

# **„Chemikalienfreier Betrieb von getauchten Modul- systemen in der Abwasserbehandlung durch Fou- lingvermeidung mittels Wirbelschichttechnologie**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 27171/02-23 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Verfasser: Frank Peter Helmus  
Sandra Rosenberger  
Andreas Bareth  
Ulrich Meyer-Blumenroth

Wiesbaden, 28.03.2014

## Eckdaten des Projekts

### **Dauer des Gesamt-Projektes**

4 Jahre

Beginn: 01.09.2009

Ende: 31.12.2013

### **Dauer der 3. Förderphase**

1 Jahr (plus 1 Monat kostenneutrale Verlängerung)

Beginn: 01.12.2012

Ende: 31.12.2013

### **Projektkosten 3. Förderphase**

Projektkosten: 265.066 €

Eigenanteil: 127.786 €

Fördersumme: 127.280 €

### **Antragssteller**

Microdyn-Nadir GmbH  
Kasteler Straße 45  
65203 Wiesbaden

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Ulrich Meyer-Blumenroth (Geschäftsführer)

M. Eng. Andreas Bareth (Projektleitung)

E-Mail: [a.bareth@microdyn-nadir.de](mailto:a.bareth@microdyn-nadir.de)

Tel.: 0611/962-5579

### **Kooperationspartner**

Hochschule Osnabrück  
Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik  
Albrechtstraße 30  
49076 Osnabrück

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Frank Peter Helmus

E-Mail: [f.helmus@hs-osnabrueck.de](mailto:f.helmus@hs-osnabrueck.de)

Tel.: 0541/969-3936

Prof. Dr.-Ing. Sandra Rosenberger

E-Mail: [s.rosenberger@hs-osnabrueck.de](mailto:s.rosenberger@hs-osnabrueck.de)

Tel.: 0541/969-2957

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>7</b>
<b>2 Material und Methoden .....</b>	<b>8</b>
2.1 MBR-Pilotanlage .....	8
2.2 Membranmodule .....	9
2.3 Wirbelgut und Spaltsieb .....	10
2.4 Analytik .....	12
<b>3 Projektergebnisse .....</b>	<b>15</b>
3.1 Betriebsergebnisse der Pilotanlage – Biologische Parameter.....	16
3.2 Charakterisierung des Belebtschlammes der Pilotanlagen .....	19
3.3 Betriebsergebnisse der Pilotanlage – Permeabilität und Membranfouling .....	21
3.4 Entwicklung einer Indikatormethode zur Membranintegrität (Arbeitspaket 3).....	30
3.5 Auswirkungen von MCP auf die eingesetzten Membranen.....	33
3.6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	41
<b>4 Fazit.....</b>	<b>46</b>
<b>5 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>48</b>
<b>6 Anhang.....</b>	<b>49</b>
<b>Anhang 1.....</b>	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ansicht der beiden Container der Pilotanlage auf dem Gelände der Kläranlage Eversburg in Osnabrück.....	8
Abb. 2: Verfahrensfliessbild der Pilotanlage Osnabrück-Eversburg .....	9
Abb. 3: REM-Aufnahmen der Ausgangsmembran UP150 (links) und der neu entwickelten Membran MBR016(rechts) .....	10
Abb. 4: Elastollan®, ø: 4 mm .....	10
Abb. 5: Foto des eingesetzten Spaltsiebess.....	11
Abb. 6: Verlauf des TS-Gehalts in der Nitrifikationsstufe (B02) der Pilotanlage .....	16
Abb. 7: CSB-Werte im Zulauf der Kläranlage Eversburg und im Permeat der Pilotanlage ....	17
Abb. 8: Ammoniumkonzentration im Zulauf der KA Eversburg und im Permeat der Pilotanlage .....	18
Abb. 9: NO <sub>3</sub> -N im Permeat der Pilotanlage.....	19
Abb. 10: Mikroskopisches Bild KA Eversburg (links) und der MBR-Pilotanlage (rechts) .....	19
Abb. 11: Darstellung der Konzentration an Polysacchariden und Proteinen in der flüssigen Phase des Belebtschlammes .....	20
Abb. 12: Fließkurve von Belebtschlamm (TS = 10,35 g/l) unter Variation des Schergeschwindigkeitsbereiches.....	21
Abb. 13: Temperaturkorrigierte Permeabilitäten (Schlamm) für MT1+MT2 (UP150) und MT3+MT4 (MBR016) vom 10.08.11 – 07.11.13.....	22
Abb. 14: Temperaturkorrigierte Permeabilitäten (Schlamm) für MT1+MT2 (UP150) und MT3+MT4 (MBR016) vom 10.08.11 – 06.02.12; Anlaufprozess; Membran Set 2 .....	23
Abb. 15: T. korrigierte Permeabilitäten (Schlamm)für MT1+MT2 (UP150) und MT3+MT4 (MBR016) vom 07.03.12 – 15.08.12; Beladung: 9,6 kg <sub>Granulat</sub> /m <sup>3</sup> <sub>Belebtschlamm</sub> .....	24
Abb. 16: T. korrigierte Permeabilitäten normiert (Schlamm) für MT1+MT2 (UP150) und MT3+MT4 (MBR016) vom 07.03.12 – 05.07.12; Beladung:9,6 kg <sub>Granulat</sub> /m <sup>3</sup> <sub>Belebtschlamm</sub> .....	25
Abb. 17: Temperaturkorrigierte, bezogene Permeabilitäten (oben), Flux Q (Mitte) und die kumulierte NaOCl-Belastung (unten) für MT1+MT2 (UP150) und MT3+MT4 (MBR016) vom 13.03.13 – 08.11.2013 bei einer Beladung:15 kg <sub>Granulat</sub> /m <sup>3</sup> <sub>Belebtschlamm</sub> .....	26
Abb. 18: High-Speed-Protokolle von MT1 – MT4 (jeweils ein Arbeitszyklus) .....	28
Abb. 19: Durchschnittliche tägliche Abnahme der Permeabilität bei unterschiedlichen Flüssen; *bei einer Belüftungsrate von 20 m <sup>3</sup> /h anstatt der Standard-Vorgabe von 30 m <sup>3</sup> /h .	29

---

Abb. 20: Trübung des Permeatmix aus allen vier Membranstraßen.....	30
Abb. 21: Rückhalt von intestinalen Enterokokken und Escherichia coli der einzelnen Membranstraßen in koloniebildende Einheit (KBE) pro 100 ml .....	32
Abb. 22: Probennahmestellen an den Membrantaschen .....	34
Abb. 23: Reinwasserpermeabilität der gebrauchten Membranen.....	35
Abb. 24: Porengrößen der gebrauchten Membranen; mean flow pore size (mittlere Pore) bestimmt mittels Kapillarfluss-Porometrie (POROLUX 1000).....	35
Abb. 25: REM Oberfläche UP150 (links) und MBR016 (rechts) ohne MCP – Kassette 1 .....	37
Abb. 26: REM Oberfläche UP150 (links) und MBR016 (rechts) mit MCP – Kassette 1 .....	37
Abb. 27: REM Oberfläche UP150 (links) und MBR016 (rechts) mit MCP – Kassette 2 .....	37
Abb. 28: REM Querschnitt, Module ohne MCP, Kassette 1: UP150 links, MBR016 rechts ...	38
Abb. 29: REM Querschnitt, Module mit MCP, Kassette 1: UP150 links, MBR016 rechts .....	38
Abb. 30: REM Querschnitt, Module mit MCP, Kassette 2: UP150 links, MBR016 rechts (Änderung der Skala beachten) .....	38
Abb. 31: Ansicht von oben auf Membranmodule .....	40
Abb. 32: Betriebskostenvergleich .....	45

---

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Analytikplan .....	12
Tab. 2: Auflistung der verwendeten LCK-Schnelltests mit Probenvorbehandlung, Messbereich und Produktbezeichnung .....	13
Tab. 3: Einstufung von Badegewässern (Binnengewässer) .....	13
Tab. 4: Übersicht über das Versuchsvorhaben .....	15

## Zusammenfassung

Im Rahmen des insgesamt dreiphasigen Projekts konnte das Wirbelschichtverfahren erfolgreich in das getauchte MBR Verfahren implementiert werden. Zunächst wurde gemeinsam mit der Firma BASF Polyurethanes ein speziell für diesen Einsatzzweck geeignetes und wirtschaftlich sinnvolles Granulat entwickelt. Als zuverlässiges Rückhaltesystem der Granulate hat sich ein belüftetes Spaltsieb erwiesen. Dieses Sieb kann aufgrund seiner geringen erforderlichen Siebfläche leicht auch in bestehenden Anlagen nachgerüstet werden.

Regelmäßige Kontrollen der Granulatbeladung zeigen den stabilen Wirbelschichtbetrieb. Auch nach Betriebspausen lassen sich die Granulate gut aufwirbeln. Langzeituntersuchungen mit der im Projekt entwickelten, verschleißresistenten Membran liefen über 27 Monate. Hierzu wurden in einer MBR Pilotanlage vier konventionelle MBR-Module mit je 50m<sup>2</sup> Membranfläche parallel betrieben. Zwei Module waren mit der Standard-Membran und zwei Module mit der neu entwickelten Membran bestückt. Jeweils ein Modul wurde mit Wirbelschicht betrieben. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Wirbelschicht im Gegensatz zum konventionellen Verfahren über mehrere Monate ein Betrieb ohne chemische Reinigung möglich ist. Es stellte sich jedoch heraus, dass ein vollständiger Verzicht auf chemische Reinigungen nicht realisierbar ist. Deshalb wurde in der letzten Projektphase ein chemikalienreduzierter Betrieb geprüft. Trotz der halbierten Reinigungshäufigkeit konnte bei den Wirbelschichtstraßen ein dauerhafter Betrieb gewährleistet werden. Im Wirbelschichtbetrieb stieg die Permeabilität nach Reinigungen weniger stark an, aber auch zwischen den Reinigungsintervallen fiel sie weniger stark ab. Die neue Betriebsweise zeigt im Vergleich zum konventionellen Verfahren damit einen gleichmäßigeren Permeabilitätsverlauf. Auswirkungen der Wirbelschicht auf die Belebtschlammigenschaften konnten im Rahmen des Projekts nicht festgestellt werden.

Für die Bewertung der Membranintegrität wurde die praxisorientierte Methode über die Bewertung der Ablaufqualität gewählt. Hierbei ist für kommunale MBR-Anlagen die EU-Badegewässerrichtlinie mit der Bestimmung der intestinalen Enterokokken und E. coli relevant. Die Standard-Membran zeigte mit Granulat erhöhte Mengen an Mikroorganismen im Ablauf. Die erhöhten Werte wurden durch eine extrem ungleichmäßige Durchströmung der mit Granulat betriebenen Module verursacht, was zu einer einseitigen Belastung der Membranfläche und zu starkem Abrieb an der Membranoberfläche führte. Bei der neu entwickelten Membran konnten auch unter den extremen Umständen keine Unterschiede zwischen dem Betrieb mit und ohne Granulat ermittelt werden. Die neue Membran zeigt ebenfalls deutliche Veränderungen, diese wirken sich bedingt durch den strukturellen Aufbau aber nicht auf die Ablaufqualität aus.

Ökologisch betrachtet bietet das Wirbelschichtverfahren einen deutlichen Vorteil gegenüber dem konventionellen Verfahren. Unter denselben Randbedingungen konnte mit der zirkulierenden Wirbelschicht trotz der nicht vollständig erreichten Ziele ein langfristiger Betrieb mit 50% weniger Chemikalien realisiert werden. Die zusätzlichen Betriebskosten für den Wirbelschichtbetrieb werden durch den verringerten Chemikalienbedarf kompensiert. Unter Um-

ständen ist es wirtschaftlich wesentlich interessanter der Reduzierung des Chemikalienverbrauch eine Erhöhung der spezifischen Permeatflüsse und somit eine Reduzierung der Membranfläche vorzuziehen. Die Verringerung der Membranfläche reduziert sowohl Investitions- als auch Betriebskosten.

In der Gesamtbetrachtung konnte das Ziel eines komplett chemikalienfreien Betriebs nicht erreicht werden. Dahingegen zeigt das neue Verfahren in Verbindung mit der neu entwickelten Membran großes Chemikalien-Reduzierungspotenzial und die Möglichkeit, höhere spezifische Permeatflüsse zu realisieren. Für weitergehende Untersuchungen muss speziell auf die Moduldurchströmung und somit auf die Modulaufstellung und Anordnung im Becken geachtet werden. Bei Beachtung einer gleichmäßigen Modulanströmung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit noch weiteres Reduzierungspotenzial vorhanden.

Das Vorhaben wurden von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Az:27171/02) gefördert. Kooperationspartnern war die Hochschule Osnabrück.

## 1 Einleitung

Das wesentliche Ziel dieses Projektes lag in einem langfristig chemikalienfreien Betrieb von MBR-Anlagen zur Abwasseraufbereitung mit getauchten Modulsystemen. Dieses Ziel sollte durch den optimierten Einsatz der Wirbelschichttechnologie in verschleißmodifizierten Membraneinheiten erreicht werden. Die Untersuchung gliederte sich in drei Förderzeiträume. Die Zwischenberichte der ersten beiden Förderzeiträume liegen vor und beziehen sich vorwiegend auf die technologische Entwicklung und die Verfahrensoptimierung.

Im dritten Förderzeitraum ist der langfristige Einsatz der Technologie unter den beiden Prozessvarianten „möglichst kompletter Verzicht auf chemische Reinigung“ und „begleitende chemische Reinigung bei deutlicher Reduzierung des Chemikalieneinsatzes“ untersucht worden. Die Untersuchungen erfolgten an einer großtechnischen Pilotanlage. Diese ist mit kommerziell verfügbaren Membranmodulen der Firma MICRODYN-NADIR bestückt und innerhalb einer Kläranlage aufgestellt und betrieben.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 MBR-Pilotanlage

Die Langzeituntersuchungen zum entwickelten MCP-Verfahren (MCP - mechanical cleaning process) wurden an einer Pilotanlage auf dem Gelände der Kläranlage Eversburg der Stadtwerke Osnabrück durchgeführt (vgl. Abb. 1).



**Abb. 1: Ansicht der beiden Container der Pilotanlage auf dem Gelände der Kläranlage Eversburg in Osnabrück**

Die Pilotanlage bildet eine bis auf die Vorbehandlung eigenständige MBR-Anlage mit vier getauchten und in separaten Modultanks aufgestellten Plattenmodulen des Typs BIO-CEL<sup>®</sup> BC50 ab. Die Plattenmodule weisen eine aktive Membranfläche von je 50 m<sup>2</sup> auf, was bei einem eingestellten Permeatfluss von 15 L/m<sup>2</sup> h eine Permeatmenge von 0,75 m<sup>3</sup>/h je Modul und somit eine Gesamtpermeatmenge von 3 m<sup>3</sup>/h für die Pilotanlage ergibt. Beim Zulauf der Pilotanlage handelt es sich um vorbehandeltes Abwasser der Kläranlage Eversburg. Die Modultanks weisen einen Inhalt von je 2 m<sup>3</sup> auf, wodurch sich ein Gesamtvolumen der Anlage von ca. 20 m<sup>3</sup> ergibt. Daraus resultiert eine hydraulische Verweilzeit von ca. 7 h. Der TS-Gehalt wurde über den gesamten Anlagenbetrieb in Phase 3 auf ca. 10 g/l eingestellt. Damit lag die Schlammbelastung bei ca. 0,1 kg CSB/kg TS/d und die Raumbelastung bei ca. 1,2 kg CSB/m<sup>3</sup>/d.

Das Verfahrensfliessbild der Anlage findet sich in Abb. 2. Zur detaillierten Beschreibung der Versuchsanlage sei auf den Abschlussbericht der Phasen 1 und 2 verwiesen.

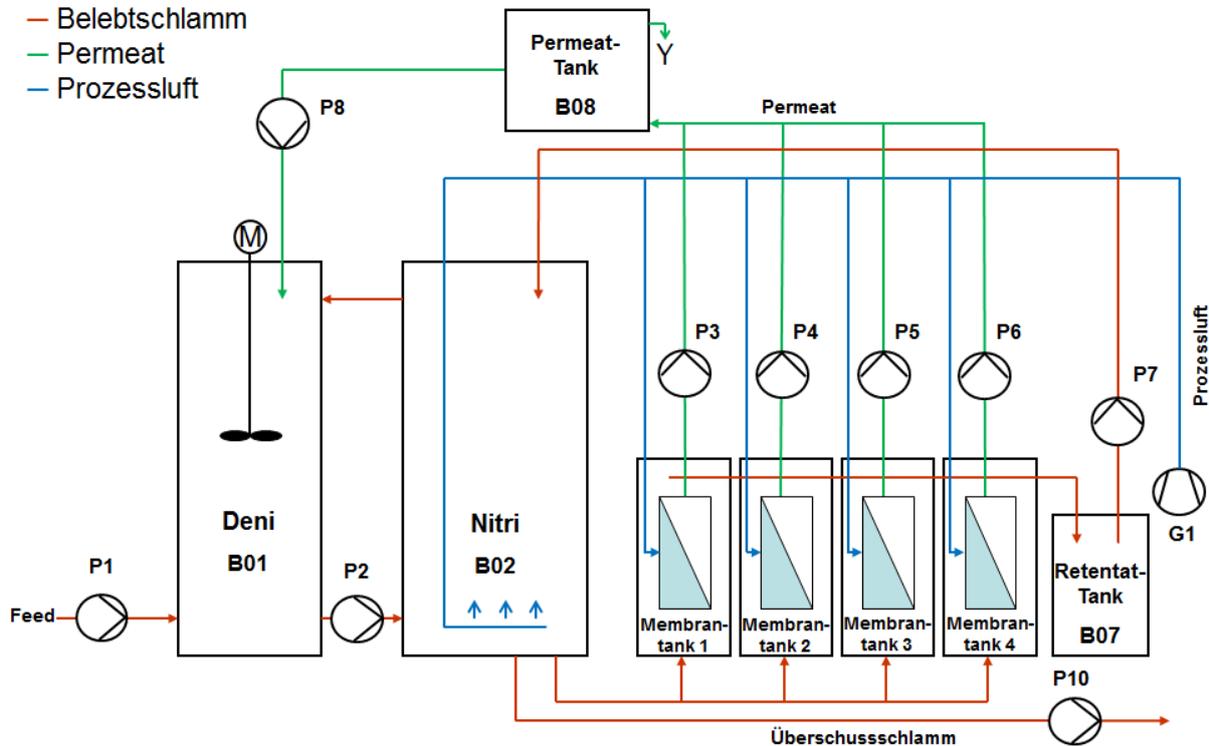


Abb. 2: Verfahrensfließbild der Pilotanlage Osnabrück-Eversburg

## 2.2 Membranmodule

Jeder Membrantank ist mit einem BC50 Membranmodul mit jeweils 50 m<sup>2</sup> Membranfläche ausgestattet. In den Membrantanks MT1 und MT2 kommen die durch MICRODYN-NADIR standardmäßig verwendeten Ultrafiltrationsmembranen UP150 zum Einsatz. In den Membrantanks MT3 und MT4 sind die im Rahmen des Projektes neu entwickelten Mikrofiltrationsmembranen (siehe Projektbericht zum Abschluss der Phase 2) integriert.

Bei der Standardmembran UP150 handelt es sich um eine asymmetrische Membran, siehe Abb. 3. Die Membran besitzt eine dünne trennaktive Schicht von zum Teil weniger als 0,5 µm auf welche eine stark asymmetrische Struktur folgt. Diese so genannte Trägerstruktur weist große Hohlräume auf, die sich zum Trägervlies hin aufweiten. Durch die Granulate kann diese Trennschicht wie in der ersten Projektphase dargestellt beschädigt werden.

Die neu entwickelte Membran mit einer mittleren Porengröße von 0,16 µm liegt im Mikrofiltrationsbereich und ist deutlich symmetrischer aufgebaut (s. Abb. 3). Die neuentwickelte Membran ist durch ihre Struktur deutlich verschleißresistenter. Zum Herstellungsprozess und Auswahlverfahren sei auf den Abschlussbericht aus Phase 2 hingewiesen.

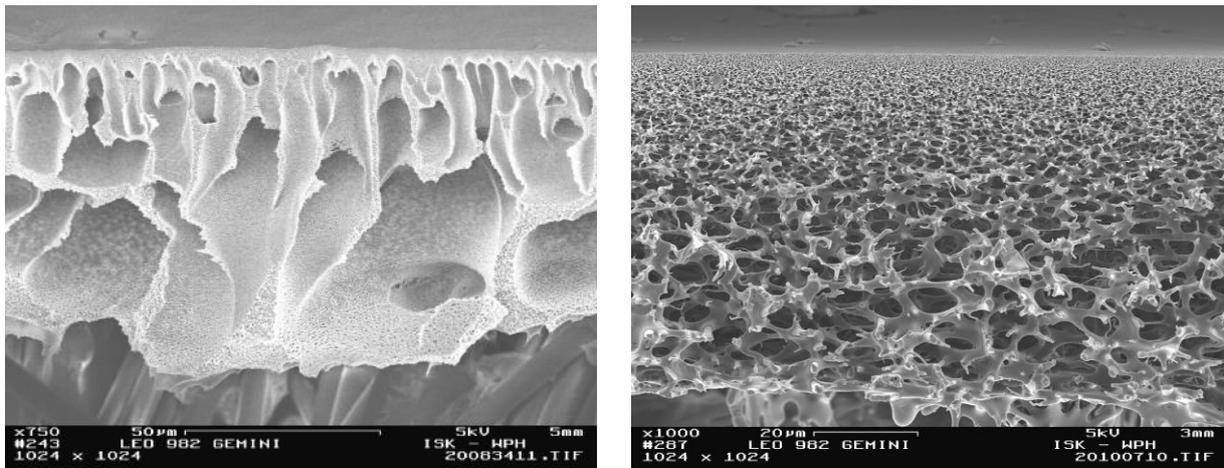


Abb. 3: REM-Aufnahmen der Ausgangsmembran UP150 (links) und der neu entwickelten Membran MBR016(rechts)

### 2.3 Wirbelgut und Spaltsieb

In Zusammenarbeit mit der BASF Polyurethanes wurde ein speziell für dieses Projekt optimiertes thermoplastisches Polyurethan (Elastollan<sup>®</sup>) entwickelt. Durch Verwendung von Polyether als Blockcopolymer und Zugabe von Füllstoffen ließ sich eine hohe Hydrolysebeständigkeit bei Einhaltung der gewünschten Parameter, einer mittleren Korngröße von 4 mm und einer Dichte von 1,04 kg/L, einstellen. In Abb. 4 ist das entwickelte Granulat dargestellt. Es zeigt sehr gute Benetzungseigenschaften und lässt sich sehr gut aufwirbeln. Die hervorragenden Eigenschaften des Elastollan kombiniert mit der, hinsichtlich Abtrennung, ausreichenden Partikelgröße führten dazu, dass dieses Granulat für den großtechnischen Einsatz ausgewählt wurde.



Abb. 4: Elastollan<sup>®</sup>,  $\varnothing$ : 4 mm

Da sowohl statische Filtersysteme als auch sedimentationsbetriebene Rückhaltesysteme als potentiell Granulatrückhaltesystem im rheologisch komplexen Medium Belebtschlamm ausgeschlossen werden konnten, wurde abschließend eine belüftete Spaltsiebkonstruktion (vgl. Abb. 4) entwickelt. Bei dem Spaltsieb handelt es sich um eine Kastenkonstruktion, in der ein schräggestelltes Spaltsieb zur Rückhaltung von Granulaten dient. Eine Belüftungseinrichtung erzeugt im Strömungskanal kontinuierliche Strömungsturbulenzen an der Sieboberfläche, wodurch die Verblockung des Siebes verhindert wird. Das Spaltsieb ist derart konstruiert, dass der Belebtschlamm aus dem Strömungskanal in den MT zurückgeführt wird, sobald das Spaltsieb überströmt worden ist.



**Abb. 5: Foto des eingesetzten Spaltsiebes**

## 2.4 Analytik

In Tabelle 1 ist der Analytikplan des Projektes dargestellt. Die Analytik erfolgt sowohl im Labor für Verfahrenstechnik der Hochschule Osnabrück als auch im Labor der Kläranlage Eversburg.

Tab. 1: Analytikplan

	Messgröße	Messhäufigkeit
a.	TS und Glühverlust Nitrifikation	5x/Woche
	TS in allen Kammern	2x/Woche
b.	CSB (Permeat, Belebtschlamm, Feed)	2x/Woche
c.	NH <sub>4</sub> -N (Permeat)	2x/Woche
d.	EPS (Feed, BO <sub>2</sub> , KABB, MTs, Permeat)	2x/Woche
e.	Bakterienrückhalt der Membran	1x/Monat
f.	Viskosität des Belebtschlammes	2x/Woche
g.	Trübung	Online
h.	TS (BO <sub>2</sub> , MT`s)	Online
i.	Transmembr. Druckdifferenz	Online
j.	Permeatvolumenstrom	Online
k.	Gelöstsauerstoff + Temperatur	Online
l.	NO <sub>x</sub>	Online

### a. Bestimmung des Trockensubstanzgehalts

Die Bestimmung des Trockensubstanzgehalts wurde nach DIN 38414 Teil 2 durchgeführt. Die Bestimmung des organischen und des mineralischen Anteils des Trockensubstanzgehalts erfolgte nach DIN 38414 Teil 3.

### b. + c. Nasschemische Analytik durch LCK-Schnelltests

Der Übersichtlichkeit halber sind in Tabelle 3 sämtliche LCK-Schnelltests mit entsprechenden Vorbehandlungsvarianten aufgeführt:

**Tab. 2: Auflistung der verwendeten LCK-Schnelltests mit Probenvorbereitung, Messbereich und Produktbezeichnung**

Parameter	Probenvorbereitung	Messbereich [mg/L]	Küvetten-Test (Hach Lange)
CSB	Homogenisieren	150 - 1000	LCK 114
CSB	-	15 - 150	LCK 314
Laton (N <sub>ges</sub> )	Homogenisieren, Filtrieren	20 – 100	LCK 338
		1 - 16	LCK 138
NH <sub>4</sub> -N	Homogenisieren, Verdün- nen, Filtrieren	2 - 47	LCK 303
		0,015 - 2	LCK 304
NO <sub>3</sub> -N	Verdünnung, Filtrieren	0,23 – 13,5	LCK 339
NO <sub>2</sub> -N	Filtrieren	0,015 – 0,6	LCK 341
PO <sub>4</sub> -P	Homogenisieren, Verdün- nen, Filtrieren	1,6 - 30	LCK 049
		0,03 – 1,5	LCK 349

#### **d. Bestimmung der EPS in der flüssigen Phase**

Die in der flüssigen Phase gelösten EPS wurden durch die Summenparameter Polysaccharide und Proteine ermittelt. Die Bestimmung der Polysaccharide wurde nach Dubois durchgeführt. Die Bestimmung der Proteine wird nach Lowry (modifiziert von Frølund et al. [1996]) durchgeführt.

#### **e. Bakterienrückhalt der Membran**

Beginnend mit September 2012 wurden Analysen nach EU-Richtlinie 2006/7/EG (Badege-  
wässerrichtlinie) bei der GUA Gesellschaft für Umweltanalytik GmbH (akkreditiertes Untersu-  
chungslabor) in Auftrag gegeben. Die geltenden Bewertungskriterien sind in Tab. 3 darge-  
stellt.

**Tab. 3: Einstufung von Badegewässern (Binnengewässer)**

Parameter	Ausgezeichnete Qualität	Gute Qualität	Ausreichende Qualität	Referenzanalyse- methoden
Intestinale Enterokokken (KBE/100 ml)	200	400	660	ISO 7899-1 oder ISO 7899-2
Escherichia coli (KBE/100 ml)	500	1 000	1800	ISO 9308-3

#### **f. Viskosität des Belebtschlammes**

Die rheologischen Untersuchungen wurden mit dem Rheometer MCR101 der Fa. Anton Paar, ausgestattet mit dem Doppelspaltmesssystem DG 26.7 durchgeführt.

#### **g. Trübung**

Die Trübung des Permeats (Mix aus allen vier Membranstraßen) wurde mit dem Trubimax W CUS31 der Firma Endress + Hauser online vermessen.

#### **h. TS**

Die Trockensubstanzkonzentration des Belebtschlammes in den Membranbehältern sowie im Behälter B02 wurde photometrisch über die Onlinesonde SOLITAX der Firma Dr Lange aufgenommen.

#### **i. Transmembrane Druckdifferenz**

Zur Bestimmung der Transmembranen Druckdifferenz der Membranstraßen waren in den jeweiligen Permeatleitungen Differenzdruckaufnehmer vom Typ PMC131-A11F1Q4K der Firma Endress + Hauser installiert. Es wurde alle 30 sec ein Messwert aufgenommen und über die SPS in einer fortlaufenden CSV-Datei dokumentiert.

#### **j. Permeatvolumenstrom**

Der Permeatvolumenstrom wurde über magnetisch-induktive Durchflussmesser vom Typ MIK-5NA50KL443Y der Firma Kobold aufgenommen, die analog zu den Druckaufnehmern in jeder Membranstraße verbaut sind.

Die Permeabilität wurde nach den im Abschlussbericht der Phasen 1 und 2 vorgestellten Verfahren aus den Messdaten für den Permeatvolumenstrom und der transmembranen Druckdifferenz ermittelt und auf 20°C normiert.

#### **k. Gelöster Sauerstoff + Temperatur**

Der gelöste Sauerstoff in der Deni- und Nitrifikation sowie die Temperatur in den beiden Behältern wurden vom Gerät Oxymax W COS41 der Firma Endress + Hauser erfasst.

#### **l. NO<sub>x</sub>**

Zur Messung der Konzentration der Gesamtstickstoffe (NO<sub>x</sub>) war im Permeatbehälter die Onlinesonde NITRATAX der Firma Dr. Lange installiert.

### 3 Projektergebnisse

Zur besseren Übersicht sind in Tabelle 4 zunächst die Zeiträume der wesentlichen Projektphasen mit ihrem Bearbeitungsstand dargestellt.

**Tab. 4: Übersicht über das Versuchsvorhaben**

Aktivität	Status
Planung, Konstruktion, Beschaffung und Montage	erfolgreich abgeschlossen
Inbetriebsetzung und Optimierung	erfolgreich abgeschlossen
Arbeitspaket 0: Entwicklung eines Partikelrückhaltesystems	erfolgreich abgeschlossen
Arbeitspaket 1: - Material und Geometrie des Wirbelguts - Geometrie in der MBR-Kammer - Betriebsbedingungen	erfolgreich abgeschlossen
Arbeitspaket 2: - Beobachtung des Foulingverhaltens - Viskositätsuntersuchungen	erfolgreich abgeschlossen
Arbeitspaket 3: - Entwicklung einer Indikatormethode	mit Abstrichen abgeschlossen
Arbeitspaket 4: - Entwicklung stressresistenter Membraneinheiten - Einsatz der stressresistenten Membraneinheiten	erfolgreich abgeschlossen
Arbeitspaket 5: - Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	abgeschlossen

Im Folgenden werden im Wesentlichen die für die 3. Phase (01.09.2012 – 31.12.2013) relevanten Ergebnisse dargestellt. Der Verlängerungszeitraum wurde zur Betrachtung der folgenden Fragestellungen bewilligt:

1. Wie wirkt sich der Einsatz von MCP auf das Langzeitpermeabilitätsverhalten aus?
2. Wie ist die Leistungsfähigkeit der neu entwickelten Membranen und wie wirkt sich der Einsatz von MCP langfristig auf die Membranen aus?
3. Feasibility Study

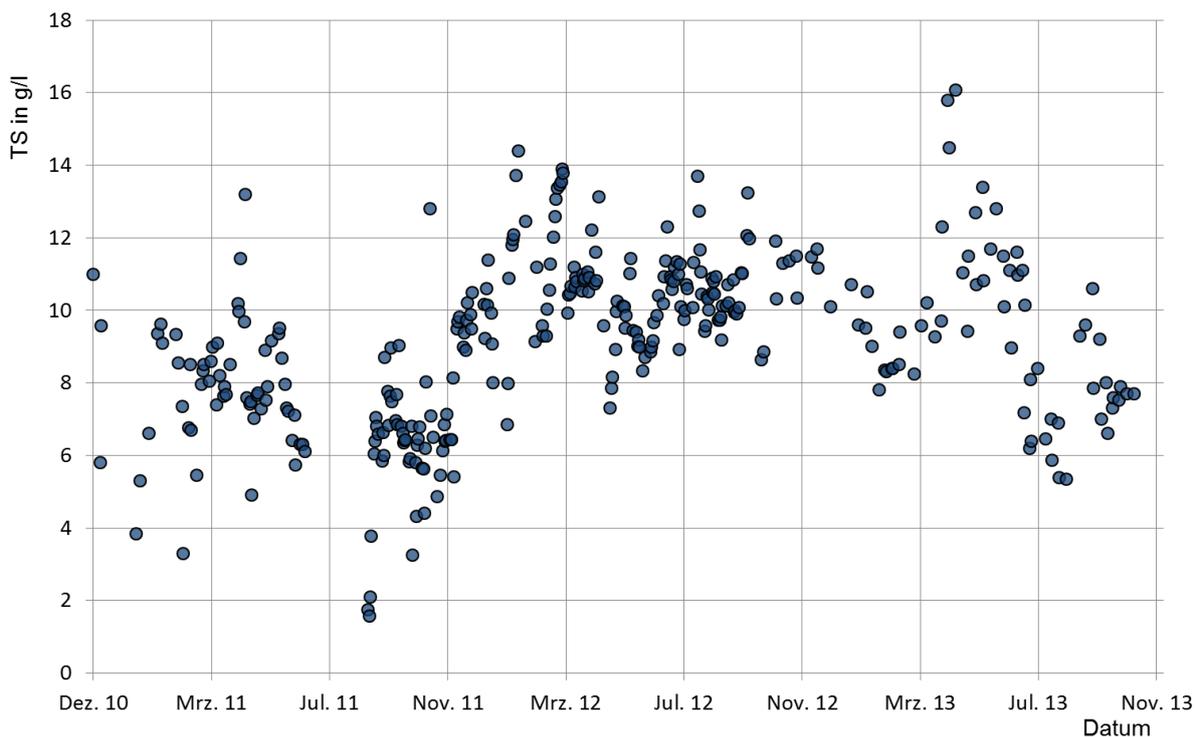
Für die vollständige Ergebnisdarstellung des Forschungsprojektes sei ebenfalls auf den Projektbericht der vorherigen Phasen vom 20.08.2013 verwiesen.

### 3.1 Betriebsergebnisse der Pilotanlage – Biologische Parameter

Im Laufe der dritten Versuchsphase wurden u.a. die Permeatvolumenströme variiert, um Peakflüsse bei Regenereignissen simulieren zu können und die hydraulische Belastungsgrenze des MCP-Systems ermitteln zu können. Seit Februar 2012 wurde teilweise Permeat innerhalb der Anlage rezirkuliert. Die hydraulische Verweilzeit (HRT) in der Anlage lag im Mittel bei 0,45 d und die Raumbelastung ( $B_R$ ) bei 1,2 kg CSB/m<sup>3</sup>/d.

#### Trockensubstanzgehalt

Abb. 6 zeigt den Verlauf des TS-Gehalts in der Nitrifikationsstufe seit Betriebsbeginn der Pilotanlage. Der angestrebte Trockensubstanzgehalt liegt bei 10 g/L, was aufgrund von Zulaufschwankungen und besonders in der ersten Betriebsphase auch aufgrund von Anlagen- ausfällen mit einhergehenden Biomasseverlusten nicht immer eingehalten werden konnte. Der Glühverlust der Pilotanlage hat sich um einen Mittelwert von 75 % eingependelt.

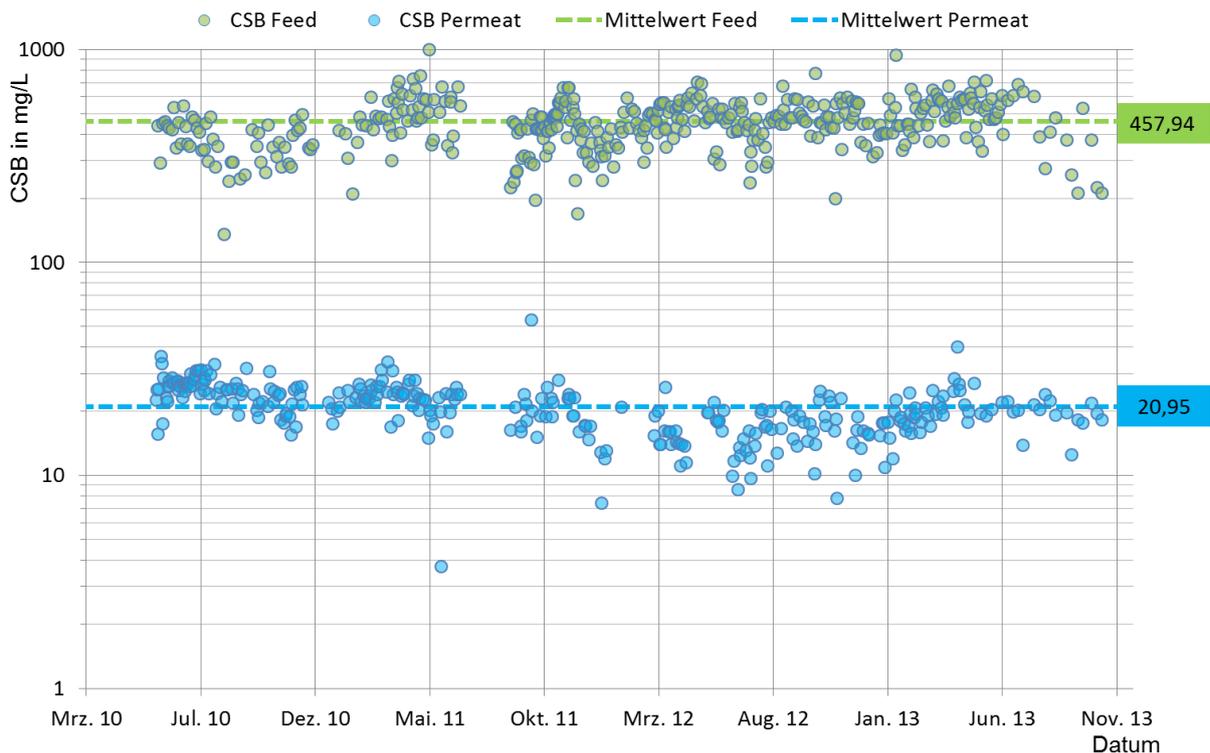


**Abb. 6: Verlauf des TS-Gehalts in der Nitrifikationsstufe (B02) der Pilotanlage**

Der TS-Gehalt in den vier Membrankammern liegt um ca. 20 % über dem TS-Gehalt in der Nitrifikationsstufe der Pilotanlage. Dieser Wert entspricht dem internen Rezirkulationsverhältnis von 5:1.

## Abbau organischer Substanzen – CSB

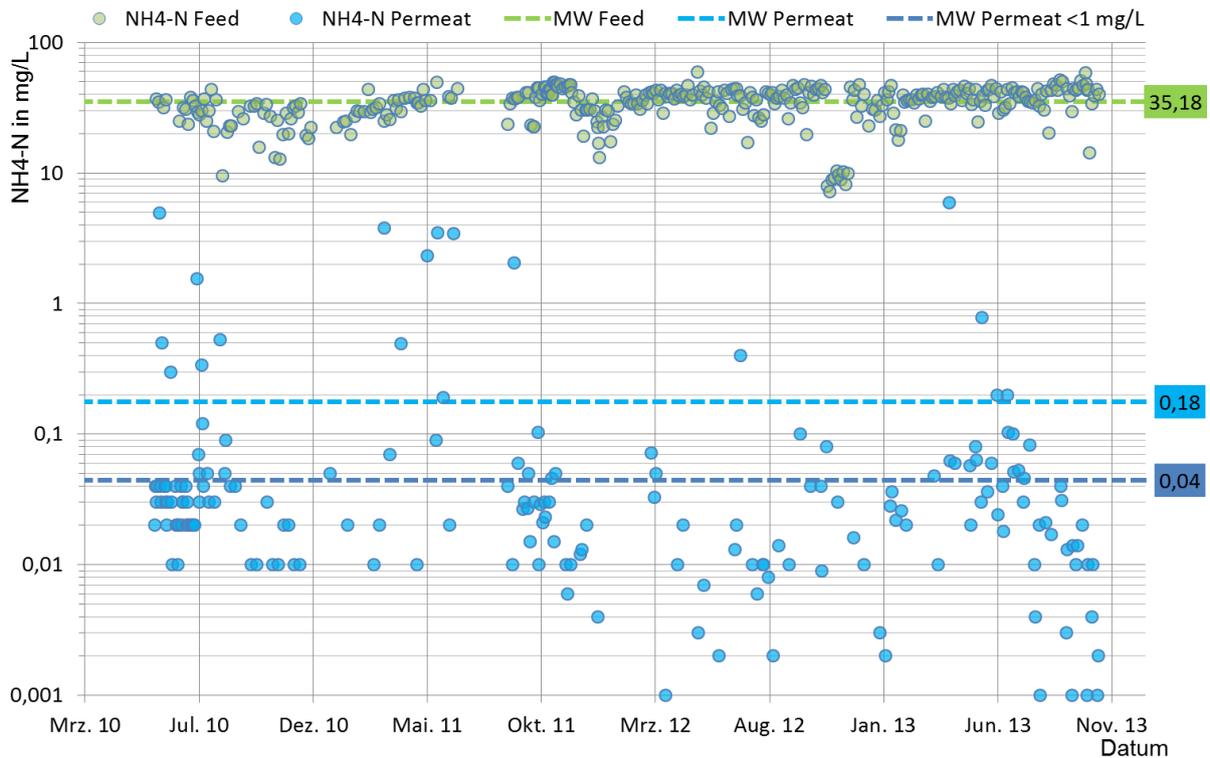
Die Pilotanlage zeigt über den gesamten Versuchszeitraum einen sehr guten Abbaugrad organischer Substanzen. Bei einer mittleren CSB-Zulaufkonzentration von 458 mg/L lag die CSB-Ablaufkonzentration im Mittel bei 21 mg/L. In der dritten Versuchsphase lagen die Ablaufkonzentrationen trotz teilweise deutlich höherer Zulaufkonzentrationen stabil um 20 mg/L. Der Abbau organischer Substanzen ist damit über den betrachteten Langzeitbetrieb von 3 ½ Jahren stabil.



**Abb. 7: CSB-Werte im Zulauf der Kläranlage Eversburg und im Permeat der Pilotanlage**

## Abbau von Stickstoffverbindungen – NH<sub>4</sub>-N

Ein ähnliches Bild ergibt sich beim Ammoniumgehalt (vgl. Abb. 8): die MBR-Versuchsanlage produziert ein Permeat mit niedrigem Ammoniumgehalt das vom Niveau her unter demjenigen des Ablaufs der konventionellen Kläranlage liegt. Bei der Mittelwertbildung werden zwei Kriterien herangezogen. Der erste Wert von 0,18 mg/L entspricht dem Mittel aller Messwerte. Für den zweiten Mittelwert wird davon ausgegangen, dass alle Messwerte >1 mg/L auf Betriebsstörungen oder Messfehler beruhen. Dadurch resultiert ein rechnerischer Mittelwert von 0,04 mg/L.



**Abb. 8: Ammoniumkonzentration im Zulauf der KA Eversburg und im Permeat der Pilotanlage**

Beim Nitrat ergibt sich ein gegenteiliges Bild. Das Konzentrationsniveau im Permeat der Pilotanlage liegt über demjenigen konventioneller Kläranlagen (vgl. Abb. 9). Mit dem in der Pilotanlage eingestellten Rezirkulationsverhältnis ist bei vorgeschalteter Denitrifikation theoretisch ein Stickstoffabbau von 76 % erreichbar. Dieser Wert wird nicht erreicht. Die Denitrifikation ist demnach unvollständig und prinzipiell optimierungsfähig.

Als Ursachen können die verhältnismäßig klein dimensionierte Denitrifikationsstufe oder Sauerstoffverschleppung aus den Membrankammern genannt werden. Da die Stickstoffelimination jedoch nicht im Fokus der Untersuchungen steht, wurde hier keine Optimierung vorgenommen.

Der Abbau von Stickstoffverbindungen ist damit über den betrachteten Langzeitbetrieb von 3 ½ Jahren stabil.

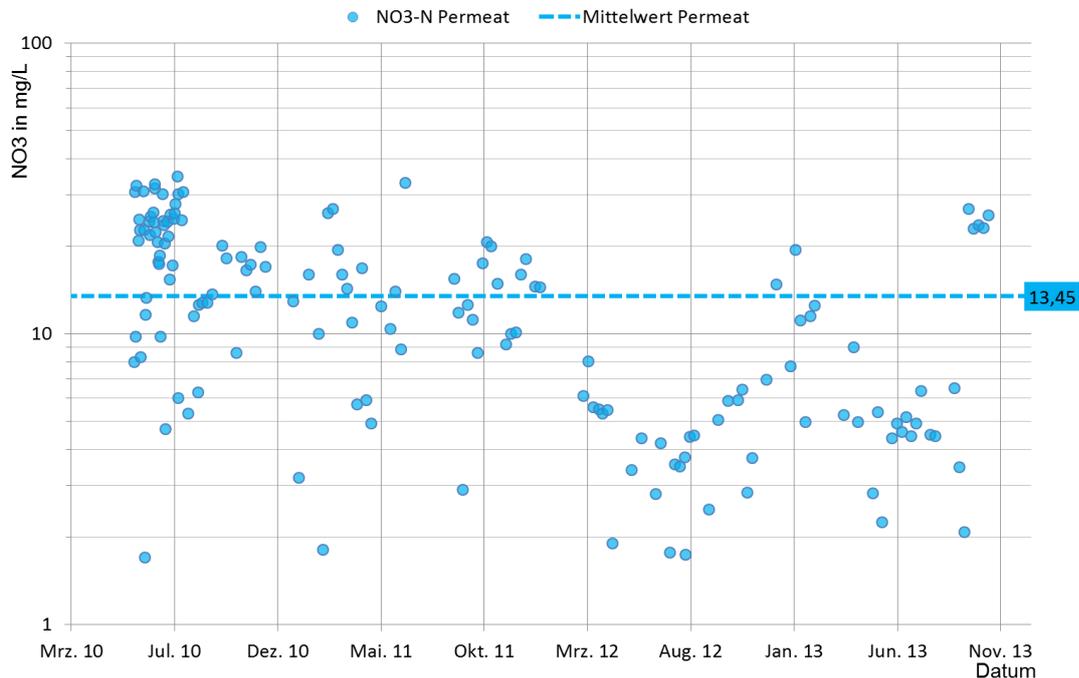


Abb. 9:  $\text{NO}_3\text{-N}$  im Permeat der Pilotanlage

### 3.2 Charakterisierung des Belebtschlammes der Pilotanlagen

#### Mikroskopisches Bild

Das mikroskopische Bild des Belebtschlammes zeigt eine für Membranbelebungsreaktoren übliche Struktur. Im Gegensatz zu der konventionellen Kläranlage Eversburg sind die Flocken im MBR weniger kompakt und deutlich homogener verteilt (vgl. Abb. 10). Zeitweilig traten in Verbindung mit Schwimmschlamm viele fädige Organismen auf. Diese können ursächlich aber nicht mit dem Betrieb der Wirbelschicht in Zusammenhang gebracht werden.

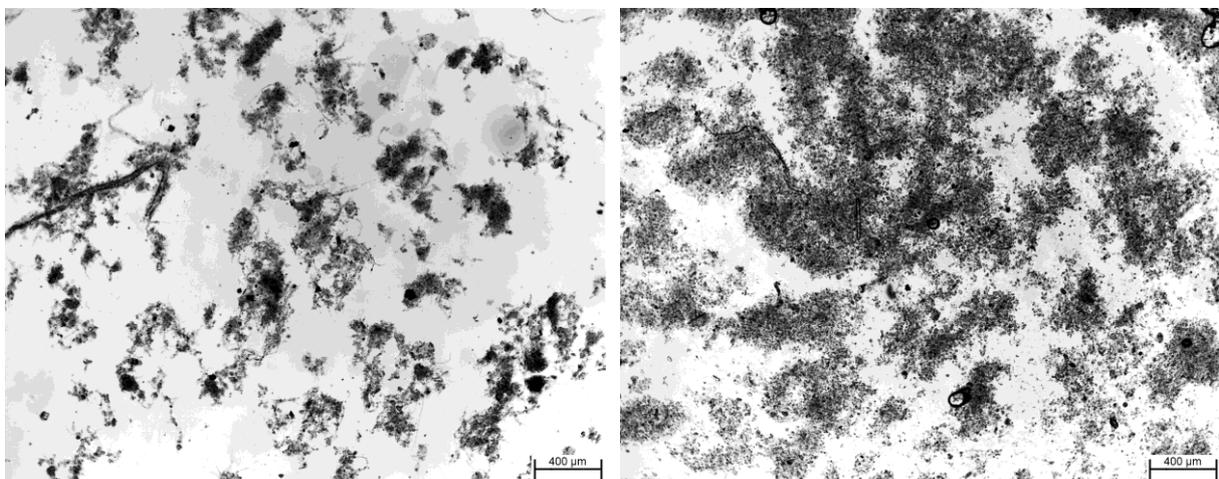
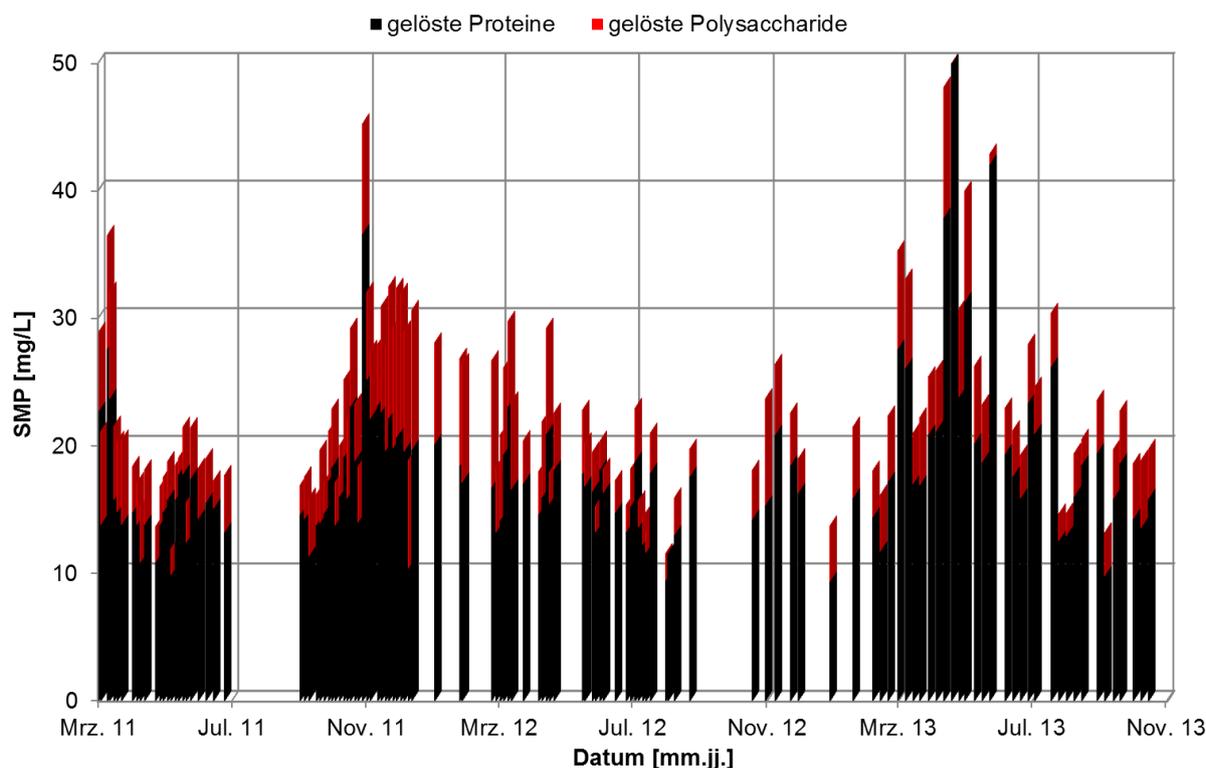


Abb. 10: Mikroskopisches Bild KA Eversburg (links) und der MBR-Pilotanlage (rechts)

## EPS in der flüssigen Phase

Die SMP-Konzentration im Permeat der Pilotanlage beträgt im Schnitt 11 mg/L. Dieser Wert liegt in der gleichen Größenordnung wie die SMP-Konzentration im Klarlauf und in der flüssigen Phase des Belebtschlammes der Kläranlage. Innerhalb der Pilotanlage ist in der flüssigen Phase des Belebtschlammes eine höhere Konzentration von ca. 20-25 mg/L zu erkennen. Der Anteil der Proteine beträgt im Mittel 78 % und der Polysaccharide folglich 22 %. Dieses Verhalten ist typisch für Membranbelebungsreaktoren und stellt keine Besonderheit des MCP-Verfahrens dar. Die SMP-Konzentration in den einzelnen Membrankammern ist unabhängig vom Betrieb mit und ohne Granulat identisch. Dieser Befund ist durch die hohe Zirkulationsrate und der damit verbundenen niedrigen Verweilzeit in den Membrankammern von ca. 25 min. auch zu erwarten. Im Langzeitbetrieb der Pilotanlage sind Schwankungen der Protein- und Polysaccharidkonzentrationen erkennbar. Es lässt sich aber keine Veränderung erkennen, die auf den Langzeiteinsatz von MCP zurückzuführen wäre.



**Abb. 11: Darstellung der Konzentration an Polysacchariden und Proteinen in der flüssigen Phase des Belebtschlammes**

## Rheologie

Der Belebtschlamm der Pilotanlage zeigt das für MBR-Belebtschlamm typische strukturviskose Verhalten. Die Viskosität des Belebtschlammes liegt bei einer Scherrate von  $100 \text{ s}^{-1}$  und einem TS-Gehalt von 10 g/L im Mittel bei 10 mPa s. Dies ist ein für Membranbelebungsanlagen typischer Wert. Auch in Bezug auf die Viskosität des Belebtschlammes sind demnach keine Auffälligkeiten durch den Einsatz des MCP-Verfahrens erkennbar.

Neben dem scherverdünnenden Verhalten sind in den Rheogrammen deutliche Fließgrenzen und Thixotropie erkennbar. In Abb. 12 sind beispielhaft für die durchgeführten systematischen Viskositätsuntersuchungen Fließkurven für Messungen der gleichen Schlammprobe nach unterschiedlichem Messprotokoll dargestellt: in der ersten Messung wurde die Schergeschwindigkeit in Form einer Rampe bis  $100 \text{ s}^{-1}$  logarithmisch erhöht und anschließend wieder verringert, in der zweiten Messung bis  $10.000 \text{ s}^{-1}$ . Parallel wurde die Probe vor und nach der Scherung unter dem Mikroskop untersucht. Aus der Fließkurve ist ersichtlich, dass der Grad der Scherbelastung einen Einfluss auf die Thixotropie des Belebtschlammes hat. Die Hysterese ist nach Belastung bis  $100 \text{ s}^{-1}$  deutlich geringer ausgeprägt als bei der Fließkurve mit höherer Belastung.

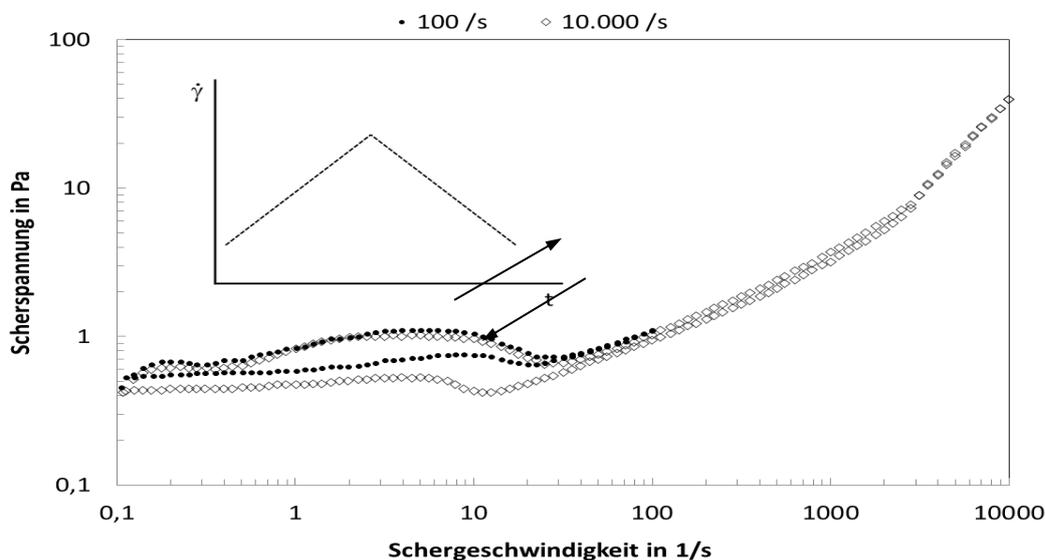


Abb. 12: Fließkurve von Belebtschlamm (TS = 10,35 g/l) unter Variation des Schergeschwindigkeitsbereiches

### 3.3 Betriebsergebnisse der Pilotanlage – Permeabilität und Membranfouling

#### Permeabilität

Die Untersuchungen zum Einfluss des Mechanical Cleaning Process auf die Permeabilität in der Pilotanlage lassen sich in zwei Phasen teilen. Im Zeitraum von August 2010 bis Juni 2011 waren alle vier Membrankammern der Pilotanlage mit konventionellen UP150-Membranmodulen (siehe Projektbericht Phase 2 vom 20.8.2012) bestückt. In der zweiten Phase von August 2011 bis Juni 2012 waren zwei Membrankammern mit zwei neuen UP150-Membranmodulen und die anderen beiden Membrankammern mit zwei neuen MBR016-Membranmodulen bestückt.

Um die Auswirkungen des Mechanical Cleaning Process bei beiden Membrantypen untersuchen zu können, wurden die Membrantanks MT1 und MT3 jeweils ohne und MT2 und MT4

jeweils mit Granulat betrieben. Die Granulatbeladung wurde zu Beginn auf  $4 \text{ kg}_{\text{Granulat}}/\text{m}^3_{\text{Belebtschlamm}}$  eingestellt und im Laufe des Projektes auf  $9,6 \text{ kg}/\text{m}^3$  und später  $15 \text{ kg}/\text{m}^3$  erhöht, um den möglichen Membranverschleiß zu beschleunigen und Auswirkungen der Granulatbeladung sichtbar zu machen. In Abb. 13 sind die Permeabilitäten von MT1 – MT4 der Phasen 2 und 3 dargestellt. Dabei sind drei Bereiche von großer Bedeutung:

1. Anlaufprozess mit anschließender Zugabe von  $4 \text{ kg}/\text{m}^3$  Granulat (Detail, s. Abb. 14)
2. Konstanter Betrieb ohne chemische Reinigung der MCP-Straßen (Detail, s. Abb. 15)
3. Regelmäßige Reinigungszyklen und schrittweise Fluxsteigerung (Detail, s. Abb. 17)

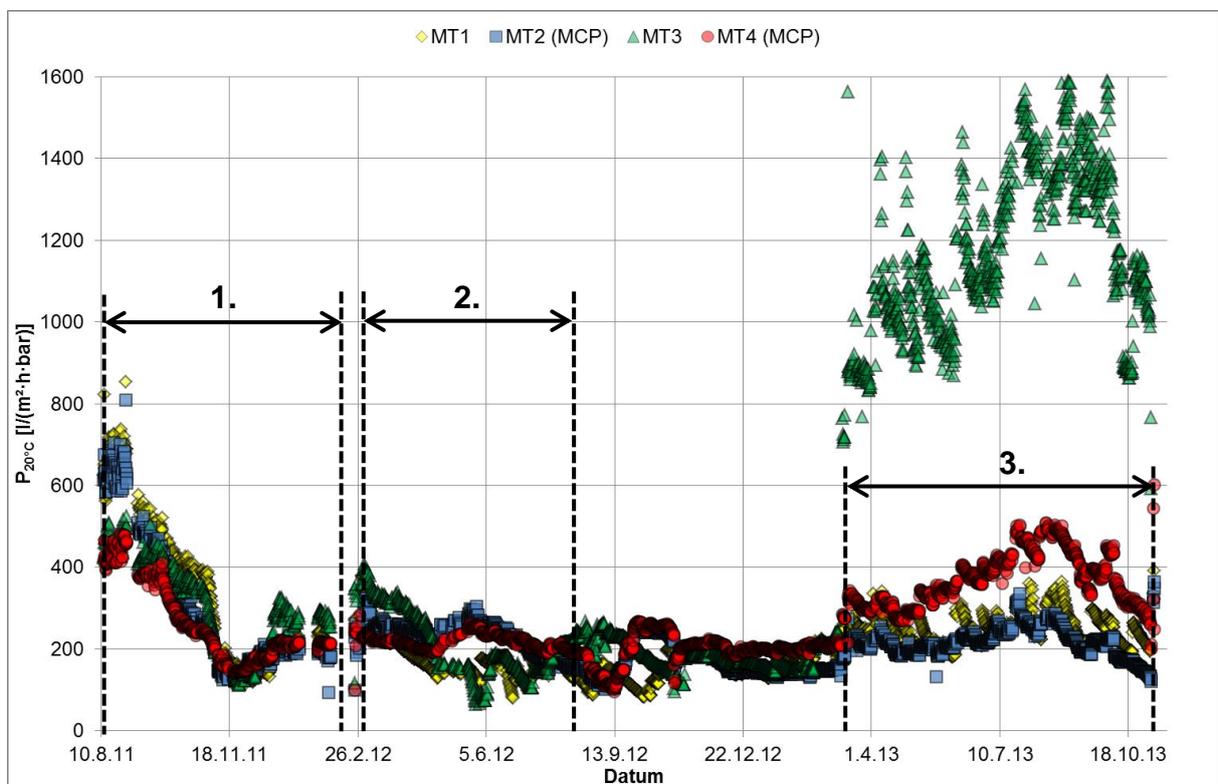
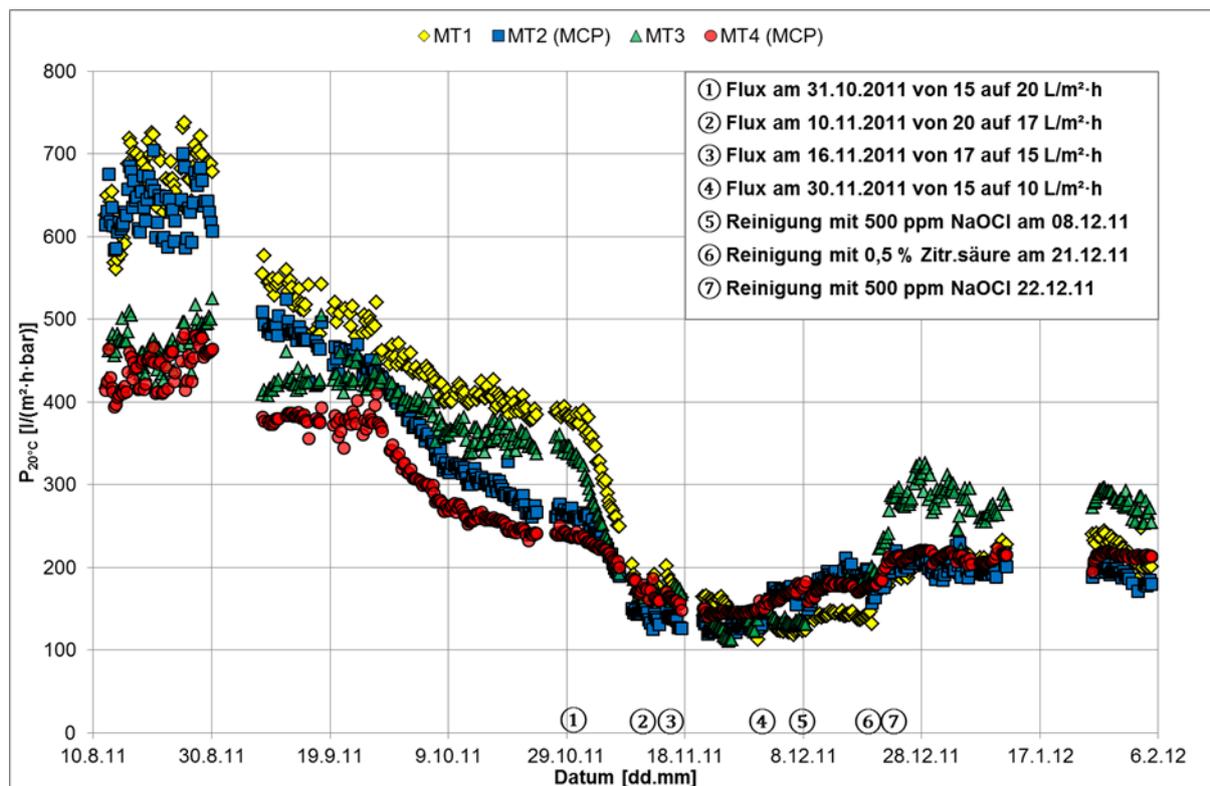


Abb. 13: Temperaturkorrigierte Permeabilitäten (Schlamm) für MT1+MT2 (UP150) und MT3+MT4 (MBR016) vom 10.08.11 – 07.11.13

Eine detaillierte Darstellung des Anlaufprozesses findet sich in Abb. 14. Es zeigt sich, dass die Anfangspermeabilitäten der Ultrafiltrationsmembranen höher liegen als diejenigen der Mikrofiltrationsmembranen, was mit den im Labor ermittelten Wasserpermeabilitäten korrespondiert.



**Abb. 14: Temperaturkorrigierte Permeabilitäten (Schlamm) für MT1+MT2 (UP150) und MT3+MT4 (MBR016) vom 10.08.11 – 06.02.12; Anlaufprozess; Membran Set 2**

Nach Zugabe der Granulate am 27.09.2011 zeigt sich zunächst ein unerwarteter Effekt: in beiden Membranmodulen mit MCP (MT2 und MT4) nimmt die Permeabilität stärker ab als in den beiden Modulen ohne Granulat. Allgemein fallen die Permeabilitäten in allen vier Membrantanks kontinuierlich. Deutlich zu erkennen ist, dass die nicht mit MCP betriebenen Membranmodule insbesondere nach der Erhöhung des Permeatflux deutlich steiler abfallen. Im November 2011 fallen die Permeabilitäten aus den Membranmodulen ohne MCP unter die Permeabilitäten mit MCP-Betrieb. Aufgrund der bisweilen deutlich gefallen Permeabilitäten wurde nach vier Monaten Betrieb eine erste in situ Zwischenreinigung mit NaOCl (500 ppm) und Zitronensäure (0,5 %) durchgeführt. Die Reinigung führt bei den nicht mit Granulat betriebenen Modulen zu einem deutlicheren Anstieg der Permeabilität als bei den Modulen mit Granulat.

Sowohl der Permeabilitätsabfall nach der Zugabe der Granulate als auch der geringere Anstieg der Permeabilität nach der Reinigung deuten auf eine Kompaktierung der Foulingsschicht durch die Granulatimpulse hin. Dieser Einfluss war in Projektphase 1 mit anderen Granulaten nicht erkennbar.

Nach den frostbedingten Ausfällen in den Wintermonaten wurde der Anlagenbetrieb ab dem 07.03.12 in den mit MCP betriebenen Membrantanks mit einer erhöhten Granulatbeladung von  $9,6 \text{ kg}_{\text{Granulat}}/\text{m}^3_{\text{Belebtschlamm}}$  aufgenommen. Diese erhöhte Beladung ergibt sich über den Ansatz konstanter Impulsdichte zwischen den erfolgreichen MCP-Versuchen in Phase 1

(2,8 mm Granulat mit  $4 \text{ kg/m}^3$  Beladung) und den jetzt eingesetzten 4 mm – Granulatpartikeln (s. Projektbericht zu Phase 2).

Die Ergebnisse in Abb. 15 und Abb. 16 zeigen deutlich den Einfluss von MCP: Während die Permeabilitäten der konventionell betriebenen Membranmodule deutlich abfallen und regelmäßige Zwischenreinigungen erforderlich machen, verlaufen die Permeabilitäten bei den mit MCP betriebenen Membranmodulen wesentlich gleichmäßiger. Sie fallen über den betrachteten Zeitraum nur langsam ab und benötigen keine Zwischenreinigung. Auffällig ist die Betriebsphase von Ende April bis Ende Mai. Hier war aufgrund von Problemen mit der Anlagensteuerung kein kontinuierlicher Anlagenbetrieb möglich. In dieser Zeit erholten sich die Permeabilitäten der mit Granulat betriebenen Module während die der konventionell betriebenen Module konstant blieben. Der Vergleich des Permeabilitätsverhaltens wird besonders deutlich, wenn man die bezogenen Permeabilitäten betrachtet (Abb. 16).

Aus dieser Tatsache können zwei Schlüsse gezogen werden: Zum einen kann die Reinigungsfrequenz einer MBR-Anlage mit MCP deutlich verringert werden. Zum anderen kann ein langfristig chemikalienfreier Betrieb unter den gegebenen Randbedingungen nicht realisiert werden.

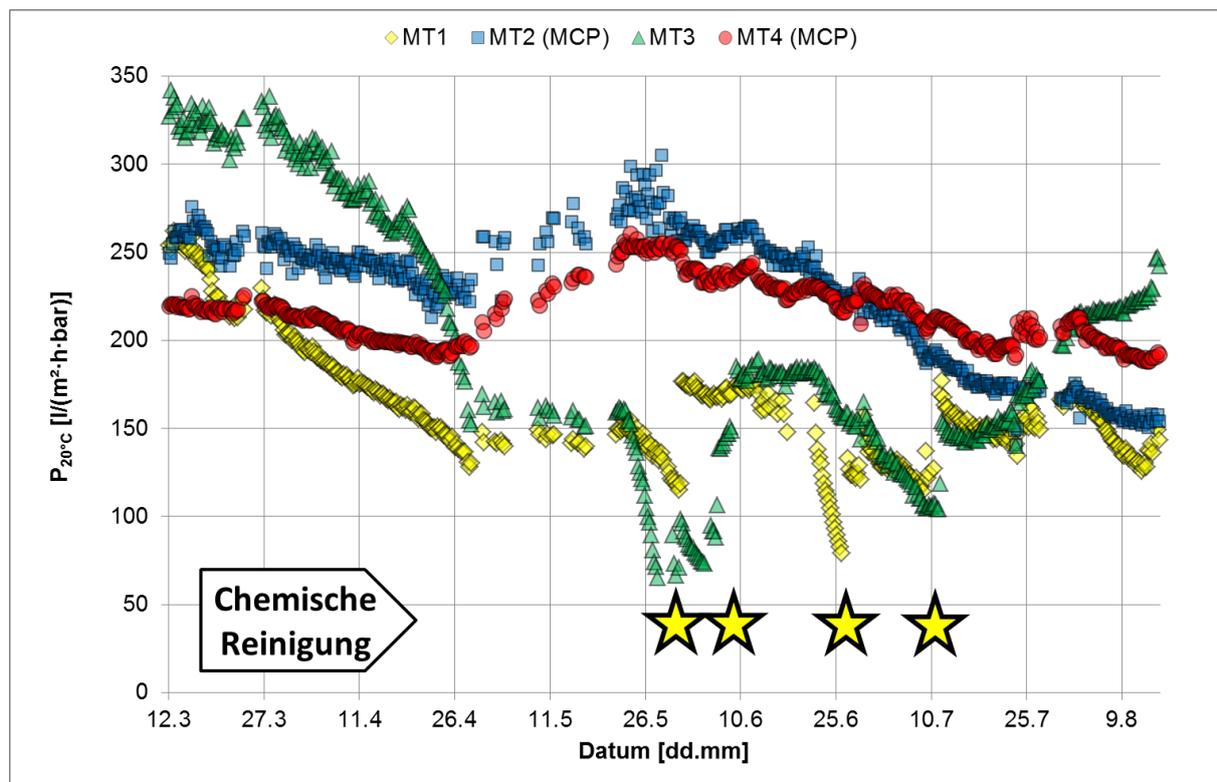


Abb. 15: T. korrigierte Permeabilitäten (Schlamm) für MT1+MT2 (UP150) und MT3+MT4 (MBR016) vom 07.03.12 – 15.08.12; Beladung:  $9,6 \text{ kg}_{\text{Granulat}}/\text{m}^3_{\text{Belebtschlamm}}$

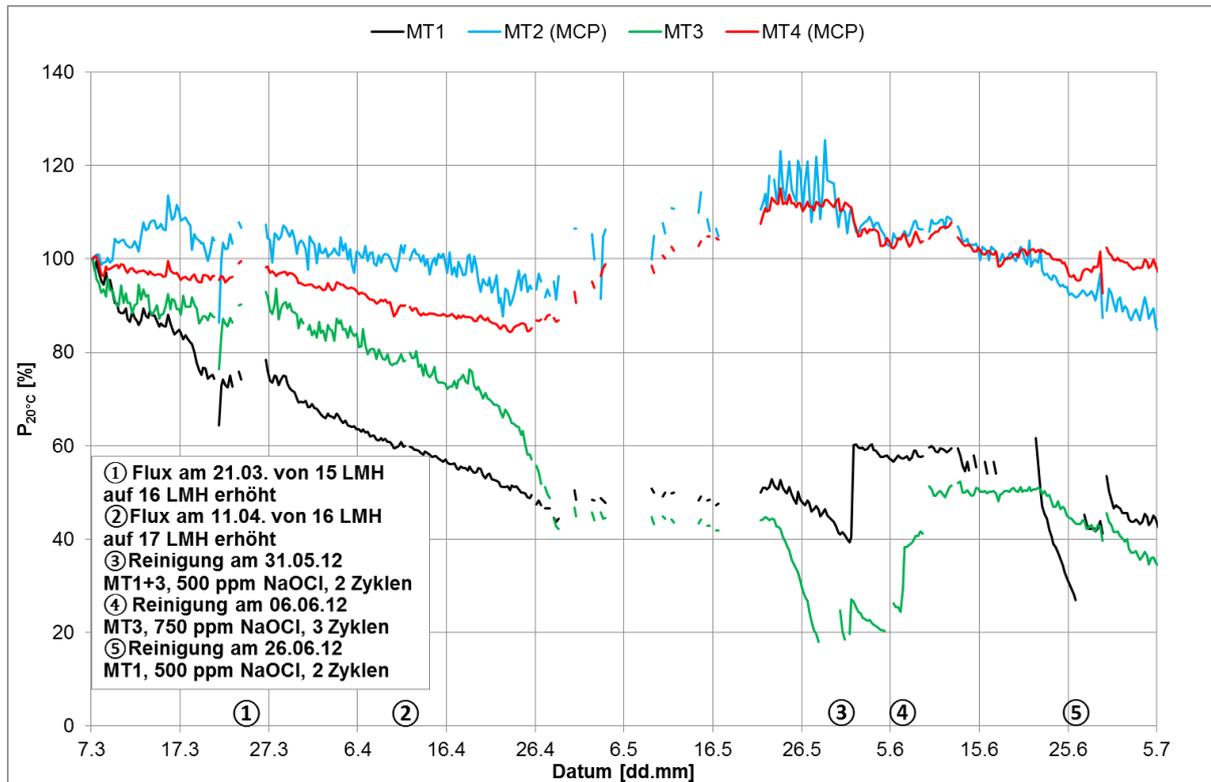


Abb. 16: T. korrigierte Permeabilitäten normiert (Schlamm) für MT1+MT2 (UP150) und MT3+MT4 (MBR016) vom 07.03.12 – 05.07.12; Beladung:  $9,6 \text{ kg}_{\text{Granulat}}/\text{m}^3_{\text{Belebtschlamm}}$

Aus diesen Erkenntnissen folgend wurde für die letzte Phase des Forschungsprojektes das Ziel definiert, einen wirtschaftlichen Betrieb von MBR-Anlagen mit MCP bei minimalem Chemikalienbedarf zu verwirklichen.

Anschließend an eine Vorversuchphase wurden folgende Betriebsparameter definiert:

- Schrittweise Erhöhung des Flusses ( von 15 bis 25 LMH)
- Halbierung des NaOCl-Bedarfs
  - Reinigung der nicht MCP-Module (MT1+3) alle 3 Wochen mit 300 ppm
  - Reinigung der MCP-Module (MT2+4) alle 6 Wochen mit 300 ppm

Diese letzte Versuchsphase begann mit intensiven in situ Zwischenreinigungen aller Module mit NaOCl und Zitronensäure. Hierbei war wie bei vorhergehenden Reinigungen ein geringerer Permeabilitätsanstieg bei den MCP-Modulen erfolgt. Ein deutlicher Anstieg der Permeabilität in Folge der intensiven Reinigungen war beim Modul mit der neuen Membran ohne Granulat (MT4) aufgetreten. Der Anstieg resultiert aus den Eigenschaften der neuentwickelten Membran und wird in Abschnitt 3.5 diskutiert. Die Granulatbeladung wurde auf  $15 \text{ kg}/\text{m}^3$  erhöht, um eine beschleunigte Alterung zu simulieren und um einen möglichst starken Reinigungseffekt zu erzeugen.

Der normierte Permeabilitätsverlauf einschließlich Flux und NaOCl-Belastung der Membranen ist in Abb. 17 dargestellt.

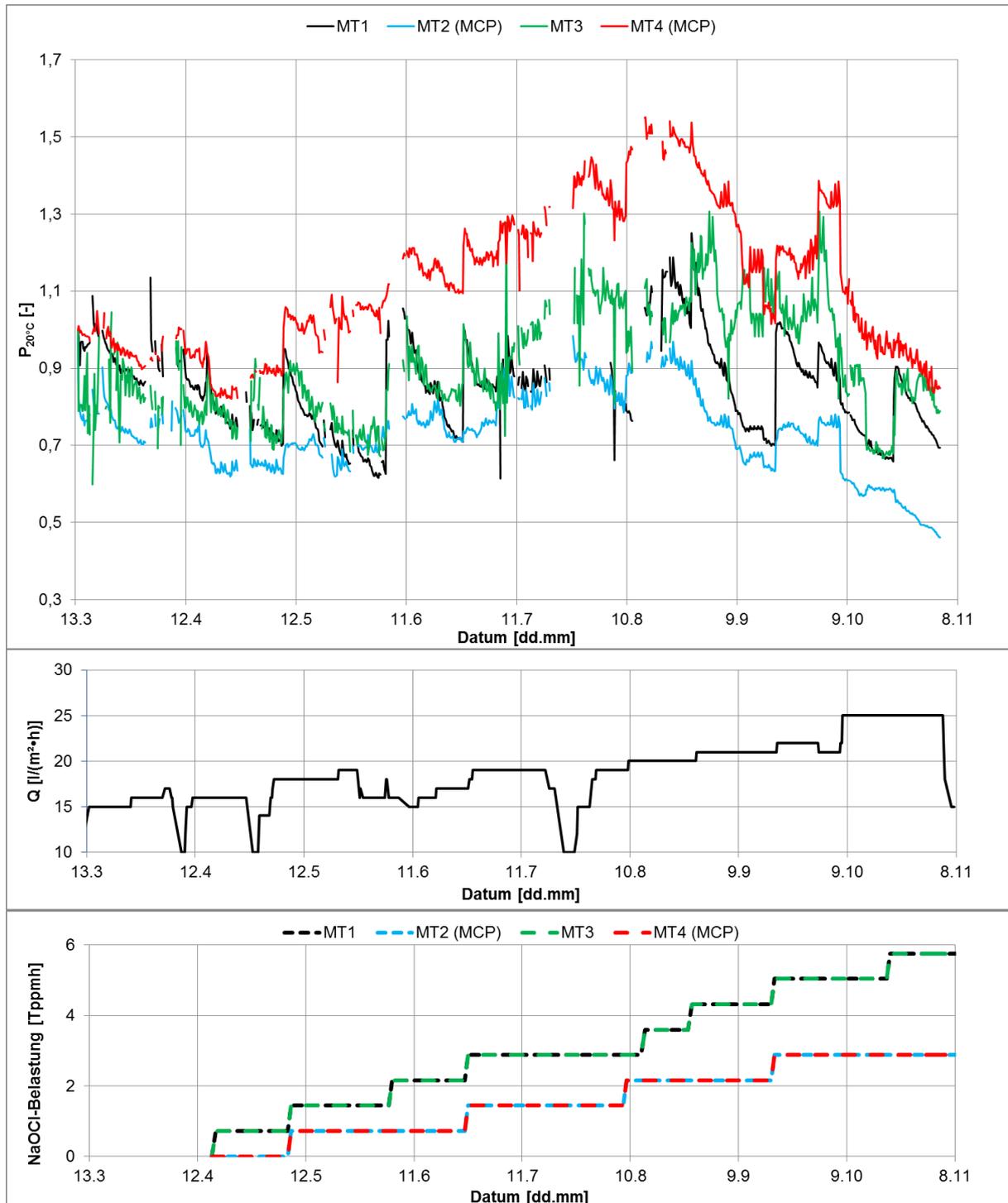


Abb. 17: Temperaturkorrigierte, bezogene Permeabilitäten (oben), Flux  $Q$  (Mitte) und die kumulierte NaOCl-Belastung (unten) für MT1+MT2 (UP150) und MT3+MT4 (MBR016) vom 13.03.13 – 08.11.2013 bei einer Beladung:  $15 \text{ kg}_{\text{Granulat}}/\text{m}^3_{\text{Belebtschlamm}}$

Zu erkennen ist ein tendenzieller Anstieg der Permeabilitäten aller Module, bei regelmäßiger Reinigung, bis Ende August. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Flux bis auf 20 LMH erhöht. Hervorgehoben werden sollte die Kombination aus der MBR016-Membran und MCP. Hierbei führen die regelmäßigen Reinigungen zu einem Anstieg der Permeabilität um 50 %, bei gleichzeitig erhöhtem Flux.

Ein direkter Vergleich der konventionellen Membran UP150 ohne MCP (MT1) mit der neu-entwickelten Membran MBR016 (MT4) verdeutlichen den signifikanten Vorteil der letzteren Kombination. Während die Permeabilität von MT1 zwischen den Reinigung deutlich abnimmt, stagniert oder steigt die Permeabilität von MT4.

Ab 21 LMH zeigt sich eine deutliche Abnahme der Permeabilitäten aller Membranstraßen. Hier scheint der optimale Betriebsfluss der Membranen überschritten worden sein.

Im letzten Schritt wurde der Flux aller Module auf 25 LMH erhöht und anschließend Anfang Oktober die Belüftungsrate auf 20 m<sup>3</sup>/h, entspricht 0,4 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup><sub>Membran</sub>, reduziert. Bei diesen extremen Bedingungen ist ein starkes Fouling zu beobachten. Doch auch hier ist ein Vorteil von MBR016/MCP anhand der Steigung der Permeabilitäten erkennbar.

### **Foulingverhalten**

Zusätzlich zu den kontinuierlichen Messungen der Permeabilität wurden wöchentlich High-Speed-Datensätze der einzelnen Membranmodule aufgezeichnet. In den High-Speed-Aufnahmen werden einzelne Filtrationszyklen hochaufgelöst aufgezeichnet (vgl. Abb. 18). Anhand dieser Darstellung gibt die Steigung als Zunahme der Druckdifferenz mit der Zeit ein Maß für die kurzfristige Foulingzunahme. Die unterschiedlich stark ausgeprägten Amplituden der Messkurven sind auf das jeweilige Alter der Pumpenstatoren (Exzentrerschneckenpumpen) zurückzuführen und haben keinen Einfluss auf die Messdatenauswertung.

In den High-Speed-Protokollen zeigt sich über den gesamten Untersuchungszeitraum ein vernachlässigbar geringer TMP-Zuwachs während eines Filtrationszyklus, unabhängig davon, ob das Membranmodul mit oder ohne MCP betrieben wurde. Ein Unterschied im prinzipiellen Foulingverhalten zwischen den Membranen mit und ohne Granulateinsatz ist demnach nicht erkennbar. Weder scheint es einen nachhaltigen negativen Einfluss des anfänglichen Permeabilitätsabfalls bei den MCP-Modulen zu geben, noch nimmt das Fouling in den Membranen ohne MCP innerhalb der Filtrationszeit von 510 Sekunden signifikant zu. Weiterhin ist auch kein Unterschied zwischen den zwei Ultrafiltrations- und den zwei Mikrofiltrationsmembranen erkennbar.

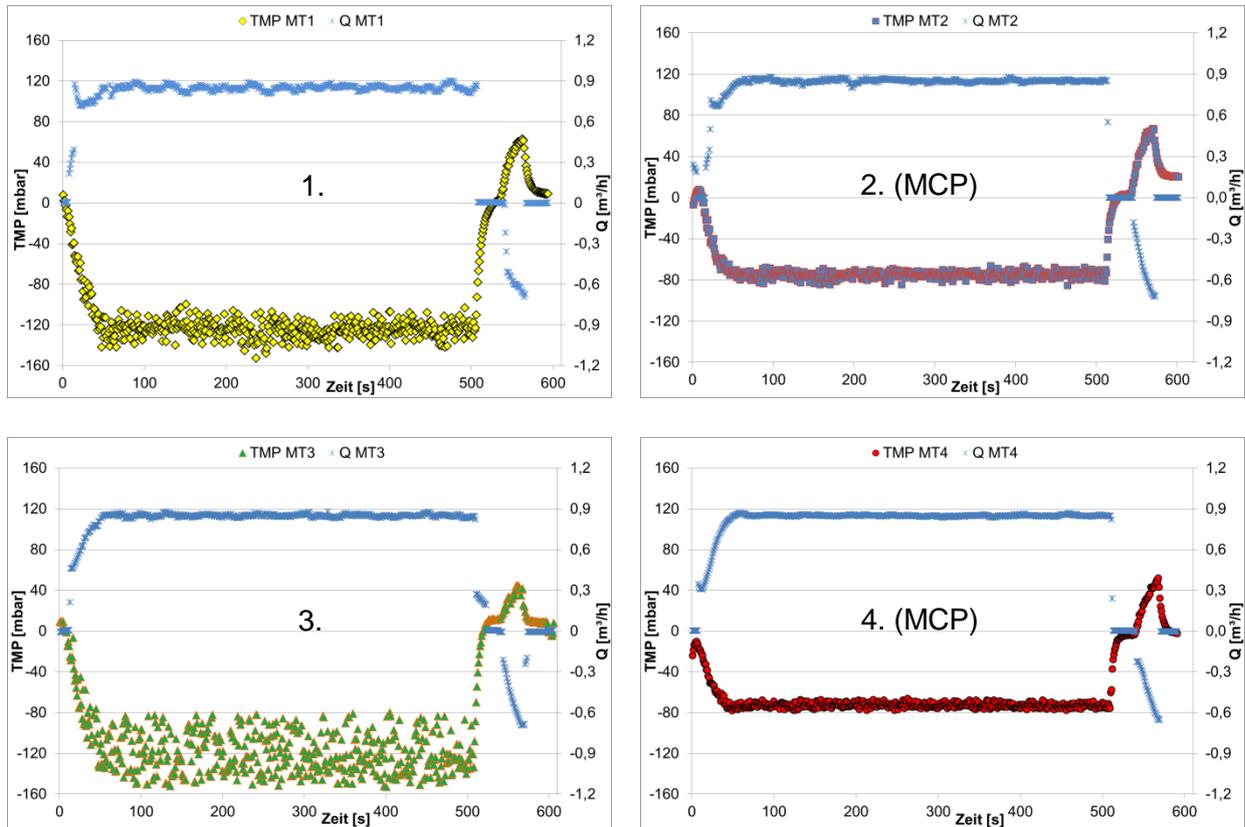
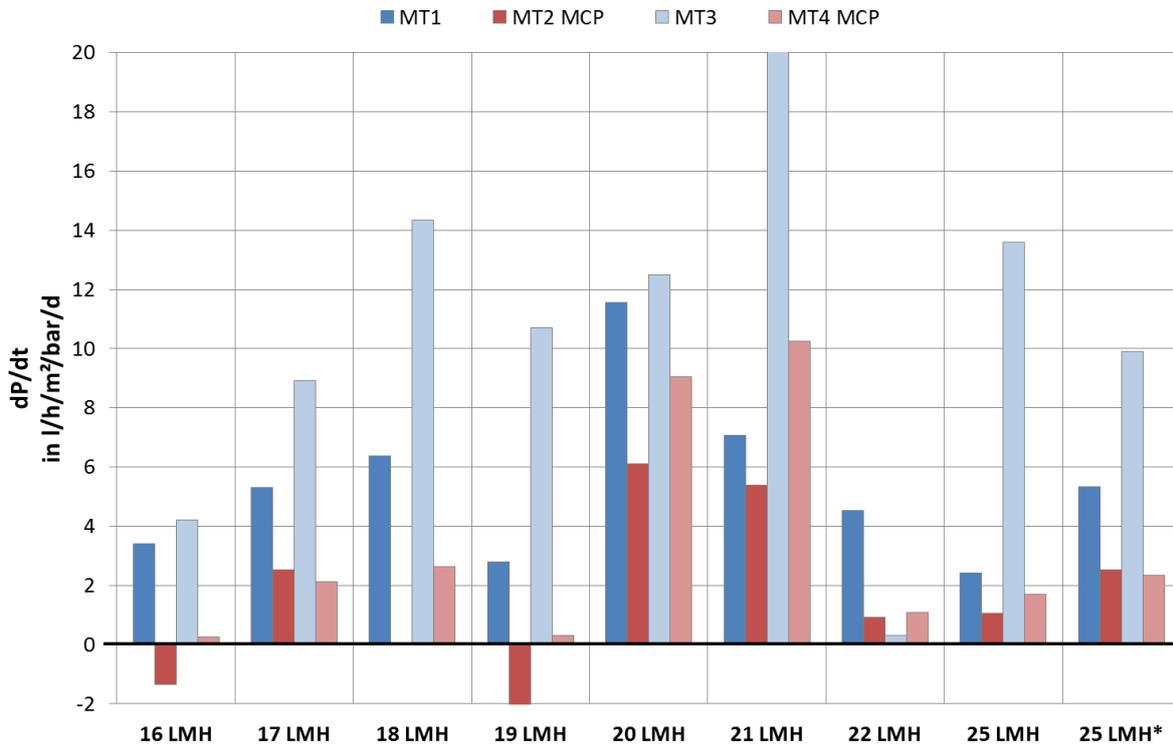


Abb. 18: High-Speed-Protokolle von MT1 – MT4 (jeweils ein Arbeitszyklus)

Des Weiteren wurde untersucht, wie sich das Foulingverhalten bei unterschiedlichen Fluss-Niveaus verhält. In Abb. 19 ist die mittlere tägliche Permeabilitätsabnahme ( $dP/dt$ ) für Flüsse von 16 LMH bis 25 LMH dargestellt. Bei 25 LMH\* wurde die Membranbelüftung von 30 m³/h auf 20 m³/h reduziert. Der Vergleich zeigt, dass  $dP/dt$  der MCP-Straßen stets geringer ist als bei den Referenz-Straßen. Der Anstieg von  $dP/dt$  mit dem Fluss stellt ein typisches Verhalten von MBR-Anlagen dar, weil mit höheren Flüssen mehr Feststoff an die Membran zugeführt wird. Die Ursache für die deutlich geringeren Werte ab 22 LMH konnte nicht gefunden werden. Hier könnten Umweltfaktoren die Charakteristik des Belebtschlammes verändert haben.



**Abb. 19: Durchschnittliche tägliche Abnahme der Permeabilität bei unterschiedlichen Flüssen; \*bei einer Belüftungsrate von 20 m³/h anstatt der Standard-Vorgabe von 30 m³/h**

Die Granulatbeladung wurde mit dem neuen Granulat im Bereich 4 bis 15 kg/m³ variiert. Nach der Erhöhung der Beladung konnte in keinem der Fälle eine kurzfristige Veränderung des Foulingverhaltens beobachtet werden. Die langfristigen Auswirkungen lassen sich nur schwer bewerten, da andere Parameter wie Fluss und Reinigungszyklen ebenfalls verändert wurden. Im Allgemeinen deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Beladungserhöhung von 4 auf 8 kg/m³ sich positiv auf die Permeabilitätsergebnisse ausgewirkt hat, während die hohe Beladung von 15 kg/m³ in der letzten Versuchsphase keinen weiteren signifikanten Einfluss auf das Permeabilitätsverhalten hatte.

### 3.4 Entwicklung einer Indikatormethode zur Membranintegrität (Arbeitspaket 3)

Als weiteres Ziel dieses Forschungsprojektes sollte eine praxisorientierte Indikatormethode entwickelt werden, die es unabhängig von der Modulgröße oder dem Einsatzort ermöglicht, schnell, einfach und zerstörungsfrei Membranmodule auf eine Beschädigung hin zu untersuchen.

Betrachtet werden in diesem Kapitel die Methoden der Online-Trübungsmessung und bakteriologische Indikatormethoden. Für die vollständige Darstellung dieses Kapitels sei ebenfalls auf den Projektbericht der vorherigen Phasen vom 20.08.2013 verwiesen.

#### Trübung

Die Trübung wird an der Pilotanlage Osnabrück Eversburg kontinuierlich gemessen. Es werden täglich vier Mittelwerte aufgenommen. Die mittlere Trübung aller vier Membranstraßen beträgt 0,26 FNU. Dabei sollte beachtet werden, dass die Trübungssonde in regelmäßigen Abständen gereinigt werden muss. Im Laufe des Projektes wurden diese Reinigungsintervalle mehrmals überschritten. Wie aus Abb. 20 ersichtlich ist, macht sich die Verunreinigung der Sonde durch einen starken Anstieg der gemessenen Trübung deutlich. Da diese Anstiege nicht die tatsächliche Permeatrübung darstellen, kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche mittlere Trübung im Bereich von 0,2 FNU liegt. In Einzeltrübungsmessungen aus den vier Membrantanks ist keine Abweichung der Trübung vom Permeatmix zu erkennen. Aus diesem Grund ist die Trübung alleine als Indikator der Membranintegrität nicht geeignet.

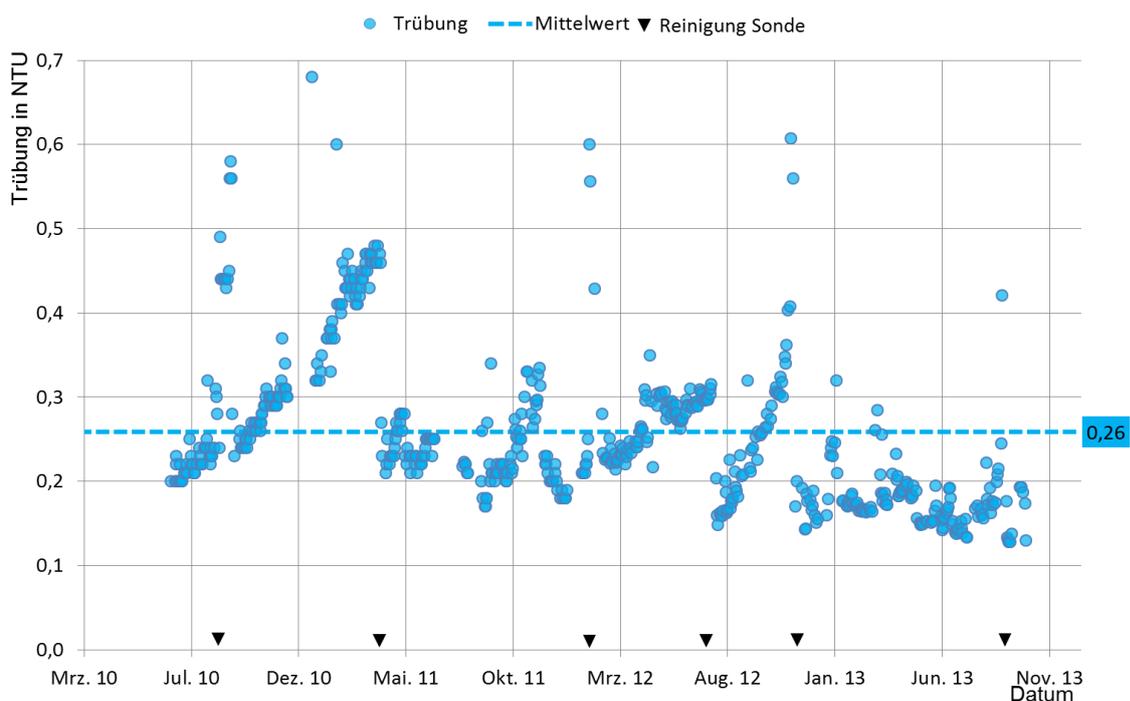


Abb. 20: Trübung des Permeatmix aus allen vier Membranstraßen

### Bestimmung von Mikroorganismen im Permeat

Im Rahmen der Projektverlängerungsphase 3 wurden zusätzlich zur Trübungsmessung bakteriologische Untersuchungen wie in Abschnitt 2.2 beschrieben durchgeführt. Hierzu wurden abflammbare Probenahmestellen in die Permeatleitung integriert, welche die Anforderungen der DIN-Norm DIN EN ISO 19458 zur sterilen Entnahme von Trinkwasserproben erfüllen.

Bezüglich Mikroorganismen im Ablauf kommunaler Kläranlagen gilt meist die EU-Badegewässerrichtlinie **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Die Richtlinie stellt Anforderungen an die Badegewässerqualität und macht diese an der Konzentration von Mikroorganismen im Gewässer fest. Die Grenzwerte für als ausgezeichnet bewertete Binnengewässer liegen bei 200 KBE/100ml für intestinale Enterokokken und 500 KBE/100ml für Escherichia Coli. Diese Anforderungen werden von den Anlagenbetreibern an die Anlagenbauer und Modulhersteller gestellt.

Die Vorteile dieser Methode liegen in der einfachen Durchführbarkeit. Die Probenahme kann prinzipiell automatisiert und ins Prozessleitsystem integriert werden. Es ist darauf zu achten, dass die Probenahme in der Filtrationsphase und nicht in der Rückspülphase erfolgt. Der Anlagenbetrieb wird dadurch nicht beeinflusst und die Anlage bleibt voll verfügbar.

Die Nachteile liegen in den aufwändigen Nachweismethoden für die Mikroorganismen. Diese müssen in entsprechenden Labors durchgeführt werden und sind somit kostenintensiv und lassen sich nicht automatisieren. Zudem erhält der Betreiber die Resultate aufgrund der Nachweismethoden mit einer zeitlichen Verzögerung von 1-2 Tagen. Alternativ gibt es auch Verfahren, die mit dem vorhandenen Equipment auf Kläranlagen durchgeführt werden können (Colilert-18, CompactDry EC). Diese sind jedoch weniger genau und die zeitliche Verzögerung bleibt bestehen.

Beginnend mit September 2012 wurden Analysen bei der GUA Gesellschaft für Umweltanalytik GmbH (akkreditiertes Untersuchungslabor) in Auftrag gegeben.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 21 zusammengefasst. 55% der analysierten Proben lagen unterhalb von 15KBE/100ml. Dieser Wert stellt die Nachweisgrenze des Verfahrens dar. 90% der Messwerte liegen unter 100KBE/100ml. Entsprechend der Einstufung nach der Badegewässerrichtlinie (s. Tab. 3) ist die Permeatqualität damit in den meisten Fällen als ausgezeichnet einzuordnen. Ein Grund für die starke Streuung liegt wahrscheinlich in der Probenahme. Die Untersuchung des Permeats auf Mikroorganismen war in der Planungsphase der Anlage nicht vorgesehen. Der gesamte Permeatbereich wurde aus Platzgründen und für eine einfache Trübungsmessung stark verzweigt und mit diversen Absperrorganen aufgebaut. Dadurch ist eine schnelle Verkeimung des Permeatbereichs wahrscheinlich. Erhöhte Einzelwerte können somit der Probenahme bzw. einer Verkeimung auf Permeatseite zugeschrieben werden. Lediglich statistisch häufig auftretende Grenzwertüberschreitungen sind relevant.

Bei der UP150 Membran ohne Granulat (MT1) wurden fast durchweg niedrige Werte bzw. nicht nachweisbare Konzentrationen festgestellt.

Bei MT2 (UP150 mit Granulat) sind in einigen Fällen höhere Konzentrationen aufgetreten. 2-mal wurde das Kriterium für ausgezeichnete Qualität bei Enterokokken und 3-mal bei E.coli überschritten. Es gibt jedoch auch einige Messwerte, die unterhalb der Nachweisgrenze liegen. Die Wasserqualität ist aber immer noch als ausreichend einzustufen.

Bei dem ebenfalls mit Granulat betriebenen Modul MT4 mit der neu entwickelten Membran (MBR016) wurden im Vergleich mit dem Modul ohne Granulat (MT3) keine erhöhten Konzentrationen festgestellt. Die neuen Membranen zeigen etwas höhere Konzentrationen als die UP150 Membran ohne Granulat.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass lediglich das Permeat aus dem Membrantank MT2 (konventionelle Membran UP150 im Granulatbetrieb) statistisch relevante Bakterienkonzentrationen im Permeat aufweist. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt im Rahmen der Charakterisierung der Membranen in folgenden Abschnitt 3.5.

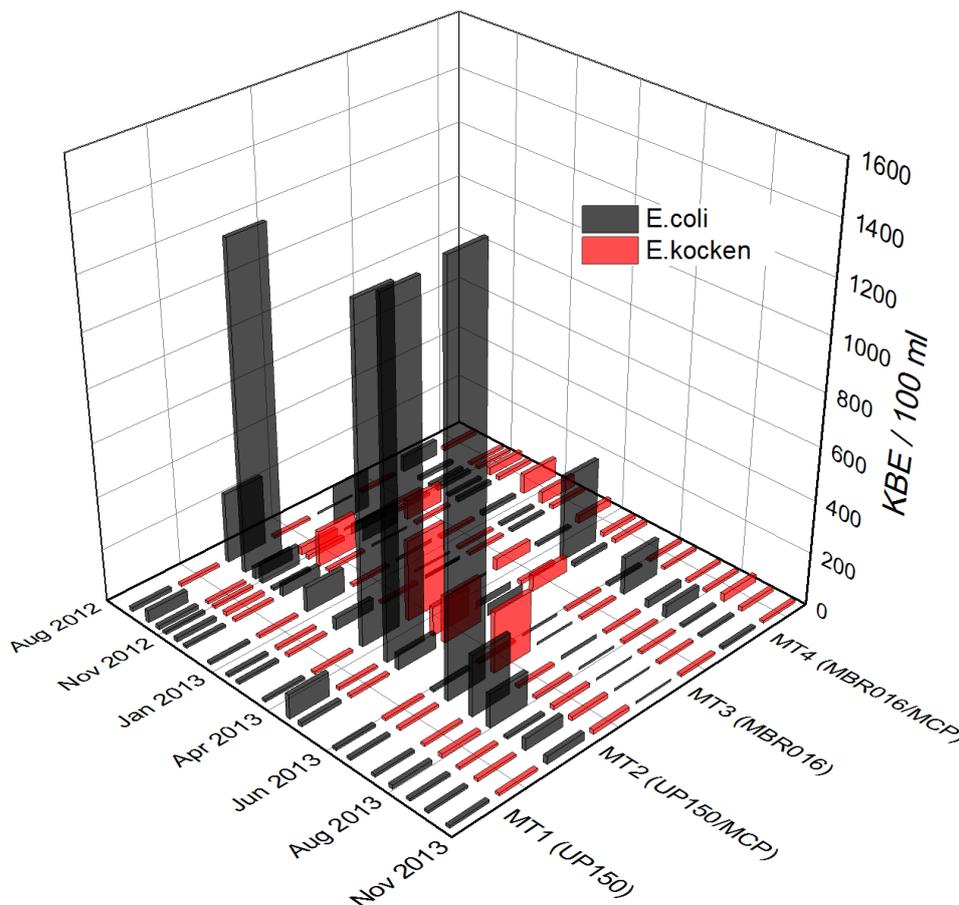


Abb. 21: Rückhalt von intestinalen Enterokokken und Escherichia coli der einzelnen Membranstraßen in koloniebildende Einheit (KBE) pro 100 ml

### **Zusammenfassung Methodenentwicklung Membranintegrität**

Die Entwicklung einer Methode zur Überprüfung der Membranintegrität wurde als Arbeitspaket in das Projekt aufgenommen, da nicht auszuschließen ist, dass das mechanische Reinigungsverfahren MCP auf Dauer zu Membranbeschädigungen führen kann.

Die in der Modulfertigung üblichen Druck basierenden Methoden (Bubble-Point-Test, Druckhaltetest) sind im großtechnischen Betrieb nur bedingt umsetzbar. Eine wesentlich praxisorientiertere Methode ist die Bestimmung der Membranintegrität über die Ablaufqualität. Hierbei ist für kommunale MBR-Anlagen die EU-Badegewässerrichtlinie mit der Bestimmung der intestinalen Enterokokken und E. coli relevant. Die Druck basierenden Methoden können bei Bedarf zur Lokalisierung der Fehlerquellen herangezogen werden, eignen sich aber weniger als prozessbegleitende Methode.

Die Schwankungsbreite der bakteriologischen Methode erwies sich vor allem an der mit Granulat betriebenen Straße mit der Standardmembran als sehr hoch. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, müssen deshalb viele Messungen durchgeführt werden. Diese Problematik gilt es für weitere Untersuchungen und bei der Umsetzung großtechnischer Anlagen zu berücksichtigen, um eine repräsentative Probenahme zu gewährleisten.

Trotz der beschriebenen Nachteile scheint die Bestimmung auf Mikroorganismen die praktikabelste aller Integritätsmethoden darzustellen. Für viele Anwendung zur Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser werden Anforderungen an bestimmte Mikroorganismen gestellt. Eine neue Möglichkeit, die sich erst gegen Ende des Projekts ergeben hat, besteht in der Durchflusszytometrie, welche zum Teil bereits in der Trinkwasseranalytik eingesetzt wird.

### **3.5 Auswirkungen von MCP auf die eingesetzten Membranen**

Das grundsätzlich deutlich gutmütigere Verschleißverhalten der neu entwickelten Membran MBR016 gegenüber der Standardmembran UP150 wurde im Rahmen der Membranentwicklung nachgewiesen. Die neu entwickelte Membran mit Schwammstruktur zeigte bei abrasiver Beanspruchung der Oberfläche durch Polymergranulat ein deutlich effizienteres Verhalten als die UP150. Es kam weder zu deutlichen Erhöhungen der Reinwasserpermeabilität noch zu Porenvergrößerungen in Bereiche über 0,4 µm. Die eingesetzten Verfahren sowie die Ergebnisse sind im Abschlussbericht der Projektphase 2 vom August 2012 ausführlich beschrieben.

Die prinzipielle Eignung der neuen Membranen MBR016 konnte durch den erfolgreichen Betrieb parallel zu den etablierten Membrantypen (UP150) nachgewiesen werden.

## **Modulcharakterisierung**

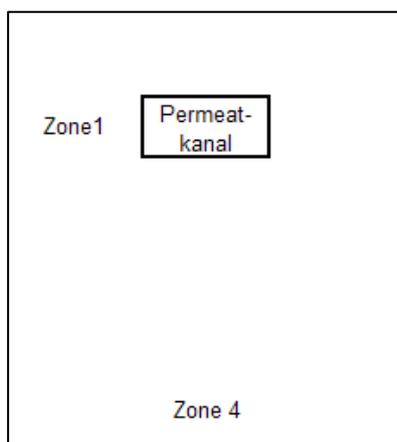
Alle Module wurden im Anschluss an die Versuche intensiv in NaOCl und Zitronensäure gereinigt, demontiert und geprüft.

Beide Module mit der etablierten UP150 Membran zeigten bei den Modulprüfungen keine besonderen Auffälligkeiten. Die erhöhten Konzentrationen von Mikroorganismen im Permeatablauf insbesondere von MT2 konnten nicht auf spezielle Beschädigungen der Membrantaschen zurückgeführt werden. Die Module zeigten das für gebrauchte Einheiten übliche Bild.

Bei den neuen Membranen wurden kleinere Leckagen an einer Klebeverbindung festgestellt. Diese könnten für die im Mittel etwas höheren Konzentration von Mikroorganismen im Vergleich zum UP150 Modul ohne Granulat verantwortlich sein.

## **Membrancharakterisierung**

Für die ausführliche Charakterisierung der gebrauchten Membranen wurden die Module im Detail wie folgt beprobt und mit Labormethoden untersucht. Jedes der vier Module besteht aus zwei PVC-Kassetten, die jeweils ein Membranpaket bestehend aus 25 Membrantaschen beinhalten (siehe Abb. 22). Von jeder Kassette wurden an der äußersten (Tasche 1) und mittleren (Tasche 13) Tasche Proben im Bereich neben dem Permeatkanal und unten im Eintrittsbereich genommen (siehe Abb. 22) und charakterisiert. Es konnten keine nennenswerten Unterschiede zwischen den beiden Zonen auf der Membran und zwischen den Taschen 1 und 13 einer Kassette festgestellt werden. In den folgenden Ergebnisdarstellungen tauchen die Parameter Zone und Tasche deshalb nicht auf.



**Abb. 22: Probenahmestellen an den Membrantaschen**

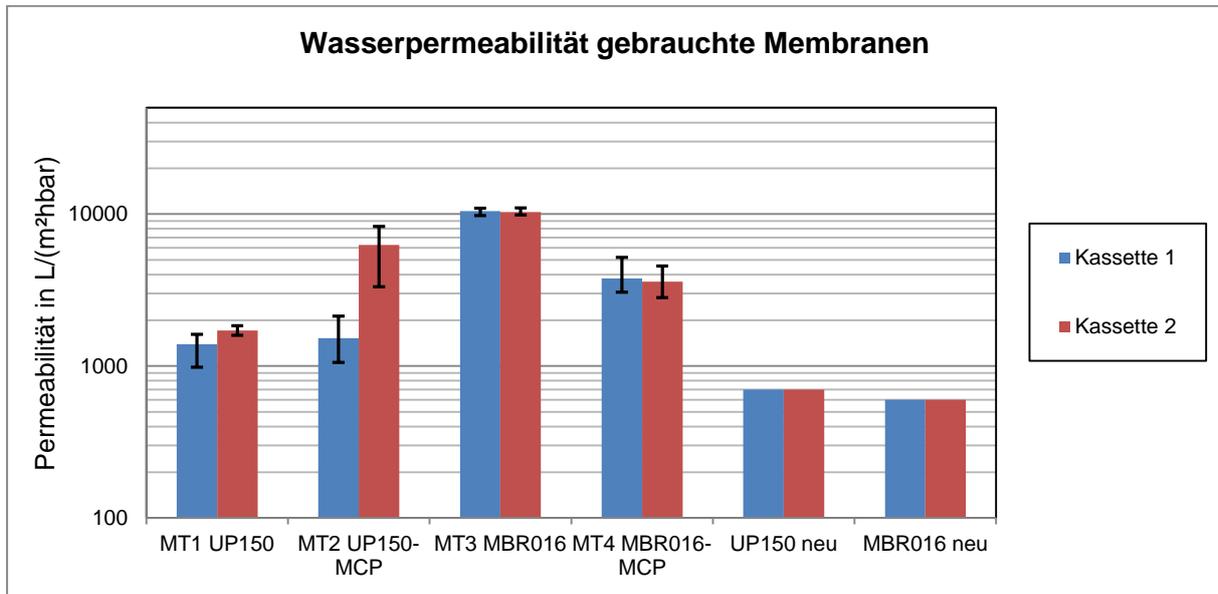


Abb. 23: Reinwasserpermeabilität der gebrauchten Membranen

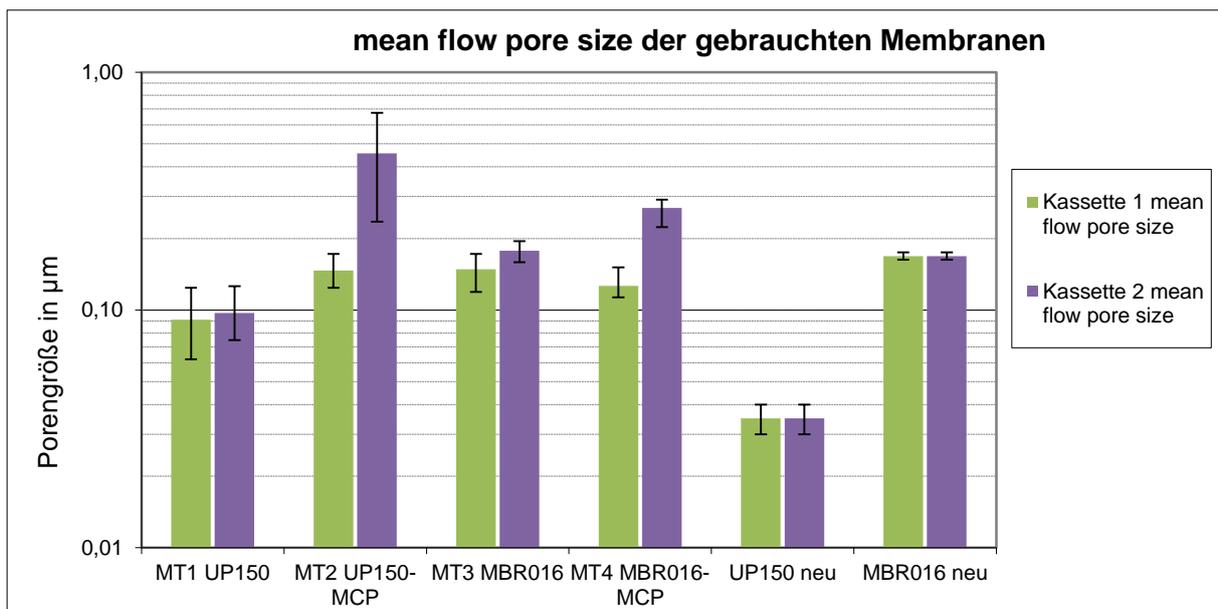


Abb. 24: Porengrößen der gebrauchten Membranen; mean flow pore size (mittlere Pore) bestimmt mittels Kapillarfluss-Porometrie (POROLUX 1000)

In Abb. 23 ist die Reinwasserpermeabilität der gereinigten Membranen dargestellt. Im Vergleich zum Neuzustand ist die Permeabilität bei allen gebrauchten Proben gestiegen. Bei der UP150 ohne Granulat kam es zu einer Verdoppelung der Permeabilität. In Kassette 1 der UP150 mit Granulat ergeben sich ähnliche Werte. Kassette 2 zeigt einen wesentlich stärkeren Anstieg, im Mittel um den Faktor 10. Bei der MBR016 Membran ohne Granulat ist der stärkste Anstieg der Permeabilität (ca. Faktor 20) zu verzeichnen. Mit Granulat ist die Permeabilität um den Faktor 8 gestiegen. In beiden Fällen ist kein Unterschied zwischen den Kassetten 1 und 2 feststellbar.

Bei der mittleren Porengröße (Abb. 24) ergibt sich bei der UP150 ein ähnliches Bild. Ohne Granulat steigt die Porengröße von  $0,04\mu\text{m}$  auf  $0,09\mu\text{m}$  bzw.  $0,15\mu\text{m}$  mit Granulat in Kasette 1. Kasette 2 des Moduls mit Granulat zeigt eine mittlere Porengröße im Bereich  $0,5\mu\text{m}$ . Die MBR016-Membran zeigt hier ein ähnliches Bild wie die UP150. Im Modul ohne Granulat und in Kasette 1 des Moduls mit Granulat liegen die Werte im Bereich  $0,13\text{-}0,18\mu\text{m}$ , was im Bereich des Neuzustands liegt. Kasette 2 des Moduls mit Granulat zeigt einen Anstieg auf  $0,27\mu\text{m}$ .

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden jeweils von Kasette 1 des Moduls ohne Granulat und von Kasette 1 und 2 des Moduls mit Granulat REM-Aufnahmen angefertigt. Die Ergebnisse sind in Abb. 25 bis Abb. 30 auf den folgenden Seiten dargestellt.

Die REM-Aufnahmen zeigen leichte Gebrauchsspuren an den Membranen ohne Granulat (Abb. 25). Die ersten Kassetten der Module mit Granulat zeigen im Vergleich bereits Veränderungen der Membranoberfläche (Abb. 26) und des Querschnitts (Abb. 29). Bei der UP150 ist in der Querschnittsaufnahme eine deutliche Komprimierung der obersten Membranschicht festzustellen. In Kasette 2 der mit Granulat betriebenen Module ist im Vergleich eine starke Veränderung der Oberfläche zu erkennen. Insbesondere bei der UP150 (Abb. 27) sind Öffnungen im Bereich mehrere  $\mu\text{m}$  vorhanden. Durch den Abrieb der obersten Trennschicht wurden zum Teil die großen Hohlräume der Unterstruktur freigelegt. Die MBR016 Membran zeigt ebenfalls Veränderungen. Die Oberflächenrauigkeit hat stark zugenommen. Es sind keine durchgehenden Öffnungen im  $\mu\text{m}$  Bereich erkennbar. Die Querschnittsaufnahmen deuten wie bei der UP150 auf eine Komprimierung der Membranstruktur hin.

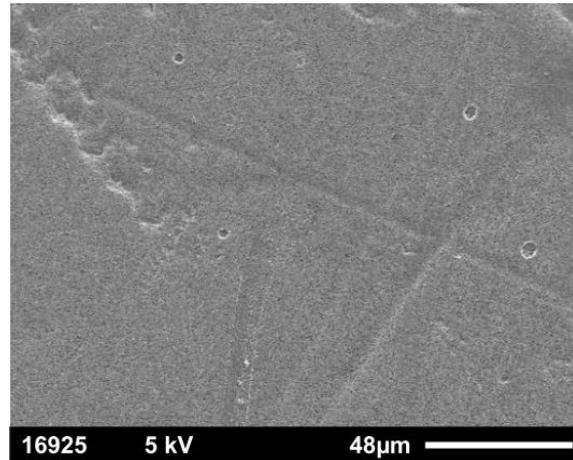
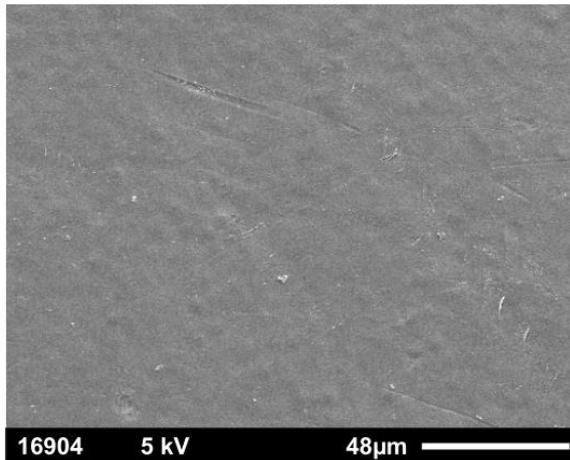


Abb. 25: REM Oberfläche UP150 (links) und MBR016 (rechts) ohne MCP – Kassette 1

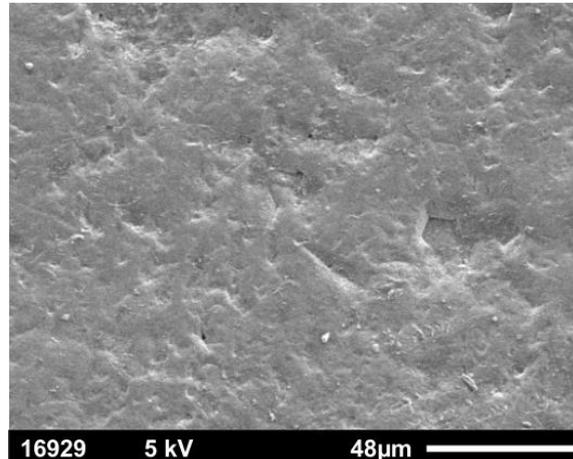
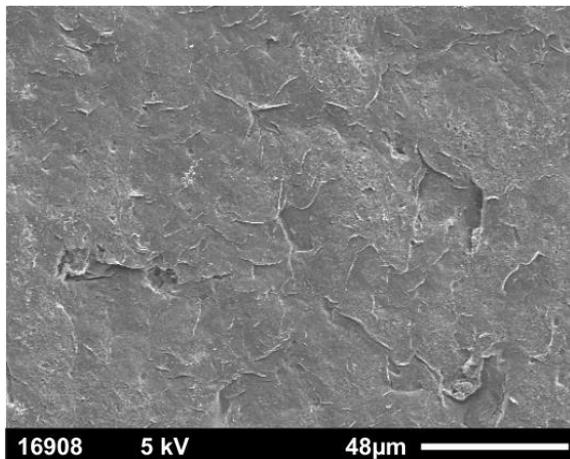


Abb. 26: REM Oberfläche UP150 (links) und MBR016 (rechts) mit MCP – Kassette 1

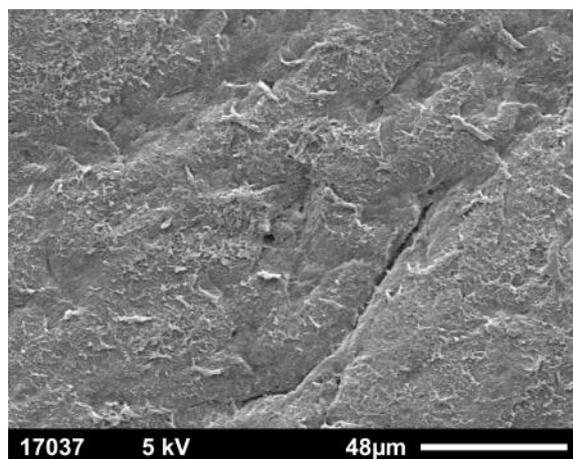
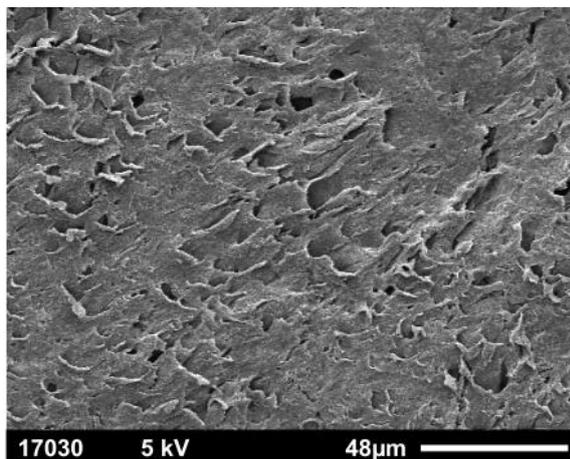


Abb. 27: REM Oberfläche UP150 (links) und MBR016 (rechts) mit MCP – Kassette 2

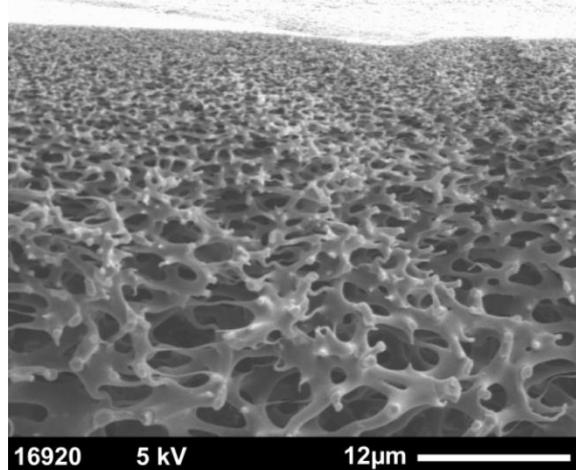
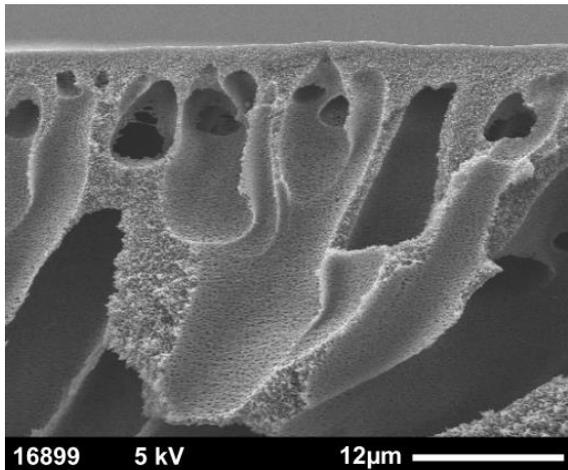


Abb. 28: REM Querschnitt, Module ohne MCP, Kassette 1: UP150 links, MBR016 rechts

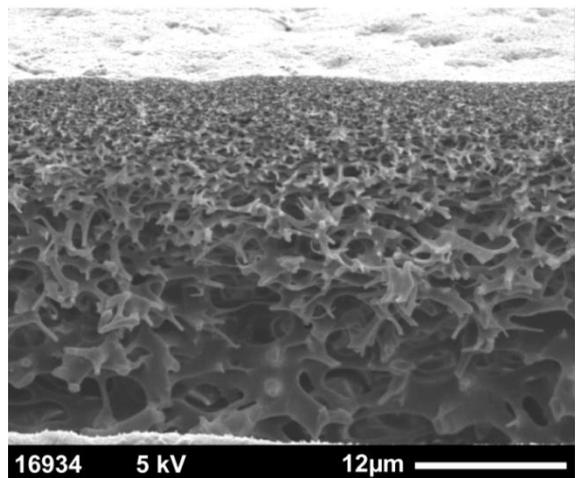
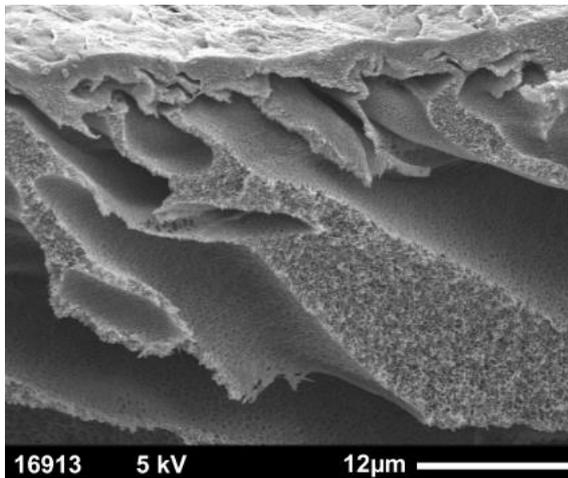


Abb. 29: REM Querschnitt, Module mit MCP, Kassette 1: UP150 links, MBR016 rechts

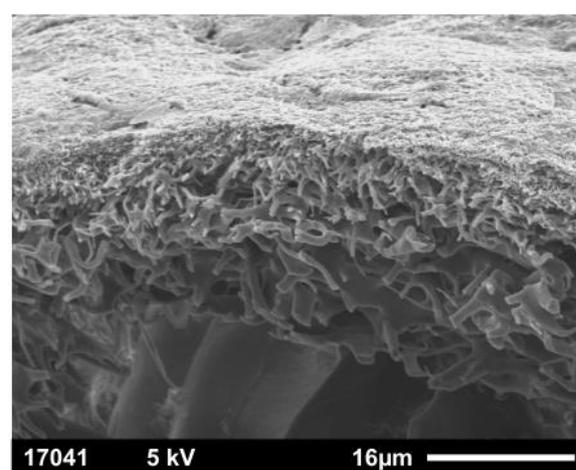
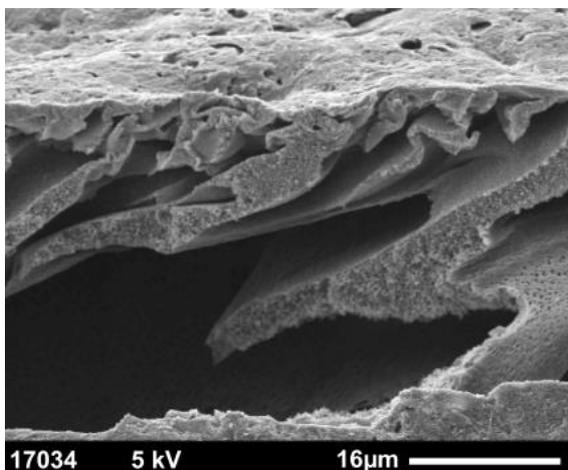


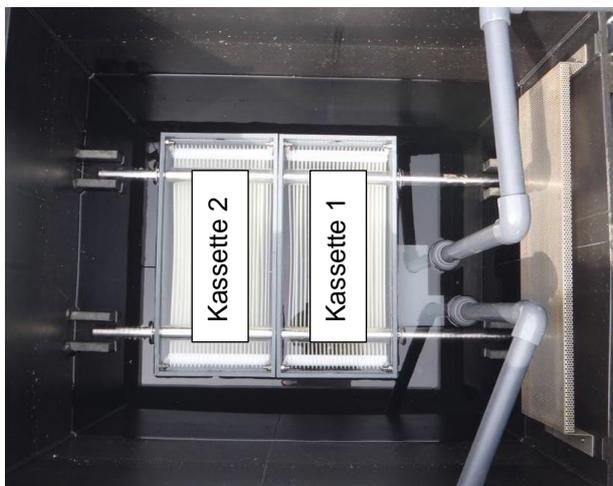
Abb. 30: REM Querschnitt, Module mit MCP, Kassette 2: UP150 links, MBR016 rechts (Ände-  
rung der Skala beachten)

## **Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse**

Auch bei den Membranen ohne Granulat kommt es zu Veränderungen der Membraneigenschaften im Vergleich zum Neuzustand. Diese sind zum einen auf mechanische Belastung durch Feststoffe im Belebtschlamm und zum anderen auf die chemische Belastung durch NaOCl zurückzuführen. Vor allem der chemische Angriff durch NaOCl führt zum Abbau und Auswaschen von Polymeradditiven, die für die Membranherstellung benötigt werden. Die Veränderungen machen sich durch eine steigende Reinwasserpermeabilität bemerkbar und treten deutlich bei der MBR016 Membran auf. Bei dieser Membran liegt die Permeabilität im Neuzustand mit ca. 600 L/(m<sup>2</sup> h bar) weit unter dem zu erwartenden Wert für diese Porengröße. Untersuchungen im Verlauf des Projekts haben gezeigt, dass die geringe Permeabilität durch in Wasser quellende Additive ausgelöst wird. Diese verbleiben bei der Membranherstellung leicht gebunden in der Membranstruktur haften. Geringe Mengen NaOCl führen dazu, dass diese leicht gebundenen Polymerreste gelöst und ausgespült werden. Die Permeabilität steigt in der Folge auf für Poren im Bereich von 0,16µm zu erwartende Werte von ca. 10000 L/(m<sup>2</sup> h bar). In Laboruntersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass der Permeabilitätsanstieg zuerst schnell verläuft und dann auf typische Veränderungen von Polymermembranen fällt. In weiteren Untersuchungen muss ermittelt werden, ob eine sehr hohe Anfangspermeabilität für den Betrieb von Vorteil ist. Für diesen Fall könnte im Fertigungsprozess ein zusätzlicher Schritt implementiert werden oder ein Spülprozess vor der Inbetriebnahme erfolgen.

Bei den Modulen mit MCP sind große Unterschiede zwischen Kassette 1 und 2 festzustellen. Während bei Kassette 1 im Vergleich zum Betrieb ohne Granulat relativ geringe Veränderungen auftreten, kommt es bei Kassette 2 zu wesentlich stärkeren Veränderungen. Vor allem bei der UP150 ist in Kassette 2 ein starker Anstieg der Porengröße und der Reinwasserpermeabilität vorhanden. Die REM-Aufnahmen verdeutlichen dies durch eine abgetragene Trennschicht. Auch bei der MBR-Membran ist anhand der Porengrößenbestimmung und der REM-Aufnahmen ein Unterschied zwischen Kassette 1 und 2 festzustellen. Im Vergleich zur UP150 sind die Unterschiede geringer. Die Reinwasserpermeabilität ist beim Granulatmodul der MBR Membran in beiden Kassetten weniger stark gestiegen als beim nicht mit Granulat betriebenen Modul. Anhand der REM-Aufnahmen könnte dies zum einen durch eine Verdichtung der obersten Membranschicht ausgelöst worden sein. Zum anderen war bei den Granulat betriebenen Modulen die Gesamtchemikalienbelastung geringer. Die Verdichtung bzw. Veränderung der obersten Membranschicht könnte auch der Grund für die gleiche Reinwasserpermeabilität bei unterschiedlicher Porengröße an Kassette 1 und 2 des Granulatmoduls sein. Bei der UP150 kommt es ebenfalls zu einer Verdichtung der Membranstruktur. Sie erfolgt jedoch nicht im obersten Bereich der Trennschicht, sondern im darunter liegenden von großen Hohlräumen geprägten Bereich. Diese Hohlräume werden zusammengedrückt, dabei wird zum Teil die obere, relativ dichte Trennschicht verletzt, so dass es zu einem Anstieg der Permeabilität und Porengröße kommt.

Die Unterschiede zwischen den Kassetten 1 und 2 der mit Granulat betriebenen Module lassen sich nur durch eine ungleichmäßige Granulatbelastung erklären. Der Bereich neben Kassette 1 (siehe Abb. 31 rechts) ist aufgrund der Anschlussleitungen für Betriebsluft und Permeat größer als neben Kassette 2. Die nach unten gerichtete Strömungsgeschwindigkeit der Zirkulation ist daher auf dieser Modultankseite geringer. Unterhalb des Moduls ist die Beschleunigung damit aller Voraussicht nach größer. Die Trägheit der Granulate führt dann dazu, dass diese vermehrt in Kassette 2 getrieben werden. Dadurch war die sehr hoch gewählte Granulatbelastung von bis zu  $15 \text{ kg/m}^3$  in Kassette 2 tatsächlich noch höher und führte zu einer deutlich stärkeren Belastung der Membranoberfläche als in Kassette 1.



**Abb. 31: Ansicht von oben auf Membranmodule**

In Abb. 21 sind die Ergebnisse zur Konzentration von Mikroorganismen im Permeat der Module aufgetragen. Die erhöhten Konzentrationen im UP150 Modul mit Granulat wurden höchstwahrscheinlich durch Kassette 2 verursacht. Kassette 1 zeigt auch leichte Veränderungen, es gibt jedoch keine Anzeichen auf häufige Membrandurchbrüche, die zur Passage der betrachteten Mikroorganismen führen könnten.

Allgemein zeigt die MBR016 Membran ein wesentlich gutmütigeres Verschleißverhalten als die UP150 Membranen. Trotz der deutlichen Veränderungen der Membranstruktur bleiben die Membraneigenschaften im für den MBR-Anwendungsfall geeigneten Bereich, was durch gute Ablaufwerte bestätigt wurde. Bei der UP150 Membran wurde vermutlich durch die sehr hohe Granulatbelastung, welche noch durch eine Ungleichverteilung des Granulats im Modul verstärkt wurde, die Belastungsgrenze erreicht. Bei Beachtung einer gleichmäßigen Modulanzströmung und einer geringeren Beladung sind jedoch auch bei der UP150-Membran ausreichend lange Betriebszeiten zu erwarten.

### 3.6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Um die Umsetzung der in diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse auf industrielle Anwendungen zu ermöglichen, sollen neben dem umwelttechnischen Gewinn auch marktwirtschaftliche Vorteile aufgezeigt werden. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse werden die für den Einsatz der neuen Technologie erforderlichen Kosten den möglichen Einsparungen an Betriebskosten gegenüber gestellt. Diese Analyse wurde bereits im Projektbericht für die 2. Projektphase anhand einer kommunalen Beispielabwasserbehandlungsanlage mit einem täglichen Zufluss von 2.000 m<sup>3</sup>/d durchgeführt. Im Folgenden werden die neuen Erkenntnisse der 3. Projektphase herangezogen und dieselbe Beispielanlage für die beiden Anwendungsfälle (1) Standard-MBR und (2) Granulat-MBR bemessen.

#### Basisdaten

Die Beispiel-MBR-Anlage hat eine Größenordnung von 2.000 m<sup>3</sup>/d mit einem typischen Peak Flow von 2·Q.

$Q_d = 2.000 \text{ m}^3/\text{d}$  (Durchschnittszufluss)

$Q_M = 167 \text{ m}^3/\text{h}$  (maximaler stündlicher Zufluss)

Die Analyse wird anhand der getesteten BIO-CEL<sup>®</sup> Module der Firma MICRODYN-NADIR durchgeführt. Zum Einsatz in dieser Größenordnung kommen Module vom Typen BC400F-C100-UP150 mit einer Membranfläche von 400 m<sup>2</sup> je Membranmodul.

#### Investitionskosten

##### Ermittlung der erforderlichen Membranfläche

Die erforderliche, zu installierende Membranfläche hängt direkt proportional vom Membranfluss ab. Kommunale MBR-Anlagen werden gemäß DWA-Arbeitsbericht **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** auf einen Spitzenzufluss von 25 L/(m<sup>2</sup>·h) bemessen. Bei einem Peak Faktor von 2 ergeben sich damit Durchschnittsflüsse von 12,5 L/(m<sup>2</sup>·h).

Bei der Betriebsweise in Projektphase 3 wurden keine höheren Flüsse in den MCP Modulen im Vergleich zu den Standard Modulen eingestellt. Die Betriebsergebnisse schließen nicht aus, dass im Vergleich höhere Flüsse oder Peak Flüsse in den MCP Modulen möglich wären. Sie deuten aber darauf hin, dass unter den gegebenen Randbedingungen (Abwasser, Belebtschlamm) höhere Flüsse häufigere Reinigungen erfordert hätten und somit der Vorteil des geringeren Chemikalienbedarfs nicht gegeben gewesen wäre. Für die folgende Betrachtung wird deshalb für beide Betriebsweisen dieselbe zu installierende Membranfläche angesetzt.

Für die Beispielanlage ergeben sich folgende erforderliche Membranflächen:

Standard-MBR: 12,5 L/(m<sup>2</sup>·h) → 6.667 m<sup>2</sup>

Granulat-MBR: 12,5 L/(m<sup>2</sup>·h) → 6.667 m<sup>2</sup>

MBR-Anlagen werden mindestens 2-straßig ausgelegt, sodass sich für die beiden Varianten folgende Werte ergeben:

2 Straßen mit jeweils 8 Modulen

Insgesamt: 16 Module á 400 m<sup>2</sup> → 6.400 m<sup>2</sup>

Mit dieser gewählten Membranfläche ergeben sich folgende Membranflüsse:

Peak Fluss: 26,1 L/(m<sup>2</sup>·h)

Durchschnittsfluss: 13,1 L/(m<sup>2</sup>·h)

Die Investitionskosten für die Membranmodule und der größte Teil der Installations- und Anlagentechnik sind für die vergleichende Betrachtung nicht relevant, da sie für beide Betriebsvarianten gleich ausfallen.

#### Einrichtungen zum Granulatrückhalt

Die Granulate sollen – wie in der Versuchsanlage angewendet – ausschließlich im Filtrationsbecken verweilen und zum Schutz der Pumpen und Messgeräte nicht in die verbleibende biologische Stufe gelangen. Daher muss eine Einrichtung zum Rückhalt der Granulate im Filtrationsbecken vorgesehen werden.

Aus den Erfahrungen dieses Projektes ist bekannt, dass eine Siebanlage aufgrund der Verstopfungsproblematik nur in Verbindung mit einer aktiven Siebbelüftung bzw. Siebüberströmung zuverlässig funktioniert. Die Investition für diese Vorrichtung beläuft sich aus neueren Erfahrungen von MICRODYN-NADIR in bereits umgesetzten Anlagen auf ca. 12.000 €.

#### Granulate

Für die Variante Granulat-MBR sind Granulate zur mechanischen Reinigung erforderlich. Die Erkenntnisse aus Phase 3 deuten darauf hin, dass ein volumenspezifischer Füllgrad von 8 kg/m<sup>3</sup> ausreicht. Die spezifischen Kosten des Granulates betragen 7,5 €/kg.

Somit ergeben sich bei einem Beckenvolumen von 155 m<sup>3</sup> Investitionskosten von 9.300 €.

#### Zusammenfassung: Kostenrelevante Unterschiede im Invest

Unterschiede im Invest ergeben sich ausschließlich bei der Vorrichtung zum Rückhalt der Granulate und den Granulaten selbst.

	Standard-MBR	Granulat MBR
Rückhaltesystem	-	12.000€
Granulate	-	9.300€
Summe	-	21.300€

Aufgrund der gleichen Größe und Anlagentechnik der beiden Betriebsvarianten ergeben sich für die Granulat-Betriebsvariante zusätzliche Investitionskosten.

## **Betriebskosten**

### Energiebedarf Granulatrückhaltesystem

Der Unterschied der beiden Varianten hinsichtlich des Energiebedarfs besteht aufgrund der gleichen installierten Membranflächen nur im Luftbedarf für das Granulatrückhaltesystem. Der Energiebedarf für Gebläse ergibt sich nach Pöpel [2] zu:

$$E = 5,4 \text{ Wh}/(\text{m}^3_{\text{Luft}} \cdot \text{m}_{\text{Einblastiefe}})$$

Bei dem Granulatrückhaltesystem wird bei von MN realisierten Anlagen ein Luftbedarf von 5 m<sup>3</sup> Luft/h für ein BC400-Modul angesetzt. Die anzusetzende Einblastiefe liegt bei ca. 2,0 m.

$$\rightarrow E_{\text{Sieb}} = 5,4 \text{ Wh}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}) \cdot 16 \text{ BC400} \cdot 5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{BC400} \cdot 2,0 \text{ m} / 1.000 \text{ W/kW} = 0,86 \text{ kWh/h}$$

Daraus ergibt sich bei 20 h/d ein Jahresenergiebedarf von etwa 6.300 kWh/a.

Es ergeben sich bei üblichen Energiepreisen von 0,12 €/kWh Energiekosten für den Betrieb der MCP-Siebe von 757 €/a.

### Granulatersatzkosten

Die Ergebnisse aus dem Projekt und Erfahrungen von realisierten Anlagen deuten auf keinen vorzeitigen Verschleiß des Granulats hin. Es können geringe Verluste bei intensiven Reinigungen der Module oder der Filterbecken vorkommen. Die Wiederbeschaffungszeit der Granulate wird auf 5 Jahre angesetzt. Die Granulatersatzkosten belaufen sich auf 1.860 €/a.

### Chemikalienbedarf

#### *Zwischenreinigungen*

Die übliche Zwischenreinigung von MBR Modulen wird in Abhängigkeit von der Abwasserqualität in Abständen von wenigen Tagen bis zu mehreren Wochen durchgeführt. Für kommunale Anlagen hat sich ein Zyklus von 2 Wochen für eine alkalische Zwischenreinigung mit Natriumhypochlorit bewährt. Zudem werden die Membranen 2...4 mal pro Jahr mit Zitronensäure rückgespült. Die MCP Straßen können nach den Ergebnissen von Phase 3 mit 50% der Reinigungen auskommen. Mit spezifischen Kosten von 0,30 €/L für Natriumhypochlorit und 0,75 €/L für Zitronensäure ergeben sich folgende Mengen und Kosten:

	Standard-MBR	Granulat-MBR
Natriumhypochlorit	3200 L/a	1600 L/a
Zitronensäure	640 L/a	320 L/a
Jahreskosten	1.440 €/a	720 €/a

### *Intensivreinigungen*

Bei der Variante Standard-MBR ist auf Basis derzeitiger Erfahrungen eine jährliche Intensivreinigung vorzusehen. Dafür wird das Filtrationsbecken geleert und mit Chemikalien gefüllt. Für den Granulatbetrieb müsste auch hier eine Halbierung der Häufigkeit erreichbar sein, so dass die Intensivreinigung noch alle 2 Jahre anfällt.

Für die Intensivreinigung, die üblicherweise manuell durchgeführt wird, ist mit einem Arbeitszeitbedarf von etwa 3 Stunden je Modul zu rechnen. Daher fallen bei der Variante Standard-MBR zusätzlich Personalkosten in Höhe von 2.880 €/a an (Basis 60 €/h).

Es ergeben sich Jahreschemikalienmengen und -kosten von:

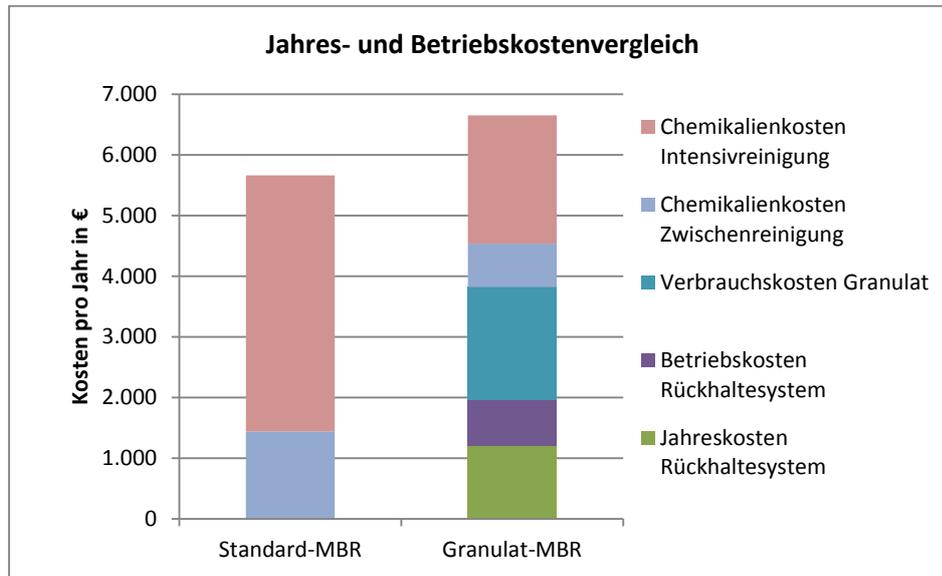
	Standard-MBR	Granulat-MBR
Natriumhypochlorit	1.050 L/a	525 L/a
Zitronensäure	1.370 L/a	685 L/a
Arbeitskosten	2.880 €/a	1.440 €/a
Jahreskosten	4.220 €/a	2.110 €/a

### Membranersatzkosten

Die Ergebnisse der Membranentwicklung und der Langzeitversuche an der Pilotanlage zeigen, dass durch die neue entwickelte Membran beim Granulatbetrieb keine verkürzten Membranstandzeiten zu erwarten sind. Die auftretenden Membranveränderungen sind unkritisch für den Einsatz in MBR-Anlagen. In Verbindung mit dem geringeren Chemikalienbedarf beim MCP Betrieb sollte deshalb eine vergleichbare Standzeit möglich sein. Für die weitere vergleichende Betrachtung sind dadurch die Membranersatzkosten nicht relevant.

### Zusammenfassung: Kostenrelevante Unterschiede

Die kostenrelevanten Unterschiede der beiden Betriebsweisen sind zusammengefasst in Abb. 32 dargestellt. Die Betrachtung zeigt keine Betriebs- und Jahreskostenvorteile für die Granulat-Betriebsvariante. Die Annahmen der Jahreskosten für das Granulat und das Granulatrückhaltesystem sind konservativ. Aufgrund dessen und der relativ geringen absoluten Kostendifferenz sind die Betriebskostenunterschiede als nicht relevant einzustufen. Der geringe Chemikalienverbrauch der Granulat-Betriebsvariante wird durch die Kosten für das Granulat und das Rückhaltesystem kompensiert.



**Abb. 32: Betriebskostenvergleich**

Ohne die Berücksichtigung eines höheren mittleren Flusses bzw. Peakflusses ist keine Reduzierung der benötigten Membranfläche möglich. Dadurch ergeben sich auch keine Kostenvorteile durch geringeren Energieverbrauch aufgrund der geringeren Membranfläche. Im Vergleich zu den Membranersatz- und Energiekosten für die Crossflow Belüftung ist eine Verringerung der Reinigungschemikalien aufgrund der vergleichsweise kostengünstigen Chemikalien wirtschaftlich nicht interessant. Sofern durch den Chemikalieneinsatz nicht zusätzliche Einleitgebühren anfallen, ist es wirtschaftlich nicht interessant den Chemikalienverbrauch der Reduzierung der Membranfläche vorzuziehen.

Der wirtschaftlich interessantere Granulat-Betrieb würde demnach einem Betrieb mit höheren spezifischen Flüssen bei nicht reduziertem Chemikalienverbrauch entsprechen. Unter Annahme des Einsatzes der neu entwickelten Membran ist nicht mit höheren Membranersatzkosten zu rechnen, so dass bereits geringe Flusserhöhungen zu entsprechend geringeren Installationsflächen und somit zu geringeren Energiekosten führen. Ein solches Szenario wurde bereits im letzten Projektbericht beschrieben und wird deshalb nicht erneut dargestellt.

Ökologisch betrachtet bietet das Wirbelschichtverfahren einen deutlichen Vorteil gegenüber dem konventionellen Verfahren. Unter denselben Randbedingungen konnte mit der zirkulierenden Wirbelschicht ein Betrieb mit 50% weniger Chemikalien erreicht werden.

## 4 Fazit

Im Laufe des Projekts konnte die Wirbelschicht erfolgreich in das getauchte MBR-Verfahren der Firma MICRODYN-NADIR implementiert werden. Gemeinsam mit der Firma BASF Polyurethanes wurde ein speziell für diesen Einsatzzweck geeignetes und auch wirtschaftlich sinnvolles Granulat entwickelt und erfolgreich zur Foulingminimierung eingesetzt. Als einzig zuverlässiges Rückhaltesystem der Granulate hat sich ein belüftetes Spaltsieb erwiesen. Dieses Sieb kann aufgrund seiner geringen erforderlichen Siebfläche leicht auch in bestehenden Anlagen nachgerüstet werden. Regelmäßige Auswertungen der Granulatanzahl, die sich in der Zirkulationsströmung befindet, zeigen den stabilen Wirbelschichtbetrieb. Auch nach Betriebspausen lassen sich die Granulate gut aufwirbeln.

Der Einsatz der Wirbelschichttechnologie lässt keinerlei negative Auswirkungen auf die Belebtschlammigenschaften erkennen. Zusätzlich wurde ein gänzlich neuer Membrantyp entwickelt der sowohl in Labor- als auch im Anlagenbetrieb ein sehr gutmütiges Verschleißverhalten zeigt und somit lange Betriebszeiten gewährleisten kann.

Das Ziel eines langfristig chemikalienfreien Betriebs konnte nicht erreicht werden. Das neue Verfahren zeigt in Verbindung mit der neu entwickelten Membran trotzdem großes Chemikalien-Reduzierungspotenzial. Für weitergehende Untersuchungen muss speziell auf eine gleichmäßige Moduldurchströmung und somit auf die Modulaufstellung und Anordnung im Becken geachtet werden. Die ungleichmäßige Durchströmung hat wahrscheinlich dazu geführt, dass der Wirbelschichtbetrieb nicht sein volles Potenzial entfalten konnte, da eine Hälfte des Moduls nur sehr schwach mit Granulat beaufschlagt wurde.

Bei der UP150 Membran wurde durch die sehr hohe Granulatbeladung, welche durch die Ungleichverteilung des Granulats im Modul verursacht wurde, die Belastungsgrenze erreicht. Das Modul zeigt im Vergleich zu den anderen Modulen etwas höhere Konzentrationen von Mikroorganismen im Ablauf. Die Grenzwerte der Badegewässerrichtlinie konnten jedoch eingehalten werden. Bei Beachtung einer gleichmäßigen Modulanströmung und sind auch bei der UP150-Membran ausreichend lange Betriebszeiten zu erwarten.

Trotz der beschriebenen Nachteile scheint die Bestimmung auf Mikroorganismen die praktikabelste aller Integritätsmethoden darzustellen, da für viele Anwendung zur Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser Anforderungen an bestimmte Mikroorganismen gestellt werden. Eine neue Möglichkeit, die sich erst gegen Ende des Projekts ergeben hat, besteht in der Durchflusszytometrie, welche zum Teil bereits in der Trinkwasseranalytik eingesetzt wird. Hierbei kann in einem automatisierbaren Verfahren das Abwasser vor Ort spezifisch auf Mikroorganismen untersucht werden. MICRODYN NADIR plant hierzu eine konkrete Weiterentwicklung im Rahmen neuer Projekte.

Ökologisch betrachtet bietet das Wirbelschichtverfahren einen deutlichen Vorteil gegenüber dem konventionellen Verfahren. Unter denselben Randbedingungen konnte mit der zirkulierenden Wirbelschicht ein Betrieb mit 50% weniger Chemikalieneinsatz erreicht werden.

---

Der wirtschaftlich interessantere Granulat-Betrieb würde jedoch einem Betrieb mit höheren spezifischen Flüssen bei gleichem Chemikalienverbrauch entsprechen. Unter Annahme des Einsatzes der neu entwickelten Membran ist nicht mit höheren Membranersatzkosten zu rechnen, so dass bereits geringe Flusserhöhungen zu entsprechend geringeren Installationsflächen und somit zu geringeren Energiekosten führen. Die möglichen Flussteigerungen waren nicht das Ziel des Projekts, sind aber von Interesse und werden in weiter untersucht werden.

---

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] DWA (2005) Membranbelevungsverfahren - 2. Arbeitsbericht des DWA-Fachausschusses KA-7 "Membranbelevungsverfahren". Korrespondenz Abwasser(47) 10, 1547-1553
- [2] Pöpel, H. J.: Grundlagen zur Optimierung der Belüftung und Energieeinsparung, Verein zur Förderung des Institutes WAR der Technischen Universität Darmstadt, Band 23, 5-31, 1985

## 6 Anhang

