof, bladeren en ander gesuspendeerd materiaal voorafgaande aan de MBR af te scheiden. In relatie tot de voorbehandeling is de zwevendestofsaamenstelling van het voedingswater als belangrijk aspect aangeduid.

5.2.3 BIOLOGIE

In aanvulling op de richtlijnen uit het STOWA-rapport 2008-08 is ten opzichte van de biologie het volgende aangevuld:

- Slibeigenschappen in relatie tot filtratie-eigenschappen. De slibsaamenstelling en eigenschappen; met daarin met name de deeltjesgrootteverdeling is van belang voor de werking van het membraanfiltratie-eigenschap. Een belangrijk middel daarbij spelen slibkarakteriseringsmethodieken (DFCm-TUD; TUBerlin, Vito).
- Door de nieuwste inzichten uit het EU-onderzoek zijn extracellulaire polymaire stoffen (EPS) van minder belang geworden voor de filtratieprocessen. De relatie tot micro-deeltjes is groter gebleken dan de bijdrage van EPS.
- Als optimaal slibgehalte wordt 8 - 10 g/l geadviseerd; waarbij er aanwijzingen zijn dat bij gehalte onder 8 g/l de filtreerbaarheid van het slib terugloopt, doordat steeds meer kleine (micro)deeltjes het membraanoppervlak kunnen bereiken en daar verstopping veroorzaken.
- Uit het EU-onderzoek is naar voren gekomen dat combinaties van slib-opdrager-systemen en membranen goede prestaties leveren wat betreft foulingcontrole. Doordat slib en deeltjes aan de dragermaterialen zijn verbonden, worden de membranen minder zwaar belast (ook met eventueel verstoppende microdeeltjes).
- In de Europese onderzoeken zijn verschillende dynamische actief-slibmodellen opgesteld om de werking van MBR's te simuleren. Zo is een membraanunit gemodelleerd in WEST® om o.a. energieberekeningen uit te voeren en zijn ASM-modellen (BIOWIN) voor slibproductie opgesteld. Tevens zijn meerdere CFD-modellen opgesteld.

5.2.4 MEMBRANEN

Als belangrijkste onderdeel van de MBR zijn nieuwe adviezen over de membraanunits opgesteld:

- Toevoeging van chemische additieven om filtratie-eigenschappen van het slib te verbeteren zijn veelvuldig onderzocht. Zogenaamde flux-enhancers zijn in lab-omstandigheden succesvol ingezet en ook op de wereldmarkt worden deze stoffen steeds meer gebruikt. Het gaat daarbij om combinaties van flocculanten en/of (poeder) actief-kooldoseringen.
- Extern opgestelde membranen of membraantanks hebben zich bewezen als best te besturen installaties. Dat zegt niet meteen dat deze ook de beste filtratie-eigenschappen hebben, maar door de opstelling buiten de biologisch actief bedreven compartimenten is het wel beter mogelijk om de actief-slibmassa en eigenschappen af te stellen op de filtratie-eigenschappen van de membranen.

5.2.5 SLIBPRODUCTIE

In het EU-onderzoek is relatief veel onderzoek verricht naar vermeende andere slibproductie van MBR's ten opzichte van conventionele systemen. De uitkomsten zijn niet zeer onderscheidend, maar geven wel meer inzicht in de processen rondom MBR-installaties en het gedrag van (micro) slibdeeltjes in het MBR-systeem en de slibverwerkingsinstallatie.

6

CONCLUSIES

Vanuit de onderzoekstrajecten binnen het cluster MBR-network is veel onderzoek uitgevoerd om de membraantechnologie voor afvalwaterzuiveringen verder te optimaliseren. In dit rapport zijn aanvullende onderzoeken samengevat naar membraanconfiguratie- en ontwerp, membraanvervuiling en -reiniging, modellering en sturing. Dankzij diverse onderzoeksprojecten is de status van aerobe MBR-systemen doorontwikkeld. Ondanks deze onderzoeken liggen nog steeds vragen open.

Wanneer extra onderzoek wordt uitgevoerd in de toekomst dan is het noodzakelijk dat de voor- en nadelen van MBR-systemen in beschouwing worden genomen. Zaken zoals influent karakterisering, membraanvervuiling, hybride membranen, slijbleeftijd, effluent hergebruik, energieverbruik, kosten en opleiding van operators, zijn af en toe nog van grote invloed op een betrouwbaar en kostefficiënt systeem. Hierdoor verloopt de invoer van MBR-systemen op de markt nog niet optimaal [57].

Er is behoefte aan zeer controleerbare en gestandaardiseerde RWZI's, die geoptimaliseerd kunnen worden volgens de behoefte van de klant en de benodigde randvoorwaarden. Ook is een meer systematische aanpak benodigd voor het ontwerpen van MBR-systemen bij uitbreiding of nieuwbouw. Zodoende kan de ecologische voetafdruk van MBR-systemen worden geminimaliseerd, terwijl eenvoudige aanpassingen over de bijbehorende prestaties mogelijk worden gemaakt. Ook moet aandacht worden besteed aan een integrale aanpak en de evaluatie van de levenscyclus waarbij onder andere de uitstoot van broeikasgassen, energieverbruik en de routes van de betrokken toxische stoffen in het water en slib worden meegenomen [57].

De voordelen van een MBR zijn uitvoerig onderzocht en aangetoond in vergelijking tot conventionele RWZI's. Het effluent is minstens gelijk of beter met betrekking tot CZV/BZV-verhouding, stikstof en fosfaat, maar vrij van zwevende stof (SS) en pathogenen. De slibconcentratie kan echter een factor 3 á 4 hoger en een nabezinktank is niet meer nodig. Dit leidt tot kleinere installaties, kleine hoeveelheden spuislib en helder bacterie vrij water, dat her te gebruiken is als proces water, sproeiwater of huishoudelijk water (niet zijnde drinkwater). De membraanunits zijn modulair en makkelijk op te schalen in bijvoorbeeld containers. Doordat de membranen een goede scheiding van water en slib garanderen is de installatie robuust [60].

De nadelen van het gebruik van MBR-systemen zijn de chemische reiniging, het relatief hoge energieverbruik en de onderhoudskosten. De uiteindelijke bijbehorende kosten en energieverbruik zijn afhankelijk van de specifieke situatie en configuratie. Het totale energieverbruik voor een MBR-systeem is nog steeds hoger dan dat van een conventionele RWZI. Ook zijn de totale jaarlijkse kosten van de MBR nog altijd hoger in vergelijking tot een conventionele RWZI.

Gebaseerd op de pilotonderzoeken en de haalbaarheidsstudies kan worden geconcludeerd dat een MBR-installatie op dit moment al financieel haalbaar is als de bovenstaande voordelen een grote rol spelen. Naar verwachting zal de markt voor de toepassing van MBR-installaties in Nederland en vooral daarbuiten verder doorgroeien mede door de aangescherpte effluenteisen. In de nabije toekomst zal, in aanwezigheid van een volwassen membraanmarkt, voor veel RWZI's het MBR-concept een haalbaar alternatief zijn met een duidelijke toegevoegde waarde. Dit geldt met name daar waar permeaat (of RWZI-effluent) nuttig toegepast kan worden voor landbouw, stadswater, proceswater of koelwater.

Om MBR-technologie helemaal volwassen en daarmee concurrerend te maken is het van belang verdere ontwikkeling op het gebied van energie-efficiency en kostenverlaging (membraankosten; installatiekosten) te stimuleren. In ketensluitingsprojecten heeft membraan-technologie, en daarmee specifiek de MBR-technologie, een grote toekomst.

7

REFERENTIES

1. AMEDEUS "Accelerate Membrane Development For Urban Sewage Purification" - Final Activity Report, final draft 07.08.2009, publicatiejaar 2010
2. Final MBR-Network workshop "Salient outcomes of the European R&D projects on MBR technology", 31 March – 1 April 2009 Berlin, publicatiejaar 2010, www.mbr-network.eu.
3. Enrico Fatarella, Vera Iversen, Stefan Grinwis, Sabine Paulussen, WP1 - textile material for mbr filtration, D1 – Characterisation tests on selected nonwoven webs (at least six webs made of three fibres), D7 – WP1 Report, mei 2009
4. Heleen De Wever, Matthew Brannock, WP6: implementation of submerged module inside or outside of reactor d38: final report – month 30, 15 mei 2008
5. STOWA 2005-24/25 GWRC; Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater treatment; State of Science Report
6. STOWA 2006-05/06 MBR rapport Varsseveld
7. STOWA 2006-16 MBR proefinstallatie RWZI Hilversum
8. STOWA 2007-23 Ervaringen met nageschakelde MBR op RWZI Leeuwarden; verwijdering van hormoonverstorende stoffen, geneesmiddelen en andere microverontreinigingen
9. STOWA 2008-W-01 Ervaringen met MBR voor individuele behandeling van afvalwater
10. STOWA 2008-08 Ontwerp- en beheersaspecten van een MBR voor de behandeling van huishoudelijk afvalwater
11. STOWA 2009-36 Ervaringen met Hybride MBR Ootmarsum
12. STOWA 2009-35 Ervaringen met Hybride MBR Heenvliet
13. Perry van der Marel, Arie Zwijnenburg, Antoine Kemperman, Matthias Wessling, Hardy Temmink, Walter van der Meer, Membrane properties influencing fouling in MBR, Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland,
14. Buetehorn S., Brannock M., Le-Clech P., Leslie G., Volmering D., Vossenkaul K., Wintgens T., Melin T.: Observation of Cake Layer Formation and Removal on Microporous Hollow-Fibre Membranes. Presentation at the Conference on Membranes in Drinking Water Production and Wastewater Treatment, Toulouse (France), October 20 - 22, 2008.
15. Kochan J., Wintgens T., Wong J.E., Melin T.: Polyelectrolyte-Modified Polyethersulfone Ultrafiltration Membranes for Waste Water Treatment Applications. Presentation at the Conference on Membranes in Drinking Water Production and Wastewater Treatment, Toulouse (France), October 20 - 22, 2008.
16. Kochan J., Wintgens T., Melin T., Wong J.E., Chemical Papers, 63 (9) (2009) 152-157.
17. Buetehorn S., Koh C.N., Wintgens T., Melin T., Volmering D., Vossenkaul K., Desalination, 231 (2008) 191-199.

18. Buetehorn S., Carstensen F., Wintgens T., Melin T., Volmering D., Vossenkaul K.: Permeate Flux Decline in Cross-Flow Microfiltration at Constant Pressure. Poster presentation at the 12th Aachener Membran Kolloquium, Aachen (Germany), October 29-30, 2008.
19. Judd, S. (2007) Membrane bioreactors: state of the art, Proceedings: AWA Membrane Speciality Conference II, February 21-23, Melbourne. Grélot A., Tazi-Pain A., Weinrich L., Lesjean B., Grasmick A. (2009). Evaluation of a novel flat sheet MBR filtration system. *Desalination* 236, 111-119
20. Huyskens C., Brauns E., Van Hoof E., De Wever H., Influence of selected operational parameters on (ir)reversible fouling in MBR's, Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
21. Mehrez R., Ernst M., Iversen V., Drews A., Kraume M., Jekel M., Development and application of a protein en polysaccharides sensor for on-line fouling control in membrane bioreactors. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
22. Drews, A., Vocks, M., Bracklow, U., Iversen, V., Kraume, M. (2008) Does fouling in MBRs depend on SMP? *Desalination*, 231, 1-3, 31, 141-149.
23. Rosenberger, C. Laabs, B. Lesjean, R. Gnirss, G. Amy, M. Jekel and J.-C. Schrotter (2006) Impact of colloidal and soluble organic material on membrane performance in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment. *Wat. Res.* 40, 4, 710-720.
24. T. de la Torre, J. Stueber, V. Iversen, A. Drews, B. Lesjean., The quest for indicators of membrane fouling in membrane bioreactor systems, Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
25. V. Iversen, S. Hermann, A. Drews, R. Mehrez, M. Ernst, M. Jekel, B. Lesjean, M. Kraume., Effects of various flux enhancers in MBR: lab tests vs. pilot scale operation. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
26. C. F. Galinha, G. Carvalho, C. Portugal, R. Oliveira, M. T. B. Crespo, M. A. M. Reis, J. G. Crespo., New developments in membrane bioreactors characterisation and monitoring. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
27. Alessio Fenu, Osi Braimah*, Jan-Willem Mulder, Maria Kennedy, Gary Amy, organic matter in MBR sludge waters: foulant identification and cleaning protocols. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
28. R. Aryal*, S. Vigneswaran*, J. Kandasamy*, A. Grasmick, foulant dynamics on supported media membrane reactor. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
29. S. Buetehorn, J. Kochan, C.N. Koh, T. Wintgens, D. Volmering, K. Vossenkaul, T. Melin., assessment principles for membrane and membrane module development: a case study. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
30. Van der Marel, P., Zwijnenburg, A., Kemperman, A., Wessling, M., Temmink, H., Van der Meera, W., membrane properties influencing fouling in MBR, Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
31. W. Bosq, F. Saux, J. M. Espenan, O. Lorain., development of new hollow fibre modules for MBR application, Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
32. W. De Wilde, K. Moons, D. Bixio, C. Thoeve, G. De Gueldre., technical feasibility and optimal control strategy of dual (hybrid) MBR-CAS concepts for plant refurbishment, Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.

33. M. Heijnen, R. Winkler, M. Vogg, G. Roeder, P. Berg., development of a novel fibre sheet membrane for MBR: the FiSh, Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
34. B.Kreckel, U.Brüss, A. Grélot, A. Tazi-Pain., innovative EURpean made flat-sheet module system for MBR application. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
35. C. Lüdicke, J. Stüber, R. Gnirss, B. Lesjean, M. Kraume., operational experience of MBR demonstration plant with post denitrification in Berlin-Magretenhöhe (ENREM-project). Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
36. T.O. Leiknes, J. Phattaranawik, I. Ivanovic., challenges and potentials of biofilm-MBR for municipal wastewater treatment. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
37. Mulder J.W., operational experiences with the hybrid MBR heenvliet, a smart way of retrofitting. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
38. B. Zwicklenpflug, M. Boehler, A. Joss, H. Siegrist., the effect of organic peak loads on membrane biofouling in a pilot scale MBR treating municipal wastewater. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
39. Zimmermann, B., Krause, S., Siembida, B., Cornel, P., enhanced cleaning process for MBR. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
40. A. Grelot, C. Machinal, A. Tazi-Pain, A. Grasmick., fouling origin and cleaning strategies in MBR. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
41. WP 6-cleaning protocols, EUROMBRA-project, D8 en D14, WP activity report: year one.
42. A. Fenu, G. Guglielmi, J. Jimenez, B. Lesjean, I. Nopens, J. Roels, D. Saroj, M. Sperandio., specificities of ASM-based biological modelling of MBR processes. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
43. J. Jimenez, P. Grelier, A. Tazi-Pain., biological modelling of membrane bioreactors and impact of primary sedimentation. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
44. Jiang T. (2007), Characterization and modelling of soluble microbial products in membrane bioreactors, PhD thesis, Ghent University, Belgium pp 241.
45. Laspidou C.S., Rittmann B.E., (2002) A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass. Water Research 36 pp 2711-2720.
46. E. Brauns, E. Van Hoof, C. Huyskens, H. Elslander, F. Vanhoof, P. Lens, H. De Wever., advanced control of MBR-systems using on-line fouling sensor measurements. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
47. Lazarova, V., optimisation of MBR operation and reliability using failure mode analysis. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
48. Wang, Y., Brannock, M., Leslie, G., evaluation of mixing efficiency & nutrient removal in membrane bioreactors via CFD modelling with experimental validation. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
49. C. Brepols, H. Schäfer, N. Engelhardt., economic aspects of large scale membrane bioreactors. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.

50. J. H.J.M. van der Graaf, A. F. van Nieuwenhuijzen, S. Geilvoet, A. A. Moreau, M. Lousada Ferreira, P. Krzeminski., the European MBR tour of the Delft filtration characterisation method. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
51. E. Fatarella, L. Lombardi, V. Iversen, S. Paulussen, U. Brüss, B. Lesjean, M. Kraume., optimised electrospun nanofibers for municipal wastewater treatment by textile bioreactors (TBR). Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
52. Frechen F.B., major items and outcomes of the CEN workshop agreement N° 34 on submerged membrane bioreactor (MBR) technology. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
53. Judd S., The MBR Book, Elsevier, 2006.
54. B. Verrecht, G. Guglielmi, J.W. Mulder, C. Brepols, S. Judd., an aeration energy model for an immersed membrane bioreactor. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
55. G. Guglielmi, D. Chiarani, G. Andreottola., Sludge filterability and dewaterability in municipal MBR. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
56. H. De Wever, C. Brepols, B. Lesjean., Decision tree for full scale submerged MBR-configurations. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
57. A. Tilche, M. Schouppe., European activities and strategy on membrane R&D. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
58. J.W. Mulder, J. van Agtmaal, P.A. de Boks, A.M.J. Veraart, H. Schonewille, Airlift MBR at municipal WWTP Terneuzen for industrial reuse, Evides industriewater, Waterschap Zeeuws-Vlaanderen en Norit. <http://www.evides.nl/nl/Industrial/about/Industriewater%20downloads/Evides%20Berlijn.pdf>
59. Pot, M.A., Van Agtmaal, J., De Boks, P.A., Veraart, A.M.J., Schonewille, H., Airlift MBR at municipal WWTP Terneuzen, Pilot research supports full scale implementation. Final MBR-Network workshop 30 maart-1 april 2009, Berlijn, Duitsland.
60. R. Lems., De weg naar de decentrale MBR, Artikel land+water
61. Global water research coalition, Water and energy, Draft report of the GWRC research strategy workshop, May 2008, United Kingdom.
62. Global water research coalition, MBR for municipal wastewater treatment, report of the GWRC research strategy workshop, October 2005, United Kingdom.
63. Global water research coalition, Membrane bioreactors for municipal wastewater treatment, state of science report, October 2005, United Kingdom.
64. http://www.worldcat.org/search?q=membranbelevungsverfahren&fq=&dblist=638&qt=first_page
65. DWA articles of association, January 2006.
66. German association of water, wastewater and waste, standards, capacity building and networking. December 2005, Damascus, Syria.
67. WateReuse Foundation, Investigation of membrane bioreactor effluent water quality and technology, 2010, Alexandria, USA, WRF-06-007.
68. Merkblatt DWA-M 227, Membranbelevungsverfahren, DWA-Regelwerk, Februar 2011

8

BIJLAGEN

BIJLAGE 1

REFERENTIES MBR-INSTALLATIE VOOR Huishoudelijk Afvalwater

MBR-INSTALLATIES VOOR HUISHOUDELIJK AFVALWATER (> 500 I.E.) IN EUROPA TUSSEN 2001 EN 2007

2001	Moneyreagh (N IRE)	1450	Kubota	24	2003	Merkendorf (D)	510	Kubota	8
2002	South Wraxall (UK)		Kubota	23	2003	St. Anna Alfaeda (I)	630	Kubota	12
2002	Schwägalp (CH)	780	Huber/VRM		2003	Velo Veronese (I)	670	Kubota	13
2002	St. Peter ob Judenburg (A)	1500	Mitsubishi		2003	Erbezzo (I)	620	Kubota	12
2002	Lowestoft (UK)	46000	Zenon (GE)	590	2003	Revore Veronese (I)		Kubota	19
2002	Westbury (UK)		Kubota	210	2003	Guethary (FRA)		Zenon (GE)	80
2002	Brescia (I)	200000	Zenon (GE)	1580	2003	Dittisham (UK)	510	Kubota	10
2002	Llanranog (UK)	600	Kubota	12	2003	Finstown (UK)		Kubota	12
2002	Welsh Water (UK)		Kubota	15	2003	Gairloch (UK)	2122	Kubota	60
2002	Skipsea (UK)	6000	Kubota	55	2003	Greyabbey (UK)		Kubota	50
2002	Gairloch (UK)		Kubota	60	2003	Llangranog (UK)		Kubota	12
2002	Cromarty (UK)		Kubota	43	2003	Simmerath (D)	750	Puron (KMS)	26
2002	Greyabbey (IRE)		Kubota	49	2004	Varsseveld (NL)	23000	Zenon (GE)	755
2003	Kircubbin		Kubota	72	2004	Mohnheim (D)	9700	Zenon (GE)	75
2003	Schilde (B)	20000	Zenon (GE)	350	2004	Seelscheidt (D)	11500	Kubota	355
2003	Gardenstown (UK)		Kubota	30	2004	Waldmössingen (D)	2600	Zenon (GE)	90
2003	Longbridge (UK)	1437	Kubota	65	2004	Kaarst-Nordkanal (D)	80000	Zenon (GE)	1850
2003	Lynmouth (UK)	3000	Kubota	68	2004	Buxton (UK)	30000	Zenon (GE)	450
					2004	La Bisbal (I)		Zenon (GE)	135
2005	Nether Kellet (UK)		Zenon (GE)	17	2006	Heenvliet (NL)	2500	Seghers/Kep pel	100
2005	Dunloy (N IRE)		Kubota	42	2006	Piene (D)	170	Kubota	6
2005	Rathfriland (N IRE)	5500	Kubota	130	2006	Konzen (D)	9700	Kubota	551
2005	Drumaness (N IRE)	3000	Kubota	53	2006	Leidingen Ihn (D)		Puron (KMS)	7
2005	Llanbedr (UK)		Kubota	126	2006	Thelus (F)		Puron (KMS)	14
2005	Masonite (IRE)		Kubota	50	2006	Arenas de Iguna (E)	20000	Huber VRM	180
2005	Wädenswil (CH)	22000	Zenon (GE)	612	2006	Moneyreagh, uitbreiding (N IRE)	1470	Kubota	31
2005	Stäfa (CH)	7000	Zenon (GE)	217	2007	Ootmarsum (NL)	14000	X-Flow (NoritMT)	150
2005	Benodet (F)		Kubota	120	2007	Ashbourne		Puron (KMS)	140
2006	Barmouth (UK)		Kubota	121	2007	Rousset (F)		Puron (KMS)	75
2006	Aldeno (I)		Kubota	53	2007	St. Jouan des Guerets (F)		Puron (KMS)	60
2006	Dundrum (N IRE)		Kubota	40	2007	La Torre (E)		Kubota	568
2006	Loughguile (N IRE)		Kubota	28	2007	Puigpunvent (E)		Kubota	10
2006	Pomeroy (N IRE)		Kubota	41	2007	Saida (E)		Kubota	12
2006	Cardirara di Reno		Kubota	80	2007	Rennes (F)	21000	Kubota	110
2006	Illescas (E)		Kubota	78	2007	Le Bono (F)	7000	Kubota	177
2006	Woffelsbach (D)	6200	Kubota	349					
2006	El Valle (E)		Kubota	88					

PENTAIR - NORIT-X-FLOW SYSTEMS

Capaciteit [m ³ /dag]	Jaar	Klant	Lokatie	Toepassing
17.000	2007/8	Veolia	Palm Jumeira	Municipal AL
14.000	2008	NMT	Terneuzen	Municipal AL
6.500	2008	White Martins	Minas Renais	Car manufacturer (FIAT).
4.200	2006/7	Parkson	Millsborough, US	Municipal AL
4.000	2007	UEM	Valyampet	Industrial AL
3.600	2005/6	NMT	Ootmarsum	Municipal AL
3.600	2003	ATM	NL	Cleaning waste water
3.000 + 2.000	2006	NORIT	Istanbul	Leachate (2 units)
2.400	2008	Veolia	Japan	Refinery effluent
2.400	2007	NMT	Obolon, Ukraine	Maltary MBR
2.400	2008	NMT	Venezuela	Brewery AL MBR
2.400	2007	UEM	Thuthipet	Industrial AL
2.160	2006	Dynatec	Singapore	Thermophilic MBR
2.040	2000	Wehrle Werk AG	Dairy Gold, Irel.	Dairy waste water
2.000	2008	NMT	Rusky Solod, Russia	Maltary AL MBR
2.000	2008	Rusky Solod	Kursk, Russia	Maltary water, AL
2.000	2007	Tsinghua	Xuzhou China	Cigarette factory AL
1.800	2008	Chengdu	Wehrle	leachate
1.680	2006	Fumatech	Sachsenmilch	Dairy waste water; recycle
1.750	2008	Ternois	Riec sur Belon, FR	Municipal AL
1.729	2009	Cruise ship	UK	Municipal, Crossflow
1.729	2009	Cruise ship	UK	Municipal, Crossflow
1.560	2003	Wehrle Werk AG	Kellogs, UK	Food waste water
1.560	2005	Dynatec/Aquabio	Food appl. USA	Food waste water

KUBOTA SYSTEMS

Capaciteit [m³/dag]	jaar	Locatie		Toepassing
1.900	1998	UK	Porlock	Sewage
12.700	2000	UK	Swanage	Sewage
1,555	2002	UK	Longbridge	Sewage
1,642	2002	UK	Lynmouth	Sewage
1,728	2003	UK	Kircubbin	Sewage
5,160	2003	Spain	Riells I Viabrea	Sewage
8,544	2003	Germany	Seelscheid	Sewage
8,600	2003	UK	Cardigan	Sewage
2,600	2004	France	Guilvinec	Sewage
6,700	2004	Germany	Eitorf	Sewage
2,393	2004	UK	Nefyn	Sewage
3,110	2004	UK	Rathfriland	Sewage
1,920	2004	Italy	Calderara di Reno	Sewage
3,024	2004	UK	Llanbedr (Harlech)	Sewage
2,892	2005	UK	Barmouth	Sewage
1,872	2005	Spain	Illescas	Sewage
7,100	2005	Germany	Woffelsbach	Sewage
14,100	2005	Germany	Konzen	Sewage
13,632	2005	Spain	La Torre	Sewage
2,860	2005	France	Benodet	Sewage
1,575	2006	Spain	Hacienda Riquelme	Sewage
1,706	2006	UK	Irvinestown	Sewage
2,640	2007	France	Betton (SIARN Rennes)	Sewage
1,600	2007	France	Le Bono	Sewage
9,000	2007	France	Quiberon	Sewage
2,132	2007	UK	Dromore	Sewage
2,700	2007	Spain	Los Canares y La Tercia	Sewage
35,000	2007	Spain	Sabadell	Sewage
2,200	2007	Italy	Castelguelfo	Sewage
3,500	2007	Israel	Nazareth	Sewage
1,500	2008	Turkey	Konacik	Sewage
9,000	2008	Spain	Condado de Alhama	Sewage
1,750	2008	Italy	P plant	Sewage
1,750	2008	Italy	G plant	Sewage
2,600	2008	France	P plant	Sewage
1,700	2008	Spain	MM plant	Sewage
4,208	2008	France	B F plant	Sewage
2,020	2008	France	P plant	Sewage
8,160	2008	Cyprus	V plant	Sewage
4,368	2008	Belgium	T plant	Sewage
3,500	2009	France	M plant	Sewage
2,284	2009	France	T plant	Sewage
2,840	2009	France	O plant	Sewage
4,756	2010	France	C plant	Sewage
1,840	2010	France	Barneville Carteret	Sewage
9,200	2010	France	Carnac	Sewage

2,145	2010	France	Pont Aven	Sewage
1,570	2010	France	Pollestres	Sewage
1,750	2010	France	Chantonay	Sewage
1,500	2010	Italy	Albarella	Sewage
1,457	2010	France	R plant	Sewage
2,200	2011	Italy	Ida Corigliano	Sewage
2,160	2011	Italy	Banco	Sewage
1,920	2011	France	Camaret Sur Mer	Sewage
1,730	2011	France	St. Gildas	Sewage
2,000	2006	UAE	Al Khanza	Sewage
78,000	2006	Oman	Al Ansab	Sewage
18,000	2007	Dubai	Palm Jumeirah	Sewage
12,000	2007	UAE	Greens upgrade	Sewage
9,000	2007	Saudi Arabia	KAUST temporary STP	Sewage
12,666	2007	Saudi Arabia	KAUST permanent STP	Sewage
2,000	2008	UAE	Dubai Maritime City	Sewage
2,120	2008	UAE	Sorouh Reem Temporary	Sewage
5,400	2008	Saudi Arabia	Udhailiyah	Sewage
10,000	2009	UAE	Jebel Ali Airport STP A	Sewage
2,500	2009	Bahrain	Bahrain Bay STP	Sewage
2,000	2009	UAE	Seqayah, Abu Dhabi Workers Village	Sewage
1500	2011	UAE	Habshan 2nd	Sewage
2,271	2002	USA	Running Springs, CA	Sewage
3,785	2002	USA	The Tulalip Tribes, WA	Sewage
3,400	2003	USA	The Hamptons 1st, GA	Sewage
1,893	2004	USA	Pumpkinevine Creek, GA	Sewage
4,921	2004	USA	Hyrum 1st, UT	Sewage
7,570	2004	USA	Dundee, MI	Sewage
7,570	2005	USA	Nassau County, FL	Sewage
6,813	2005	USA	Mcfarland Creek, OH	Sewage
1,613	2005	USA	Uppersweat Water, GA	Sewage
2,271	2005	USA	Star 1st, ID	Sewage
3,785	2005	USA	James Creek 1st, GA	Sewage
3,785	2005	USA	Troy, MO	Sewage
2,271	2005	USA	Star 2nd, ID	Sewage
3,407	2006	USA	Moroni, UT	Sewage
2,271	2006	USA	Barrow, AK	Sewage
22,710	2006	USA	Delphos, OH	Sewage
1,938	2006	USA	Monrovia WWTP, AL	Sewage
1,631	2006	USA	North Lewisburg, OH	Sewage
3,875	2006	USA	Cottonwood, TX	Sewage
2,419	2007	USA	B County 2	Sewage
1,893	2007	USA	Pumpkinevine expansion	Sewage
11,355	2007	USA	Dover	Sewage
5,148	2007	USA	Lake of Pines	Sewage
3,785	2007	USA	Winlock	Sewage
1,893	2008	USA	Chino Valley	Sewage
3,785	2008	USA	Star	Sewage

3,785	2008	USA	Coppermine	Sewage
10,220	2008	USA	Los Lunas(Phase1)	Sewage
6,720	2008	USA	Union Rome	Sewage
2,016	2009	USA	Shelton,WA	Sewage
3,407	2009	USA	Sultan	Sewage
1,893	2009	USA	Richmond,UT	Sewage
1,893	2009	USA	Pumpkinvine expansion	Sewage
19,682	2009	USA	Leoni Township	Sewage
7,570	2009	USA	Liberty county	Sewage
7526.4	2009	USA	Alderwood	Sewage
1,613	2009	USA	North Key Largo,FL	Sewage
6,989	2009	USA	Arlington, WA	Sewage
2,150	2011	USA	Carrollton,OH	Sewage
2,957	2010	USA	Sandia Pueblo,NM	Sewage
6,451	2010	USA	Ruidoso,NM	Sewage
2,044	2010	USA	Little Venice FL	Sewage
1,613	2010	USA	Belfair ,WA	Sewage
1,893	2011	USA	North Topsail NC	Sewage
1,600	2004	New Zealand	Turangi WWTP	Sewage
1,800	2005	New Zealand	Te Aroha WWTP	Sewage
7,500	2007	Australia	Harvey Bay Project	Sewage
3,600	2009	China	F Plant	Sewage
3,226	2009	China	C Treatment	Sewage
4,500	2010	India	Delhi Jal Board	Sewage
1,613	2010	China	Y Treatment	Sewage
7,000	2011	Korea	Ulchin	Sewage
9,600	2011	Hong Kong	DSD Lamma Island	Sewage

KOCH MEMBRANE SYSTEMS - PURON

Australia, Griffith

Type of system:

Biological treatment with chemical P-removal , denitrification, nitrification, and UF

Type of module:

PSH 1500

Annual average flow:

7,900 m³/d (2.1 MGD)

Peak hour flow:

23,700 m³/d (6.3 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

2011

Australia, Camden Haven

Type of system:

Biological treatment with denitrification/ nitrification and UF

Type of module:

PSH 1500

Annual average flow:

3680 m³/d (1 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

2010

Australia, Fairfield

Type of system:

Biological treatment with Bio-P removal, denitrification/nitrification and UF

Type of module:

PSH 1500

Annual average flow:

3000 m³/d (0.8 MGD)

Peak hour flow

9000 m³/d (2.4 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

October 2010

Bahrain, Ma'Amir

Type of system:

Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 500

Annual average flow:

2,200 m³/d (0.6 MGD)

Peak hour flow:

3,600 m³/d (0.95 MGD)

Raw source:

Municipal wastewater

Start-up:

Q1 2012

Brazil, Sao Paulo

Type of system:

Biological treatment with nitrification, denitrification, UF and RO

Type of module:

PSH 1500

Annual average flow:

56,200 m³/d (15 MGD)

Peak hour flow:

61,500 m³/d (16.2 MGD)

Raw source:
Standard Municipal Sewage
Start-up:
April 2012

China, South China
Type of system:
Biological treatment with nitrification, denitrification and UF
Type of module:
PURON® PSH 500 C2 - 17
Annual average flow:
12000 m3/d (3.2 MGD)
Max. month flow:
12000 m3/d (3.2 MGD)
Raw source:
Standard Municipal Sewage plus Industrial (textile industry)
Start-up:
February 2009

China, Shanghai
Type of system:
Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration
Type of module:
PURON PSH 1500
Annual average flow:
25,000 m3/d (6.6 MGD)
Peak hour flow:
36,000 m3/d (9.5 MGD)
Raw source:
Municipal wastewater
Start-up:
Q1 2012

Egypt, Sharm El Sheik
Type of system:
Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration
Type of module:
PURON PSH 1500
Annual average flow:
5,000 m3/d (1.32 MGD)
Peak hour flow:
7,200 m3/d (1.9 MGD)
Raw source:
Municipal wastewater
Start-up:
Q2 2011

France, Rousset

Type of system:

Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON® PSH 500 C2 - 17

Annual average flow:

1800 m³/d (0.5 MGD)

Max. day flow:

1922 m³/d (0.51 MGD)

Peak hour flow:

1922 m³/d (0.51 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

May 2007

France, St. Jouan des Guerets

Type of system:

Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON® PSH 500 C2 - 17

Annual average flow:

1390 m³/d (0.37 MGD)

Max. day flow:

1752 m³/d (0.46 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

January 2009

France, Avranches

Type of system:

Biological treatment with anaerobe phosphorous removal, nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON® PSH 1500

Annual average flow:

9360 m³/d (2.5 MGD)

Max. day flow:

14880 m³/d (3.9 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

May 2009

France, Saint Laurent de la Salanque

Type of system:

Nitrification, Denitrification and UF

Type of module:

PURON PSH 1500

Annual average flow:

3600 m³/d (1MGD)

Max. month flow:

4800 m³/d (1.3 MGD)

Max. day flow:

6500 m³/d (1.7 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

May 2009

France, Sigean

Type of system:

Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PSH 500

Annual average flow:

2120 m³/d (0.56 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

June 2009

France, La Châtre

Type of system:

Nitrification, Denitrification and UF

Type of module:

PURON PSH 1500

Annual average flow:

1500 m³/d (0.4 MGD)

Max. day flow:

2400 m³/d (0.7 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

3rd Quarter 2009

France, Cabourg

Type of system:

Biological treatment with anaerobe phosphorous removal, nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 1500

Annual average flow:

7,704 m³/d (2 MGD)

Max. day flow:

14,400m³/d (3.8 MGD)

Peak hour flow:

21,600 m³/d (5.7 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

4th Quarter 2009

France, Deauville

Type of system:

Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 1500

Avg. day flow:

11,088 m³/d (3 MGD)

Peak hour flow:

28,800 m³/d (7.6 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

4th Quarter 2009

France, Port Leucate

Type of system:

Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 1500

Average flow:

Summer: 5,610 m³/d (1.5 MGD)

Low season: ≤ 3.000 m³/d (≤ 0.8 MGD)

Max. day flow

6,060 m³/d (1.6 MGD)

Peak hourly flow:

350 m³/h (2.2 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

September 2010

France, Banyuls

Type of system:

Biological treatment with chemical P removal, nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 1500

Annual average flow:

1,806 m³/d (0.48 MGD)

Peak hour flow:

4,320 m³/d (1.14 MGD)

Raw source:

Municipal wastewater

Start-up:

March 2011

France, Achères

Type of system:

Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 1500

Max. day flow:

21,600 m³/d (5.7 MGD)

Peak hour flow:

21,600 m³/d (5.7 MGD)

Raw source:

Wastewater from sludge treatment

Start-up:

2nd Quarter 2011

France, Mouguerre

Type of system:

Biological treatment with chemical P removal, nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 1500

Annual average flow:

1,890 m³/d (0.5 MGD)

Peak hour flow:

2,400 m³/d (0.63 MGD)

Raw source:

Municipal wastewater

Start-up:

July 2011

France, Evry

Type of system:

Primary sedimentation, biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 1500

Annual average flow:

17,920 m³/d (4.8 MGD)

Max. day flow:

21,120 m³/d (5.6 MGD)

Peak hourly flow:

1,480 m³/h (9.4 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

2nd Quarter 2011

France, St. Valéry en Caux

Type of system:

Biological treatment with Bio-P removal, nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 500

Annual average flow:

3,046 m³/d (0.8 MGD)

Max. day flow:

4,750 m³/d (1.3 MGD)

Peak hourly flow:

250 m³/h (1.6 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

2nd Quarter 2011

France, Carré de Réunion (Versailles)

Type of system:

Primary lamella sedimentation, biological treatment with Bio-P removal, nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 1500

Annual average flow:

43,500 m³/d (11.5 MGD)

Max. day flow

96,700 m³/d (25.5 MGD)

Peak hourly flow:

6,000 m³/h (38 MGD)

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

2nd Quarter 2013

Italy, Rieti

Type of system:

Biological treatment with denitrification, nitrification and UF

Type of module:

PURON PSH 1500

Annual average flow:

2,688 m³/d (0.71 MGD)

Peak hour flow:

5,400 m³/d (1.42 MGD)

Raw source:

Municipal wastewater

Start-up:

September 2011

Kingdom of Saudi Arabia, Rabigh

Type of system:

Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 500

Annual average flow:

1,950 m³/d (0.51 MGD)

Max monthly flow:

Equalized inlet flow

Raw source:

Standard Municipal Sewage

Start-up:

Nov. 2010

USA, Santa Paula (CA)

Type of system:

Biological treatment with nitrification/ denitrification and UF

Type of module:

PSH 1500

Annual average flow:

12,870 m³/d (3.4 MGD)

Peak hour flow:

39,365 m³/d (10.4 MGD)

Raw source:

Municipal Wastewater

Start-up:

1st Quarter 2010

USA, Thunder Valley Casino (CA)

Type of system:

Biological treatment with nitrification/denitrification followed by UF

Type of module:

PURON PSH 500

Annual average flow:

2,530 m³/d (0.67 MGD)

Max. day flow:

4,660 m³/d (1.23 MGD)

Raw source:

Casino/Hotel

Start-up:

2nd Quarter 2010

USA, Franconia (PA)

Type of system:

Biological treatment with nitrification, denitrification and ultrafiltration

Type of module:

PURON PSH 500

Annual average flow:

1,892 m³/d (0.5 MGD)

Peak hour flow:

3,785 m³/d (1 MGD)

Raw source:

Municipal wastewater

Start-up:

March 2011

BIJLAGE 2

INTERNATIONALE ONDERZOEKSPROJECTEN

AMEDEUS

De technologische ontwikkelingen van de nieuwe MBR-systemen is door een consortium van 12 partners uitgevoerd (zie onderstaande paragraaf). De bijbehorende onderverdeling van partners is in de onderstaande opsomming uiteengezet:

- 5 partners, welke zich richten op goedkope en toch goedpresterende nieuwe concepten;
- 2 eindgebruikers;
- 3 non-profit instellingen;
- 2 universiteiten.

De specifieke kennis van de universiteiten op het gebied van onderzoek en ontwikkeling in MBR technologie, draagt bij aan de onderzoeken naar mogelijkheden om de operationele kosten te verlagen. De onderzochte mogelijkheden om deze operationele kosten te verlagen zijn hieronder opgesomd:

- het beheersen van membraanvervuiling;
- optimalisatie van reinigingen;
- vermindering van zuurstofinbreng;
- het optimaliseren van de kapitaalkosten door een betere uitvoering van het membraan-bioreactor proces.

Ook werden de mogelijkheden van standaardisaties onderzocht en is een kennisoverdracht naar Zuid- en Oost-Europa georganiseerd om de doordringing van deze nieuwe markten te versnellen.

STRATEGISCHE DOELEN

De projectdoelen van AMEDEUS zijn:

- Het verlagen van zowel de investering- als operationele kosten van de MBR-technologie in Europa en het minimaliseren van de belasting op het milieu. Hierdoor kan de concurrentiepositie ten opzichte van conventionele technologieën worden verhoogd;
- Wereldwijd en op Europees niveau het aandeel van de Europese bedrijven in de markt van MBR-installaties vergroten;
- Het bevorderen van de toepassing van de Europese richtlijnen voor de behandeling van afvalwater voor het lozen op zwemwater, alsmede de mogelijkheden vergroten voor het hergebruik (geen drinkwater) van behandeld effluent.

PARTNERS

De volgende partners zijn betrokken in het AMEDEUS-project:

- CompetenzCentrum Water Berlijn (KWB), Duitsland, Berlijn;
- Technische Universiteit Berlijn (TUB), Duitsland, Berlijn;
- Tecnotessile (TTX), Italië, Prato;
- Vlaams Instituut voor Technologisch Onderzoek (VITO), België, Mol;
- Inge AG (INGE), Duitsland, Greifenberg;
- Anjou Recherche / Veolia Water (AR), Frankrijk, Maisons-Laffitte;
- Aquafin (AQF), België, Aartselaar;
- Polymem (POLYM), Frankrijk, Toulouse;
- A3 water solutions GmbH (A3), Duitsland, Gelsenkirchen;
- Envi-Pur (ENVI), Tsjechië, Tabor;
- Universiteit van New South Wales (UNSW), Australië, Sydney.

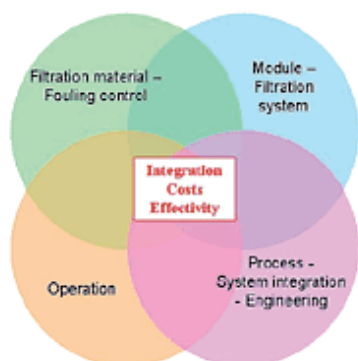
WERKPAKKETTEN

Het AMEDEUS-project is opgebouwd uit 11 werkpakketten (WP). Deze werkpakketten richten zich op de 4 technologische werkvelden, zie ook Figuur 16, van het MBR-proces, te weten:

1. Filtratie materiaal en vervuiling controle
2. Module en filtratiesystemen
3. Procesvoering, systeemintegratie en engineering
4. Bedrijfsvoering

FIGUUR 16

TECHNOLOGISCHE WERKVELDEN AMEDEUS



De vier technologische werkvelden hebben tot doel het algemeen verbeteren en verhogen van de acceptatie van de MBR-technologie. De 11 werkpakketten zijn als volgt opgedeeld:

- WP1 Textiel voor MBR filtratie;
- WP2 Aangroeibestrijding en online sensoren als indicatie voor vervuiling;
- WP3 Ontwikkeling van 4 innovatieve MBR-technologieën en het optimaliseren van de reiniging;
- WP4 Analyseren van een MBR-standaardisatie;
- WP5 Biologische modellering van MBR en de invloed van voorbezinking;
- WP6 Toepassing van ondergedompelde modules binnen of buiten de reactor;
- WP7 Ontwerp van een reeks gestandaardiseerde MBR-units in containerformaat;
- WP8 Geavanceerde data-acquisitie, toezicht en besturingssysteem voor de MBR;
- WP9 Ontwerp en bedrijfsvoering van tweeledige MBR-configuraties voor het verbeteren van de zuivering;
- WP10 Integreren van resultaten, de verspreiding en clustering van activiteiten;
- WP11 Management and rapportage.

EUROMBRA

STRATEGISCHE DOELSTELLINGEN

De specifieke doelstellingen van het EUROMBRA-programma zijn hieronder opgesomd:

- Het beoordelen en vergelijken van verschillende configuraties van membranen en membraanmodules;
- Ontwikkeling van nieuwe methoden voor de kwalitatieve en kwantitatieve analyse van zowel korte als lange termijnvervuiling;
- Evaluatie van de invloed van membraanvervuilende stoffen op basis van verschillende representatieve praktijksituaties;
- Studie naar het gebruik van nieuwe vezels of andere speciale testcellen om ontwikkelingen op grotere schaal te voorspellen en optimaliseren;
- Het beoordelen van anti-membraanvervuilende strategieën voor zowel korte als lange termijnvervuiling, specifiek gericht op operationele parameters zoals flux, beluchting en reiniging;
- Bepaling van de invloed van dynamische effecten, zoals plotselinge toename van hydraulische en organische belastingen;
- Onderzoek naar mogelijke effecten van microbiële groei en diversiteit;
- Onderzoek naar de verwijdering van specifieke verontreinigingen door middel van aanpassingen in het processchema.
- Evaluatie en beheersing van geproduceerde reststoffen;
- Totale kosten-batenanalyse;
- Verspreiding van de resultaten.

Daarnaast wil EUROMBRA de grondbeginselen van MBR-technologie verbeteren door integratie van fundamenteel onderzoek en toepassing van nieuwe technologieën, om uiteindelijk een gevestigde en gestandaardiseerde industrie voor MBR-technologie te verkrijgen.

PARTNERS

De volgende partners zijn betrokken bij het EUROMBRA-project:

- Technische Universiteit van Noorwegen, (NTNU), Noorwegen - Trondheim
- Universiteit van Cranfield (CRAN), United Kingdom, Bedford
- Afdeling Scheikunde (IVT), RWTH Universiteit van Aken (RWTH), Duitsland, Aken
- Instituto de Biologia Experimental e Biológica, Lissabon (IBET), Portugal, Lissabon
- Nationaal Instituut voor Toegepaste Wetenschappen (INSA), Frankrijk, Toulouse
- Universiteit van Montpellier II (UM II), Frankrijk, Montpellier
- Technische Universiteit Delft (TUD), Nederland, Delft
- Universiteit van Trento (UNITN), Italië, Trento
- Polymem (POLYM), Frankrijk, Toulouse
- Universiteit van KwaZulu-Natal (UKZN), Zuid Afrika, Durban,
- Technische Universiteit van Sydney (UTS), Australië, Sydney
- Institute for Water Education (UNESCO-IHE), Nederland, Delft
- Zwitsers Federaal Instituut voor Milieutechniek en Technologie (EAWAG), Zwitserland, Dübendorf
- Waterschap Hollandse Delta (WHD), Nederland, Dordrecht
- Erftverband (EV), Duitsland, Bergheim / Erft
- Millenniumpore Limited (MILL), Verenigd Koninkrijk, Washington, Tyne & Wear
- KOCH Membraan Systemen (KMS), Duitsland, Aken
- FlowConcept (FLCO), Duitsland, Hannover

WERKPAKKETTEN

MBR-technologie is momenteel commercieel beschikbaar als optie voor de behandeling van huishoudelijk afvalwater. De MBR-technologie staat echter nog in de kinderschoenen. In vergelijking met ander membraan gebaseerde technologieën en toepassingen, zoals nanofiltratie en omgekeerde osmose, is de groei van standaardisatie zeer gematigd binnen de MBR-industrie.

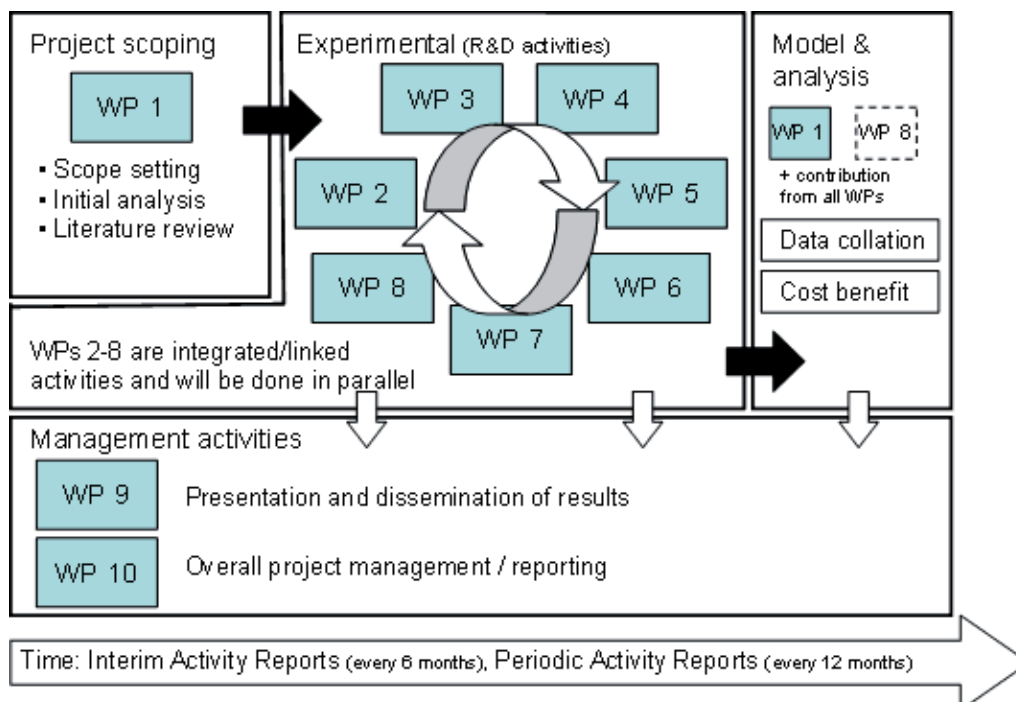
De huidige beschikbare MBR-toepassingen verschillen in veel aspecten tot elkaar als het gaat om de keuze van membraanmateriaal, moduleontwerp, aanbevolen werkwijzen en ranges, strategieën voor een duurzame en economische exploitatie en footprint. Een oplossing tot verdere ontwikkeling en standaardisatie van deze technologie is een beter begrip van de uitdagingen die specifiek zijn voor de technologie en het vinden van efficiënte manieren om knelpunten te overwinnen.

Het complete EUROMBRA-project is gestructureerd in 10 Werkpakketten, dit is weergegeven in Figuur 17 en in de onderstaande opsomming.

- WP1 Project omvang
- WP2 Membraan module
- WP3 Beluchting en membraan activiteit (TUDelft betrokken)
- WP4 Proces configuratie (TUDelft betrokken)
- WP5 Opstellen voedingswaterkarakterisatie en MBR monitoring (TUDelft hoofdonderzoek)
- WP6 Reinigingsprotocollen
- WP7 Concentraat- en slibbehandeling
- WP8 MBR case studies (TUDelft project leider, WSHD grootste bijdrage)
- WP9 Presentatie en verspreiding van resultaten
- WP10 Algemene en wetenschappelijke coördinatie

FIGUUR 17

PROJECTDOEL EUROMBRA



MBR-TRAIN

STRATEGISCHE DOELSTELLINGEN

De strategische doelen van MBR-TRAIN zijn hieronder opgesomd:

- Het versterken van de intersectorale samenwerking op het gebied van watertechnologie, dat als essentieel wordt beschouwd voor de duurzame ontwikkeling;
- Een bijdrage leveren aan het ondervangen van de versnippering binnen het Europese onderzoek zodat het Europese onderzoeksgebied kan worden versterkt.

PARTNERS

De partners die zijn betrokken in het onderzoek van MBR-TRAIN zijn hieronder opgesomd:

- Universiteit van Aken (RWTH), Duitsland Aken;
- Water Research Institute National Research Council (CNR-IRSA), Italië, Rome;
- Aquafin (AQF), België, Aartselaar;
- Universiteit van Cranfield (CRAN), Verenigd Koninkrijk, Bedford;
- Kenniscentrum Water Berlijn (KWB), Duitsland, Berlijn;
- Universiteit Gent (UGent), België, Gent;
- Brno University of Technology (BUT), Tsjechië, Brno;
- Politecnico di Milano (POLIM), Italië, Milaan;
- RWE Thames Water (RWE), Verenigd Koninkrijk, Reading;
- Technische Universiteit Delft (TU Delft), Nederland, Delft.

WERKPAKKETTEN

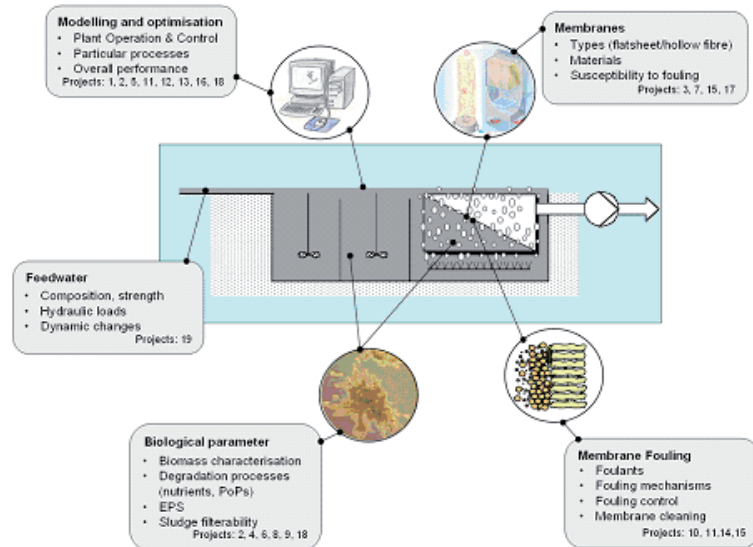
MBR-TRAIN richt zich vooral op de open vragen van de levensvatbare MBR-toepassingen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de verschillende benaderingen en methodieken die de deelnemende instellingen nastreven. De onderwerpen en aspecten waar het onderzoek zich op richtte zijn hieronder opgesomd:

1. Type membranen, materialen en configuratie
2. Membraanvervuiling en karakterisering van de vervuiling
3. Biologische processen, slib interacties
4. Vloeistof dynamica
5. Operationele kosten
6. Algemene operationele prestaties

De onderwerpen zijn tevens visueel weergegeven in figuur 18.

FIGUUR 18

ONDERZOEKSONDERWERPEN MBR-TRAIN



Een bijzonder aspect van alle projecten is het opleidende karakter en de bijbehorende vorming die het biedt voor jonge onderzoekers.

In totaal biedt MBR-TRAIN 19 individuele onderzoeksprojecten van verschillende duur. De onderzoeken zijn door individuen onderzocht, maar altijd in nauwe samenwerking en uitwisseling met de andere projectpartners. De verschillende werkpakketten van MBR-TRAIN zijn hieronder opgesomd:

- WP1 MBR data verwerving, meet-en regeltechniek;
- WP2 Modellering van verbeterde biologische defosfatering (EBPR) in een MBR;
- WP3 Prestatievergelijking van de procesvoering op full-scale van ondergedompelde holle vezels en plaat membranen;
- WP4 Optimalisatie van operationele kosten in een full-scale MBR;
- WP5 Toepassing van MBR modellen in full-scale installaties;
- WP6 Karakterisering en vaststelling van de filtreerbaarheid van MBR's (TUDelft onderwerp);
- WP7 Invloed van chemische reinigingsmiddelen op membraanmateriaal;
- WP8 Optimalisatie van full-scale MBR bedrijfsvoering voor gedecentraliseerde behandeling;
- WP9 Vergelijking van de operationele processen van drie full-scale MBR (TUDelft onderwerp);
- WP10 Onderzoek van het MBR vervuiling door deeltjes, colloïdale en opgeloste organische stoffen;
- WP11 Experimenteel en theoretisch onderzoek naar de invloed van permeaatterugspoelingen op vervuiling;
- WP12 Computergestuurde vloeistof dynamica toegepast op MBR-systemen;
- WP13 Procesoptimalisatie en biomassa karakterisering;
- WP14 Beheersing van vervuiling in een MBR op decentraal (huis)niveau;
- WP15 Invloed van membraan materiaaleigenschappen op vervuiling bij MBR's;
- WP16 Het lot van persistente organische verontreinigende stoffen (POP's) in MBR's voor drinkwater doeleinden;

- WP17 Hoge-schuifkracht keramische air-lift MBR's voor slibbehandeling;
- WP18 Wiskundige modellering en and procescontrole van MBR's;
- WP19 Effect van dynamische veranderingen van het voedingswater op operationele parameters van MBR's (TUDelft onderwerp).

GWRC

De leden van de GWRC waren:

- WQRA-Water Quality Research Australia;
- KWR-Water Cycle Research institute;
- SUEZ environment-CIRSEE;
- STOWA-Foundation for Applied Water Management Research ;
- PUB;
- WERF-Water Environment Research Foundation
- TZW-The German Water Center;
- UKWIR-United Kingdom Water Industry Research;
- VERI-Veolia Environment Research and Innovation;
- WRF-Water Research Foundation;
- WRC-Water Research Commission;
- WSAA-Water Services Association of Australia.

Deze organisaties hebben nationale onderzoeksprogramma's opgezet, gericht op verschillende delen van de watercyclus. Ze geven de aanzet, betrouwbaarheid en financiering voor de GWRC. Ieder lid heeft een unieke set van vaardigheden en kennis binnen de Coalitie. Via haar leden vertegenwoordigt deze organisatie de belangen en behoeften van 500 miljoen consumenten en GWRC beschikt over een onderzoeksprogramma met een jaarlijkse budget van 125 miljoen EUR.

De Global water research cooperation werd officieel opgericht in april 2002 met de ondertekening van een samenwerkingsovereenkomst op het International Water Association 3e World Water Congres in Melbourne. In juli 2003 heeft GWRC een partnerschapsovereenkomst gesloten met het US Environmental Protection Agency. GWRC is aangesloten bij de International Water Association (IWA).

DWA

De ATV (Abwassertechnische Vereinigung e.V.) [vereniging op het gebied van afvalwatertechniek], opgericht op 10 mei 1948 en samengevoegd op 1 januari 2000 met de DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) [Duitse Vereniging voor watermanagement en hydrocultuur] tot de ATV-DVWK (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) [Duitse vereniging voor water, afvalwater en afval]. De DWA is gevestigd in Bonn en onder toezicht van de DWA zijn zeven regionale verenigingen opgezet, die de belangen en doelen van de DWA in hun regio nastreven. De DWA heeft ongeveer 14.000 leden waarvan 800 leden verspreid over 55 landen.

In 2003 is tijdens de jaarlijkse algemene vergadering van de DWA een resolutie aangenomen voor de ondersteuning van de internationale afspraak omtrent de wereldwijde doelstelling voor toegang tot schoon water (Kyoto, Johannesburg).

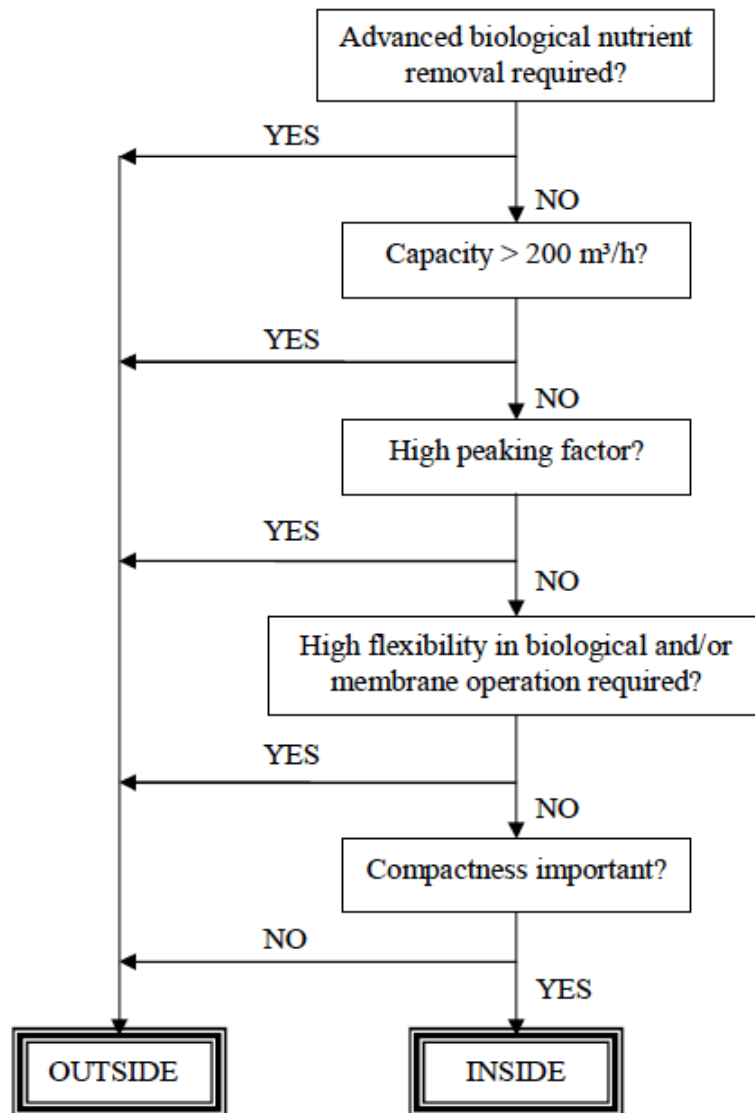
De huidige internationale activiteiten van de DWA zijn:

- Uitwisseling van experts tijdens de Internationale Forum;
- Internationale vakbeurzen zoals het IFAT in China;
- Sino-Duitse Training Centrum;
- Internationale delegaties uit het buitenland om workshops op te zetten;
- Engelse seminars voor medewerkers uit het buitenland;
- Samenwerking tussen DWA commissies en specialisten;
- Ondersteuning van de 'Young Scientists and Professionals' programma;
- Ontwikkelen van een studie voor jonge DWA leden met ambities voor een internationale carrière;
- Advies in de opbouw van nieuwe inter- en nationale verenigingen op het gebied van water en afvalwater;
- Betrokkenheid in international verenigingen en instellingen;
- Opzetten van vertalingen van de DWA regelgeving en standaarden;

Ondersteunen van universiteiten.

BIJLAGE 3

BESLISBOOM VOOR ONDERGEDOMPPELDE MEMBRANEN



BIJLAGE 4

GETESTE CHEMICALIËN MBT

MEMBRAANVERVUILING

Table 2. Selected additives and their positive (+) or negative (-) impact on investigated parameters soluble microbial products SMP, oxygen transfer coefficient k_{La} , oxygen uptake rate OUR, nitrification / denitrification, particle size (volume share), critical Flux J_{crit} and filtration performance in pilot plant

Substance	Supplier	Product	c_{Add} [mg/L]	SMP	k_{La}	OUR	Nitri/ Deni	Particle size V	J_{crit} test cell	Plant
Metal salt	Ciba	Magnasol 5108	100	+	-	+/-	--	+/-	+	
	Merck	FeCl3	85	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+	
Chitosan	France Chitin	Chitosan 221	200	++	-	--	+/-	++	+/-	
	France Chitin	Chitosan 652	250	+	+/-	--	+/-	+		
Activated carbon	Norit	SA Super	450	+	+/-	+/-	+/-	+/-		
	Pica	Picahydro LP 27	5000	+	-	--	--	+/-		
Polymer	Nalco	MPE-50	500	++	+	+/-	+/-	+	++	+
	Kurita	MP H 30	500	+						
	Kurita	MP L 30	500	+	-	+/-	-	+/-	++	
	Adipap	Adifloc KD 451	70	+	+	+/-	-	+		
	Adipap	Adifloc KD 452	70	++	+/-	+/-	+/-	(+)	++	++
Starch	Rhodia	Jaguar C162	300	+	+/-	+/-	+/-	+/-		
	Tate & Lyle	Mylbond 168	1500	+	++	+/-	+/-	+/-	+	--

c_{Add} added concentration (= optimum concentration for SMP removal according to batch tests)

++ strong improvement

+

+/- no effects

-

-- strong unwished effects

BIJLAGE 5

VERGELIJKING VAN VERSCHILLENDE SENSOREN

FP6 Project AMEDEUS

Table 4. Comparison of MBR-VFM and EPS-SIA sensors

	MBR-VFM sensor	EPS-SIA sensor
Measurement principle	Physical filtration of mixed liquor	Chemical (photometrical) analysis of foulants in sludge filtrate
Evaluation of fouling potential	Determination of reversible and irreversible fouling characteristic	Determination of the concentration of polysaccharides and proteins as potential fouling causing substances
Measurement mode	Automated according to optimized protocol Membrane mounting and cleaning manual until now	Fully automatic Calculation of concentrations manually until now
Pre-treatment of the sludge sample	Filtration at 1 mm	Filtration with microsieve filter (stainless steel, 1µm) in order to remove the solids
Measurement time / frequency	1 h if only reversible fouling number is needed, otherwise 2-3 h	< 1.5 h per measurement incl. duplicates measurement every 2-3 hours sufficient (Ernst et al. 2007)
Possible application	Optimisation of both mechanical (relaxation, backwash, etc.) and chemical cleaning actions, based on reversible and irreversible fouling number respectively	Optimisation of operation (e.g. HRT), addition of specific fouling reducers to counteract high foulant concentrations
Pros	• Direct method for determination of fouling propensity • Takes into account all contributing foulants, e.g. MLSS, sludge composition, all EPS fractions, fluctuating wastewater composition, ... • Differentiation between reversible and irreversible fouling • Possibility to adjust filtration parameters related to mechanical or chemical cleaning to the measured reversible and irreversible fouling potential respectively	• Fully automatic measurement on-site • Monitoring of daily and seasonal variations of fouling substances (polysaccharides, proteins) • Quick identification of changes of the sludge properties • Modular in application: measurement can be extended on other substances measurable with photometric methods • Reusable filter for sample pre-filtration • Standardisation of the determination techniques for proteins and polysaccharides
Cons	• Hydrodynamic conditions in the testing membrane and membrane material of sensor should be identical to those of the real operational membranes of the MBR • Execution of consecutive measurements is not automated yet, but automation is possible	• The verification of the direct relation of fouling vs. polysaccharides / proteins is still debated. Potential risk not to measure all causes of fouling. • Calculation of concentrations manually (further development possible) • Parallel measurement of polysaccharides and proteins only possible with two SIA devices

BIJLAGE 6

VORMEN EN WERKING VAN CHEMISCHE SCHOONMAAKMIDDELEN OP MEMBRANEN

Categorie	Functie	Product	Formule	Reinigde werking op:
alkalisch	hydrolyse	Natronloog	NaOH	organische en microbiële vervuilingen, polysachariden, proteïnen en vetten.
Oxiderend	Oxidatie, desinfecterend	Natriumhypochloriet Waterstofperoxide	NaOCl H_2O_2	Organische verbindingen
Zuur	Oplosmiddel	Citroenzuur Zoutzuur Oxaalzuur Azijnzuur	$C_6H_8O_7$ HCl $C_2H_2O_4$ $C_2H_4O_2$	Anorganische verbindingen
Chelaat bindend		Citroenzuur EDTA	$C_6H_8O_7$ $C_{10}H_{16}N_2O_8$	Anorganische verbindingen, organische vervuilingen
Tenside	Emulgerend, Dispergerend, Oppervlaktebehandeling	Tenside Wasmiddel		Vetten, olie, proteïnen, celwand denaturatie
Enzymatisch	Katalytische werking	Enzymen		Vetten, eiwitten en zetmeel

BIJLAGE 7

BIJKOMENDE OPERATIONELE KOSTEN

MBR-SYSTEEM T.O.V. CAS-SYSTEEM

Tabelle 8: *Membranspezifisch zusätzlich anfallende Betriebskosten (auf der Basis von Wedi (2008))*

		spez. Energiebedarf		spez. Kosten		Gesamtkosten	
		niedrig	hoch	niedrig	hoch	niedrig €Ct/m³	hoch €Ct/m³
Crossflow-Belüftung	kWh/m³	0,20	0,75			2,00	7,50
Permeatextraktion und Rezirkulationen	kWh/m³	0,08	0,15			0,80	1,50
zusätzliche Druckbelüftung	kWh/m³	0,08	0,10			0,80	1,00
Chemikalien	€/m² a			0,20	1,10	0,23	1,26
Membranersatz bei 5 a Standzeit	€/m²			40	80	9,13	18,26
Membranersatz bei 10 a Standzeit	€/m²			40	80	4,57	9,13

Der spezifische Energiebedarf ist bezogen auf 1 m³ Abwasser
 Die spezifischen Kosten sind bezogen auf 1 m² Membranfläche
 Annahmen: 0,10 €/kWh, jahresmittlerer Flux 10 L/(m² • h)

