

Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik
an der RWTH Aachen e.V. (PIA e.V.)

**Entwicklung und Praxistests von Membranmodulen
zur Überschussschlamminimierung für die
stoffstromorientierte Abwasserentsorgung
auf Flusskreuzfahrtschiffen**

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt,
gefördert unter dem AZ 33193/01 & /02
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Verfasser
Dipl.-Ing. Arndt Kaiser

Institutsleitung
Dr.-Ing. Elmar Dorgeloh

Aachen, November 2020

Bezugsmöglichkeit:

Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik
an der RWTH Aachen e.V. (PIA e.V.)

Mies-van-der Rohe-Straße 1; 52074 Aachen

Telefon: +49(0)241-75 082 13

E-Mail: kaiser@pia.rwth-aachen.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



AZ	33193/01 & /02	Referat	23	Fördersumme	295.484 €
----	-------------------------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Entwicklung und Praxistests von Membranmodulen zur Überschuss-
schlammminimierung für die stoffstromorientierte Abwasserentsorgung
auf Flusskreuzfahrtschiffen**

Stichworte Abwasser, Verfahren, Verfahrenstechnik, Prozesse, Membran, Schiff

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
44 Monate	28.09.2016	30.04.2020	2

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik an der RWTH Aachen e.V. Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen	Tel:	0241 75082-13
		Fax:	0241 75082-29
		Projektleitung	
		Dipl.-Ing. Arndt Kaiser	
		Bearbeiter	
		Dipl.-Ing. Arndt Kaiser	

Kooperationspartner Martin Membrane Systems AG
Dipl.-Ing. Mark Grigo
Von-Thünen-Str. 1-4
19071 Brüsewitz bei Schwerin

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ziel des Projektes war es, ein Membranmodul zu entwickeln, mit dem die Menge an Überschussschlamm, der beim Betrieb von Bordkläranlagen auf Flusskreuzfahrtschiffen anfällt, durch Eindickung zu minimieren. Auf Flusskreuzfahrtschiffen werden die an Bord entstehenden häuslichen Abwässer zur Einhaltung umweltgesetzlicher Bestimmungen der Binnenschifffahrt (CDNI-Übereinkommen) mittels Bordkläranlagen behandelt. Das behandelte Abwasser wird in die Wasserstraße eingeleitet. Der beim Behandlungsprozess entstehende Klärschlamm muss zwischengespeichert und intervallweise an Entsorgungsfahrzeuge an Land abgegeben werden. Eine Minimierung der Schlammengen durch Eindickung, respektive durch Abzug der Wasserphase, führt somit zu einer deutlichen Verringerung von Tankwageneinsätzen und gleichzeitig zu Einsparungen von Entsorgungskosten.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Entwicklung des Membranmoduls erfolgte unter Einsatz einer Versuchsanlage an Land und einer Pilotanlage an Bord eines Flusskreuzfahrtschiffes. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf Leistungsdaten des Moduls und auf die Reduktion der Klärschlammengen (Eindickungsgrad). Die Untersuchungen erfolgten jeweils über mehrmonatige Zeiträume, um Langzeiterfahrungen zu Betriebsstabilitäten und Dauerhaftigkeiten der eingesetzten Materialien zu gewinnen.

Der Praxisbetrieb an Bord wurde technisch und wissenschaftlich begleitet. Die Begleitungen umfassten regelmäßige Vor-Ort-Kontrollen und eine Beprobung aller relevanten Messstellen in den Zu- und Abläufen der Bordkläranlage und des Schlammstammeltanks.

Eine essentielle Frage bestand im weiteren Umgang mit dem Filtrat des Eindickungsprozesses: Ist eine direkte Einleitung in die Wasserstraße möglich oder eine Rückführung in den Behandlungsprozess erforderlich?

Ergebnisse und Diskussion

Die Landversuche trugen zu einem vertieften Verständnis von Betriebsabläufen und zu Betriebserfahrungen bei. Sie lieferten wichtige Erkenntnisse zu technisch möglichen und wirtschaftlich sinnvollen Betriebsparametern. Der Klärschlamm konnte von im Mittel 12 g/l auf bis zu 90 g/l eingedickt werden. Im Rahmen des Pilotbetriebs an Bord konnte die während einer Fahrtsaison an Land zu entsorgende Schlammmenge um ca. 60% reduziert werden. Der maximal gemessene Feststoffgehalt im bordseitigen Schlammreaktor lag bei 34 g/l. Auf Basis aufgezeichneter Daten ließ sich der maximale Feststoffgehalt zu ca. 64,0 g/l bestimmen.

An Bord des Flusskreuzfahrtschiffes konnte ein durchgängig stabiler Betriebszustand über den gesamten Zeitraum einer Fahrtsaison aufrechterhalten werden. Die Pilotanlage war über den gesamten Zeitraum von 238 Tagen dauerhaft im Betrieb. Es kam zu keinem technischen Defekt oder Ausfall der Membranmodule. Ein signifikanter Leistungsabfall des Filtrationsprozesses konnte auch am Ende der Betriebsdauer nicht festgestellt werden.

Die im Vorfeld geplante technische Ausführung (Anlagendesign) der Membranmodule und Membranfilter erwies sich für einen Bordeinsatz als robust und geeignet. Die frei wählbare Parametrierung der wesentlichen Betriebsparameter wie Filtratfluss, transmembrane Druckdifferenz und Filtrationsintervall ermöglichte eine Anpassung an unterschiedliche Betriebs- und Belastungszustände. Der Prozess der bordseitigen Schlammeindickung ist auf Basis der Projektergebnisse als beherrschbar einzustufen. Weitere Optimierungsschritte lassen sich zukünftig auf Grundlage von Praxiserfahrungen umsetzen.

Die Untersuchungen zum spezifischen Klärschlammfall ergaben eine Spannbreite von 2,9% bis 3,8% bezogen auf die behandelte Abwassermenge. Die Größenordnung des im Vorgängerprojekt (DBU Az. 27643) hergeleiteten Durchschnittswerts von 3,0% wird dadurch bestätigt. Kritisch anzumerken ist hierbei der Betrachtungsansatz von Volumenströmen und nicht von feststoffbezogenen Massenströmen. Der spezifische Klärschlammfall kann in Abhängigkeit getroffener Maßnahmen zur Eindickung durch zusätzlich zu entsorgende Spülwässer aus der Reinigung von Schlammstammeltanks deutlich höheren volumenbezogenen Schwankungsbreiten unterliegen.

Die direkte Einleitung von Filtraten des Eindickungsprozesses in die Wasserstraßen führt grundsätzlich zu einer Erhöhung von Einleitfrachten. Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse ließen sich, unter Berücksichtigung üblicher Schwankungsbreiten in Bordkläranlagenabläufen, jedoch keine signifikanten Erhöhungen ermitteln.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen von Publikationen, Vorträgen und bilateralen Arbeitstreffen mit Akteuren der Binnenschifffahrt sowie interessierten Stakeholdern der Siedlungswasserwirtschaft vorgestellt. Im Besonderen wurden Wasserschutzpolizeien über das Forschungsvorhaben informiert, die im Rahmen der CDNI-Gesetzgebung Kontroll- und Überwachungsaufgaben zu Bordkläranlagen übernehmen.

Fazit

Die Produkt- bzw. Marktreife der technischen Bauteile wurden im Rahmen des Projektes erreicht. Es konnte gezeigt werden, dass das Membranmodul zukünftig einen entscheidenden Beitrag zur Optimierung der bordseitigen, autarken Abwasserbehandlung inklusive der Reststoffentsorgung leisten kann.

Die Entsorgung von Klärschlämmen ist auf Grundlage der gesetzlichen Bestimmungen nachweislich. Im Zuge großtechnischer Realisierungen werden daher zukünftig Dokumentationspflichten zum Betrieb festgelegt werden müssen, um den Verbleib des Klärschlammes anhand von Nachweisen lückenlos und transparent dokumentieren und belegen zu können.

Eine Rückführung des Filtrates in den Behandlungsprozess der Bordkläranlage sollte verbindlich festgelegt werden. Durch die hierdurch geschaffene interne Rezirkulation entfällt die Notwendigkeit, die Qualität des Filtrates separat überwachen zu müssen. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Rückführung zu keiner Überfrachtung von biologischen Systemen von Bordkläranlagen führen wird.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung	2
2.1 Anmerkung zum Projekt-Akronym „SLIM“.....	2
2.2 Projekt-Veranlassung	2
2.3 Projekthinhalte und Untersuchungsziele.....	5
2.4 Geplante Vorgehensweise im Projekt.....	7
2.5 Projektverlauf	7
3 Material und Methoden	9
3.1 Überblick zum Untersuchungsumfang	9
3.2 Landversuche.....	10
3.2.1 Beschreibung der Versuchsanlage	10
3.2.2 Beschreibung der Versuche.....	11
3.3 Bordbetrieb Pilotanlage	13
3.4 Referenzmessungen an Bord von Flusskreuzfahrtschiffen	15
4 Ergebnisse	16
4.1 Betrieb Versuchsanlage	16
4.1.1 Testphase 1.....	16
4.1.2 Testphase 2a.....	19
4.1.3 Testphase 2b.....	20
4.2 Betrieb Pilotanlage	23
4.2.1 Betriebsergebnisse in der Fahrtsaison 2018	23
4.2.2 Betriebsergebnisse in der Fahrtsaison 2019	26
4.3 Ergebnisse Referenzmessungen.....	28
4.3.1 Zulaufmessungen	28
4.3.2 Ablaufmessungen.....	30
4.3.3 Untersuchungen zum Schlammanfall	32
5 Diskussion der Ergebnisse	33
5.1 Erreichter technischer Reifegrad SLIM-Anlage.....	33
5.2 Ablaufqualität SLIM-Filtrat	33
5.3 Plausibilität der Referenzmessungen	35
5.3.1 Abwasserzusammensetzung im Zulauf von Bordkläranlagen	35
5.3.2 Klärschlammanfall	36

6	Fazit und Empfehlungen.....	37
7	Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse.....	41
	Literatur	42
	Anhang	A-1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Forschungsziele des Projektes	6
Abbildung 3-1:	Untersuchungsgegenstände	9
Abbildung 3-2:	PIA-Landversuchsanlage (Konfiguration „SLIM“)	10
Abbildung 3-3:	Testkonfigurationen „SLIM“-Reaktor Landversuchsanlage	12
Abbildung 3-4:	Verfahrensschema Bordkläranlage	13
Abbildung 3-5:	Verfahrensschema SLIM-Reaktor	14
Abbildung 3-6:	Detailaufnahmen SLIM-Membranfilter und Filtratablaufleitung mit PN-Stelle	14
Abbildung 4-1:	Feststoffmassen	17
Abbildung 4-2:	Gegenüberstellung gemessener TS-Gehalte im durchmischten Reaktorbereich zu theoretischem TS-Verlauf unter der Annahme eines voll durchmischten Reaktors	19
Abbildung 4-3:	Gegenüberstellung gemessene TS-Gehalte in Testphase 2b zu theoretischem TS-Verlauf in einem voll durchmischten Reaktor	21
Abbildung 4-4:	Verlauf der Filtrationsleistung während des Praxisbetriebs im Zeitraum September/Oktober 2018	25
Abbildung 4-5:	Statistische Kenndaten zu Konzentrationsmessungen in den Jahren 2016 und 2018 im Zulauf einer Bordkläranlage	29
Abbildung 4-6:	Referenzmessungen im Ablauf von Bordkläranlagen	31
Abbildung 5-1:	Gegenüberstellung von statistischen Kenndaten verschiedener Messkampagnen zu gemessenen CSB-Konzentrationen im Zulauf der biologischen Behandlungsstufe von Bordkläranlagen	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2–1:	Übersicht Projektverlauf (nach Jahreszahlen).....	8
Tabelle 3–1:	Überblick zu Referenzmessungen/Untersuchungen	15
Tabelle 4–1:	Volumen- und Feststoffbilanzierung SLIM-Reaktor	17
Tabelle 4–2:	Übersichtstabelle Analyseergebnisse	18
Tabelle 4–3:	Statistische Kenndaten zu den untersuchten Filtraten in Testphase 2a ..	20
Tabelle 4–4:	Statistische Kenndaten zu den untersuchten Filtraten in Testphase 2b ..	22
Tabelle 4–5:	Pilotbetrieb an Bord des Flusskreuzfahrtschiffes in der Fahrtsaison 2018	24
Tabelle 4–6:	Bilanzierung der Klärschlammentsorgung in der Fahrtsaison 2019.....	26
Tabelle 4–7:	Statistische Kenndaten zu gemessenen Abwasserparametern im Ablauf Bordkläranlage und SLIM-Filtrat während der Fahrtsaison 2019.....	27
Tabelle 4–8:	Statistische Kenndaten zum jährlichen Klärschlammanfall1)	32
Tabelle 5–1:	Gegenüberstellung gemittelter Ablaufkonzentrationen	34
Tabelle 7–1:	Chronologie zur Dissemination der Projektergebnisse	41

Abkürzungsverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Erläuterung
<u>Abwasserparameter</u>		
AFS	mg/l	Abfiltrierbare Stoffe, Schwebstoffe, suspendierte Stoffe nach Filtration über Filter mit 0,45 µm Porengröße
BSB ₅	mg/l	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
CSB	mg/l	Chemischer Sauerstoffbedarf
N _{ges}	mg/l	Gesamt-Stickstoff
NH ₄ -N	mg/l	Ammonium-Stickstoff
NO ₃ -N	mg/l	Nitrat-Stickstoff
P _{ges}	mg/l	Gesamt-Phosphor
TS	mg/l	Trockensubstanzgehalt
oTS	%	organischer Trockensubstanzanteil
MTS	kg	Feststoffmasse

Abkürzungen

CDNI		Übereinkommen über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt (CDNI) vom 9. September 1996
PN		Probenahme
SLIM		Excess <u>s</u> ludge minimization aboard river cruise ships by using new developed and <u>i</u> nnovative <u>m</u> embrane modules Erläuterung siehe Kapitel 2.1
ÜSS		Überschussschlamm
V	m ³	Volumen
ZKR		Zentralkommission der Rheinschifffahrt

1 Zusammenfassung

Auf Flusskreuzfahrtschiffen werden die an Bord entstehenden häuslichen Abwässer zur Einhaltung umweltgesetzlicher Bestimmungen der Binnenschifffahrt mittels Bordkläranlagen behandelt. Das behandelte Abwasser wird in die Wasserstraße eingeleitet. Der beim Behandlungsprozess entstehende Klärschlamm muss an Bord zwischengespeichert und intervallweise an Land abgegeben werden.

Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es, ein Membranmodul zu entwickeln, mit dem die Menge an Überschussschlamm durch Eindickung minimiert werden kann. Eine Minimierung der Schlammengen führt zu einer deutlichen Verringerung von Tankwageneinsätzen bei der Landentsorgung und damit zu Einsparungen von Entsorgungskosten.

Die Entwicklung des Membranmoduls erfolgte unter Einsatz einer Versuchsanlage an Land und einer Pilotanlage an Bord eines Flusskreuzfahrtschiffes. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf Leistungsdaten des Moduls und auf die Reduktion der Klärschlammengen (Eindickungsgrad). Sie erfolgten jeweils über mehrmonatige Zeiträume, um Langzeiterfahrungen zu Betriebsstabilitäten und Dauerhaftigkeiten der eingesetzten Materialien zu gewinnen.

Die Landversuche haben zu einem vertieften Verständnis von Betriebsabläufen und zu Betriebserfahrungen beigetragen. Sie haben wichtige Erkenntnisse zu technisch möglichen und wirtschaftlich sinnvollen Betriebsparametern geliefert. Der Klärschlamm konnte von im Mittel 12 g/l auf bis zu 90 g/l eingedickt werden. Im Rahmen des Pilotbetriebs an Bord konnte die während einer Fahrtsaison an Land zu entsorgende Schlammmenge um ca. 60% reduziert werden.

Die Produkt- bzw. Marktreife der technischen Bauteile ist im Rahmen des Projektes erreicht worden. Es konnte gezeigt werden, dass das Membranmodul zukünftig einen entscheidenden Beitrag zur Optimierung der bordseitigen, autarken Abwasserbehandlung inklusive der Reststoffentsorgung leisten kann.

Die Entsorgung von Klärschlämmen ist auf Grundlage der gesetzlichen Bestimmungen nachweispflichtig. Im Zuge großtechnischer Realisierungen sind daher zukünftig Dokumentationspflichten zum Betrieb festzulegen, um den Verbleib des Klärschlammes anhand von Nachweisen transparent und lückenlos dokumentieren und belegen zu können.

2 Einleitung

2.1 Anmerkung zum Projekt-Akronym „SLIM“

Im Rahmen der ersten Projektveröffentlichungen wurde dem Forschungsprojekt das Akronym „SLIM“ zugeordnet, das für den internationalen Flusskreuzfahrtenmarkt aus dem Projekttitel abgeleitet wurde:

„Excess sludge minimization aboard river cruise ships
by using new developed and innovative membrane modules“

Der Begriff „SLIM“ soll, bezogen auf den Betriebsaufwand, prägnant für eine „schlanke Abwasserentsorgung“ stehen. Dem entsprechend wurden für den optimierten Schlamm- und Schlammendickreaktor sowie den modifizierten Schlammfiltrations-Membranmodul die folgenden Begriffe eingeführt:

SLIM-Membranmodul/ SLIM-Membranfilter	Membranmodul/-filter, die für die Eindickung von Überschuss- schlamm im Rahmen des Projektes entwickelt wurde.
SLIM-Reaktor	Schlammstammeltank der zur Eindickung des Überschuss- schlammes mit einem SLIM-Membranfilter aufgerüstet wurde.

2.2 Projekt-Veranlassung

Die Entsorgung von Schiffsbetriebsabfällen von Flusskreuzfahrtschiffen, die auf europäischen Wasserstraßen verkehren, wird durch das ÜBEREINKOMMEN ÜBER DIE SAMM- LUNG, ABGABE UND ANNAHME VON ABFÄLLEN IN DER RHEIN- UND BINNENSCHIFF- FAHRT maßgeblich bestimmt. Die Bezeichnung dieses sogenannten Abfallübereinkommens lautet **CDNI**, abgeleitet aus dem Titel in französischer Sprache: „*Convention relative à la col- lecte, au dépôt et à la réception des déchets survenant en navigation rhénane et intérieure*“. (CDNI, 2020)

Das CDNI wurde als internationaler Beitrag der Binnenschifffahrt zur Entlastung der Umwelt von den Vertragsstaaten Deutschland, Belgien, Frankreich, Luxemburg, Niederlande und der Schweiz in der Überzeugung erarbeitet, dass zum Umweltschutz international abgestimmte, einheitliche Regelungen getroffen werden müssen, um Wettbewerbsverzerrungen zu vermei- den. Der Vertrag zu dem Übereinkommen wird von der Zentralkommission für die Rhein- schifffahrt (ZKR) verwahrt. Das Übereinkommen wurde 1996 ratifiziert und ist im November 2009 in Kraft getreten.

Das Übereinkommen und dessen Anwendungsbestimmungen sehen für die Binnenschifffahrt ein generelles Einleitverbot in Oberflächengewässer vor und enthalten detaillierte

Vorschriften zur Vermeidung und Behandlung von Schiffsbetriebsabfällen und -abwässern sowie zur Art und Weise ihrer Abgabe an Land.

Die Entsorgung häuslicher Abwässer auf Flusskreuzfahrtschiffen kann wahlweise durch eine Zwischenspeicherung an Bord mit Abgabe an Entsorgungsstellen zur weiteren Behandlung an Land oder durch den Einsatz von bordseitigen Abwasserbehandlungsanlagen, sogenannten Bordkläranlagen, erfolgen. Im Sinne des CDNI umfasst der Begriff "häusliches Abwasser" Abwasser aus Küchen, Essräumen, Waschräumen und Waschküchen sowie Fäkalwasser.

Der Einsatz von Bordkläranlagen zur autarken Abwasserbehandlung hat sich als favorisierte Entsorgungslösung auf Flusskreuzfahrtschiffen durchgesetzt. Als Verfahrenstechnik hat sich die Membrantechnologie in Bordkläranlagen etablieren können. Im Vergleich zu anderen Behandlungsverfahren bieten Membran-Bordkläranlagen aufgrund ihrer kompakten Auslegungsoptionen deutliche Vorteile hinsichtlich des Platzanspruches gegenüber konventionellen Abwasserbehandlungsanlagen.

Positive Betriebserfahrungen aus den letzten Jahren unterstreichen die Einsatztauglichkeit von Membran-Bordkläranlagen. Dank der Berücksichtigung schiffsspezifischer Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung zeigt sich die Membrantechnik als sehr robust, so dass beispielsweise eine einmalige Reinigung der eingesetzten Membranmodule pro Jahr während der Winterliegezeit ausreicht. Messungen belegen, dass die gesetzlich festgelegten Grenzwerte für den Ablauf von Bordkläranlagen zuverlässig eingehalten werden. Das Abwassermanagement konnte somit den Bedürfnissen der Flusskreuzschiffahrt optimal angepasst werden.

Akuter Handlungsbedarf wird vom Schifffahrtsgewerbe bei der Entsorgung von Klärschlämmen, die beim Betrieb von Bordkläranlagen entstehen, gesehen. Aufgrund eines nicht flächendeckenden Entsorgungsnetzes mit wenigen geeigneten Übergabestellen stellt eine Entsorgung vielerorts das Bordpersonal vor Herausforderungen. Oftmals können die Reststoffe nur über Tankwagen abtransportiert werden, um anschließend auf kommunalen Kläranlagen entsorgt zu werden. Die Übergabe von Klärschlämmen an Tankwagen wird durch die örtlichen Verhältnisse der Liegeplätze stark erschwert, da es sich um touristisch hoch frequentierte Uferpromenaden handelt. Unvermeidbare Lärm- und Geruchsemissionen werden vom Umfeld negativ wahrgenommen und können das Bild einer umweltverbundenen Flusskreuzschiffahrt stören.

Gemäß CDNI muss Klärschlamm an Bord zwischengespeichert und zur fachgerechten Entsorgung an Land abgegeben werden. Nach Artikel 9.03 *Sammlung und Behandlung an Bord, Abgabe an Annahmestellen (CDNI)* gilt: „Die Betreiber von Fahrgastschiffen, die über Bordkläranlagen nach Anhang V verfügen, haben für die ordnungsgemäße Abgabe des Klärschlammes gegen Nachweis gemäß den innerstaatlichen Vorschriften in geeigneter Weise selbst zu sorgen.“ Nach Artikel 7 *Finanzierung der Annahme und Entsorgung von sonstigen*

Schiffsbetriebsabfällen können bei Fahrgastschiffen die Kosten für die Annahme und Entsorgung von Klärschlamm dem Schiffsführer gesondert angelastet werden.

Eine nähere Betrachtung zu Reststoffen wurde erstmalig im Rahmen eines DBU-Vorgängerprojektes durchgeführt (AZ 27643; *Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Bordkläranlagen mit Membrantechnik und Optimierung des Anlagenbetriebs an Bord von Flusskreuzfahrtschiffen; 2011/2012*). Beim Betrieb der damals untersuchten Bordkläranlage fielen Reststoffe wie die vom Feinfilter zurückgehaltenen Feststoffe und der bei der biologischen Reinigung entstehende Überschussschlamm an. Aufgrund der Kapselung der Speichertanks und der schwierigen Zugänglichkeiten war eine Erfassung von Schlammengen oder die Bestimmung von Feststoffgehalten im Schlamm- bzw. Feststoff-Wassergemisch nicht realisierbar. Über die erfassten Betriebsdaten und Betriebseinstellungen aus der Anlagensteuerung und den diskontinuierlich entsorgten Reststoffmengen (Teilentleerungen der Sammel tanks) wurde ein Reststoffanfall von ca. 30 m³ je 1.000 m³ behandeltem Abwasser errechnet.

Für ein Flusskreuzfahrtschiff mit einer Kapazität von 200 Personen (Fahrgäste+Crew), einer Einsatzdauer von 250 Tagen im Jahr und einem personenspezifischen Abwasseraufkommen von 140 l/(P*d) bedeutet dies ein jährliches Abwasseraufkommen von 7.000 m³ Abwasser bzw. einen Klärschlammfall von 210 m³ (äquivalent zu einem Gewicht von ~210 t).

Klärschlämme bestehen nur zu einem geringen Anteil aus Feststoffen, der bis zu 2% betragen kann. Bei einem Feststoffgehalt von 2% fallen bei einer jährlichen Klärschlammmenge von 210 m³ damit 4,2 t Feststoffe an. Die Landentsorgung der reinen Feststoffe ist das eigentliche Ziel der Klärschlamm Entsorgung.

Wird bei einer mobilen Entsorgung mit Tanklastwagen von einer spezifischen Transportkapazität von 10 m³ bzw. 10 t je Tanklastwagen ausgegangen, wäre nur eine Abfuhr für eine Entsorgung der reinen Feststoffmenge von 4,2 t jährlich vorzunehmen. Tatsächlich sind jedoch 21 Abfahrten pro Jahr erforderlich, um die im Klärschlamm enthaltene Wassermenge mit zu entsorgen. Aus diesen Betrachtungen heraus kann eine an Bord stattfindende Eindickung des Klärschlammes zu deutlichen Vorteilen hinsichtlich eines minimierten Entsorgungsaufwandes und einer damit einhergehenden Reduzierung von Entsorgungskosten führen.

Bei Vorversuchen des Projektpartners MARTIN Systems GmbH mit Standard-Membranmodulen zur Phasentrennung konnte der Überschussschlamm mit einem TS-Gehalt von 10 kg/m³ auf annähernd 40 kg/m³ eingedickt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die zu entsorgende Überschussschlammmenge durch den Einsatz der SLIM-Membranfilter um bis zu 75 % reduzieren lässt. Die Einsparung ist u.a. davon abhängig, ob die eingebauten Bordkläranlagen bereits über eine statische Klärschlamm eindickung mit Trübwasserabzug verfügen oder ob der anfallende Überschussschlamm nur gesammelt und an Land abgegeben wird.

2.3 Projektinhalte und Untersuchungsziele

Inhalt des Projektes war die Entwicklung eines SLIM-Membranmoduls im Rahmen einer Modifizierung eines Plattenmembranmoduls des Industriepartners MARTIN Systems GmbH. Das Modul sollte unter praxisrelevanten Einsatzbedingungen an Land und an Bord eines Flusskreuzfahrtschiffes untersucht und optimiert werden.

Die Innovation des Projektes lag damit primär in einer Verbesserung einer autarken Abwasserentsorgung an Bord von Flusskreuzfahrtschiffen. Die Entwicklungsarbeiten zum SLIM-Membranmodul sollten vor dem Hintergrund teilstrombasierter Lösungsansätze erfolgen, um die Schnittstelle Flusskreuzfahrtschiff und landseitige Entsorgungsinfrastruktur im Abwasserbereich zu verbessern.

Ziel des Projektes war es, die Menge an Überschussschlamm durch die teilstromorientierte Bordbehandlung „Eindickung“ zu minimieren. Die Minimierung von Reststoffmengen ermöglicht eine Verlängerung der Speicherintervalle bei gleichem Speichervolumen, die Häufigkeit der Landabgabe kann entsprechend reduziert werden.

Im Projekt sollte folgenden Fragen nachgegangen werden:

- Inwieweit können die an Bord produzierten Reststoffmengen durch Eindickung reduziert werden? Inwieweit sind weitere Effekte hinsichtlich einer Schlammminimierung festzustellen? Erfolgt nur eine Reduzierung der Wasserphase im Schlamm oder wird auch ein Abbau organischer Substanz durch Aufschluss der biologischen Zellen im Schlamm feststellbar sein?
- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen dem Grad der Reststoffminimierung und einer stabilen Betriebsweise des Membranmoduls vor dem Hintergrund erforderlicher Membranreinigungen während der Fahrtsaison?
- Welche Standzeiten können erreicht werden? Welche Modulgröße (Membranfilterfläche) erscheint sinnvoll vor dem Hintergrund erreichbarer Fluxraten? Wie ist die Einsatztauglichkeit zu bewerten?
- Welche Qualität hat das Filtrat des Schlammmoduls und wie ist es zu entsorgen? Ist (a) eine direkte Zugabe in den Ablauf der Bordkläranlage möglich oder muss (b) eine Rückführung in den Zulauf zur Bordkläranlage erfolgen? Wie wirken sich die unterschiedlichen Stoffstromführungen auf die Ablaufqualität aus?
- Wie ist der zusätzliche Betriebs-, Überwachungs- und Wartungsaufwand zu bewerten? Welche Reinigungskonzepte (in situ oder ex situ Reinigungen) sind in den Bordkläranlagenbetrieb zusätzlich zu implementieren?

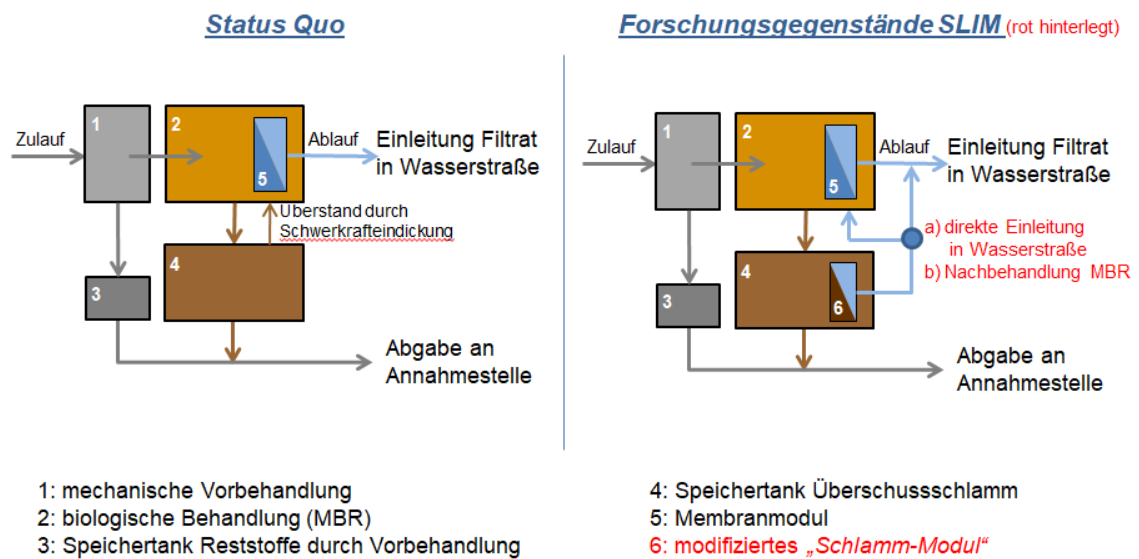


Abbildung 2-1: Forschungsziele des Projektes

Über diese Forschungsfragen hinaus sollten Querschnittsuntersuchungen an Bord weiterer Flusskreuzfahrtschiffe zwecks Charakterisierung des Reststoffanfalls durchgeführt werden, um die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Betrieb der Pilotanlage evaluieren zu können. Die Arbeiten im Projekt sollten zusätzlich genutzt werden, den Kenntnisstand zur Abwasser-situation und Abwasserbehandlung auf Flusskreuzfahrtschiffen zu verbessern (vgl. Tabelle 3–1).

2.4 Geplante Vorgehensweise im Projekt

Die geplante Vorgehensweise im Projekt basierte auf dem Ansatz eines Parallelbetriebes einer Versuchsanlage an Land und einer großtechnischen Pilotanlage an Bord eines Flusskreuzfahrtschiffes. Erfahrungsgemäß lassen sich so in kurzer Zeit belastbare Untersuchungsergebnisse generieren. Festgestellte Besonderheiten eines Bordbetriebes lassen sich an Land schnell und detailliert unter definierbaren und steuerbaren Betriebsbedingungen nachstellen und untersuchen. In vorangegangenen Projekten hatte sich dieser Ansatz bewährt. Eine sechsmonatige Vorlaufzeit der Landversuche sollte sicherstellen, dass bereits erste Aussagen zu Leistungsdaten der neuen Membranmodule getroffen werden konnten, um mit gesicherten Betriebseinstellungen an Bord zu beginnen.

Mit Hilfe der Landversuche sollte sichergestellt werden, dass die an Bord eingebauten Membranmodule über den gesamten Zeitraum einer Fahrtsaison störungsfrei zu betreiben sind. Das Sammeln von Langzeiterfahrungen insbesondere im Hinblick auf eine langfristige Betriebsstabilität und Dauerhaftigkeit der eingesetzten Materialien wurde als besonders relevant eingestuft.

Die ursprünglich zugrunde gelegte Projektdauer umfasste 24 Monate. Die Liegezeit des Flusskreuzfahrtschiffes während der Wintermonate konnte zum Umsetzen erforderlicher Baumaßnahmen genutzt werden. Das Projekt startete im September 2016 und endete im April 2020.

2.5 Projektverlauf

Die logistischen Begebenheiten verhinderten die Installation eines halb-technischen Prototypen eines SLIM-Membranfilters in den Schlammstammeltank eines Flusskreuzfahrtschiffes in der Winterliegezeit 2016/2017. Die Installation konnte erst während der Winterliegezeit 2017/2018 erfolgen. Die Verzögerung führte zu einer ersten kostenneutralen Projektverlängerung um sechs Monate.

Im Laufe der Fahrtsaison 2018 wurde festgestellt, dass wichtige, praxisrelevante Projektziele im Rahmen der bewilligten Projektkosten und Projektlaufzeit aufgrund äußerer Rahmenbedingungen nicht mehr erreicht werden konnten.

Die Fahrtsaison 2018 war bereits seit dem Monat Juli 2018 stark durch niedrige Wasserstände in den Flüssen geprägt. Fahrplanänderungen und Verlagerungen auf andere Reisegebiete waren die Folge. Der ursprüngliche zweiwöchige Pendelverkehr des Schiffes zwischen Amsterdam und Budapest konnte nicht umgesetzt werden, wodurch regelmäßige Kontrollen in Nürnberg (durch MARTIN Systems GmbH) und Köln (durch PIA e.V.) nicht möglich waren. Betriebsprobleme mit der Pilotanlage wurden zu spät erkannt, so dass die Pilotversuche die Erwartungen nicht erfüllten, und eine angestrebte Serienreife nicht erreicht werden

konnte. Aufgrund der Ereignisse beschränkte sich der auswertbare Pilotbetrieb auf einen Zeitraum von 15 Tagen, wobei die erzielten Ergebnisse Fragen hinsichtlich der beobachteten Betriebsstabilität aufwiesen. Ein mängelfreier Funktionsnachweis konnte nicht erzielt werden. Im Rahmen einer Nachbewilligung wurde das Projekt bis April 2020 verlängert. Die ursprüngliche Projektlaufzeit von 24 Monaten erhöhte sich damit auf insgesamt 43 Monate. Eine Übersicht zum Projektverlauf ist in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Tabelle 2–1: Übersicht Projektverlauf (nach Jahreszahlen)

Jahr	Versuchsanlage	Pilotanlage
2016	mit Projektbeginn Aufbau Versuchsanlage	Vorbereitende Maßnahmen in der Wintersaison 2016/2017
2017	Inbetriebnahme Versuchsanlage und Langzeittest Versuchsphase 1	keine baulichen oder betrieblichen Tätigkeiten
2018	Langzeittest Versuchsphase 2	Einbau Pilotanlage, Inbetriebnahme und Versuchsbetrieb Betriebsjahr 1
2019	Langzeittest Versuchsphase 2 Außerbetriebnahme Versuchsanlage	Versuchsbetrieb Betriebsjahr 2
2020	-	Wartung und Revision

3 Material und Methoden

3.1 Überblick zum Untersuchungsumfang

Die Untersuchungen umfassten Landversuche mit einer am PIA e.V. betriebenen Versuchsanlage und einen bordseitigen Betrieb einer großtechnischen Pilotanlage an Bord des Flusskreuzfahrtschiffes SCENIC Crystal.

Versuchsanlage am PIA



Großtechnische Pilotanlage an Bord SCENIC Crystal



Abbildung 3-1: Untersuchungsgegenstände

Betrieb und wissenschaftliche Begleitung der Versuchsanlage oblag dem Projektpartner PIA e.V.. Für den technischen Betrieb der Pilotanlage war der Projektpartner MARTIN Systems GmbH verantwortlich; die wissenschaftliche Begleitung der Pilotanlage erfolgte wiederum durch den PIA e.V.. Die Untersuchungen an Bord durften zu keinem Zeitpunkt zu einer Beeinträchtigung/Gefährdung des bordseitigen Abwasserbehandlungsprozesses führen und mussten aus Gewährleistungsgründen gegenüber der Reederei abgesichert werden. Die Bordbegleitung umfasste Vor-Ort-Kontrollen und eine Beprobung von relevanten Messstellen in den Abläufen der Bordkläranlage und des Schlammstammeltanks sowie in den Reaktoren selbst. Ein Eingriff in technische Abläufe erfolgte im Rahmen dieser wissenschaftlichen Begleitungen zu keiner Zeit.

Ergänzt wurden diese Arbeiten durch Querschnittsuntersuchungen an Bord weiterer Flusskreuzfahrtschiffe zur Erfassung der Zulaufsituation von Bordkläranlagen und des Reststoffanfalls bei bordseitiger Abwasserbehandlung. Diese Arbeiten wurden ebenfalls durch den PIA e.V. durchgeführt.

3.2 Landversuche

3.2.1 Beschreibung der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage wurde am PIA e.V. im Rahmen eines Vorgängerprojektes entwickelt und seit 2015 sukzessive optimiert, so dass sie weitestgehend vollautomatisch, und damit auch außerhalb von Werktagen, betrieben werden kann. Die Versuchsanlage basiert auf dem Membranbelebungsverfahren. Die Reaktoren können beliebig und ihrem Nutzungszweck entsprechend kombiniert werden. Die für die Untersuchungen konfigurierte Versuchsanlage entsprach in ihrem Aufbau einer Bordkläranlage, so wie sie vom Projektpartner MARTIN Systems GmbH auf Flusskreuzfahrtschiffen verbaut wird, ergänzt um den SLIM-Reaktor. Die Anlage bestand für die Versuche aus folgenden Komponenten:

- vorgeschaltete mechanische Reinigung (Siebung),
- Misch- und Ausgleichs-Reaktor (M+A-Reaktor)
- Membran-Bioreaktor mit 2 Filtrationsstraßen (Membranfilter)
- SLIM-Reaktor mit integriertem SLIM-Membranfilter

Alle drei Reaktoren der Versuchsanlage sind baugleich ($L \times B \times H = 800 \times 600 \times 1800$ in mm) bei einem maximalen Volumen von 864 Liter.

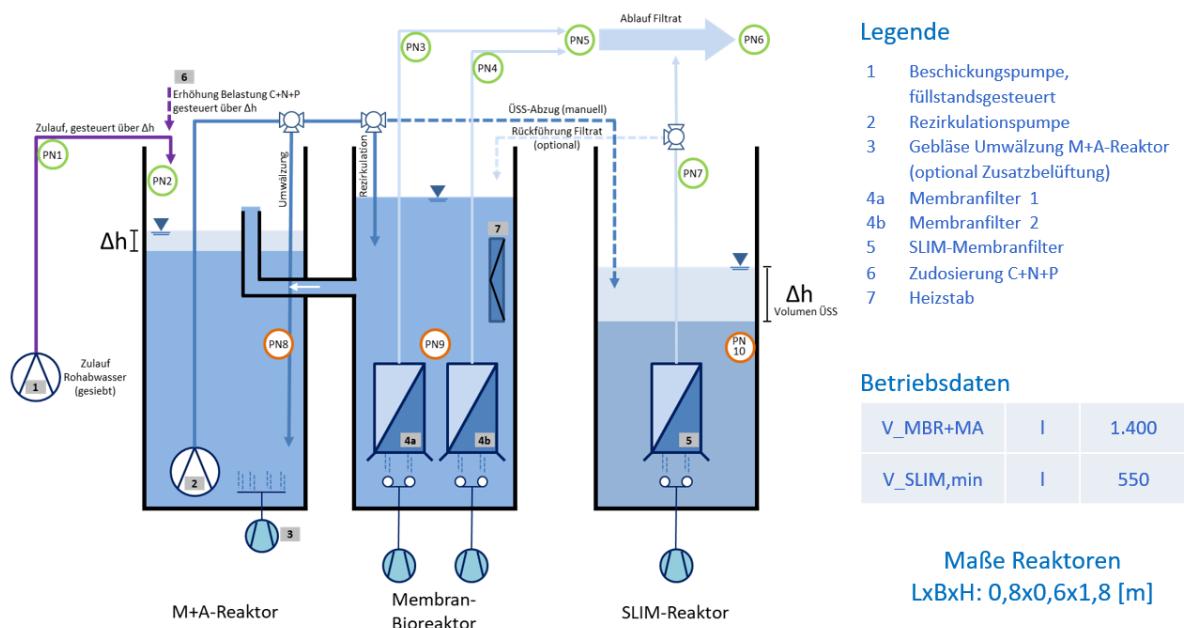


Abbildung 3-2: PIA-Landversuchsanlage (Konfiguration „SLIM“)

Die Versuchsanlage wird üblicherweise mit häuslichem Rohabwasser des PIA-Prüffeldes beschickt. Zum Schutz der Membranfilter wird das Rohabwasser vorgesiebt. Zur Anpassung der Abwasserbelastung an Schiffsabwasser kann dem mechanisch vorbehandelten Abwasser Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphat zudosiert werden.

Die Beschickung der biologischen Behandlungsstufe erfolgt vollautomatisch in Abhängigkeit der Filtrationsleistung der Membranfilter über eine Füllstandsmessung im M+A-Reaktor. Der M+A-Reaktor und der Membranbioreaktor sind durch eine Rezirkulationsleitung hydraulisch gekoppelt. Die Rezirkulationspumpe ist im M+A-Reaktor installiert, der Rückfluss erfolgt über das hydraulische Gefälle. Die Rezirkulationsleitung wird mit einer internen Rezirkulation im M+A-Reaktor zur Umwälzung des belebten Schlammes kombiniert. Die Rezirkulationsvolumenströme sind über 3-Wege-Ventile frei parametrierbar. Zusätzlich ist der M+A-Reaktor mit einem Gebläse ausgerüstet, das zur Verbesserung der Umwälzung oder zur Belüftung des belebten Schlammes betrieben werden kann.

Die Belüftung des Membranbioreaktors erfolgt über die Spülgebläse der beiden Membranfilter. Beide Filterstraßen können unabhängig voneinander parametrierbar werden. Die Leistung der Membranfilter wird über die Parameter „Flux“ und „transmembrane Druckdifferenz (TMP)“ mittels magnetisch-induktiven Durchflussmessern und Druckmesssonden überwacht. Über einen installierten Heizstab lässt sich der Belebtschlamm auf Temperaturen $>30^{\circ}\text{C}$ erwärmen, um die natürlichen Betriebsbedingungen in Maschinenräumen an Bord von Schiffen abbilden zu können.

Im Rahmen des Projektes wurde der SLIM-Reaktor über die Rezirkulationsleitung mit der biologischen Behandlungsstufe gekoppelt. Die Beschickung des SLIM-Reaktors erfolgte über das manuelle Öffnen eines 3-Wege-Ventils. Der SLIM-Reaktor wurde im Aufstaubetrieb mit Hilfe eines Füllstandssensors betrieben. Sobald der minimale Füllstand erreicht wurde, schaltete der Filtrationsprozess automatisch ab. Leistungsdaten wie „Flux“ und „TMP“ des SLIM-Membranfilters wurden manuell über Durchflussmessungen (Auslitern des Filtratstromes über fest definierte Zeitspannen) und mit Hilfe eines Druckmessrohres betriebsabhängig erfasst.

3.2.2 Beschreibung der Versuche

Die Landversuche wurden in zwei Teilphasen aufgeteilt (vgl. Tabelle 2–1). Testphase 1 diente zur gezielten Vorbereitung auf den bordseitigen Pilotbetrieb, Testphase 2 erfolgte parallel zum Pilotbetrieb, um diesen unterstützen zu können. In der ersten Testphase im Jahr 2017 wurde der SLIM-Reaktor der Versuchsanlage als voll durchmischter Reaktor betrieben. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Umwälzung wurde ein zusätzliches Gebläse in Betrieb genommen. Für die Festlegung von Betriebsparametern der Pilotanlage an Bord wurde primär der Fragestellung zum erreichbaren bzw. optimalen Feststoffgehalt nachgegangen. Anhand einer Schlamm Bilanzierung sollten zusätzlich Aussagen zum Umfang einer möglichen Schlamm desintegration getroffen werden. Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines Langzeitversuchs durchgeführt, um zusätzlich erste Aussagen zur Langzeitstabilität des SLIM-Membranmoduls treffen zu können.

Im Jahr 2018 wurde der SLIM-Reaktor der Versuchsanlage parallel zum bordseitigen Pilotbetrieb als teildurchmischter Reaktor betrieben. Die Betriebssituation entsprach damit den Verhältnissen an Bord, wo aus technischen Gründen eine vollständige Umwälzung des nachgerüsteten Schlammspeichertanks nicht realisiert werden konnte. Da die Zugänglichkeit an Bord stark eingeschränkt war, sollten mögliche Auswirkungen an Land untersucht werden.

Innerhalb der ersten Betriebswochen wurde eine Ausbildung von zwei Bereichen innerhalb des Reaktors mit unterschiedlich hohen Feststoffgehalten beobachtet. Ein von der Crossflow-Belüftung des SLIM-Moduls geprägter, vlldurchmischter Reaktorbereich R1 wies deutlich geringere Feststoffgehalte auf, als ein sich parallel dazu ausbildender Schlammstapelbereich R2. Für eine nähere Untersuchung der daraus positiv nutzbaren Effekte wurde der SLIM-Reaktor in einer weiteren Testphase durch eine geschlitzte Trennwand in zwei Reaktorräume aufgeteilt.

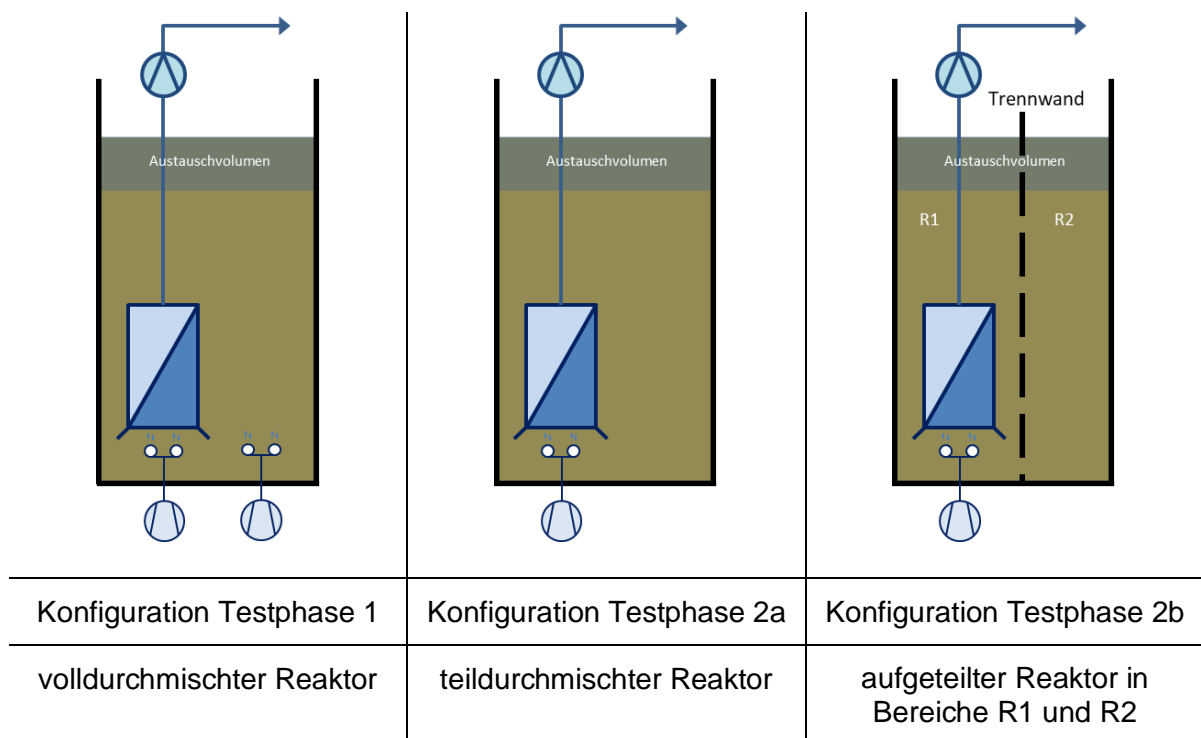


Abbildung 3-3: Testkonfigurationen „SLIM“-Reaktor Landversuchsanlage

Der Teilbereich R1 wurde gezielt und dauerhaft mit geringem Feststoffgehalt (~ 30 g/l) betrieben, um die Betriebsstabilität des SLIM-Membranfilters und damit die Einsatzdauer erhöhen zu können. Die Überschussschlamm-Entnahme erfolgte ausschließlich in der Deckschicht im Teilbereich R2.

3.3 Bordbetrieb Pilotanlage

Die Pilotanlage wurde an Bord des Flusskreuzfahrtschiffes SCENIC CRYSTAL installiert. Das Flusskreuzfahrtschiff wurde 2013 in Dienst gestellt und verfügt über eine Passagierkapazität von 169 Personen bei einer Mannschaftsstärke von 48 Personen. Mit einer Länge von 135 m wird die SCENIC CRYSTAL der größten Kategorie der in Europa verkehrenden Flusskreuzfahrtschiffe zugeordnet.

Die installierte Bordkläranlage ist vom Typ BMA© 50 R des Projektpartners Martin Systems GmbH und wurde im Jahr 2011 im Rahmen von Nachrüstmaßnahmen an Bord installiert und im Jahr 2012 in Betrieb genommen. Bei der Nachrüstung wurde für die Reaktoren der Bordkläranlage auf schiffsbauliche Tanks zurückgegriffen. Zur Zwischenspeicherung von Überschussschlamm stehen zwei Tanks zur Verfügung. Diese Besonderheit war ausschlaggebend für die Wahl des Schiffes, da die Pilotanlage in einem redundanten System implementiert werden konnte und so der Bordbetrieb auch bei Komplettausfall des bordseitigen SLIM-Reaktors hätte sichergestellt werden können. Das Verfahrensschema, so wie es in der Verfahrenssteuerung an Bord hinterlegt ist, ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

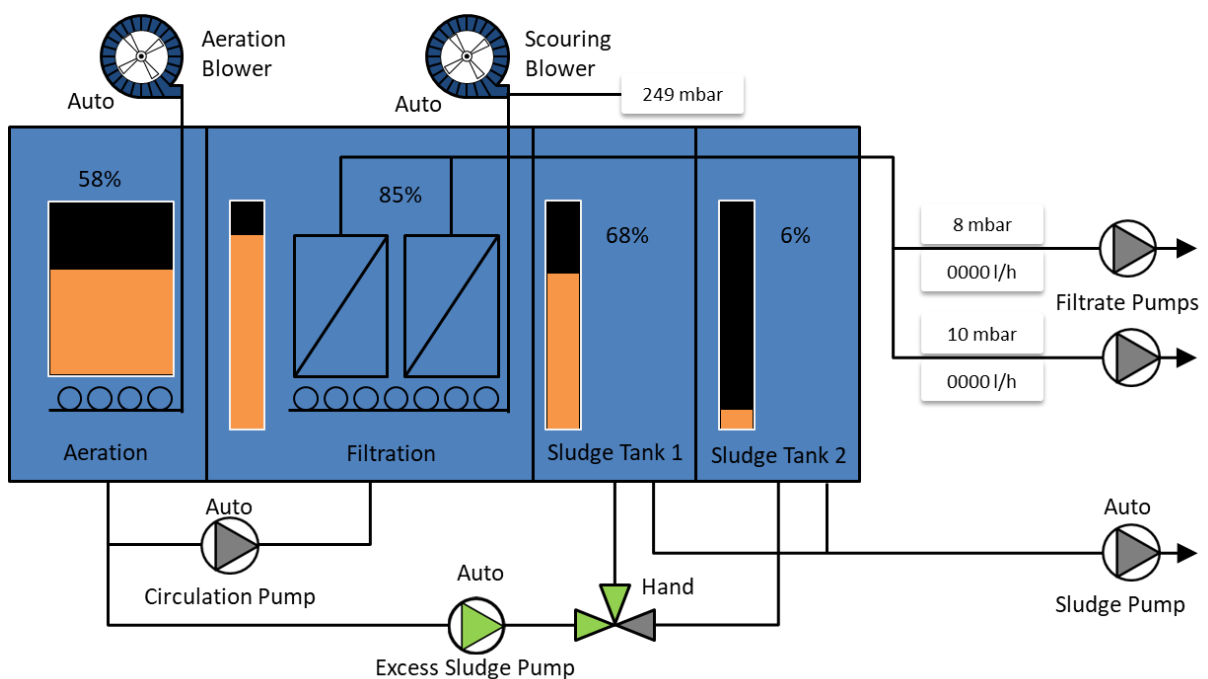
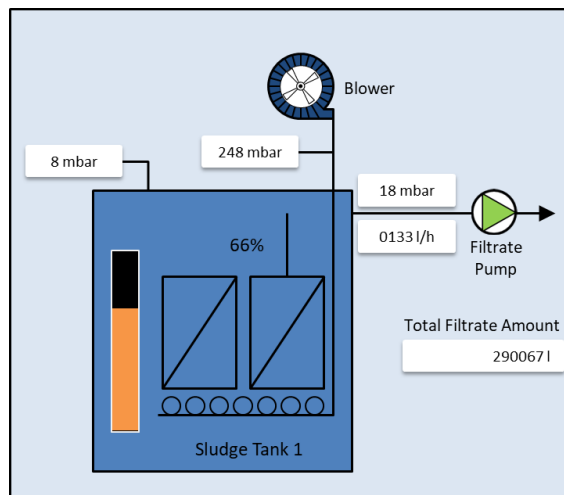


Abbildung 3-4: Verfahrensschema Bordkläranlage

Die Pilotanlage wurde in den Schlammstammeltank „Sludge Tank 1“ eingebaut. Das dazugehörige Verfahrensschema, das in einem Untermenü der Anlagensteuerung abrufbar ist, ist in Abbildung 3-5 abgebildet.



(Betriebsdaten Stand 21.09.2019)

Abbildung 3-5: Verfahrensschema SLIM-Reaktor

Folgende Parameter zur Überwachung und Sicherstellung des Betriebs wurden kontinuierlich aufgezeichnet:

- Füllstand SLIM-Tank
- Durchfluss Filtratleitung
- Saugdruck Filtratleitung
- Druck Spülluftleitung SLIM-Membranmodule
- Kompensationsdruck SLIM-Tank
- Filtratmenge, gesamt
- Zähler für Überschussschlammabgaben in SLIM-Tank

Abbildung 3-6 zeigt Detailaufnahmen zu den eingebauten SLIM-Membranfiltern sowie der Filtratablaufleitung mit Probenahmestelle.



Abbildung 3-6: Detailaufnahmen SLIM-Membranfilter und Filtratablaufleitung mit PN-Stelle

3.4 Referenzmessungen an Bord von Flusskreuzfahrtschiffen

Zur Evaluierung der Ergebnisse wurden Querschnittsuntersuchungen an Bord weiterer Flusskreuzfahrtschiffe durchgeführt. Hierzu wurden von insgesamt fünf weiteren Flusskreuzfahrtschiffen die Klärschlamm-Abgabeprotokolle der Jahre 2018 und 2019 anonymisiert ausgewertet. Zur Beschreibung der Zulaufsituation von Bordkläranlagen konnten an Bord eines Flusskreuzfahrtschiffes zwei Untersuchungskampagnen in den Jahren 2016 und 2018 realisiert werden. Die örtlichen Gegebenheiten an Bord weiterer Schiffe ließen keine repräsentativen Probenahmen im Zulauf der Bordkläranlagen zu. Zusätzlich wurden 25 Ablaufproben von unterschiedlichen Bordkläranlagentypen in den Jahren 2016 und 2017 zusätzlich auf Nährstoffparameter ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ und P_{ges}) untersucht.

Tabelle 3–1: Überblick zu Referenzmessungen/Untersuchungen

Art der Untersuchung	Untersuchungsumfang
Klärschlammabgaben von Flusskreuzfahrtschiffen	Abgabeprotokolle aus den Jahren 2018 und 2019 wurden von fünf Flusskreuzfahrtschiffen in anonymisierter Form ausgewertet.
Abwassercharakteristik im Zulauf von Bordkläranlagen	Abwasserproben wurden im Rahmen von zwei Messkampagnen im Zulauf einer Bordkläranlage genommen und auf die Standardparameter analysiert und ausgewertet.
Nährstoffkonzentrationen im Ablauf von Bordkläranlagen	Ablaufproben von unterschiedlichen Bordkläranlagentypen wurden zusätzlich auf die Parameter $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ und P_{ges} untersucht.

4 Ergebnisse

4.1 Betrieb Versuchsanlage

4.1.1 Testphase 1

In der ersten Testphase im Jahr 2017 wurde der „SLIM“-Reaktor als voll durchmischter Reaktor betrieben. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Umwälzung wurde ein zusätzliches Gebläse in Betrieb genommen. Für die Festlegung von Betriebsparametern der Pilotanlage an Bord wurde primär der Fragestellung zum erreichbaren bzw. optimalen Feststoffgehalt nachgegangen. Die Dauer der Versuchsreihe betrug 175 Tage.

Die Versuchsanlage wurde mit häuslich-kommunalem Abwasser beschickt und die organische Belastung durch Zugabe von Ethanol- oder Zuckerlösungen zur Steigerung der Überschussschlammproduktion erhöht. Die Durchsatzleistung des Membranbioreaktors betrug in dem Versuchszeitraum ~ 290.000 l (im Mittel 1.650 l/d). Das Membranmodul im SLIM-Reaktor wurde füllstandsabhängig gesteuert. Bei Erreichen eines Mindestvolumens von 550 l im SLIM-Reaktor wurde die Filtration automatisch gestoppt. Die Versuchsreihe wurde beendet, als die festgesetzte Zeitmarke für die Filtrationsdauer von 24 Stunden überschritten wurde. Technisch bedeutete dies, dass die tägliche Überschussschlammproduktion über der Filtrationsleistung des Membranmoduls lag und zur weiteren Speicherung das Speichervolumen hätte erhöht werden müssen.

An 79 Tagen wurde der produzierte Überschussschlamm vom M+A-Reaktor über die Rezirkulationsleitung in den SLIM-Reaktor zur weiteren Eindickung gepumpt. Bei jedem Schlammabzug aus dem M+A-Reaktor wurden das Volumen erfasst und der Trockensubstanzgehalt bestimmt. Zu Beginn der Versuche befand sich im SLIM-Reaktor eine Feststoffmasse M_{TS} von 4,5 kg, was einem TS-Gehalt von 8,2 g/l entsprach. Insgesamt wurden 5.000 l Überschussschlamm aus dem M+A-Reaktor abgezogen und in den SLIM-Reaktor gepumpt. Die korrespondierende Feststoffmasse M_{TS} betrug 51,30 kg. Der Trockensubstanzgehalt im SLIM-Reaktor betrug zum Ende der ersten Testphase 70 g/l.

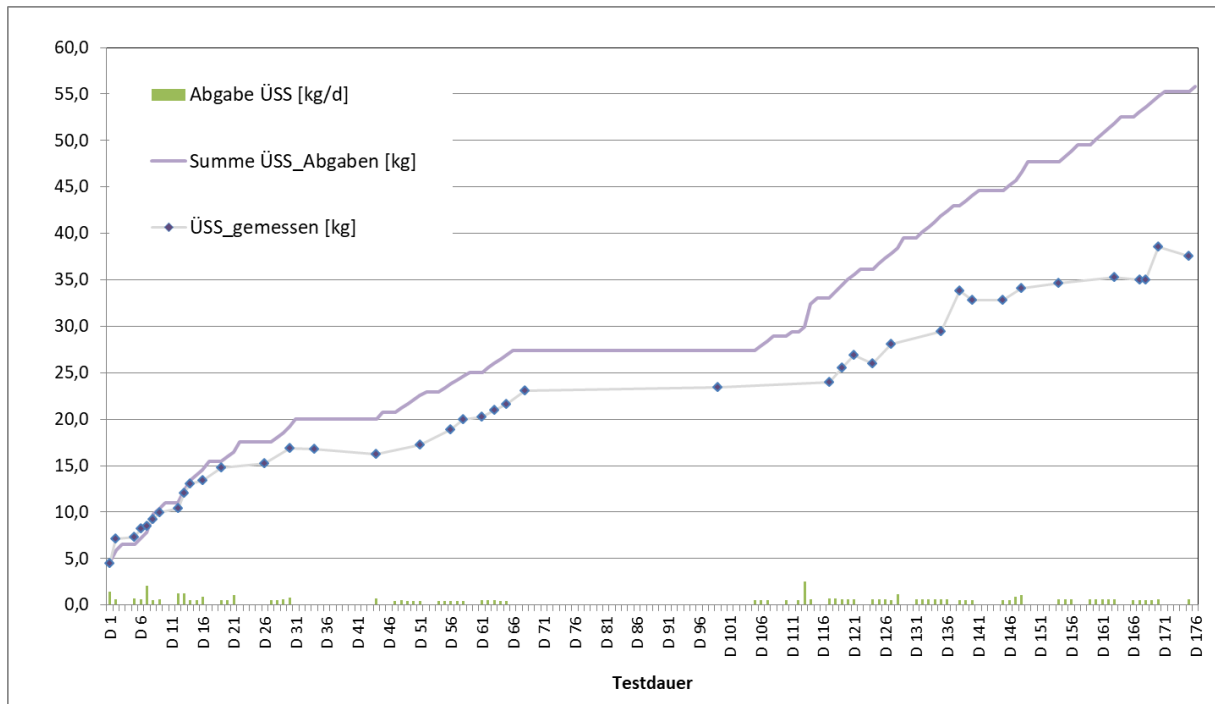


Abbildung 4-1: Feststoffmassen

Das Volumen des zugeführten Überschussschlammes konnte durch den filtrationsbedingten Eindickungsprozess im SLIM-Reaktor um 90% reduziert werden. Mit einem Trockensubstanzgehalt von 70g/l und einem Schlammvolumen von 550 l ergab sich eine Feststoffmasse MTS von 38,5 kg. Damit reduzierte sich die Feststoffmasse um 17,3 kg. Die Feststoffmasse, die durch Schlammnahmen für die Trockensubstanzbestimmungen aus dem System entnommen wurde, kann mit ca. 75 l bzw. 3 kg abgeschätzt werden. Daraus resultiert eine Reduktion der Feststoffmassen von 14,3 kg, was einem Anteil von 26% entspricht. Die Reduktion der Feststoffmassen wird auf einen Zellaufschluss von Mikroorganismen zurückgeführt.

Tabelle 4–1: Volumen- und Feststoffbilanzierung SLIM-Reaktor

	Start (Tag 1)	ÜSS-Zugabe	Zugabe gesamt	Entnahmen	Ende (Tag 175)
V _{ÜSS} [l]	550	5.000	5.550	75 (Annahme)	550
MTS [kg]	4,5	51,3	55,8	3,0 (Annahme)	38,5
oTS-Anteil [%]	83	83	83	/	81

In regelmäßigen Abständen wurden Zulauf und Ablauf des MBR-Reaktors sowie der Ablauf des SLIM-Reaktors beprobt. Die Versuchsanlage wurde nicht gezielt zur „Stickstoffelimination“ betrieben.

Abschließend sind die Analyseergebnisse aufgeführt. Die Ablaufkonzentrationen im SLIM-Filtrat unterscheiden sich deutlich von den Konzentrationen im Ablauf des Membranbioreaktors.

Tabelle 4–2: Übersichtstabelle Analyseergebnisse

Zulauf MBR

Parameter		Anzahl Messungen	Minimum	Maximum	Mittelwert
CSB*	mg/l	6	499	1.534	881
N _{ges}	mg/l	6	63,0	90,0	79,7
P _{ges}	mg/l	5	9,7	18,0	12,4

*zusätzliche „CSB-Zugabe“ von im Mittel 400g/d durch Ethanol- oder Zuckerlösungen

Ablauf MBR

Parameter		Anzahl Messungen	Minimum	Maximum	Mittelwert
CSB	mg/l	11	10	31	21
NH ₄ -N	mg/l	11	0,1	5,3	0,8
NO ₃ -N	mg/l	11	9,1	59,0	35,2
P _{ges}	mg/l	11	1,1	7,6	4,0

Ablauf SLIM-Reaktor

Parameter		Anzahl Messungen	Minimum	Maximum	Mittelwert
CSB	mg/l	9	38	208	71
NH ₄ -N	mg/l	10	0,1	24,1	5,6
NO ₃ -N	mg/l	10	1,2	64,0	23,2
P _{ges}	mg/l	10	8,9	64,0	26,8

4.1.2 Testphase 2a

Im Jahr 2018 wurde, parallel zum Betrieb der Pilotanlage an Bord, der SLIM-Reaktor der Versuchsanlage als teildurchmischter Reaktor betrieben. Die Betriebssituation entsprach damit den Verhältnissen an Bord, wo aus technischen Gründen eine vollständige Umwälzung des nachgerüsteten Schlammstehertanks nicht realisiert werden konnte. Da die Zugänglichkeit an Bord stark eingeschränkt war, sollten mögliche Auswirkungen an Land untersucht werden.

Die Versuchsdauer betrug 82 Tage. Der SLIM-Reaktor wurde in dieser Versuchsphase mit 2.100 l Überschussschlamm beschickt, was einer korrespondierenden Feststoffmasse von 27,5 kg entsprach.

Innerhalb der ersten Betriebswochen wurde eine Ausbildung von zwei Teilbereichen mit unterschiedlich hohen Feststoffgehalten beobachtet. Die von der Crossflow-Belüftung des SLIM-Moduls geprägte, vollaufgemischte Zone im Umfeld des Membranfilters wies dabei deutlich geringere Feststoffgehalte auf, als es die Feststoff-Zugaben vermuten ließen. In folgender Abbildung sind die Ergebnisse der TS-Messungen einem theoretischen Verlauf des TS-Gehaltes gegenübergestellt, der sich infolge der regelmäßigen Schlammzugaben in einem voll durchmischten Reaktor eingestellt hätte.

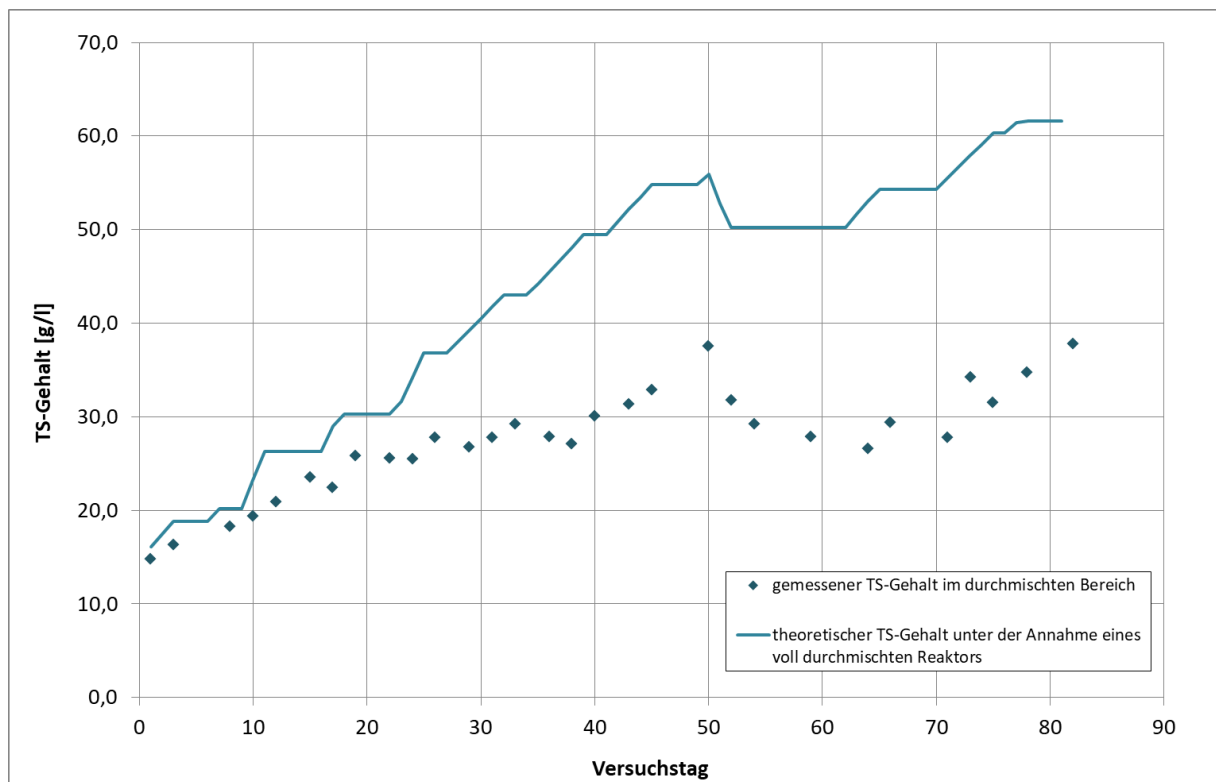


Abbildung 4-2: Gegenüberstellung gemessener TS-Gehalte im durchmischten Reaktorbereich zu theoretischem TS-Verlauf unter der Annahme eines voll durchmischten Reaktors

Die örtliche Ausbildung eines Schlammstapelbereichs konnte nicht bestimmt werden; allein eine Zone an der Oberfläche des nicht durchmischten Bereichs ließ sich visuell lokalisieren. In dieser Zone wurden zum Ende der Versuchsphase TS-Gehalte zwischen 70 und 90 g/l bestimmt.

An den Versuchstagen 51 und 52 wurden insgesamt 80 l Schlamm mit einer korrespondierenden Feststoffmasse von 3,4 kg abgezogen. Die abgezogene Feststoffmasse entsprach etwa 12% der Gesamtmasse im SLIM-Reaktor und führte zu einer deutlichen Absenkung des TS-Gehaltes in der durchmischten Zone von 37,5 g/l auf unter 30 g/l. Die Versuchsphase wurde am 82. Versuchstag beendet, nachdem der TS-Gehalt im durchmischten Bereich erneut in Richtung 40 g/l anstieg. Eine weitere Versuchsphase (Testphase 2b) wurde initiiert, um zu untersuchen, ob sich die festgestellten Effekte in ein Betriebsregime integrieren ließen.

Abschließend sind die statistischen Kenndaten zu den untersuchten Ablaufproben des SLIM-Filtrates aufgeführt und den Ergebnissen des MBR-Filtrates zu Vergleichszwecken gegenübergestellt. Die Ablaufqualität des MBR-Filtrates wird im SLIM-Filtrat nicht erreicht. Die im SLIM-Filtrat gemessenen und gegenüber dem MBR-Filtrat deutlich erhöhten P_{ges} -Konzentrationen lassen auf eine Schlammhydrolyse im SLIM-Reaktor schließen.

Tabelle 4–3: Statistische Kenndaten zu den untersuchten Filtraten in Testphase 2a

Parameter		Filtrat SLIM-Reaktor			Filtrat Membranreaktor		
		Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert
CSB	mg/l	48	72	57	14	20	18
N_{ges}	mg/l	13,4	150,1	57,3	0,6	43,1	27,2
$NH_4\text{-N}$	mg/l	0,1	4,8	0,6	0,1	0,7	0,3
$NO_3\text{-N}$	mg/l	8,6	150,0	56,7	17,2	42,9	29,9
P_{ges}	mg/l	19,3	42,2	29,4	1,0	8,0	4,0
pH-Wert	-	3,6	6,5	5,6	6,2	6,9	6,6
Leitfähigkeit	$\mu\text{S/cm}$	633	1.557	986	544	756	630

n = 10 Messungen

4.1.3 Testphase 2b

In Testphase 2b wurde der SLIM-Reaktor durch eine geschlitzte Trennwand in zwei gleich große Reaktorbereiche unterteilt. Der SLIM-Membranfilter wurde in den ersten Teilbereich eingebaut, so dass dieser durch das Membranspülgebläse vollständig durchmischt wurde. Der zweite Teilbereich sollte die Funktion eines Schlammstapelraumes übernehmen.

Zu Beginn des Versuches wurde analog zu Testphase 2a ein TS-Gehalt von ca. 13 g/l eingestellt. Die Versuchsdauer betrug 110 Tage. Der SLIM-Reaktor wurde in dieser

Versuchsphase mit 3.570 l Überschussschlamm beschickt, was einer korrespondierenden Feststoffmasse von 37,0 kg entsprach. Die Betriebssituationen waren vergleichbar zu Testphase 2a.

In nachfolgender Abbildung sind die Ergebnisse der TS-Messungen im volldurchmischten Teilbereich und in der oberen Zone des Schlammstapelbereiches einem theoretischen Verlauf des TS-Gehaltes gegenübergestellt, der sich in einem voll durchmischten Reaktor eingestellt hätte.

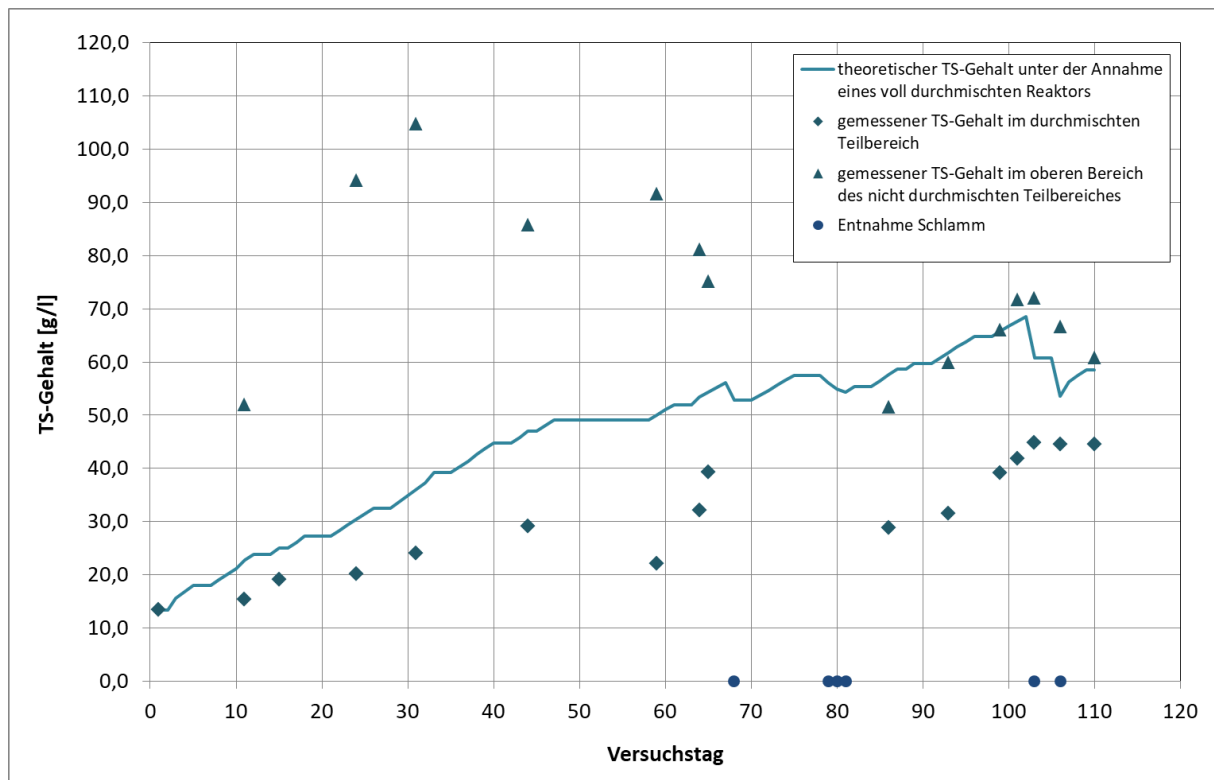


Abbildung 4-3: Gegenüberstellung gemessene TS-Gehalte in Testphase 2b zu theoretischem TS-Verlauf in einem voll durchmischten Reaktor

Zwischen dem 48. und 58. Versuchstag erfolgte keine Beschickung des Reaktors. Der Verlauf des TS-Gehaltes im durchmischten Teilbereich ist dem korrespondierenden Verlauf aus Testphase 2a unter Berücksichtigung der stattgefundenen Schlammabnahmen ähnlich.

Die insgesamt sechs Schlammabnahmen erfolgten ausschließlich aus der oberen Zone des Schlammstapelbereiches. Es wurden 200 l Schlamm mit einer korrespondierenden Feststoffmasse von 13,9 kg entnommen. Die Entnahmen am Ende der Testphase führten aufgrund eines geänderten Entnahmeregimes nicht zur angestrebten Absenkung des TS-Gehaltes im durchmischten Teilbereich.

Abschließend sind die statistischen Kenndaten zu den untersuchten Ablaufproben des SLIM-Filtrates in Testphase 2b aufgeführt und den Ergebnissen des MBR-Filtrates zu Vergleichszwecken gegenübergestellt. Die Abläufe wurden über den Untersuchungszeitraum in regelmäßigen Abständen insgesamt 13mal untersucht. Die Ablaufqualität des MBR-Filtrates wird im SLIM-Filtrat nicht erreicht. Die im SLIM-Filtrat gemessenen und gegenüber dem MBR-Filtrat deutlich erhöhten P_{ges} -Konzentrationen lassen wie in Testphase 2a ebenfalls auf eine Schlammhydrolyse im SLIM-Reaktor schließen.

Tabelle 4–4: Statistische Kenndaten zu den untersuchten Filtraten in Testphase 2b

Parameter		Filtrat SLIM-Reaktor			Filtrat Membranreaktor		
		Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert
CSB	mg/l	16	118	47	11	62	23
N_{ges}	mg/l	18,4	67,4	42,5	2,6	44,1	23,1
$NH_4\text{-N}$	mg/l	<0,1	2,2	0,3	<0,1	0,7	0,3
$NO_3\text{-N}$	mg/l	18,4	67,3	42,2	2,2	43,7	22,9
P_{ges}	mg/l	12,2	51,2	30,6	0,6	9,7	4,2
pH-Wert	-	4,1	6,8	6,1	5,8	7,7	7,0
Leitfähigkeit	$\mu\text{S/cm}$	790	1.453	1.005	519	1.159	727

n = 13 Messungen

4.2 Betrieb Pilotanlage

4.2.1 Betriebsergebnisse in der Fahrtsaison 2018

Die Pilotanlage wurde im Juni 2018 vom Projektpartner Martin Systems GmbH in Betrieb genommen. Die Fahrtsaison 2018 war seit dem Monat Juli 2018 durch niedrige Wasserstände in den Flüssen geprägt. Fahrplanänderungen und Verlagerungen auf andere Reisegebiete waren die Folge. Der ursprüngliche zweiwöchige Pendelverkehr des Schiffes zwischen Amsterdam und Budapest konnte daher nicht umgesetzt werden, der regelmäßige Kontrollen in Nürnberg (durch MARTIN Systems GmbH) und Köln (durch PIA e.V.) ermöglicht hätte.

Da im August 2018 nur das Gebiet der Donau befahren wurde, wurde der erste wissenschaftliche Begleittermin für Anfang September 2018 vorgesehen. Dazu fand im Vorfeld am 06.09.2018 in Nürnberg eine technische Betriebskontrolle durch MARTIN Systems GmbH statt, bei der festgestellt werden musste, dass die Pilotanlage zwischenzeitlich außer Betrieb genommen worden war. Es wurden umgehend Maßnahmen zur Wiederinbetriebnahme eingeleitet. Eine Befundung im Rahmen von Wartungsarbeiten erfolgte am 10.09.2018. Am 21.09.2018 konnte die Anlage wieder in Betrieb genommen werden. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung wurden die Betriebsparameter aufgenommen. Aufgrund erneuter, kurzfristiger Fahrplanänderungen erfolgte ein weiterer Termin am 10.10.2018 in Nürnberg, um den Betriebszustand zu erfassen. Zwischenzeitlich wurde die Anlage vom Bordpersonal aufgrund von Betriebsschwierigkeiten am 06.10.2018 allerdings erneut außer Betrieb genommen.

Ab Mitte Oktober 2018 wurde aufgrund der niedrigen Wasserstände das Schiff außer Betrieb genommen, so dass eine Wiederinbetriebnahme der Pilotanlage nicht mehr umsetzbar war. Der zeitliche Ablauf des Pilotbetriebes für das Jahr 2018 ist nachstehend tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 4–5: Pilotbetrieb an Bord des Flusskreuzfahrtschiffes in der Fahrtsaison 2018

Zeit	Ereignis
Winter 2016/2017	Vorbereitende Maßnahmen am SLIM-Reaktor (Werftarbeiten)
März/April 2018	Installation SLIM-Membranfilter sowie Steuer- und Regelungstechnik
Mai 2018	Saisonstart am 25.04.2018
Juni 2018	Inbetriebnahme Pilotanlage (14.06.2018) und Probebetrieb
Juli 2018	Betriebsoptimierung (Anpassung Filtrationszeiten); 19.07.2018
August 2018	Niedrigwasserperiode; Einsatzgebiet auf Donau beschränkt
September 2018	06.09.2018: Technische Kontrolle; Anlage wurde vom Bordpersonal außer Betrieb genommen. 10.09.2018: Wartung und Beginn mit Instandsetzung 21.09.2018: Instandsetzung abgeschlossen und Aufnahme der wissenschaftlichen Begleitung
Oktober 2018	06.10.2018: Ende Pilotbetrieb mit Beginn Liegezeit ohne Gastbetrieb

Aufgrund der Ereignisse beschränkte sich ein auswertbarer Pilotbetrieb damit auf einen Zeitraum von 15 Tagen (entspricht ~360 Betriebsstunden). Die erzielten Ergebnisse warfen Fragen hinsichtlich der beobachteten Betriebsstabilität auf.

Wie in Abbildung 4-4 dargestellt, war nach ca. 100 Betriebsstunden eine stetige Abnahme der Filtrationsleistung erkennbar, die auf einen zunehmenden Transmembrandruck (nicht in der Grafik dargestellt) zurückgeführt wurde. Eine zu vermutende Membranverblockung führte ab der 250. Betriebsstunde zu einem Absinken der stündlichen Filtratmenge bis schließlich der Filtrationsprozess vollständig zum Stillstand kam.

Inwiefern der Betriebsverlauf auf individuelle örtliche Verhältnisse oder auf generelle Ursachen (Auslegung und Betriebskonzept) zurückzuführen war, konnte nicht abschließend geklärt werden. Der am Ende des Betriebes gemessene Feststoffgehalt im Reaktor wurde zu 44 g/l bestimmt und lag damit hinsichtlich der Empfehlungen auf Basis der Landversuche im vorgegebenen Bereich.

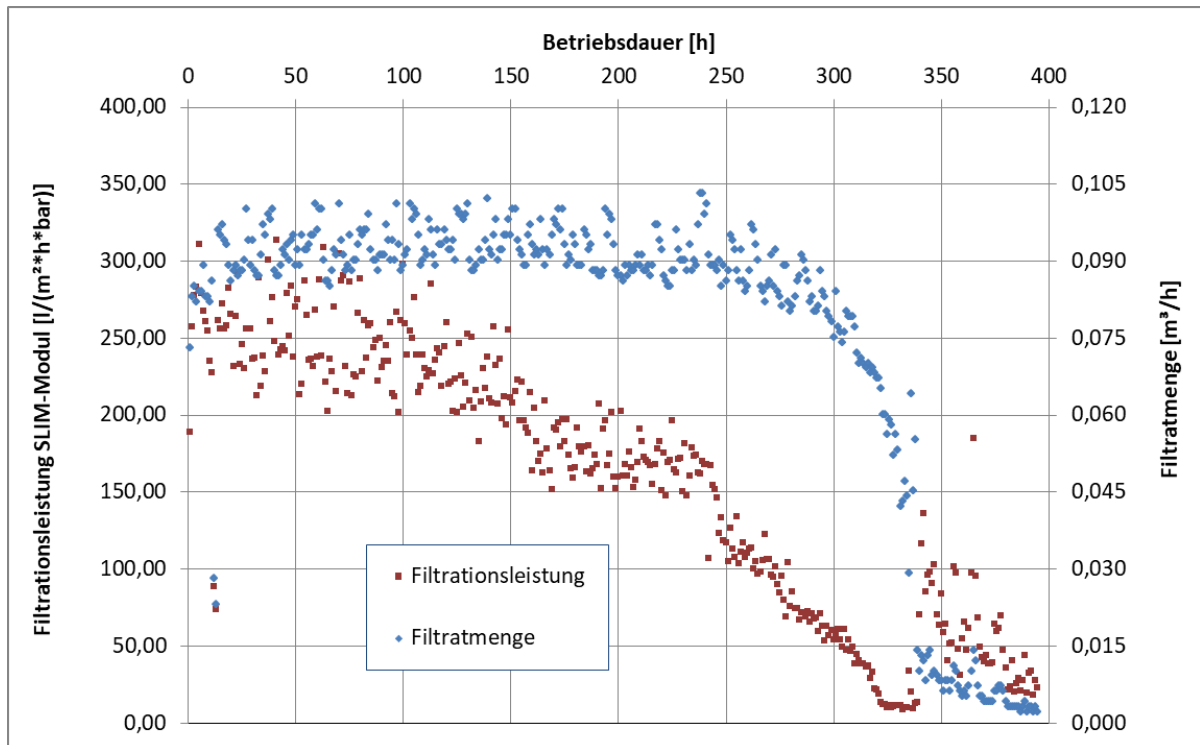


Abbildung 4-4: Verlauf der Filtrationsleistung während des Praxisbetriebs im Zeitraum September/Oktober 2018

4.2.2 Betriebsergebnisse in der Fahrtsaison 2019

Im Rahmen einer Projekterweiterung wurde der Pilotbetrieb für die Fahrtsaison 2019 verlängert. Während der Winterliegezeit in der Wintersaison 2018/2019 wurde der SLIM-Reaktor gewartet und die SLIM-Membranmodule getauscht. Die Saison startete am 12.03.2019 und endete am 05.11.2019. Die Pilotanlage war über den gesamten Zeitraum von 238 Tagen dauerhaft im Betrieb. Mit der wissenschaftlichen Begleitung der Pilotanlage wurde im Juli 2019 begonnen.

Vom Projektpartner Martin Systems GmbH wurden keine Betriebsausfälle im Rahmen der technischen Inspektionen gemeldet. Während der Fahrtsaison 2019 konnte die Pilotanlage durchgängig an Bord stabil betrieben werden. Ein signifikanter Leistungsabfall des Filtrationsprozesses konnte auch am Ende der Betriebsdauer nicht festgestellt werden.

Auf Basis aufgezeichneter Daten wurde der Überschussschlammanfall im Untersuchungszeitraum zu ca. 290 m³ ermittelt, wovon auf Basis von Abgabeprotokollen nur 120 m³ Schlamm an Land entsorgt wurden. Die Differenz von 170 m³ ist auf eine Schlammeindickung durch die SLIM-Filtration zurückzuführen, indem die Wasserphase dem Wasser-Feststoff-Gemisch entzogen wurde. Bilanztechnisch entspricht dies einer Reduktion von ~60% bezogen auf die Ausgangsmenge.

Tabelle 4–6: Bilanzierung der Klärschlammentsorgung in der Fahrtsaison 2019

Klärschlammanfall* gesamt	300 m ³
Klärschlammentsorgung* an Land (protokollierte Abgaben)	130 m ³
Überschussschlammentsorgung über Eindickung/ SLIM-Filtrat	170 m ³

* enthalten sind 10 m³ Siebstoffe aus der mechanischen Vorreinigung

Der maximal gemessene Feststoffgehalt im SLIM-Reaktor lag bei 34 g/l. Auf Basis aufgezeichneter Daten ließ sich der maximale TS-Gehalt im SLIM-Reaktor zu ca. 64,0 g/l bestimmen. Der Trockensubstanzgehalt im Membranbioreaktor variierte aufgrund der Betriebsweise im Untersuchungszeitraum zwischen 6,0 und 13,5 g/l.

Ablaufqualitäten

Die statistischen Kenndaten der Untersuchungen zu den Ablaufqualitäten der Bordkläranlage und des SLIM-Filtrates sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die CSB-Ablaufkonzentrationen im SLIM-Filtrat liegen im Mittel um den Faktor 3 über den Konzentrationen des Ablaufs der Membranbordkläranlage. Fünf der zehn Ablaufproben weisen CSB-Ablaufkonzentrationen auf, die über dem zulässigen CSB-Einleitgrenzwert von 125 mg/l liegen.

Ebenfalls liegen die P_{ges} -Konzentrationen im SLIM-Filtrat um den Faktor 2,5 über den Ablaufkonzentrationen des Bordkläranlagenablaufs. Die gemessenen Stickstoffkonzentrationen im SLIM-Filtrat liegen mit durchschnittlich 24,3 mg/l deutlich unter den mittleren Ablaufkonzentrationen des BKA-Filtrates mit 38,7 mg/l.

Tabelle 4–7: Statistische Kenndaten zu gemessenen Abwasserparametern im Ablauf Bordkläranlage und SLIM-Filtrat während der Fahrtsaison 2019

Parameter	Dim	Ablauf Bordkläranlage*				SLIM-Filtrat*			
		Min	Max	Mittelwert	Median	Min	Max	Mittelwert	Median
CSB	mg/l	20	40	28	27	33	185	93	75
N_{ges}	mg/l	5,1	78,2	36,0	32,7	1,0	52,0	15,8	11,0
$NH_4\text{-N}$	mg/l	<0,1	4,2	0,7	0,1	<0,1	3,8	0,8	0,1
$NO_3\text{-N}$	mg/l	1,4	77,2	33,2	31,5	0,6	46,2	11,9	6,3
P_{ges}	mg/l	1,7	16,5	8,9	9,5	1,3	37,0	22,5	24,2
pH-Wert	-	6,4	7,8	7,4	7,6	7,0	7,6	7,3	7,3
Leitfähigkeit	$\mu\text{S/cm}$	1.066	2.013	1.626	1.647	1.345	3.130	1.833	1.732

* 10 Messungen

4.3 Ergebnisse Referenzmessungen

4.3.1 Zulaufmessungen

Um allgemeingültige Aussagen zur Abwassersituation auf Flusskreuzfahrtschiffen ableiten zu können, war im Rahmen des Projektes eine Querschnittsuntersuchung zur detaillierten Erfassung der Abwassersituation an Bord mehrerer Flusskreuzfahrtschiffe geplant. Wie sich bei mehreren Begehungen an Bord verschiedener Schiffe herausstellte, war es aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht möglich, repräsentative Beprobungen im Zulauf von Bordkläranlagen durchzuführen. Oftmals werden an Bord Abwasserteilströme erst in größeren Sammel tanks zusammengeführt und dort bereits mit Rücklaufschlammern gemischt oder diese Tanks dienen zeitgleich als Zwischenspeicher für zurückgehaltene Siebstoffe.

Aufgrund von Nachrüstmaßnahmen konnte an Bord eines Flusskreuzfahrtschiffes im Ablauf der mechanischen Vorbehandlungsstufe Abwasserproben gezogen werden. Der beprobte Abwasserstrom umfasste hierbei alle Grau- und Schwarzwasserströme. Das Küchenwasser wurde zusätzlich durch eine Flotationsanlage vorbehandelt, bevor es mit den anderen Teilströmen vermischt wurde. Die Abwasserproben beschreiben damit die Belastungssituation der biologischen Behandlungsstufe einer Bordkläranlage.

Die Bordkläranlage konnte im Rahmen des Projektes zweimal untersucht werden. Jede Untersuchungsphase umspannte einen Zeitraum von drei Tagen. An jedem Tag wurden vormittags, mittags und abends Stichproben im Ablauf der mechanischen Vorbehandlung gezogen. In beiden Untersuchungsphasen wurden so jeweils neun Einzelproben gezogen. Die Abwasserproben wurden auf die Parameter CSB (homogenisiert und filtriert), BSB₅, AFS, N_{ges} und P_{ges} analysiert.

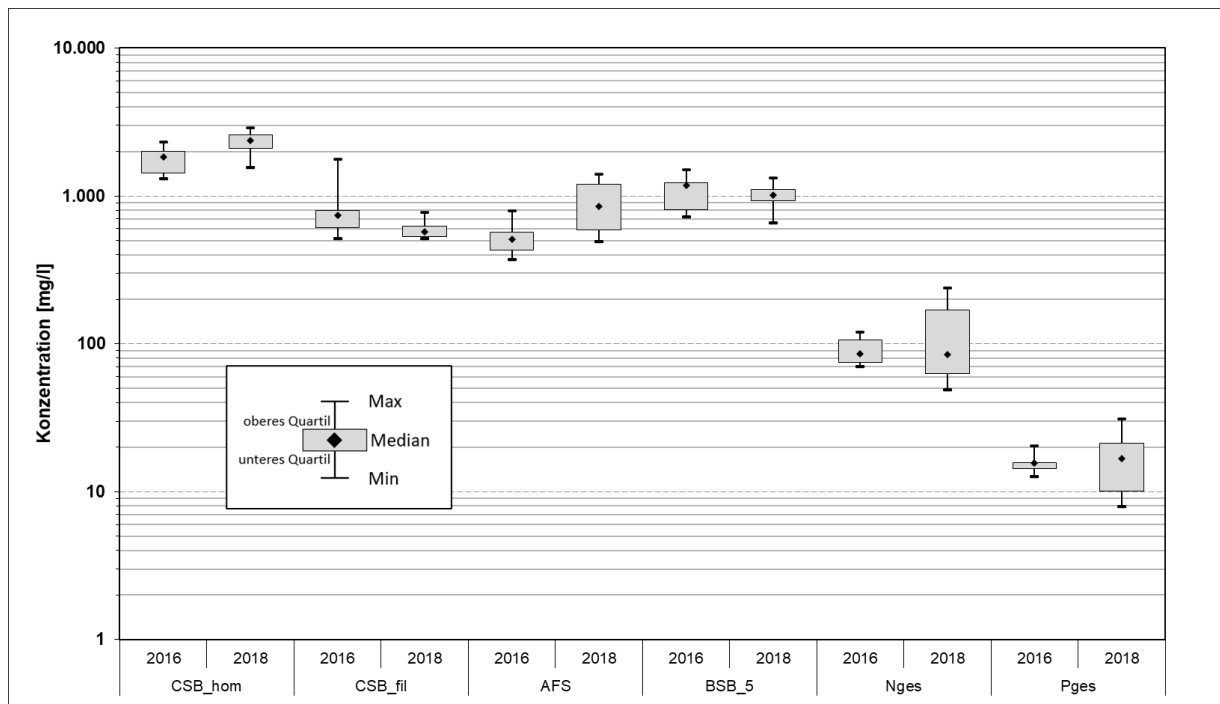


Abbildung 4-5: Statistische Kenndaten zu Konzentrationsmessungen in den Jahren 2016 und 2018 im Zulauf einer Bordkläranlage

Die statistischen Kenndaten deuten auf eine höhere Abwasserbelastung in der Fahrtsaison 2018 hin. Im Mittel lagen die Gesamt-CSB-Konzentrationen um knapp 30% höher; darüber hinaus und unter Einbezug der Abfiltrierbaren Stoffe zeigten sich deutliche Unterschiede in den gelösten und partikulären Anteilen. Die höheren CSB-Konzentrationen der Fahrtsaison 2018 werden daher auf einen signifikant höheren Anteil partikulärer Fraktionen im Abwasser zurückgeführt.

Für die Nährstoffparameter Stickstoff und Phosphor ergaben sich für beide Messkampagnen im Mittel ähnliche Konzentrationen. Für die Messkampagne 2018 weisen die statistischen Kenndaten allerdings größere Schwankungsbreiten auf.

Ursachen und Gründe der ermittelten Größenordnungen sowie der untereinander festgestellten Abweichungen können nicht abschließend geklärt werden, da es sich um rein deskriptive Untersuchungen gehandelt hat. Auch sind zur besseren Vergleichbarkeit keine Gesamtfrachten oder personenspezifische Frachten ermittelbar, da weder die korrespondierenden Wassermengen noch die an Bord befindlichen Personenzahlen für die Auswertungen zur Verfügung standen.

4.3.2 Ablaufmessungen

Zur Beurteilung des Einflusses zusätzlich emittierter Nährstofffrachten durch den Einsatz und Betrieb von SLIM-Reaktoren wurde der Ablauf von insgesamt 25 Bordkläranlagen zusätzlich auf die Parameter P_{ges} , NH_4-N und NO_3-N untersucht. Bei den Probenahmen handelte es sich um einfache Stichproben, die im Rahmen der Selbstüberwachung genommen wurden. Es handelt sich bei den nachfolgend dargestellten Analyseergebnissen somit um Momentaufnahmen. Aus Datenschutzgründen erfolgte die Auswertung in anonymisierter Form, so dass weder Behandlungsmethoden noch zugehörige Betriebszustände der beprobten Bordkläranlagen in die Untersuchung mit eingebunden werden konnten.

Die gemessenen CSB-Ablaufkonzentrationen liegen zwischen 6 und 60 mg/l, die gemessenen P_{ges} -Ablaufkonzentrationen liegen zwischen 0,7 und 26,6 mg/l. Die NH_4-N -Konzentrationen weisen einen Schwankungsbereich von 0,1 bis 80,6 mg/l und die NO_3-N -Konzentrationen einen Schwankungsbereich von 0,3 bis 66,2 mg/l auf. Zur Bewertung möglicher Gesamtstickstoffeliminationsleistungen wurden die jeweiligen Stickstoffkonzentrationen addiert und ausgewertet. Die Konzentrationen liegen zwischen 0,6 und 80,9 mg/l.

Die P_{ges} -Eliminationsleistungen sind in erster Linie auf den Aufbau von Biomasse rückführbar, wobei niedrige P_{ges} -Ablaufkonzentrationen auf ein großes CSB zu P_{ges} -Verhältnis zurückgeführt werden könnten. 17 der 25 Ablaufproben weisen eine NH_4-N -Ablaufkonzentration von <1 mg/l auf, 11 Ablaufproben ergeben Konzentrationen <18 mg/l für die Summe aus den Stickstoffparametern NH_4-N und NO_3-N . Die Messergebnisse sind abschließend in der folgenden Abbildung dargestellt.

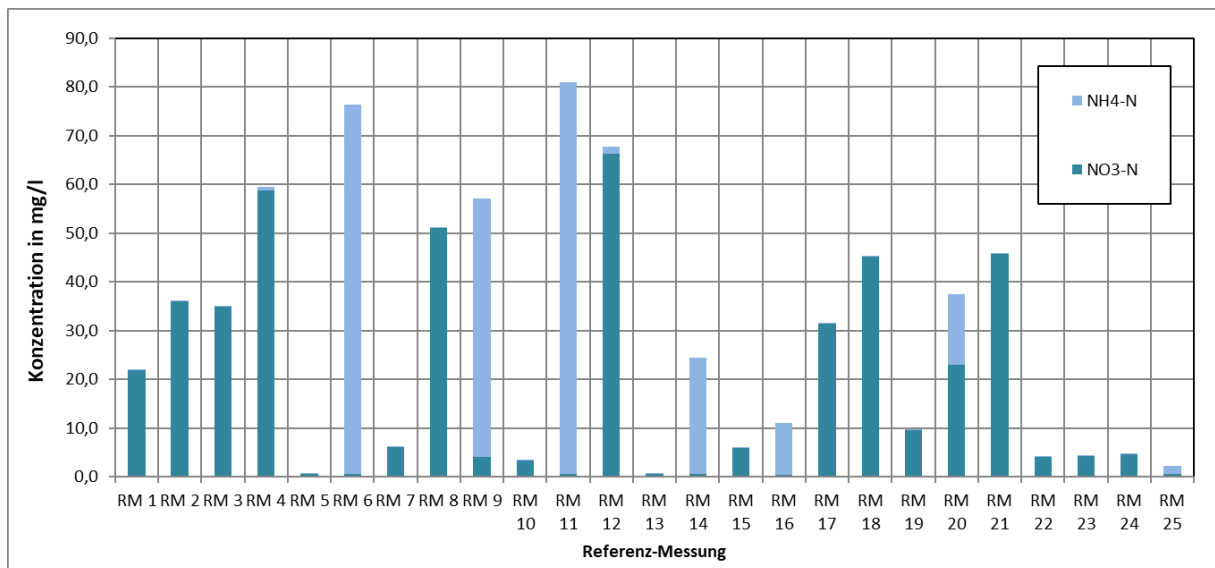
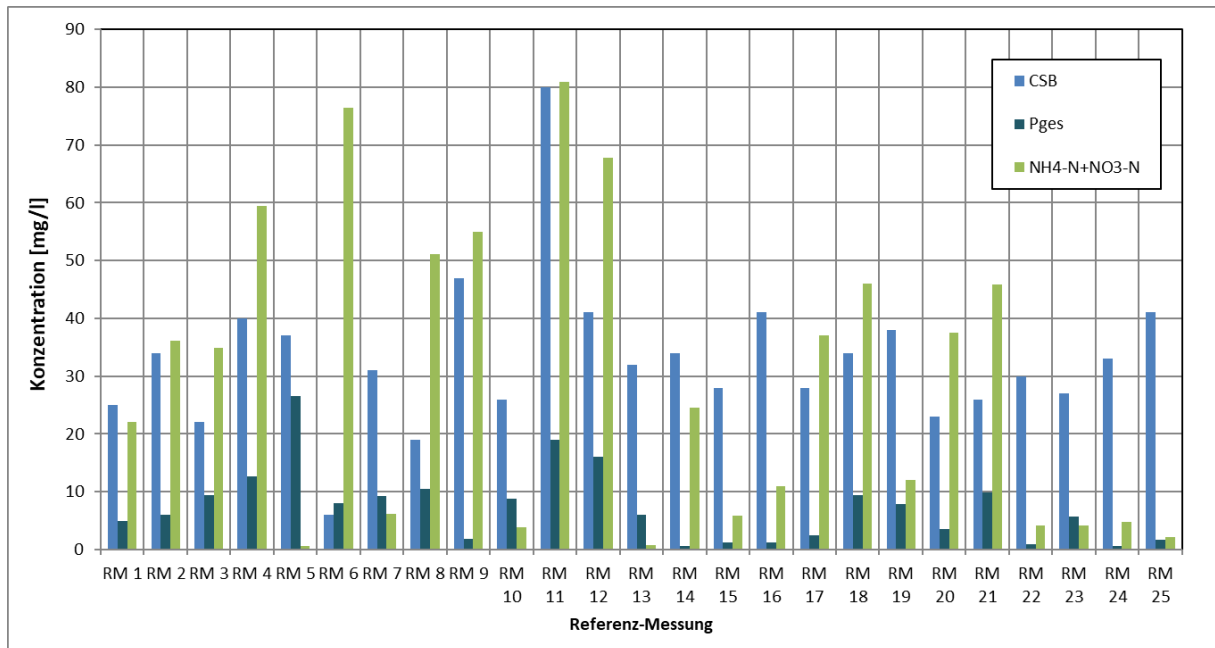


Abbildung 4-6: Referenzmessungen im Ablauf von Bordkläranlagen

4.3.3 Untersuchungen zum Schlammfall

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des SLIM-Reaktors wurden Klärschlammmentsorgungsnachweise der Jahre 2018 und 2019 von vier typgleichen Bordkläranlagen herangezogen. Insgesamt konnten so sieben Jahresnachweise ausgewertet werden.

Die Häufigkeit der Landabgaben lag zwischen 10 und 17 Abgaben je Fahrtsaison. Die jährlichen Abgabemengen variierten zwischen 187 und 325 m³. Der, auf die jährliche Abwassermenge bezogene, spezifische Klärschlammfall konnte zu 2,9 bis 3,8% ermittelt werden.

Die statistischen Kenndaten der Jahresauswertungen sind in nachstehender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4–8: Statistische Kenndaten zum jährlichen Klärschlammfall¹⁾

Kenngröße	Abgabehäufigkeiten	Abgabemengen	Spezifischer Klärschlammfall ²⁾
	[Anzahl/a]	[m ³ /a]	[%]
Min	10,0	187	2,9
Max	17,0	325	3,8
Mittelwert	13,3	258	3,4
Median	13,0	261	3,3

¹⁾ ausgewertet wurden 7 Jahresberichte von 2018 und 2019 von 4 Flusskreuzfahrtschiffen
²⁾ jährlicher Klärschlammfall bezogen auf jährlichen Abwasseranfall

5 Diskussion der Ergebnisse

Die Landversuche trugen zu einem vertieften Verständnis von Betriebsabläufen und zu Betriebserfahrungen mit dem neu zu entwickelnden SLIM-Membranmodul bei. Sie lieferten wichtige Erkenntnisse zu technisch möglichen und wirtschaftlich sinnvollen Betriebsparametern für spätere Praxisanwendungen. Die Ergebnisse der ausgedehnten Landversuche im Rahmen von Testphase 2 zeigten noch einmal das deutliche Potential des Lösungsansatzes der bordseitigen Klärschlammeindickung auf.

Der Pilotbetrieb blieb aufgrund der in Kapitel 2 beschriebenen Umstände im ersten Betriebsjahr deutlich hinter den Erwartungen zurück. Um die angestrebte Serienreife zu erreichen, waren weitere Arbeiten im Rahmen einer Projekterweiterung erforderlich. Es galt, die im Rahmen von Landversuchen gewonnenen Erkenntnisse zu Betriebsparametern unter Bordbedingungen zu verifizieren. Dies konnte im zweiten Betriebsjahr an Bord erreicht werden.

5.1 Erreichter technischer Reifegrad SLIM-Anlage

An Bord des Flusskreuzfahrtschiffes konnte im zweiten Betriebsjahr ein durchgängig stabiler Betriebszustand aufrechterhalten werden. Es kam zu keinem technischen Defekt oder Ausfall der SLIM-Membranmodule. Die im Vorfeld geplante technische Ausführung (Anlagendesign) der Membranmodule und Membranfilter erwies sich für einen Bordeinsatz als robust und geeignet. Die frei wählbare Parametrierung der wesentlichen Betriebsparameter wie Filtratfluss, transmembrane Druckdifferenz und Filtrationsintervall ermöglichte eine Anpassung an unterschiedliche Betriebs- und Belastungszustände. Der Prozess der bordseitigen Schlammeindickung ist auf Basis der Projektergebnisse als beherrschbar einzustufen. Weitere Optimierungsschritte lassen sich zukünftig auf Grundlage von Praxiserfahrungen umsetzen.

5.2 Ablaufqualität SLIM-Filtrat

Eine der Forschungsfragen im Projekt bezog sich auf die Qualität des SLIM-Filtrates und seiner weiteren Entsorgung: Ist eine direkte Zugabe in den Ablauf der Bordkläranlage möglich oder muss eine Rückführung in den Zulauf/ Membranbioreaktor der Bordkläranlage erfolgen?

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das SLIM-Filtrat vor der Einleitung in die Wasserstraße mit dem Filtrat des Bordkläranlagenablaufs vermischt. Eine Rückführung in den Zulauf/Membranbioreaktor wurde im Rahmen des Projektes technisch nicht umgesetzt.

Auf Basis der mittleren Ablaufkonzentrationen, wie sie in Tabelle 5–1 aufgeführt sind, wurde unter Berücksichtigung eines auf die Abwassermenge bezogenen, spezifischen Schlammanfalls von 3% Ablaufkonzentrationen des Ablaufgemisches rechnerisch bestimmt und mittleren Ablaufqualitäten untersuchter Bordkläranlagen gegenübergestellt.

Die direkte Einleitung von SLIM-Filtraten in die Wasserstraßen führt grundsätzlich zu einer Erhöhung von Einleitfrachten. Auf Basis der Werte aus Tabelle 5–1 führt die Einleitung zu prozentualen Frachterhöhungen zwischen 1% und 10%. Die prozentualen Veränderungen der Ablaufkonzentrationen variieren zwischen -2% und 7%. Signifikante Abweichungen unter Berücksichtigung üblicher Schwankungsbreiten in Bordkläranlagenabläufen sind für die untersuchten Parameter nicht zu erkennen.

Tabelle 5–1: Gegenüberstellung gemittelter Ablaufkonzentrationen

Parameter	SLIM ¹⁾	BKA ²⁾	SLIM+BKA ³⁾	prozentuale Veränderung ⁴⁾	Referenzmessungen ⁵⁾
CSB	93	28	30	7%	33
N _{ges}	15,8	36	35,4	-2%	29,2
NH ₄ -N	0,8	0,7	0,7	0%	10,6
NO ₃ -N	11,9	33,2	32,6	-2%	18,4
P _{ges}	22,5	8,9	9,3	4%	7,4

¹⁾ Filtrat SLIM-Schlammeindickung
²⁾ Filtrat Ablauf zugehöriger Bordkläranlage
³⁾ rechnerische Gesamt-Ablaufkonzentration bei spezifischem Schlammanfall von 3% des Abwasseranfalls
⁴⁾ prozentuale Veränderung Gesamt-Ablaufkonzentration zu Ablaufkonzentration BKA
⁵⁾ gemittelte Ablaufkonzentrationen aus 25 Beprobungen verschiedener Bordkläranlagen

Bei einer Entscheidung zum Umgang mit dem SLIM-Filtrat ist primär zu beachten, dass das SLIM-Filtrat in fünf von 10 Proben CSB-Konzentrationen aufwies, die oberhalb des erlaubten Grenzwertes von 125 mg/l lagen. Vor diesem Hintergrund sollte daher mit dem SLIM-Filtrat ähnlich verfahren werden wie mit abgezogenen Trübwässern aus Schlamm sedimentationsprozessen. Eine Rückführung des SLIM-Filtrates in den Zulauf oder Membranbioreaktor der Bordkläranlage sollte verbindlich festgelegt werden. Durch die hierdurch geschaffene interne Rezirkulation entfällt die Notwendigkeit, die Qualität des SLIM-Filtrats separat überwachen zu müssen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Rückführung zu keiner Überfrachtung des biologischen Systems führen wird. Weitere Empfehlungen zur zukünftigen Vorgehensweise zur Markteinführung sowie weiterführende Maßnahmen werden in Kapitel 6 behandelt.

5.3 Plausibilität der Referenzmessungen

5.3.1 Abwasserzusammensetzung im Zulauf von Bordkläranlagen

Die Ergebnisse der durchgeführten Referenzmessungen im Zulauf der biologischen Behandlungsstufe einer Bordkläranlage zeigen zum Teil deutliche Unterschiede zu bisherigen Konzentrationsmessungen von Messkampagnen aus den Jahren 2011 und 2012 auf (vgl. (AZ 27643; *Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Bordkläranlagen mit Membrantechnik und Optimierung des Anlagenbetriebs an Bord von Flusskreuzfahrtschiffen; 2011/2012*). Beispielhaft sind die statistischen Kenndaten für den Parameter CSB der verschiedenen Messkampagnen gegenübergestellt.

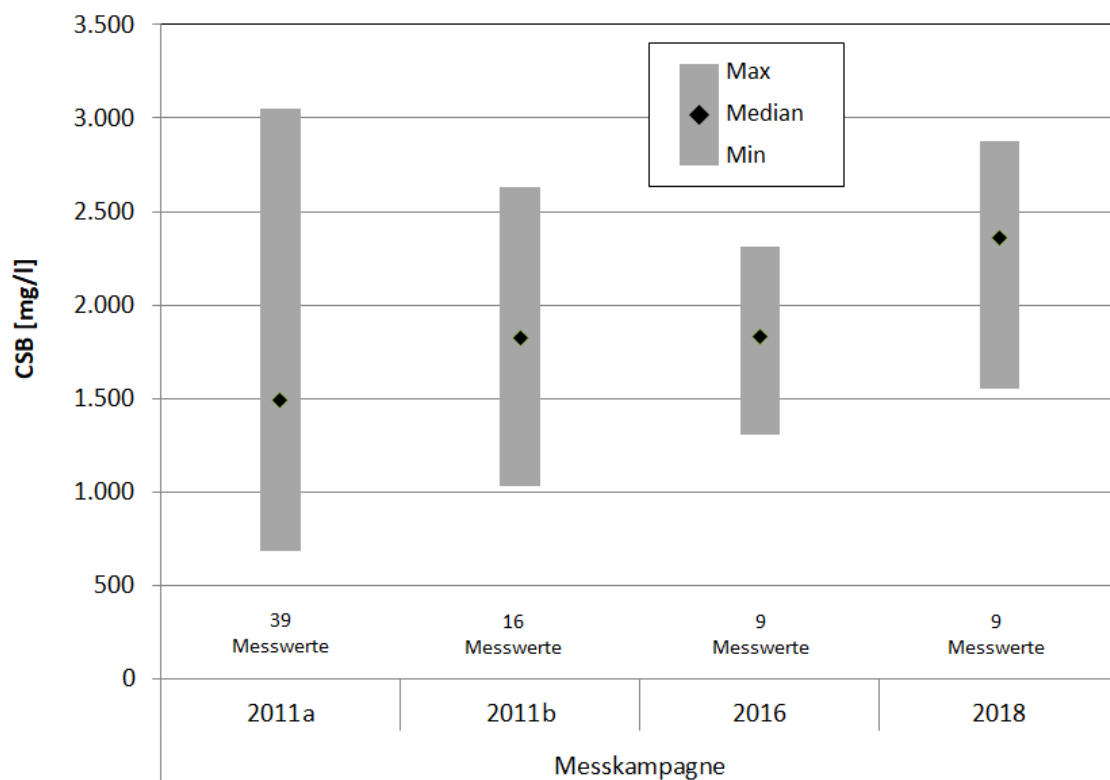


Abbildung 5-1: Gegenüberstellung von statistischen Kenndaten verschiedener Messkampagnen zu gemessenen CSB-Konzentrationen im Zulauf der biologischen Behandlungsstufe von Bordkläranlagen

Die größeren Spannweiten der Messkampagnen aus dem Jahr 2011 können grundsätzlich auf den jeweiligen Umfang der einzelnen Messkampagnen zurückgeführt werden. Die Medianwerte der verschiedenen Messkampagnen liegen zwischen 1.492 mg/l (Messkampagne 2011a) und 2.360 mg/l (Messkampagne 2018) und weisen damit zueinander signifikante Unterschiede auf. Relativiert wird diese Abweichung wiederum durch einen Vergleich der

Medianwerte der Messkampagnen 2011b und 2016; hier liegen die Medianwerte mit 1.826 mg/ (Messkampagne 2011b) und 1.830 mg/l (Messkampagne 2016) dicht beieinander. Wie bereits in Kapitel 4.3.1 erläutert, werden die statistischen Kenndaten der CSB-Messungen der Messkampagne 2018 durch einen gegenüber 2016 deutlich erhöhten partikulären Anteil geprägt. Die Ursache der signifikanten Abweichungen könnte daher ggfs. auf die Betriebszustände der mechanischen Vorbehandlungsstufen zurückgeführt werden.

5.3.2 Klärschlammanfall

Die Untersuchungen zum spezifischen Klärschlammanfall bestätigen mit einer Spannweite von 2,9% bis 3,8% die Größenordnung des im Vorgängerprojekt hergeleiteten Durchschnittswerts von 3,0%, bezogen auf die behandelte Abwassermenge. Der spezifische Klärschlammanfall kann, in Abhängigkeit getroffener Maßnahmen zur Eindickung bzw. durch zusätzlich zu entsorgende Spülwässer aus der Reinigung von Schlammstammeltanks, deutlich höheren volumenbezogenen Schwankungsbreiten unterliegen.

6 Fazit und Empfehlungen

Die Forschungsfragen konnten zur vollen Zufriedenheit geklärt werden. Aus Sicht des Projektteams wurde die Produkt- bzw. Marktreife der technischen Bauteile (SLIM-Membranmodul) im Rahmen des Projektes erreicht. Das SLIM-Membranmodul kann zukünftig einen entscheidenden Beitrag zur Optimierung der bordseitigen, autarken Abwasserbehandlung inklusive der Reststoffentsorgung (Klärschlämme) leisten.

Zusätzliche Investitions- und Betriebskosten können durch die Einsparung von Entsorgungskosten kompensiert werden. Eine ökonomische Bewertung zum aktuellen Zeitpunkt ist aufgrund fehlender Daten nicht valide durchführbar.

Die technische Einbindung lässt sich ohne größeren Verwaltungsaufwand realisieren. Bisherige Eindickungsmaßnahmen auf Basis eines Trübwasserabzug im Schlammstammeltank erfolgen aktuell ohne zusätzliche Freigaben und Dokumentationspflichten, die über ein R&I-Fließschema hinausgehen.

Im Rahmen eines großtechnischen Betriebes wird es vielmehr von Bedeutung sein, Maßnahmen zu treffen, um den Verbleib des Klärschlammes für die Überwachungsbehörden transparent und lückenlos dokumentieren und anhand von Nachweisen belegen zu können. Dies gilt sowohl für die Wasser- wie auch für die Feststoffphase.

Die Entsorgung von Klärschlamm ist auf Grundlage der gesetzlichen Vorschriften nachweisspflichtig. Im Sinne des CDNI werden unter dem Ausdruck „Klärschlamm“ Rückstände verstanden, die bei Betrieb einer Bordkläranlage an Bord des Fahrzeugs entstehen. Die Nachweispflicht bezieht sich damit auf die produzierten Klärschlammengen bei physikalischen Vorbehandlungs- und biologischen Behandlungsmaßnahmen, wie produzierte Primärschlämme durch mechanische Behandlungsmaßnahmen (Feststoffabscheidung) und produzierte Überschussschlämme durch biologische Behandlung (Zuwachs an Mikroorganismen).

Das Führen einer lückenlosen, bordseitigen Dokumentation von der Entstehung bis zur Abgabe der Reststoffe wird daher für die Reedereien obligatorisch werden müssen. Einer „Überverteilung von Kontrollbehörden durch Kläranlagenbetreiber“ muss durch geeignete Nachweis- und Überwachungskonzepte entgegengewirkt werden. Der wirtschaftliche Vorteil, der sich durch reduzierte Klärschlamm Entsorgungskosten bei verminderten Abgabemengen ergibt, ist hierbei hervorzuheben.

Dokumentierte Klärschlammengen sind zwingend Plausibilitätsprüfungen zu unterziehen und Forschungsergebnissen, Erfahrungswerten sowie Messergebnissen der Zulassungsprüfung gegenüberzustellen. Die Reduzierung der Klärschlammengen durch Eindickung ist durch eine nachverfolgbare Dokumentation der betrieblich abgezogenen Wasserphase nachzuweisen. Zusätzliche Plausibilitätsprüfungen können in Form von Feststoffmessungen der

eingedickten Klärschlämme erfolgen. Aus Sicht der behördlichen Überwachung lassen sich mit diesen Maßnahmen grundsätzlich potentiellen Missbräuchen entgegenwirken.

Diese Dokumentationspflichten sollten aus Sicht des Autors allerdings zwingend für alle Eindickungsmaßnahmen, und damit auch für Trübwasserabzugssysteme, eingeführt werden. Entsprechende Dokumentations- und Kontroll-Konzepte sind von der Bedeutung her als gleichwertig gegenüber den technischen Lösungen einzustufen. Letztlich können diese Konzepte jedoch nur aus der Praxis heraus und unter Beteiligung aller Akteure entwickelt werden.

Eine besondere Verantwortung werden hierzu Hersteller von Bordkläranlagen mit implementierten Klärschlammindickungsmaßnahmen tragen müssen. Die Bereitstellung entsprechender Nachweisdokumente und Messeinrichtungen zur Erfüllung der Nachweispflichten liegt in ihrem Verantwortungsbereich und hat im Rahmen des nach EN ISO 9001 zu zertifizierendem Qualitätsmanagement der Hersteller zu erfolgen.

Diese Internationale Norm legt Anforderungen an ein Qualitätsmanagementsystem fest. Qualitätsmanagement bedeutet im Sinne der Norm eine systematische und geplante Herangehensweise an die Ermittlung und Erfüllung von Kundenforderungen durch ein Unternehmen. Nachhaltiger Erfolg wird nur dann erreicht, wenn die Bedürfnisse bzw. Zufriedenheit der Kunden gründlich erhoben und verstanden werden und im Prozess der Leistungserbringung Berücksichtigung finden. Unter Kundenbedürfnissen ist u.a. deren Einhaltung gesetzlicher Bestimmungen gemeint. Qualitätsrelevante Tätigkeiten der Hersteller unterliegen dem sogenannten PDCA Zyklus (Plan, Do, Check, Act), der zum Ziel hat, die Wirksamkeit festgelegter Maßnahmen zu überprüfen und, sofern die definierten Ziele nicht erreicht werden, zu handeln. Der Europäische Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe (ES-TRIN) verlangt im Rahmen des Zulassungsverfahrens von Bordkläranlagen, dass Hersteller die Bestimmungen dieser Qualitätsnorm erfüllen (vgl. ES-TRIN, 2017; Anlage 7, Abschnitt 1, Kapitel 3.1).

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Einführung von SLIM-Maßnahmen in den zeitlichen Kontext zunehmend strengerer und umfangreicherer Überwachungen fallen wird.

Im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz wurde in den Jahren 2017 bis 2019 durch das Bayerische Landesamt für Umwelt erstmals ein Konzept erarbeitet, das den zuständigen Kontrollbehörden zukünftig ermöglichen soll, die einwandfreie Funktionsfähigkeit von Bordkläranlagen auf Fahrgastschiffen effizient überwachen zu können. Die gesicherten Erkenntnisse zum Stand der Abwasserentsorgung auf Flusskreuzfahrtschiffen haben mit den in den letzten Jahren begonnenen Polizeikontrollen deutlich zugenommen. Der Regelkreis zu Produktion, Zulassung, Einbau und Überwachung von Bordkläranlagen wurde geschlossen und Rückkopplungsprozesse damit angestoßen. Die regelkonforme Abwasserentsorgung an Bord eines Flusskreuzfahrtschiffes wird mehr und mehr von übergeordneter Bedeutung für den gesamten regulären Betriebsablauf zu werten sein.

Die Komplexität einer regelkonformen Abwasserentsorgung mit all ihren betrieblichen und technischen Konsequenzen sollte aus Sicht des Autors von allen beteiligten Parteien nicht unterschätzt werden (vgl. Kaiser, 2020).

Zusammenfassend lassen sich zum aktuellen Zeitpunkt folgende Empfehlungen für die Einführung von „SLIM“ formulieren:

- ⇒ Das Filtrat aus den Schlamm-Modulen muss dem Zulauf oder dem Bioreaktor der Bordkläranlage zugeleitet werden. Eine Einleitung direkt nach außenbords oder in die Ablaufleitung ist zu verbieten.
- ⇒ Ein rechnerischer Nachweis muss der verantwortlichen Behörde vorgelegt werden, der bescheinigt, dass die Bordkläranlage die hydraulische und stoffliche Zusatzfracht abgezogener Filtrate bewältigen kann. Zu klären ist, ob und in welcher Form eine Eintragung in das Schiffsattest erforderlich wäre.
- ⇒ Aus „behördlicher Überwachungssicht“ ist durch den Hersteller eine ausführliche Prozessbeschreibung inklusiver korrespondierender Betriebsprotokolle zu liefern. Der Verbleib des beim Reinigungsprozess entstehenden Klärschlammes muss lückenlos dokumentierbar sein. Entsprechende notwendige Messeinrichtungen technischer Art (wie z.B. Mengemesser) sind durch den Hersteller vorzusehen.
- ⇒ Aus „behördlicher Überwachungssicht“ ist durch den Betreiber der Verbleib des beim Reinigungsprozess entstehenden Klärschlammes lückenlos zu dokumentieren. Durch eine nachverfolgbare Dokumentation der betrieblich abgezogenen Wasserphase ist die Reduzierung der Klärschlammemengen nachzuweisen. Hierzu greift der Betreiber auf die vom Hersteller zu liefernden Instrumente zurück.
- ⇒ Die Interaktion zwischen Hersteller und Betreiber erfolgt auf Basis der QM-Zertifizierung nach ISO 9001 des Herstellers.
- ⇒ Zum jetzigen Zeitpunkt sollte von einem spezifischen Klärschlammfall von mindestens 30l/1m³Abwasser ausgegangen werden, sofern keine valide Datengrundlage vorliegt. Abweichungen sollten nur in begründeten Fällen erlaubt werden.
- ⇒ Eine fachmännische Einbau- und Betriebsbegleitung der ersten SLIM-Anlagen durch den PIA e.V. wird zwecks Sicherstellung und Gewährleistung eines regelkonformen Betriebs ausdrücklich empfohlen. Die ersten baulichen Umsetzungen sollten im Rahmen einer gemeinsamen Bordbegehung einzeln abgenommen werden. Im Rahmen der Betriebsbegleitung sollten durch den PIA e.V. entsprechende Plausibilitätsprüfungen vorgenommen werden. Die im Rahmen der Begleitung gewonnene Expertise kann allen Akteuren zwecks gemeinsamer, praxisnaher Entwicklung von Dokumentations- und Kontroll-Konzepten zur Verfügung gestellt werden.

Auf Basis dieser Empfehlungen wird aus Sicht des Autors eine Implementierung entsprechender Optimierungsmaßnahmen zur bordseitigen, autarken Abwasserbehandlung inklusive der Reststoffentsorgung nachhaltig umgesetzt werden können: die Reedereien werden bestmöglich unterstützt, indem ihnen technische und konzeptionelle Lösungen zur kontinuierlichen Verbesserung unterbreitet werden; gleichzeitig werden korrespondierende Kontrollinstrumente für die Überwachungsbehörden entwickelt.

7 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen von Publikationen, Vorträgen und bilateralen Arbeitstreffen mit Akteuren der Binnenschifffahrt sowie interessierten Stakeholdern der Siedlungswasserwirtschaft vorgestellt. Mit Abschluss des Vorhabens ist eine weitere Publikation in einem Fachjournal der Binnenschifffahrt geplant. Im Besonderen wurden Wasserschutzpolizeien über das Forschungsvorhaben informiert, die im Rahmen der CDNI-Gesetzgebung Kontroll- und Überwachungsaufgaben zu Bordkläranlagen übernehmen. In nachfolgender Tabelle sind chronologisch die Aktivitäten zur Verbreitung der Projektergebnisse aufgeführt.

Tabelle 7–1: Chronologie zur Dissemination der Projektergebnisse

Zeitpunkt	Art der Dissemination	Zielgruppe
September 2017	Publikation in Fachzeitschrift „ <i>Binnenschifffahrt</i> “	Akteure der Binnenschifffahrt
September 2018	Vortrag	Wasserschutzpolizeien Schulungs-Workshop in Rüdesheim
Juli 2019	Vortrag	Wasserschutzpolizeien Schulungs-Workshop in Köln
Oktober 2019	Arbeitstreffen (bilateral)	Dezernat Technische Schiffssicherheit Ergebnispräsentation und Diskussion in Mainz
Dezember 2019	Vortrag	Wasserschutzpolizei Bayern und Bayerisches Landesamt für Umwelt Ergebnispräsentation und Diskussion in Augsburg
Januar 2020	Arbeitstreffen (bilateral)	Reederei der Flusskreuzschifffahrt Planungsgespräch für großtechnische Umsetzung
geplant Frühjahr 2021	Publikation in Fachzeitschrift „ <i>Binnenschifffahrt</i> “	Akteure der Binnenschifffahrt

Durch den Ausbruch des Coronavirus SARS-CoV-2 wurden im Frühjahr 2020 mehrere Veranstaltungen, auf denen die Projektergebnisse vorgestellt werden sollten, abgesagt. Zum Teil sollen, sofern möglich, die Veranstaltungen im Jahr 2021 nachgeholt werden.

Ebenfalls wurden Planungsarbeiten zur großtechnischen Umsetzung verschoben, da der Ausbruch des Coronavirus zum Erliegen des Flusskreuzfahrtenmarktes zu Beginn der Fahrtsaison 2020 geführt hatte. Inwiefern eine Markterholung in der Fahrtsaison 2021 stattfinden wird, auf dessen Grundlage die Planungsarbeiten fortgeführt werden können, bleibt abzuwarten.

Literatur

- CDNI, 2011 Übereinkommen über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt, September 1996; Zentralkommission der Rheinschifffahrt (ZKR); Straßburg, Ausgabe 2018
- DIN EN ISO 9001:2015 Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen; Ausgabedatum 2015-11
- ES-TRIN, 2019 Europäischer Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe (ES-TRIN); Europäischer Ausschuss zur Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt (CESNI); Ausgabe 2019
- Kaiser, 2020 Kaiser, Arndt: Bordkläranlagen in der Flusskreuzschifffahrt – quo vadis? Binnenschifffahrt 03/2020; Fachmagazin für Technik und Logistik.

Anhang

Statistische Kenndaten zu den Zulaufmessungen

Mess- kampagne 2016	CSB_hom	CSB_fil	BSB ₅	AFS	N _{ges}	P _{ges}
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Min	1.310	517	720	370	71	13
Max	2.310	1.770	1.510	790	120	21
Mittelwert	1.786	818	1.080	537	92	16
Median	1.830	739	1.180	510	86	16
u. Quartil	1.430	607	810	430	75	14
o. Quartil	2.010	802	1.230	570	106	16

Anzahl Messungen: 9

Mess- kampagne 2018	CSB_hom	CSB_fil	BSB ₅	AFS	N _{ges}	P _{ges}
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Min	1.550	516	660	490	49	8
Max	2.880	775	1.330	1.400	240	31
Mittelwert	2.293	602	1.031	879	115	17
Median	2.360	569	1.010	850	85	17
u. Quartil	2.090	529	930	590	63	10
o. Quartil	2.590	623	1.100	1.200	170	21

Anzahl Messungen: 9