

# DYNAMISCHE FILTRATIE



RAPPORT

2011  
w06

LITERATUURVERKENNING  
DYNAMISCHE FILTRATIE

RAPPORT

2011  
W06



# COLOFON

UITGAVE STOWA, Amersfoort, 2011

## AUTEURS

Kees Roest (KWR Watercycle Research Institute)  
Bert Daamen (Bert Daamen Water & Energy)  
Mark van Loosdrecht (KWR Watercycle Research Institute)

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Cora Uijterlinde (STOWA)  
Olaf Duin (Waterschap Hollandse Delta)  
Alex Sengers (Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard)  
Willy Poiesz (Waterschap Noorderzijlvest)  
Chris Ruiken (Waternet)  
Dennis Piron (Waterschap Rivierenland)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA STOWA 2011-w06

# DE STOWA IN HET KORT

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

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

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

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

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

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

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

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



# DYNAMISCHE FILTRATIE

## INHOUD

	STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	INLEIDING	1
	1.1 AANLEIDING	1
	1.2 DEZE RAPPORTAGE	2
<b>2</b>	HUIDIGE STAND VAN DE TECHNIEK	3
	2.1 INLEIDING	3
	2.2 MODULEOPBOUW	3
	2.3 FILTERMATERIAAL	4
	2.4 UITGEFILTERDE MATERIAAL	6
	2.5 BEHEERSING VAN DE FLUX	7
	2.6 PRAKTIJKRESULTATEN (FLUX EN EFFLUENTKWALITEIT)	9

<b>3</b>	<b>POTENTIE EN POSITIONERING DYNAMISCHE FILTRATIE</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>12</b>
<b>3.2</b>	<b>KOSTEN</b>	<b>12</b>
<b>3.3</b>	<b>DYNAMISCHE FILTRATIE ALS BEZINKTANK ALTERNATIEF</b>	<b>14</b>
3.3.1	ALTERNATIEF VOOR VOORBEZINKING	14
3.3.2	ALTERNATIEF VOOR TUSSENBEZINKING	14
3.3.3	ALTERNATIEF VOOR NABEZINKING	14
<b>3.4</b>	<b>POTENTIE</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>CONCLUSIE</b>	<b>17</b>
<b>4.2</b>	<b>AANBEVELINGEN</b>	<b>17</b>
<b>4.3</b>	<b>ONDERZOEKSACTIVITEITEN</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>19</b>
	<b>BIJLAGE I</b>	<b>23</b>

# 1

## INLEIDING

### 1.1 AANLEIDING

De traditionele afvalwaterzuivering in Nederland bestaat uit een voorbezinktank, een actiefslibproces en een nabezinktank, vaak gecombineerd met een slibgisting. Afvalwaterzuivering kost nu nog energie en de bezinktanks nemen vrij veel ruimte in. Dit is in principe niet nodig. Zo kan de organische stof uit het afvalwater met behulp van een efficiëntere afscheiding verzameld worden. Deze chemisch-gebonden energie in organische stof is in feite 'groene energie' en kan in potentie worden benut. Uiteindelijk kan er door efficiënte benutting en omzettingen zelfs een energieproducerende afvalwaterzuivering verkregen worden. Het nuttig aanwenden van deze 'groene energie' draagt bij aan de (inter)nationale klimaatdoelstellingen en het streven van de Waterschappen om minder primaire energie te gebruiken. In het klimaatakkoord en de Meerjarenaafspraken energie-efficiency (MJA3) is de ambitie opgenomen om de energie-efficiency te verbeteren met minimaal 2% per jaar. Om de chemisch-gebonden energie uit afvalwater te benutten moet de organische stof zo efficiënt mogelijk verzameld worden, met behoud van de zuiveringseigenschappen ten aanzien van nutriëntenverwijdering en dergelijke. Hiervoor wordt in de regel gebruik gemaakt van laag belaste (ééntraps) actiefslibsystemen met relatief grote bezinktanks.

Door het gebruik van membranen zijn bezinktanks overbodig en kan de afvalwaterzuivering veel compacter uitgevoerd worden. Dit is een reden waarom membraan bioreactoren (MBRs) de laatste tijd flink in de belangstelling staan. Er zijn al verschillende MBRs op praktijkschaal. Hoewel MBRs compacter zijn dan traditionele afvalwaterzuiveringsinstallaties en deeltjes in het effluent worden voorkomen, zijn er ook enkele belangrijke nadelen. Het bedrijven van een MBR is relatief duur, doordat het een energie intensief proces is en doordat er speciale kwetsbare en kostbare membranen gebruikt worden. Het compacter uitvoeren van een MBR door verhoogde slibconcentratie kost tevens meer beluchtingenergie door de lagere zuurstof-overdrachtsefficiëntie. Inzet van MBR-technologie bemoeilijkt het bereiken van de energie-efficiëntiedoelstellingen voor zuiveren van afvalwater.

In plaats van met een nabezinktank of een conventionele MBR kan met behulp van een compact en goedkoop zogenaamd dynamisch membraan de organische fractie uit het afvalwater verzameld worden. Dynamische filtratie kan ook als compact en modulair alternatief voor een tussenbezinktank ingezet worden. Een dynamisch membraan bestaat uit een robuust en goedkoop dragermateriaal, waarop een natuurlijke filterkoek ontstaat die verantwoordelijk is voor de filtratie. De term dynamisch refereert hierbij naar de in de tijd variërende structuur van de filtrerende koeklaag. De effluentkwaliteit zal dus afhankelijk van de status van het dynamische membraan variëren.

Door het gebruik van compacte zelfvormende biologische membranen op een goedkoop dragermateriaal (dynamische membranen) kan het zuiveringsslib efficiënt gescheiden worden van het gezuiverde water. Dynamische filtratie zal naar verwachting minder energie vergen



dan toepassing van een conventionele MBR, maar toch het voordeel van ruimtebesparing ten opzichte van een bezinktank behouden. Tevens zou voor dynamische filtratie een minder kritische voorbehandeling dan bij conventionele MBR-membranen nodig kunnen zijn.

## 1.2 DEZE RAPPORTAGE

Dit rapport vormt de eerste fase in het ontwikkeltraject dynamische filtratie. Het rapport verschaft een zo actueel en volledig mogelijk overzicht van internationaal gerapporteerde dynamische filtratieactiviteiten. Aangezien er nog geen praktijktoepassingen zijn, is het voornamelijk een overzicht van laboratoriumonderzoek. Ook de ervaringen van exploratief onderzoek van Bert Daamen komen in dit rapport aan bod. Deze rapportage biedt inzicht in de potentie van dynamische filtratie en is derhalve een goede basis voor het vervolgonderzoek.

Het opstellen van een rapport dynamische filtratie op basis van een inventarisatie van de huidige stand van de techniek is een eerste stap en noodzakelijke verdieping om in de toekomst de potentie van deze dynamische filtratie te kunnen inschatten. In hoofdstuk 2 worden achtereenvolgens de belangrijkste aspecten behandeld: moduleopbouw, eigenschappen van mogelijke filtermaterialen, het uitgefilterde materiaal, flux beheersingstechnieken en uiteindelijk een overzicht van de verkregen praktijkresultaten, waarbij de focus ligt op de behaalde flux en effluentkwaliteit.

Hoofdstuk 3 geeft richting aan de positionering van dynamische filtratie. Naast enkele kostenindicaties wordt vooral de potentie van dynamische filtratie besproken. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 enkele conclusies getrokken en wordt afgesloten met aanbevelingen en suggesties voor onderzoeksactiviteiten in benodigd vervolgonderzoek.

# 2

## HUIDIGE STAND VAN DE TECHNIEK

### 2.1 INLEIDING

Werk aan dynamische membranen staat in de kinderschoenen en vindt momenteel vooral in Duitsland en het Verre Oosten plaats. De meeste publicaties beschrijven inventariserende laboratorium proeven (zie bijlage I). Een enkele opschaling wordt in de literatuur vermeld (Fan and Huang 2002; Seo *et al.* 2002). Daarnaast heeft Bert Daamen reeds exploratief onderzoek naar dynamische filtratie verricht, inclusief enige opschaling. Vele onderzoeksvragen, zoals beheersing van de waterflux, constructie en inzicht in de optimale filtratiecyclus, staan nog open. Hieronder volgt een overzicht van de belangrijkste gepubliceerde onderzoeksbevindingen uit literatuur op het gebied van dynamische filtratie.

Dynamische filtratie is het proces waarin op een relatief grofmazig filtermateriaal (grootteorde 3 tot 500  $\mu\text{m}$ ) een filterende koeklaag wordt opgebouwd met een beduidend kleinere poriegrootte. Met als criteria kostprijs en energiebesparing lijkt dynamische filtratie een interessante techniek/toepassing voor slibafscheiding. Dynamische filtratie wordt ook wel aangeduid als 'coarse pore filtration' en als 'self-forming dynamic membranes'. Sinds eind jaren 90 is, vooral in het Verre Oosten, intensief onderzoek verricht en praktijkervaring opgedaan met dynamische filtratie ten behoeve van slibretentie in actief slibsystemen. Hier wordt een overzicht gegeven van de tot dusver gepubliceerde onderzoeksresultaten. Hiermee wordt inzicht verschaft in de huidige stand van zaken van de ontwikkeling van deze nieuwe technologie. Dit overzicht is gebaseerd op ongeveer 30 publicaties (samenvattende tabel in bijlage) en is op basis van de thema's; module-opbouw, filtermateriaal, gefiltreerd medium, beheersing van de flux en praktijkresultaten (flux en filtraatkwaliteit) uitgewerkt. Voor achtergrondinformatie over filtratietechnieken in het algemeen wordt verwezen naar bijvoorbeeld het rapport filtratietechnieken voor RWZI's (STOWA 2006-21).

### 2.2 MODULEOPBOUW

De gerapporteerde onderzoeken betreffen merendeels enkelvoudige filtratiemodules op labo-  
ratiumschaal met een oppervlakte kleiner dan 0,12 m<sup>2</sup>. De uitzonderingen hierop betreffen schakelingen van meerdere plaatvormige ondergedompelde filtermodules (met 10 platen van elk 0,2 m<sup>2</sup> (Seo *et al.* 2002) en met 18 platen van elk 0,15 m<sup>2</sup> (Fan and Huang 2002)) waarbij een stap richting pilotschaal (groter oppervlak per filtratie-unit en een schakeling van meerdere units) is gemaakt. Tevens is een afwijkende configuratie van een filterzak van 0,29 m<sup>2</sup> in een beluchtingstank beschreven met als toepassingsgebied kleinschalige waterzuivering (Ren *et al.* 2010).

Het merendeel van de omschreven onderzoeken betreffen toepassing van een ondergedompelde vlakke plaatgeometrie, waarbij niet wordt omschreven op welke wijze de filtraat-afvoer-ruimte is opgebouwd en op welke wijze het filtermedium is opgespannen. Park *et al.* (2004)

maakt melding van een gaas-spacer (toepast voor slibindikking) en Alavi Moghaddam *et al.* (2003) refereert naar het verstevigen van het 'slappe' filterdoek; dit door inklemmen tussen een plastic gaas.

De onderzochte tube-vormige filters (afgezien van de micro-filtratie-membranen) betroffen een drietal onderzoeken (Chang *et al.* 2006; Chang *et al.* 2007; Seo *et al.* 2007) waarbij relatief 'brede' tubes (5-37 mm) in het actief slib zijn gehangen en de filtratierichting van 'buiten-naar-binnen' was. De tube-vormige doeken waren alle polypropyleen non-woven doeken met poriegrootten van 13, 25, 39  $\mu\text{m}$  (Chang *et al.* 2006) en 20  $\mu\text{m}$  (Chang *et al.* 2007). Alleen Chang *et al.* (2006) maakt melding van een drager-support voor het filterdoek, terwijl Seo *et al.* (2007) en Chang *et al.* (2007) geen melding maken van een filtraatzijdige versteviging.

Een tweetal referenties beschrijft een filtermodule die buiten de actiefslib-ruimte is bedreven, te weten door Iversen *et al.* (2007) die deze opstelling gebruikt als een gestandaardiseerde test-opstelling om 22 filtermaterialen te onderwerpen aan een vergelijkbare filtratietest en door Jeison *et al.* (2008) die slibretentie van anaëroob slib heeft onderzocht. Jeison *et al.* gebruikte voor zijn externe module biogas om een vloeistoftransport door de verticaal opgestelde holle fiber te realiseren, dit in combinatie met het beheersen van de aangegroeide koeklaagdikte. Vanuit het uitgangspunt van zeer lage vereiste drukverschillen en dus energiegebruik voor filtratie (filtraatonttrekking onder vrij verval van 0-150 cm  $\text{H}_2\text{O}$ ) ligt de voorkeur voor ondergedompelde filtermodules boven externe (pomp aangedreven) modules voor de hand.

Voor het beter beheersen van het foulingproces bij micro-/ultrafiltratie is met extern geplaatste crossflow membranen onderzoek gedaan naar de positieve invloed van pre-coaten met kleine (2  $\mu\text{m}$ ) kaolinitee-deeltjes bij actief slibfiltratie (Li *et al.* 2006), polyvinyl alcohol/4-vinylpyridine graft polymeer pre-coating (Li *et al.* 2000; Wang *et al.* 2009), en naar de positieve invloed van pre-coaten van membraanoppervlak met een (dynamische) laag PEG (polyethyleenglycol) en/of PVA-polymeer (polyvinylalcohol) op filtratie van textielkleurstoffen (Pessoa de Amorim and Ramos 2006). Het gaat hierbij echter om onderzoek naar het verbeteren van het UF/MF-membraanfiltratieproces door middel van dynamische filtratiemechanismen in plaats van onderzoek naar dynamische filtratie van actief slib met grofmaziger (>3  $\mu\text{m}$ ) filtermaterialen.

### 2.3 FILTERMATERIAAL

De helft van de onderzochte filtermaterialen betreft non-woven producten en de andere helft geweven materialen ('mesh') met een regelmatige poriestructuur.

De non-woven producten zijn onderzocht bij porie-grootten van 3 tot 200  $\mu\text{m}$ , en de geweven materialen tussen 1 en 500  $\mu\text{m}$ . Ondermeer Jeison *et al.* (2008) rapporteert dat bij porie-grootten groter dan 60  $\mu\text{m}$  het lastiger werd om een goed filterende dynamische filterlaag op te bouwen (doorslag) en dat bij porie-grootten van kleiner dan 10  $\mu\text{m}$  de filterweerstand sneller toenam. Derhalve is het onderzoek met geweven filtermateriaal voortgezet met poriediameters van 15 en 20  $\mu\text{m}$ . In een gestandaardiseerde test-cel zijn 22 filtermaterialen getest door Iversen *et al.* (2007) met non-woven poriegrootten tussen 3 en 50  $\mu\text{m}$  en geweven poriegrootten tussen 1 en 65  $\mu\text{m}$  bij 0,2 m/s langsstroomsnelheid en een (voor dynamische filtratie veel te hoge) verschuldruk van 650 cm  $\text{H}_2\text{O}$ . Gezien de te hoge verschuldruk is het niet verwonderlijk dat in dit onderzoek de filtratiematerialen met kleine poriegrootten (< 0,5  $\mu\text{m}$ ) een (met microfiltratie vergeleken) acceptabele flux en effluentkwaliteit opleverden en dat het gebruik van materialen met grotere poriediameters resulteerde in een onaccep-

tabele effluentkwaliteit. Chang *et al.* (2006) vond voor non-woven filtermaterialen met 13, 25 en 39  $\mu\text{m}$  poriegrootte een optimale filtratie bij 25  $\mu\text{m}$  poriegrootte bij een gemiddelde vlok-grootte van het afgefilterde medium van 29  $\mu\text{m}$ . Duidelijk is, evenals bij Jeison *et al.* (2008), dat de verhouding vlok-grootte ten opzichte van poriegrootte van belang is. De meeste onderzoeken rapporteren goede filtratieresultaten (flux en effluentkwaliteit) bij poriegrootten tussen 15 en 200  $\mu\text{m}$ .

Bij de non-woven filtermaterialen wordt in de regel gewerkt met een dichtheid van 15 tot 70  $\text{g/m}^2$  en is er sprake van een ruime spreiding in de poriegrootteverdeling. De toegepaste non-woven filtermaterialen zijn gemaakt van polypropyleen (8 maal gerapporteerd) en polyester (5 maal gerapporteerd). Bij de geweven filtermaterialen zijn geen multifilamente weefsels (een weefdraad bestaat dan uit meerdere filamenten) gerapporteerd en is de poriegrootte ten gevolge van het weven eenduidiger gedefinieerd. De geweven materialen waarmee testen zijn uitgevoerd, zijn gemaakt van nylon, staal, zijde, polyester, polyvinylideenfluoride (PVDF), polypropyleen, teryleen en dacron, waarbij nylon het meest is toegepast.

Daamen heeft een monofilamenteus geweven doek (poriegrootte 130  $\mu\text{m}$ ) en drie multifilament geweven doeken (200 filamenten per geweven draad met circa 12 tot 18 draden per cm en geschatte poriegrootte < 10  $\mu\text{m}$ ) van polypropyleen getest. Gebleken is dat het realiseren van een hoge flux bij een grofmazig monofilament doek leidt tot een kwetsbaarder systeem ten aanzien van de filtraatkwaliteit. Samen met de grotere mechanische sterkte (onder andere van belang in verband met krachten bij het terugspoelen) van de multifilament geweven doeken zijn dit twee argumenten voor toepassing van multifilamente doeken bij gewenste hoge fluxen. Ook opvallend is dat vergelijkbare doekopbouw (materiaal, weving) van de verschillende geteste doeken leidde tot zeer vergelijkbare fluxen.

Er zijn geen testresultaten gepubliceerd aangaande de chemische en mechanische bestendigheid van de gebruikte materialen over langere termijn. Er is wel globale kennis over de pH-gevoeligheid van een aantal (potentiële) dynamische membraan dragermaterialen (Tabel 1).

TABEL 1

CHEMISCHE RESISTENTIE DYNAMISCHE MEMBRAAN DRAGERMATERIALEN (AL-MALACK AND ANDERSON 1997)

Materiaal	pH-range
Cellulose acetaat	2-8
Geregenereerd cellulose	2-12
Polyacrylonitrile	2-13
Polyvinylideenfluoride (PVDF)	1-12
Polyethersulphone	2-13
Polysulphone	2-14
Polypropylene	2-14

Chitosan oppervlaktebehandeling van een non-woven filtermateriaal, met 0,5  $\mu\text{m}$  poriegrootte, had een positief effect (Wang *et al.* 2010). De lastig verwijderbare (irreversibele) fouling door eiwitbestanddelen in EPS (extracellular polymeric substance ofwel exopolysaccharide), als aangetoond met BSA (Bovine Serum Albumine) als model-eiwit, wordt door de verhoging van het hydrofiele karakter van het materiaal door het chitosan sterk verminderd. In een nog niet gepubliceerde studie wordt in een duurproef van 25 dagen de eerste week een dalende filtratieweerstand gevonden (mogelijk door hydrofilisering van het filteroppervlak) en wordt na 18 dagen een sterke stijging van het drukverschil geconstateerd. Deze fouling is lastig mechanisch (beluchting) te verwijderen en lijkt te worden veroorzaakt door EPS. Een toename

van het EPS-gehalte is gemeten in de opgebouwde koeklaag. Cao *et al.* (2010) geeft aan dat het gebruik van diatomeeënaarde als precoating en in de bioreactor een soort beschermende laag geeft op het dragermateriaal, waardoor de dynamische koeklaag met een lucht terugspoeling weer gemakkelijk loslaat en er dus geen irreversible fouling optreedt.

## 2.4 UITGEFILTERDE MATERIAAL

Onderzoek naar dynamische filtratie heeft vooral plaatsgevonden op aëroob en vlokkelig actief slib. Enkele uitzonderingen zijn: anaëroob MBR-slib (Ho *et al.* 2007; Jeison *et al.* 2008), gecentrifugeerd bioreactor supernatant (Zhou *et al.* 2008) en effluent uit een biofilm-reactor (Lee *et al.* 2001). Lee *et al.* (2001) vermeldt dat bij een microfiltratie-membraanscheiding van actief slib (vlokken) en van het effluent van een biofilm reactor (kleinere deeltjes), het actiefslibstelsel leidt tot een zeven maal tragere membraanvervuiling, hetgeen verklaard wordt door de opbouw van een beschermende koeklaag op het membraan.

Enkele onderzoeken zijn gestart met entslib vanuit een membraanbioreactor, waarbij de slibvlok in de regel kleiner is dan een conventioneel actiefslibstelsel. Tevens is in een referentie (Kiso *et al.* 2005) de toepassing van dynamische filtratie in een sequencing batch reactor (SBR) onderzocht, waarbij na langere relaxatietijd kortdurend gedurende een uur het filter werd belast bij hoge fluxen ( $625 \text{ l/m}^2 \cdot \text{uur}$ ). Ondanks de andere uitvoeringsvorm (SBR in plaats van continu proces) betreft de onderzochte toepassing aëroob actiefslib en is vooral het hydraulisch belastingspatroon sterk afwijkend van de andere gepubliceerde onderzoeken.

Gepubliceerde onderzoeken zijn uitgevoerd met verschillende slibconcentraties tussen 1 en 25 g/l en tevens een aërobe slibmineralisatie toepassing bij voeding met slibben van 4 tot 6 g/l en resulterende slibgehalten in de reactor tot 32 g/l (Horng *et al.* 2006; Wang *et al.* 2006). Er zijn echter ook experimenten met prioritair stoffen vervuild (oppervlakte) water uitgevoerd (Horng *et al.* 2007; Chu *et al.* 2010).

Bij meerdere duurtesten was er sprake van een toenemende slibconcentratie gedurende het experiment en een navenant afnemende slibbelasting. Alavi Moghaddam *et al.* (2003) heeft daarentegen expliciet duuronderzoek gedaan naar de invloed van de gehanteerde slibleeftijd (10, 30 en 75 dagen), dit bij resulterende variabele slibconcentraties (1,7 tot 6,1 g/l) en bij een gelijk filtratieoppervlak, gelijke hydraulische en volumetrische TOC-belasting. Bij de kortere slibleeftijden van 10 en 30 dagen zijn beduidend meer filamenten aangetroffen en minder metazoa (wormen) en trad er geen filterverstopping op (30-60 cm  $\text{H}_2\text{O}$  bij constant  $41 \text{ l/m}^2 \cdot \text{uur}$ ) en bleef de effluentkwaliteit (onopgeloste bestanddelen) stabiel met  $1,7 \pm 1,4 \text{ mg/l}$  bij 10 dagen en  $2,9 \pm 2,0 \text{ mg/l}$  bij 30 dagen slibleeftijd. Bij een slibleeftijd van 75 dagen trad na 80 dagen een sterk verhoogde filtratieweerstand op van 400 cm  $\text{H}_2\text{O}$ , gevolgd door sterke doorslag van onopgelost materiaal (gemiddeld 23 mg/l). Helaas is naast de slibleeftijd tevens de slibconcentratie gevarieerd, waardoor het weer lastiger wordt om de geconstateerde effecten alleen aan de slibmorfologie toe te schrijven. Fuchs *et al.* (2005) heeft bij verschillende slibbelastingen tussen 0 en 0,3 g BZV/g MLSS.dag onderzoek verricht naar effluentkwaliteit en zag bij toenemende slibbelasting (van 0 > 0,03 > 0,06 > 0,18 > 0,3 g BZV/g MLSS.dag) een afnemend effluentgehalte onopgeloste stof (25 > 18 > 8 > 4 > 3 mg/l) en een sterke afname van het aantal kleinere (<150  $\mu\text{m}$ ) slibdeeltjes in het filtraat. Fuchs *et al.* (2005) bevestigt hiermee de bevindingen van Alavi Moghaddam *et al.* (2003).

Jeison *et al.* (2008) verrichtte onderzoek naar dynamische filtratie in een anaëroob systeem waar de slibretentie werd gerealiseerd door een microfiltratie membraan. Het permeaat uit het dynamisch filter werd geretourneerd naar de reactor. Naast het feit dat wordt geopperd dat de verhouding van de poriëgrootte van het filtermateriaal ten opzichte van de vlok grootte van belang is voor een goede filtratie, wordt bij dit onderzoek tevens opgemerkt, dat door de onderzoeksopzet (slibretentie door microfiltratie) mogelijk een sterkere opconcentrerings plaats kan vinden van minder wenselijke, kleinere slibdeeltjes. Mogelijk dat dit fenomeen de filterverstopping en gerelateerde doorslag mede veroorzaakte.

Chang *et al.* (2006) verrichte bij verschillende initiële fluxen (tussen 17 en 50 l/m<sup>2</sup>.uur), met verschillende slibconcentraties (2 - 10 g/l) en verschillende beluchtingintensiteiten (7 - 120 m/uur) kortdurende testen om de invloed hiervan op de filtratieweerstand vast te leggen. Vooral bij verhoging van de flux boven de 33 l/m<sup>2</sup>.uur en verhoging van het slibgehalte boven de 5 g/l bleek de filtratieweerstand sterk toe te nemen. Daamen heeft ook onderzoek gedaan naar de invloed van het slibgehalte. In een teruggespoeld filtersysteem met initiële hoge fluxen van zo'n 500 l/m<sup>2</sup>.uur bleek dat een verhoogde slibconcentratie (4 ten opzichte van 2 g/l) leidde tot een tweemaal snellere fluxdaling gedurende de gehanteerde filterrun-tijden van 30 minuten.

## 2.5 BEHEERSING VAN DE FLUX

Bij de verschillende onderzoeken worden ruwweg een tweetal verschillende filterkoeklagen onderkend, hetgeen wordt bevestigd door microscopische waarnemingen. De bovenste laag met gerapporteerde dikten tot wel 8 mm valt bijna spontaan van het filtermateriaal af als deze uit het actiefslib wordt gehaald en kan derhalve makkelijk mechanisch verwijderd worden en wordt als oorzaak van reversibele fouling gezien. Na het afspoelen van deze bovenste laag wordt, méér gehecht aan het oppervlak en in de poriën van het filtermateriaal, een beter verkleefde en gel-/slijmachtige aanhechting aangetroffen, die meestal pas na chemische behandeling een voldoende herstel van de permeabiliteit laat zien. Voor deze irreversibele fouling rapporteert Chu *et al.* (2006) dat het herstel van de permeabiliteit 65% bedroeg na wassen met water, terwijl met 0,3% NaOCl het herstel 92% bedroeg.

Oplossingen voor het beheersen van irreversibele fouling worden gevonden in:

- Uiteindelijk chemisch reinigen (Zhi-Guo *et al.* 2005; Chu and Li 2006).
- Sturen op een slibmorfologie met veel filamenten bij hogere slibbelastingen en kortere slibleeftijden (Alavi Moghaddam *et al.* 2003; Fuchs *et al.* 2005).
- Zorgen voor een hydrofiel oppervlak van het filtermateriaal, mogelijk door oppervlaktebehandeling met bijvoorbeeld chitosan (Wang *et al.* 2010).
- Mogelijk dat goede pH-beheersing volgens Kiso *et al.* (2005) bij pH-waarden lager dan 7 leidt tot een voldoende hoge saccharide-gehalte in het ECP (exocellulair polymeer) en beduidend hogere fluxen (kortere filtratietijden) dan bij pH-waarden hoger dan 7.

Voor het beheersen van reversibele fouling zijn de volgende maatregelen gerapporteerd:

- Bedrijfsvoering bij voldoende lage fluxen, zoals bij Chang *et al.* (2007) bij slechts 7,5 l/m<sup>2</sup>.uur en bij Satyawali *et al.* (2008) die op basis van een test met oplopende fluxen (in stappen van 20 minuten) de kritische flux van het betreffende systeem vastlegde. De kritische flux is die flux, waarbij de drukval niet meer constant bleef gedurende de 20 minuten. Seo *et al.* (2002) varieerde bij non-woven doeken van 35 tot 70 g/m<sup>2</sup> de initiële drukval tussen 10 en 50 cm H<sub>2</sub>O en constateerde bij testen gedurende 160 minuten en lage

initiële drukval 10 cm H<sub>2</sub>O een relatief kleine fluxdaling van 42 naar 37 l/m<sup>2</sup>.uur bij goede effluentkwaliteit bereikt ruim binnen 20 minuten. Bij een startende drukval van 50 cm H<sub>2</sub>O daalde de flux lineair in tijd van ruim 1000 naar 200 l/m<sup>2</sup>.uur na 160 minuten en was de effluentkwaliteit pas na 40 minuten lager dan 10 mg/l SS.

- Realiseren van een langstroomsnelheid langs het filtermateriaal, hetgeen in elk onderzoek (afgezien van dead-end-filtratie-experimenten ter opheldering van het filtratieproces) is toegepast. Gerapporteerde snelheden zijn 3 tot 10 cm/s (Kiso *et al.* 2000), 6 tot 30 cm/s gecombineerd met lucht (Fuchs *et al.* 2005) en 20 cm/s in de gestandaardiseerde testcel (Iversen *et al.* 2007). Dit zijn beduidend mildere langstroomcondities als gehanteerd in bijvoorbeeld het tubulaire crossflow microfiltratie-membraan met poriegrootte van 2 µm die werd voorzien van een pre-coat met kaoliniet discrete deeltjes van 2 µm (Li *et al.* 2006).
- Realisatie van beluchting onder het ondergedompelde filtermateriaal:
  - Op tijd gestuurd, waaronder 1 minuut per etmaal met 20-40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.s (Kiso *et al.* 2000), 3 minuten per 3 uur (Alavi Moghaddam *et al.* 2002), tijdens periode zonder filtraatonttrekking in de SBR-applicatie (Kiso *et al.* 2005), 5 minuten per etmaal (Chu and Li 2006), intermitterend (Liu *et al.* 2009), en 5 minuten voor en 5 minuten na filtraatonttrekking in de als SBR bedreven aërobe slibmineralisatie bij zeer hoge slibgehalten van 32 g/l door Wang *et al.* (2006).
  - Op membraanvervuiling (drukverschil) gestuurd, zoals bij Fan en Huang (2002) gedurende 5 minuten bij 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.uur na optreden van vervuiling waarbij tevens geen filtraatonttrekking en zoals bij Fuchs *et al.* (2005) waarbij na langere tijd (tussen enkele dagen en 2-3 weken) de sterk verhoogde drukval (100 ten opzichte van de gebruikelijke 3 tot 10 cm H<sub>2</sub>O) adequaat werd hersteld door intensieve beluchting.
  - Op continue basis beluchten onder de filtermodule, waarbij deze beluchting voor de ondergedompelde filtermodules tevens gebruikt wordt voor langstrooming. In zijn kritische flux-bepaling toonde Satyawali en Balakrishnan (2008) aan dat de kritische flux verhoogd kon worden door intensiveren van de beluchting onder de ondergedompelde filtratiemodule. De kritische flux steeg van 3,9 naar 14 l/m<sup>2</sup>.uur door verhogen van de beluchtingintensiteit van 2,6 naar 4,5 l/minuut op een filtermodule van 0,05 m<sup>2</sup>. Het concept van kritische flux kan derhalve goed gebruikt worden om een goede beluchtingintensiteit te vinden, waarbij het mogelijk wordt om langdurig een goede flux (of permeabiliteit) te realiseren.

Bij het gebruik van beluchting ter beheersing van een voldoende flux worden ook kanttekeningen geplaatst:

Fuchs *et al.* (2005) rapporteert dat over het algemeen bij hogere beluchtingintensiteit (beluchting gecombineerd voor zuurstofinbreng en beheersing koekopbouw op filtermodule) gepaard gaat met een verslechterde effluentkwaliteit.

Chang *et al.* (2006) onderzocht de invloed van beluchtingintensiteit op de filtratieweerstand in kortdurende testen en vond dat bij waarden boven de 75 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.uur een sterk verhoogde filtratieweerstand, zeer waarschijnlijk veroorzaakt geacht door het opbreken van de slibvlokken in kleinere deeltjes, die leiden tot snellere verstopping van poriën.

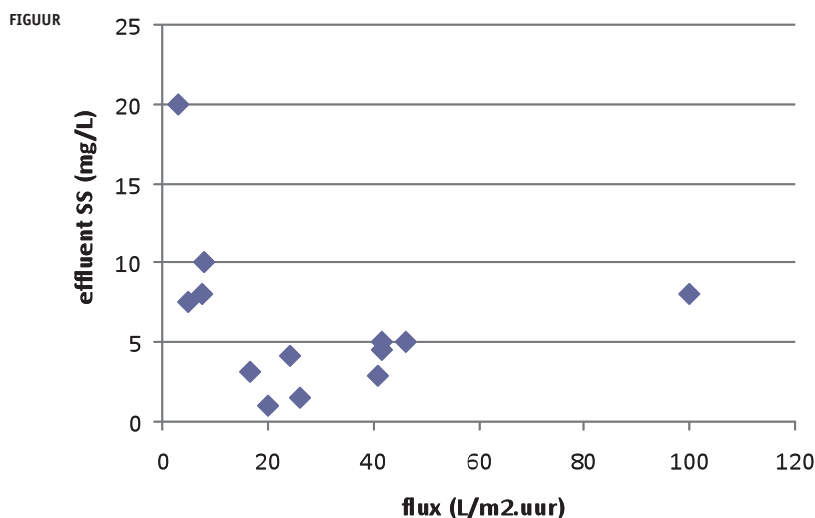
Seo *et al.* (2007) rapporteert op ondergedompelde vlakke plaat en een ondergedompelde verticaal opgestelde tube, dat er verschillende koeklaagdikten worden gevonden over het filteroppervlak, dit ten opzichte van positionering ten opzichte van de opstijgende luchtbellens bij de vlakke plaat en over de hoogte van de verticaal opgestelde tube. Het realiseren van een evenwichtige verdeling van de koeklaagdikte over het filteroppervlak is van belang in verband met een goede verdeling van de filterprestaties (flux en filtraatkwaliteit) over het filtermateriaal.

In de Engelstalige gepubliceerde onderzoeken wordt nauwelijks melding gemaakt van experimentele resultaten met het terugspoelen van filtermateriaal voor het beheersen van de filtratieweerstand en flux. Ho *et al.* (2007) gebruikte een dagelijkse terugpuls en Seo *et al.* (2002) refereert naar onderzoek door Hamata (1999, in Japans) waarbij door terugspoeling een goed herstel van de flux wordt gerealiseerd bij dagelijks terugspoelen met water. Hierna daalde de flux van ruim 1000 naar 80 l/m<sup>2</sup>.uur in 5 uur looptijd. Het terugspoelen van dynamische membranen levert derhalve een grote potentiële winst in flux en dus in compactheid van het systeem. Het terugspoelen van zeer open filtermaterialen vergt, ten gevolge van de zeer hoge permeabiliteit, een zeer hoge snelheid om te komen tot een goede verdeling van het teruggespoelde filtraat over het gehele filteroppervlak. In (nog niet gepubliceerd) onderzoek door Daamen wordt een volledig herstel van de flux verkregen bij een nog niet geoptimaliseerde zeer korte (ongeveer 0,2 seconden) en krachtige waterpuls van circa 2,5 cm (ml/cm<sup>2</sup>). Er zijn ook onderzoeken waarbij gebruik is gemaakt van terugspoelen met lucht (Chu *et al.* 2008; Chu *et al.* 2010).

In meerdere onderzoeken wordt melding gemaakt van het handmatig wassen van de filtermodule (Alavi Moghaddam *et al.* 2002; Wu *et al.* 2005; Alavi Moghaddam *et al.* 2006; Chu and Li 2006; Seo *et al.* 2007). Vanuit het perspectief van het ontwikkelen van een praktijkinstallatie lijkt deze wijze van beheersen van de flux niet realistisch.

## 2.6 PRAKTIJKRESULTATEN (FLUX EN EFFLUENTKWALITEIT)

Ten behoeve van de filtratie-onderzoeken is veelal op kleine schaal (100 liter) een actiefslib systeem bedreven, waarbij de grootste systeemvolumina 140 liter (Fan and Huang 2002) en 750 liter (Seo *et al.* 2002) betroffen. Om voor praktijktoepassingen uiteindelijk een goed functionerend systeem aan te tonen zijn duurproeven uitgevoerd. Hierbij wordt voornamelijk gekeken naar het verloop van flux, effluentkwaliteit en drukverschil (filtratieweerstand). Het resultaat van enkele duuronderzoeken is weergegeven in figuur 1, waarbij de effluentkwaliteit telkens als één gemiddelde, danwel een maximum opgetreden waarde binnen het gehele onderzoek is weergegeven. In enkele artikelen wordt aangegeven dat er geen onopgelost materiaal (suspended solids; SS) in het effluent zijn waargenomen, maar dit is natuurlijk discutabel. Deze waarden zijn niet opgenomen in figuur 1, omdat de SS detectielimiet rond de 5 mg/l ligt.





Uit de grafiek in figuur 1 blijkt dat voor de ondergedompelde membranen het gangbare werkgebied momenteel blijkt te liggen bij fluxen tot 50 l/m<sup>2</sup>.uur en filtraatkwaliteit tot 8 mg/l. Dit betekent dat dynamische filtratie:

- Vergelijkbaar is met membraanfiltratie ten aanzien van de fluxen en ontwerpdimensies.
- Vergelijkbaar is met nabezinking met (zelfs) nageschakelde zandfiltratie ten aanzien van de effluentkwaliteit.

Over het algemeen worden bij dynamische filtratie de volgende fasen onderscheiden:

- Inloophase, waarin een koeklaag zich nog moet vormen en de effluentkwaliteit nog onvoldoende is en meestal geretourneerd wordt naar de actiefslibtank. Afhankelijk van de omstandigheden is deze fase een kwestie van minuten.
- Stationaire fase, waarin een stabiel verloop van flux, drukval en effluentkwaliteit. Afhankelijk van de opgelegde drukval en fluxbeheersingsmaatregelen kunnen stabiele fluxen voor zeer lange tijd gerealiseerd worden.
- Verstoppingfase, waarin de filtratieweerstand oploopt door (ir)reversibele fouling en dit gepaard gaat met afname van de flux, toename van het drukverschil en meestal een sterke verslechtering van de filtraatkwaliteit.

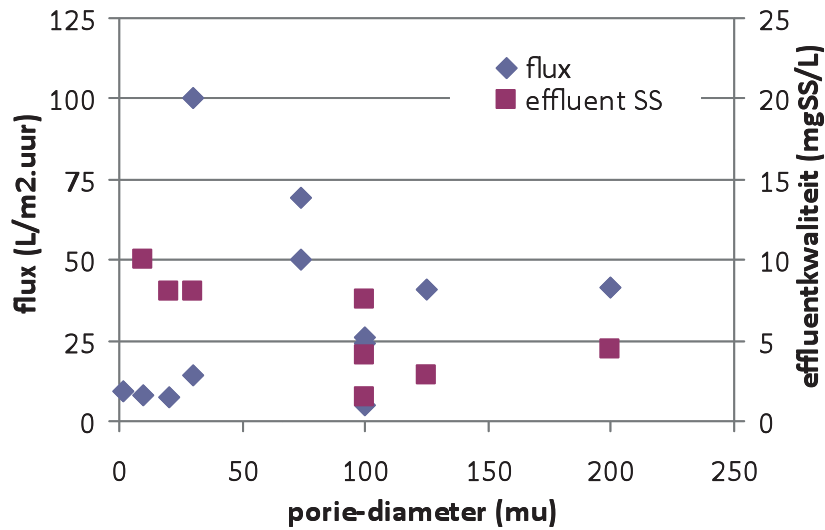
De lengte van de verrichte duuronderzoeken varieerde, tot maximaal 180 dagen en is wellicht voldoende geweest ten aanzien van gehanteerde sibleeftijden en ten aanzien van reversibele en irreversibele membraan fouling processen. Maar ten aanzien van acute (bijvoorbeeld RWA) en seizoensfluctuaties in (de kwaliteit van) biologisch zuiveringsslib en ten aanzien van systeemintegriteit (operationele kosten en betrouwbaarheid) van een praktijkinstallatie gedurende zijn technische levensduur, is nog onvoldoende informatie beschikbaar om de praktische haalbaarheid van dynamische filtratie te evalueren.

Het ontwikkelingsproces van dynamische filtratie verloopt momenteel voornamelijk via het pad van ondergedompelde vlakke plaat elementen. Het beheersen van flux en fouling gebeurt voornamelijk door middel van (tijdelijke) beluchting onder de filtratiemodule. Ten aanzien van materiaal- en weefsoort zijn er nog geen onderscheidende onderzoeken geweest, die geleid hebben tot voorkeursrichtingen. Ondanks dat voor specifieke onderzoekssituaties voorkeuren zijn uitgesproken voor toepassing van bepaalde poriediameters ten opzichte van vloggrootte, porieblokkade-mechanismen en vlokdoorslag, blijkt uit figuur 2 dat het met poriegrootten tussen 20 en 200 µm goed mogelijk is om te komen tot een acceptabele flux en effluentkwaliteit.

Aangezien er verschillende studies zijn gepubliceerd zonder informatie over de poriegrootte van de gebruikte dragermaterialen of de behaalde effluentkwaliteit, is figuur 2 niet helemaal volledig. Er zijn echter meerdere onderzoeken (Kiso *et al.* 2000; Alavi Moghaddam *et al.* 2002; Fan and Huang 2002; Seo *et al.* 2002; Alavi Moghaddam *et al.* 2003; Kiso *et al.* 2005; Alavi Moghaddam *et al.* 2006; Chu and Li 2006) (en bij BZV-slibbelastingen > 0,06; (Fuchs *et al.* 2005)) waarbij gedurende langere bedrijfstijd is aangetoond dat het gehalte onopgeloste stoffen in het effluent ruim onder de 5 mg/liter lag. Tevens blijkt dat kortdurend beduidend hogere fluxen (> 500 l/m<sup>2</sup>.uur) gerealiseerd kunnen worden bij goede effluentkwaliteiten (Seo *et al.* 2002; Kiso *et al.* 2005). Door ieder halfuur kort maar intensief terug te spoelen (531/m<sup>2</sup>.uur) heeft Daamen stationaire fluxen van 600 tot wel 950 l/m<sup>2</sup>.uur behaald met twee maal verdund actiefslib. Met onverdund slib (4 g/l) waren de initiële fluxen nog steeds rond de 500 l/m<sup>2</sup>.uur.

FIGUUR 2

FLUX- EN EFFLUENTKwaliteitRESULTATEN IN RELATIE TOT DRAGERMATERIAALPORIEGROOTTE



De spreiding in gepubliceerde effluentkwaliteiten, fluxen en looptijden zonder irreversibele filterverstopping geeft aan, dat dit beheersaspect nog in ontwikkeling is en dat er onderzoeksvragen open liggen ten aanzien van het optimale werkgebied voor:

- de beluchting of andere fluxbeheersingsmethodieken (relaxatie, terugspoelen);
- de initiele flux en/of de aangelegde verschilddruk;
- de slibkarakteristieken, zoals slibconcentratie, -belasting, -morfologie en -leeftijd).

# 3

## POTENTIE EN POSITIONERING DYNAMISCHE FILTRATIE

### 3.1 INLEIDING

Hoewel er nog maar een beperkte hoeveelheid wetenschappelijke literatuur bestaat op het gebied van dynamische filtratie, blijkt uit de gepubliceerde resultaten dat er goede potentie in dynamische filtratie zit. De dragermaterialen voor de dynamische membranen zijn goedkoop en eenvoudig te produceren. Uit verschillende experimenten is gebleken dat al na enkele minuten een dynamisch filter wordt opgebouwd. In verschillende publicaties wordt melding gemaakt van duurtesten waarbij de concentratie onopgeloste bestanddelen in het filtraat beduidend lager dan 5 mg/l is. Langdurige operationele aspecten van dynamische filtratie en optimale beheerscondities, zoals reiniging, zijn echter nog redelijk onbekend en zullen dus nog verder onderzocht moeten worden. Aangezien dragermaterialen voor dynamische filtratie chemisch en mechanisch robuust uitgevoerd kunnen worden, zal reiniging in principe makkelijker uitgevoerd moeten kunnen worden dan reiniging van traditionele membranen in MBRs. Ervaringen die zijn opgedaan ten aanzien van fluxbeheersing met effluentbehandelingstechnieken zoals trommelfilters kunnen van belang zijn voor dynamische filtratie en moeten derhalve worden meegenomen in vervolgonderzoek.

Vanuit het perspectief van de levenscyclus dient dynamische filtratie beoordeeld te worden ten opzichte van membraanfiltratie. Hierbij dienen ondermeer milieubelastende aspecten (grondstof, afvalstof, energiegebruik) voor de verschillende fases (productie, gebruik, vervanging) nader uitgewerkt te worden. Het is de verwachting dat voor al deze aspecten en fases het gebruik van dynamische filtratie een beduidend lagere milieubelasting vergt.

### 3.2 KOSTEN

Vanuit kostenperspectief dient de potentie onder andere beoordeeld te worden op de volgende aspecten:

- Gestelde randvoorwaarden aan het gehele zuiveringsconcept, zoals voorbehandeling (roosters) of nabehandelingen (effluentkwaliteit) of ruimtegebruik.
- Productiekosten en vervangingskosten (levensduur filtermateriaal).
- Energiekosten voor filtratie (drukval, fluxbeheersing) en voor potentiële besparing door vergroting van het aandeel te vergisten slib.

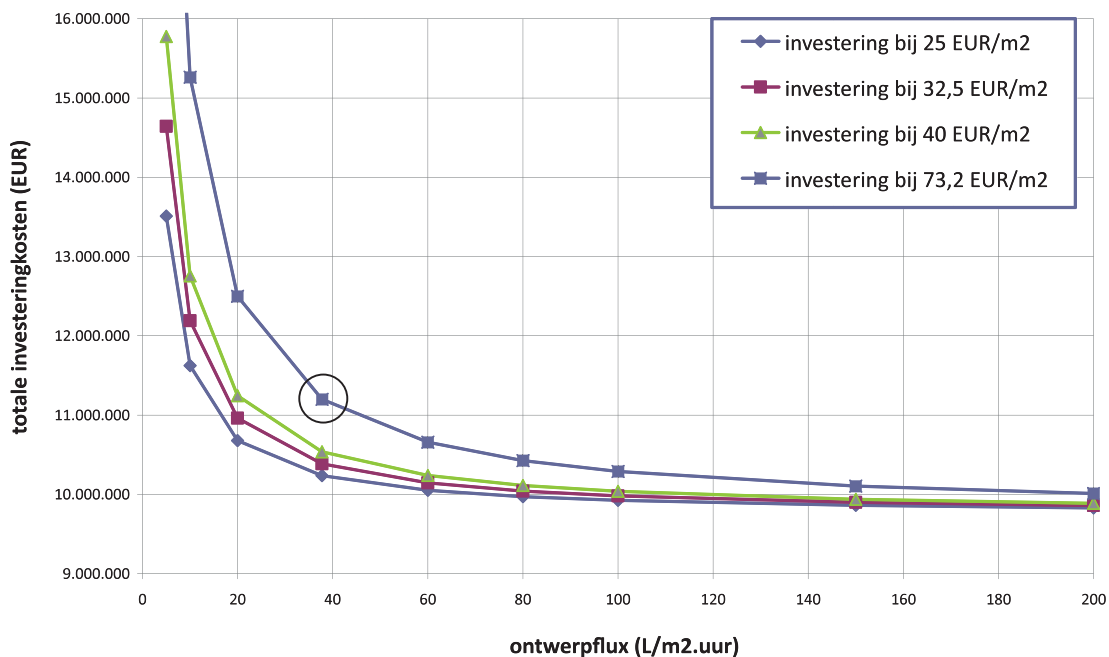
Momenteel kan er nog niet veel gezegd worden over bovenstaande aspecten en er zijn nog geen uitgewerkte berekeningen van bijvoorbeeld investering- en operationele kosten. Doekkosten zijn echter laag, zo'n 2-4 euro per vierkante meter. Verwacht wordt dat massaproductie van dynamische filtratie membraanelementen zal resulteren in een prijs van 25-40 euro per vierkante meter doekoppervlak, terwijl traditionele membraanelementen momenteel ongeveer

50 euro per vierkante meter kosten. Naast voornoemde kosten geldt voor beide varianten dat er ook nog kosten zijn voor bijvoorbeeld installatie en de appendages.

In het STOWA rapport 'onderzoek MBR Varsseveld' (STOWA 2006-05) zijn de kosten van de MBR Varsseveld vergeleken met een referentievariant (actiefslibstelsysteem met zandfiltratie), waaruit bleek dat de investeringskosten gelijk zijn. In een recente studie (groene-weide; 10.000 i.e.) van Brepols *et al.* (2010) zijn de berekende investeringskosten voor een MBR zelfs iets lager dan de investeringskosten voor een conventioneel actiefslibstelsysteem met zandfiltratie en UV disinfectie. De exploitatiekosten voor een MBR blijken echter iets hoger te zijn dan de exploitatiekosten van een conventioneel actiefslibstelsysteem met zandfiltratie (STOWA 2006-05). Dit wordt vooral veroorzaakt door de afschrijving op membranen. Aangezien verwacht wordt dat dynamische filtratie membraanelementen goedkoper geproduceerd kunnen worden dan traditionele membraanelementen, lijkt toepassing van dynamische filtratie in vergelijking met een conventioneel actiefslibstelsysteem met zandfiltratie kostentechnisch in ieder geval gelijkwaardig. Zoals al in het voorgaande hoofdstuk bleek is het mogelijk om met dynamische filtratie een vergelijkbare effluentkwaliteit te behalen als met een conventioneel actiefslibstelsysteem met zandfiltratie.

Uitgaande van de case Varsseveld (STOWA 2006-05) is een indicatieve berekening gemaakt voor toepassing van dynamische filtratie, waarbij de invloed van de ontwerpflux en de filterprijs op de investeringskosten zijn berekend (Figuur 3). De totale investeringskosten voor de MBR Varsseveld waren € 11,2 miljoen, met een ontwerpflux van 37,5 l/m<sup>2</sup>.uur (omcirkeld in de grafiek in figuur 3) en een membraanprijs van > € 73 (STOWA 2006-05). Ondanks het geringe aandeel van de investeringskosten voor de filtermodule (circa 13% van de totale investering) blijkt hieruit de invloed van de voor de Nederlandse situatie vast te stellen ontwerpflux en kostprijs voor filterelementen voor de financiële haalbaarheid van dynamische filtratie. Een lagere filterelementenkostprijs en een hogere flux kunnen de investeringskosten substantieel omlaag

FIGUUR 3 INVLOED VAN DE ONTWERPFLUX EN DE FILTERPRIJS OP DE TOTALE INVESTERINGKOSTEN (CASE VARSSEVELD)



brenge. Daarmee is dynamische filtratie interessant, zeker als de energiekosten van dynamische filtratie zoals verwacht lager uitvallen dan de energiekosten bij traditionele MBRs of als dynamische filtratie wordt toegepast in een systeem waarbij (extra) energieproductie wordt gerealiseerd. Dat laatste kan bijvoorbeeld door met dynamische filtratie meer organisch materiaal uit het afvalwater te filteren dan in de huidige afvalwaterzuiveringpraktijk.

### 3.3 DYNAMISCHE FILTRATIE ALS BEZINKTANK ALTERNATIEF

Voor het scheiden van organisch materiaal en andere deeltjes uit afvalwater worden momenteel voornamelijk bezinktanks gebruikt. Dynamische filtratie zou toegepast kunnen worden als alternatief voor een bezinktank. Er kan dan onderscheid gemaakt worden tussen voor-, tussen- en nabezinktanks, omdat er substantieel verschil zit tussen het uitgefilterde materiaal (i.e. de filterkoek) en de functie van de betreffende bezinktank.

#### 3.3.1 ALTERNATIEF VOOR VOORBEZINKING

Hoewel er geen praktijkervaring is opgedaan met dynamische filtratie als alternatief voor een voorbezinktank, lijkt deze optie vrij riskant. Voorbehandeling van afvalwater voor MBRs met fijnzeven (maaswijdte 0,5-2 mm) is niet gemakkelijk gebleken, zoals ook de ervaringen met de MBR Varsseveld (vooral in de DWA/RWA overgang) hebben aangetoond (STOWA 2006-05). In recent onderzoek met influent fijnzeven van  $\leq 5$  mm werd voornamelijk het toilet papier afgevangen (STOWA 2010-19). Het gesuspendeerde materiaal in ruw afvalwater vormt niet gemakkelijk de gewenste slibvlokken voor dynamische filtratie, terwijl vet en haren voor problemen kunnen zorgen. Daardoor is er geen goede filterkoekopbouw met ruw afvalwater. Wellicht is het mogelijk om door toepassing van flocculatie en coagulatie een werkend dynamisch membraan te verkrijgen, maar hiervoor is veel onderzoek en optimalisatie vereist. Toepassing van dynamische filtratie als alternatief voor een voorbezinktank ligt derhalve niet direct voor de hand.

#### 3.3.2 ALTERNATIEF VOOR TUSSENBEZINKING

Wellicht is het wel mogelijk om zonder al te grote aanpassingen een bestaande voorbezinktank om te bouwen tot een A-trap-achtig proces (bekend van zogenaamde AB-systemen, waarbij de A-trap hoogbelast is). Daardoor kan dynamische filtratie ingezet worden als alternatief voor een tussenbezinktank, waarbij optimalisatie van het afvangen van organische stof belangrijker is dan de filtraatkwaliteit, omdat het filtraat vervolgens nog in een conventioneel actiefslibstelsysteem behandeld wordt, of wellicht in de toekomst in een 'koude anammox'. Deze optie is erg interessant vanuit de afvalwaterzuivering-als-energiefabriek gedachte en kan ook als een compacte A-trap worden toegevoegd aan RWZI's die momenteel geen voorbezinktank hebben. Dynamische filtratie kan natuurlijk ook ingezet worden als alternatief van de tussenbezinktank van de enkele afvalwaterzuivering die momenteel al als AB-systeem bedreven wordt. Dit levert naar verwachting een ruimtebesparing op.

#### 3.3.3 ALTERNATIEF VOOR NABEZINKING

Bestaande afvalwaterzuiveringen met een beperkte hydraulische capaciteit kunnen wellicht veel baat hebben bij toepassing van dynamische filtratie als alternatief voor een nabezinktank. De effluentkwaliteit is dan erg belangrijk. De flux speelt hierbij uiteraard een cruciale rol, waarbij de verschillen tussen de droogweeraanvoer (DWA) en de regenweeraanvoer (RWA) in acht genomen moeten worden. De MBR Varsseveld heeft een ontwerpflux van  $37,5 \text{ l/m}^2 \cdot \text{uur}$ , maar in de praktijk wordt gewerkt met een netto flux in de procesmodus van ongeveer  $20 \text{ l/m}^2 \cdot \text{uur}$  (STOWA 2006-05). De MBR proefinstallatie in Hilversum haalde in de praktijk net-

to fluxen van 40-50 l/m<sup>2</sup>.uur (STOWA 2006-16). Uit de gepubliceerde literatuur over dynamische filtratie is het duidelijk dat vergelijkbare fluxen redelijk eenvoudig gehaald worden met aanvaardbare effluentkwaliteit. Het terugspoelen van de filtermodules, zoals gedaan door Daamen, biedt de mogelijkheid tot het verder verhogen van de ontwerpflux tot waarden ruim boven de 100 l/m<sup>2</sup>.uur. Er zijn zelfs kortdurend fluxen van meer dan 500 l/m<sup>2</sup>.uur gerealiseerd met behoud van goede effluentkwaliteiten (Seo *et al.* 2002; Kiso *et al.* 2005).

### 3.4 POTENTIE

De potentie van dynamische filtratie hangt onder andere af van de kosten, robuustheid en de eenvoud. Onder kosten vallen niet alleen de investering- en operationele kosten, maar ook bijvoorbeeld energiekosten en ruimtebeslag (compactheid). Bij minimaal vergelijkbare effluentkwaliteit is het volume/oppervlak van dynamische filtratie substantieel kleiner dan dat van een bezinktank. Ten opzichte van conventionele MBR is het met dynamische filtratie in principe mogelijk om zeker een twee keer hogere flux te bereiken, terwijl de dynamische membraanelementen goedkoper geproduceerd zouden kunnen worden. Dat biedt perspectief.

Een overzicht van verwachtingen en kritische aspecten van dynamische filtratie als alternatief voor bezinktanks is gegeven in tabel 2.

TABEL 2: KRITISCHE ASPECTEN VAN DYNAMISCHE FILTRATIE ALS ALTERNATIEF VOOR BEZINKTANKS.

Dynamische filtratie als alternatief voor:	Voorbezinking	Tussenbezinking	Nabezinking
Huidige situatie RWZI*	NBT VBT & NBT	NBT VBT & NBT TBT & NBT	TBT & NBT NBT
Doel dynamische filtratie**	Energiebenutting VE-capaciteit verhogen	Energiebenutting VE-capaciteit verhogen	Hydraulische capaciteit verhogen
Verandering	Slibbelasting	Introductie A-trap Slibbelasting	Debiet
Aandachtspunten	Geen slibvlok Wel haren en vet	DWA/RWA Slibvlok Slibbelasting Tweede-trap	DWA/RWA Filtraatkwaliteit Slibkarakteristieken
Verwachtingen	Risikant door verstoppingen	Energiefabriek Aandacht voor nutriëntenverwijdering	Hoge fluxen met behoud van effluentkwaliteit

\* NBT = nabezinktank; TBT = tussenbezinktank; VBT = voorbezinktank \*\* VE = vervuilingseenheid

Dynamische filtratie biedt kansen op energiewinst indien toegepast in een AB-(achtig)stelsel en heeft potentie als alternatief voor een nabezinktank, zeker indien er een uitbreiding van de hydraulische capaciteit op een RWZI noodzakelijk is. Het is echter nog onbekend welke stabiele en kritische fluxen uiteindelijk in de praktijk mogelijk zijn met dynamische filtratie. Verder onderzoek en (pilot) toepassing zal dit moeten uitwijzen.

In tabel 3 is een aanzet tot positionering van dynamische filtratie gemaakt door onderlinge vergelijking met andere slibafscheidingsystemen, waaruit het perspectief van dynamische filtratie afgeleid kan worden. Enerzijds kan dynamische filtratie vergeleken worden met een tussenbezinktank en anderzijds met technieken voor het scheiden van slib en effluent. Dynamische filtratie als alternatief voor een tussenbezinktank zorgt naast een compacter systeem vooral ook voor een robuuster systeem. Dit omdat dynamische filtratie minder

gevoelig is voor de slibkwaliteit (bv. slibvlokdegradatie). Bovendien kan de slibafvang door het gebruik van dynamische filtratie beter gereguleerd worden, inclusief maximalisatie hiervan. De investerings- en operationele kosten zijn naar verwachting echter wel hoger. Ten aanzien van effluentproductie kan dynamische filtratie een aantrekkelijke optie zijn indien de effluentkwaliteit vergelijkbaar is met zandfiltratie. De beperkte literatuur die momenteel beschikbaar is wijst erop dat dit mogelijk is. In het licht van de kaderrichtlijn water (KRW) is dat erg interessant. Bovendien is bij de noodzaak tot hydraulische uitbreiding dynamische filtratie een aantrekkelijk alternatief ten opzichte van een nabezinktank. Vooral als er een beperkte ruimte beschikbaar is.

**TABEL 3** GLOBALE ONDERLINGE VERGELIJKING VAN VERSCHILLENDE SLIBAFSCHEIDINGSSYSTEMEN. DYNAMISCHE FILTRATIE (DF) IS VERGELEKEN MET EEN TUSSENBEZINKTANK (TBT) VOOR SLIBSCHEIDING TEN BEHOEVE VAN EEN A-TRAP. DAARNAAST IS DF VERGELEKEN MET EEN NABEZINKTANK, EEN NABEZINKTANK MET VERVOLGENS ZANDFILTRATIE, EN MET MEMBRAANFILTRATIE VOOR SLIBSCHEIDING TEN BEHOEVE VAN EFFLUENTPRODUCTIE

	Slibseparatie				
	Slibseparatie t.b.v. A-trap		Slibseparatie t.b.v. effluentproductie		
	TBT	DF	NBT	NBT+ZF	MF
Investeringskosten	+	0	+	0	-
Ruimtebeslag	-	+	-	-	+
Energiegebruik	+	0	+	-	-
Mogelijke energiewinst	+	+	0	0	0
Personele kosten	+	0	+	0	-
Onderhoud/vervangning	+	0	+	+	-
Effluentkwaliteit	-	0	-	0	+
Robuustheid t.a.v. slibkwaliteit	-	+	-	0	+

+ = relatief positiever; 0 = neutraal; - = relatief negatiever; TBT = tussenbezinktank; DF = dynamische filtratie; NBT = nabezinktank; ZF = zandfilter; MF = membraanfiltratie

# 4

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 4.1 CONCLUSIE

Uit de beperkt beschikbare literatuur en uit initiële praktische experimenten blijkt dat dynamische filtratie, naast MBRs, erg interessant is en de potentie heeft om een alternatief te vormen voor bezinktanks, inclusief nabezinktanks met zandfilter. Een dynamisch membraan bestaat uit een goedkoop, relatief grofmazig filtermateriaal, waarop een natuurlijke filterkoek ontstaat tijdens het afvalwaterzuiveringsproces. Het dragermateriaal heeft poriegroottes van 3 tot wel 500  $\mu\text{m}$ , maar de snel vormende filterkoek, welke uiteindelijk verantwoordelijk is voor de filtratie, is veel fijnmaziger, waarbij het effluent uiteindelijk minder dan 5 mg/l onopgeloste stoffen kan bevatten.

Een belangrijke parameter als de potentiële waterflux die met dynamische filtratie kan worden bereikt hangt bijvoorbeeld af van de gekozen actieve fluxbeheersingstechnieken (beluchten/spoelen), maar gepubliceerde duuronderzoeken hebben in ieder geval langdurig een flux van 40 l/m<sup>2</sup>.uur laten zien. Een fluxbeheersingstechniek als terugspoelen is echter nog nauwelijks getest en zou tot hogere fluxen kunnen leiden. Fluxen van honderden liters per uur per vierkante meter filteroppervlak lijken mogelijk. In het algemeen kan worden gesteld dat er, op een enkele uitzondering na (Fan and Huang 2002; Seo *et al.* 2002), nog weinig ervaring is opgedaan met opschaling. De techniek moet zich dus nog bewijzen in de praktijk.

Er kan nog niet veel gezegd worden over de kosten van dynamische filtratie. Door de potentieel hogere fluxen van dynamische filtratie en de verwachte lagere kostprijzen van de filtermodule zullen de investeringskosten (per m<sup>3</sup>/jaar) substantieel lager uitvallen dan bij membraanfiltratie en concurrerend zijn met (na-)bezinking inclusief zandfiltratie.

### 4.2 AANBEVELINGEN

Uitgaande van de thans opgebouwde kennis en ervaring dient nader onderzoek uitgevoerd te worden om het concept van dynamische filtratie te ontwikkelen tot een praktijktoepassing. Dit onderzoek moet duidelijk maken hoe dynamische filtratie zo optimaal mogelijk toegepast kan worden in de praktijk. Met onderzoek moeten de mogelijkheden en onmogelijkheden van dynamische filtratie in kaart gebracht worden, waardoor er meer duidelijkheid komt over de praktische toepasbaarheid van deze techniek.

Een aantal technologische aspecten, zoals de reactorconfiguratie, dragermateriaal keuze, dynamische membraanopbouw en de beheerscondities, zullen nog (verder) onderzocht moeten worden. Op basis van deze onderzoeksresultaten kan uiteindelijk ook inzicht verkregen worden in de technische en economische haalbaarheid van dynamische filtratie. Om de praktische (opgeschaalde) toepassing zowel technisch en economisch te evalueren, is duuronderzoek op een pilot-installatie vereist.



### 4.3 ONDERZOEKSACTIVITEITEN

Om de onderzoeksvragen die er ten aanzien van dynamische filtratie zijn te beantwoorden, zullen er verschillende onderzoeksactiviteiten uitgevoerd moeten worden. Mogelijke onderzoeksactiviteiten zijn gericht op het onderzoeken van de effecten van:

- 1 Filtratieconfiguratie, zoals het gebruikte filtermateriaal, de poriegrootte, de doekgrootte, etc.
- 2 Generieke en locatiespecifieke procesparameters, zoals opgelegde drukval, actuele temperatuur, chemicaliëngebruik, wel of geen voorbezinking, etc.
- 3 Slibparameters, zoals drogestofgehalte, as-gehalte, SVI, etc.
- 4 Operationele parameters, zoals beluchting, langstroomsnelheid, terugspoelen, etc.

De belangrijkste doelparameters van onderzoek zijn het creëren van een acceptabele effluentkwaliteit met een voldoende hoge flux. Uiteindelijk zullen de onderzoeksactiviteiten moeten resulteren in inzicht in de technologische toepasbaarheid van dynamische filtratie en de praktische uitvoerbaarheid. Met deze kennis kan dan een ontwerp voor pilottesten gemaakt worden. Pilottesten zullen uiteindelijk uitsluitsel geven over de technologische/technische en economische haalbaarheid van dynamische filtratie in de praktijk.

## 5

## REFERENTIES

Al-Malack, M. H. and G. K. Anderson (1997). "Cleaning techniques of dynamic membranes." *Separation and Purification Technology* 12(1): 25-33.

Alavi Moghaddam, M. R., Y. Guan, H. Satoh and T. Mino (2003). "Performance and microbial dynamics in the coarse pore filtration activated sludge process at different SRTs (solids retention times)." *Water Science and Technology* 47(12): 73-80.

Alavi Moghaddam, M. R., Y. Guan, H. Satoh and T. Mino (2006). "Filter clogging in coarse pore filtration activated sludge process under high MLSS concentration." *Water Science and Technology* 54(10): 55-66.

Alavi Moghaddam, M. R., H. Satoh and T. Mino (2002). "Performance of coarse pore filtration activated sludge system." *Water Science and Technology* 46(11-12): 71-76.

Brepols, C., H. Schafer and N. Engelhardt (2010). "Considerations on the design and financial feasibility of full-scale membrane bioreactors for municipal applications." *Water Science and Technology* 61(10): 2461-2468.

Cao, D. W., H. Q. Chu, W. Jin and B. Z. Dong (2010). "Characteristics of the biodiatomite dynamic membrane (cake layer) for municipal wastewater treatment." *Desalination* 250(2): 544-547.

Chang, M. C., R. Y. Horng, H. Shao and Y. J. Hu (2006). "Performance and filtration characteristics of non-woven membranes used in a submerged membrane bioreactor for synthetic wastewater treatment." *Desalination* 191(1-3): 8-15.

Chang, W. K., A. Y. J. Hu, R. Y. Horng and W. Y. Tzou (2007). "Membrane bioreactor with nonwoven fabrics as solid-liquid separation media for wastewater treatment." *Desalination* 202(1-3): 122-128.

Chu, H. Q., D. W. Cao, B. Z. Dong and Z. M. Qiang (2010). "Bio-diatomite dynamic membrane reactor for micro-polluted surface water treatment." *Water Research* 44(5): 1573-1579.

Chu, H. Q., D. W. Cao, W. Jin and B. Z. Dong (2008). "Characteristics of bio-diatomite dynamic membrane process for municipal wastewater treatment." *Journal of Membrane Science* 325(1): 271-276.

Chu, L. B. and S. Li (2006). "Filtration capability and operational characteristics of dynamic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment." *Separation and Purification Technology* 51(2): 173-179.

Fan, B. and X. Huang (2002). "Characteristics of a self-forming dynamic membrane coupled with a bioreactor for municipal wastewater treatment." *Environmental Science & Technology* 36(23): 5245-5251.

Fuchs, W., C. Resch, M. Kernstock, M. Mayer, P. Schoeberl and R. Braun (2005). "Influence of operational conditions on the performance of a mesh filter activated sludge process." *Water Research* 39(5): 803-810.

Ho, J. H., S. K. Khanal and S. Sung (2007). "Anaerobic membrane bioreactor for treatment of synthetic municipal wastewater at ambient temperature." *Water Science and Technology* 55(7): 79-86.

Hong, R. Y., M. C. Chang, H. Shao, Y. J. Hu and C. P. Huang (2007). "The usage of non-woven fabric material as separation media in submerged membrane photocatalytic reactor for degradation of organic pollutants in water." *Separation Science and Technology* 42(7): 1381-1390.

Hong, R. Y., H. Shao, W. K. Chang and M. C. Chang (2006). "The feasibility study of using non-woven MBR for reduction of hydrolysed biosolids." *Water Science and Technology* 54(5): 85-90.

Iversen, V., A. Drews, T. Schmidt, B. Lesjean, E. Fatarella and M. Kraume (2007). "Textile filter medium for the use in membrane vitalization plant." *Chemie Ingenieur Technik* 79(11): 1945-1950.

Jeison, D., I. Diaz and J. B. van Lier (2008). "Anaerobic membrane bioreactors: Are membranes really necessary?" *Electronic Journal of Biotechnology* 11(4).

Kiso, Y., Y. J. Jung, T. Ichinari, M. Park, T. Kitao, K. Nishimura and K. S. Min (2000). "Wastewater treatment performance of a filtration bio-reactor equipped with a mesh as a filter material." *Water Research* 34(17): 4143-4150.

Kiso, Y., Y. J. Jung, M. S. Park, W. H. Wang, M. Shimase, T. Yamada and K. S. Min (2005). "Coupling of sequencing batch reactor and mesh filtration: Operational parameters and wastewater treatment performance." *Water Research* 39(20): 4887-4898.

Lee, J., W. Y. Ahn and C. H. Lee (2001). "Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor." *Water Research* 35(10): 2435-2445.

Li, F., J. H. Chen and C. H. Deng (2006). "The kinetics of crossflow dynamic membrane bioreactor." *Water SA* 32(2): 199-203.

Li, N., Z. Z. Liu and S. G. Xu (2000). "Dynamically formed poly (vinyl alcohol) ultrafiltration membranes with good anti-fouling characteristics." *Journal of Membrane Science* 169(1): 17-28.

Liu, H. B., C. Z. Yang, W. H. Pu and J. D. Zhang (2009). "Formation mechanism and structure of dynamic membrane in the dynamic membrane bioreactor." *Chemical Engineering Journal* 148(2-3): 290-295.

Park, M. S., Y. Kiso, Y. J. Jung, M. Simase, W. H. Wang, T. Kitao and K. S. Min (2004). "Sludge thickening performance of mesh filtration process." *Water Science and Technology* 50(8): 125-133.

Pessoa de Amorim, M. T. and I. R. A. Ramos (2006). "Control of irreversible fouling by application of dynamic membranes." *Desalination* 192(1-3): 63-67.

Ren, X., H. K. Shon, N. Jang, Y. G. Lee, M. Bae, J. Lee, K. Cho and I. S. Kim (2010). "Novel membrane bioreactor (MBR) coupled with a nonwoven fabric filter for household wastewater treatment." *Water Research* 44(3): 751-760.

Satyawali, Y. and M. Balakrishnan (2008). "Treatment of distillery effluent in a membrane bioreactor (MBR) equipped with mesh filter." *Separation and Purification Technology* 63(2): 278-286.

Seo, G. T., B. H. Moon, T. S. Lee, T. J. Lim and I. S. Kim (2002). "Non-woven fabric filter separation activated sludge reactor for domestic wastewater reclamation." *Water Science and Technology* 47(1): 133-138.

Seo, G. T., B. H. Moon, Y. M. Park and S. H. Kim (2007). "Filtration characteristics of immersed coarse pore filters in an activated sludge system for domestic wastewater reclamation." *Water Science and Technology* 55(1-2): 51-58.

STOWA (2006-05). "Onderzoek MBR Varsseveld."

STOWA (2006-16). "MBR proefinstallatie RWZI Hilversum."

STOWA (2006-21). "Filtratietechnieken RWZI's."

STOWA (2010-19). "Influent fijnzeven in RWZI's."

Wang, C. C., F. L. Yang, L. F. Liu, Z. M. Fu and Y. Xue (2009). "Hydrophilic and antibacterial properties of polyvinyl alcohol/4-vinylpyridine graft polymer modified polypropylene non-woven fabric membranes." *Journal of Membrane Science* 345(1-2): 223-232.

Wang, C. C., F. L. Yang, F. G. Meng, H. M. Zhang, Y. Xue and G. Fu (2010). "High flux and antifouling filtration membrane based on non-woven fabric with chitosan coating for membrane bioreactors." *Bioresource Technology* 101(14): 5469-5474.

Wang, W. H., Y. J. Jung, Y. Kiso, T. Yamada and K. S. Min (2006). "Excess sludge reduction performance of an aerobic SBR process equipped with a submerged mesh filter unit." *Process Biochemistry* 41(4): 745-751.

Wu, Y., X. Huang, X. Wen and F. Chen (2005). "Function of dynamic membrane in self-forming dynamic membrane coupled bioreactor." *Water Science and Technology* 51(6-7): 107-114.

Zhi-Guo, M., Y. Feng-Lin and Z. Xing-Wen (2005). "MBR focus: do nonwovens offer a cheaper option?" *Filtration and Separation* 42(5): 28-30.

Zhou, X. H., H. C. Shi, Q. Cai, M. He and Y. X. Wu (2008). "Function of self-forming dynamic membrane and biokinetic parameters' determination by microelectrode." *Water Research* 42(10-11): 2369-2376.



# BIJLAGE I

ref.nr.	schaaigrootte	Gefitreeerde medium*	Materiaal **	weef-type	porie-grootte	Flux-beheersing	Onderzoeks-duur bij stabiele flux	stabiele flux-range	TMD	effluent-kwaliteit	kansen	bedreigingen
Eenheid	m <sup>2</sup>	g/l			mu		dagen	l/m <sup>2</sup> -uur	cm H <sub>2</sub> O	mg/l		
(Kiso et al. 2000)	0,11-0,12	AS (3-10)	nylon	mesh	100, 200, 500	F (3-10 cm/s), A (1min/day 20-40 m/s)	150	20,8 - 31,7	0,5 - 1 - 10	SS: < 1,5	lage TMD, geen backpuls nodig!	geen langstroom tav flux en aeration tav effluentkwaliteit
(Lee et al. 2001)	0,067	AS (3) <vs> attached growth (0,1)	PE	Membrane	0,1	A (2,5 l/min constant)	1 - 10	25	< 260	not relevant	slibvlok (AS) leidt tot 7 maal tragere stijging in drukval tot 26 kPa dan attached growth met small particles: grotere compressibiliteit, losere structuur	riscio airbubbling op kleine deeltjes op oppervlakte/porien door intensievere deeltjes uitwisseling
(Seo et al. 2002)	0,054 - 2,0	AS (1,4-2,5)	PP (35-70 g/m <sup>2</sup> , 0,26-0,42 mm)	non-woven		A (in beluchtingszone)	12	16,7	5-50	SS: 3,2	afstemming doek (35 - 70 g/m <sup>2</sup> ) op initiële drukval (5 - 50 cm H <sub>2</sub> O) in relatie tot looptijd	leakage of MLS in initial permeate (<20 minutes)
(Navri Moghaddam et al. 2002)	ca 0,09	AS (4-8)	PE (15 g/m <sup>2</sup> )	non-woven	200	A (3min/3uur), wekelijks handmatig wassen	65 (batchtest, geen slibspui)	41,7	n.g.	SS: <16 (initieel) en 4,5 (filament slib fase)	bij vorming filament slib verbeterd de effluentkwaliteit	sterke onderdruk in membraan, waardoor beschadiging, als niet wordt teruggespoeld.
(Fan and Huang 2002)	2,7	AS (7,5)	'Dacron'	mesh	100 (en in gellaag: 0,1-1 porien geobserveerd)	F, A (120 m/u gedurende 5 minuten bij optredende clogging)	85 dagen	14,8 - 33,3	< 5	SS: < 4,1	stabiel werkgebied vastgelegd: flux: 15->33, TMD: 0,6->4,5 en stabiele looptijd: 7->0,2 dagen & bodembeluchting was acceptabel voor goede cleaning & distinction gellaag (na 3-5 dagen) & cake layer & gellaag verbeterd flux tgv meer hydrofiele karakter	Abrupte stijging drukval (5 cmH <sub>2</sub> O) tijdens stabiele looptijd leidt tot stijging flux en doorslag in troebelheid! (kwetsbaarheid gellaag & beschermende koeklaag?)

ref.nr.	schaalgrootte	Gefiltreerde medium*	Materiaal **	weef-type	porie-grootte	Flux-beheersing	Onderzoeks-duur bij stabiele flux	stabiele flux-range	TMD	effluent-kwaliteit	kansen	bedreigingen
Eenheid	m <sup>2</sup>	g/l			mu		dagen	l/m <sup>2</sup> .uur	cm H <sub>2</sub> O	mg/l		
(Alavi Moghaddam et al. 2003)	ca 0,03	AS (1,7 - 6,1 g/l voor SRT = 10 - 75 d bij VLR = 295 g TOC/m <sup>3</sup> .d)	PE 15 g/m <sup>2</sup>	non-woven	50-200	geen beluchting, geen backwash, geen filtraat-recirculatie	120-180	41 continu	30-60 voor 10 en 30 d SRT en tot 400 voor 75 d SRT	1,7±1,4 max 8 / 2,9±2,0 max 10 en 23±56 max ? bij SRT = 10, 30 en 75	lage SRT = meer filamenten = betere filtratie (minder clogging, betere effluentkwaliteit)	weinig filamenten en veel metazoa (wormen) worden gezien als indicatoren voor filterclogging en slechte filtraatkwaliteit, dit gebeure bij hoge slibeeftijden !
(Park et al. 2004)	0,054	AS (3-9)	?	mesh	100, 200, 500	geen	6-7 uur	Dyna-misch	dalend nivo vanaf 65 cm	SS: < 10 na enkele minuten, < 1 na 10 minuten		
(Zhi-Guo et al. 2005)	?	AS	PP	non-woven	3, 5	A, C (0,3% NaOCl, frequentie onbekend)	geen informatie	20	geen informatie	SS laag, niet gekwantificeerd	bleekloog nodig om irreversibele fluxdaling te beheersen...	
(Wu et al. 2005)	?	AS (6-9)	?	non-woven	?	F, wassen met water na elke run	geen informatie	50-80	oplopend tot 14	geen SS, wel nutriënten	bij 40 l/m <sup>2</sup> .u is de O <sub>2</sub> -afname ca 5 mg/liter/mm... dus vnl anoxisch processen !	mogelijk nevenproductie opgelost organisch materiaal in dynamisch membraan
(Kiso et al. 2005)	0,016	AS in SBR (3-5)	?	mesh	100	A (tijdens periode van geen afvoer)	1 uur per draw elke 24, 16 of 12 uur, duurtsten tot 120 dagen	625 (continue beluchting) en lager bij intermitterende beluchting, relatief onafhankelijk van initiële drukverschil	Dynamisch 20 cm daling vanaf 50, 100, 150 en 200 cm in 1 uur	SS<4	kortdurend hele hoge fluxen bij hoge TMD	bij inkorting van SBR-cyclietijden (12 ipv 24 of 16 uur) liep de filtratietijd sterk op bij hogere effluent-pH (tgv NaHCO <sub>3</sub> ) dan 7 liep de filtratietijd sterk op en het aandeel saccharide in ECP nam af
(Fuchs et al. 2005)	0,097	AS (4 en 7)	nylon	mesh	30	A, tbv slib en filtratie waardoor 6-30 cm/s snelheid	bij 4 g/l minimaal 7 dagen, bij 7 g/l 3,5-6 dagen	50 - 150	3 - 10	Afhankelijk van slib-belasting en vlok-grootte (zie kansen)	koeklaag minder beïnvloed door slibconcentratie, maar meer door de beluchting onder het filter en stijgende F/M-ratio (BOD) van 0/0,03/0,06/0,18/0,3 leiden tot minder vlokken/ml en beter effluent SS van 25/18/8/4/3 mg/l = interessant t.a.v. A-trap-visie !	hogere beluchting onder membraan leidt tot hogere SS in effluent



ref.nr.	schaalgrootte	Gefiltreerde medium*	Materiaal **	weef-type	porie-grootte	Flux-beheersing	Onderzoeks-duur bij stabiele flux	stabiele flux-range	TMD	effluent-kwaliteit	kansen	bedreigingen
Eenheid	m <sup>2</sup>	g/l			mu		dagen	l/m <sup>2</sup> -uur	cm H <sub>2</sub> O	mg/L		
(Wang et al. 2006)	0,016 > 0,0518	AS (10-32)	nylon	mesh	100	A (onder filter-module 5 min voor en 5 min na with-drawal)	filtratietijd tot 400 min/dag, 400 dagen onderzoekstijd	5 - 100	100	SS av 40, piek 57	hogere siltconcentraties dan bij MBRsystemen voor siltreductie, positieve invloed op flux van een hogere ECP-content (mg/g-sib)	
(Alavi Moghaddam et al. 2006)		AS (4-10)	?	non-woven		F en handmatig wassen op niet-vermelde frequentie in functie van optredende clogging	65	41,7	bij clogging (ondanks handmatig wassen) oplopend tot 140	SS < 5	een mogelijk (zwak bewijs) groter aandeel van filamentaire bacteriën leidt bij verstopping tot minder ernstige doorslag	filterclogging ontstaat en is niet beheersbaar gebieken zonder additionele maatregelen
(Li et al. 2006)	0,067	AS (1-9)	keramisch + 2 mu kaoliniet deeltjes als precoat	n.v.t.	2 (keramisch) en 0,4 (dynamic kaoliniet laag)	F (1-2 m/s) en (kaoliniet) back-wash als < 20 l/m <sup>2</sup> . uur	180	< 20	2000		divv een precoat van kleine inerte deeltjes kun je een dynamisch membraan maken, waardoor mogelijk een nog betere retentie of flux gerealiseerd kan worden	
(Pessoa de Amorim and Ramos 2006)	0,0004	reactive dye	Poly-ether-sulfon		MW-cut-off 30.000 kDa				2		Kleurverwijdering (textiel) met ultrafiltratie wordt minder gevoelig voor irreversibele fouling door gebruik van 'precoat' dynamisch membraan met PEG en PVA polymeren	
(Chu and Li 2006)	0,066	AS(3-10 en 6 bij 35 dagen durend experiment)	Teryleen	Mono-filament filterdoek (232 en 190 draden per 10 cm)		F (door beluchting) en A (5 min per dag) en handmatig wassen als dP > 10 cm H <sub>2</sub> O na 12 en 26 dagen	33	20	<2	SS meestal <1, pieken < 5 en NTU < 9	irreversibele fouling herstelde 65 % permeabiliteit na wassen met water en 92% met 0,3%NaOCl	

ref.nr.	schaalgrootte	Gefiltreerde medium*	Materiaal**	weef-type	porie-grootte	Flux-beheersing	Onderzoeks-duur bij stabiele flux	stabiele flux-range	TMD	effluent-kwaliteit	kansen	bedreigingen
Eenheid	m <sup>2</sup>	g/l		mu			dagen	l/m <sup>2</sup> .uur	cm H <sub>2</sub> O	mg/l		
(Chang et al. 2006)	2 x 0,025	AS (1,8 groeiend naar 11 zonder slijbspur)	PP	non-woven	13, 25 en 39	F + A door beluchting	112 (totaal) en deelstudies naar invloed van beluchting en MLSS gedurende 1 uur	tot 33 (tussen 17 en 50) redelijk onafhankelijk van slijbconcentratie en beluchting !	niet genoemd	niet genoemd	bij fluxen <41,7 was filtratieveerstand minimaal bij beluchting 0,01 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .s of < 0,02 (range 0,002-0,033); optimale scour ivm afschuring en particle-break-up ! (25 mu was de beste poriegrootte)	invloed hogere slijbconcentraties (2-10) en hogere initiële fluxen (17-50) op filtratieveerstand gekwantificeerd en vooral bij > 33/m <sup>2</sup> .u en > 5 g/l sterke toename van weerstand
(Hong et al. 2006)	0,025	Gehydrolyseerd slijb (2-22) in SBR	PP	non-woven	20-30	lucht back-wash 5 min. per cycle	140	8,3-20	< 10 kPa	< 200	slijbductie in een dynamische membraan reactor mogelijk met stabiele flux	bij kortere HRT minder SS reductie door lagere concentratie opgelost zuurstof
(Seo et al. 2007)	0,052	AS (2,5-3,5)	PP	non-woven (35g/m <sup>2</sup> )		A en indien nodig handmatig wassen	25	46 (1e run met plaat <vs> 12mm tube en <12 (2e run met 5mm tubes)	< 50	SS: 3-7		bij 5 mm tubes neemt de weerstand toe, wsl. tgv. verstopping filtraat-afvoerkanaal & uniforme luchtverdeling is nodig ivm beheersing koeklaagdikte over filteroppervlak
(Iversen et al. 2007)	lab	AS uit pilotschaal MBR (kleinere vlok)	22 textielsoorten van 8 leveranciers van PVDF, PP, PA en PE	woven en non-woven	non-woven 3-50, woven 1-65	F (0,2 m/s)	2 uur bij constante druk (0,6-0,65 bar) en 12 uur bij constante flux (14-16 l/m <sup>2</sup> .u)	5-18 na 2 uur filtratie op 0,6 bar (14 mu ruwheid), 0,08 bar (4 mu ruwheid), 0,01 bar bij membraan (4,5 mu ruwheid)	na 12 uur bij 15 l/m <sup>2</sup> .u: 0,5 bar	2-400 KVE/ml	een testopstelling is gebruikt waarbij filtermaterialen vergeleken kunnen worden, helaas nog niet bij de voor doekfiltratie vereiste procesinstellingen (druk, langsstromingsnelheid en effluentkwaliteit)	verstopping van filtermateriaal bij drukverschil van 0,6 bar & hygienische /MBR effluent-kwaliteit (<10 KVE/ml) is NIET haalbaar met doekfiltratie
(Chang et al. 2007)	0,027 (pilot 0,72)	AS (tot 15) op bakery waste water	PP	non-woven 0,6 mm dik	20	A (0,01 m <sup>3</sup> per m <sup>2</sup> )	50	7,5	30-50	SS 23 metingen: range 4-11 en 1 x 20	bij lage fluxen is langdurige en stabiele bedrijfsvoering goed mogelijk	bij lage flux (lage TMP) langdurige en stabiele bedrijfsvoering mogelijk
(Ho et al. 2007)	0,002	anaeroob slijb (9,6-12,5)	PP PTFE-laminated	non-woven	10	F (0,1-0,2 m/s) & P (dagelijks)	90	4 - 12	0,5-3 psi	< 10 mg/l	bij lage flux (lage TMP) langdurige en stabiele bedrijfsvoering mogelijk	geen hoge TMP en cross flow velocity mogelijk

ref.nr.	schaalgrootte	Gefiltreerde medium*	Materiaal**	weef-type	porie-grootte	Flux-beheersing	Onderzoeks-duur bij stabiele flux	stabiele flux-range	TMD	effluent-kwaliteit	kansen	bedreigingen
Eenheid	m <sup>2</sup>	g/l			mu		dagen	l/m <sup>2</sup> -uur	cm H <sub>2</sub> O	mg/l		
(Hong et al. 2007)	0,086	Fotocatalyst TiO <sub>2</sub> clusters (350 mg/l)	PP	non-woven	2	F	10	4 - 15	3,3 kPa	0		
(Zhou et al. 2008)	0,003	koeklaag opbouw met AS, waarna voeden met gecentrifugeerd supernatant uit een SFDMBR	PP (50 g/cm <sup>2</sup> )	non-woven		geen	8	40			Zuurstof-depletie treedt op van 8 naar 0 mg/liter in 1,5-2,0 mm koeklaag-dikte	de toenemende dikte van dag 1 naar dag 8 van zuurstofdepletie van 1,5 naar 2,5 mm wordt vnl. veroorzaakt geacht door lagere SOUR van de koeklaag
(Sabyawali and Balakrishnan 2008)	0,05	AS (4-12)	nylon	mesh	30	Aeration (kritische flux beïnvloed door beluchting: 3,9 l/m <sup>2</sup> .h bij 2,6 l/min en 14 l/m <sup>2</sup> .h bij 4,5 l/min)	7	0,9	9		Gemiddeld slechts 87% rejectie, pas na 95 van de 250 dagen 'volledige' solids rejection !	reductie SMP (not bound EPS) in duurtst itt bij MBR een toename, hetgeen lager risico op irreversibele fouling oplevert & geïlaag (SEM-analyse) bedekt slecht een kleine fractie van het oppervlak. Kritische flux sterk beïnvloedbaar met beluchting! Strategie is ontwerp doekfilter op waarde lager dan kritische flux waardoor minimalisatie van terugspoelbehoefte !
(Jeison et al. 2008)	Sub-merged 0, 0094-0,0188 m <sup>2</sup> en externe module vlakke plaat 0,0292 m <sup>2</sup>	anaeroob MBR-slib (7-25)	non-woven spacer materiaal & PE	non-woven & mesh	non-woven: appr. 30 en mesh: 15 en 20 (> 60 siechte koekopbouw, < 10 te hoge weerstand)	biogas & biogas	15, 10 en 25 dagen, echter geen stabiele flux	3 (@ non-woven, sub-merged, 55°C, 7 g/l) en 0,5-3 (@ mesh, 30°C, 17-25 g/l, external & sub-merged)	> 100	20		kleine vlogrootte (kleiner dan poriegrootte) en andere vlok morfologie leidt kennelijk tot sterke filtratieweerstand. (slibentitie met parallel membraan, dus geen selectie met het doek op geschikte vlogrootte)

ref.nr.	schaalgrootte	Gefiltreerde medium*	Materiaal**	weef-type	porie-grootte	Flux-beheersing	Onderzoeks-duur bij stabiele flux	stabile flux-range	TMD	effluent-kwaliteit	kansen	bedreigingen
Eenheid	m <sup>2</sup>	g/l		mu			dagen	l/m <sup>2</sup> .uur	cm H <sub>2</sub> O	mg/l		
(Chu et al. 2008)	0,084	AS (11 g/l) + diatomite (SiO <sub>2</sub> : 10 g/l)	staal	mesh	74	lucht back-wash (18,58 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *uur; 10 kPa; 2 min)	tot 250 uur	8,6-130	tot 40 kPa	0 (NTU 0,39-0,73)	hoge flux met regelmatig een korte (2 min.) backflush	lage flux zonder frequente backflush geeft adhesie & groei micro-organismen die moeilijk te verwijderen zijn
(Liu et al. 2009)	0,1	AS (7.5)	zijde	mesh-lijke	100	langs-stroming en intermitterend met lucht	25 uur (dynamisch proces)	4-10		troebel-heid op t = 0, 1, 2, 4, 8, 12, 25 uur via 78, 20, 16, 5, 2,5, 2,1 en 2,0 NTU	divv juiste instelling cross-flow-snelheid (boundary layer) wordt hypothetisch gestuurd op intact houden van de separation layer en minimalisatie van de fouling layer (geen onderbouwing uit onderzoek !)	hypothetisch van aard want het fitten van beperkte data met een formule levert geen fenomenologisch bewijs over optreden van vier (!) mechanismen van opbouw van een dynamisch membraan.
(Ren et al. 2010)	0,29	AS (3-12)	PE (710 g/m <sup>2</sup> , 4 mm dik)	non-woven	100	Beluchting langs de wand	167 (62 d bij J=4, 36 d bij J=4,8 en 67 d bij J=6 l/m <sup>2</sup> .uur)	4 - 4,8 en 6,0	dicht bij 0	5 a 10	zuurstofdeling over het dynamisch membraan van gemiddeld 3,6 naar 0,25 mg/L: denitrificatie & alkaliteitsbesparing	
(Wang et al. 2010)	0,05	AS (5) en BSA (als modelwit m.b.t. precipitatie & fouling)	Materiaal niet genoemd, wel coating met chitosan	non-woven	0,5 (150 kDa)	3 minuten operatoneel, 1 minuut pauze	niet genoemd	20		< 0,3 NTU	verlagen hydrofobiciteit van oppervlakte en porien verlaagt EPS-fouling en daarmee irreversible fouling	
(Chu et al. 2010)	0,046	Micropoluted oppervlakte water (MLSS 12 g/l; diatomite (SiO <sub>2</sub> ) 8 g/l)	staal	mesh	74	lucht back-wash (7,2 l/m <sup>2</sup> *s; 20 kPa; 2 s)	40	50	tot 40 kPa	0 (NTU 0,26-0,43)	effluent van Chinees drinkwaterkwaliteit	
Daamen ongepubliceerd	0,006	AS (2-5)	PP	woven (multi-filament)	< 10	Beluchting onder filter en terugspoelen met filtraat	0,3	100-900	8 - 20	< 6 NTU	terugspoelen leidt tot sterk verhoogde fluxen, gebruik van multifilamente weefsels leiden na terugspoelen al snel tot zeer goede filtraatkwaliteit	nog geen duurtesten uitgevoerd

\* AS = actief slijb \*\* PP = polypropylene; PE = polyester \*\*\* F = Langsstroming; A = Lucht; P = terugpulsen; C = chemisch

