

Behandlung von Scrubberabwasser in der KA Puttgarden

Sebastian Beining¹, Hans-Otto Günter¹, Abdelmadjid Silem¹ und Jörn Einfeldt²

1 Privatinstitut für Klärtechnik GmbH, Botterstieg 1, D-23611 Bad Schwartau

2 HAW Hamburg, Fakultät Life Sciences, Department Umwelttechnik, Ulmenliet 20, D-21033 Hamburg

E-Mail (Vortragender): Sebastian Beining, mailbox@pik-net.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die Firma Scandlines GmbH betreibt auf dem Fährhafen Puttgarden die sogenannte Vogelfluglinie zwischen Puttgarden (Fehmarn, Deutschland) und Rødby (Lolland, Dänemark) mit insgesamt fünf Fährschiffen. Von diesen Schiffen wurden vier mit je einer Abgasreinigungsanlage an Bord ausgerüstet. In diesen Rauchgaswäschern (Scrubber) werden die Abgase der Schiffsdieselmotoren mit Seewasser und Natronlauge in Kontakt gebracht. Neben den Schwefeloxiden (SO_x) werden die durch Verbrennung gebildeten Stickoxide (NO_x) aus dem Abgas gewaschen. Das dabei entstehende Waschwasser ist sehr stark belastet und muss entsorgt werden.

Da eine Einleitung dieser Abwässer mehr oder weniger unbehandelt in das Meer ökologisch nicht sinnvoll ist, hat sich die Firma Scandlines als Betreiber schon frühzeitig entschieden, die anfallenden Scrubberabwässer möglichst auf der betriebseigenen Kläranlage in Puttgarden zusammen mit den Schiffsabwässern und den übrigen häuslichen Abwässern an Land zu behandeln. Um die Machbarkeit und die Rahmenbedingungen zu prüfen sind zuerst im Labor der Privatinstitut für Klärtechnik GmbH (PIK) umfangreiche Untersuchungen zur Abbaubarkeit und möglichen Verfahren vorgenommen worden.

Nach positiven Laborergebnissen wurde Anfang 2015 eine großtechnische Versuchsanlage auf der Kläranlage Puttgarden errichtet und die Versuche durch das PIK wissenschaftlich begleitet.

Aufgrund der positiven Ergebnisse des Versuchsbetriebes hat sich die Firma Scandlines zwischenzeitlich entschieden im Jahr 2017 eine dauerhafte Anlage zur Mitbehandlung der Scrubberabwässer auf der Kläranlage Puttgarden zu errichten. Die Inbetriebnahme und Optimierung der Anlage wurde durch das PIK ebenfalls begleitet. Erste Ergebnisse zur Behandlung von Scrubberabwasser auf der KA Puttgarden im regulären Betrieb mit der neu errichteten großtechnischen Anlage liegen vor.

1 GESETZLICHE REGELUNGEN

Um die Meeresverschmutzung durch den Schiffsverkehr zu vermindern bzw. ganz zu unterbinden, haben die 171 Mitgliedsstaaten der International Maritime Organization (IMO) das Internationale Übereinkommen von 1973 zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (MARPOL 73/78) beschlossen. Das MARPOL-Abkommen ist weltweit gültig und umfasst derzeit sechs Anlagen.

MARPOL: Anlage VI – Luftverschmutzung durch Schiffe

Die Anlage VI regelt die Emissionen von Schiffen in die Luft, die durch die Verbrennung der Kraftstoffe entstehen. In der Anlage wurden neben anderen Schadstoffen hauptsächlich Grenzwerte für Stick- und Schwefeloxide festgelegt. Die Grenzwerte zur Einhaltung der Stickoxid-Emissionen richten sich nach der Antriebsleistung der Schiffsdieselmotoren sowie nach dem Betrieb der Motoren und eingesetzten Katalysatoren (SCR).

Da als Kraftstoff auf den meisten Schiffen Schweröle (HFO bzw. MFO) mit Schwefelgehalten von bis zu 6%-S verbrannt werden, muss insbesondere auch auf die Einhaltung der Schwefeloxid (SO_x) Emissionen geachtet werden.

Dabei gelten folgende Schwefelgrenzwerte im Brennstoff:

MARPOL Anlage VI, Regel 14 Schwefeloxide (SO _x) und Partikelmasse und Schwefelrichtlinie nach 2012/33/EU (SchwefelRL)			
Schwefelnormen	2012	2015	2020
Außerhalb (S)ECA nach SchwefelRL und Anlage VI MARPOL	3,50 % m/m	3,50 % m/m	0,50 % m/m
Innerhalb (S)ECA nach SchwefelRL und Anlage VI MARPOL	1,00 % m/m (seit 01.01.2010)	0,10 % m/m	0,10 % m/m
Spezialfall EU-weit: Fahrgastschiffe (Linienverkehr zwischen EU-Häfen) nach SchwefelRL	1,50 % m/m (in SECA 1,00 % m/m)	1,50 % m/m (in SECA 0,10 % m/m)	0,50 % m/m
Spezialfall EU-weit: EU-Häfen (mehr als zwei Stunden am Liegeplatz) nach SchwefelRL	0,10 % m/m	0,10 % m/m	0,10 % m/m
% m/m = Massenhundertteile im Schiffskraftstoff			

Bild 1: Schwefelgrenzwerte in Schiffskraftstoffen (aus BSH 2017)

Wird ein Schiffskraftstoff mit höheren Schwefelanteilen verfeuert, so müssen alternativ die Grenzwerte im Abgas eingehalten werden.

Die sogenannten (S)ECA (SO_x emission control areas) stellen besonders schützenswerte Meeresgebiete dar, in denen strengere Grenzwerte für die Schwefelgehalt im Brennstoff bzw. Abgas gelten. Zu diesen Emissions-Überwachungsgebieten zählen derzeit u.a. die Ostsee, Nordsee und der Ärmelkanal.

In der Nord- und Ostsee gilt seit 01.01.2015 ein Grenzwert für den Schwefelgehalt im Schiffskraftstoff bzw. im Abgas von 0,10%. Wird zur Einhaltung dieses Grenzwertes ein

Abgasreinigungssystem (Scrubber) verwendet, gilt für das Einleiten von Waschwasser in deutschen Gewässern (§ 13 Abs. 7 SeeUmwVerhV und CDNI):

- Binnenwasserstraße: **verboten!** (Ausnahme: Bodensee, Rhein oberhalb Rheinfelden).
- Seewasserstraßen: **erlaubt, wenn** Kriterien der IMO-Richtlinien für Abgasreinigungssysteme 2009 erfüllt (pH-Wert, PAK und Trübung).

2 RAUCHGASWÄSCHER (SCRUBBER)

Um den Grenzwert von 0,1%-S in den Emissions-Überwachungsgebieten (ECA) jederzeit einhalten zu können, müssen die bei der Verbrennung von schwefelhaltigem Schweröl entstehenden Verbrennungsgase in Rauchgaswäschern absorptiv gewaschen werden.

Bei der Verbrennung entstehen neben CO₂ und H₂O als Hauptprodukte hauptsächlich Schadstoffgase wie Stickoxide (NO_x) und Schwefeloxide (SO_x) sowie Ruß. Dieses saure Abgas wird bei den nassen Verfahren in einem Gegenstromgaswäscher (Scrubber) mit Meerwasser und Natronlauge in Kontakt gebracht und auf einen pH-Wert von pH = 7-8 neutralisiert. Dabei reagieren die Schwefeloxide mit der Natronlauge zu Natriumsulfit und Natriumsulfat.

Die im Verbrennungsgas enthaltenen Stickoxide lösen sich bei der Absorption ebenfalls im Waschwasser und bilden mit der Natronlauge Nitrate und Nitrite.

Als Folge der Gaswäsche fallen stark salzhaltige, belastete Waschwassermengen an. Auf Schiffen haben sich bei nassen Wäschersystemen die sogenannten closed-loop und die open-loop Scrubber technisch bewährt:

In einem closed-loop Scrubber wird das Waschwasser bis zur vollständigen Beladung im Wäscher zirkuliert und bei Erschöpfung durch frisches Waschwasser ersetzt.

In einem open-loop Scrubber werden ständig große Mengen frisches, unbeladenes Waschwasser zur Gaswäsche verwendet. Dabei erfolgt nur eine Teilbeladung des Waschwassers. Daneben gibt es auch Hybrid-Scrubber, die sowohl als open-loop (offene See) als auch als closed-loop-Scrubber (Hafen, Binnengewässer) betrieben werden können.

Die Reederei Scandlines hat seine Ostseefähren mit einem closed-loop Scrubbersystem ausgestattet.

3 KLÄRANLAGE PUTTGARDEN

Infolge des Fährschiffbetriebs in Puttgarden fallen täglich ca. 220 m³ Abwässer an, die einen häuslichen Charakter aufweisen. Die Behandlung dieser Abwässer erfolgt im Fährhafen Puttgarden in einer firmeneigenen Kläranlage (2.350 EW) durch eine mechanische Reinigungsstufe (Rechen, Sandfang, Vorklärung), eine biologische Behandlungsstufe (Denitrifikation, Nitrifikation und C-Abbau,) sowie einer Nachklärung. Die

Phosphorelimination erfolgt durch die simultane P-Fällung in der Belebung mit Polyaluminiumchlorid.

Zur Abwassereinleitung der Kläranlage Puttgarden in die Ostsee sind derzeit folgende Überwachungswerte im Ablauf einzuhalten:

CSB	=	110 mg/l
BSB5	=	25 mg/l
Nges	=	60 mg/l
Pges	=	10 mg/l

4 MACHBARKEITSSTUDIE SCRUBBERABWASSERBEHANDLUNG

Die Einleitung der mehr oder weniger unbehandelten Abwässer der Abgasreinigungssysteme in das Meer ist ökologisch nicht sinnvoll. Es können an der Einleitstelle kurzzeitige Umweltbeeinträchtigungen durch hohe Abwassertemperaturen, zeitweise schwankende pH-Werte und durch die Schadstoffbelastungen auftreten. Weiterhin ist es paradox die Schadstoffe einerseits aus der Luft herauszuholen um diese andererseits in die aquatische Umwelt insbesondere in einem nach MARPOL besonders geschütztem Gebiet wie die Ostsee wieder zurückzuführen.

Die Firma Scandlines als Betreiber der Fährverbindung Puttgarden – Rødby beschloss deshalb bewusst die Scrubberabwässer nicht in die Ostsee einzuleiten, sondern zu prüfen, ob diese in der betriebseigenen Kläranlage in Puttgarden zusammen mit den Schiffsabwässern und den übrigen häuslichen Abwässern an Land behandelt werden können. Da keine Erfahrungen mit der Mitbehandlung solcher hoch konzentrierten Scrubberabwässer in kommunalen Kläranlagen vorliegen, sollten zuerst eventuelle Beeinträchtigungen der biologischen Abbauprozesse ermittelt werden. Hierbei war zu beachten, dass bei der Kläranlage Puttgarden mit einer Ausbaugröße von lediglich 2.350 EW der Scrubberwasseranteil hydraulisch und organisch mehr als 25% der Belastung im Gesamtabwasser betragen wird. Hinzu kommen hohe Salzgehalte aus dem Seewasser, Nitrat-, Nitrit- und Sulfatgehalte sowie Ruß- und Öl-Rückstände aus der Verbrennung.

Um die Machbarkeit und die Rahmenbedingungen einer Mitbehandlung zu ermitteln sind zuerst im Labor der Privatinstitut für Klärtechnik GmbH (PIK) umfangreiche Untersuchungen zur biologischen Abbaubarkeit und zu weiteren möglichen Vorbehandlungsverfahren durchgeführt worden.

4.1 Abwasserzusammensetzung

Bei der Rauchgaswäsche wird Meerwasser der Ostsee als Washwasser verwendet. Die Wassermatrix des Scrubberabwassers entspricht der typischen Zusammensetzung eines natürlichen Meerwassers.

Durch die Rauchgaswäsche wird das Waschwasser mit nachfolgenden Inhaltsstoffen belastet:

- sehr hohe Salzkonzentrationen: Leitfähigkeit 40-90 mS/cm, Natrium und Sulfate 20-60 g/l, Chloride >6 g/l
- hohe organischen Belastungen, teilweise mit Teer- und Ölphase
- hohe Feststoffanteile durch Ruß
- Nitrite und Nitrate ($N_{\text{ges,anorg.}} > 100 \text{ mg/l}$)
- Schwermetalle wie Nickel (1-6 mg/l) und Zink (>1mg/l)

4.2 Laborversuche zur biologischen Behandlung

Bei der Ermittlung einer Entsorgungsschiene für das Scrubberabwasser wurde die Möglichkeit einer biologischen Behandlung zusammen mit den Fährschiffabwässern auf der vorhandenen Kläranlage untersucht. Da die Rauchgasabwässer extrem salzhaltig sind, wurden zuerst die zu erwartenden Auswirkungen solcher Abwässer auf die biologischen Abbauprozesse einer Kläranlage untersucht. Auf Grund einer hohen biologischen Empfindlichkeit der Nitrifikanten ist hier die eventuelle Nitrifikationshemmung zu nennen.

Die Durchführung gezielter Biotestverfahren sollte in dieser Hinsicht Klarheit verschaffen. Die Anwendung anderer Biotestverfahren sowohl unter anoxischen als auch unter aeroben Bedingungen sollte außerdem eventuelle Auswirkungen auf den Kohlenstoff- und Stickstoffabbau deutlich machen. Anhand dieser Versuche, die insgesamt positiv verliefen, konnten neben der biologischen Abbaubarkeit der organischen Inhaltsstoffe auch wertvolle Erkenntnisse über eine gemeinsame biologische Behandlung von Fährschiffs- und Scrubberabwasser gewonnen werden. Insbesondere ist mit einer Erhöhung des inerten refraktären Rest-CSB zu rechnen.

4.3 Laborversuche zur Machbarkeit einer Nachbehandlung

Da bei der biologischen Mitbehandlung des Scrubberabwassers mit einem inerten refraktären Rest-CSB zu rechnen ist, erweist sich eine Nachbehandlung zur weiteren Reduzierung der CSB-Konzentration im biologisch behandelten Abwasser als notwendig. Zur Nachbehandlung wurde das Adsorptionsverfahren untersucht. Organische Schadstoffe lassen sich auf der inneren Oberfläche eines Adsorptionsmittels anlagern und eliminieren. Als Adsorptionsmittel für solche Schadstoffe hat sich in der Praxis Aktivkohle bewährt. Die Adsorption erfolgt jedoch nicht selektiv. Je nach Aktivkohleprodukt können unterschiedliche organische Bestandteile bevorzugt adsorbiert werden. Im Labor des PIK wurde hierzu eine Reihe von Versuchen durchgeführt, um zunächst eine Aktivkohle zu finden, die für die Adsorption der spezifischen organischen Abwasserinhaltsstoffe geeignet ist. Für die Versuche wurde der Ablauf einer mit Mischabwasser (Scrubberabwasser und Zulauf KA Puttgarden) betriebenen Laborkläranlage verwendet. Der CSB lag in diesem biologisch behandelten Abwasser bei rd. 300 mg/l.

Mit den drei jeweils am besten geeigneten Aktivkohlen wurden dann Adsorptionskurven in Laboransätzen erstellt um die Adsorptionskapazität der gewählten Aktivkohlen zu bestimmen. Anschließend wurde die Adsorptionskinetik dieser Aktivkohlen untersucht. Ziel dabei war es, die für die Auslegung einer Nachbehandlungsstufe benötigten Parameter zu bestimmen.

Ergebnisse

Zunächst wurde die Machbarkeit einer Rest-CSB-Elimination durch Adsorption mit Aktivkohle geprüft. Adsorptionsversuche mit unterschiedlichen Aktivkohlemustern und gleichen Zugabemengen zeigten zufriedenstellende Ergebnisse bei der Verwendung sowohl einer pulverförmigen Aktivkohle (PAC) als auch bei zwei granulierten Aktivkohlen (GAC).

Die weiteren Versuche zur Kapazität und Kinetik ließen Vorteile für die Verwendung der PAC erkennen: Bei der Adsorptionskinetik benötigte die Adsorption mit PAC deutlich geringere Kontaktzeiten von ca. 10-15 min als mit GAC. Die einzusetzende Menge zur Erreichung des Reinigungsziels von CSB <110 mg/l ist ebenfalls geringer als mit granulierter Aktivkohle. Die benötigte Menge betrug in den Laborversuchen rd. 1 g/l. Nachteil der Verwendung einer pulverförmigen Aktivkohle ist deren Dosierung als Feststoff direkt in das Abwasser. Bei einer Nachbehandlung müssen die eingesetzten Aktivkohlemengen vor der Abwassereinleitung beseitigt werden.

4.4 Laborversuche zur Machbarkeit einer Vorbehandlung

Durch die Vorbehandlung des Rohabwassers mit einem Adsorptionsmittel (z.B. Aktivkohle) sollte eine teilweise Adsorption der organischen Abwasserinhaltsstoffe und eine Reduktion deren organischer Belastung erreicht werden. Ziel dabei war die Höhe des Rest-CSB im Abwasser nach biologischer Behandlung bereits im Vorfeld zu senken.

Hier wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt, um zuerst ein Adsorptionsmittel zu finden, das für die Adsorption der spezifischen organischen Abwasserinhaltsstoffe geeignet ist. Nachdem eine geeignete Aktivkohle gefunden wurde, wurden die Adsorptionskapazitäten und die Adsorptionskinetik in Laborversuchen untersucht. In einem Test zur biologischen Abbaubarkeit unter aeroben Bedingungen wurde abschließend die Auswirkung einer Voradsorptionsstufe auf den biologischen Abbau ermittelt.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde auch die Machbarkeit einer Vorbehandlung durch UV-Strahlung geprüft. Nach den Versuchen zur Oxidation mit UV-Strahlung und teilweise Zugabe von Wasserstoffperoxid wurde wieder ein Test zur biologischen Abbaubarkeit unter aeroben Bedingungen durchgeführt.

Ergebnisse

Durch eine Vorbehandlung des Rohabwassers mit Adsorptionsmitteln (Aktivkohle) lässt sich eine beachtliche Adsorption der organischen Abwasserinhaltsstoffe und eine Reduktion deren organischer Belastung erzielen. Die Elimination der organischen Belastung betrug dabei rd.

30-45 %. Auch hier waren wieder die Vorteile der Verwendung einer pulverförmigen Aktivkohle aufgrund der geringeren Kontaktzeit und niedrigeren Dosierung gegeben.

Die Prüfung der biologischen Abbaubarkeit einer mit Aktivkohle behandelten Abwasserprobe zeigte außerdem einen leicht verbesserten biologischen Abbau.

Hinsichtlich der Versuche zur Machbarkeit einer Oxidation der organischen Inhaltstoffe durch UV-Strahlung unter gleichzeitiger Zugabe des Oxidationsmittels Wasserstoffperoxid wurde nur eine geringfügige CSB-Elimination von rd. 20% festgestellt. Die Versuche zeigten keine Verbesserung der biologischen Abbaubarkeit.

5 BEHANDLUNGSKONZEPT

5.1 Vorbehandlung

Um eine Mitbehandlung der Scrubberabwässer auf der Kläranlage Puttgarden zu ermöglichen, wird neben der vorhandenen Verfahrenstechnik eine separate Behandlung des Scrubberabwassers benötigt. Da das Scrubberabwasser stoßweise anfällt, ist zunächst ein Speicherbehälter zur Vergleichmäßigung der Einleitung notwendig. Aus diesem Vorlagebehälter (VL) wird das Scrubberabwasser mit konstantem Durchfluss in einen mit Rührwerk ausgestatteten 2-Kammer-Kontaktreaktor (KR1) gefördert. Parallel wird hier pulverförmige Aktivkohle (PAC) zugegeben. Durch Kontakt zwischen PAC und Rohabwasser aus den Scrubbern wird eine Teilelimination der initialen organischen Belastung erzielt. Zur Schwermetallelimination wird in der ersten Kammer des Reaktors der pH-Wert mit Natronlauge im basischen pH-Bereich ($\text{pH} > 9,0$) eingestellt.

Zur Bildung von absetzbaren Flocken wird in der zweiten Kammer des Kontaktreaktors KR1 eine Zugabe polymerer Flockungsmittel (pFM) vorgenommen. Die anschließende Abtrennung der Aktivkohleschlämme erfolgt durch Sedimentation in einem Schrägklärer (SK1). Das so vorbehandelte Scrubberabwasser wird in das Misch- und Ausgleichsbecken der Kläranlage geleitet und vermischt sich dort mit den übrigen Kläranlagen-Zuläufen. Die abgetrennten Aktivkohleschlämme werden in einen Voreindicker (VE) bzw. Schlammstapelbehälter (SStB) gepumpt und gespeichert. Das Überstandswasser des SStB wird in das vorhandene Misch- und Ausgleichsbecken geleitet. Die eingedickten Aktivkohleschlämme können nicht landwirtschaftlich verwertet werden und müssen für eine anderweitige Entsorgung (z.B. Verbrennung) abgefahren werden.

5.2 Biologische Behandlung

Bei ausreichender Verdünnung haben Laborversuche zur Machbarkeit einer Scrubberabwasserbehandlung gezeigt, dass ein Großteil der Inhaltstoffe biologisch abbaubar ist. Die biologische Mitbehandlung von Scrubberabwasser in Mischproben hat außerdem gezeigt, dass keine Beeinträchtigung der Nitrifikanten zu erwarten ist, auch bei Stoßbelastungen mit erhöhten Scrubberabwasser-Anteilen von 25%.

Zum Kohlenstoff- und Stickstoffabbau durchläuft das im Misch- und Ausgleichsbecken der KA gespeicherte Mischabwasser die vorhandene Biologie (Denitrifikation, Nitrifikation). Unter zunächst anoxischen und anschließend aeroben Bedingungen erfolgt die biologische Mitbehandlung des vorbehandelten Scrubberabwassers.

Der inerte Rest-CSB nach biologischer Behandlung des Scrubberabwassers macht in Abhängigkeit des geforderten CSB-Überwachungswertes der Kläranlage eine ergänzende chemisch-physikalische Nachbehandlung mit Aktivkohle als weitere Reinigungsstufe erforderlich.

5.3 Nachbehandlung

Die Nachbehandlung des Kläranlagenablaufs dient vorwiegend der Adsorption des inerten CSB aus der biologischen Mitbehandlung des Scrubberabwassers, kommt allerdings auch dem kommunalen Rest-CSB zu Gute.

Nach der Belebtschlammabtrennung in der vorhandenen Nachklärung wird der weitgehend feststofffreie Ablauf in die neu aufgestellte Nachbehandlungsstufe geleitet. Diese besteht aus einem mit Rührwerk ausgestatteten 3-Kammer-Kontaktreaktor (KR2), in dem es nach Zugabe von pulverförmiger Aktivkohle (PAC) zur Adsorption des organischen Rest-CSB kommt. Die Zugabe der PAC erfolgt über eine Bigpack-Dosierstation mit Ansatzbehälter als Suspension in die erste Kammer. In dieser Behandlungsstufe wurde außerdem die Phosphatfällung von der Belebung (Simultanfällung) auf eine Nachfällung umgestellt. Durch Reduzierung der Fällschlammengen und Erhöhung des aktiven Biomasseanteils in der Belebung soll das Schlammalter erhöht werden (Absicherung der Nitrifikation und der Schlammstabilisierung). Die Zugabe von Polyaluminiumchlorid als Fällmittel erfolgt in der zweiten Kammer.

Zur Bildung von absetzbaren Flocken wird in der dritten Kammer des Kontaktreaktors eine Zugabe polymerer Flockungsmittel (pFM) vorgenommen. Die anschließende Abtrennung des gebildeten Aktivkohleschlammes erfolgt durch Sedimentation in einem Schrägklärer (SK2). Das nahezu feststofffreie, behandelte Abwasser wird abschließend in die Ostsee eingeleitet.

Die sedimentierten Aktivkohleschlämme werden zur Vorbehandlung des Rohscrubberabwassers in den Kontaktreaktor KR1 zurückgefördert. Da die Adsorption konzentrationsabhängig ist, fällt die Beladung der Aktivkohle bei der Nachbehandlung geringer aus. Die Beladungskapazität der hier verwendeten Aktivkohle (PAC) ist daher nicht vollständig ausgeschöpft und ist bei Kontakt mit höher belasteten Abwässern zur Vorbehandlung des Scrubberabwassers noch aufnahmefähig.

5.4 Fließschema

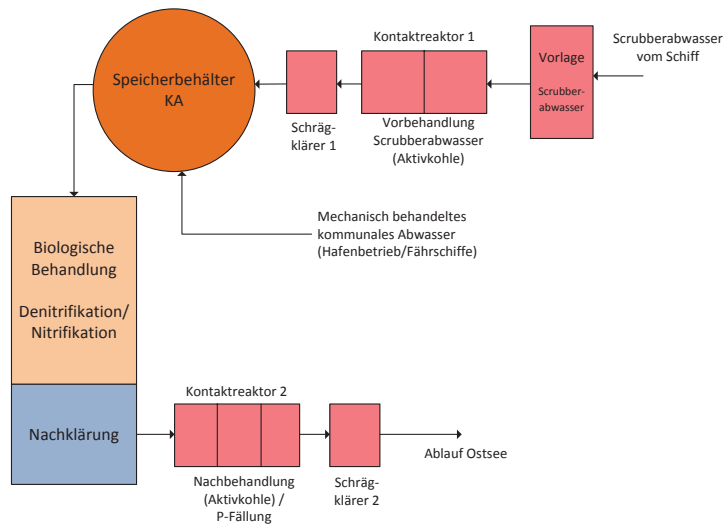


Bild 2: Fließschema zum Behandlungskonzept

6 GROßTECHNISCHER VERSUCHSBETRIEB

Nach positiven Laborergebnissen wurde Anfang 2015 die Genehmigung einer großtechnischen Versuchsanlage gemäß dem Behandlungskonzept in Abschnitt 5 beantragt und nach Erhalt der wasserrechtlichen Genehmigung auf der Kläranlage Puttgarden errichtet und betrieben. Der Versuchsbetrieb wurde durch das PIK wissenschaftlich begleitet.

In mehr als 2,5 Jahren Versuchsbetrieb wurden über 30.000 m³ organisch und anorganisch hoch belastetes Scrubberabwasser unter Einhaltung der erhöhten Einleitungsanforderung behandelt. Die Ergebnisse der intensiven Überwachung des Kläranlagenbetriebes während der Versuchsphasen wurden fortlaufend ausgewertet und die Betriebsparameter der Versuchsanlage entsprechend bei Bedarf angepasst. Die eingeleiteten Scrubberabwassermengen und Anteile am kommunalen Abwasser waren im Versuchsbetrieb deutlich höher als in den Laborversuchen. Als sehr positives Ergebnis aus dem langjährigen Versuchsbetrieb erwies sich die notwendige einzusetzende Aktivkohlemenge in der Nachbehandlung. Diese lag unter realen Bedingungen mit rd. 0,1-0,3 g/l deutlich niedriger als wie in den Laborversuchen mit 1,0 g/l.

Im Laufe des Versuchsjahres 2016 wurden zeitweise stoßartige Scrubberabwassermengen von 60-70 m³/d eingeleitet. Diese wurden mit Störungen der Biologie der KA Puttgarden begleitet. Starke Trübungen und ein erhöhter Rest-CSB im Ablauf der Nachklärung waren die Folge. Die Nachbehandlung war unter diesen Bedingungen überlastet. Als Trübungsursache wurde ein Flockenzerfall festgestellt. Um die Flockung und Flockenstruktur des Belebtschlammes zu verbessern und Trübungen zu binden, wurde ein großtechnischer Versuch zur Zugabe von Kalkmilch direkt in die Belebung (Ablauf Denitrifikation) durchgeführt. Nach der Bildung eines ausreichenden Depots wurden deutliche Verbesserungen der Flockenbildung und der Ablaufwerte festgestellt, sodass auch zukünftig bei sehr hohen Scrubberabwassereinleitungen eine Kalkmilchzugabe direkt in die Belebung der KA Puttgarden notwendig ist.

Ausführliche Ergebnisse aus dem Versuchsbetrieb auf der KA Puttgarden mit Scrubberabwasser ist der Literatur (Günter et al. 2017) zu entnehmen.

7 GROßTECHNISCHER REGELBETRIEB

Aufgrund der positiven Ergebnisse des Versuchsbetriebes hat sich die Firma Scandlines entschieden im Jahr 2017 eine dauerhafte Anlage zur Mitbehandlung der Scrubberabwässer auf der Kläranlage Puttgarden zu errichten. Das Behandlungskonzept hat sich im laufenden Versuchsbetrieb bewährt und wird für die zukünftige Behandlungsanlage übernommen. Bei der zuständigen Wasserbehörde des Kreises Ostholstein wurde hierfür die wasserrechtliche Genehmigung zur Mitbehandlung von Scrubberabwasser durch eine Aktivkohlestufe zur Vor- und Nachbehandlung beantragt.

Ursprünglich war der Bau einer Halle für die benötigten Anlagenteile vorgesehen. Auf dem Gelände des Fährhafens der Scandlines Deutschland GmbH wurde in unmittelbarer Nähe zur Kläranlage jedoch eine bestehende Halle verfügbar und sollte für die Unterbringung der Anlage zur Scrubberabwasserbehandlung genutzt werden. Durch kleinere Umbaumaßnahmen wurden dort alle benötigten verfahrenstechnischen Anlagenteile der neuen Behandlungsanlage frostsicher untergebracht. Die Rohrleitungsstrassen zwischen der Kläranlage und der Halle wurden ebenfalls frostsicher unterirdisch in einem gemeinsamen Kanal verlegt.

Die Förderung des Abwassers vom Ablauf des Nachklärbeckens der Kläranlage Puttgarden zur Nachbehandlung des Wassers in der vorhandenen Halle wurde hydraulisch entkoppelt. Hierfür wurde nach der vorhandenen Mengenummessung ein neuer Pumpenschacht vor dem Ablaufschacht - letzterer dient zukünftig als Probenahmeschacht (PN) - errichtet. Das neue Pumpwerk dient zur kontinuierlichen, höhenstandsgeregelten Förderung des anfallenden Abwassers. Zur Außerbetriebnahme von Kontaktreaktor KR2 und im Schadensfalle soll über eine Rohrverbindung ein freier Ablauf über den PN-Schacht in die Ostsee möglich sein (Not-Überlauf). Die Reaktoren und die anschließenden Sedimentationsstufen sollen, im Unterschied zur Versuchsanlage, im Freigefälle durchflossen werden. Die Investitionskosten der gesamten neuen Behandlungsanlage betragen rd. 450.000 € (Bauleistung und Planung).

Nachfolgend ist eine Lageplanskizze (ohne Maßstab) für die Aufstellung und Einbindung der Aktivkohlestufe zur Scrubberabwasserbehandlung in der vorhandenen Halle dargestellt:

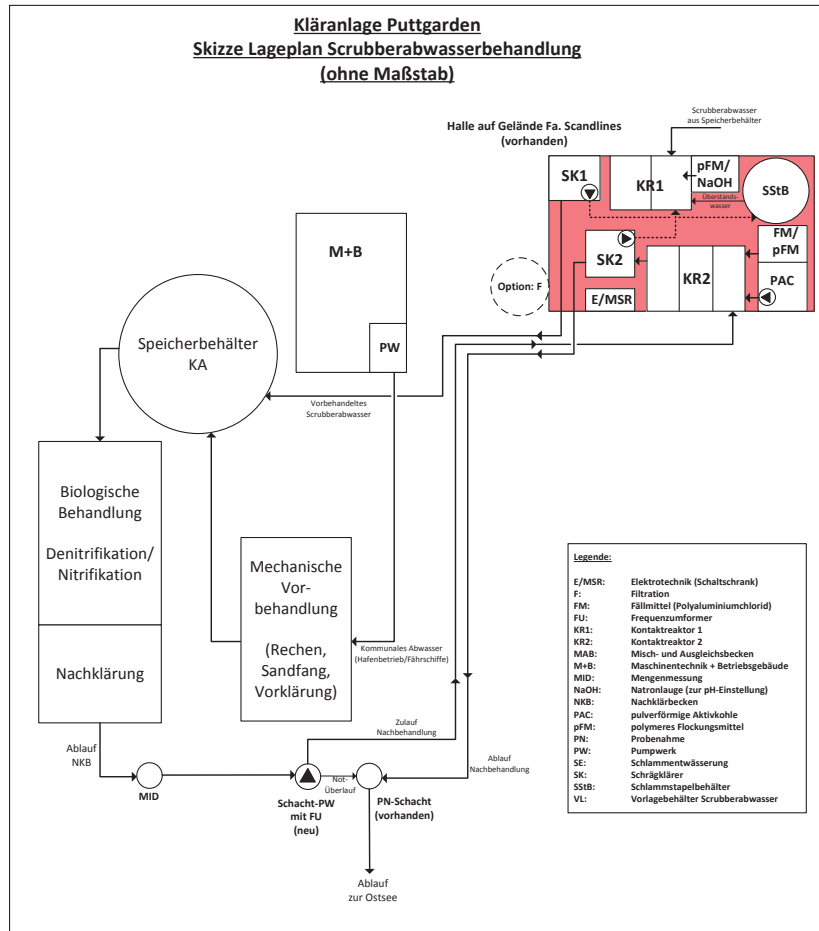


Bild 3: Lageplanskizze zur Aufstellung und Einbindung der Aktivkohlestufe in der vorhandenen Halle auf der Kläranlage Puttgarden (ohne Maßstab)

Die aktuellen Ergebnisse der intensiven Überwachung des Kläranlagenbetriebes werden fortlaufend ausgewertet und sind nachfolgend graphisch dargestellt (Zeitraum 01/2018 bis 06/2018). Wichtige betriebliche Ereignisse wurden gekennzeichnet, um deren Einfluss zu veranschaulichen.

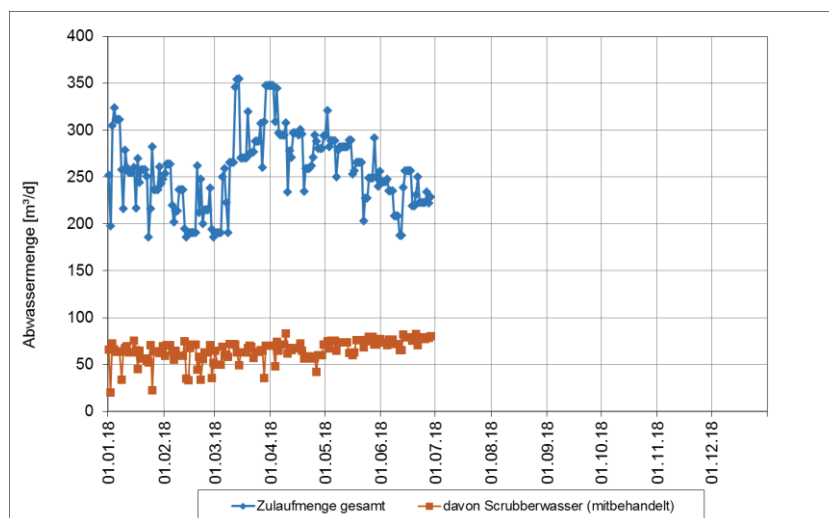
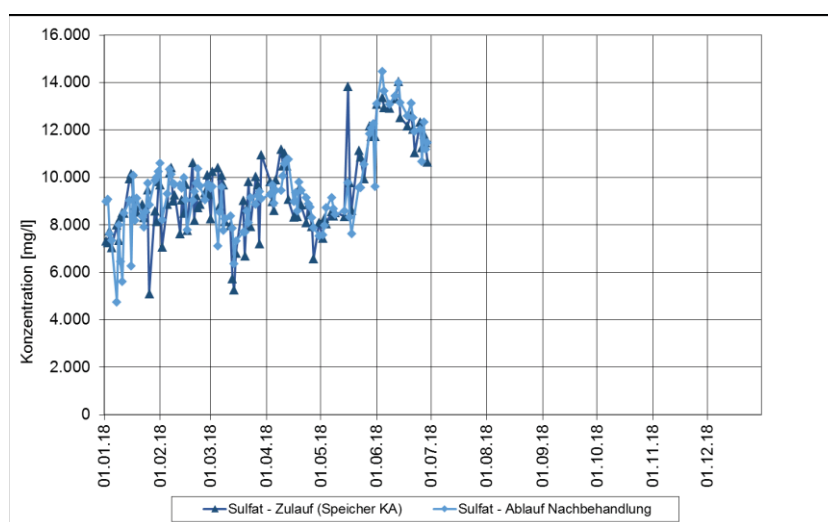


Bild 4: KA Puttgarden: Abwassermengen, Zeitraum 01-06/2018

In den aufgezeichneten Abwassermengen im Zulauf sind deutliche Schwankungen festzustellen, siehe Bild 4. Die Zulaufbeschickung der Kläranlage erfolgt seit Ende März 2018 geregelt über den Füllstand des Misch- und Ausgleichsbeckens der Kläranlage. Auf dem Hafengelände führen große Regenereignisse - wie im März 2018 häufig vorgekommen - trotz Trennkanalisation zu hohen Zuläufen.

Die mitbehandelten Scrubberabwassermengen zeigen im Betriebsjahr 2018 eine deutlich zunehmende Tendenz. Die kontinuierlichen Einleitungen betragen von 01-06/2018 im Mittel 65 m³/d, seit Mai 2018 liegt die behandelte Scrubberabwassermenge mit im Mittel 74 m³/d auf einem sehr hohen Niveau. Dies entspricht einem Anteil von über 35% am Zulauf der KA Puttgarden.

**Bild 5: KA Puttgarden: Sulfatkonzentration im Zulauf und Ablauf, Zeitraum 01-06/2018**

Die hohen Scrubberabwassereinleitungen bewirken eine Zunahme der Sulfatgehalte im Kläranlagenabwasser auf 7.000 - 14.000 mg/l, siehe Bild 5. Neben Beeinträchtigungen der biologischen Abbauleistung in der Kläranlage führen zu hohe Sulfatgehalte zu verstärkter Betonkorrosion. Hier werden auf Dauer Maßnahmen zum Schutz der Bauwerke erforderlich. Betrieblich zeigte sich, dass die hohen Salzfrachten durch die stark gestiegenen Scrubberabwassereinleitungen zu starken Trübungen im Ablauf der Nachklärung führen. Anhand von mikroskopischen Untersuchungen wurde ein Flockenzerfall als Trübungsursache festgestellt. Als Maßnahmen wurde zur Verbesserung der Flockung Kalkmilch direkt in die Belebung dosiert. Nach der Bildung eines ausreichenden Depots, wurde schnell eine deutliche Verbesserung der Trübung und damit der CSB-Ablaufwerte erzielt.

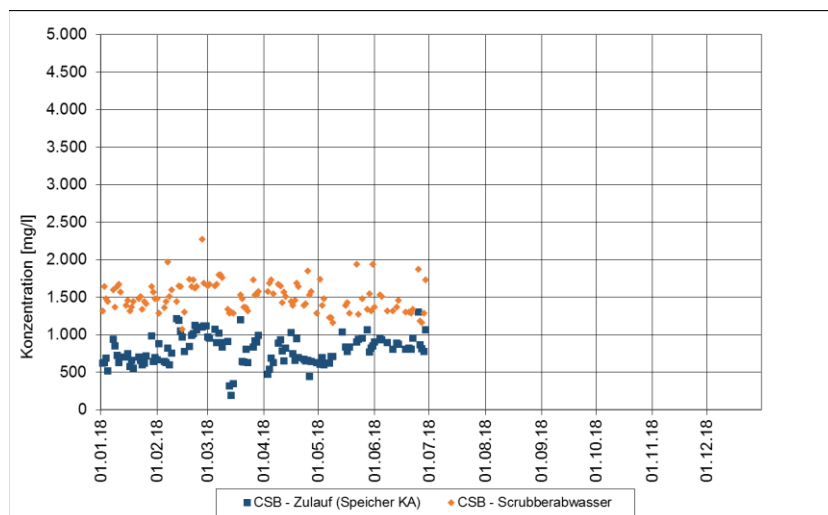


Bild 6: KA Puttgarden: CSB im Zulauf und Scrubberabwasser, Zeitraum 01-06/2018

Die CSB-Belastungen im Zulauf der Kläranlage (gemessen im Misch- und Ausgleichsbecken der KA, inklusive Scrubberabwasser) sind im Allgemeinen als erhöht zu bezeichnen und liegen i.M bei 800 mg/l CSB. Mitte März 2018 lagen die Konzentrationen im Zulauf zeitweise auf einem sehr geringen Niveau, der Grund sind stark erhöhte Oberflächenwasserzuläufe durch Starkregen und Schneeschmelze.

Die CSB-Konzentrationen im Scrubberabwasser lagen in der ersten Hälfte des Jahres 2018 im Mittel bei 1.500 mg/l. Im Vergleich zum Versuchsbetrieb hat sich die CSB-Belastung im Scrubberabwasser deutlich stabilisiert. Dies liegt vor Allem an der deutlich erhöhten Speicherkapazität von rd. 150 m³ für das Scrubberabwasser. Auf dem Gelände des Fährhafens Puttgarden dient seit dem Regelbetrieb eine nicht mehr verwendete unterirdische Trinkwasserzisterne als Speicherbecken für den Scrubberabwasseranfall. Die Zisterne ist zudem als Doppelkammerbecken ausgeführt. In der ersten Kammer werden nun im Scrubberabwasser vorkommende Ölfilme größtenteils zurückgehalten. Im Versuchsbetrieb führten diese häufig zu Betriebsstörungen bei der Behandlung der Abwässer.

Im langjährigen Versuchsbetrieb wurde festgestellt, dass bei der Vorbehandlung des Scrubberabwassers mit Aktivkohle die CSB-Konzentration um rd. 500-1000 mg/l gesenkt wird. Die CSB-Elimination liegt zwischen 20-40%.

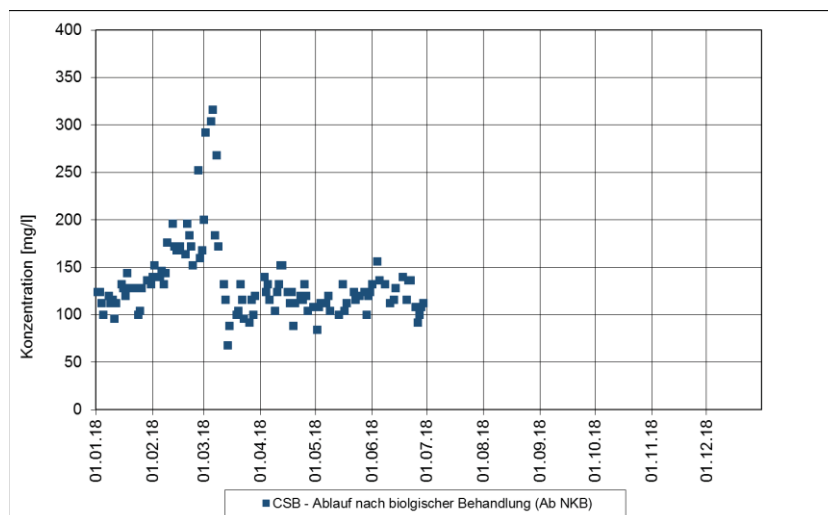


Bild 7: KA Puttgarden: CSB im Ablauf des Nachklärbeckens (nach biologischer Behandlung), Zeitraum 01-06/2018

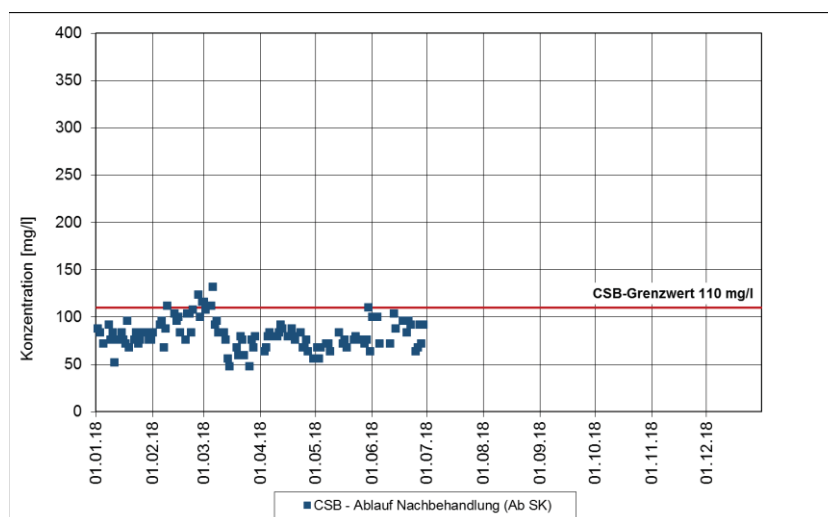


Bild 8: KA Puttgarden: CSB im Ablauf des Schrägklärers (original) nach Aktivkohleadsorption in KR2, Zeitraum 01-06/2018

An den CSB-Werten im Ablauf der Nachklärung (Bild 7) wird ersichtlich, dass mit einem Rest-CSB nach der biologischen Behandlung von bis zu 320 mg/l zu rechnen ist. Im Februar und Anfang März 2018 war der Rest-CSB im Ablauf der biologischen Behandlung stark erhöht. Während dieser Zeit lagen die Scrubberabwasser-Anteile im Gesamtabwasser der KA durch niedrige kommunale Abwassereinleitungen zeitweise auf einem hohen Niveau. Bei den niedrigen Abwassertemperaturen von 5-6°C war die Leistung der Biologie der KA Puttgarden zu dieser Zeit deutlich eingeschränkt.

Der Rest-CSB wird durch die Nachbehandlungsstufe mit Pulveraktivkohle betriebsstabil unterhalb des Überwachungswertes von $\text{CSB} \leq 110 \text{ mg/l}$ gehalten (Bild 8). Im Mittel liegt der CSB-Ablaufwert in der ersten Hälfte des Jahres 2018 bei 82 mg/l. Während des schlechten

biologischen Abbaus bei den kalten Abwassertemperaturen im März 2018 konnte der sehr hohe Rest-CSB von über 300 mg/l in der Nachbehandlung noch auf rd. 120-130 mg/l gesenkt werden.

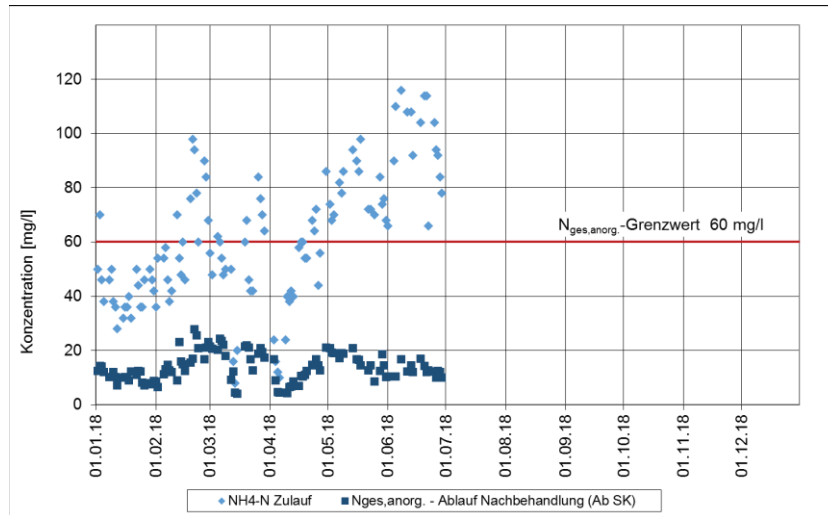


Bild 9: KA Puttgarden: NH₄-N-Konzentrationen im Zulauf und Nges,anorg.-Konzentrationen im Ablauf, Zeitraum 01-06/2018

Die Stickstoffwerte lassen eine vollständige Nitrifikation und stabile Stickstoffelimination erkennen, siehe Bild 9. Der seit dem 01.01.2017 geltende neue Überwachungswert von 60 mg/l Nges,anorg. wurde in der ersten Hälfte des Jahres 2018 betriebsstabil eingehalten.

Die im Zulauf gemessenen Ammonium-Konzentrationen schwanken und werden vor Allem durch das saisonal erhöhte Passagieraufkommen in den Ferien beeinflusst. Mitte März 2018 lagen die Konzentrationen im Zulauf zeitweise auf einem sehr geringen Niveau, der Grund sind stark erhöhte Oberflächenwasserzuläufe durch Starkregen und Schneeschmelze.

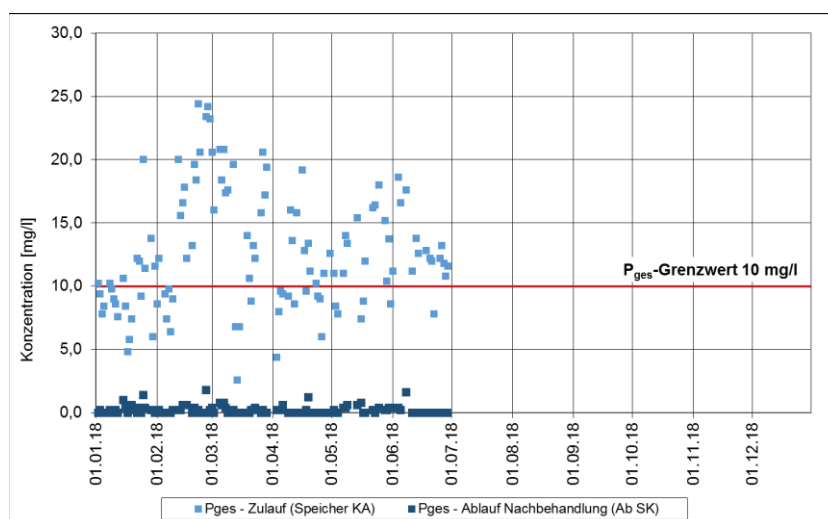


Bild 10: KA Puttgarden: Pges-Konzentrationen im Zulauf und Ablauf, Zeitraum 01-06/2018

Die Phosphorbelastungen im Zulauf der KA Puttgarden unterliegen ebenfalls großen Schwankungen. Trotz der hohen Belastung im Mischwasser ist eine stabile Phosphornachfällung zu verzeichnen.

8 CHEMIKALIEN- UND SCHLAMMENTSORGUNGSKOSTEN

Auf Grundlage der im Betriebsjahr 2016 mit der Versuchsanlage angefallenen Chemikalien- und Entsorgungskosten wurde eine Kostenschätzung (Betriebskosten ohne Investitionskosten) für die Mitbehandlung des Scrubberabwassers durchgeführt. Diese ergab, bezogen auf die behandelte Scrubberabwassermenge:

- 6,51 €/m³ Scrubberabwasser

Die Behandlungskosten liegen damit deutlich unterhalb der reinen Entsorgungskosten des Scrubberabwassers durch entsprechende Fachbetriebe mit >60 €/m³.

Die Betriebskosten des großtechnischen Regelbetriebes (inkl. Energie-, Personal- und Investitionskosten) werden nach Vorliegen einer ausreichenden Datenlage am Ende des Betriebsjahres 2018 ermittelt. Ein großer Teil der Scrubberwasser-Behandlungskosten in der KA Puttgarden werden durch die Klärschlamm- und Aktivkohleschlammentsorgung verursacht. Zurzeit werden diese Schlämme durch ein Lohnunternehmen entwässert und entsorgt. Fa. Scandlines erwägt die Anschaffung und den Betrieb einer eigenen Entwässerungsmaschine (z.B. Schneckenpresse) um die Kosten für die Schlammentsorgung deutlich zu senken.

LITERATUR

AEC MARITIME (2016) SOx Scrubbing Made Simple, AEC-Brochure 2016, Niederlande

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2017) MARPOL Anlage VI, Regel 14, abgerufen am 02.10.2017 von http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Umweltschutz/MARPOL_Uebereinkommen/index.jsp

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2009) IMO-Richtlinien für Abgasreinigungssysteme 2009, abgerufen am 02.10.2017 von <http://www.bsh.de/de/Schifffahrt/Sportschifffahrt/>

Berichtigungsservice_NfS/Schifffahrtvorschriften/2010/37-2010.pdf

Danish Ministry of the Environment (2012) Assessment of possible impacts of scrubber water discharges on the marine environment, Kopenhagen

Lloyd's Register (2012) Understanding exhaust gas treatment systems, Guidance for shipowners and operators, 1. Auflage, London

Günter H.-O., Silem A., Beining S. und Einfeldt J. (2017) Behandlung von Abwasser aus der Rauchgaswäsche von Seeschiffen (Scrubberabwasser), 6. IndustrieTage Wassertechnik November 2017, Tagungsband S. 178-200, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef 2017

MARPOL (1973) Internationales Übereinkommen von 1973 zur Verhütung von Meeresverschmutzung durch Schiffe und Protokoll von 1978 zu diesem Übereinkommen, abgerufen am 02.10.2017 von https://www.jurion.de/gesetze/marpol_uebk/

Umweltbundesamt (2014) Auswirkungen von Abgasnachbehandlungsanlagen (Scrubbern) auf die Umweltsituation in Häfen und Küstengewässern, Juni 2014, Dessau-Roßlau

30. Hamburger Kolloquium zur Abwasserwirtschaft

Themenschwerpunkte:

**Mikroschadstoffe, Mikroplastik, Antibiotikaresistenzen;
Niederschlagswasser, Überflutungsschutz;
Schiffsabwasser und Wasserrahmenrichtlinie**

Hamburg, 11. und 12. September 2018

Herausgeber:

Dr.-Ing. Joachim Behrendt, Dr.-Ing. Dorothea Rechtenbach
Prof. Dr.-Ing. Ralf Otterpohl

© GFEU 2018

Gesellschaft zur Förderung der Forschung und Entwicklung der Umwelttechnologien
an der TU Hamburg-Harburg e.V.
Eißendorfer Str. 42
21073 Hamburg

Tel.: 040/42878-3207

Fax: 040/42878-2684

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die daraus begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Die Herausgeber danken Herrn Andreas Wiebusch für die Gestaltung des Tagungsbandes.

Printed in Germany, Behörde für Umwelt und Energie, Freie und Hansestadt Hamburg

Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft
Band Nr. 97

ISBN 978-3-942768-22-1