

Institut für Siedlungswasserwirtschaft  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp



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



---

# Abschlussbericht

## F+E-Vorhaben

### Einsatz der Membrantechnik

### Zur Abwasserbehandlung

### auf Binnenschiffen

(AZ IV-9-042 528)

**Sachbearbeitung:**

Dipl.-Ing. Arndt Kaiser

Aachen, Dezember 2004

---

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp  
(ISA)

---

Dr.-Ing. E. Dorgeloh  
(PIA)

## Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>2</b> | <b>Veranlassung</b> .....  | <b>12</b> |
| <b>3</b> | <b>Die Deutsche Fahrgastschifffahrt</b> .....  | <b>13</b> |
| 3.1      | Schiffsbetriebsabfälle und deren Entsorgungswege in der deutschen Binnenschifffahrt..... | 13        |
| 3.2      | Daten und Fakten zur deutschen Fahrgastschifffahrt.....                                  | 16        |
| <b>4</b> | <b>Vorstellung des F+E Vorhabens</b> .....   | <b>18</b> |
| 4.1      | Darstellung der Projektziele .....   | 18        |
| 4.2      | Darstellung der Vorgehensweise.....  | 19        |
| 4.3      | Bemessungskriterien und Anforderungen an die Schiffskläranlagen .....                    | 22        |
| 4.4      | Aufbau und Funktionsweise der Prototypen .....   | 26        |
| 4.4.1    | Prototyp der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH.....                                       | 26        |
| 4.4.2    | Prototyp der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH .....                                   | 29        |
| 4.4.3    | Prototyp der Firma Martin Systems Engineering GmbH .....                                 | 32        |
| 4.4.4    | Prototyp der Firma Puron AG.....   | 35        |
| 4.4.5    | Überblick ausgewählter Anlagenmerkmale .....   | 38        |
| <b>5</b> | <b>Auswertung der Eignungstests</b> .....  | <b>40</b> |
| 5.1      | Delphin Umwelttechnik GmbH.....  | 40        |
| 5.1.1    | Testverlauf .....  | 40        |
| 5.1.2    | Auswertung der Untersuchungen.....   | 41        |
| 5.2      | Earth Tech Umwelttechnik GmbH .....  | 43        |
| 5.2.1    | Testverlauf .....  | 43        |
| 5.2.2    | Auswertung der Untersuchungen.....   | 44        |
| 5.3      | Martin Systems Engineering GmbH .....  | 50        |
| 5.3.1    | Testverlauf .....  | 50        |
| 5.3.2    | Auswertung der Untersuchungen.....   | 51        |
| 5.4      | Puron AG .....   | 56        |
| 5.4.1    | Testverlauf .....  | 56        |
| 5.4.2    | Auswertung der Untersuchungen.....   | 57        |

|               |  |            |
|---------------|--|------------|
| <b>6</b>      | <b>Darstellung und Auswertung der Praxistests .....</b>  | <b>64</b>  |
| 6.1           | Gegebenheiten an Bord des Fahrgastschiffs MS Asbach .....  | 64         |
| 6.1.1         | Wasserverbrauch an Bord der MS Asbach .....  | 70         |
| 6.1.2         | Zusammensetzung des Abwasserzulaufs an Bord der MS Asbach ....   | 73         |
| 6.1.3         | Probenahme und Analytik .....  | 76         |
| 6.2           | Auswertung des Praxistests der Pilotanlage der Firma Martin Systems<br>Engineering GmbH.....                                     | 77         |
| 6.2.1         | Testverlauf .....  | 77         |
| 6.2.2         | Darstellung und Auswertung der erfolgten Untersuchungen .....  | 79         |
| 6.3           | Auswertung des Praxistests der Pilotanlage der Firma Earth Tech<br>Umwelttechnik GmbH.....                                       | 93         |
| 6.3.1         | Testverlauf .....  | 93         |
| 6.3.2         | Darstellung und Auswertung der erfolgten Untersuchungen .....  | 96         |
| <b>7</b>      | <b>Beurteilung der getesteten Pilotanlagen auf ihre Verwendbarkeit als<br/>Bordkläranlagen .....</b>                             | <b>109</b> |
| <b>8</b>      | <b>Darstellung der Möglichkeiten zur großtechnischen Umsetzung<br/>und wirtschaftliche Betrachtung von Bordkläranlagen .....</b> | <b>120</b> |
| <b>9</b>      | <b>Zusammenfassung.....</b>  | <b>132</b> |
| <b>10</b>     | <b>Literatur.....</b>  | <b>137</b> |
| <b>Anhang</b> | <b>.....</b>   | <b>138</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1:  | Bundeswasserstraßen in Deutschland mit erhöhter Fahrgast-<br>schiffahrt (überarbeitet nach [7]).....                                  | 17 |
| Abbildung 2:  | Aufstellplatz der Pilotanlage im vorderen Maschinenraum der<br>MS Asbach.....   | 23 |
| Abbildung 3:  | Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH.....   | 26 |
| Abbildung 4:  | Verfahrensskizze der Pilotanlage der Firma Delphin<br>Umwelttechnik GmbH.....   | 27 |
| Abbildung 5:  | Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH .....   | 29 |
| Abbildung 6:  | Verfahrensskizze der Pilotanlage der Firma Earth Tech<br>Umwelttechnik GmbH.....  | 30 |
| Abbildung 7:  | Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH .....   | 32 |
| Abbildung 8:  | Verfahrensskizze der Pilotanlage der Firma Martin Systems<br>Engineering GmbH.....  | 33 |
| Abbildung 9:  | Pilotanlage der Firma Puron AG.....   | 35 |
| Abbildung 10: | Verfahrensskizze der Pilotanlage der Firma Puron AG .....   | 36 |
| Abbildung 11: | Filtrationsleistung der Pilotanlage der Firma Delphin<br>Umwelttechnik GmbH.....  | 42 |
| Abbildung 12: | Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB <sub>5</sub><br>der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH ..... | 44 |
| Abbildung 13: | Zu- und Ablaufkonzentrationen der Stickstoffparameter der<br>Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH .....                | 45 |
| Abbildung 14: | Analysenergebnisse der Keimprobenuntersuchung zur Pilotanlage<br>der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH .....                        | 46 |
| Abbildung 15: | Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter Öle/Fette der<br>Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH .....                | 47 |
| Abbildung 16: | Zu- und Ablaufkonzentrationen des Parameters P <sub>ges</sub> der<br>Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH .....        | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 17: Temperaturverlauf, TS-Gehalte und Glühverlust im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH .....            | 48 |
| Abbildung 18: Verlauf der Betriebsparameter der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während eines Zyklus .....                     | 49 |
| Abbildung 19: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB <sub>5</sub> der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH ..... | 51 |
| Abbildung 20: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Stickstoffparameter der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH .....                | 52 |
| Abbildung 21: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter Öle und Fette der Firma Martin Systems Engineering GmbH .....                            | 53 |
| Abbildung 22: Temperaturverlauf, TS-Gehalte und Glühverlust im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH .....          | 54 |
| Abbildung 23: Verlauf der Betriebsparameter der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH .....  | 54 |
| Abbildung 24: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB <sub>5</sub> der Pilotanlage der Firma Puron AG.....                         | 57 |
| Abbildung 25: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Stickstoffparameter der Pilotanlage der Firma Puron AG.....  | 58 |
| Abbildung 26: Analysenergebnisse der Keimprobenuntersuchung zur Pilotanlage der Firma Puron AG .....   | 59 |
| Abbildung 27: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter Öle/Fette der Pilotanlage der Firma Puron AG.....  | 60 |
| Abbildung 28: Zu- und Ablaufkonzentrationen des Parameters P <sub>ges</sub> der Pilotanlage der Firma Puron AG.....                                | 61 |
| Abbildung 29: Temperaturverlauf, TS-Gehalte und Glühverlust im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Puron AG.....                                  | 62 |
| Abbildung 30: Verlauf der Betriebsparameter der Pilotanlage der Firma Puron AG.....  | 63 |
| Abbildung 31: Fahrgastschiff MS Asbach.....  | 64 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 32: Abwasserentsorgungssystem an Bord der MS Asbach<br>(vereinfachte Darstellung) .....  | 65 |
| Abbildung 33: Abwasserentsorgung an Bord der MS Asbach zur Zeit<br>der Praxistests.....  | 65 |
| Abbildung 34: Verladung der Anlagenteile auf den Pontonkran der Köln-<br>Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG .....  | 67 |
| Abbildung 35: Einbringen der Anlagenteile in den vorderen Maschinenraum<br>der MS Asbach über vorhandene Einstiegs Luke .....  | 68 |
| Abbildung 36: Fertigmontierte Pilotanlagen am Aufstellort an Bord der<br>MS Asbach .....   | 69 |
| Abbildung 37: Mittlere tägliche Wasserverbräuche an Bord der MS Asbach in<br>der Fahrtsaison 2003.....   | 70 |
| Abbildung 38: Mittlere tägliche Wasserverbräuche an Bord der MS Asbach in<br>der Fahrtsaison 2004.....   | 71 |
| Abbildung 39: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB <sub>5</sub> der<br>Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH<br>(Praxistest 2003) ..... | 79 |
| Abbildung 40: Stickstoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der<br>Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003) .....                             | 82 |
| Abbildung 41: Stickstoffkonzentrationen im Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin<br>Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003) .....                                     | 83 |
| Abbildung 42: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter Öle/Fette der<br>Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH<br>(Praxistest 2003) .....                | 86 |
| Abbildung 43: Zu- und Ablaufkonzentrationen des Parameters P <sub>ges</sub> der<br>Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH<br>(Praxistest 2003) .....        | 87 |
| Abbildung 44: Temperaturverlauf und TS-Gehalte im Bioreaktor der Pilotanlage<br>der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003) ....                           | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 45: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB <sub>5</sub> der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004) .....                        | 96  |
| Abbildung 46: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und TOC der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004) .....                                     | 98  |
| Abbildung 47: Stickstoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004) .....   | 99  |
| Abbildung 48: Stickstoffkonzentrationen im Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004) .....   | 100 |
| Abbildung 49: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter Öle/Fette der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004) .....                                       | 102 |
| Abbildung 50: Zu- und Ablaufkonzentrationen des Parameters Pges der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004) .....   | 103 |
| Abbildung 51: Temperaturverlauf und TS-Gehalte im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004) .....  | 105 |
| Abbildung 52: Gegenüberstellung mittlerer CSB- und BSB <sub>5</sub> -Ablaufkonzentrationen der untersuchten Pilotanlagen zu den Ablaufanforderungen des Abfallübereinkommens der ZKR..... | 111 |
| Abbildung 53: Mittlere jährliche Einleitfrachten der MS Asbach bei unbehandeltem bzw. bei behandeltem Abwasser .....  | 118 |
| Abbildung 54: Großtechnische Umsetzung einer Bordkläranlage auf der MS Asbach (Variante 2) .....  | 122 |
| Abbildung 55: Vergleich der Gesamtaufwendungen zum Zeitpunkt t = 0 für eine Abwasserbehandlung an Bord bzw. Abwasserabgabe an Land für ausgewählte Städte entlang des Rheins .....        | 129 |

## Tabellenverzeichnis

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tabelle 1:  | Begriffsbestimmungen von Abfall in der Binnenschifffahrt, Auszug aus Teil 1 des Merkblatts für die Abfallbeseitigung (ZKR, 2001) [2].....  | 13 |
| Tabelle 2:  | Grenz- und Überwachungswerte für Bordkläranlagen von Fahrgastschiffen nach Abfallübereinkommen der ZKR [1] .....   | 14 |
| Tabelle 3:  | Erwartete Abwasserzusammensetzung an Bord von Fahrgastschiffen .....   | 24 |
| Tabelle 4:  | Einzuhaltende Ablaufgrenzwerte der Pilotanlagen .....  | 25 |
| Tabelle 5:  | Darstellung ausgewählter Anlagencharakteristika .....  | 38 |
| Tabelle 6:  | Analysenergebnisse der Untersuchungen zur Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH.....  | 41 |
| Tabelle 7:  | Ergebnis der Keimprobenuntersuchung im Ablauf der Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH .....   | 42 |
| Tabelle 8:  | Gemessene Stickstoffkonzentration im Ablauf der Pilotanlage der Firma Puron AG vor dem Eignungstest .....  | 59 |
| Tabelle 9:  | Statistische Kenngrößen zum Wasserverbrauch pro Passagier an Bord der MS Asbach in den Monaten Juni und Juli 2004 .....  | 72 |
| Tabelle 10: | Zusammensetzung des Abwassers im Zulauf zur Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH im Jahr 2003.....  | 73 |
| Tabelle 11: | Zusammensetzung des Abwassers im Zulauf zur Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH im Jahr 2004.....  | 74 |
| Tabelle 12: | Zusammensetzung des Abwassers im Vorlagetank zur Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik im Jahr 2004.....  | 75 |
| Tabelle 13: | Verlauf des Praxistests .....  | 78 |
| Tabelle 14: | Gemessene $CSB_{\text{hom}}$ und $CSB_{\text{fil}}$ -Konzentrationen im Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während der erneuten Einfahrphase ..... | 80 |



|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tabelle 15: | Mittlere CSB- und BSB <sub>5</sub> – Zu- und Ablaufkonzentrationen und Schwankungsbreiten während der Normalbetriebsphasen der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003) .....         | 81 |
| Tabelle 16: | Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten von Stickstoffparametern im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2003) .....        | 85 |
| Tabelle 17: | Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten der Parameter Öle/Fette im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2003) .....         | 86 |
| Tabelle 18: | Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten des Parameters P <sub>ges</sub> im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2003) ..... | 88 |
| Tabelle 19: | BSB <sub>5</sub> -Belastung im Zulauf und BSB <sub>5</sub> -Schlammbelastung im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2003) .....        | 90 |
| Tabelle 20: | Analysenergebnisse der Keimprobenuntersuchung zur Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003) .....  | 91 |
| Tabelle 21: | Betriebsparameter der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während des Praxistests 2003 .....   | 91 |
| Tabelle 22: | Verlauf des Praxistests mit der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH in der Fahrtsaison 2004 .....  | 95 |
| Tabelle 23: | Mittlere CSB- und BSB <sub>5</sub> – Zu- und Ablaufkonzentrationen und Schwankungsbreiten während der Normalbetriebsphasen der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004) .....           | 97 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 24: | Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten des Parameters TOC im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2004) .....   | 99  |
| Tabelle 25: | Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten von Stickstoffparametern im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2004) .....                                     | 101 |
| Tabelle 26: | Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten der Parameter Öle/Fette im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2004) .....                                      | 103 |
| Tabelle 27: | Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten des Parameters $P_{ges}$ im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2004) .....                                     | 104 |
| Tabelle 28: | BSB <sub>5</sub> -Belastung im Zulauf und BSB <sub>5</sub> -Schlammbelastung im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Martin System Engineering GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2004) .....                                    | 106 |
| Tabelle 29: | Analysenergebnisse der Keimprobenuntersuchung zur Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2004) ....  | 107 |
| Tabelle 30: | Betriebsparameter der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während des Praxistests 2004 .....  | 107 |
| Tabelle 31: | Zusammenstellung der Analysenergebnisse .....   | 109 |
| Tabelle 32: | Grenzwerte von Bordkläranlagen für Fahrgastschiffe nach [10] im Vergleich zu mittleren Ablaufwerten der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH im Praxistest .....   | 112 |
| Tabelle 33: | Gegenüberstellung maximaler und mittlerer Ablaufwerte sowie Eliminationsraten für den Gesamtbetrieb(*) und für die Normalbetriebsphasen während des Praxistests im Jahr 2003 mit der Pilotanlage der Firma Martin System Engineering GmbH ..... | 113 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 34: | Gegenüberstellung maximaler und mittlerer Ablaufwerte sowie Eliminationsraten für den Gesamtbetrieb und für die Normalbetriebsphasen während des Praxistests im Jahr 2004 mit der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH ..... | 114 |
| Tabelle 35: | Ermittlung der jährlichen Abwasservolumenströme an Bord der MS Asbach anhand der Einsatzdauer und der mittleren täglichen Wasserverbräuche für die Jahre 2003 und 2004.....   | 117 |
| Tabelle 36: | Mittlere jährliche Frachten der MS Asbach bei unbehandelter Einleitung des Abwassers .....  | 117 |
| Tabelle 37: | Herstellungskosten der untersuchten Pilotanlagen .....  | 120 |
| Tabelle 38: | Richtpreisangebote zur großtechnischen Umsetzung einer Bordkläranlage auf der MS Asbach.....  | 123 |
| Tabelle 39: | Übersicht der Betriebskosten .....  | 125 |
| Tabelle 40: | Aufwendungen zum Zeitpunkt der Bordkläranlagenbeschaffung (Projektkostenbarwerte PKBW; Zeitpunkt $t = 0$ ) ohne Klärschlamm Entsorgungskosten .....   | 126 |
| Tabelle 41: | Kosten der Abwasserentsorgung durch Pumpwagen für ausgewählte Städte am Rhein.....  | 127 |
| Tabelle 42: | Aufwendungen zum Zeitpunkt $t = 0$ zur Abwasserentsorgung mittels Pumpwagen für ausgewählte Städte am Rhein und unterschiedliche Nutzungszeiträume.....   | 128 |
| Tabelle 43: | Aufwendungen zum Zeitpunkt $t = 0$ zur Klärschlamm Entsorgung mittels Pumpwagen für ausgewählte Städte am Rhein und unterschiedliche Nutzungszeiträume.....   | 128 |

# 1 Einleitung

Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft- und Verbraucherschutz in Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) wurde im Zeitraum April 2002 bis Dezember 2004 am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA) und am Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik an der RWTH Aachen e.V. (PIA) die Einsatzfähigkeit der Membrantechnik zur Abwasserbehandlung auf Fahrgastbinnenschiffen untersucht.

Inhalte des F+E-Vorhabens „Einsatz der Membrantechnik zur Abwasserbehandlung auf Binnenschiffen“ (AZ IV-9-042 528) waren Entwicklung und Test von Abwasserbehandlungsanlagen für Binnenschiffe mit Membrantechnologie, basierend auf einer Kombination des aeroben Belebungsverfahrens und der Mikrofiltrationstechnik zur Abtrennung des Belebtschlammes.

Ziel dieses Projektes war es, die Abwasserreinigung an die schiffsbaulichen und betrieblichen Rahmenbedingungen anzupassen und so den Schifffahrtsunternehmen eine geeignete Verfahrenstechnik zur Behandlung der anfallenden Abwässer an Bord zur Verfügung zu stellen. Es wurden Verfahrensweisen gesucht, die einen kontroll- und wartungsarmen Betrieb unter Bordbedingungen erlauben.

Als Projektpartner standen dem ISA und PIA das Fahrgastschiff-Unternehmen „Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG“ sowie die Anlagenhersteller „Delphin Umwelttechnik GmbH“ aus Hamburg, „Earth Tech Umwelttechnik GmbH“ aus Neuss, „Martin Systems Engineering GmbH“ aus Sonneberg und „Puron AG“ aus Aachen zur Seite.

Zur Erreichung der Projektziele wurde das F+E -Vorhaben in 2 Phasen aufgeteilt. In Phase 1 wurden in Kooperation mit den oben genannten Anlagenherstellern Pilotanlagen zur Abwasserreinigung mit Membrantechnik entwickelt, auf dem Prüffeld des PIA getestet und fallweise optimiert.

In Projektphase 2 war vorgesehen, zwei der vier Pilotanlagen auf dem Fahrgastschiff MS Asbach der Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG zu installieren und jeweils einem Test unter Praxisbedingungen in den Fahrtsaisons 2003 und 2004 zu unterziehen.

## 2 Veranlassung

Am 9. September 1996 wurde von Vertretern der Rheinanlieger- und Mitgliedsstaaten der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (Frankreich, Niederlande, Belgien, Luxemburg, Schweiz und Deutschland) das "Übereinkommen über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt" unterzeichnet [1].

Mit diesem sogenannten Abfallübereinkommen soll im Interesse des Umweltschutzes die zukünftige Behandlung aller auf einem Binnenschiff anfallenden Abfälle mit international einheitlichen Vorgaben geregelt werden. Durch Artikel 9.01 Abs. 3 „Verbot der Einbringung und Einleitung“ wird die Einleitung von häuslichem Abwasser von Fahrgastbinnenschiffen in die Wasserstraßen geregelt. Vorgesehen ist, dass ab dem 1. Januar 2005 für Kabinenschiffe mit mehr als 50 Schlafplätzen und ab dem 1. Januar 2010 für Fahrgastschiffe mit einer Zulassung zur Beförderung von mehr als 50 Fahrgästen ein Einleitverbot existieren soll. Fahrgastschiffe, die über zugelassene Bordkläranlagen verfügen, unterliegen diesem Verbot gemäß Artikel 9.01 Abs. 4 nicht.

### 3 Die Deutsche Fahrgastschifffahrt

#### 3.1 Schiffsbetriebsabfälle und deren Entsorgungswege in der deutschen Binnenschifffahrt

Die Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) hat zur Orientierung der auf einem Schiff anfallenden Abfälle das „Merkblatt für die Abfallbeseitigung sowie die Verwendung von Reinigungsmitteln in der Binnenschifffahrt“ herausgegeben [2]. Dieses soll zur Erleichterung der Binnenschiffer dienen, um über neu erschienene Bestimmungen zur Abfallentsorgung umgehend informiert zu sein. Es wird jährlich neu herausgegeben und untergliedert sich in vier Teile.

Teil 1 des Merkblatts umfasst die Begriffsbestimmungen und Kurzbezeichnungen der Abfälle und gibt Empfehlungen für die jeweiligen Ablieferungsformen vor, so wie sie derzeit in der deutschen Binnenschifffahrt Anwendung finden.

**Tabelle 1: Begriffsbestimmungen von Abfall in der Binnenschifffahrt, Auszug aus Teil 1 des Merkblatts für die Abfallbeseitigung (ZKR, 2001) [2]**

| Begriffsbestimmungen                               |  |
|--|--|
| <b>Abfälle</b>                                     | Stoffe, die an Bord anfallen und deren umweltgerechte Entsorgung geboten ist. Sie werden unterschieden in Schiffsbetriebsabfälle sowie Abfälle/Abwässer aus dem Ladungsbereich.  |
| <b>Schiffsbetriebsabfälle</b>                      | Abfälle und Abwässer, die bei Betrieb und Unterhaltung des Schiffes entstehen (Altfette, Altfilter, Altöl, Bilgenwasser, Gebinde, gebrauchte Lösungsmittel, Hausmüll, häusliches Abwasser, übrige Sonderabfälle) sowie Slops |
| <b>Abfälle und Abwässer aus dem Ladungsbereich</b> | Abfälle und Abwässer, die in Zusammenhang mit der Ladung an Bord des Fahrzeugs entstehen.  |
| <b>Hausmüll</b>                                    | Aus Haushalten stammende organische und anorganische Abfälle (z.B. Speisereste, Papier, Glas und ähnliche Küchenabfälle), jedoch ohne Anteile der anderen genannten Abfälle.   |

Die Entsorgung der öl- und fetthaltigen Schiffsbetriebsabfälle unterliegt festgesetzten Reglementierungen und ist für die deutsche Rheinschifffahrt in der Rheinschiffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV) gesetzlich verankert [3]. Mit Kapitel 15 der RheinSchPV (Gewässerschutz und Abfallbeseitigung auf Fahrzeugen) ist es verboten, Altöl, Bilgenwasser, Altfette und andere öl- oder fetthaltige Abfälle sowie Slops, Hausmüll und übrigen Sonderabfall in die Wasserstraße einzubringen. Der Schiffsführer ist verpflichtet, diese Abfälle separat in dafür vorgesehene Behälter zu sam-

meln und an dafür ausgewiesene Annahmestellen gegen Nachweis, außer bei Hausmüll, zu entsorgen.

Das Abfallübereinkommen der ZKR vom September 1996 sieht ein Verbot für die Einleitung von unbehandeltem Abwasser in die Gewässer für Fahrgastschiffe bestimmter Kapazitäten vor. Demnach besteht für Kabinenschiffe mit mehr als 50 Schlafplätzen ab 1. Januar 2005 und für Fahrgastschiffe, die zur Beförderung von mehr als 50 Fahrgästen zugelassen sind, ab 1. Januar 2010 ein Einleitverbot für häusliches Abwasser. Zur Einhaltung dieser Vorschrift müssen entweder ausreichend große Abwassersammeltanks an Bord vorhanden sein, deren Inhalt in regelmäßigen Abständen zur Weiterbehandlung an Land abgegeben wird oder eine geeignete Bordkläranlage reinigt das Abwasser vor Ort. Bordkläranlagen zur Schiffsabwasserreinigung müssen nach Anhang V des Übereinkommens folgende, in Tabelle 2, dargestellte Grenz- und Überwachungswerte einhalten.

**Tabelle 2: Grenz- und Überwachungswerte für Bordkläranlagen von Fahrgastschiffen nach Abfallübereinkommen der ZKR [1]**

Bei der Typprüfung von Bordkläranlagen sind folgende Grenzwerte einzuhalten:

| Parameter  | Sauerstoffkonzentration | Probe                           |
|--|-------------------------|---------------------------------|
| Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB <sub>5</sub> ) | 25 mg/l                 | 24h – Mischprobe, homogenisiert |
|  | 40 mg/l                 | Stichprobe, homogenisiert       |
| Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)                  | 125 mg/l                | 24h – Mischprobe, homogenisiert |
|  | 180 mg/l                | Stichprobe, homogenisiert       |

Im Betrieb sind folgende Überwachungswerte einzuhalten:

| Parameter  | Sauerstoffkonzentration | Probe                     |
|--|-------------------------|---------------------------|
| Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB <sub>5</sub> ) | 40 mg/l                 | Stichprobe, homogenisiert |
| Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)                  | 180 mg/l                | Stichprobe, homogenisiert |

Mechanisch-chemische Verfahren unter Einsatz von chlorhaltigen Mitteln sind nicht zugelassen.

Für die Speicherung und Frischhaltung der Klärschlämme sind ausreichende Vorkehrungen zu treffen.

In der Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO [4]), § 15.11 (Stand 2004) sind bereits Vorgaben zur Einhaltung des ersten vorgesehenen Abwassereinleitverbots ab 2005 für Kabinenschiffe getroffen worden. Hiernach sollen die im Abfallübereinkommen aufgeführten Grenzwerte für den Ablauf von Schiffskläranlagen zukünftig in der Rheinschiffahrtspolizeiverordnung zu finden sein.

Die Abwassersammlung an Bord der Schiffe erfordert bestimmte konstruktive Voraussetzungen nach § 15.11, Abs. 2. So muss z.B. der Füllstand oder der Füllungsgrad der Sammel tanks feststellbar sein. Die Entleerung der Tanks erfordert zudem bordeigene Pumpen und Leitungen, mit denen das Abwasser an Anlegestellen auf beiden Seiten des Schiffes übergeben werden kann. Zugleich soll dies ermöglichen, dass die Abwässer anderer Schiffe durchgeleitet werden können.

Während die Mitgliedsstaaten des Abfallübereinkommens sich verpflichten, geeignete Übergabepunkte für das gesammelte Schiffsabwasser zu errichten, sind die Betreiber von Bordkläranlagen selbst für die ordnungsgemäße Abgabe des anfallenden Klärschlammes zuständig, z.B. durch Abfahren mit Saugwagen gegen Nachweis.

Ausnahmemöglichkeiten sind in Artikel 9.02 des Übereinkommens ebenfalls vorgesehen, wonach die Vertragsstaaten für Schiffe, für die die Einhaltung des Einleitverbotes für häusliches Abwasser praktisch schwer durchführbar ist oder unzumutbar hohe Kosten verursacht, alternative Entsorgungsverfahren vereinbaren können. Es sind dann Bedingungen festzulegen, unter denen diese Ausnahmen als gleichwertig angesehen werden können, was bei der Umsetzung des Abfallübereinkommens in deutsches Recht in den Händen von Bund und Ländern liegt.

Für die übrigen, im Abfallübereinkommen nicht explizit genannten Binnenschiffe ist eine Einleitung der häuslichen Abwässer in die Gewässer erlaubt.



### 3.2 Daten und Fakten zur deutschen Fahrgastschifffahrt

Im Jahr 2000 waren 1.370 in Deutschland ansässige Unternehmen in der Binnenschifffahrt tätig, davon 361 in der Personenschifffahrt. Insgesamt verfügten diese Unternehmen über 3.375 Schiffe zur Güter- bzw. Personenbeförderung. Als fahrendes Personal auf Binnenschiffen waren rund 6.500 Mitarbeiter tätig [5].

Die Gesamtzahl der gemeldeten Tagesausflugsschiffe betrug im Jahr 2001 909 Schiffe mit einer Gesamtkapazität von 227.631 Plätzen und 34 Fahrgastkabinenschiffe mit 3.304 Betten. Der Bundesverband der deutschen Binnenschifffahrt e.V. (BDB) hat versucht, über das in der Fahrgastschifffahrt eingenommene Entgelt das jährliche Fahrgastaufkommen abzuschätzen. Für das Jahr 2001 wurden so rund 11 Mio. beförderte Fahrgäste errechnet.

In Bild 1 sind die Haupteinsatzstrecken und regionalen Schwerpunkte der Fahrgastschifffahrt, nach Mitteilung des Bundesverbandes der deutschen Binnenschifffahrt e.V. (BDB), dargestellt [6].

Nach Angaben des BDB sind die Haupteinsatzstrecken von Fahrgastschiffen:

- Rhein           Raum Köln-Bonn bis Königswinter
- Rhein           von Bingen bis Koblenz (Mittelrhein)
- Mosel           von Koblenz bis Trier
- Donau          von Regensburg bis Passau
- Elbe            Raum Dresden

Regionale Schwerpunkte sind zu finden:

- in und um Berlin
- am Bodensee
- am Chiemsee.

## BUNDESWASSERSTRASSEN

- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes -



- MAINZ □ Sitz einer Wasser- und Schifffahrtsdirektion
- Mannheim ◇ Sitz eines Wasser- und Schifffahrtsamtes u. dgl.
- - - Staatsgrenze

- Grenze zwischen Wasser- und Schifffahrtsdirektionen
- Grenze zwischen Wasser- und Schifffahrtsämtern
- WS-Klasse 0 - III
- WS-Klasse IV - VI

Bundeswasserstraßen, die eine Länge von unter 5 km aufweisen, sind maßstabsbedingt teilweise nicht dargestellt.

Kartographie: Sonderstelle für Vermessungswesen beim Wasser- und Schifffahrtsamt Regensburg  
 Vertrieb: Drucksachenstelle der WSV bei der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte, Postfach 6307, 30063 Hannover

**Abbildung 1: Bundeswasserstraßen in Deutschland mit erhöhter Fahrgastschifffahrt (überarbeitet nach [7])**

## 4 Vorstellung des F+E Vorhabens

### 4.1 Darstellung der Projektziele

Ziele des durchgeführten Untersuchungsvorhabens waren Entwicklung und Test von Abwasserbehandlungsanlagen für Binnenschiffe unter Einsatz der Membrantechnik. Durch eine optimierte Verfahrenstechnik zur Reinigung von Grau- und Schwarzwässern sollte die Abwasserreinigung an die schiffsbaulichen und betrieblichen Rahmenbedingungen angepasst und so den Unternehmen eine geeignete Verfahrenstechnik zur Verfügung gestellt werden. Als Technik sollte eine Membranbelebungsanlage, basierend auf der Kombination des aeroben Belebungsverfahrens und der Mikrofiltrationstechnik zur Abtrennung des Belebtschlammes, eingesetzt werden. Diese Kombination kann zu einer wesentlichen Verbesserung der Abwassersituation beitragen.

Dabei sollten folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Die Anlage soll auch nachträglich in ein Schiff installiert werden können.
- Die Anlage soll das Abwasser biologisch mit Hilfe von Membranbioreaktoren reinigen.
- Das gereinigte Ablaufwasser soll an Bord wieder verwendbar sein (Toilettenspülung, Deckreinigung etc.).
- Die Ablaufqualität soll die Einleitung auch in empfindliche Gewässer ermöglichen.
- Die Anlage soll auch ohne vertiefte technische Ausbildung betrieben werden können.

## 4.2 Darstellung der Vorgehensweise

Beginn des Projekts war mit Schreiben des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen der 17.04.2002.

Das Projekt wurde in 2 Phasen aufgeteilt. Projektphase I umfasste Vorplanung, Entwicklung und Bau von Prototypen sowie die Durchführung von Eignungstests auf dem Prüffeld des PIA in Aachen. Ziel der Projektphase I war es, vier unterschiedliche und funktionstüchtige Prototypen für den Schiffeinsatz bereitzustellen.

In Projektphase II sollten anschließend anhand der in Phase I erzielten Resultate zwei Prototypen auf einem Fahrgastschiff der Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG (KD) unter Praxisbedingungen in der Fahrtsaison 2003 bzw. in der Fahrtsaison 2004 getestet werden.

In Zusammenarbeit mit der KD wurden nach Projektbeginn die Bemessungskriterien und Anforderungen an die Prototypen für die Ausschreibungsunterlagen zusammengestellt. Die Ausschreibungsunterlagen selbst wurden im Juni/Juli 2002 auf Fachmessen und Tagungen verteilt bzw. an den Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) weitergeleitet. Auf Nachfrage wurden detaillierte Unterlagen an folgende interessierte Anlagenhersteller verschickt:

- A3 GmbH  
D-45881 Gelsenkirchen
- Berghof Filtrations- und Anlagentechnik  
D-72800 Eningen
- DELPHIN Umwelttechnik GmbH  
D-21079 Hamburg
- Earth Tech Umwelttechnik GmbH  
D- 41468 Neuss
- Hamann Wassertechnik GmbH  
D- 21217 Seevetal
- Martin Systems Engineering GmbH  
D-98515 Sonneberg

- ROCHEM UF-Systeme GmbH  
D- 22605 Hamburg
- VA TECH WABAG  
D-40878 Ratingen
- WEHRLE-WERK AG  
D- 79301 Emmendingen
- WILHELM RUMP KG  
D-20457 Hamburg

Bis Anfang August 2002 wurden von folgenden Firmen Angebotsunterlagen eingereicht:

- DELPHIN Umwelttechnik GmbH
- Earth Tech Umwelttechnik GmbH
- Martin Systems Engineering GmbH

Die übrigen Anlagenhersteller reichten keine Angebote ein.

Ende August wurden die ersten Lieferverträge zur geforderten Membranbelebungsanlage mit Delphin Umwelttechnik und Martin Systems abgeschlossen. Ende Oktober kam es zu einem Vertragabschluss mit der Firma Earth Tech Umwelttechnik.

Da laut Projektziel insgesamt vier Prototypen von verschiedenen Anlagenherstellern untersucht werden sollten, konnte die PURON AG aus Aachen als weiterer Projektteilnehmer gewonnen werden. Hierbei kam es Anfang Dezember 2002 zu einem Vertragsabschluss.

Zur Überprüfung der Betriebstauglichkeit war vorgesehen, jede Anlage einem vierwöchigen Eignungstest inklusive einer Woche Stillstandszeit auf dem Prüffeld des PIA zu unterziehen. Während der Stillstandszeit wurde die Anlage selbst im Betrieb gelassen und allein der Zulauf zur Anlage gestoppt (Stand-By Betrieb). Der gesamte Test diente zur Verifizierung des vom Anlagenhersteller garantierten einwandfreien und betriebsfähigen Zustands der Anlage. Während dieses Leistungsnachweises wurde der Ablauf regelmäßig beprobt und der Anlagenstatus überwacht.

Im Rahmen des Projekts konnten drei Eignungstests auf dem Prüffeld des PIA beendet werden. Der Eignungstest der Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH musste aufgrund technischer Anlagenmängel abgebrochen werden. Nach Abschluss der Eignungstests der Pilotanlagen der Firmen Martin Systems Engineering GmbH und Earth Tech Umwelttechnik GmbH wurde der Betrieb dieser Anlagen in der Fahrtsaison 2003 (Martin System) und Fahrtsaison 2004 (Earth Tech) auf dem Fahrgastschiff MS Asbach der Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG unter Praxisbedingungen untersucht.

### 4.3 Bemessungskriterien und Anforderungen an die Schiffskläranlagen

Das geringe Platzangebot auf einem Binnenschiff führt zu hohen Anforderungen an die Konstruktion der Anlage. Zusätzlich müssen bei Fahrgastschiffen die unterschiedlichen Betriebszustände wie Liege- bzw. Fahrtbetrieb besonders berücksichtigt werden, da diese zu starken Schwankungen hinsichtlich des Abwasseranfalls führen. Der Aspekt, dass umbauter Raum an Bord eines Schiffs extrem teuer ist, führt zu der Forderung alle einzubauenden Systeme möglichst platzsparend und kompakt auszuführen.

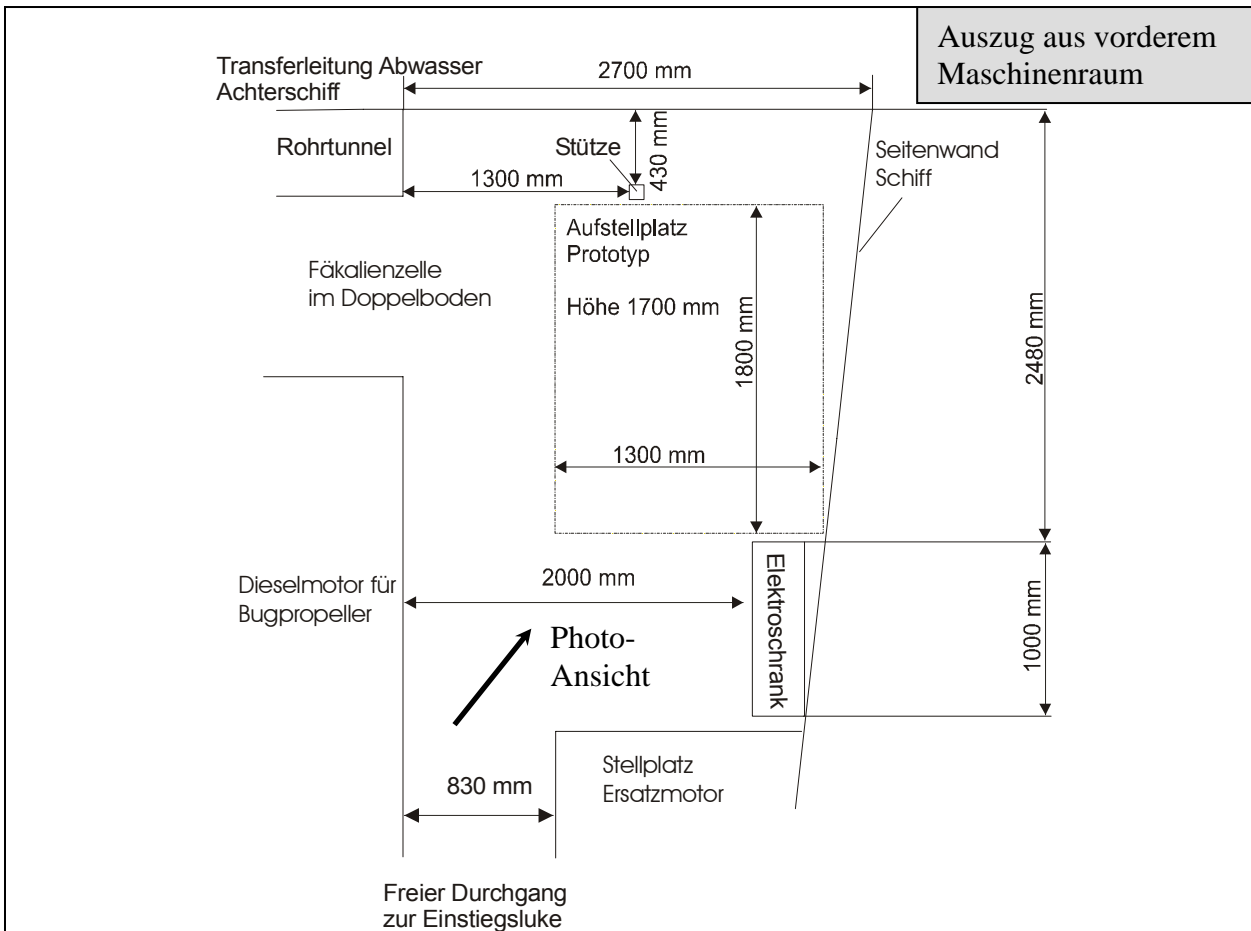
Generell sind folgende Anforderungen an Anlagen zur Reinigung von Schiffsabwässern zu stellen:

- geringe Emissionen
- wartungsarmer Betrieb
- hohe Flexibilität und Verfügbarkeit
- einfache und sichere Betriebsweise
- modularer Aufbau
- kurzer Einfahrtbetrieb

Bedingt durch den für die Praxistests zur Verfügung gestellten Aufstellplatz im vorderen Maschinenraum des Fahrgastschiffes MS Asbach waren die Anlagen so auszuführen, dass sie demontierbar sind. Der Einbau durch die Einstiegs Luke mit den Maßen 1,20 m \* 0,70 m bei einer Raumhöhe von etwa 1,90 m musste gewährleistet sein. Die Anlage selbst durfte dabei folgende Dimensionen nicht überschreiten:

$$\text{Länge} * \text{Breite} * \text{Höhe} = 1,80 \text{ m} * 1,30 \text{ m} * 1,70 \text{ m}$$

In der folgenden Abbildung ist der Aufstellplatz dargestellt.



### Ansicht



**Abbildung 2: Aufstellplatz der Pilotanlage im vorderen Maschinenraum der MS Asbach**

Der Aufstellplatz wurde vorher als Lagerplatz für Werkzeug und als Arbeitsplatz für kleinere Reparaturen genutzt. Die vorhandenen Platzverhältnisse erlaubten eine Größe der Pilotanlage, deren Abwasserreinigungsleistung bei etwa 1,8 m<sup>3</sup> Abwasser/Tag liegt. Die Beschickung der Anlage konnte direkt aus dem Fäkaliensammel-tank unterhalb des Maschinenraums erfolgen (vgl. Kapitel 6).



Die Anlagen waren entsprechend den folgenden Kriterien auszuführen:

- Abwasserbehandlung in biologischem Reaktor mit Membranfiltration
- Abwasserdurchsatz: bis 1,8 m<sup>3</sup>/d  
(maßgebend waren die einzuhaltenden Raummaße)
- Einsatzdauer je Fahrt: max. 7 Tage
- Schlammstorage (Primär- und Sekundärschlamm) für 7 Tage
- Entwässerungssystem auf dem Schiff: Schwerkraft
- Zeiträume ohne Abwasserzufluss: größer als 1 Monat

Die Abwasserzusammensetzung an Bord des Fahrgastschiffes wurde wie in Tabelle 3 dargestellt annähernd erwartet.

**Tabelle 3: Erwartete Abwasserzusammensetzung an Bord von Fahrgastschiffen**

| Parameter                          | Konzentration<br>[mg/l] | Spezifische Fracht <sup>1)</sup><br>[g/ (EW*d)] |
|------------------------------------|-------------------------|---|
| BSB <sub>5</sub>                   | 600 mg/l                | 90  |
| CSB                                | 1000 mg/l               | 150   |
| abfiltrierbare Stoffe              | 540 mg/l                | 80  |
| Gesamt Stickstoff N <sub>ges</sub> | 80 mg/l                 | 12  |
| Gesamt Phosphor P <sub>ges</sub>   | 20 mg/l                 | 3   |

<sup>1)</sup> Q<sub>d</sub> = 150 l/(EW\*d)

Folgende Ablaufanforderungen sollten von den Pilotanlagen eingehalten werden:

**Tabelle 4: Einzuhaltende Ablaufgrenzwerte der Pilotanlagen**

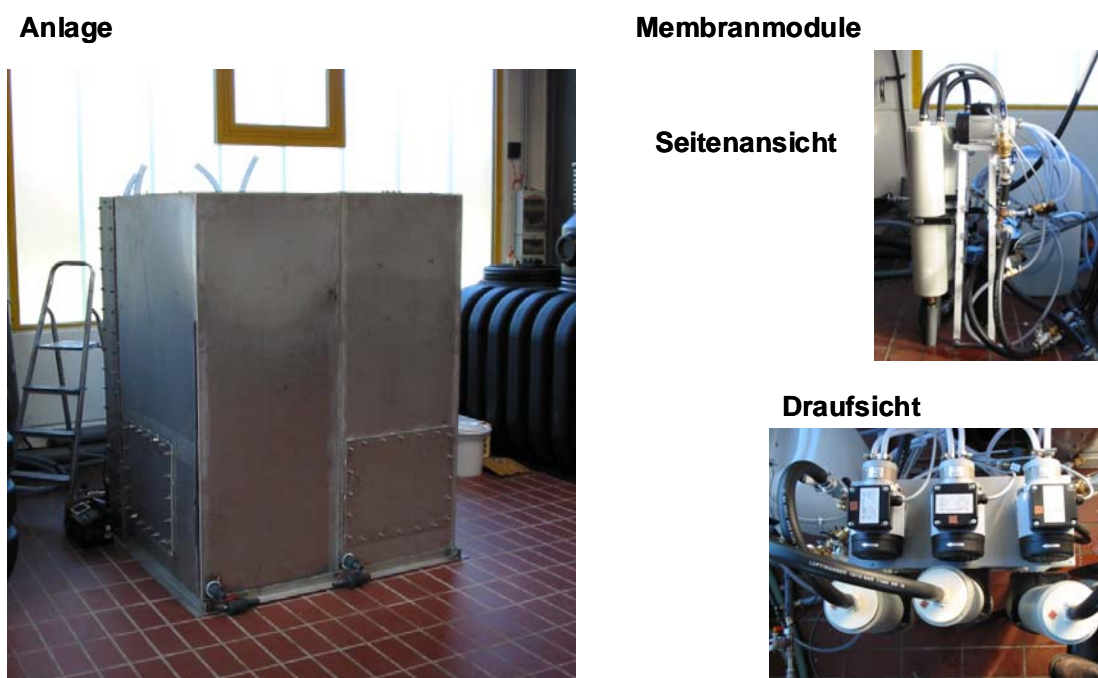
| Parameter             | Ablaufanforderung |
|-----------------------|-------------------|
| abfiltrierbare Stoffe | < 1 mg/l          |
| CSB                   | < 60 mg/l         |
| N <sub>anorg</sub>    | < 18 mg/l         |
| Coliforme Keime       | < 1/100 ml        |

In dem folgenden Kapitel 4.4 werden Aufbau und Funktionsweisen der verschiedenen Prototypen der Anlagenhersteller dargestellt, in einer abschließenden Gesamtbetrachtung sind die wesentlichen Anlagendaten in Kapitel 4.4.5 zusammengefasst.

## 4.4 Aufbau und Funktionsweise der Prototypen

### 4.4.1 Prototyp der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH

In Abbildung 3 ist die Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH dargestellt.



**Abbildung 3: Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH**

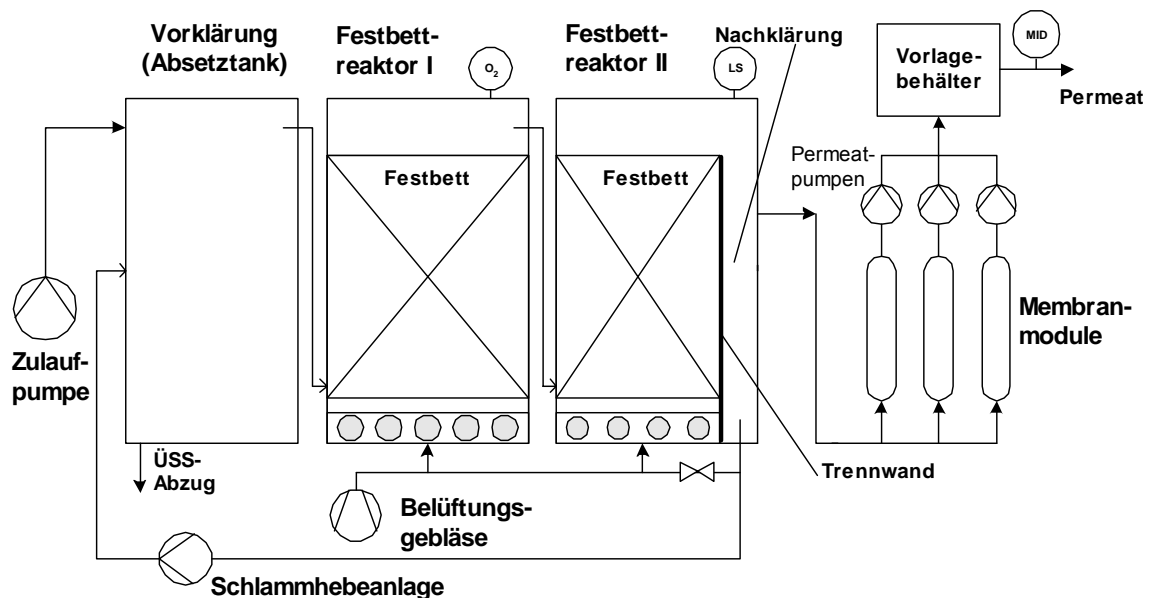
Die Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik besteht aus einem Vorklärbecken zur Grobstoffabscheidung, 2 Festbettreaktoren zur Denitrifikation und Nitrifikation, einer minimierten Nachklärzone zur Abscheidung von Schlamm und einer separaten Mikrofiltrationseinheit zur Entkeimung des biologisch gereinigten Abwassers. Die drei Behälter sind als rechteckige Edelstahlbehälter ausgeführt. Die minimierte Nachklärung ist im 2. Festbettreaktorbehälter durch eine nach unten offene Trennwand integriert.

Das Abwasser durchläuft die Anlage im freien Gefälle. Das Vorklärbecken dient zur Grobentschlammung des Rohabwassers sowie als Speicher für Primär- und Sekundärschlamm. Die Festbettreaktoren werden jeweils im freien Gefälle von unten beschickt, wobei der Überlauf vom Vorklärbecken in den ersten Festbettreaktor über ein Tauchrohr erfolgt, um Schwimmstoffe zurückzuhalten.

Je nach Betriebsweise können in den beiden Festbettreaktoren jeweils Nitrifikation oder Denitrifikation bzw. beide Prozesse nacheinander stattfinden. Beide Reaktoren

können mittels eines Kompressors über Membranbelüfter belüftet werden. Laut Aussage des Herstellers ist es möglich, als Verfahrensweise eine vorgeschaltete oder eine intermittierende Denitrifikation einzustellen.

Abbildung 4 zeigt Aufbau und Verfahrensprinzip der Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH.



**Abbildung 4: Verfahrensskizze der Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH**

Das biologisch gereinigte Abwasser gelangt unter der Tauchwand im zweiten Festbettreaktor hindurch in die Nachklärzone. Die Nachklärzone hat die Funktion, den vom Festbett gelösten Sekundärschlamm abzusetzen, um die Membranen vor hohen Feststoffgehalten zu schützen. Dadurch sollen die Standzeit der Membrane erhöht bzw. die Rückspülzeiten minimiert werden.

Aus der Nachklärung wird der Sekundärschlamm mittels einer Lufthebeanlage zurück in die Vorklärung gefördert. Das Rezirkulationsvolumen entspricht dabei etwa 100% der Zulaufmenge. Die Schlammrückführung ist mit dem Belüfter gekoppelt, so dass diese nur innerhalb der Laufzeiten der Belüftung erfolgen kann. Der Kompressor für die Belüftung und das Magnetventil für die Schlammrückführung werden über eine programmierbare Steuereinheit geregelt.

Die Membranfiltration erfolgt in Abhängigkeit des Wasserstandes in der Nachklärzone durch Saugpumpen. Insgesamt sind drei Membranfiltrationsmodule mit einer Leistung von je 40 l/h vorgesehen. Die gesamte Filtrationseinheit ist außerhalb der E-

delstahlbehälter angeordnet, so dass die Membranfiltrationsmodule für Wartungszwecke gut zugänglich sind. Durch einfaches Lösen der Schlauchverbindungen ist die gesamte Filtrationseinheit von der Anlage entkoppelbar.

Jedes Modul ist mit einer separaten Saugpumpe verbunden. Teile des filtrierten Abwassers werden in einem Vorlagebehälter als Rückspülwasser zur Reinigung der Module gesammelt. Die Rückspülung der Membranfiltrationseinheit erfolgt mittels einer Rückspülpumpe aus dem Permeat-Vorlagebehälter.

#### 4.4.2 Prototyp der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH

In Abbildung 5 ist die Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH dargestellt.



**Abbildung 5: Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH**

Die Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH besteht allein aus einem Bioreaktor. Anfangs war als mechanische Vorreinigung ein Siebkorb mit einer Spaltbreite von 1 mm vorgesehen, der direkt in den Abwassersammeltank eingesetzt werden konnte. Aus dem Siebkorb sollte das grobstofffreie Abwasser über die Zulaufpumpe in den Bioreaktor gefördert werden. Die Reinigung des Siebkorbess erfolgte dabei durch Rezirkulation eines Teilstroms des vorbehandelten Abwassers, der über eine separate Leitung zurück zur Außenseite des Korbs zwecks Abspülung des Siebguts geleitet wurde.

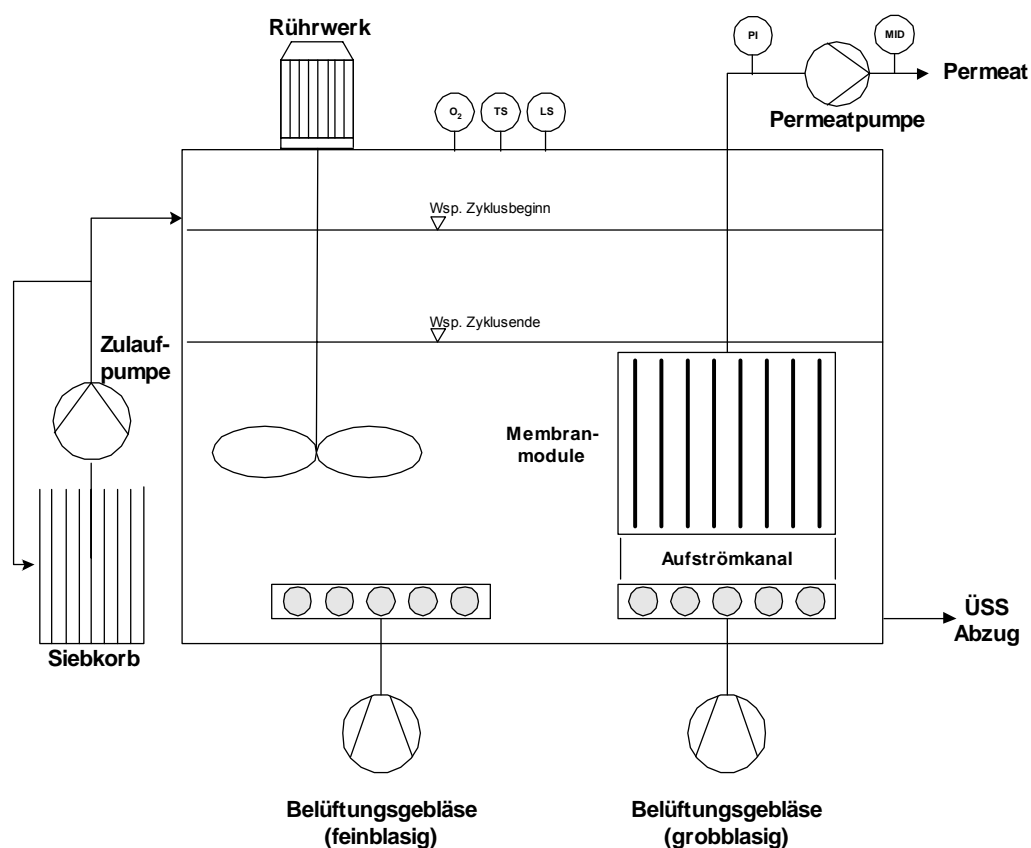
Es stellte sich jedoch heraus, dass die Abreinigung nur unzureichend funktionierte und die Spalten zu schnell verblockten. Aufgrund dessen floss nicht genügend Abwasser in den Siebkorb, um den Bioreaktor in der dafür vorgesehenen Zeit zu befüllen. Der Siebkorb als mechanische Vorreinigung wurde daraufhin entfernt und das Rohabwasser direkt in den Bioreaktor gefördert.

Der Bioreaktor selbst ist in Anlehnung an das SBR Verfahren mit Einsatz der Membrantechnik als Ersatz für die Sedimentationsphase entwickelt worden, d.h. er wird im Aufstaubetrieb gefahren. Eingestellt sind vier Zyklen pro Tag mit einem Durchsatz von etwa 450 l/Zyklus.

Ein Zyklus ist in folgende Verfahrensschritte aufgeteilt:

- Anlagenbeschickung
- Biologische Behandlung des Abwassers (Nitri/Deni)
- Filtration (während der Filtration herrschen aerobe Verhältnisse im Bioreaktor)

Abbildung 6 zeigt Aufbau und Verfahrensprinzip der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH.



**Abbildung 6: Verfahrensskizze der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH**

Ein im Bioreaktor angeordnetes Rührwerk sorgt für ausreichende Turbulenzen und stellt damit die notwendige Umwälzung des Belebtschlammes sicher. Die Speicherung

des Überschussschlammes erfolgt durch Aufkonzentrierung direkt im Bioreaktor und ist nach Bedarf auszuschleusen.

Ursprünglich sollte die Abreinigung der Membranoberfläche durch grobblasige Spül-  
luft sowie die Belüftung des Belebtschlammes über einen Kompressor erfolgen. Die  
Anordnung des Belüfters direkt unter den Membranen hatte jedoch zur Folge, dass  
der Sauerstoffeintrag in den Belebtschlamm zu gering war, so dass ein zweiter Kom-  
pressor installiert werden musste. Um die Laufzeiten des zweiten Kompressors zu  
reduzieren, wird dieser über die vorhandene Sauerstoffmesssonde angesteuert.

Das Membranmodul besteht aus 20 Plattenmembranen der Firma KUBOTA und ist  
direkt im Bioreaktor angeordnet. Das Austauschvolumen im Bioreaktor ist so gewählt,  
dass ein Trockenfallen der Membranen verhindert wird. Die Plattenmembranen sind  
über eine Permeatsammelleitung miteinander verbunden, der Permeatabzug erfolgt  
über eine Saugpumpe.

Zum Einbau in das Fahrgastschiff MS Asbach kann der Bioreaktor in vier Segmente  
zerlegt werden, Aggregate und Steuerungsschrank sind leicht demontierbar.



#### 4.4.3 Prototyp der Firma Martin Systems Engineering GmbH

In Abbildung 7 ist die Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH dargestellt.



**Abbildung 7: Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH**

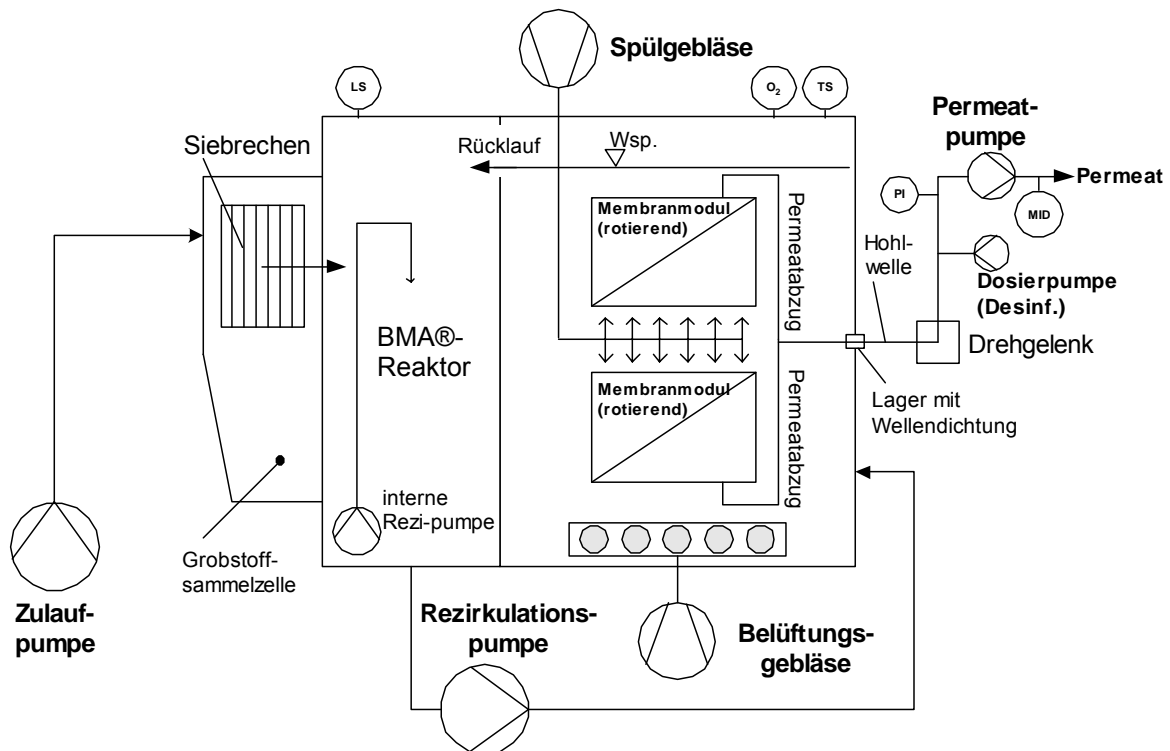
Die Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH zur biologischen Abwasserbehandlung von Grau- und Schwarzwasser auf Schiffen besteht aus einer mechanischen Vorreinigung, dem sogenannten Bio-Membran-Aufstaureaktor (BMA®-Reaktor) und dem Biomembranreaktor. Bei der vorliegenden Pilotanlage ist der BMA®-Reaktor als separate Zelle im Biomembranreaktor integriert.

Die mechanische Reinigungsstufe bestand anfangs aus einem mit Luftblasenabreinigung betriebenes Feinsieb zur Trennung von Grobstoffen und ungelösten Bestandteilen. Der erforderliche Rückhalt erfolgte in der Grobstoffsammelzelle. Fette wurden aufflotiert und konnten über einen separaten Fettabzug entsorgt werden. Da die Luftblasenabreinigung nur unzureichend funktionierte, wurde diese durch eine motorbetriebene Reinigungsbürste für den weiteren Projektverlauf in Projektphase II ersetzt (vgl. Kapitel 5.3.1).

Aus der mechanischen Vorreinigung fließt das frische Abwasser dem BMA®-Reaktor im freien Überlauf zu. Der BMA®-Reaktor wird im Aufstauverfahren, der Biomembranreaktor selbst mit konstantem Füllstand betrieben. Über eine Rezirkulationspumpe

pe wird das Abwasser gleichmäßig in den Biomembranreaktor gefördert, durch einen internen Überlauf erfolgt ein Rücklauf der Biomasse in den BMA<sup>®</sup>-Reaktor. Eine im BMA<sup>®</sup>-Reaktor eingebaute Füllstandsmesssonde steuert wasserstandsabhängig die Zulauf- und die Permeatpumpe. Darüber hinaus übernimmt der Reaktor gleichzeitig die Funktion eines vorgeschalteten Denitrifikationsbeckens.

Abbildung 8 zeigt Aufbau und Verfahrensprinzip der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH.



**Abbildung 8: Verfahrensskizze der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH**

Bei diesem sogenannten BMA-VRM<sup>®</sup>-Verfahren kommen im Biomembranreaktor getauchte und rotierende Ultrafiltrationsmodule zum Einsatz (VRM<sup>®</sup> steht hierbei für Vacuum-Rotation-Membrane). Die Technik besteht aus einer rotierenden Hohlwelle um die die Flachmembranen im Umfang angeordnet und über einen Permeatsammler verbunden sind. Der Permeatabzug erfolgt über eine selbstansaugende Kreiselpumpe wobei das Permeat zentral über die Hohlwelle aus dem Reaktor entnommen wird.

Laut Hersteller ist die Innovation des Verfahrens durch das variable Reinigungssystem zur Erzeugung hoher Strömungsgeschwindigkeiten an den Membranoberflächen gekennzeichnet. Durch die sequentielle Überströmung der rotierenden Flachmem-

branen mittels eines von Luftblasen induzierten Reinigungsstrahls in der Mitte des Rotationsfilters wird die Abreinigung der Deckschicht vorgenommen (grobblasige Spülluft). Dies ermöglicht einen Verzicht auf periodische Rückspülungen mit Wasser oder Chemikalien. Die Rotationsbewegung erzeugt intensive Turbulenzen, so dass zusätzliche Aggregate zur Umwälzung des Belebtschlammes entfallen.

Die Belüftung zur Kohlenstoff- und Stickstoffelimination erfolgt feinblasig. Das Belüftungsgebläse wird über eine im Reaktor eingebaute Sauerstoffmesssonde gesteuert; eine intermittierende Denitrifikation ist dabei vorgesehen.

Die Anlage ist so konstruiert, dass Aggregate, Steuerungsschrank und Grobstoffsammelzelle vom eigentlichen Bioreaktor leicht demontierbar sind. Der Reaktor selbst ist in drei Segmente zerlegbar.

#### 4.4.4 Prototyp der Firma Puron AG

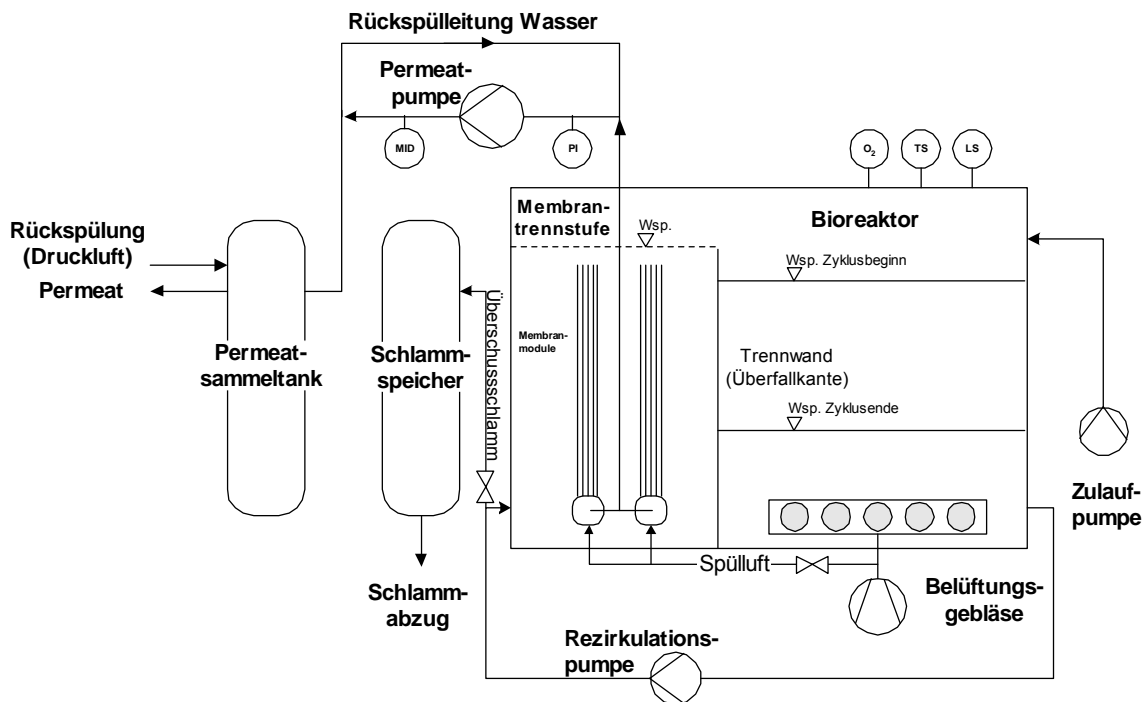
In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind Aufbau und Verfahrensprinzip der Pilotanlage der Firma Puron AG dargestellt.



**Abbildung 9: Pilotanlage der Firma Puron AG**

Die Pilotanlage der Firma Puron besteht aus einem Bioreaktor, einem Permeatsammeltank sowie aus einem separaten Tank zur Überschussschlamm-speicherung. Gemäß den Herstellerangaben kann aufgrund der Konstruktionsmerkmale der eingesetzten Puron-Membranmodule auf eine mechanische Vorreinigung des Abwassers verzichtet werden.

Der Bioreaktor ist zweigeteilt. Er besteht aus der eigentlichen Membrankammer und dem Reaktor zur biologischen Reinigung des Abwassers, der gleichzeitig als Pufferbecken dient. Über eine Trennwand mit Überfallkante im Inneren des Bioreaktors sowie über eine außen montierte Rezirkulationspumpe sind beide Kammern miteinander verbunden.



**Abbildung 10: Verfahrensskizze der Pilotanlage der Firma Puron AG**

Über eine Tauchpumpe wird das Rohabwasser in das Pufferbecken gefördert, die Anlage wird im Aufstaubetrieb (SBR-Verfahren) gefahren. Ein Zyklus ist in folgende Verfahrensschritte aufgeteilt.

- Anlagenbeschickung
- biologische Abwasserreinigung mit intermittierender Belüftung (Nitri / Deni)
- Filtration des gereinigten Abwassers.

Durch die Trennwand ist gewährleistet, dass während der Filtrationsphase der Wasserspiegel in der Membrankammer konstant bleibt und die Membranen nicht trocken fallen. Mittels einer Permeatpumpe wird das Filtrat durch Anlegen eines filtratseitigen Unterdrucks in den Permeatsammelbehälter gepumpt. Während des Filtrationszyklus werden die Deckschichten durch eine Modulspülung intervallmäßig entfernt. Die Modulspülung umfasst eine Luftspülung und eine Permeatrückspülung durch Anlegen eines Überdrucks im Permeatsammelbehälter.

Die Luftversorgung zur Abreinigung mit Spülluft und zur Belüftung des Belebtschlammes erfolgt über einen gemeinsamen Kompressor. Die Belüftung des Belebtschlammes wird über die im Bioreaktor eingebaute Sauerstoffmesssonde geregelt.

Die eingesetzten Puron-Membranmodule werden aus Modul-Bausteinen aufgebaut, wobei jeder Modulbaustein aus einem Membranfaserbündel (Hohlfasermembran) besteht. Die Membranfasern sind an einer Seite verschlossen und werden an der anderen Seite in ein Modulelement offen eingeharzt. Eine Begasungsdüse zur Luftspülung ist zentral im Modulelement angeordnet. Die anfänglich installierte Membranfläche von 36 m<sup>2</sup> wurde auf 20 m<sup>2</sup> reduziert. Die Ausschleusung des Überschussschlammes in den Tank erfolgt über die Rezirkulationspumpe mit einem zeitgesteuerten Ventil in der Zuleitung zum Schlammspeichertank.

Die gesamte Membrananlage ist auf zwei gleichgroße Edelstahlrahmen montiert, die über Schraubverbindungen miteinander fixiert sind. Ein Rahmen nimmt den Bioreaktor auf, der andere die Aggregate inklusive Schaltschrank, Permeatsammel- und Schlammspeichertank.

#### 4.4.5 Überblick ausgewählter Anlagenmerkmale

In Tabelle 5 sind anhand von Verfahrensbeschreibungen, technischen Dokumentationen und Bedienungsanleitungen die jeweiligen Auslegungsdaten und charakteristischen Merkmale zu den einzelnen Pilotanlagen zusammengefasst und gegenübergestellt.

**Tabelle 5: Darstellung ausgewählter Anlagencharakteristika**

| Hersteller                         | Delphin<br>Umwelttechnik                          | Earth Tech<br>Umwelttechnik                        | Martin Systems<br>Engineering                      | Puron  |
|------------------------------------|---|--|--|--|
| Anlagentyp;<br>Reinigungsverfahren | Festbettreaktor;<br>kontinuierlich be-<br>schickt | Aufstau-<br>Belebungsanlage<br>(SBR-Verfahren)     | Belebungsanlage;<br>kontinuierlich<br>beschickt    | Aufstau-<br>Belebungsanlage<br>(SBR-Verfahren)                     |
| Vorreinigung                       | Vorklärung<br>$V_{VK} = 0,62 \text{ m}^3$         | keine  | 1 mm Lochsie-<br>bung                              | keine  |
| Volumen Belegung                   | 1,6 m <sup>3</sup>                                | 1,73 m <sup>3</sup>                                | 1,33 m <sup>3</sup>                                | 1,4 m <sup>3</sup>   |
| Membranformen/<br>Membranmodule    | Hohlfasermembran<br>3 Module je 40 l/h            | Plattenmembran<br>(KUBOTA)                         | Plattenmembran                                     | Hohlfasermembran   |
| Anordnung der<br>Membran           | externe Anordnung                                 | in Bioreaktor<br>integriert<br>(getauchte Membran) | in Bioreaktor<br>integriert<br>(getauchte Membran) | Membrankammer<br>$V_{MK} = 0,4 \text{ m}^3$<br>(getauchte Membran) |
| Eingebaute<br>Membranfilterfläche  | k.A.  | 8 m <sup>2</sup>                                   | 16 m <sup>2</sup>                                  | 20 m <sup>2</sup>  |
| Flux                               | k.A.  | 25 l/(m <sup>2</sup> *h)                           | 15 l/(m <sup>2</sup> *h)                           | 15 l/(m <sup>2</sup> *h)   |
| Transmembran-<br>druck             | k.A.  | ≤ 400 mbar   | ≤ 200 mbar   | ≤ 250 mbar   |
| Deckschicht-<br>entfernung         | Rückspülung mit<br>Permeat                        | Spülluft   | Spülluft   | Rückspülung mit<br>Permeat & Spülluft                              |
| Reinigung der Mem-<br>branen       | Austausch   | Austausch  | In-situ-Reinigung                                  | In-situ-Reinigung  |
| Überschussschlamm-<br>speicherung  | Vorklärung  | Bioreaktor durch<br>Aufkonzentrierung              | Bioreaktor durch<br>Aufkonzentrierung              | separater 100 Liter-<br>Tank                                       |
| opt. TS-Gehalt                     | k.A.  | 10 - 16 g/l  | 5 – 15 g/l   | < 12 g/l   |
| Wartungsintervall                  | 3x jährlich                                       | 3x jährlich  | 2x jährlich  | k.A.   |

Wesentliche Unterschiede der getesteten Pilotanlagen sind in den biologischen Reinigungsverfahren, der Vorbehandlung des Rohabwassers, der verwendeten Membranmodule und eingesetzten Membranfilterflächen zu sehen.

Die Anlagenhersteller Delphin Umwelttechnik GmbH und Earth Tech Umwelttechnik GmbH sehen vor, im Rahmen der Wartung die Membranen vor Ort auszutauschen und zur Wiederherstellung des Permeatfluss extern (z.B. am Firmenstandort) zu reinigen. Diese Reinigungsstrategie setzt voraus, dass von Anfang an zwei komplette Membranmodulsätze vorzuhalten sind. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Reinigungsvorrichtungen (Dosierpumpe und Lagerbehälter für Reinigungsmittel) nicht in die Behandlungsanlage an Bord integriert werden müssen.

Die für notwendig erachteten Wartungsintervalle reichen von 2x bis 3x jährlich. Letztendlich müssen die Erfahrungen in der Praxis zeigen, wie oft eine Wartung einer Abwasserbehandlungsanlage an Bord notwendig sein wird.

Im Folgenden werden die verschiedenen Testverläufe der Eignungstests und des Praxistests sowie die Ergebnisse zu den Untersuchungen in den Kapiteln 5 und 6 dargestellt. Im Anhang befinden sich die vollständigen Datenblätter mit den Analyseergebnissen zu den entsprechenden Untersuchungen.



## 5 Auswertung der Eignungstests

### 5.1 Delphin Umwelttechnik GmbH

#### 5.1.1 Testverlauf

Die Anlagenlieferung erfolgte in der 39. Kalenderwoche 2002 im teilfertigen Zustand. Die Montage und Programmierung der Anlagensteuerung erfolgte in der 41. Kalenderwoche. Aufgrund von Problemen mit der Anlagensteuerung und der Filtrationsleistung der Membrantrennstufe war eine Inbetriebnahme der kompletten Anlage nicht möglich. Während der Einfahrphase wurde daher die Pilotanlage ohne Membranfiltration betrieben. Ein erneuter Versuch im Dezember, die Pilotanlage in einen funktionsfähigen Zustand zu versetzen, scheiterte, so dass von seitens der Firma Delphin Umwelttechnik beschlossen wurde, die Membrantrennstufe am Firmensitz in Hamburg zu optimieren.

Anfang Januar wurde die Pilotanlage erneut ohne Membrantrennstufe eingefahren, die endgültige Inbetriebnahme verzögerte sich bis zum 25. Februar 2003.

Auch die nachträglichen Modifikationen an der Anlage konnten nicht erfolgreich abgeschlossen werden, so dass kurze Zeit später erneut festgestellt wurde, dass die Membrantrennstufe der Anlage den geforderten Bedingungen nicht gerecht werden konnte.

Der Test wurde daraufhin am 13.03.2003 abgebrochen, der laut Ausschreibung geforderte Leistungsnachweis konnte von der Firma Delphin Umwelttechnik nicht erbracht werden.

### 5.1.2 Auswertung der Untersuchungen

Zur Überprüfung der Reinigungsleistung hinsichtlich Kohlenstoff- und Stickstoffelimination wurden der Zu- und Ablauf der Anlage stichprobenartig während der zweiten Einfahrphase untersucht.

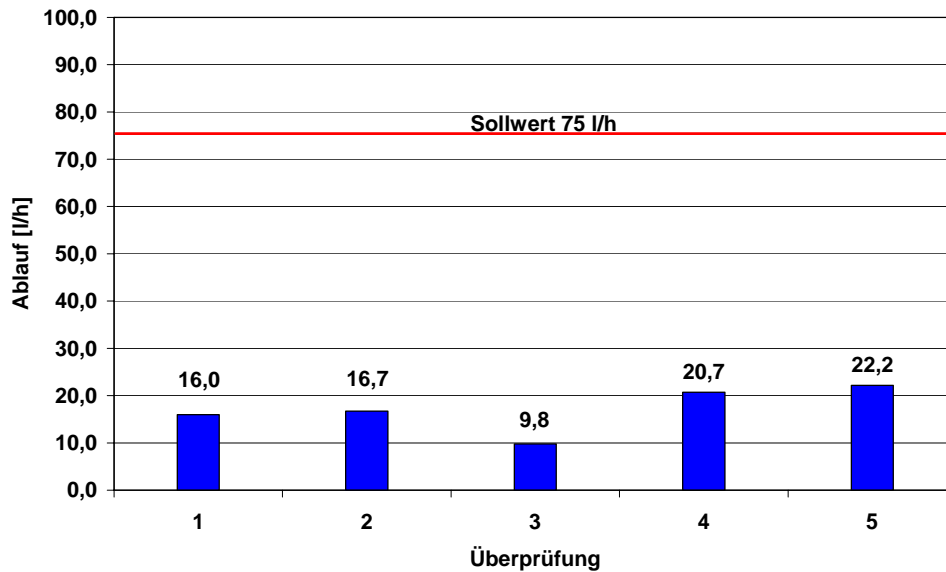
In Tabelle 6 sind die Analysenergebnisse der Untersuchungen dargestellt.

**Tabelle 6: Analysenergebnisse der Untersuchungen zur Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH**

|                          |             | Mi            | Fr         | Mo         | Fr         |
|--------------------------|-------------|---------------|------------|------------|------------|
|                          |             | 08.01.2003    | 17.01.2003 | 24.02.2003 | 28.02.2003 |
| <b>Parameter</b>         |             | <b>Zulauf</b> |            |            |            |
| <b>CSB<sub>hom</sub></b> | <b>mg/l</b> | 485           | 404        | -          | -          |
| <b>CSB<sub>fil</sub></b> | <b>mg/l</b> | 162           | 140        | -          | -          |
| <b>NH<sub>4</sub>-N</b>  | <b>mg/l</b> | 36,5          | 28,9       | -          | -          |
|                          |             | <b>Ablauf</b> |            |            |            |
| <b>CSB<sub>hom</sub></b> | <b>mg/l</b> | 121           | 79         | 56         | -          |
| <b>CSB<sub>fil</sub></b> | <b>mg/l</b> | -             | -          | 34         | -          |
| <b>NH<sub>4</sub>-N</b>  | <b>mg/l</b> | 3,0           | 2,9        | 1,1        | 2,4        |
| <b>NO<sub>3</sub>-N</b>  | <b>mg/l</b> | 18,5          | 13,3       | 30,6       | 17,2       |

An den Ablaufwerten ist zu erkennen, dass die Eliminationsleistung sowohl für die Kohlenstoff- als auch für die Stickstoffelimination den Anforderungen gerecht wurde.

Jedoch zeigen die Auswertungen der Untersuchungen zur Filtrationsleistung der Membrantrennstufe deutlich, dass die Anlage den gestellten Anforderungen bzgl. des Abwasserdurchsatzes nicht entsprach.



**Abbildung 11: Filtrationsleistung der Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH**

Zur Überprüfung der Filtrationsleistung wurde die benötigte Zeit ermittelt, um ein vordefiniertes Volumen zu filtrieren. Die Überprüfungen 1 bis 3 erfolgten dabei am 28.02.2003, die Überprüfungen 4 und 5 am 07.03.2003. Die maximale Filtrationsleistung lag etwa nur bei 30% der geforderten Filtrationsleistung von 75 l/h, um einen Tagesdurchsatz von 1,8 m<sup>3</sup>/d zu erreichen.

Die Analyse der Keimprobenuntersuchung im Ablauf eine Woche nach Inbetriebnahme (04.03.2003) ergab folgendes Ergebnis.

**Tabelle 7: Ergebnis der Keimprobenuntersuchung im Ablauf der Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH**

|                     |                 |          |
|---------------------|-----------------|----------|
| <b>Colif. Keime</b> | <b>1/100 ml</b> | <b>6</b> |
| <b>E.coli</b>       | <b>1/100 ml</b> | <b>0</b> |

Es wurden für diese Probenahme nur geringe Keimzahlen im Ablauf gemessen, die Bestimmung der Keimzahlen im Ablauf für den laufenden Betrieb war aus den oben genannten Gründen jedoch nicht möglich.

## 5.2 Earth Tech Umwelttechnik GmbH

### 5.2.1 Testverlauf

Die ersten Anlagenteile zur Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH wurden am 17.04.2003 zum Prüffeld des PIA angeliefert. Am 22.04.2003 wurde mit dem Zusammenbau der Anlage begonnen und am 16.05.2003 abgeschlossen. Am 20.05.2003 fand die reguläre Inbetriebnahme statt.

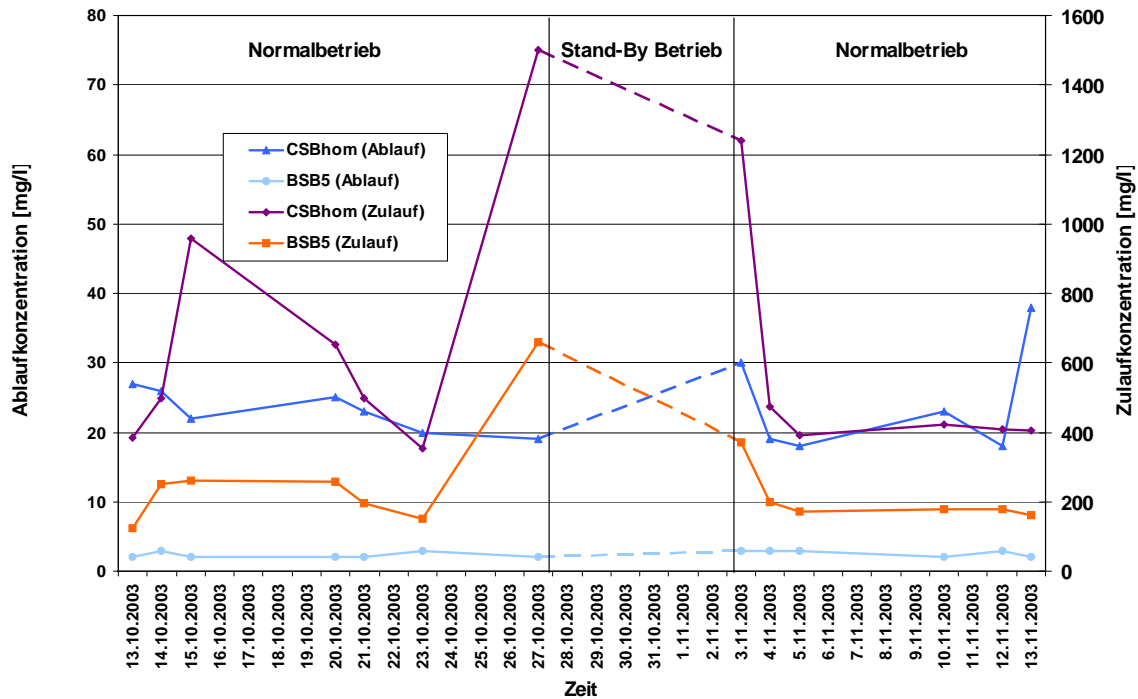
Im Zuge der Einfahrphase wurden die Zykluszeiten der Abwasserzusammensetzung angepasst. Aufgrund des noch zu geringen TS-Gehaltes (~ 7 g/l) musste die Filtratleistung der Permeatpumpe reduziert werden, um eine frühzeitige Verblockung der Membranen zu vermeiden. Nach Aussage des Herstellers muss ein TS-Gehalt von mindestens 10 g/l im Bioreaktor vorhanden sein, damit eine ordentliche Abreinigung der Membranen durch Scherwirkung gewährleistet werden kann. Die Reduzierung der Filtratleistung hatte zur Folge, dass die Anlage bis zum Erreichen des TS-Gehaltes mit nur 50% des Abwasservolumenstroms beschickt werden konnte. Die geringe Belastung der Anlage führte wiederum zu einer sehr geringen Überschussschlammproduktion, so dass sich ein ordnungsgemäßer Betrieb bei Normallast erst Anfang September einstellte.

Anschließend wurde beobachtet, dass der Lufteintrag durch einen Kompressor nicht ausreichend war, um gleichzeitig den Belebtschlamm zu belüften und die Membranen mit Spülluft abzureinigen. Anfang Oktober wurde daher ein zusätzlicher Kompressor eingebaut. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden Anfang Oktober zusätzlich turnusmäßig die Membranen ausgetauscht.

Der für den 06.10.2003 geplante Beginn des Eignungstests verschob sich daher auf den 13.10.2003. Ende des Eignungstests war der 13.11.2003, der Stand-By Betrieb begann am 27.10.2003 und endete am 03.11.2003.

## 5.2.2 Auswertung der Untersuchungen

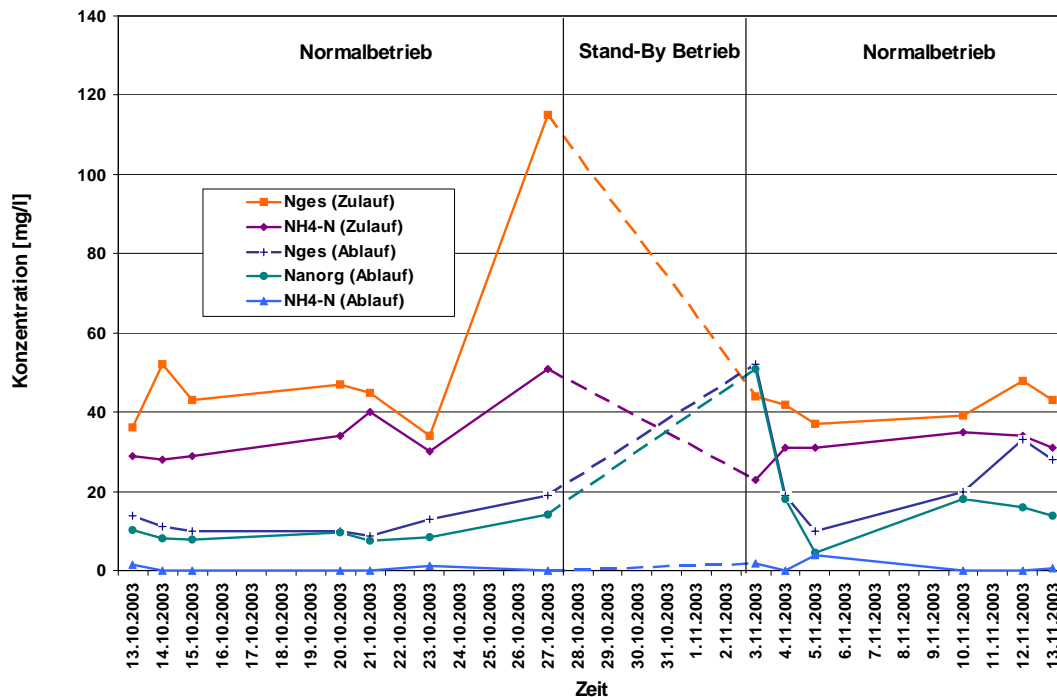
In Abbildung 12 sind die Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> über den Zeitraum des Eignungstests dargestellt.



**Abbildung 12: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH**

Die mittlere CSB-Eliminationsleistung lag bei 96%, für den Parameter BSB<sub>5</sub> ergab sich eine mittlere Eliminationsleistung von 99%. Eine Überschreitung des einzuhaltenen CSB-Grenzwertes von 60 mg/l wurde nicht festgestellt, der mittlere CSB-Ablaufwert lag bei 24 mg/l. Die BSB<sub>5</sub>-Ablaufwerte lagen unterhalb der Messwertgrenzen von < 2 mg/l bzw. < 3 mg/l. Der Einfluss des einwöchigen Stand-By Betriebs war nur durch einen kurzzeitigen Anstieg der CSB-Ablaufkonzentration am 03.11.2003 feststellbar.

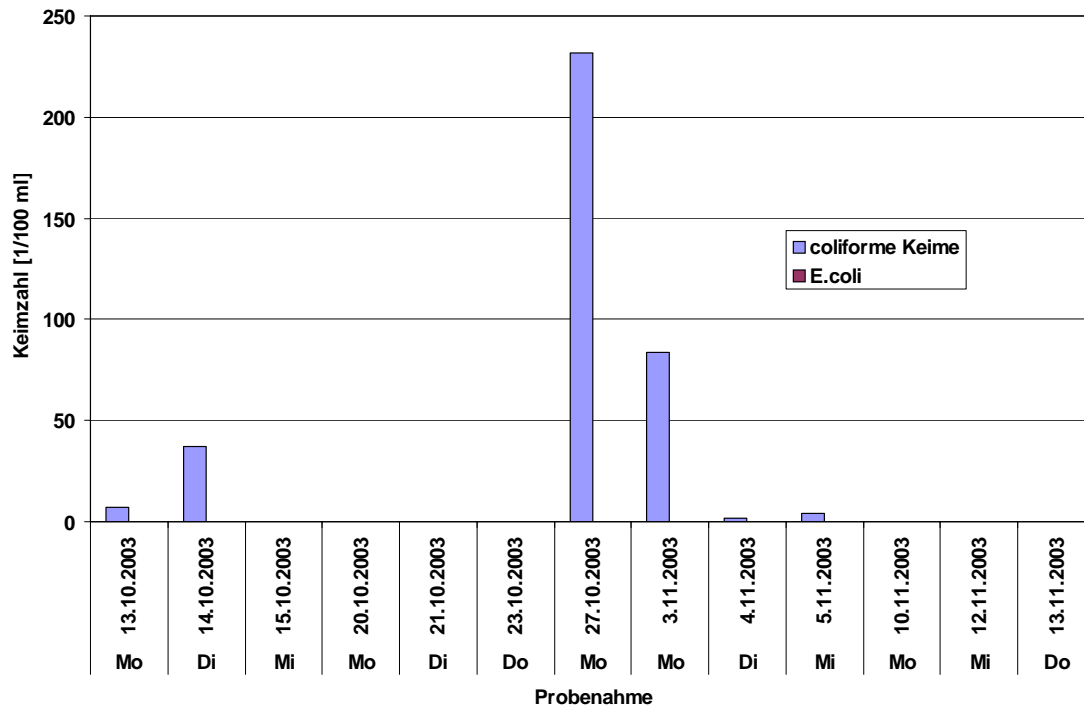
Die Verläufe der gemessenen Stickstoffkonzentrationen sind in Abbildung 13 dargestellt.



**Abbildung 13: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Stickstoffparameter der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH**

Für den Eignungstest ergab sich eine mittlere Gesamtstickstoffeliminationsrate von 60 %. Der einzuhaltende Grenzwert von  $N_{\text{anorg}} < 18 \text{ mg/l}$  wurde bis auf eine Ausnahme eingehalten. Bedingt durch den Stand-By Betrieb kam es während dieses Zeitraums zu einer Zersetzung des Schlammes und infolge dessen zu einer Rücklösung von organischem Stickstoff in Ammoniumstickstoff. Aufgrund fehlender Kohlenstoffquellen erfolgte nach der Nitrifikation keine Denitrifikation, so dass ein deutlicher Anstieg der Nitratkonzentration auf 49 mg/l festgestellt werden konnte. An den darauffolgenden Tagen waren wieder Ablaufwerte um den einzuhaltenden Grenzwert feststellbar.

Die Analyseergebnisse der Keimbeprobung sind in folgender Abbildung dargestellt.

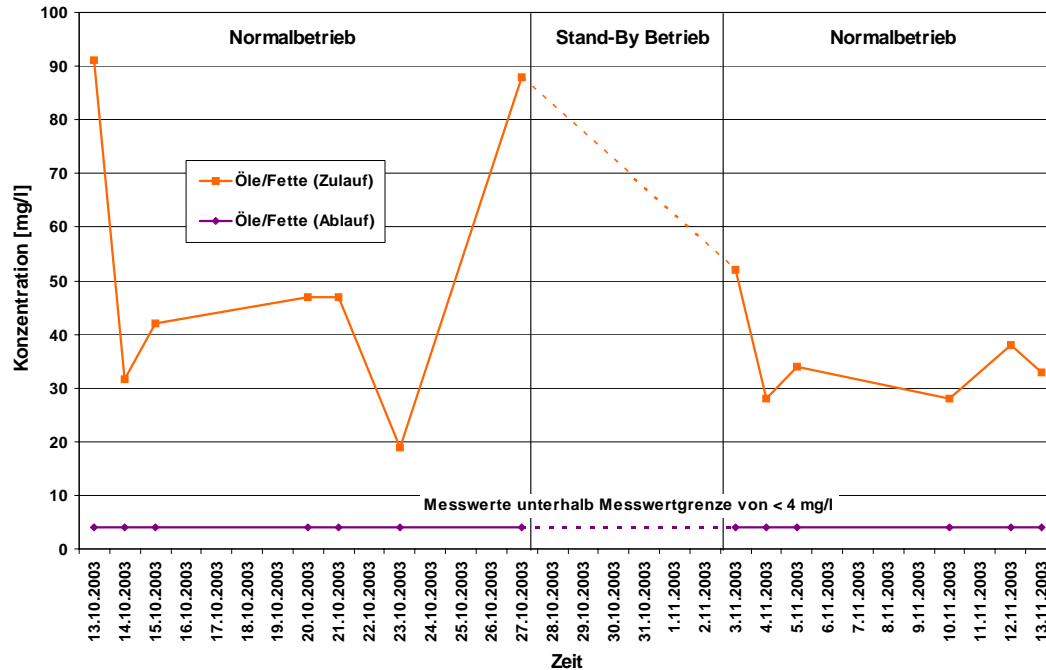


**Abbildung 14: Analyseergebnisse der Keimprobenuntersuchung zur Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH**

Coliforme Keime wurden nur zu Beginn des Eignungstests und nach dem Stand-By Betrieb festgestellt. Ursache war hierbei eine Rückverkeimung vom Ende der Ablaufleitung her. Durch den Stand-By Betrieb der Anlage wurden die Ablaufleitungen nicht regelmäßig mit Permeat durchgespült. Gleiches gilt für den Beginn des Eignungstests. Das Vorhandensein der Keime war auf den Stillstand der Anlage zu Wartungszwecken kurz vor dem Test zurückzuführen.

Eine Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf ergab durchweg Messungen  $< 1$  mg/l. Der Grenzwert wurde damit eingehalten.

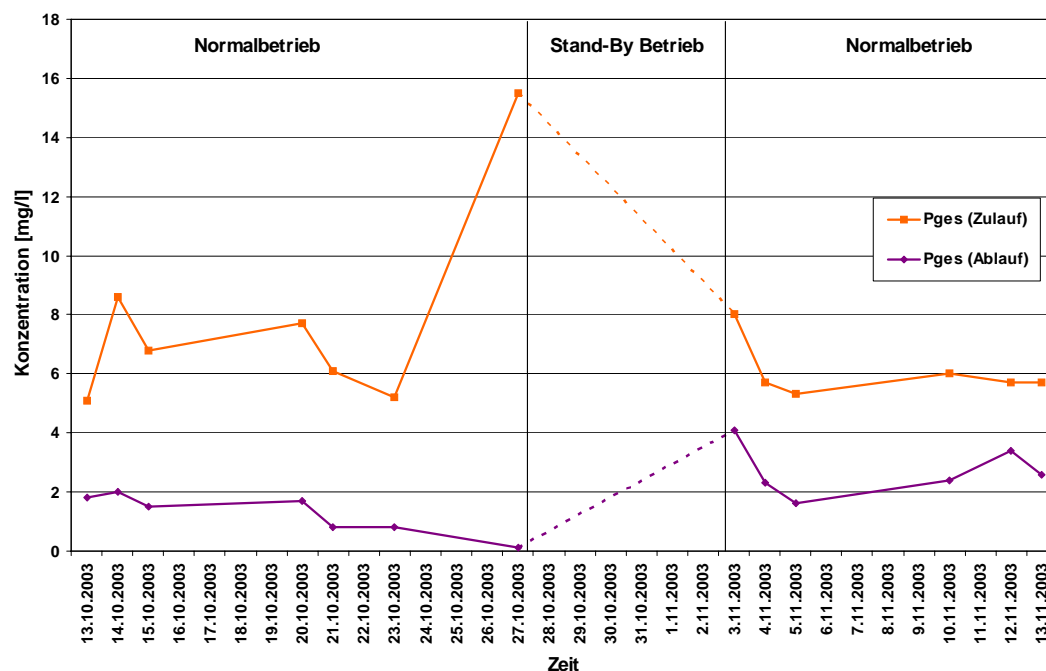
Ein negativer Einfluss auf die Permeabilität der Membrane durch Öle und Fette war nicht festzustellen. Die Ablaufkonzentrationen für Lipophile Stoffe lagen kontinuierlich unterhalb der Messgrenze von 4 mg/l.



**Abbildung 15: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter Öle/Fette der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH**

Die rechnerische mittlere Eliminationsrate für den Eignungstest ergab 81%.

In Abbildung 16 sind die Zu- und Ablaufkonzentrationen des Parameters  $P_{ges}$  über den Zeitraum des Eignungstests dargestellt

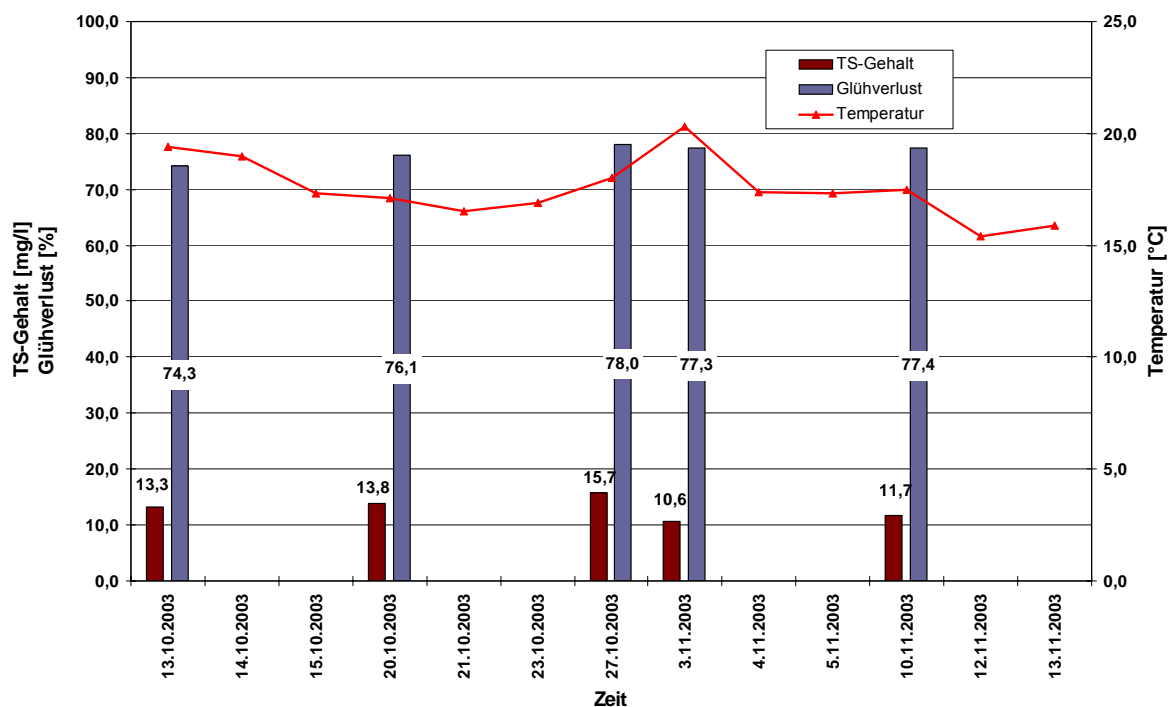


**Abbildung 16: Zu- und Ablaufkonzentrationen des Parameters  $P_{ges}$  der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH**



Die mittlere Eliminationsleistung betrug 73%. Die Ursache der erhöhten Eliminationsleistung beruht vermutlich auf einer vermehrten biologischen Phosphorelimination, genauere Untersuchungen fanden im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht statt. Fällmittel wurden keine eingesetzt.

Der pH-Wert im Zulauf schwankte zwischen 6,9 und 7,8 und lag im Ablauf zwischen 6,3 und 7,7. Die Temperatur im Bioreaktor variierte von 15,4 °C bis 20,3 °C. Der mittlere Zuwachs der Trockensubstanz betrug während der ersten Normalbetriebsphase (bis 27.10.2003) 9%. Vor dem Stand-By Betrieb wurde Überschussschlamm abgezogen und der TS-Gehalt auf 10,6 g/l abgesenkt. Der Trockensubstanzgehalt lag somit in dem vom Anlagenhersteller angegebenen optimalen Bereich. Der organische Anteil betrug im Mittel 77%. In Abbildung 17 sind die Verläufe dargestellt.

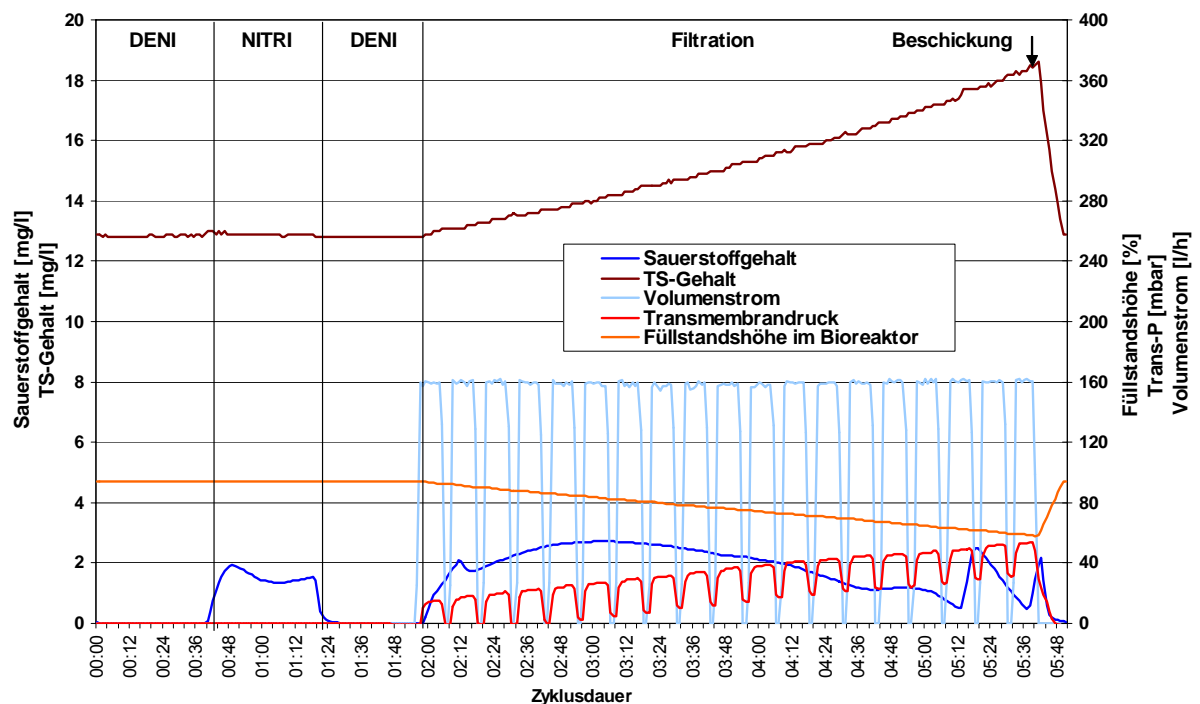


**Abbildung 17: Temperaturverlauf, TS-Gehalte und Glühverlust im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH**

Bei einer mittleren BSB<sub>5</sub>-Belastung von 0,4 kg/d (Schwankungsbreite 0,2 bis 1,2 kg BSB<sub>5</sub>/d) ergab sich damit eine mittlere BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung von 0,02 (kg BSB<sub>5</sub>/kg TS\*d).

Zur Verdeutlichung der Betriebsweise der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH ist in Abbildung 18 beispielhaft für einen Zyklus der Verlauf der Betriebsparameter dargestellt. Zur besseren Übersicht beginnt die Darstellung nicht mit

dem Befüllen der Anlage (SBR-Reaktor) sondern mit der biologischen Reinigung des Abwassers.



**Abbildung 18: Verlauf der Betriebsparameter der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während eines Zyklus**

Ein Zyklus dauerte insgesamt etwa 5 h 50 min, für die biologische Reinigung des Abwassers (Denitrifikation/Nitrifikation) waren 2 Stunden vorgesehen. Der Kompressor zum Sauerstoffeintrag wurde über eine im Bioreaktor eingebaute Sauerstoffmesssonde gesteuert. Während der Nitrifikations- und Filtrationsphasen wurde der Sauerstoffgehalt im Bioreaktor auf den Sollwert 2 mg/l geregelt.

Die Laufzeit der Permeatpumpe wurde über eine Füllstandsmesssonde im Bioreaktor gesteuert und betrug bei einem Austauschvolumen von ~ 450 Liter durchschnittlich 220 Minuten pro Zyklus. Das Verhältnis Filtrations- zu Pausenzeit zwecks Membranentspannung und Deckschichtentfernung lag bei 9 zu 3 Minuten. Die mittlere Brutto-Fluxrate ergab sich damit zu 20 l/(m<sup>2</sup>\*h). Der Anstieg des Transmembrandrucks von 20 auf 50 mbar führte zu einem Absinken der Permeabilität von 1.000 l/(m<sup>2</sup>\*h\*bar) auf 400 l/(m<sup>2</sup>\*h\*bar). Die Zunahme des TS-Gehaltes während der Filtrationsphase resultierte aus einer Aufkonzentrierung der Biomasse durch Permeatabzug.

## 5.3 Martin Systems Engineering GmbH

### 5.3.1 Testverlauf

Die Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH wurde am 20.11.2002 zum Prüffeld des PIA angeliefert, die Inbetriebnahme fand in der darauffolgenden Woche am 29.11.2003 statt.

Nach einwöchiger Einfahrphase musste die Beschickung der Anlage modifiziert werden, da aufgrund der zu hohen Förderleistung der Beschickungspumpe der interne Notüberlauf von der Vorreinigung in den BMA®-Reaktor regelmäßig ansprang und die interne Rezirkulationspumpe aufgrund der mitgeschwemmten Feststoffe blockierte. Das Problem wurde durch eine Bypass-Leitung, die direkt in den Sammeltank zurückführte, gelöst.

Während der Einfahrphase stellte sich schnell heraus, dass die Luftblasenabreinigung zur Reinigung des Siebes (mechanische Vorbehandlung des Rohabwassers) nur unzureichend funktionierte, so dass ein erhöhter Kontroll- und Wartungsaufwand erforderlich wurde (vgl. Kapitel 4.4.3). Zudem zeigten erste Analyseergebnisse, dass die Systemkonfiguration eine zu geringe Denitrifikationsleistung aufwies. Ursache war eine falsch dimensionierte und nicht regelbare Rezirkulationspumpe.

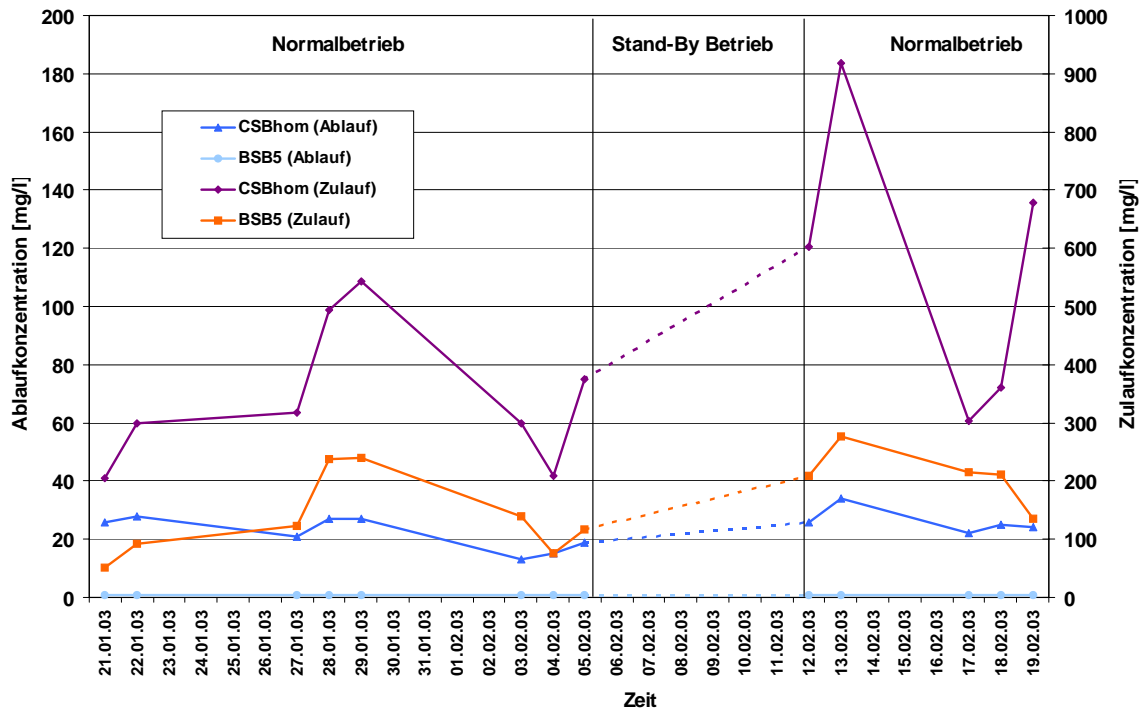
Aufgrund der Tatsache, dass wegen der Probleme mit der Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH aus zeitlichen Gründen nur die Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH für einen Praxistest in der Saison 2003 in Betracht kommen würde, wurde der Beginn des Eignungstests auf den 21.01.2003 festgelegt. Vom Anlagenhersteller wurde zugesagt, dass die aufgetretenen Mängel für den Praxistest behoben werden.

Durch regelmäßige manuelle Abreinigung des Siebes mit Wasser wurde gewährleistet, dass die Anlage während des Eignungstests kontinuierlich mit Rohabwasser beschickt werden konnte.

Wie die Darstellung der Untersuchungen im Folgenden zeigen, erfüllte darüber hinaus die Pilotanlage die gestellten Anforderungen. Der Eignungstest wurde am 19.02.2003 abgeschlossen, der Stand-By Betrieb (Anlagenbetrieb ohne Zulauf) fand zwischen dem 05.02.2003 und dem 12.02.2003 statt.

### 5.3.2 Auswertung der Untersuchungen

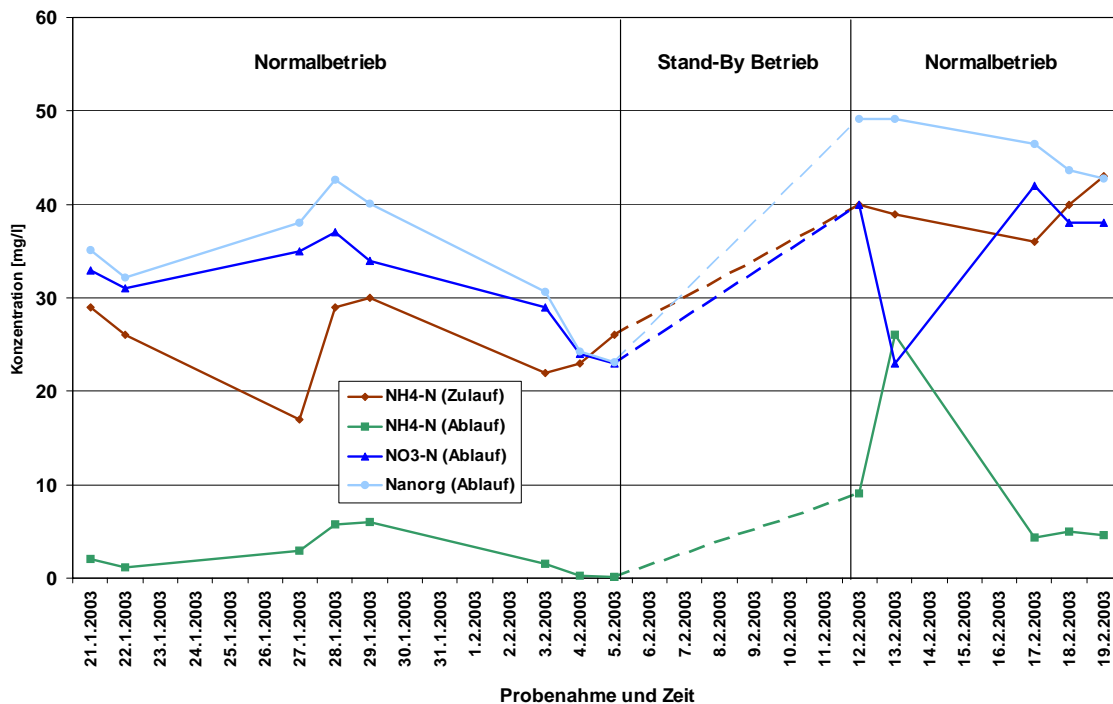
In Abbildung 19 sind die Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> über den Zeitraum des Eignungstests dargestellt.



**Abbildung 19: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH**

Die mittlere CSB-Eliminationsleistung lag bei 94%, für den Parameter BSB<sub>5</sub> ergab sich eine Eliminationsleistung von 99%. Die höchste gemessene CSB-Ablaufkonzentration betrug 34 mg/l und lag damit deutlich unter dem geforderten Ablaufgrenzwert von 60 mg/l. Ein signifikanter Einfluss auf die Eliminationsleistung durch den einwöchigen Stand-By Betriebes war ebenso wenig festzustellen wie durch die erhöhten Zulaufkonzentrationen zu Beginn der zweiten Normalbetriebsphase.

Die Verläufe der gemessenen Stickstoffkonzentrationen sind in Abbildung 20 dargestellt

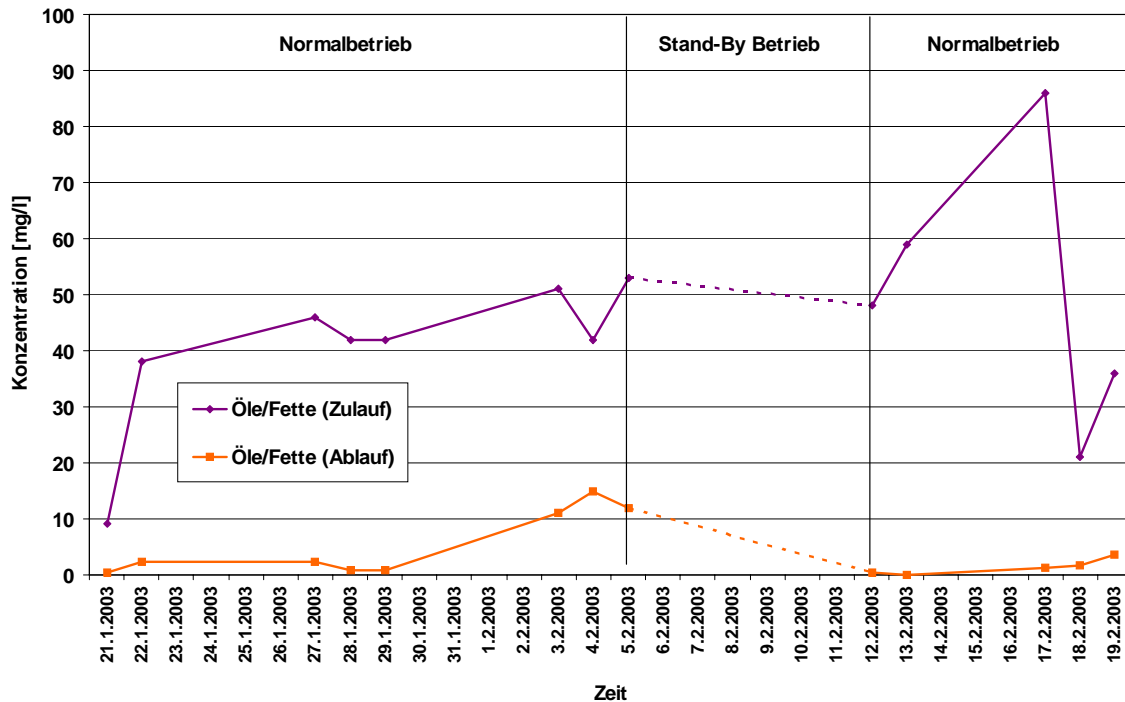


**Abbildung 20: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Stickstoffparameter der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH**

Die Gesamtstickstoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf wurden nicht bestimmt; Auswertungen der Zulaufkonzentrationen von Ammoniumstickstoff und Gesamtstickstoff, die auf dem Prüffeld durchgeführt wurden, ergaben ein Verhältnis von durchschnittlich 1,5:1 ( $N_{\text{ges}}:\text{NH}_4\text{-N}$ ). Die erhöhten  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte zu Beginn der zweiten Normalbetriebsphase waren auf die gestiegenen Zulaufkonzentrationen und auf die Auswirkungen des Stand-By Betriebs zurückzuführen. Nach einer einwöchigen „Hungerphase“ war die verringerte Aktivität der Nitrifikanten deutlich erkennbar, die ursprüngliche Nitrifikationsleistung stellte sich jedoch zum Ende des Eignungstests wieder ein.

Am Kurvenverlauf der Parameter  $\text{NO}_3\text{-N}$  und  $N_{\text{anorg}}$  zeigt sich, dass die Anlage nicht auf Denitrifikationsbetrieb ausgelegt war, der einzuhaltende Grenzwert konnte daher nicht erreicht werden.

Die mittlere Eliminationsleistung für die Parameter Öle und Fette betrug 91%, in Abbildung 21 sind die Kurvenverläufe dargestellt. Ein negativer Einfluss auf die Permeabilität der Membrane war nicht festzustellen.



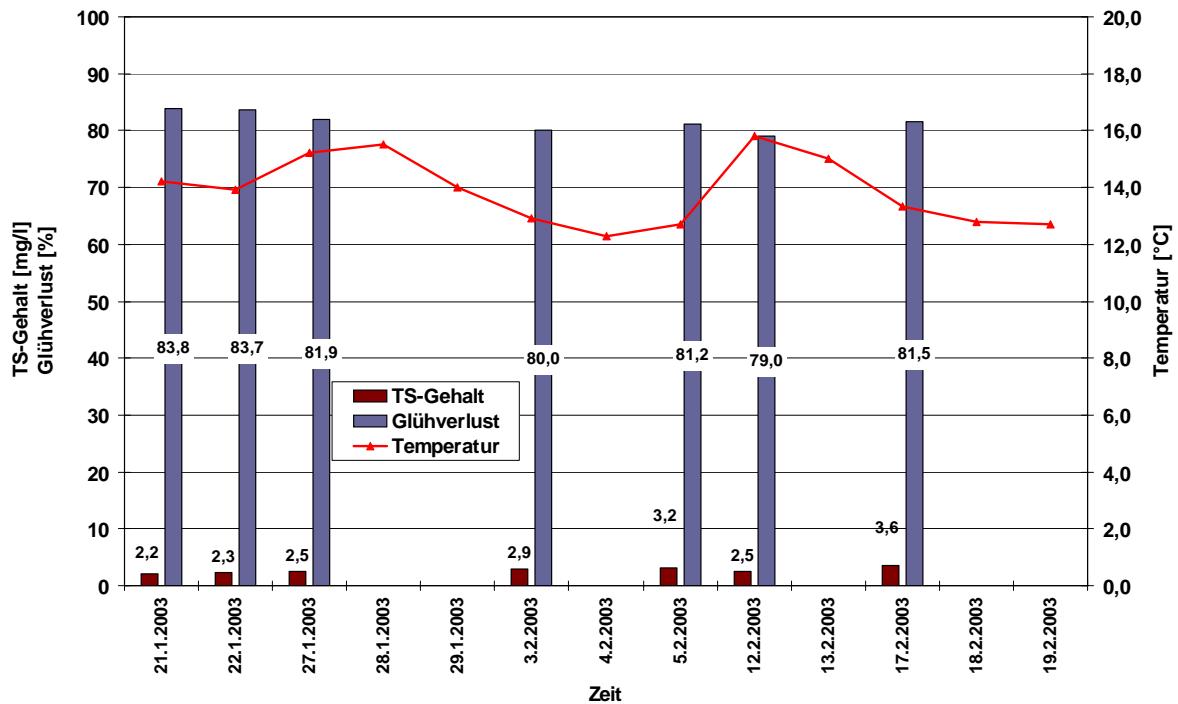
**Abbildung 21: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter Öle und Fette der Firma Martin Systems Engineering GmbH**

E.coli wurden nur nach Beendigung des Stand-By Betriebs am 12.02.2003 und am 17.02.2003 gemessen. Die gemessenen Keimzahlen mit 10/100 ml und 1/100 ml waren vernachlässigbar gering. Zum Ende des Eignungstests konnte wie zuvor wieder ein keimfreier Ablauf bezogen auf E.coli und coliforme Keime festgestellt werden.

Eine Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf ergab durchweg Messungen von <math>< 1 \text{ mg/l}</math>. Der Grenzwert wurde damit eingehalten.

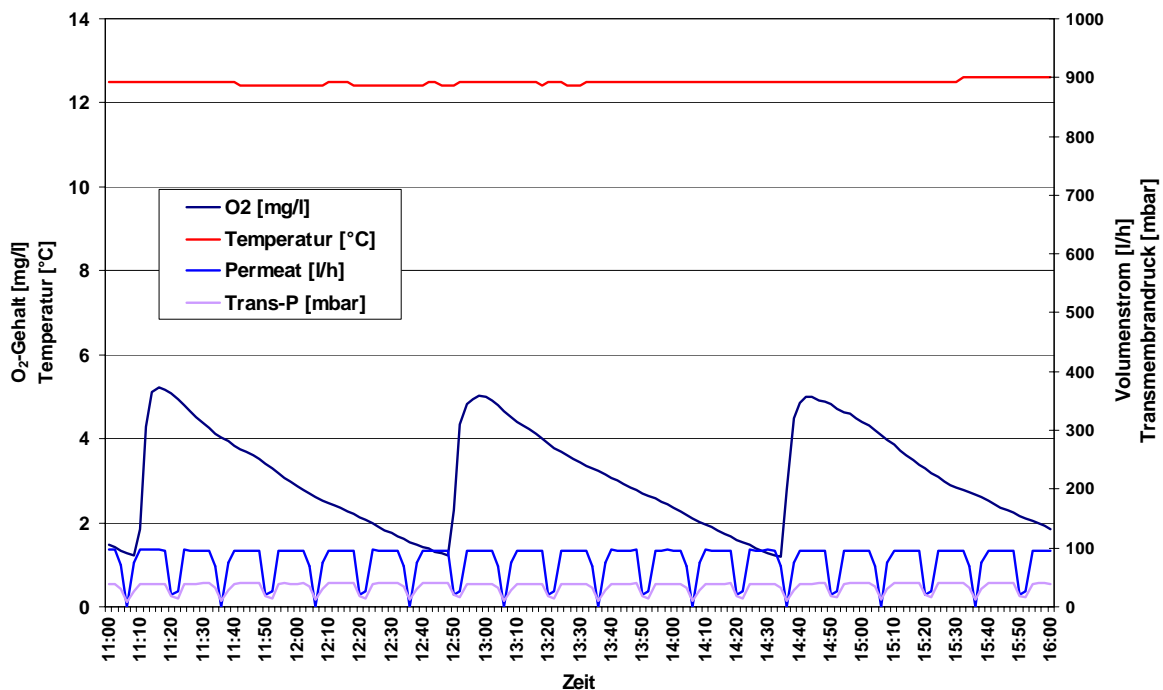
Im Ablauf wurden pH-Werte um 6 gemessen, im Zulauf schwankte der pH-Wert zwischen 7,7 und 8,2. Die Temperatur im Bioreaktor lag konstant über

Bei einer mittleren  $\text{BSB}_5$ -Belastung von \text{BSB}\_5-Schlammbelastung von



**Abbildung 22: Temperaturverlauf, TS-Gehalte und Glühverlust im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH**

In Abbildung 23 ist ein Ausschnitt typischer Kurvenverläufe zur Betriebsweise der Pilotanlage dargestellt.



**Abbildung 23: Verlauf der Betriebsparameter der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH**

Der Permeatabzug erfolgte konstant über den Tag mit intervallweisen Unterbrechungen (4x pro Stunde), so dass pro Stunde die Nettolaufzeit der Permeatpumpe etwa 45 Minuten betrug. Bei einer Auslegung von 1800 l/d (75l/h) ergab sich damit eine Brutto-Fluxrate von etwa 6 l/(m<sup>2</sup>\*h).

Durch die Unterbrechungen erfolgte eine Membranentspannung bzw. Abreinigung der Deckschicht. Der Transmembrandruck betrug durchschnittlich 40 mbar, die Permeabilität lag bei ~158 l/(m<sup>2</sup>\*h\*bar). Zur Reduzierung der Kompressorlaufzeiten für den Sauerstoffeintrag wurde dieser über eine Sauerstoffmesssonde angesteuert. Bei Erreichen einer Sauerstoffkonzentration von 5 mg/l wurde der Kompressor abgeschaltet, nach Unterschreiten von 2 mg/l zuzüglich einer einprogrammierten Zeitverzögerung wieder eingeschaltet.



## 5.4 Puron AG

### 5.4.1 Testverlauf

Die Pilotanlage der Firma Puron AG wurde am 08.04.2003 auf das Prüffeld des PIA angeliefert. Nach Überprüfung der Anlagensteuerung und Animpfung der Anlage mit Belebtschlamm erfolgte die Inbetriebnahme am 29.04.2003.

Während der Einfahrphase musste die Anlagensteuerung neu programmiert, nach drei Wochen die Permeatpumpe ausgebaut und gewartet werden, nachdem die erforderliche Filtrationsleistung nicht mehr erreicht wurde.

Vier Wochen nach der offiziellen Inbetriebnahme konnte die Anlage erneut in Betrieb genommen und am 10.06.2003 mit dem Eignungstest begonnen werden.

Die ersten Analysen zur Keimbelastung zeigten, dass die Anlage nicht den erforderlichen Rückhalt von E.coli und coliformen Keimen erreichte. Der Eignungstest wurde daraufhin am 12.06.2003 abgebrochen und die Anlage außer Betrieb genommen. Eine Untersuchung der Membranen ergab, dass einzelne Membranfasern beschädigt waren. Ursache war eine fehlerhafte Produktionscharge, die in die Pilotanlage eingebaut worden war. Die Membranen wurden daraufhin komplett ausgetauscht.

Am 31.07.2003 wurde die Anlage erneut mit Belebtschlamm angeimpft und in Betrieb genommen. Der zweite geplante Eignungstest verzögerte sich, da auftretender Rost in der Permeatpumpe diese blockierte. Für den Zeitraum der Reparatur der Pumpe, wurde die Anlage im Stand-By Betrieb gefahren.

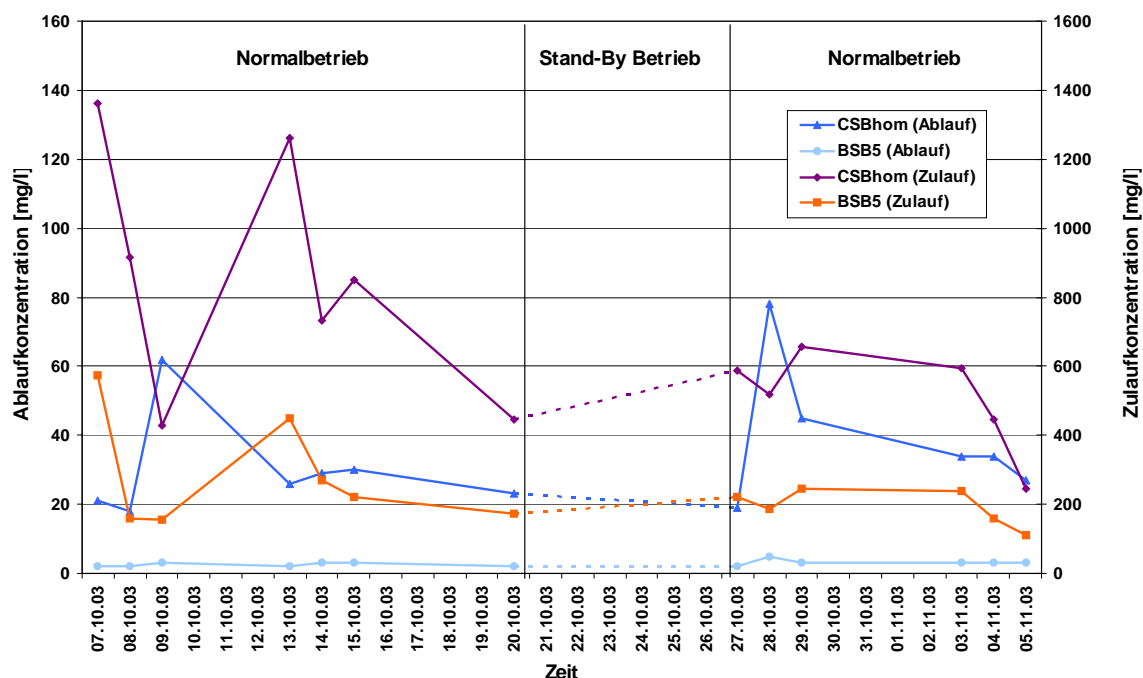
Bevor erneut mit dem Eignungstest am 07.10.2003 begonnen werden konnte, wurden vom Anlagenhersteller sicherheitshalber zur Gewährleistung des Keimrückhaltes die Membranen erneut getauscht und das Permeatsystem gereinigt.

Erste Analysen ergaben, dass wiederholt coliforme Keime im Ablauf vorhanden waren. Es stellte sich heraus, dass diesmal die Ursache nicht an defekten Membranfasern lag, sondern an bereits vorhandenen Keimen im Permeatsammelsystem, die während des Anlagenbetriebs mit defekten Membranen zu Beginn des Anlagentests dorthin gelangt waren. Aufgrund der Tatsache, dass die Membranen regelmäßig mit Permeat aus dem Sammeltank zurückgespült werden mussten, erfolgte keine Ausspülung der Keime.

Durch erneutes Reinigen während des Stand-By Betriebs vom 20.10.2003 bis zum 27.10.2003 wurde versucht, das Permeatsammelsystem zu entkeimen. Aufgrund des Systemaufbaus, das „Totzonen“ (Entlüftungsleitungen) aufwies, in die kein Reinigungsmittel eindringen konnte, musste mit Abschluss des Eignungstest am 05.11.2003 festgestellt werden, dass der Leistungsnachweis von der Firma Puron AG nicht erbracht werden konnte.

#### 5.4.2 Auswertung der Untersuchungen

In Abbildung 24 sind die Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> über den Zeitraum des Eignungstests dargestellt.

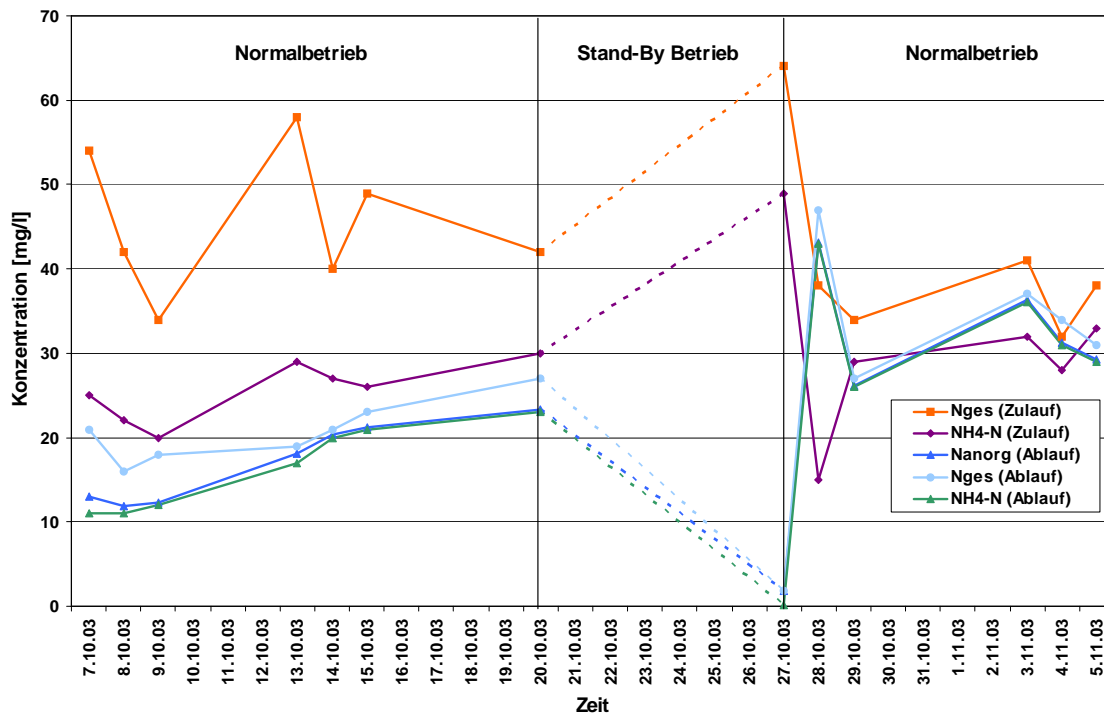


**Abbildung 24: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> der Pilotanlage der Firma Puron AG**

Die mittlere CSB-Eliminationsleistung lag bei 95%, für den Parameter BSB<sub>5</sub> ergab sich eine mittlere Eliminationsleistung von 99%. An zwei Tagen wurde eine Überschreitung des einzuhaltenden CSB-Grenzwertes von 60 mg/l festgestellt. Die erste Überschreitung konnte auf die hohen Zulaufkonzentrationen zu Beginn des Eignungstests zurückgeführt werden. Ursache der zweiten Überschreitung waren die Auswirkungen der einwöchigen „Hungerphase“ durch den Stand-By Betrieb und der dadurch verminderten Aktivität der Mikroorganismen. Nachdem eine erneute Adaption der Mikroorganismen stattgefunden hatte, wurden zum Ende des Eignungs-

tests wieder Ablaufwerte für den Parameter CSB von ca. 30 mg/l gemessen. Die BSB<sub>5</sub>-Ablaufwerte lagen bis auf eine Ausnahme unterhalb der Messwertgrenze von < 2 mg/l bzw. < 3 mg/l.

Die Verläufe der gemessenen Stickstoffkonzentrationen sind in Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 25: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Stickstoffparameter der Pilotanlage der Firma Puron AG**

Wie die Verläufe der Stickstoffparameterkurven im Ablauf deutlich zeigen, war die Nitrifikationsleistung der Anlage über den gesamten Zeitraum des Eignungstests zu gering; der in Nitrat- umgewandelte Ammoniumstickstoff wurde jedoch fast vollständig denitrifiziert. Die Ursache der geringen Nitrifikationsleistung kann wahrscheinlich auf die zwei Reinigungen des Permeatsystems vor und während des Eignungstests zurückgeführt werden. Infolge der verwendeten Reinigungsmittel (Natrium- und Kaliumhydroxid) könnte es zu einer Beeinträchtigung der empfindlichen nitrifizierenden Bakterien gekommen sein. Für den Eignungstest ergab sich eine mittlere Gesamtstickstoffeliminationsrate von 43 %.

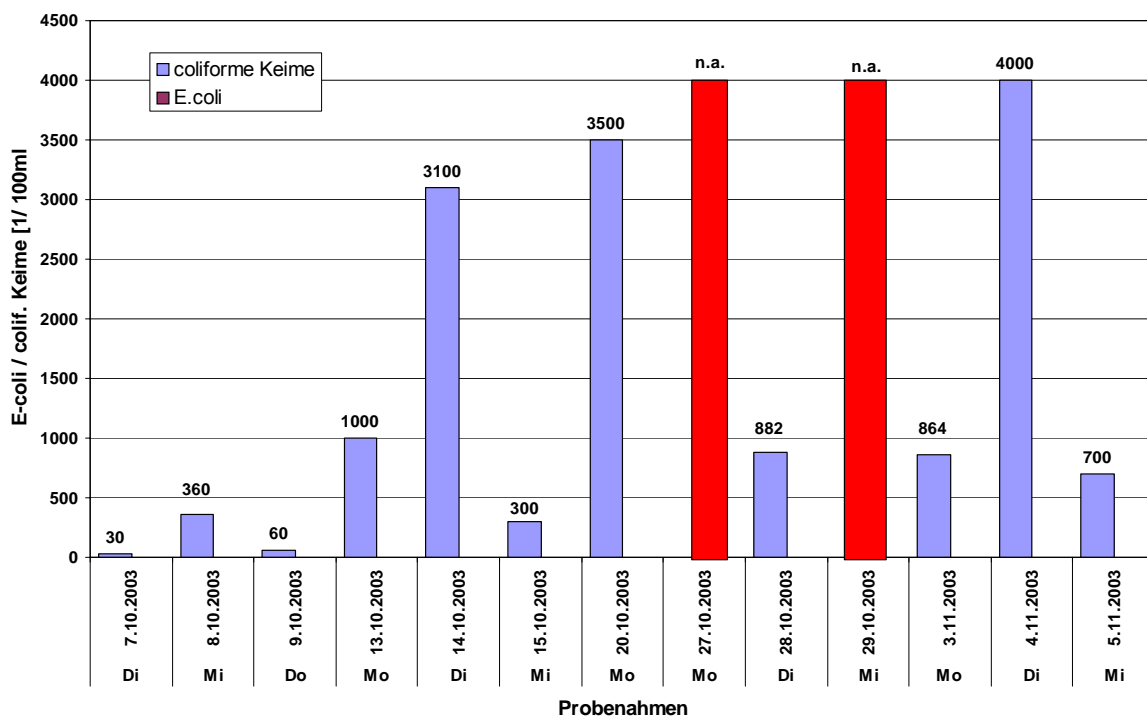
Bei einem stabilen Betrieb ohne ständige Störungen der Biologie durch Reinigungsmaßnahmen konnten deutlich geringere Ablaufkonzentrationen festgestellt werden. Während der Laufzeit vor dem Test wurden Ablaufkonzentrationen für den Parameter

$N_{\text{anorg}}$  von < 10 mg/l gemessen. In Tabelle 8 sind die Analyseergebnisse für diese Laufzeit dargestellt.

**Tabelle 8: Gemessene Stickstoffkonzentration im Ablauf der Pilotanlage der Firma Puron AG vor dem Eignungstest**

| Stickstoffparameter | Mittelwert               | MIN    | Max    |
|---------------------|--------------------------|--------|--------|
|                     | [mg/l]                   | [mg/l] | [mg/l] |
| NH <sub>4</sub> -N  | 1,8                      | < 0,2  | 7,4    |
| NO <sub>3</sub> -N  | 5,1                      | 0,7    | 12,4   |
| N <sub>anorg</sub>  | 6,5                      | 4,5    | 8,4    |
| Messzeitraum        | 30.4.2003 bis 09.09.2003 |        |        |
| Anzahl Messungen    | 14                       |        |        |

Wie in der Beschreibung des Testverlaufs bereits erwähnt, konnte kein keimfreier Ablauf bezogen auf coliforme Keime festgestellt werden. In Abbildung 26 sind die Analyseergebnisse der Keimbeprobung dargestellt.

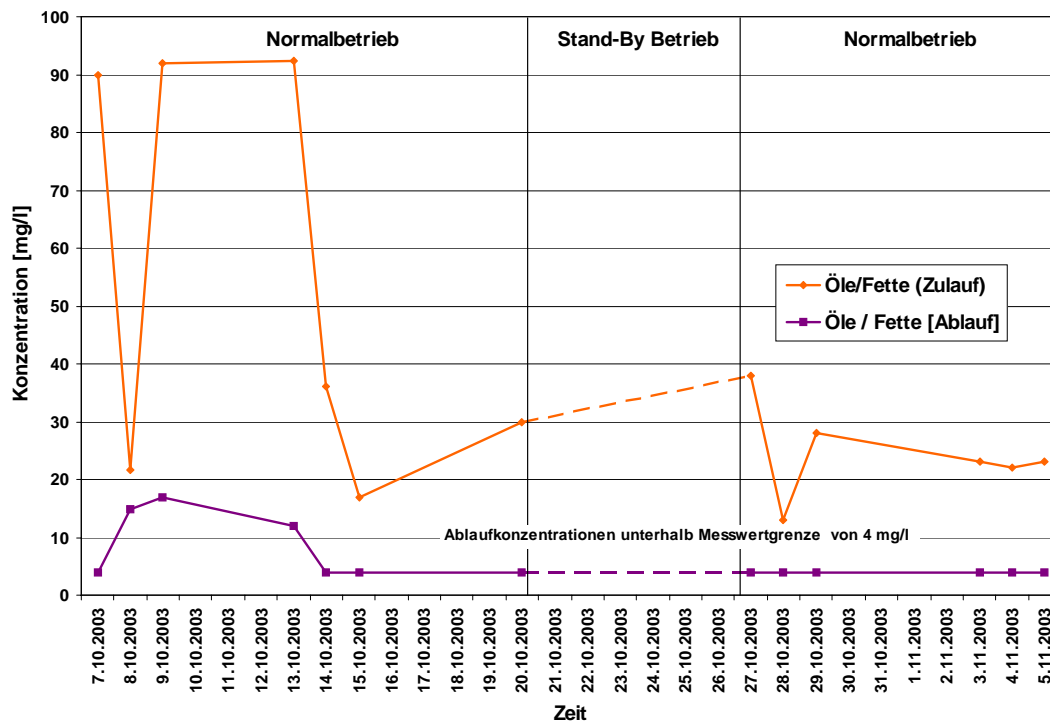


**Abbildung 26: Analyseergebnisse der Keimprobenuntersuchung zur Pilotanlage der Firma Puron AG**

Aufgrund der hohen Keimbelastung war eine Auswertung der Proben vom 27.10.2003 und 29.10.2003 nicht möglich.

Eine Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf ergab durchweg Messungen < 1 mg/l, der Grenzwert konnte damit eingehalten werden.

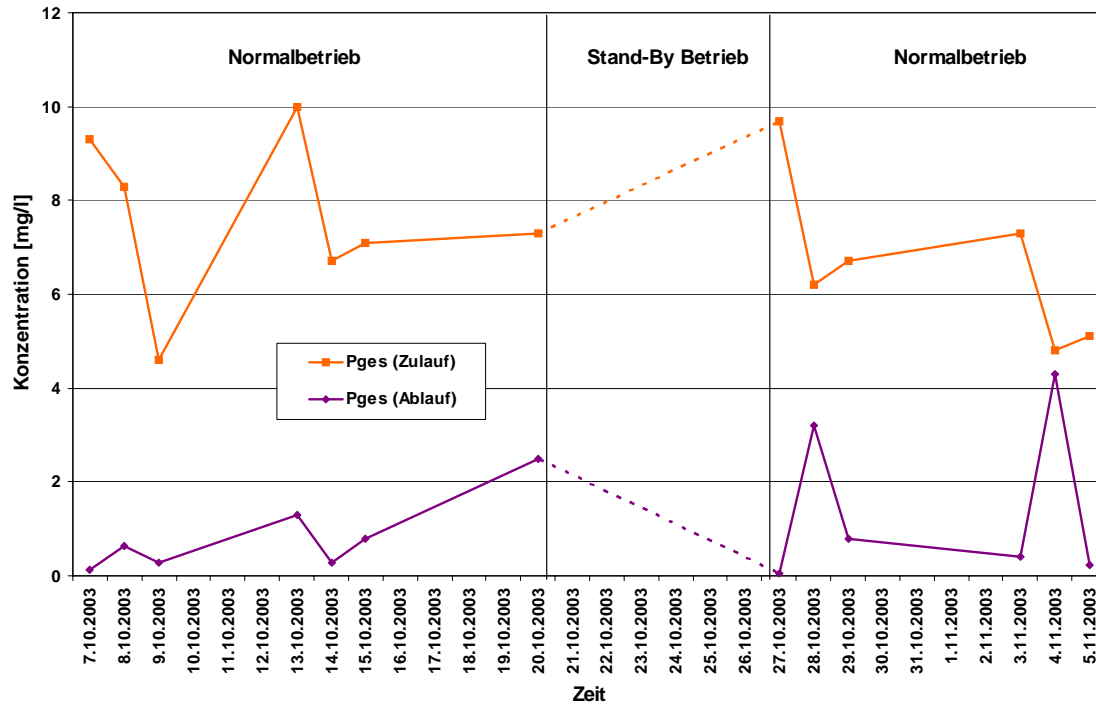
Ein negativer Einfluss auf die Permeabilität der Membrane durch Öle und Fette war nicht festzustellen. Ab der fünften Probenahme lagen die Ablaufkonzentrationen für Lipophile Stoffe konstant unterhalb der Messwertgrenze von 4 mg/l.



**Abbildung 27: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter Öle/Fette der Pilotanlage der Firma Puron AG**

Die rechnerische mittlere Eliminationsrate für den Eignungstest ergab sich zu 84%.

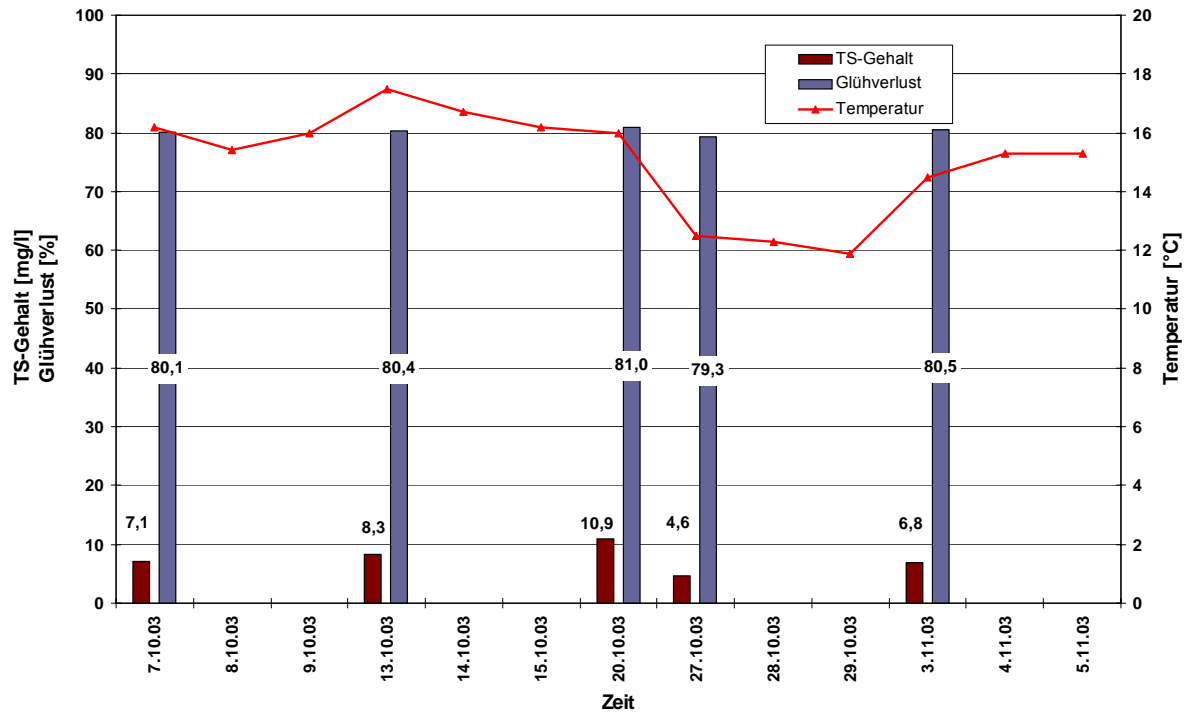
In Abbildung 28 sind die Zu- und Ablaufkonzentrationen des Parameters  $P_{ges}$  über den Zeitraum des Eignungstests dargestellt.



**Abbildung 28: Zu- und Ablaufkonzentrationen des Parameters  $P_{ges}$  der Pilotanlage der Firma Puron AG**

Die mittlere Eliminationsleistung betrug 84%. Die Ursache der hohen Eliminationsleistung lag wahrscheinlich in einer vermehrten biologischen Phosphorelimination. Genauere Untersuchungen fanden hierzu im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht statt, Fällmittel wurden keine eingesetzt.

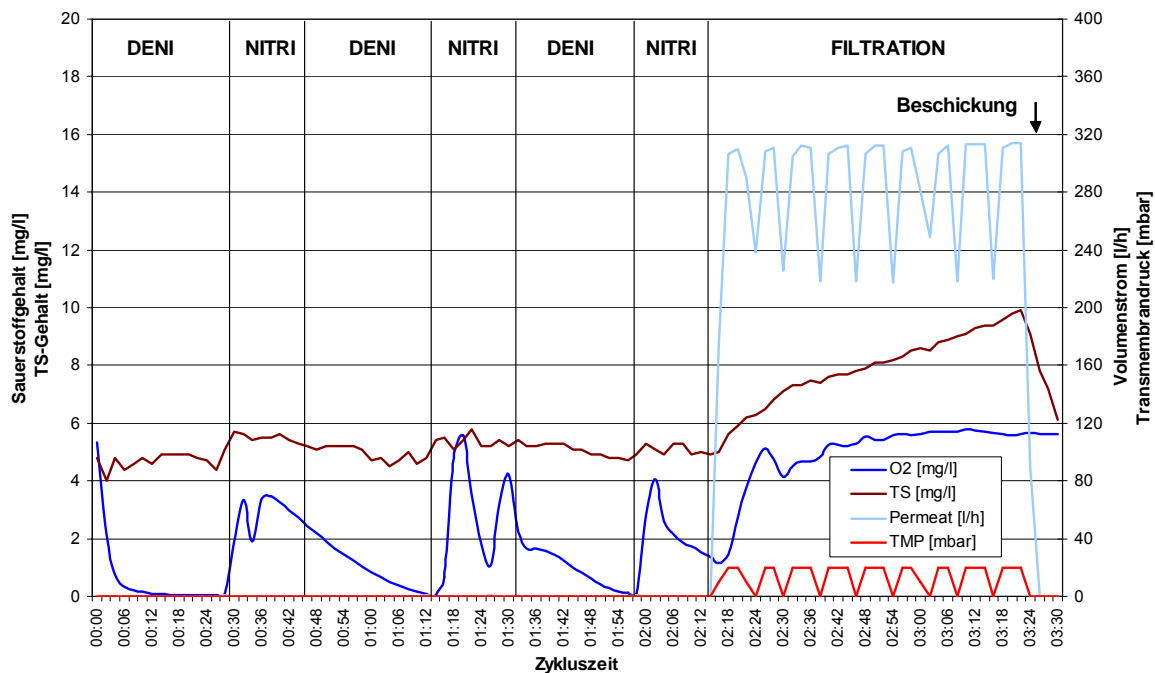
Im Ablauf wurden pH-Werte zwischen 7,2 und 8,0 gemessen, im Zulauf schwankte der pH-Wert zwischen 7,7 und 8,2. Die Temperatur im Bioreaktor variierte von 12 °C bis 18 °C, der mittlere Zuwachs der Trockensubstanz betrug während der ersten Normalbetriebsphase (bis 24.10.2003) 24%. Während des Stand-By Betriebs wurde im Zuge der Reinigungsarbeiten von der Firma Puron AG der TS-Gehalt auf 4,6 g/l gesenkt.



**Abbildung 29: Temperaturverlauf, TS-Gehalte und Glühverlust im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Puron AG**

Bei einer mittleren BSB<sub>5</sub>-Belastung von 0,4 kg/d (Schwankungsbreite 0,2 bis 1,0 kg BSB<sub>5</sub>/d) ergab sich damit eine mittlere BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung von 0,04 (kg BSB<sub>5</sub>/kg TS\*d).

Zur Verdeutlichung der Betriebsweise der Pilotanlage ist in Abbildung 30 beispielhaft für einen Zyklus der Verlauf der Betriebsparameter dargestellt. Zur besseren Übersicht beginnt die Darstellung nicht mit dem Befüllen der Anlage (SBR-Reaktor) sondern mit der biologischen Reinigung des Abwassers.



**Abbildung 30: Verlauf der Betriebsparameter der Pilotanlage der Firma Puron AG**

Ein Zyklus dauerte insgesamt etwa 3 h 30 min wobei für die biologische Reinigung des Abwassers 2 h 15 min vorgesehen war. Der Kompressor wurde über eine im Bioreaktor eingebaute Sauerstoffmesssonde gesteuert, während der Nitrifikationsphasen wurde der Sauerstoffgehalt im Bioreaktor auf den Sollwertbereich 1,5 - 2,5 mg/l geregelt.

Die Dauer der Filtrationsphase wurde über eine Füllstandsmesssonde im Bioreaktor gesteuert und betrug im Mittel etwa 70 Minuten. Bei einer Auslegung der Anlage auf 1800 l/d ergab sich damit ein Austauschvolumen von ~ 260 Liter. Die Nettolaufzeit der Permeatpumpe während der Filtrationsphase betrug 60 Minuten, der Brutto-Flux lag bei rund 13 l/(m<sup>2</sup>\*h). Der Transmembrandruck lag während der Filtrationszeiten konstant bei etwa 20 mbar, woraus sich eine Permeabilität von ~ 650 l/(m<sup>2</sup>\*h\*bar) ergab. Die Zunahme des TS-Gehalts während des Filtrationszyklus resultierte aus dem kontinuierlichen Permeatabzug.



## 6 Darstellung und Auswertung der Praxistests

### 6.1 Gegebenheiten an Bord des Fahrgastschiffs MS Asbach

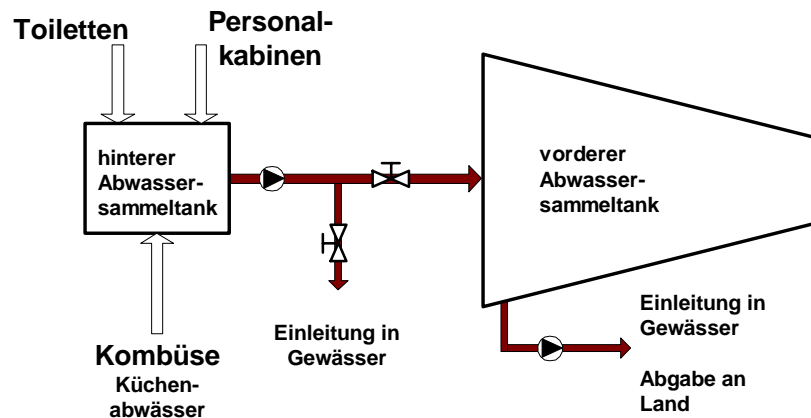
Die MS Asbach der Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG ist ein Fahrgastschiff für den Tagesausflugsverkehr. Sie ist für maximal 600 Passagiere zugelassen, die Passagierzahl liegt in der Regel zwischen 150 bis 400 Passagieren. An Bord ist ein Restaurantbetrieb mit schiffseigener Küche vorhanden, in der die Mahlzeiten täglich zubereitet werden. Das Bordpersonal lebt während der Saison auf dem Schiff und übernachtet in den dort vorhandenen Personalkabinen. Die Personalstärke liegt bei 12 Personen.



**Abbildung 31: Fahrgastschiff MS Asbach**

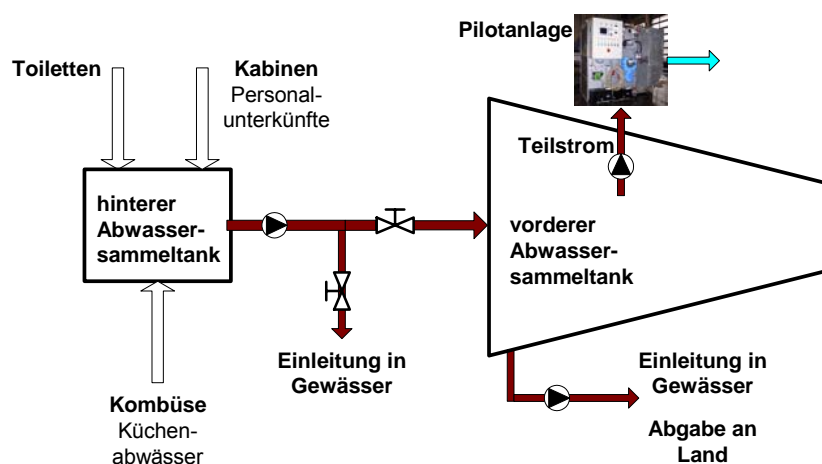
Das 1996 gebaute Schiff ist 68 m lang und 11,40 m breit. Das Fahrgastschiff MS Asbach verfügt bereits über einen Fäkalienstammeltank, der im Bug des Schiffes unterhalb des vorderen Maschinenraumes angeordnet wurde.

Für die Praxistests der Pilotanlagen an Bord konnte als Aufstellplatz ein Teil des vorderen Maschinenraums genutzt werden. Der für die Praxistests zur Verfügung stehende Platz zwecks Aufstellung der Pilotanlagen ist in Abbildung 2 (Kapitel 4) dargestellt. Das Abwasserentsorgungssystem auf dem Fahrgastschiff MS Asbach ist nachfolgend abgebildet.



**Abbildung 32: Abwasserentsorgungssystem an Bord der MS Asbach (vereinfachte Darstellung)**

Das Abwasserentsorgungssystem besteht aus zwei Sammel tanks, die über eine Rohrleitung miteinander verbunden sind. Das anfallende Abwasser aus den Sanitär- und Küchenbereichen fließt dem hinteren kleineren Sammel tank zu und wird dort gespeichert. Die Größe des Tanks beträgt etwa 2 m<sup>3</sup>. Bei Erreichen eines bestimmten Füllstandes wird das Abwasser aus dem Tank gepumpt. Durch Steuerung der Ventile kann das Abwasser direkt nach außenbords bzw. in den vorderen Sammel tank gepumpt werden. Üblicherweise wird beim normalen Betrieb der vordere Sammel tank nicht genutzt. Während des Projekts wurde ein Abwasserteilstrom in den vorderen Abwassersammel tank gepumpt, so dass von dort aus eine Beschickung der Pilotanlage mit Abwasser möglich war. Die Beschickung der Anlage erfolgte dabei über eine in den vorderen Sammel tank installierte Tauchpumpe. Die Verfahrenswei se ist in Abbildung 33 dargestellt.



**Abbildung 33: Abwasserentsorgung an Bord der MS Asbach zur Zeit der Praxistests**

### **Dokumentation des Anlageneinbaus**

Zum Einbau wurden die Pilotanlagen auf dem Prüffeld des PIA demontiert und zum Hafengelände der Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG (KD) in Köln transportiert. Dort wurden die Anlagenteile mit Hilfe eines Autokrans zuerst auf den Pontonkran der KD verladen, anschließend wurden vom Pontonkran aus die Anlagenteile in das Fahrgastschiff eingebracht. Die folgenden Bilder zeigen den Ablauf der Verladung der Anlagenteile im März 2003 der Firma Martin Systems Engineering GmbH in das Schiff. Die Verladung der Anlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH im Februar 2004 verlief identisch.

Bild 1:



Bild 2:



Bild 3:



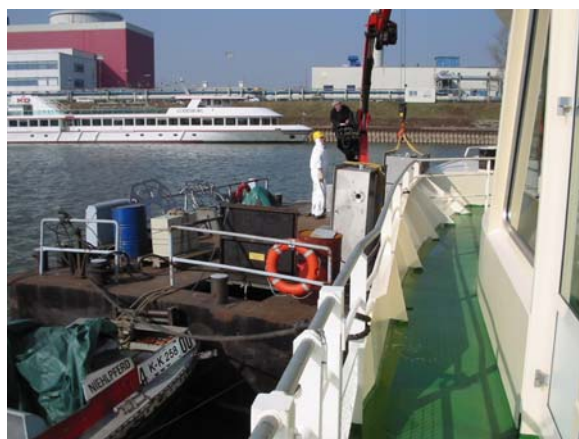
Bild 4:



Bild 5:



Bild 6:



**Abbildung 34: Verladung der Anlagenteile auf den Pontonkran der Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG**



Bild 7:



Bild 8:

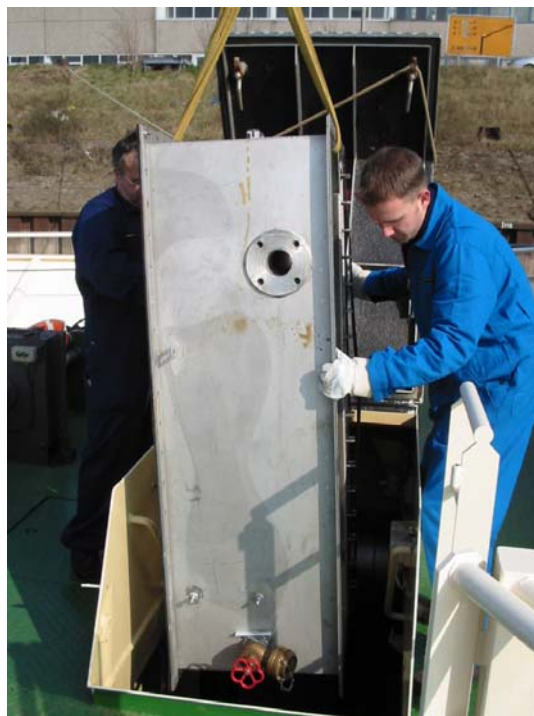


Bild 9:



Bild 10:



**Abbildung 35: Einbringen der Anlagenteile in den vorderen Maschinenraum der MS Asbach über vorhandene Einstiegs Luke**

Die Verladung der gesamten Anlagenteile von Land in den vorderen Maschinenraum dauerte jeweils insgesamt etwa fünf Stunden. Für den Zusammenbau der Anlage und die Herstellung der Anschlüsse inklusive Dichtheitsprüfung benötigten die Firmen drei Tage.

In Abbildung 36 sind die fertigmontierten Anlagen im Maschinenraum dargestellt. Der Durchgang zwischen Anlage und Maschinenraumwand (linker Bildrand) ermöglichte den Zugang von allen Seiten.



Pilotanlage Martin Systems Engineering GmbH



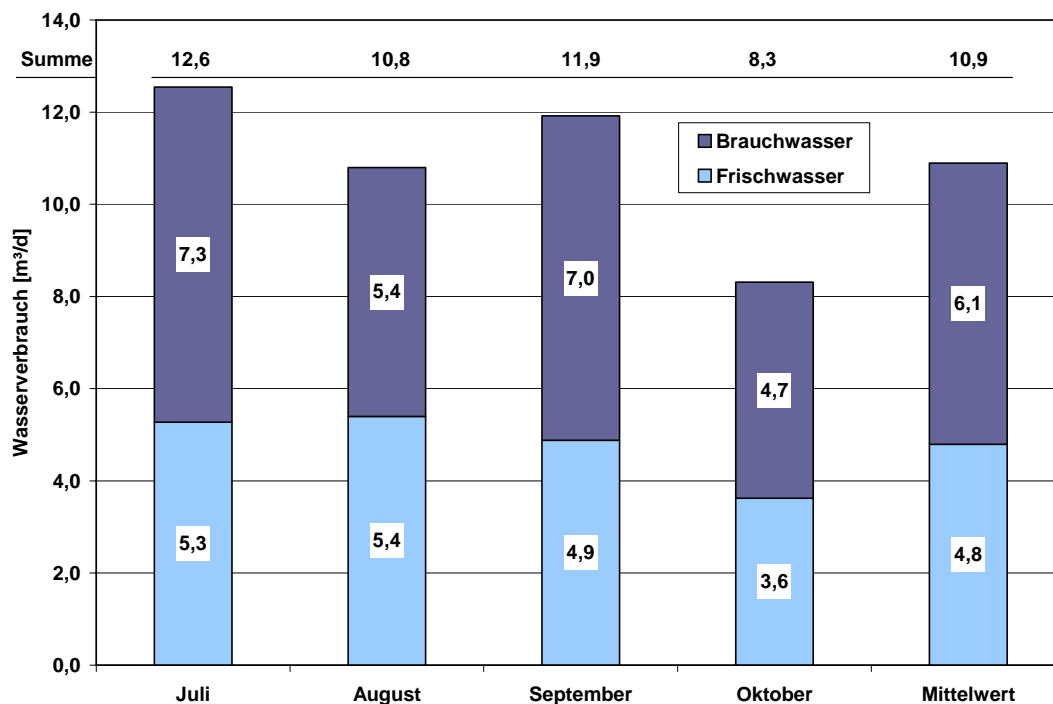
Pilotanlage Earth Tech Umwelttechnik GmbH

**Abbildung 36: Fertigmontierte Pilotanlagen am Aufstellort an Bord der MS Asbach**

### 6.1.1 Wasserverbrauch an Bord der MS Asbach

Der Wasserbedarf an Bord der MS Asbach wird über zwei Wasserversorgungssysteme gedeckt. Zur Toilettenspülung wird Brauchwasser verwendet, das nach Bedarf aus dem Rhein entnommen und über einen Sandfilter filtriert wird. Trinkwasser wird je nach Verbrauch für mehrere Tage an Bord gebunkert.

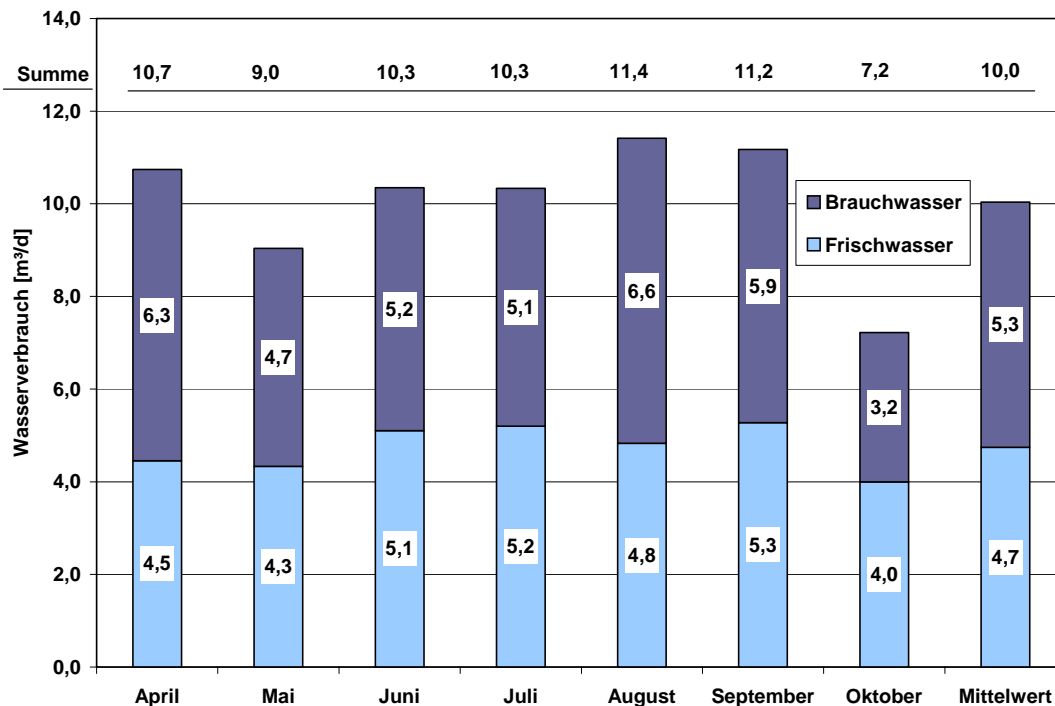
Ab Anfang Juli 2003 wurde nach dem Einbau von Wasseruhren in den Versorgungsleitungen der Wasserverbrauch an Bord der MS Asbach ermittelt. In Abbildung 37 sind die Ergebnisse der Auswertungen als mittlere Wasserverbräuche für die Monate Juli bis Oktober für die Fahrtsaison 2003 dargestellt sowie der sich daraus für den gesamten Untersuchungszeitraum resultierende mittlere Wasserverbrauch.



**Abbildung 37: Mittlere tägliche Wasserverbräuche an Bord der MS Asbach in der Fahrtsaison 2003**

Durchschnittlich ergab sich für den Untersuchungszeitraum im Jahr 2003 ein mittlerer Wasserbedarf von 10,9 m³/d, mit einem Verhältnis Frischwasser zu Brauchwasser von 44% zu 56%.

In Abbildung 38 sind die Auswertungen für die Fahrtsaison 2004 dargestellt.



**Abbildung 38 Mittlere tägliche Wasserverbräuche an Bord der MS Asbach in der Fahrtsaison 2004**

Für den Untersuchungszeitraum im Jahr 2004 ergab sich ein mittlerer Wasserbedarf von 10,0 m<sup>3</sup>/d, mit einem ähnlichem Verhältnis Frischwasser zu Brauchwasser wie in der Fahrtsaison 2003 von 47% zu 53%.

Nach Angaben des Bordpersonals sowie aufgrund von Datenerfassungen während ein- bis zweitägiger Liegezeiten kann der Wasserbedarf des Bordpersonals (12 Personen) mit durchschnittlich 2 m<sup>3</sup>/d angenommen werden.

Der Wasserbedarf der Passagiere ist stark abhängig von deren Aufenthaltsabsicht auf dem Schiff. So muss differenziert werden, ob das Schiff allein als Transportmittel oder eher als Restaurant in Anspruch genommen wird, wobei bei Letzterem der Wasserverbrauch pro Passagier durch einen stärker ausgelasteten Küchenbetrieb zunimmt.

Um einen mittleren Wasserbedarf pro Passagier bestimmen zu können, wurde in den Monaten Juni und Juli 2004 an insgesamt 33 Tagen der Wasserverbrauch und die Zahl der täglich beförderten Passagiere ermittelt und ins Verhältnis gesetzt. In Tabelle 9 ist das Ergebnis der Untersuchungen dargestellt.



**Tabelle 9: Statistische Kenngrößen zum Wasserverbrauch pro Passagier an Bord der MS Asbach in den Monaten Juni und Juli 2004**

| <b>Kenngröße</b>           | <b>Dimension</b> | <b>Wasserverbrauch pro Passagier</b> |
|----------------------------|------------------|--------------------------------------|
| <b>Anzahl Bestimmungen</b> | -                | <b>33</b>                            |
| <b>Minimum</b>             | <b>l/(P)</b>     | <b>9</b>                             |
| <b>Maximum</b>             | <b>l/(P)</b>     | <b>46</b>                            |
| <b>Spannweite</b>          | <b>l/(P)</b>     | <b>37</b>                            |
| <b>Mittelwert</b>          | <b>l/(P)</b>     | <b>20</b>                            |
| <b>Standardabweichung</b>  | <b>l/(P)</b>     | <b>9</b>                             |
| <b>85%-Perzentil</b>       | <b>l/(P)</b>     | <b>29</b>                            |

Der mittlere Wasserverbrauch ergibt sich zu 20 Liter, an den Minimum- (9 l/P) und Maximumwerten (46 l/P) ist aber eine deutliche Schwankungsbreite zu erkennen. 85% der ermittelten Wasserverbräuche liegen unter 29 Liter pro Passagier.

### 6.1.2 Zusammensetzung des Abwasserzulaufs an Bord der MS Asbach

Die Abwasserzusammensetzung an Bord des Fahrgastschiffs MS Asbach war stark vom Küchenbetrieb bzw. von der Auslastung der Küche geprägt, so dass zum Teil hohe Konzentrationsschwankungen im Zulauf zu den Pilotanlagen festgestellt wurden. Biogene Küchenabfälle und Essensreste werden an Bord über einen Mazerator zerkleinert und anschließend dem hinteren Fäkaliensammeltank zugeleitet.

In Tabelle 10 und Tabelle 11 sind Mittelwerte und Schwankungsbreiten der analysierten Parameter für die Jahre 2003 und 2004 dargestellt.

**Tabelle 10: Zusammensetzung des Abwassers im Zulauf zur Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH im Jahr 2003**

| Parameter          |       | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|--------------------|-------|------------|---------|---------|--------------------|
| CSB <sub>hom</sub> | mg/l  | 884        | 456     | 1.810   | 328                |
| CSB <sub>fil</sub> | mg/l  | 529        | 230     | 787     | 226                |
| BSB <sub>5</sub>   | mg/l  | 434        | 213     | 863     | 168                |
| NH <sub>4</sub> -N | mg/l  | 58,7       | 20,0    | 89,0    | 16,9               |
| N <sub>ges</sub>   | mg/l  | 78,6       | 46,0    | 110,0   | 18,9               |
| P <sub>ges</sub>   | mg/l  | 14,7       | 7,5     | 23,0    | 4,8                |
| AFS                | mg/l  | 363        | 147     | 907     | 213                |
| Öle/Fette          | mg/l  | 77,4       | 9,6     | 293,0   | 61,5               |
| pH-Wert            | -     | 7,1        | 6,6     | 8,0     | 0,4                |
| Leitfähigkeit      | µS/cm | 1.716      | 1.142   | 2.060   | 307                |
| Temperatur         | °C    | 18,6       | 10,8    | 27,8    | 4,6                |

Im Jahr 2003 lagen im Zulauf zur Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH die mittleren Konzentrationen unter den erwarteten Konzentrationen aus Tabelle 3. Deutlich höher lagen sie im Zulauf zur Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH, wie Tabelle 11 verdeutlicht.

**Tabelle 11: Zusammensetzung des Abwassers im Zulauf zur Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH im Jahr 2004**

| Parameter          |       | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|--------------------|-------|------------|---------|---------|--------------------|
| CSB <sub>hom</sub> | mg/l  | 1.855      | 352     | 3.564   | 941                |
| CSB <sub>fil</sub> | mg/l  | 601        | 132     | 952     | 209                |
| BSB <sub>5</sub>   | mg/l  | 736        | 82      | 2.098   | 474                |
| NH <sub>4</sub> -N | mg/l  | 77,7       | 18,0    | 111,0   | 24,0               |
| N <sub>ges</sub>   | mg/l  | 112,8      | 47,0    | 164,0   | 29,8               |
| P <sub>ges</sub>   | mg/l  | 27,6       | 13,0    | 48,6    | 9,9                |
| AFS                | mg/l  | 895        | 200     | 1.709   | 453                |
| Öle/Fette          | mg/l  | 88,7       | 18,0    | 159,0   | 44,3               |
| pH-Wert            | -     | 6,9        | 6,4     | 7,3     | 0,3                |
| Leitfähigkeit      | µS/cm | 1.785      | 1.307   | 2.190   | 243                |
| Temperatur         | °C    | 18,4       | 10,4    | 25,4    | 4,5                |

Bei der Bewertung der Abwasserzulaufkonzentrationen an Bord der MS Asbach muss berücksichtigt werden, dass die Bestimmung der Abwasserzusammensetzung stets in der Zulaufleitung zu den Pilotanlagen erfolgte. Die unterschiedlichen Betriebsweisen der Anlagen (Martin Systems-Pilotanlage kontinuierlich beschickt und Earth Tech-Pilotanlage sequentiell beschickt) führten zu unterschiedlichen Verhältnissen im vorgeschalteten Fäkalienspeichertank. Bei beiden Anlagen wurden für die Beschickung Zulaufpumpen verwendet, die für den zu behandelnden täglichen Abwasservolumenstrom zu groß dimensioniert waren, so dass in die Zulaufleitung jeweils ein By-Pass gelegt und ein Großteil des Volumenstromes wieder direkt in den Tank zurückgeleitet wurde.

Da die Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH kontinuierlich beschickt wurde, wurde dadurch gleichzeitig das Abwasser im Vorlagetank stetig umgewälzt, so dass keine Absink- oder Flotationsprozesse stattgefunden haben. Es ist daher davon auszugehen, dass die Abwasserzusammensetzung im Zulauf zur Pilotanlage auch den Abwasserzulaufkonzentrationen an Bord der MS Asbach entsprach.

Aufgrund der sequentiellen Beschickung der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (SBR-Anlage) kam es allerdings zu den oben beschriebenen Absinkprozessen, so dass die Abwässer, die in die Anlage geleitet wurden, höher konzentriert waren als es die eigentlichen Abwasserzulaufkonzentrationen an Bord der MS Asbach sind.

Um beurteilen zu können, wie groß die Unterschiede waren, wurden an insgesamt vier Probenahmetagen zusätzliche Abwasserproben direkt aus dem vorgeschalteten Fäkalientank genommen. Vor der Probenahme wurde anhand der Beschickungspumpe und des By-Pass in der Zulaufleitung das Abwasser im Tank umgewälzt, so dass von einer ausreichenden Vergleichmäßigung ausgegangen werden konnte. In Tabelle 12 ist die Abwasserzusammensetzung im Fäkalientank dargestellt.

**Tabelle 12: Zusammensetzung des Abwassers im Vorlagetank zur Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik im Jahr 2004**

| Parameter          |       | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|--------------------|-------|------------|---------|---------|--------------------|
| CSB <sub>hom</sub> | mg/l  | 1.060      | 704     | 1.276   | 214                |
| CSB <sub>fil</sub> | mg/l  | 680        | 442     | 914     | 168                |
| BSB <sub>5</sub>   | mg/l  | 575        | 282     | 757     | 179                |
| NH <sub>4</sub> -N | mg/l  | 85,8       | 77,0    | 95,0    | 8,8                |
| N <sub>ges</sub>   | mg/l  | 108,5      | 92,0    | 122,0   | 10,8               |
| P <sub>ges</sub>   | mg/l  | 25,2       | 20,5    | 31,2    | 3,9                |
| AFS                | mg/l  | 376        | 235     | 499     | 104                |
| Öle/Fette          | mg/l  | 65,0       | 23,0    | 95,0    | 30,6               |
| pH-Wert            | -     | 6,8        | 6,4     | 7,3     | 0,3                |
| Leitfähigkeit      | µS/cm | 1.738      | 1.446   | 2.020   | 209                |
| Temperatur         | °C    | 20,4       | 15,0    | 25,4    | 3,8                |

Der Einfluss der Absinkprozesse auf die Abwasserzusammensetzung im direkten Zulauf zur Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik zeigt sich deutlich an den Differenzen der AFS- (Zunahme um 138%) und CSB-Konzentrationen (Zunahme um 75%).

Im Vergleich lagen dennoch die Abwasserkonzentrationen im Jahr 2004 über denen aus dem Jahr 2003. Zurückzuführen ist dies in erster Linie auf eine Zunahme des Restaurant- bzw. Küchenbetriebes zum Vorjahr, die nach Aussage des Bordpersonals verzeichnet werden konnte.

Die in Tabelle 3 formulierte erwartete Abwasserzusammensetzung an Bord von Fahrgastschiffen kann für die Kohlenstoffparameter (CSB 1000 mg/l; BSB<sub>5</sub> 600 mg/l) mit den Messungen belegt werden, für den Parameter Stickstoff müssten die Konzentrationsangaben zwischen 10 und 20% nach oben korrigiert werden.

Das mittlere Verhältnis von BSB<sub>5</sub>:N:P lag im Jahr 2003 bei BSB<sub>5</sub>:N:P = 100:18:3,4 und im Jahr 2004 bei BSB<sub>5</sub>:N:P = 100:19:4,3. Es lag damit in beiden Jahren über dem notwendigen Verhältnis von BSB<sub>5</sub>:N:P = 100:5:1 und entspricht dem normalen Verhältnis (BSB<sub>5</sub>:N:P = 100:20:3,3) für kommunales Schmutzwasser [14].

### 6.1.3 Probenahme und Analytik

Die Probenahmen an Bord erfolgten mittels Stichproben. Die Analytik gemäß DIN-Vorgaben erfolgte in Aachen im Labor des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen. Die Beprobungen des Zu- und Ablaufs erfolgten während der Vor-Ort-Kontrollen des Anlagenbetriebs an Bord der MS Asbach. Vorgabe zu den Kontrollen war, den allgemeinen Bordbetrieb nicht negativ zu beeinträchtigen, wie beispielsweise durch Geruchsbelastungen, die durch das Öffnen des Fäkalienstamm tanks zwecks Probenahme hervorgerufen werden konnten.

Weiter mussten die Vor-Ort-Kontrollen eng mit dem Fahrplan abgestimmt werden. Aufgrund der Tatsache, dass der Einsatzplan des Schiffes zweimal im Monat für 2 Wochen erstellt wurde, waren längerfristige Planungen hinsichtlich der Anlagenkontrolle nicht möglich. Sehr flexibel musste auf kurzfristige Fahrplanänderungen reagiert werden, die zum Teil erst einen Tag vorher bekannt gegeben werden konnten. Dies machte die Planung von Sonderbeprobungen, wie die Beprobung des Ablaufs auf coliforme Keime sehr schwierig.

Einsatzfahrten zwischen Mainz, Rudesheim und Koblenz erschwerten darüber hinaus die Anlagenkontrolle bzw. Probenahmen durch lange Anreisen bzw. lange Proben Transporte. Teilweise musste auf die Deutsche Bahn als Transportmittel für die Rückfahrt zum Einstiegspunkt zurückgegriffen werden.

## **6.2 Auswertung des Praxistests der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH**

### **6.2.1 Testverlauf**

Nach Abschluss des Eignungstests wurde die Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH ab Montag, 17.03.2003 in das Fahrgastschiff MS Asbach eingebaut. Am Donnerstag, 20.03.2003 wurde der Einbau mit der Dichtheitsprüfung abgeschlossen. Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte am 26.03.2003. Die Pilotanlage wurde mit etwa 100 Liter Belebtschlamm ( $\sim 1/12$  des Reaktorvolumens) angeimpft.

Die Einfahrphase musste aufgrund einer Störung um etwa 2 Wochen auf den 08.04.2003 verschoben werden. Ursache war eine Verkanntung des Schwimmers des Durchflussanzeigers im Rezirkulationsstrom, so dass ein ordnungsgemäßer Betrieb nicht möglich war.

Der Normalbetrieb begann am 24.04.2003. Infolge verstärkter Geruchsprobleme, die vom vorderen Fäkaliensammeltank ausgingen, musste dieser während der heißen Sommermonate außer Betrieb genommen werden. Eine Beschickung der Pilotanlage mit Abwasser war für diesen Zeitraum nicht mehr möglich. Die für den September geplante Projektphase „Simulation einer längeren Liegezeit des Fahrgastschiffes“ wurde vorgezogen und in diesen Zeitraum gelegt. Der sogenannte Stand-By Betrieb der Pilotanlage, bei dem die Anlage selbst in Betrieb bleibt und nur der Zulauf zur Anlage gestoppt wird, begann am 02.06.2003 und endete am 14.07.2003.

Während der erneuten Einfahrphase der Pilotanlage wurde ein Defekt an den Membranen festgestellt, so dass am 22.07.2003 die Membranen vollständig ausgetauscht wurden.

Bis zum 02.10.2003 wurde die Pilotanlage durchgehend im Normalbetrieb gefahren und mit einem täglichen Abwasservolumenstrom von etwa  $1,8 \text{ m}^3$  beschickt.

Am 02.10.2003 führte eine manuelle Fehlbedienung zur Beschädigung des Frequenzumwandlers der Rezirkulationspumpe und damit zum Ausfall dieser Pumpe bzw. zu einem weiteren Stillstand der Anlage. Der beschädigte Frequenzumwandler der Pumpe wurde am 10.10.2003 ausgewechselt, in der darauf folgenden Woche stellte sich heraus, dass auch die Elektrik der Rezirkulationspumpe beschädigt worden war. Auf eine Ersatzteilbeschaffung musste verzichtet werden, da eine Lieferung erst nach Ende der Fahrtsaison (27.10.2003) erfolgt wäre.

Tabelle 13 gibt eine kurze Übersicht über den Verlauf des Praxistests wieder.

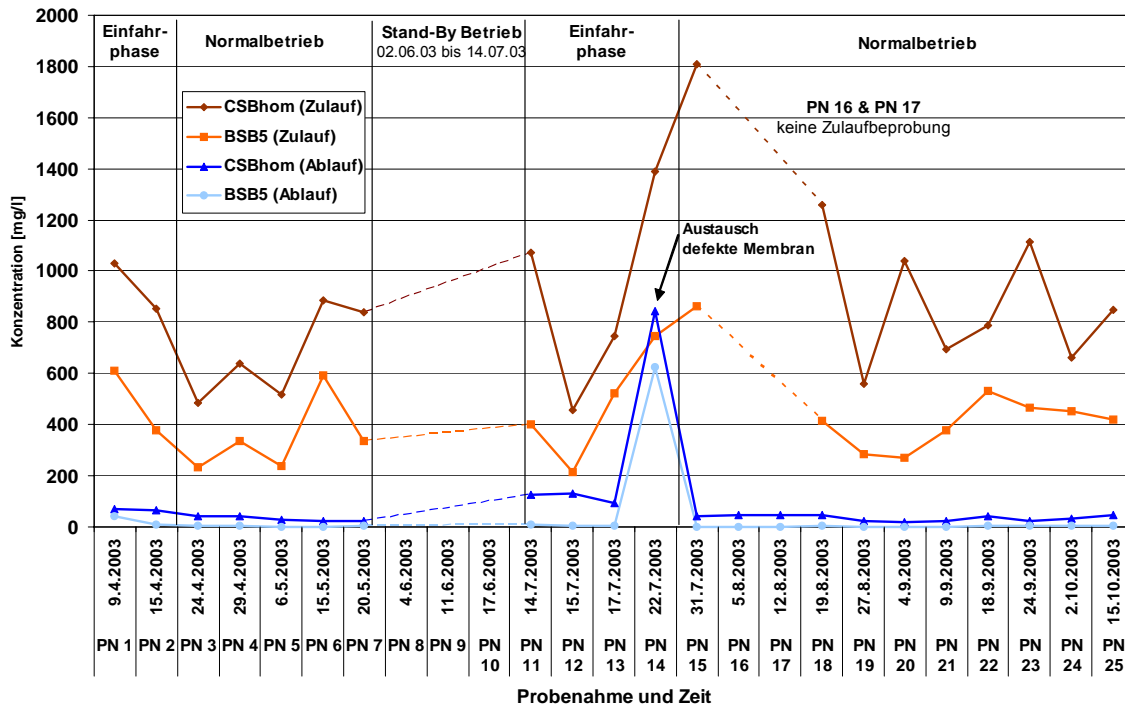
**Tabelle 13: Verlauf des Praxistests**

| Datum<br>von bis |            | Projektverlauf   |
|------------------|------------|--|
| 17.03.2003       | 20.03.2003 | Einbau der Pilotanlage der Firma Martin System AG in Fahrgastschiff MS Asbach  |
| 26.03.2003       |            | Inbetriebnahme der Pilotanlage   |
| 08.04.2003       | 24.04.2003 | Einfahrphase; $Q_d = 1,8 \text{ m}^3/\text{d}$   |
| 24.04.2003       | 02.06.2003 | Normalbetrieb; $Q_d = 1,8 \text{ m}^3/\text{d}$  |
| 02.06.2003       | 14.07.2003 | Stand-By Betrieb;<br>Anlage ist in Betrieb, wird jedoch nicht mit Abwasser beschickt. Simulation einer längeren Liegezeit des Fahrgastschiffs. |
| 14.07.2003       | 22.07.2003 | erneute Einfahrphase   |
| 22.07.2003       |            | Austausch defekter Membranen   |
| 22.07.2003       | 02.10.2003 | Normalbetrieb; $Q_d = 1,8 \text{ m}^3/\text{d}$  |
| 02.10.2003       |            | Ausfall Rezirkulationspumpe, Ende der Versuche   |
| 27.10.2003       |            | Ende Saison  |

## 6.2.2 Darstellung und Auswertung der erfolgten Untersuchungen

Die erste Probenahme fand einen Tag nach Beginn der Einfahrphase am 09.04.2003 statt. Insgesamt fanden 25 Probenahmen zur Untersuchung der Betriebs-, Zu- und Ablaufwerte statt.

In Abbildung 39 sind die Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> über den Zeitraum des Praxistests dargestellt.



**Abbildung 39: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003)**

Die mittlere CSB-Eliminationsleistung lag während des Normalbetriebes bei 96%, über den gesamten Zeitraum bei 94%. Für den Parameter BSB<sub>5</sub> lag die mittlere Eliminationsleistung für den Normalbetrieb wie für die gesamte Betriebsdauer bei 99%.

Bei der Beurteilung des Einflusses des sechswöchigen Anlagenbetriebs ohne Beschickung (Stand-By Betrieb) auf die Leistung der Kohlenstoffelimination muss berücksichtigt werden, dass die erhöhten Ablaufkonzentrationen zu einem gewissen Teil auf die fehlerhafte Filtrationsleistung der defekten Membranen zurückzuführen sind. Während zum Ende der ersten Normalbetriebsphase CSB<sub>hom</sub>-Ablaufwerte um die 20 mg/l gemessen wurden, lagen die Ablaufkonzentrationen in der erneuten Einfahrphase anfangs über 100 mg/l. Für den filtrierten CSB, der der Reinigungsleistung



einer intakten Membranstufe entspricht, wurden Ablaufkonzentrationen zwischen 40 und 65 mg/l bestimmt. In Tabelle 14 sind für diesen Zeitraum die Parameter  $CSB_{\text{hom}}$  und  $CSB_{\text{fil}}$  gegenübergestellt.

**Tabelle 14: Gemessene  $CSB_{\text{hom}}$  und  $CSB_{\text{fil}}$ -Konzentrationen im Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während der erneuten Einfahrphase**

| PN-Datum           |        | PN 11<br>14.07.2003 | PN 12<br>15.07.2003 | PN 13<br>17.07.2003 |
|--------------------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $CSB_{\text{hom}}$ | [mg/l] | 126                 | 130                 | 91                  |
| $CSB_{\text{fil}}$ | [mg/l] | 65                  | 60                  | 40                  |

Insgesamt hatte sich damit der Stand-By Betrieb nur geringfügig auf die Kohlenstoffelimination ausgewirkt.

Die Probenahme unmittelbar nach dem Austausch der Membranen bleibt hierbei unberücksichtigt, da der Zeitraum zwischen erneutem Beschicken der Anlage mit Abwasser und Probenahme mit etwa einer halben Stunde zu kurz für einen vollständigen biologischen Abbau der Inhaltsstoffe war.

Wie in Tabelle 15 dargestellt, ergibt sich für den Normalbetrieb eine mittlere  $CSB$ -Ablaufkonzentration von 33 mg/l und eine mittlere  $BSB_5$ -Ablaufkonzentration von 2 mg/l.

**Tabelle 15: Mittlere CSB- und BSB<sub>5</sub> – Zu- und Ablaufkonzentrationen und Schwankungsbreiten während der Normalbetriebsphasen der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003)**

| Parameter                   |      | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|-----------------------------|------|------------|---------|---------|--------------------|
| <b>Zulauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| CSB <sub>hom</sub>          | mg/l | 869        | 484     | 1810    | 354                |
| CSB <sub>fil</sub>          | mg/l | 504        | 230     | 787     | 227                |
| BSB <sub>5</sub>            | mg/l | 415        | 232     | 863     | 168                |
| AFS                         | mg/l | 370        | 189     | 907     | 216                |
| <b>Ablauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| CSB <sub>hom</sub>          | mg/l | 33         | 18      | 47      | 10                 |
| CSB <sub>fil</sub>          | mg/l | 28         | 17      | 42      | 9                  |
| BSB <sub>5</sub>            | mg/l | 2          | < 1     | 3       | 1                  |
| AFS                         | mg/l | 4          | < 1     | 13      | 3                  |
| <b>Eliminationsleistung</b> |      |            |         |         |                    |
| CSB <sub>hom</sub>          | %    | 96,2       | -       | -       | -                  |
| BSB <sub>5</sub>            | %    | 99,4       | -       | -       | -                  |

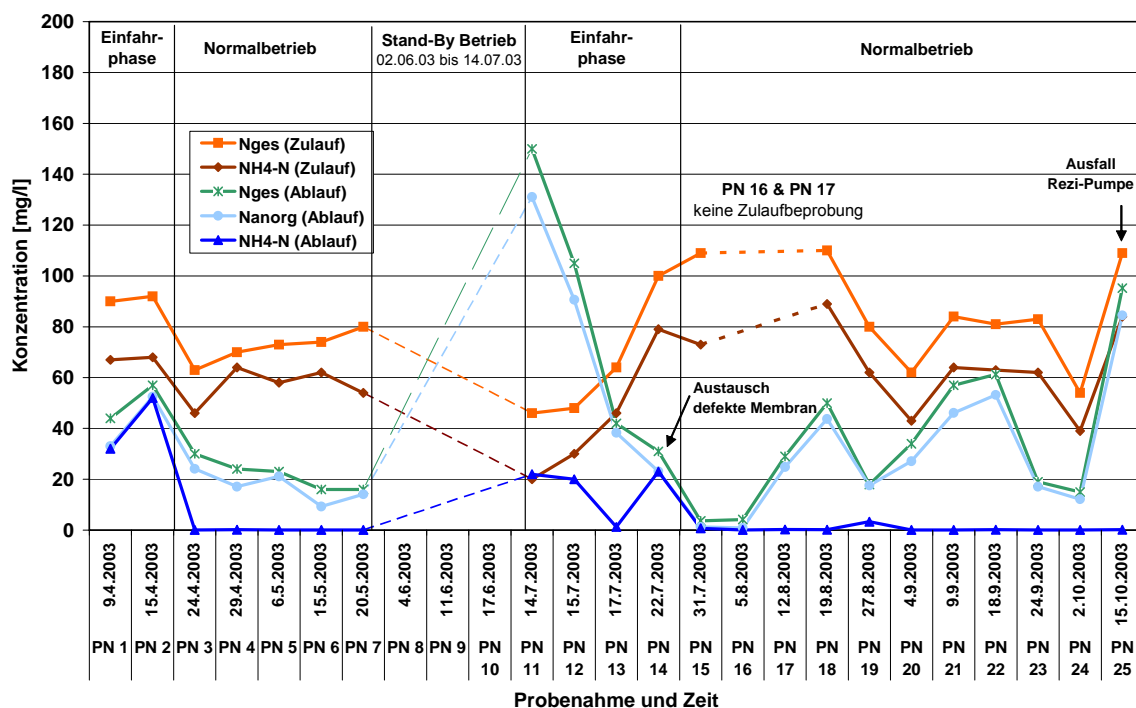
Aussagen zu den gemessenen abfiltrierbaren Stoffen (AFS) können nur bedingt getroffen werden. Das Vorhandensein von abfiltrierbaren Stoffen konnte nicht allein auf eine fehlerhafte Filtratleistung zurückgeführt werden, da insbesondere zum Ende des Praxistests Ablaufkonzentrationen von < 1 mg/l gemessen wurden. Insofern war die Ursache eher in folgenden Punkten zu finden:

- Ablagerungen in der Ablaufleitung. Hervorgerufen durch die Tatsache, dass die Probenahmestelle gleichzeitig als Entlüftungsleitung der Filtratseite dienen musste.
- Messungenauigkeiten aufgrund von Messwerten im Messwertgrenzbereich.

- Fällungs-/ Flockungsprozesse während des Proben transports vom Mittelrhein zum Analytiklabor in Aachen.

Auf eine Auswertung wird daher verzichtet.

Neben der Kohlenstoffelimination war die Pilotanlage auch zur Stickstoffelimination ausgelegt worden. Insbesondere hatte der Hersteller Martin Systems Engineering GmbH nachzuweisen, dass die erbrachten Modifikationen nach Ende des Eignungstests die Pilotanlage in die Lage versetzten, Nitratstickstoff zu denitrifizieren. In Abbildung 40 sind die Analysenergebnisse der Probenahmen für die Stickstoffparameter graphisch dargestellt.

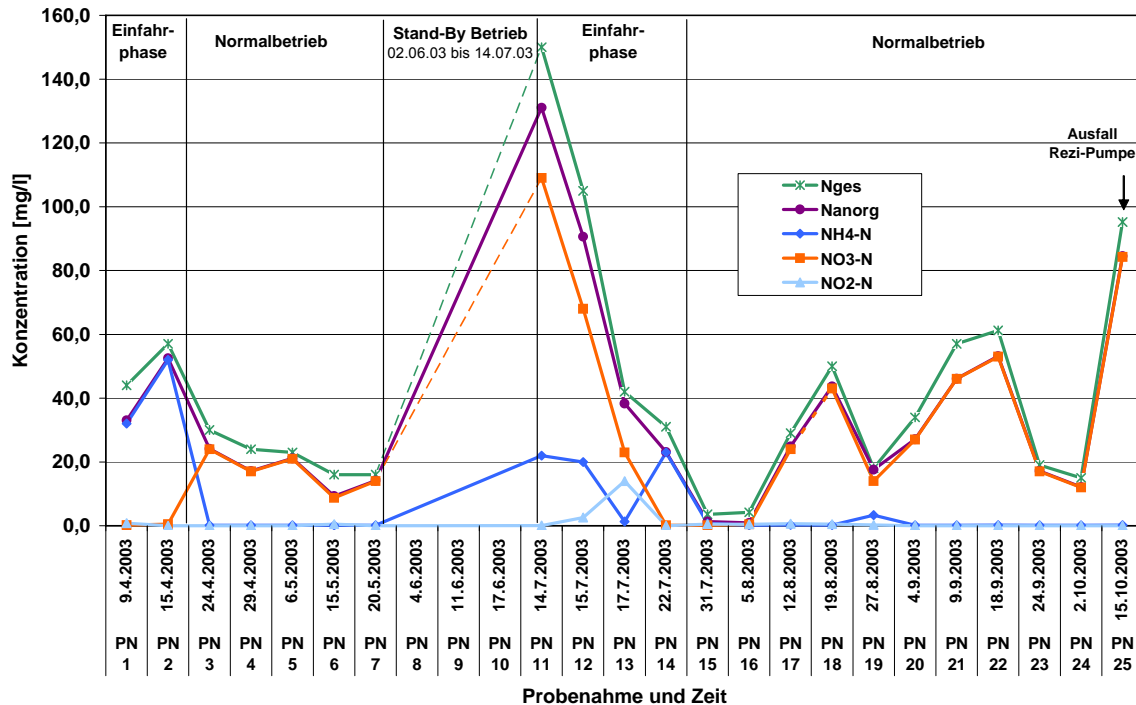


**Abbildung 40: Stickstoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003)**

Nach der Einfahrphase bis zum 24.04.03 sind für den anschließenden Normalbetrieb eine vollständige Nitrifikation und eine ausreichende Denitrifikation festzustellen. Bei den Probenahmen 6 und 7 konnten Ablaufkonzentrationen für Gesamtstickstoff kleiner 18 mg/l festgestellt werden. Die mittlere Eliminationsrate für Gesamtstickstoff betrug während des Normalbetriebes bis zum 02.06.03 69%.

Während des Anlagenbetriebs ohne Beschickung (Stand-By Betrieb) kam es infolge Nährstoffmangels zu einem Absterben der Mikroorganismen und zu einer Zersetzung des Schlamms, in deren Verlauf ein deutlicher Anstieg der Gesamtstickstoffkonzen-

tration beobachtet werden konnte. Aufgrund fehlender Kohlenstoffquellen konnte Nitrat nicht mehr in elementaren Stickstoff umgewandelt werden, wie folgende Abbildung verdeutlicht.



**Abbildung 41: Stickstoffkonzentrationen im Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003)**

Zu Beginn der erneuten Einfahrphase am 14.07.03 (PN 11) wurde eine Nitratstickstoffkonzentration von 109 mg/l gemessen. Zusätzlich führte die erneute Beschickung der Anlage zu erhöhten Ammoniumablaufwerten, da erst wieder eine erneute Adaption der Anlage an die neuen Milieubedingungen erfolgen musste.

Im Laufe der ersten drei Tage der erneuten Einfahrphase nahmen sowohl die Nitrifikations- als auch die Denitrifikationsleistung kontinuierlich zu; die sehr hohe Nitritkonzentration am 17.07.03 (Probenahme 13) zeigte allerdings, dass bei der Nitrifikation die Umwandlung von Ammonium- zu Nitratstickstoff beim Zwischenprodukt Nitrit stehen blieb. Nach vollständiger Adaption der Mikroorganismen wurden anschließend sehr hohe Eliminationsleistungen während den Probenahmen am 31.07.03 (Probenahme 15) und am 05.08.03 (Probenahme 16) ermittelt. Die Ursache für den Peak am 22.07.2003 des  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationsverlaufs ist auf die Probenahme unmittelbar nach dem Austausch der Membranen zurückzuführen.

Hier war der Zeitraum zwischen erneutem Beschicken der Anlage mit Abwasser und Probenahme mit etwa einer halben Stunde zu kurz für eine vollständige Nitrifikation des Ammoniumstickstoffs.

Die Ursache für den schwankenden Konzentrationsverlauf des Parameters  $\text{NO}_3\text{-N}$  im Ablauf (ab PN 17 bis PN 24) konnte in den kontinuierlich hohen Gesamtstickstoff- und Ammoniumkonzentrationen im Zulauf gefunden werden. Mit durchschnittlich 83 mg/l lagen die Gesamtstickstoffkonzentrationen im Zulauf in der zweiten Normalbetriebsphase etwa 15% über der durchschnittlichen Zulaufkonzentration der ersten Normalbetriebsphase (72 mg/l). Die erhöhte Belastung führte zu einer Überlastung der Denitrifikationskapazität. Die Eliminationsrate von Gesamtstickstoff betrug für die zweite Normalbetriebsphase 60%.

Durch den Ausfall der Rezirkulationspumpe ab dem 02.10.2003 konnte kein regulärer Betrieb der Pilotanlage mehr sichergestellt werden, so dass dies zu längeren Stillstandszeiten der Anlage führte. Die Ursachen für die gemessenen Konzentrationen am 15.10.2003 (PN 25) können daher auf die gleichen Gründe wie beim Stand-By Betrieb zurückgeführt werden.

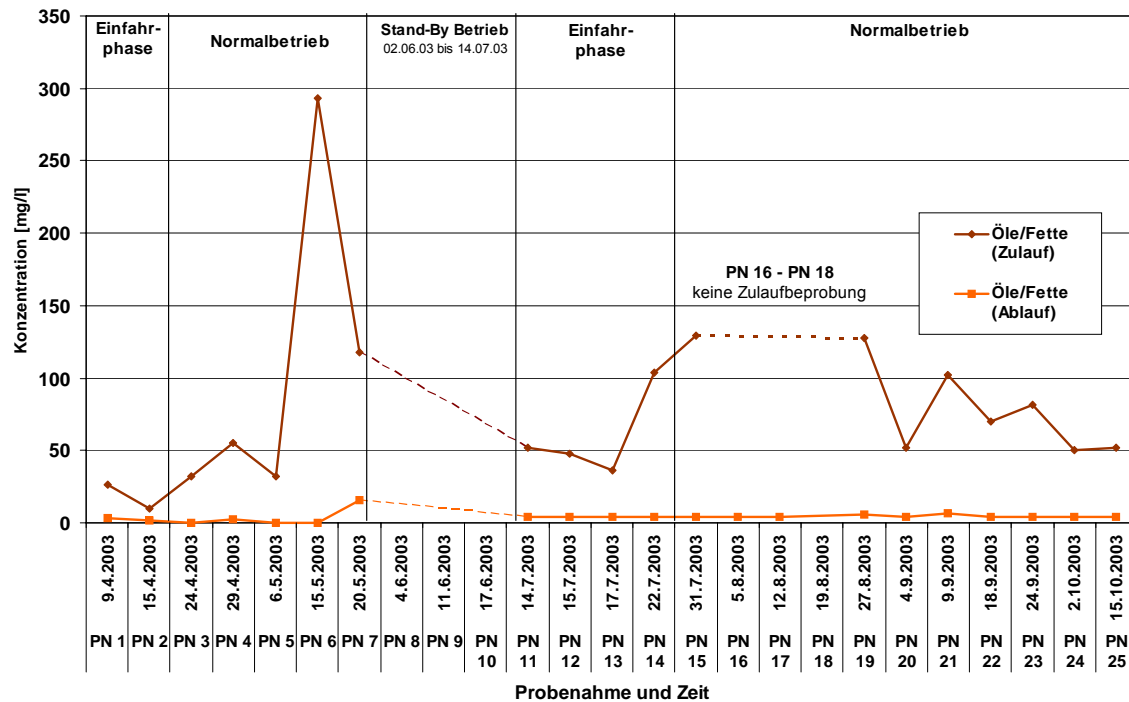
In Tabelle 16 sind abschließend die mittleren Konzentrationen und Schwankungsbreiten der Stickstoffparameter im Zu- und Ablauf während der Normalbetriebsphasen dargestellt.

**Tabelle 16: Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten von Stickstoffparametern im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2003)**

| Parameter                   |             | Mittelwert  | Minimum          | Maximum      | Standardabweichung |
|-----------------------------|-------------|-------------|------------------|--------------|--------------------|
| <b>Zulauf</b>               |             |             |                  |              |                    |
| <b>N<sub>ges</sub></b>      | <b>mg/l</b> | <b>78,7</b> | <b>54,0</b>      | <b>110,0</b> | <b>15,7</b>        |
| <b>NH<sub>4</sub>-N</b>     | <b>mg/l</b> | <b>59,9</b> | <b>39,0</b>      | <b>89,0</b>  | <b>12,5</b>        |
| <b>Ablauf</b>               |             |             |                  |              |                    |
| <b>N<sub>ges</sub></b>      | <b>mg/</b>  | <b>26,7</b> | <b>3,6</b>       | <b>61,2</b>  | <b>16,9</b>        |
| <b>N<sub>anorg</sub></b>    | <b>mg/l</b> | <b>24,4</b> | <b>0,9</b>       | <b>53,2</b>  | <b>16,7</b>        |
| <b>NH<sub>4</sub>-N</b>     | <b>mg/l</b> | <b>0,4</b>  | <b>&lt; 0,1</b>  | <b>3,3</b>   | <b>0,8</b>         |
| <b>NO<sub>3</sub>-N</b>     | <b>mg/l</b> | <b>21,4</b> | <b>0,1</b>       | <b>53,0</b>  | <b>15,1</b>        |
| <b>NO<sub>2</sub>-N</b>     |             | <b>0,2</b>  | <b>&lt; 0,02</b> | <b>0,6</b>   | <b>0,2</b>         |
| <b>Eliminationsleistung</b> |             |             |                  |              |                    |
| <b>N<sub>ges</sub></b>      | <b>%</b>    | <b>66,1</b> | <b>-</b>         | <b>-</b>     | <b>-</b>           |

Die mittlere Eliminationsleistung für den Zeitraum der Normalbetriebsphasen ergab für den Parameter N<sub>ges</sub> 66%.

Ein negativer Einfluss auf die Permeabilität der Membranen durch vorhandene Fette und Öle im Zulauf konnte nicht festgestellt werden. In Abbildung 42 ist der Verlauf der gemessenen Konzentrationen für Lipophile Stoffe dargestellt.



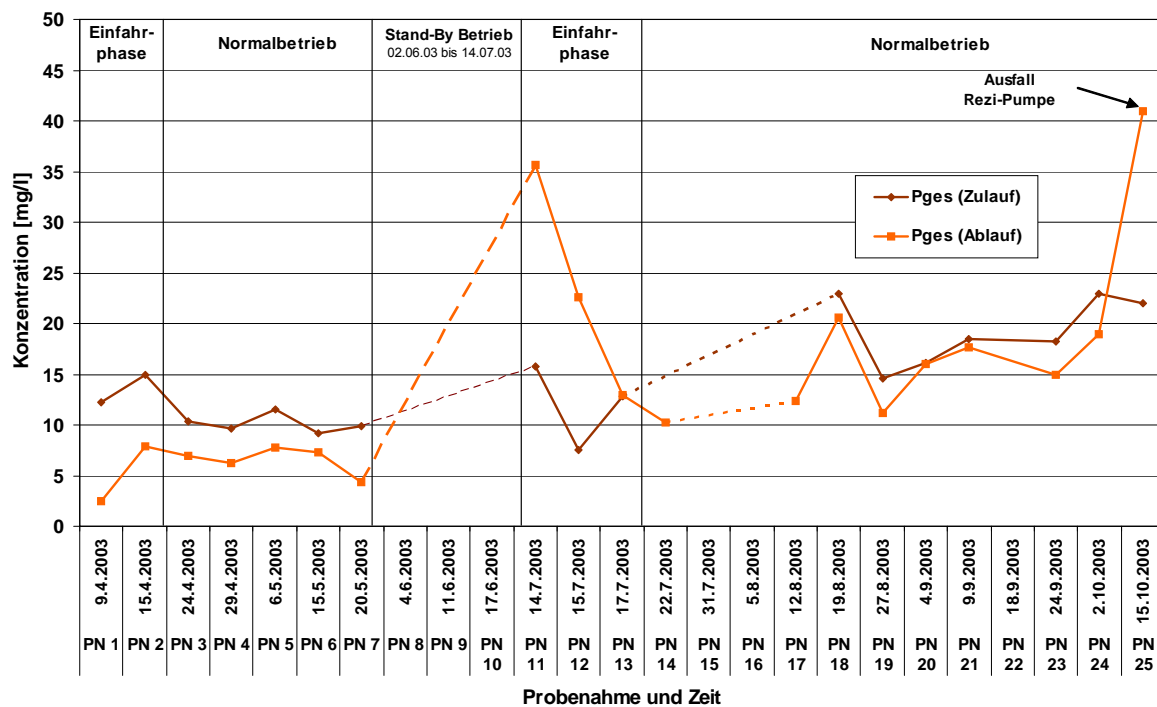
**Abbildung 42: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter Öle/Fette der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003)**

Über den gesamten Zeitraum ergab sich rechnerisch eine mittlere Eliminationsleistung von 97%, für die Normalbetriebsphasen lag sie mit 95,5% nur geringfügig darunter. In Tabelle 17 sind abschließend die mittleren Konzentrationen und Schwankungsbreiten im Zu- und Ablauf während der Normalbetriebsphasen dargestellt.

**Tabelle 17: Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten der Parameter Öle/Fette im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2003)**

| Parameter                   |      | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|-----------------------------|------|------------|---------|---------|--------------------|
| <b>Zulauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| Öle/Fette                   | mg/l | 95,6       | 32,0    | 293,0   | 68,4               |
| <b>Ablauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| Öle/Fette                   | mg/  | 4,3        | 0,2     | 16,0    | 3,8                |
| <b>Eliminationsleistung</b> |      |            |         |         |                    |
| Öle/Fette                   | %    | 95,5       | -       | -       | -                  |

In Abbildung 43 ist der Verlauf der gemessenen  $P_{ges}$ -Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Pilotanlage graphisch dargestellt.



**Abbildung 43: Zu- und Ablaufkonzentrationen des Parameters  $P_{ges}$  der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003)**

Die mittlere Eliminationsleistung für  $P_{ges}$  betrug für beide Normalbetriebsphasen 19%, für die erste Normalbetriebsphase ergab sich eine mittlere Eliminationsleistung von 36%, für die Zweite eine mittlere Eliminationsleistung von 16%. Sehr deutlich sind die Rücklösungsprozesse des inkorporierten Phosphors während der Stillstandszeiten aufgrund einer stetig stattfindenden Schlammzersetzung zu erkennen. In Tabelle 18 sind abschließend die mittleren Konzentrationen und Schwankungsbreiten im Zu- und Ablauf während der Normalbetriebsphasen dargestellt.

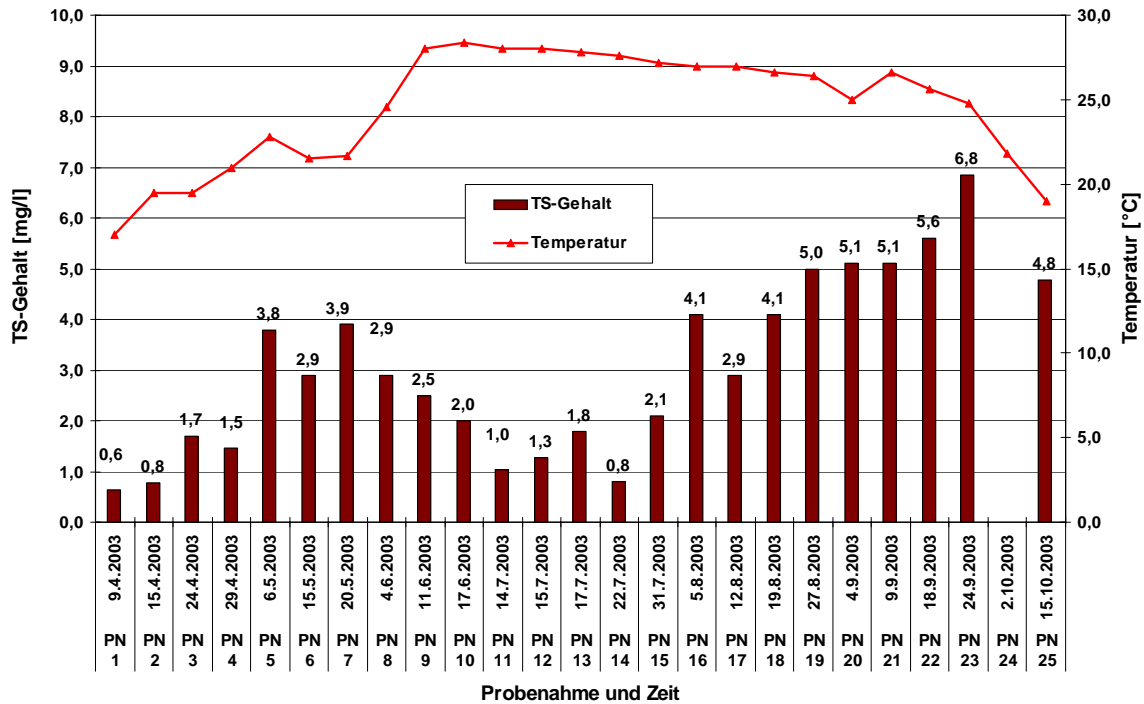


**Tabelle 18: Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten des Parameters  $P_{ges}$  im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2003)**

| Parameter                   |      | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|-----------------------------|------|------------|---------|---------|--------------------|
| <b>Zulauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| $P_{ges}$                   | mg/l | 14,9       | 9,2     | 23,0    | 5,0                |
| <b>Ablauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| $P_{ges}$                   | mg/  | 12,0       | 4,4     | 20,6    | 5,3                |
| <b>Eliminationsleistung</b> |      |            |         |         |                    |
| $P_{ges}$                   | %    | 19,3       | -       | -       | -                  |

Die gemessenen pH-Werte im Zulauf schwankten zwischen 6,6 und 8,0 und lagen im Mittel um 7,1. Im Ablauf wurden pH-Werte zwischen 7,2 und 7,9 gemessen, das Mittel lag um 7,2.

Der Temperaturverlauf im Bioreaktor und die gemessenen TS-Gehalte sind in Abbildung 44 dargestellt. Aufgrund der sehr hohen Raumtemperaturen im vorderen Maschinenraum im Sommer lag die Temperatur im Bioreaktor ab Mai bis September konstant über 20°C.



**Abbildung 44: Temperaturverlauf und TS-Gehalte im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003)**

Bedingt durch die geringe Belebtschlammmenge mit der die Pilotanlage zu Beginn des Praxistests angeimpft wurde, war eine Entnahme von Überschussschlamm bis zum Stand-By-Betrieb nicht notwendig. Die geringe Überschussschlammproduktion während der zweiten Normalbetriebsphase ergab zum Ende des Praxistests einen TS-Gehalt von 6,8 mg/l, so dass auch hier ein Abzug von Überschussschlamm nicht erforderlich war. Der Glühverlust, zur Bestimmung des organischen Anteils an der Biomasse, lag im Mittel bei 80% und schwankte zwischen 69% und 85% über den gesamten Zeitraum.

Aus den gemessenen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen im Zulauf und einer Durchsatzleistung von rund  $Q_d = 1,8 \text{ m}^3/\text{d}$  resultierte für die Normalbetriebsphasen eine mittlere BSB<sub>5</sub>-Belastung von 0,75 kg BSB<sub>5</sub>/d. Unter Berücksichtigung der gemessenen Trockensubstanzgehalte im Bioreaktor ergab sich damit eine mittlere BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung von 0,14 kg BSB<sub>5</sub>/(kg TS \* d).

In Tabelle 19 sind die mittleren BSB<sub>5</sub>-Belastungen sowie deren Schwankungsbreiten im Zulauf der Pilotanlage und die daraus resultierenden mittleren BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastungen für die einzelnen Normalbetriebsphasen dargestellt.

**Tabelle 19: BSB<sub>5</sub>-Belastung im Zulauf und BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2003)**

| Parameter                               |                  | Mittelwert  | Minimum     | Maximum     |
|---|------------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Normalbetrieb gesamt</b>             |                  |             |             |             |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Zulauf</b>           | <b>kg/d</b>      | <b>0,75</b> | <b>0,42</b> | <b>1,55</b> |
| <b>TS-Gehalt</b>                        | <b>g/l</b>       | <b>3,9</b>  | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung</b> | <b>kg/(kg*d)</b> | <b>0,14</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>Normalbetrieb 1</b>                  |                  |             |             |             |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Zulauf</b>           | <b>kg/d</b>      | <b>0,62</b> | <b>0,42</b> | <b>1,07</b> |
| <b>TS-Gehalt</b>                        | <b>g/l</b>       | <b>2,7</b>  | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung</b> | <b>kg/(kg*d)</b> | <b>0,17</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>Normalbetrieb 2</b>                  |                  |             |             |             |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Zulauf</b>           | <b>kg/d</b>      | <b>0,82</b> | <b>0,49</b> | <b>1,55</b> |
| <b>TS-Gehalt</b>                        | <b>g/l</b>       | <b>4,5</b>  | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung</b> | <b>kg/(kg*d)</b> | <b>0,14</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    |

$$V_{\text{Bioreaktor}} = 1,33 \text{ m}^3$$

Die mittlere BSB<sub>5</sub>-Belastung lag damit im Mittel konstant unter der mittleren angenommenen Bemessungsfracht von 1,08 kg BSB<sub>5</sub>/d ( $Q_d = 1,8 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $C_{\text{BSB}_5, \text{Zu}} = 600 \text{ mg/l}$ ).

Am 18.09.2003 (PN 22) wurden 2 Keimproben genommen und analysiert. Wie das Ergebnis in Tabelle 20 zeigt, wurden keine E.coli und coliformen Keime im Ablauf gemessen.

**Tabelle 20: Analyseergebnisse der Keimprobenuntersuchung zur Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2003)**

| Proben-Nr.      | Uhrzeit   | E.coli<br>[1/100 ml] | colif. Keime<br>[1/100 ml] |
|-----------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| PN 22-1 (Keime) | 08:00 Uhr | 0                    | 0                          |
| PN 22-2 (Keime) | 10:30 Uhr | 0                    | 0                          |

Die Betriebseinstellungen für den Schiffseinsatz wurden im Vergleich zum Eignungstest nur geringfügig geändert, wie Tabelle 21 verdeutlicht.

**Tabelle 21: Betriebsparameter der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH während des Praxistests 2003**

| Betriebsphase       | mittlerer<br>Abwasser-<br>volumenstrom | Brutto-<br>Fluxrate | TMP       | Permeabilität           |
|---------------------|--|---------------------|-----------|-------------------------|
|                     | l/d                                    | l/m <sup>2</sup> *h | mbar      | l/m <sup>2</sup> *h*bar |
| Normalbetrieb 1     | 1.800                                  | 5,9                 | 80        | 74                      |
| Normalbetrieb 2     | 1.800                                  | 5,4                 | 40        | 135                     |
| <i>Eignungstest</i> | <i>1.800</i>                           | <i>6,3</i>          | <i>40</i> | <i>158</i>              |

Eingesetzte Membranfilterfläche: 16 m<sup>2</sup>

Aufgrund einer geringeren Brutto-Fluxrate infolge einer verminderten Permeabilität wurde die reine Filtrationszeit von 18 auf 20 Stunden erhöht, um einen Durchsatz von 1.800 l/d zu erreichen. Die Abnahme des Transmembrandrucks in Normalbetriebsphase 2 ist auf den Einsatz neuer Membranen nach dem Austausch zurückzuführen, die geringen Differenzen in den Fluxraten resultieren aus der notwendigen Neueinstellung der Permeatpumpe nach dem Austausch.

Aufgrund der hoch gewählten eingesetzten Membranfilterfläche wurde keine Abnahme der Permeabilität über die Zeiträume der Normalbetriebsphasen festgestellt.

**Abschlussbemerkung**

Beeinträchtigungen durch die besonderen Betriebsbedingungen und durch den Anlagenstandort an Bord waren nicht festzustellen. Der Umstand, dass zweimal täglich an Bord für kurze Zeit die Stromzufuhr beim Wechsel von Land- auf Bordstrom (bzw. von Bord- auf Landstrom) unterbrochen wurde, führte ebenso wenig zu einer Störung der Anlagenaggregate und des Anlagenbetriebes wie die vom Bugpropellermotor ausgehenden Vibrationen.

## **6.3 Auswertung des Praxistests der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH**

### **6.3.1 Testverlauf**

Die Demontage der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH auf dem Prüffeld des PIA erfolgte Anfang Februar 2004 in der 6. und 7. Kalenderwoche. Während der Winterliegezeit der MS Asbach wurde der Einbau der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH begonnen und am 19.02.2004 abgeschlossen. Nach der anschließenden Dichtheits- und Funktionsprüfung der Pilotanlage wurde diese mit etwa 850 l Belebtschlamm (entspricht 50% des Bioreaktorvolumens) angeimpft und die Anlage bis zum Saisonstart im Stand-By Modus mit wöchentlicher Zugabe von Nährsubstraten (Zuckerlösung) betrieben.

Aufgrund der in der letzten Saison verstärkt aufgetretenen Geruchsbelastung, die vom vorderen Fäkaliensammeltank ausging, wurde ein Aktivkohlefilter zur Abluftbehandlung installiert.

Die reguläre Inbetriebnahme erfolgte eine Woche nach Saisonbeginn am 15.04.2004. Die Durchsatzleistung wurde zu Beginn auf 900 l/d (50% der täglichen Durchsatzleistung) eingestellt. Während des ersten Betriebsmonats (Mitte April bis Mitte Mai) traten mehrmals Probleme mit der Beschickungspumpe zur Pilotanlage auf. Zusätzlich fiel die Beschickungspumpe zum vorderen Fäkalientank für einen längeren Zeitraum (~ 10 Tage) aus, so dass ein kontinuierlicher Betrieb der Pilotanlage nicht realisiert werden konnte. In der 20. und 21. Kalenderwoche erfolgte eine Überprüfung und Neuinstallation der Beschickungspumpen, sowie eine Grundreinigung der Membranen.

Ab dem 26.05.2004 konnte mit dem Normalbetrieb begonnen werden, der Zulauf zur Anlage wurde auf 1.350 l/d (entsprach 75% der angestrebten Durchsatzleistung) erhöht. Aufgrund sehr hoher Zulaufkonzentrationen im Abwasser wurde der Zulauf zur Anlage am 30.06.2004 wieder auf 900 l/d herabgesetzt, um die täglich zugeführte BSB<sub>5</sub>-Fracht zu mindern. Ein Wackelkontakt in der Ansteuerung führte in der Zeit vom 11.07 bis 15.07.2004 zu einem Ausfall der Beschickungspumpe.

Vom 15.07 bis zum 27.07.2004 wurde die Anlage im Normalbetrieb (Durchsatz 900 l/d) gefahren. Zur Simulation einer längeren Liegezeit des Fahrgastschiffes wurde der Zulauf der Anlage für den Zeitraum vom 28.07 bis 22.08.2004 gestoppt und die An-

lage selbst im Stand-By-Betrieb betrieben. Am 23.08.2004 wurde diese Betriebsphase beendet und nach erneuter kurzer Einfahrphase inklusive Membranreinigung konnte der Normalbetrieb am 01.09.2004 fortgesetzt werden. Die Durchsatzleistung von 900 l/d wurde beibehalten und erst am Ende der Phase, am 07.10.2004, auf 1.450 l/d erhöht. Am 11.10.2004 wurde aufgrund der Erhöhung des Durchsatzes der maximal zulässige Transmembrandruck erreicht, so dass die Membrantrennstufe sich automatisch abschaltete. Da die Fahrtsaison bereits am Tag zuvor geendet hatte, wurde die Anlage nicht wieder in Betrieb genommen.

Tabelle 22 gibt eine kurze Übersicht über den Verlauf des Praxistests wieder.

**Tabelle 22: Verlauf des Praxistests mit der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH in der Fahrtsaison 2004**

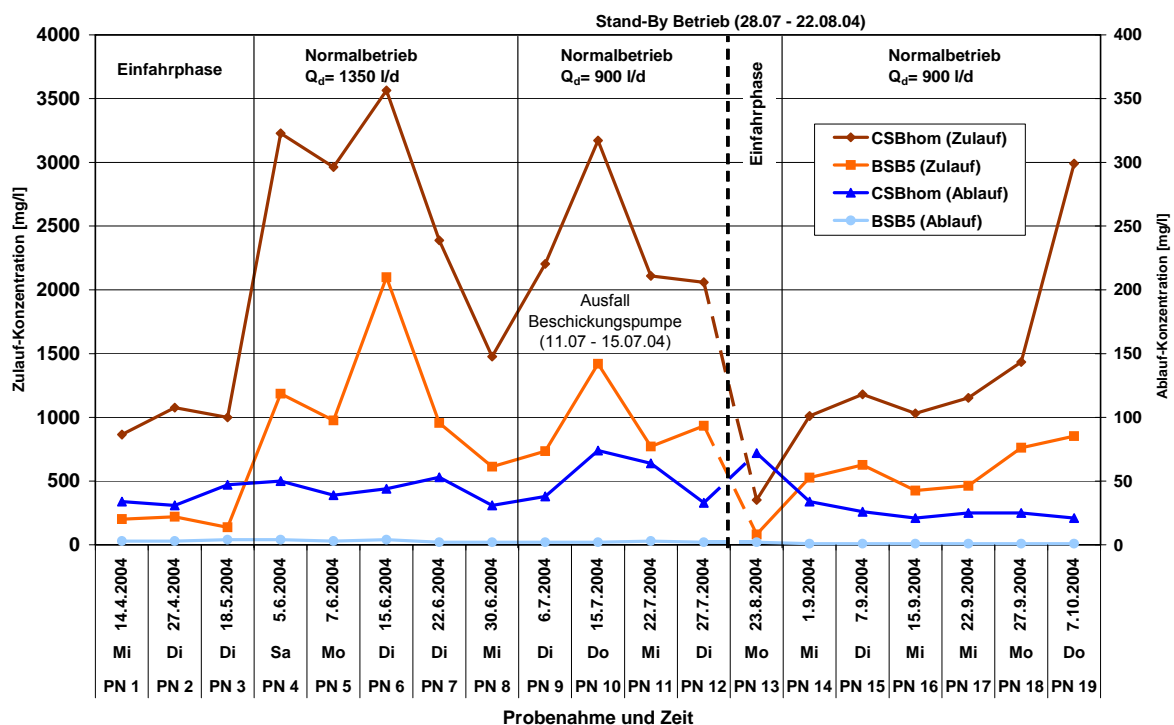
| Datum<br>von bis |            | Projektverlauf   |
|------------------|------------|--|
| 17.02.2004       | 19.02.2004 | Einbau der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH in Fahrgastschiff MS Asbach   |
| 25.02.2004       |            | Animpfung der Pilotanlage mit Belebtschlamm  |
| 26.02.2004       | 13.04.2004 | Stand-By Betrieb; wöchentliche Zugabe von Nährsubstraten   |
| 14.04.2004       |            | Inbetriebnahme Pilotanlage; $Q_d = 0,90 \text{ m}^3/\text{d}$  |
| 15.04.2004       | 25.05.2004 | Einfahrphase mit Ausfall Beschickungspumpen zum vorderen Fäkalientank und zur Pilotanlage  |
| 11.05.2004       |            | Neu-Installation der Beschickungspumpe zur Pilotanlage   |
| 18.05.2004       |            | Grundreinigung der Membrantrenneinheit   |
| 26.05.2004       | 30.06.2004 | Normalbetrieb; $Q_d = 1,35 \text{ m}^3/\text{d}$   |
| 01.07.2004       | 10.07.2004 | Normalbetrieb; $Q_d = 0,9 \text{ m}^3/\text{d}$  |
| 11.07.2004       | 15.07.2004 | Ausfall Beschickungspumpe  |
| 15.07.2004       | 27.07.2004 | Normalbetrieb; $Q_d = 0,9 \text{ m}^3/\text{d}$  |
| 28.07.2004       | 22.08.2004 | Stand-By Betrieb;<br>Anlage ist in Betrieb, wird jedoch nicht mit Abwasser beschickt. Simulation einer längeren Liegezeit des Fahrgastschiffs. |
| 23.08.2003       | 31.08.2004 | erneute Einfahrphase inklusive Membranreinigung  |
| 01.09.2004       | 07.10.2004 | Normalbetrieb; $Q_d = 0,9 \text{ m}^3/\text{d}$  |
| 08.10.2004       | 11.10.2004 | Normalbetrieb; $Q_d = 1,45 \text{ m}^3/\text{d}$ , Ende der Versuche   |
| 10.10.2004       |            | Ende Fahrtsaison   |



### 6.3.2 Darstellung und Auswertung der erfolgten Untersuchungen

Die erste Probenahme erfolgte am Tag der Inbetriebnahme am 14.04.2004. Insgesamt fanden bis zum 07.10.2004 19 Probenahmen zur Untersuchung der Betriebs-, Zu- und Ablaufwerte statt. Die Normalbetriebsphasen umfassen die Probenahmen PN 4 bis PN 12 ohne PN 10 (Ausfall Beschickungspumpe) und die Probenahmen PN 14 bis PN 19.

In Abbildung 45 sind die Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> über den Zeitraum des Praxistests dargestellt.



**Abbildung 45: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004)**

Die mittlere CSB-Eliminationsleistung lag während der Normalbetriebsphasen sowie über den gesamten Zeitraum bei 98%. Für den Parameter BSB<sub>5</sub> lag die mittlere Eliminationsleistung für den Normalbetrieb wie für die gesamte Betriebsdauer bei > 99%. Die sehr hohen Zulaufkonzentrationen Mitte Juni (um PN 6) führten dazu, dass der zu behandelnde Volumenstrom von anfänglich 1.350 l/d (75% der angestrebten Durchsatzleistung) auf 900 l/d Ende Juni reduziert werden musste, um so die tägliche BSB<sub>5</sub>-Fracht von bis zu 2,8 kg/d an die ursprüngliche Bemessungsfracht von 1,08 kg BSB<sub>5</sub>/d anzugleichen. Trotz der hohen Zulaufkonzentrationen wurden im

Ablauf während des Normalbetriebs durchweg geringe CSB- und BSB<sub>5</sub>-Ablaufkonzentrationen gemessen.

Wie in Tabelle 23 dargestellt, ergibt sich eine mittlere CSB-Ablaufkonzentration von 36 mg/l und eine mittlere BSB<sub>5</sub>-Ablaufkonzentration von 2 mg/l.

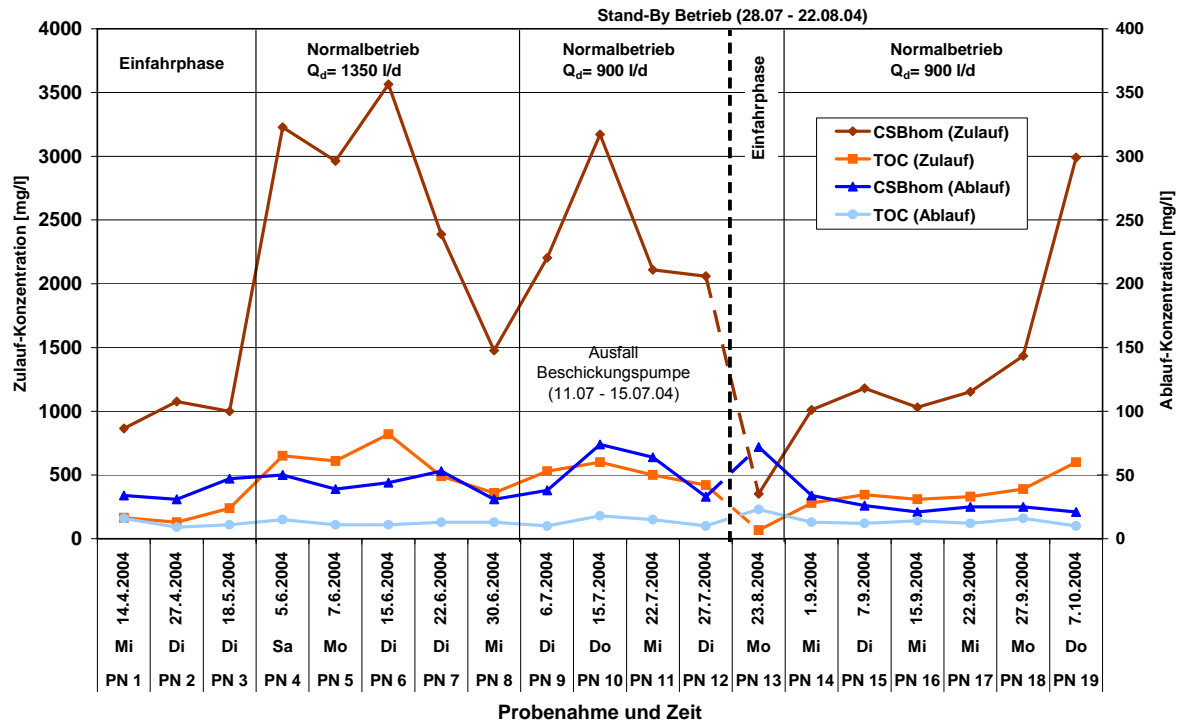
**Tabelle 23: Mittlere CSB- und BSB<sub>5</sub> – Zu- und Ablaufkonzentrationen und Schwankungsbreiten während der Normalbetriebsphasen der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004)**

| Parameter                   |      | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|-----------------------------|------|------------|---------|---------|--------------------|
| <b>Zulauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| CSB <sub>hom</sub>          | mg/l | 2056       | 1010    | 3564    | 842                |
| CSB <sub>fil</sub>          | mg/l | 611        | 463     | 947     | 143                |
| BSB <sub>5</sub>            | mg/l | 852        | 425     | 2098    | 403                |
| AFS                         | mg/l | 943        | 383     | 1709    | 475                |
| <b>Ablauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| CSB <sub>hom</sub>          | mg/l | 36         | 21      | 64      | 12                 |
| CSB <sub>fil</sub>          | mg/l | 31         | 16      | 51      | 10                 |
| BSB <sub>5</sub>            | mg/l | 2          | < 1     | 4       | 1                  |
| AFS                         | mg/l | 3          | < 1     | 11      | 3                  |
| <b>Eliminationsleistung</b> |      |            |         |         |                    |
| CSB <sub>hom</sub>          | %    | 98,2       | -       | -       | -                  |
| BSB <sub>5</sub>            | %    | 99,8       | -       | -       | -                  |

Ähnlich wie im Praxistest 1 können Aussagen zu den abfiltrierbaren Stoffen (AFS) nur bedingt getroffen werden. Es wird an dieser Stelle auf die Anmerkungen in Kapitel 6.2.2 (Tabelle 15) hingewiesen. Auf eine Auswertung wird wiederum verzichtet.

Vor dem Hintergrund der Änderung der Abwasserverordnung und der beabsichtigten Ersetzung des Parameters CSB durch den Parameter TOC wurden während des

Praxistests im Jahr 2004 zusätzlich Zu- und Ablauf der Pilotanlage auf TOC (Küvetentests) bestimmt. In Abbildung 46 sind die Parameter gegenübergestellt.



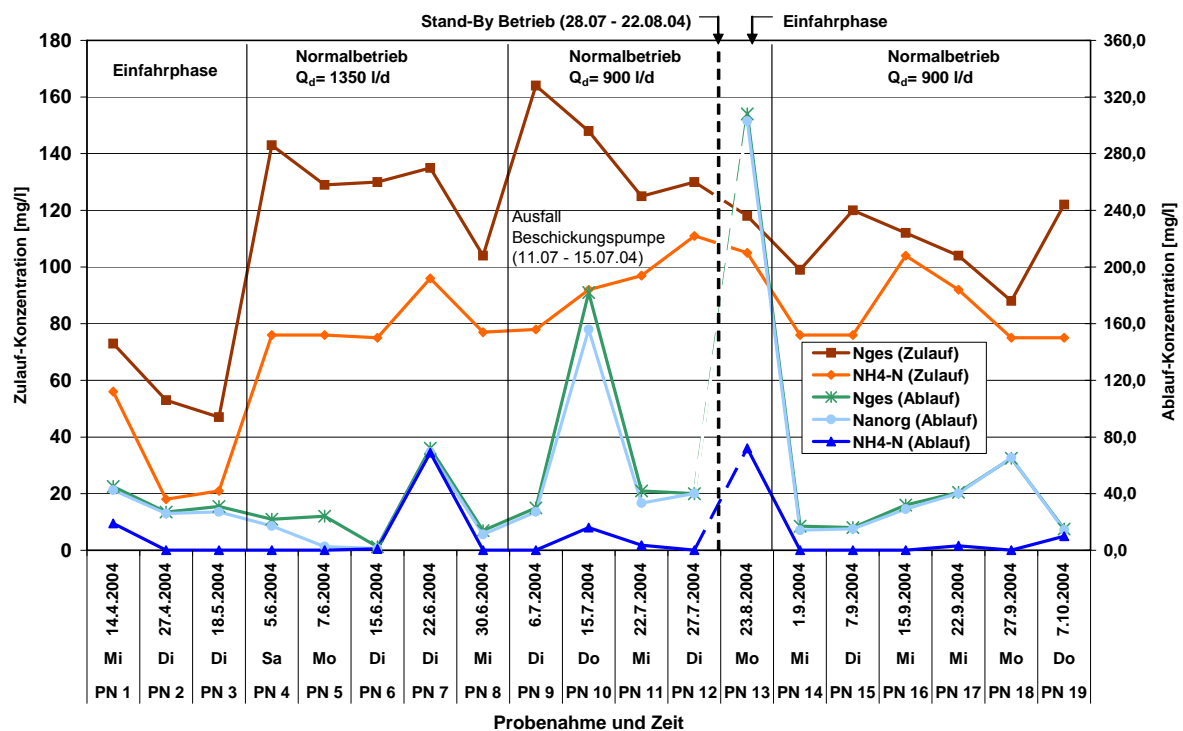
**Abbildung 46: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und TOC der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004)**

Über den gesamten Untersuchungszeitraum ergibt sich im Zulauf ein Verhältnis  $CSB_{\text{Mittelwert}} : TOC_{\text{Mittelwert}}$  von 4,5:1, im Ablauf  $CSB_{\text{Mittelwert}} : TOC_{\text{Mittelwert}}$  von 3,0:1. Die mittleren Zu- und Ablaufkonzentrationen und Schwankungsbreiten für den Parameter TOC sind in Tabelle 24 dargestellt.

**Tabelle 24: Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten des Parameters TOC im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umweltechnik GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2004)**

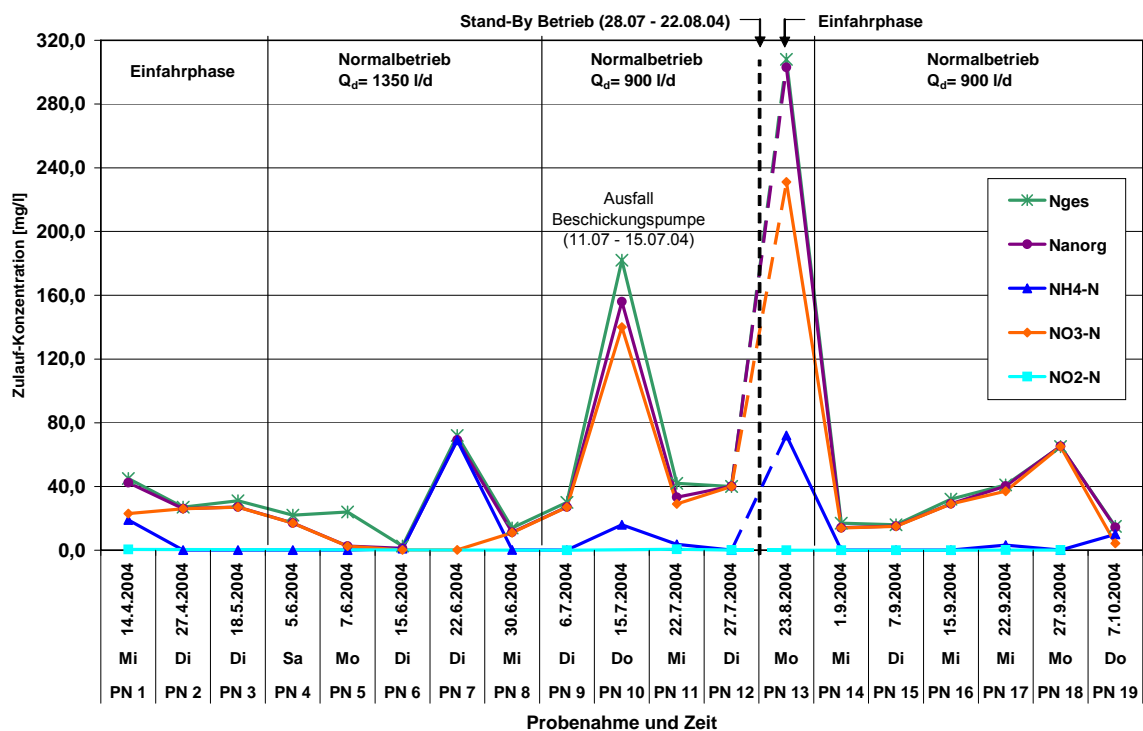
| Parameter                   |      | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|-----------------------------|------|------------|---------|---------|--------------------|
| <b>Zulauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| TOC                         | mg/l | 482        | 280     | 820     | 148                |
| <b>Ablauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| TOC                         | mg/  | 13         | 10      | 18      | 2                  |
| <b>Eliminationsleistung</b> |      |            |         |         |                    |
| TOC                         | %    | 97,3       | -       | -       | -                  |

In Abbildung 47 sind die Analyseergebnisse der Probenahmen für die Stickstoffparameter graphisch dargestellt.



**Abbildung 47: Stickstoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umweltechnik GmbH (Praxistest 2004)**

Nach der Einfahrphase konnte bis zum 15.06.04 (PN 6) eine vollständige Nitrifikation und Denitrifikation erreicht werden. Der Peak des  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationsverlaufs am 22.06.04 (69 mg/l) ist auf die sehr hohe täglich zugeführte  $\text{BSB}_5$ -Fracht in dieser Zeit zurückzuführen. Eine Nitrifikation war infolge der Überlastsituation nicht mehr festzustellen. Nach Reduzierung des Volumenstroms und damit der  $\text{BSB}_5$ -Fracht führte der Ausfall der Beschickungspumpe vom 11.07. bis 15.07.04 zu einer kurzfristigen Zersetzung des Belebtschlammes infolge Nährstoffmangels. Aufgrund fehlender Kohlenstoffquellen wurde das Nitrat nicht mehr denitrifiziert. Am 15.07.04 (PN 10) wurde eine Nitratkonzentration im Ablauf von 140 mg/l gemessen, wie Abbildung 48 zeigt.



**Abbildung 48: Stickstoffkonzentrationen im Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umweltechnik GmbH (Praxistest 2004)**

Nach dem 15.07.04 konnte anschließend bis zum Stand-By Betrieb eine  $N_{\text{ges}}$ -Eliminationsrate zwischen 60 und 70% mit vollständiger Nitrifikation und ausreichender Denitrifikation erreicht werden. Die mittlere Gesamtstickstoffeliminationsrate für die erste Normalbetriebsphase bis zum Stand-By Betrieb ergab 76,7%.

Während des Anlagenbetriebes ohne Beschickung (Stand-By Betrieb vom 28.07.04 bis 22.08.04) kam es infolge Nährstoffmangels zu einem Absterben der Mikroorga-

nismen und zu einer Zersetzung des Belebtschlammes, so dass ein deutlicher Konzentrationsanstieg zu Beginn der erneuten Einfahrphase festzustellen war.

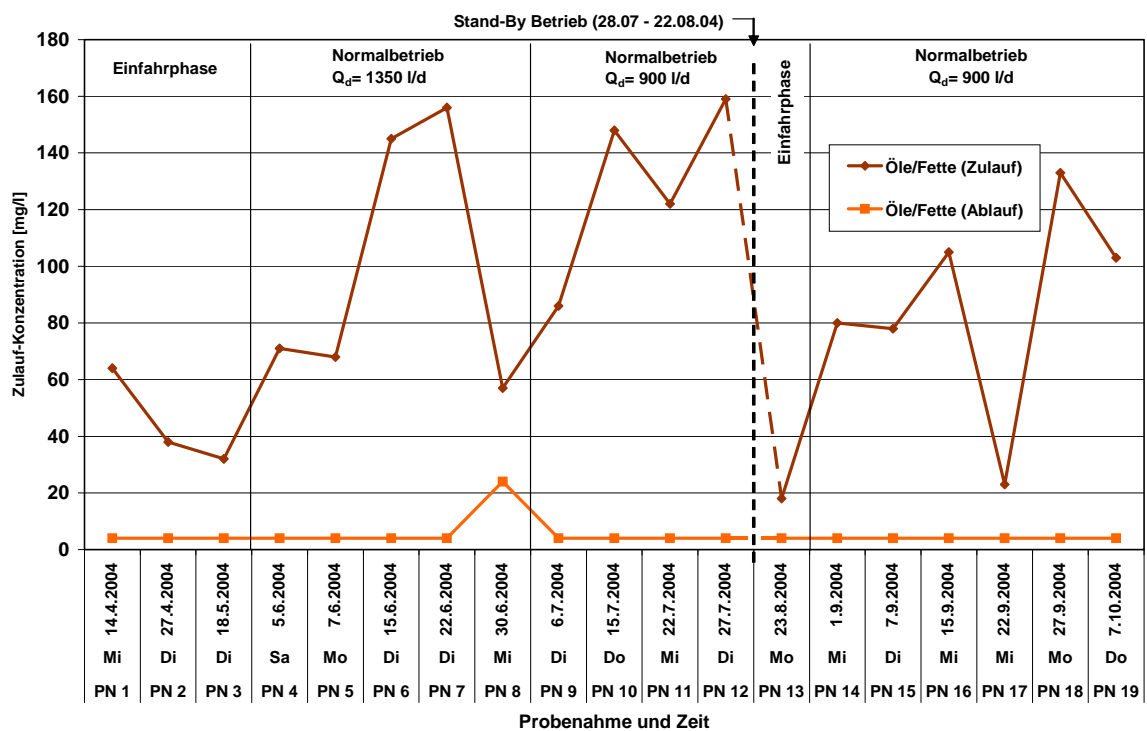
Zu Beginn der zweiten Normalbetriebsphase wurden wieder sehr hohe  $N_{ges}$ -Eliminationsraten (um 80%) mit vollständiger Nitrifikation und Denitrifikation erreicht. Bei den Probenahmen PN 14 und PN 15 wurden Ablaufkonzentrationen für Gesamtstickstoff kleiner 18 mg/l gemessen. Der anschließende Anstieg der Gesamtstickstoffkonzentration bis zum 27.09.04 (PN 18) ist auf eine abnehmende Denitrifikationsleistung zurückzuführen. Die Ursache war nicht feststellbar, am 7.10.04 (PN 19) lag die Ablaufkonzentration für  $N_{ges}$  wieder unter 18 mg/l. Die mittlere Gesamtstickstoffeliminationsrate für die zweite Normalbetriebsphase nach dem Stand-By Betrieb ergab 71,2%. In Tabelle 25 sind die mittleren Konzentrationen und Schwankungsbreiten der Stickstoffparameter im Zu- und Ablauf während der Normalbetriebsphasen dargestellt.

**Tabelle 25: Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten von Stickstoffparametern im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2004)**

| Parameter                   |      | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|-----------------------------|------|------------|---------|---------|--------------------|
| <b>Zulauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| $N_{ges}$                   | mg/l | 121,8      | 88,0    | 164,0   | 18,9               |
| $NH_4-N$                    | mg/l | 84,6       | 75,0    | 111,0   | 12,2               |
| <b>Ablauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| $N_{ges}$                   | mg/  | 30,9       | 2,6     | 72,0    | 19,0               |
| $N_{anorg}$                 | mg/l | 27,2       | 1,2     | 69,2    | 20,2               |
| $NH_4-N$                    | mg/l | 6,3        | 0,1     | 69,0    | 17,6               |
| $NO_3-N$                    | mg/l | 20,8       | 0,2     | 65,0    | 17,7               |
| $NO_2-N$                    | mg/l | 0,1        | < 0,02  | 0,6     | 0,2                |
| <b>Eliminationsleistung</b> |      |            |         |         |                    |
| $N_{ges}$                   | %    | 74,6       | -       | -       | -                  |

Die mittlere Eliminationsleistung für den gesamten Zeitraum der Normalbetriebsphasen ergab für den Parameter  $N_{\text{ges}}$  73,6%.

Ein negativer Einfluss auf die Permeabilität der Membranen durch lipophile Stoffe wie Öle und Fette war während der sehr hohen Zulaufkonzentrationen im Zeitraum der PN 7 und PN 8 festzustellen. In Abbildung 49 ist der Verlauf der gemessenen Konzentrationen dargestellt.



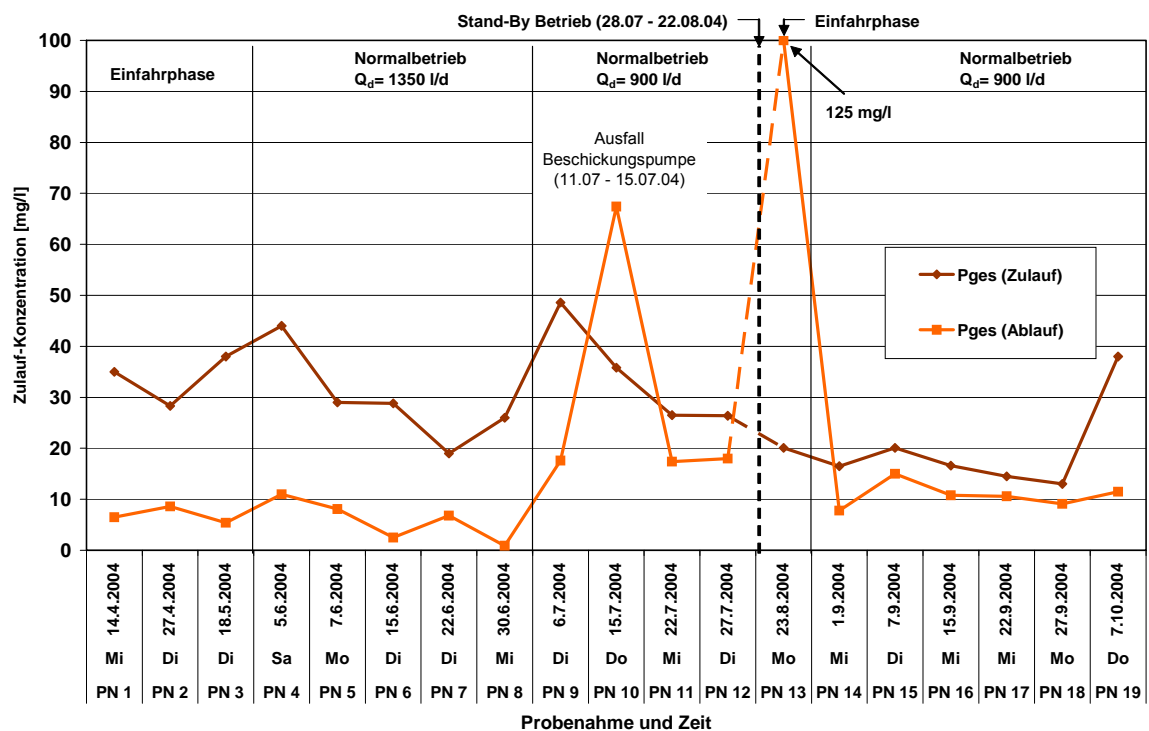
**Abbildung 49: Zu- und Ablaufkonzentrationen der Parameter Öle/Fette der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004)**

Bis auf die Probenahme am 30.06.2004 (PN 8) lagen die Ablaufkonzentrationen durchweg unter dem Messbereich von 4 mg/l. Über den gesamten Zeitraum ergab sich rechnerisch eine mittlere Eliminationsleistung von 94,3%, für die Normalbetriebsphasen lag sie mit 94,5% nur geringfügig darüber. In Tabelle 26 sind die mittleren Konzentrationen und Schwankungsbreiten während des Normalbetriebes dargestellt.

**Tabelle 26: Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten der Parameter Öle/Fette im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2004)**

| Parameter                   |      | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|-----------------------------|------|------------|---------|---------|--------------------|
| <b>Zulauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| Öle/Fette                   | mg/l | 99,0       | 23,0    | 159,0   | 39,0               |
| <b>Ablauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| Öle/Fette                   | mg/  | 5,4        | < 4,0   | 24,0    | 5,2                |
| <b>Eliminationsleistung</b> |      |            |         |         |                    |
| Öle/Fette                   | %    | 94,5       | -       | -       | -                  |

In Abbildung 50 ist der Verlauf der gemessenen  $P_{ges}$ -Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Pilotanlage dargestellt.



**Abbildung 50: Zu- und Ablaufkonzentrationen des Parameters Pges der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004)**



Am Verlauf der  $P_{\text{ges}}$ -Ablaufkonzentration sind deutlich die Rücklösungsprozesse des inkorporierten Phosphors während der Stillstandszeiten infolge des Ausfalls der Beschickungspumpe bzw. des Stand-By Betriebes zu erkennen. Die mittlere Eliminationsleistung für  $P_{\text{ges}}$  betrug für beide Normalbetriebsphasen 59,9%, für die erste Normalbetriebsphase ergab sich eine mittlere Eliminationsleistung von 66,9%, für die Zweite von 45,4%.

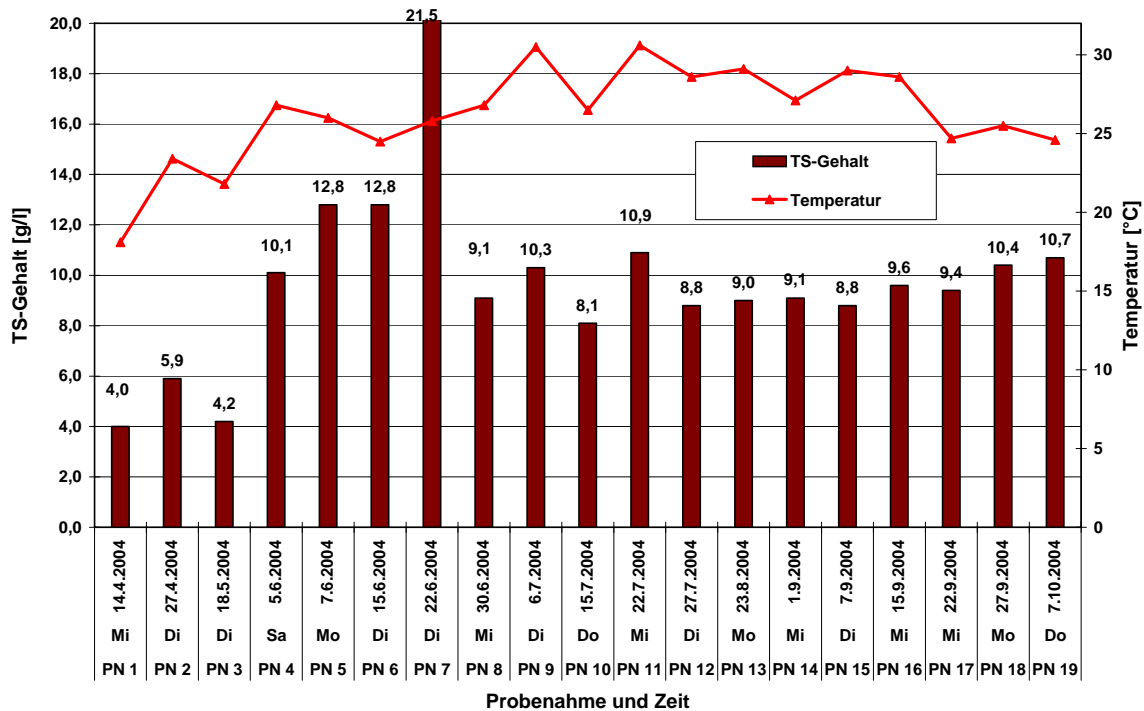
In Tabelle 27 sind abschließend die mittleren Konzentrationen und Schwankungsbreiten im Zu- und Ablauf während der Normalbetriebsphasen zusammengefasst.

**Tabelle 27: Mittlere Konzentrationen und Schwankungsbreiten des Parameters  $P_{\text{ges}}$  im Zu- und Ablauf der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2004)**

| Parameter                   |      | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
|-----------------------------|------|------------|---------|---------|--------------------|
| <b>Zulauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| $P_{\text{ges}}$            | mg/l | 26,2       | 13,0    | 48,6    | 10,6               |
| <b>Ablauf</b>               |      |            |         |         |                    |
| $P_{\text{ges}}$            | mg/  | 10,5       | 0,9     | 18,0    | 5,1                |
| <b>Eliminationsleistung</b> |      |            |         |         |                    |
| $P_{\text{ges}}$            | %    | 59,9       | -       | -       | -                  |

Die gemessenen pH-Werte im Zulauf schwankten zwischen 6,4 und 7,3 und lagen im Mittel um 6,9. Im Ablauf wurden pH-Werte zwischen 7,3 und 7,9 gemessen, das Mittel lag um 7,6.

Der Temperaturverlauf im Bioreaktor und die gemessenen TS-Gehalte sind in Abbildung 51 dargestellt. Bis auf den Beginn der Einfahrphase lagen die Temperaturen im Bioreaktor konstant über 20°C. Im Juli wurden Temperaturen bis 30°C gemessen.



**Abbildung 51: Temperaturverlauf und TS-Gehalte im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH (Praxistest 2004)**

Der TS-Gehalt im Bioreaktor wurde zwischen 8 bis 12 g/l geregelt, allein die sehr hohe BSB<sub>5</sub>-Belastung Mitte Juni führte in sehr kurzer Zeit zu einem hohen Schlammzuwachs, der zu einem TS-Gehalt von über 21 mg/l (PN 7) führte. Zur Regulierung des TS-Gehaltes musste während der Normalbetriebsphase bis zum Stand-By Betrieb aufgrund der hohen BSB<sub>5</sub>-Belastung durchschnittlich etwa 4 kg Trockensubstanz pro Woche aus der Anlage händisch entnommen werden, während des Normalbetriebes nach dem Stand-By Betrieb etwa 1,5 kg Trockensubstanz.

Der Glühverlust, zur Bestimmung des organischen Anteils an der Biomasse, bewegte sich zwischen 70% und 85% und lag im Mittel bei 79%.

Aus den gemessenen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen im Zulauf und unter Berücksichtigung der erreichten Durchsatzleistungen von  $Q_d = 0,9 \text{ m}^3/\text{d}$  bis  $Q_d = 1,35 \text{ m}^3/\text{d}$  resultierte für die Normalbetriebsphasen eine mittlere BSB<sub>5</sub>-Belastung von 0,93 kg BSB<sub>5</sub>/d. Unter Berücksichtigung der gemessenen Trockensubstanzgehalte im Bioreaktor ergab sich damit eine mittlere BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung von 0,05 kg BSB<sub>5</sub>/(kg TS \* d).

In Tabelle 28 sind die mittleren BSB<sub>5</sub>-Belastungen sowie deren Schwankungsbreiten im Zulauf der Pilotanlage und die daraus resultierenden mittleren BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastungen für die einzelnen Normalbetriebsphasen dargestellt.

**Tabelle 28: BSB<sub>5</sub>-Belastung im Zulauf und BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung im Bioreaktor der Pilotanlage der Firma Martin System Engineering GmbH während der Normalbetriebsphasen (Praxistest 2004)**

| Parameter                               |                  | Mittelwert  | Minimum     | Maximum     |
|---|------------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Normalbetrieb gesamt</b>             |                  |             |             |             |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Zulauf</b>           | <b>kg/d</b>      | <b>0,93</b> | <b>0,38</b> | <b>2,83</b> |
| <b>TS-Gehalt</b>                        | <b>g/l</b>       | <b>11,0</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung</b> | <b>kg/(kg*d)</b> | <b>0,05</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>Normalbetrieb 1</b>                  |                  |             |             |             |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Zulauf</b>           | <b>kg/d</b>      | <b>1,22</b> | <b>0,55</b> | <b>2,83</b> |
| <b>TS-Gehalt</b>                        | <b>g/l</b>       | <b>12,1</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung</b> | <b>kg/(kg*d)</b> | <b>0,06</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>Normalbetrieb 2</b>                  |                  |             |             |             |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Zulauf</b>           | <b>kg/d</b>      | <b>0,55</b> | <b>0,38</b> | <b>0,77</b> |
| <b>TS-Gehalt</b>                        | <b>g/l</b>       | <b>9,7</b>  | <b>-</b>    | <b>-</b>    |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung</b> | <b>kg/(kg*d)</b> | <b>0,03</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>    |

$$V_{\text{Bioreaktor}} = 1,73 \text{ m}^3$$

Damit lag die mittlere BSB<sub>5</sub>-Belastung für die Normalbetriebsphase 1 (Phase vor Stand-By Betrieb) über der Bemessungsfracht von 1,08 kg BSB<sub>5</sub>/d, in der Normalbetriebsphase 2 (Phase nach Stand-By Betrieb) deutlich darunter.

Am 14.07.2004 wurde während des Ausfalls der Beschickungspumpe der Ablauf über den manuellen Modus der Anlagensteuerung beprobt und auf Keime analysiert. Das Ergebnis der Keimbeprobung ist in Tabelle 29 dargestellt.

**Tabelle 29: Analyseergebnisse der Keimprobenuntersuchung zur Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH (Praxistest 2004)**

| Proben-Tag | Uhrzeit   | E.coli<br>[1/100 ml] | colif. Keime<br>[1/100 ml] |
|------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| 14.07.04   | 10:45 Uhr | 0                    | 12.600                     |
| 14.07.04   | 11:45 Uhr | 0                    | 17.750                     |

Im Ablauf waren keine E.coli, jedoch coliforme Keime festzustellen. Eine Rückverkeimung durch Umgebungsluft in der Ablaufleitung der Probenahmestelle während der Stillstandszeit der Anlage zwischen dem 11.07. bis 15.07.2004 ist nicht auszuschließen. Eine Wiederholung der Keimbeprobung war aufgrund des Schifffahrplans bis zum Ende der Saison nicht mehr möglich, es wird an dieser Stelle aber auf die erfolgreichen Untersuchungen zum Keimrückhalt auf dem Prüffeld hingewiesen.

In Tabelle 30 sind die Einstellungen der Betriebsparameter Brutto-Fluxrate und Transmembrandruck für die unterschiedlichen Durchsatzleistungen während der Normalbetriebsphasen (Normalbetrieb 1 vor Stand-By Betrieb, Normalbetrieb 2 nach Stand-By Betrieb) dargestellt.

**Tabelle 30: Betriebsparameter der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH während des Praxistests 2004**

| Betriebsphase       | Mittlerer Abwasservolumenstrom | Brutto-Fluxrate     | TMP  | Permeabilität           |
|---------------------|--------------------------------|---------------------|--|-------------------------|
|                     | l/d                            | l/m <sup>2</sup> *h | mbar   | l/m <sup>2</sup> *h*bar |
| Normalbetrieb 1     | 1.350                          | 13,6                | 50 bis 320   | 272 bis 43              |
| Normalbetrieb 1     | 900                            | 10,1                | 60 bis 110   | 168 bis 92              |
| Normalbetrieb 2     | 900                            | 11,8                | 30 bis 120   | 393 bis 98              |
| Normalbetrieb 2     | 1.450                          | 15,6                | 120 bis <b>400</b><br>Abschalten Membrantrennstufe | 130 bis 39              |
| <i>Eignungstest</i> | <i>1.800</i>                   | <i>20,5</i>         | <i>20 bis 50</i>                                   | <i>1.025 bis 410</i>    |

Eingesetzte Membranfilterfläche: 8 m<sup>2</sup>

Beim Transmembrandruck und bei der Permeabilität sind die Spannweiten angegeben, die sich während der Betriebsphasen ergeben haben. Es zeigte sich bei allen vier Phasen, dass aufgrund der sehr hohen Zulaufkonzentrationen an abfiltrierbaren Stoffen (Deckschichtbildung) die Permeabilität deutlicher als beim vierwöchigen Eignungstest über die Zeit abnahm. Zudem kamen während der Normalbetriebsphase 1 ( $Q_d = 1350$  l/d) sehr hohe Zulauffrachten hinzu, die zu einer Überlastung der Anlage führten. Hohe TS-Gehalte und lipophile Stofffrachten führten zur schnelleren Deckschichtbildung auf den Membranen. Trotz reduzierter täglicher Durchsatzleistung um 50% auf 900 l/d wurden die Betriebsbedingungen vom Eignungstest nicht wieder erreicht. Das Erreichen des maximal zulässigen TMP, das zu einem automatischen Abschalten der Membrantrennstufe führte (vgl. Kapitel 6.2.1 und Tabelle 22), zeigte am Ende des Praxistests, dass unter den gewählten Betriebsbedingungen (Anzahl der Membranreinigungen) eine Durchsatzleistung von etwa 80% der eigentlichen Durchsatzleistung nicht mehr realisiert werden konnte.

### **Abschlussbemerkung**

Beeinträchtigungen durch die besonderen Betriebsbedingungen und durch den Anlagenstandort an Bord waren auch während des zweiten Praxistests mit der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH nicht festzustellen. Der Umstand, dass zweimal täglich an Bord für kurze Zeit die Stromzufuhr beim Wechsel von Land- auf Bordstrom (bzw. von Bord- auf Landstrom) unterbrochen wurde, führte ebenso wenig zu einer Störung der Anlagenaggregate und des Anlagenbetriebes wie die vom Bugpropellermotor ausgehenden Vibrationen.

## 7 Beurteilung der getesteten Pilotanlagen auf ihre Verwendbarkeit als Bordkläranlagen

Zur Beurteilung der Verwendbarkeit als Bordkläranlagen werden für die getesteten Pilotanlagen der Firmen Earth Tech Umwelttechnik GmbH und Martin Systems Engineering GmbH die Ergebnisse der Praxistests herangezogen und für die Pilotanlage der Firma Puron AG die Ergebnisse des Eignungstests. Auf eine Darstellung der Ergebnisse zu den Untersuchungen der Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH wird verzichtet, da die Anlage aufgrund verfahrenstechnischer Mängel nicht ordnungsgemäß betrieben werden konnte.

**Tabelle 31 / Teil1: Zusammenstellung der Analysenergebnisse**

| Parameter                     |           |      | Earth Tech Umwelttechnik GmbH <sup>1)</sup> | Martin Systems Engineering GmbH <sup>2)</sup> | Puron AG <sup>3)</sup> |
|-------------------------------|-----------|------|---|---|------------------------|
| <b>Zulauf</b>                 |           |      |   |   |                        |
| <b>CSB<sub>hom</sub></b>      | Mittel    | mg/l | 2.056                                       | 869   | 696                    |
|                               | Min / Max |      | 1.010 / 3.564                               | 484 / 1.810                                   | 245 / 1.360            |
| <b>BSB<sub>5</sub></b>        | Mittel    | mg/l | 852   | 415   | 243                    |
|                               | Min / Max |      | 425 / 2.098                                 | 232 / 863                                     | 110 / 573              |
| <b>BSB<sub>5</sub>-Fracht</b> | Mittel    | kg/d | <b>0,93</b>                                 | <b>0,75</b>                                   | <b>0,4</b>             |
|                               | Min / Max |      | <b>0,38 / 2,83</b>                          | <b>0,42 / 1,55</b>                            | <b>0,2 / 1,0</b>       |
| <b>N<sub>ges</sub></b>        | Mittel    | mg/l | 121,8                                       | 78,7  | 43,5                   |
|                               | Min / Max |      | 88,0 / 164,0                                | 54,0 / 110,0                                  | 32,0 / 64              |
| <b>Öle/Fette</b>              | Mittel    | mg/l | 99,0  | 95,3  | 40,5                   |
|                               | Min / Max |      | 23,0 / 159,0                                | 32,0 / 293,0                                  | 13,0 / 92,4            |
| <b>P<sub>ges</sub></b>        | Mittel    | mg/l | 26,2  | 14,9  | 7,2                    |
|                               | Min / Max |      | 13,0 / 48,6                                 | 9,2 / 23,0                                    | 4,6 / 10,0             |
| <b>AFS</b>                    | Mittel    | mg/l | 943   | 370   | 391                    |
|                               | Min / Max |      | 383 / 1.709                                 | 189 / 907                                     | 71 / 664               |

## Fortsetzung Tabelle 31: Zusammenstellung der Analysenergebnisse

| Parameter                |           |      | Earth Tech<br>Umwelttechnik<br>GmbH <sup>1)</sup> | Martin Systems<br>Engineering<br>GmbH <sup>2)</sup> | Puron AG <sup>3)</sup> |
|--------------------------|-----------|------|---|---|------------------------|
| <b>Ablauf</b>            |           |      |   |   |                        |
| <b>CSB<sub>hom</sub></b> | Mittel    | mg/l | 36  | 33  | 34                     |
|                          | Min / Max |      | 21 / 64   | 18 / 47   | 18 / 78                |
| <b>BSB<sub>5</sub></b>   | Mittel    | mg/l | 2   | 2   | 3                      |
|                          | Min / Max |      | < 1 / 4   | < 1 / 3   | < 2 / 5                |
| <b>N<sub>ges</sub></b>   | Mittel    | mg/l | 30,9  | 26,7  | 24,8                   |
|                          | Min / Max |      | 2,6 / 72,0  | 3,6 / 61,2  | 1,9 / 47,0             |
| <b>N<sub>anorg</sub></b> | Mittel    | mg/l | 27,2  | 22,0  | 22,2                   |
|                          | Min / Max |      | 1,2 / 69,2  | 0,9 / 53,2  | 1,8 / 43,2             |
| <b>Öle/Fette</b>         | Mittel    | mg/l | 5,4   | 4,3   | 6,0                    |
|                          | Min / Max |      | < 4,0 / 24,0                                      | 0,2 / 16  | < 4 / 17               |
| <b>P<sub>ges</sub></b>   | Mittel    | mg/l | 10,5  | 12,0  | 1,1                    |
|                          | Min / Max |      | 0,9 / 18,0  | 4,4 / 20,6  | 0,1 / 4,3              |
| <b>AFS</b>               | Mittel    | mg/  | 3   | 4   | < 1                    |
|                          | Min / Max |      | < 1 / 11  | < 1 / 13 <sup>4)</sup>                              |                        |
| <b>Eliminationsraten</b> |           |      |   |   |                        |
| <b>CSB<sub>hom</sub></b> | Mittel    | [%]  | 98,2  | 96,1  | 95,1                   |
| <b>BSB<sub>5</sub></b>   | Mittel    | [%]  | 99,8  | 99,4  | 98,9                   |
| <b>N<sub>ges</sub></b>   | Mittel    | [%]  | 74,6  | 66,1  | 43,0                   |
| <b>Öle/Fette</b>         | Mittel    | [%]  | 94,5  | 95,5  | 84,1                   |
| <b>P<sub>ges</sub></b>   | Mittel    | [%]  | 59,9  | 19,3  | 84,0                   |
| <b>AFS</b>               | Mittel    | [%]  | 99,6 <sup>4)</sup>                                | 98,9 <sup>4)</sup>                                  | > 99                   |

<sup>1)</sup> Auswertung der Analysenergebnisse des Praxistests (2004)  
(Betrachtung der Normalbetriebsphasen)

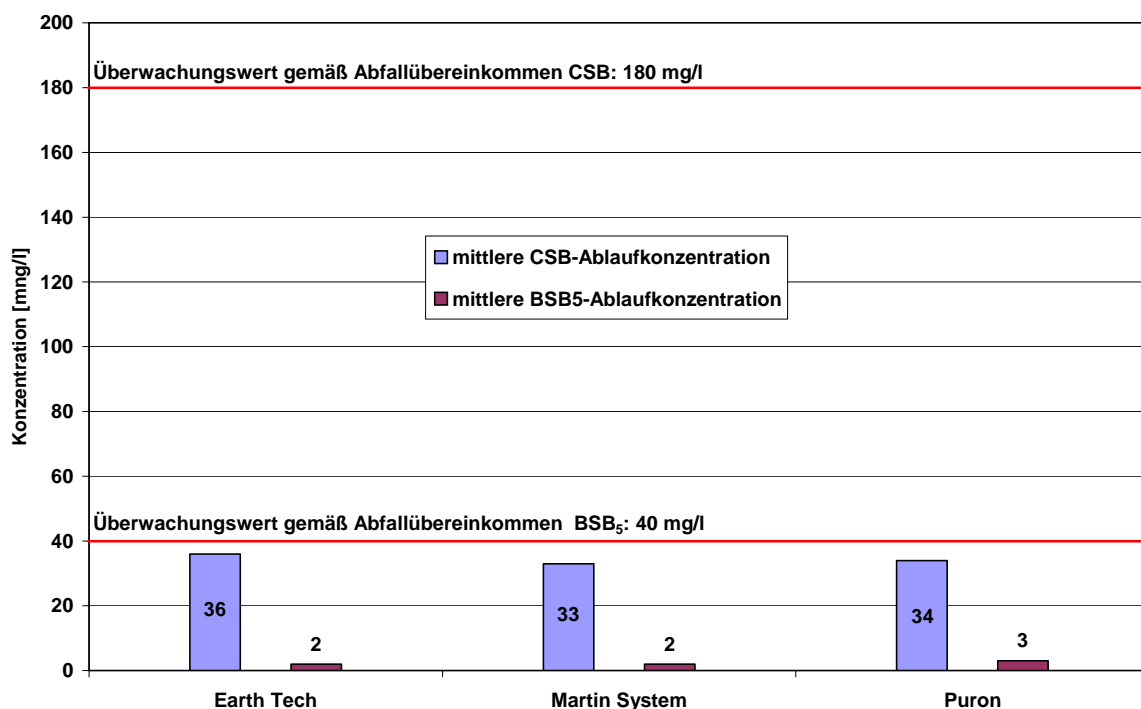
<sup>2)</sup> Auswertung der Analysenergebnisse des Praxistests (2003)  
(Betrachtung der Normalbetriebsphasen)

<sup>3)</sup> Auswertung der Analysenergebnisse des Eignungstests

<sup>4)</sup> vgl. Bemerkungen zu Tabelle 15

Die Eliminationsraten zur Kohlenstoffelimination waren bei allen drei Anlagen auf hohem Niveau. Durch nachträgliche Modifikationen bei der Umsetzung zu großtechnischen Anlagen kann davon ausgegangen werden, dass neben der geforderten Kohlenstoffelimination auch die Stickstoffelimination mit zufriedenstellender Eliminationsleistung als zusätzlicher Behandlungsschritt (sofern noch nicht geleistet) integriert werden kann. Die erreichten N-Eliminationsraten lagen im Bereich von 43% bis 66%, Eliminationsraten von 70% sind durchaus denkbar. Auch wenn eine erhöhte Reinigungsleistung wie Stickstoffelimination aus Umweltschutzgründen wünschenswert ist, sollte vorrangiges Ziel dennoch die Einhaltung der Anforderungen des Abfallübereinkommens bei gleichzeitiger größtmöglicher Berücksichtigung der (Platz-)Verhältnisse an Bord der Fahrgastschiffe sein.

Die durch das Abfallübereinkommen der ZKR gestellten Anforderungen an Bordkläranlagen für Fahrgastschiffe wurden von den drei getesteten Anlagen durchweg erfüllt, die Ablaufwerte lagen weit unter den geforderten Überwachungswerten. In folgender Abbildung sind die mittleren Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> den einzuhaltenden Grenzwerten gemäß dem Abfallübereinkommen gegenübergestellt.



**Abbildung 52: Gegenüberstellung mittlerer CSB- und BSB<sub>5</sub>-Ablaufkonzentrationen der untersuchten Pilotanlagen zu den Ablaufanforderungen des Abfallübereinkommens der ZKR**



Der Einsatz des Membranbelebungsverfahrens ermöglicht es zudem, auch die Grenzwerte gemäß den Empfehlungen der Donau-Kommission, die in Österreich für Fahrgastschiffe mit mehr als 10 Personenplätzen an Bord verbindlich sind, einhalten zu können. Die Grenzwerte sind in folgender Tabelle dargestellt.

**Tabelle 32: Grenzwerte von Bordkläranlagen für Fahrgastschiffe nach [10] im Vergleich zu mittleren Ablaufwerten der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH im Praxistest**

| Parameter                                       | Einheit    | Grenzwert | Beispiel<br>MS Asbach<br>(Normalbetrieb 2003) |
|---|------------|-----------|---|
| Coliforme Keime                                 | [1/100 ml] | 1.000     | 0   |
| AFS   | [mg/l]     | 50        | 4 <sup>1)</sup>                               |
| BSB <sub>5</sub><br>(mit Nitrifikationshemmung) | [mg/l]     | 50        | 2   |
| CSB   | [mg/l]     | 150       | 33  |

<sup>1)</sup> vgl. Bemerkungen zu Tabelle 15

Auf den Einsatz von Chlor zur Entkeimung des Abwassers kann verzichtet werden, so dass Punkt 3 des Anhang V des Abfallübereinkommens nicht verletzt wird. Gemäß diesem Punkt sind mechanisch-chemische Verfahren unter Einsatz von chlorhaltigen Mitteln zur Abwasserbehandlung auf Binnenschiffen nicht zugelassen.

Es ergibt sich hiermit eine Möglichkeit zur fachgerechten Abwasserbehandlung für die deutsche Fahrgastschiffahrt auf der Donau, die sowohl den Anforderungen gemäß dem Abfallübereinkommen der ZKR als auch den Empfehlungen der Donau-Kommission gerecht wird.

Vorraussetzung zur Einhaltung der Anforderungen an den Rückhalt von coliformen Keimen sind intakte Membrane mit ausreichender Trenngrenze. Während des Eignungstests mit der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik wurde der Grenzwert von 1.000/100ml deutlich unterschritten, während des Praxistests konnte das Ergebnis aber während der zweimaligen Keimbeprobung nicht mehr bestätigt werden. Inwieweit die Ursache auf eine Rückverkeimung der Probenahmestelle durch die Umgebungsluft im Maschinenraum, in den auch die Abluft geleitet wurde, zurückzuführen ist, konnte im Rahmen des Projekts nicht mehr geklärt werden.

Allein die Pilotanlage der Firma Puron AG kann mit dem derzeitigen Verfahrenskonzept aufgrund der auch während des Eignungstests gemessenen, sehr hohen Keim-

zahlen die genannten Anforderungen nicht erfüllen. Generell ist ein Einsatz dieser Pilotanlage als Bordkläranlage jedoch denkbar, da sie den Anforderungen der ZKR vollends genügt.

Die Praxistests auf der MS Asbach haben gezeigt, dass längere Stillstandszeiten nur wenig Einfluss auf die Kohlenstoffelimination hatten und die darauf folgenden Einfahrphasen sehr schnell wieder abgeschlossen werden konnten. Bis auf die Probenahme unmittelbar nach dem Membranaustausch bei der Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH wurde zu keiner Zeit eine Überschreitung der Überwachungswerte des Abfallübergrenzwertes der ZKR festgestellt.

In Tabelle 33 sind für die Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH die maximalen und mittleren Ablaufkonzentrationen sowie die mittleren Eliminationsraten, die sich für den Gesamtbetrieb ergeben, den entsprechenden Werten der Normalbetriebsphasen gegenübergestellt. Der Gesamtbetrieb umfasst neben den Normalbetriebsphasen auch die Einfahrphasen, die Betriebsphase mit defekten Membranen sowie die Probenahme während des Ausfalls der Rezirkulationspumpe.

**Tabelle 33: Gegenüberstellung maximaler und mittlerer Ablaufwerte sowie Eliminationsraten für den Gesamtbetrieb(\*) und für die Normalbetriebsphasen während des Praxistests im Jahr 2003 mit der Pilotanlage der Firma Martin System Engineering GmbH**

| Parameter                    | CSB <sub>hom</sub> | BSB <sub>5</sub> | N <sub>ges</sub> | N <sub>anorg</sub> | NH <sub>4</sub> -N |
|------------------------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| Maximale Ablaufkonzentration |                    |                  |                  |                    |                    |
| Gesamtbetrieb                | 130                | 52               | 151              | 131                | 52                 |
| Normalbetriebsphasen         | 47                 | 3                | 61               | 53                 | 53                 |
| Mittlere Ablaufkonzentration |                    |                  |                  |                    |                    |
| Gesamtbetrieb                | 49                 | 5                | 42,5             | 36,2               | 6,3                |
| Normalbetriebsphasen         | 33                 | 2                | 26,7             | 22,0               | 0,4                |
| Mittlere Eliminationsrate    |                    |                  |                  |                    |                    |
| Gesamtbetrieb                | 94,3               | 98,8             | 45,0             | -                  | -                  |
| Normalbetriebsphasen         | 96,2               | 99,4             | 66,0             | -                  | -                  |

(\*) Ablaufwerte unmittelbar nach Membranaustausch nicht berücksichtigt

Hinsichtlich der Kohlenstoffelimination ergeben sich bis auf die maximalen Ablaufkonzentrationen nur vernachlässigbar geringe Unterschiede. Die hohen Abweichungen der Maximalwerte lassen sich auch auf die defekten Membranen zurückführen

(vgl. Tabelle 14). Bezüglich der Stickstoffelimination ist der Einfluss der Einfahrphasen und der Stillstandszeiten deutlich erkennbar.

Dem Problem der hohen Ablaufkonzentrationen ( $CSB = 842 \text{ mg/l}$ ,  $BSB_5 = 627 \text{ mg/l}$ ) unmittelbar nach einem Membranaustausch kann beim späteren Einsatz von großtechnischen Anlagen konstruktiv begegnet werden. Denkbar ist eine Zwischenspeicherung des zur Anlage fließenden Abwassers und einer längeren Außerbetriebnahme der Filtration für den notwendigen Zeitbedarf einer biologischen Behandlung.

Beim zweiten Praxistest mit der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH waren die Unterschiede zwischen den Normalbetriebsphasen und dem Gesamtbetrieb (Einfahrphasen und Ausfall Beschickungspumpe) noch geringer, wie Tabelle 34 verdeutlicht.

**Tabelle 34: Gegenüberstellung maximaler und mittlerer Ablaufwerte sowie Eliminationsraten für den Gesamtbetrieb und für die Normalbetriebsphasen während des Praxistests im Jahr 2004 mit der Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH**

| Parameter                    | $CSB_{\text{hom}}$ | $BSB_5$ | $N_{\text{ges}}$ | $N_{\text{anorg}}$ | $NH_4\text{-N}$ |
|------------------------------|--------------------|---------|------------------|--------------------|-----------------|
| Maximale Ablaufkonzentration |                    |         |                  |                    |                 |
| Gesamtbetrieb                | 74                 | 4       | 308              | 303                | 72,0            |
| Normalbetriebsphasen         | 64                 | 4       | 72,0             | 69,2               | 69,0            |
| Mittlere Ablaufkonzentration |                    |         |                  |                    |                 |
| Gesamtbetrieb                | 40                 | 2       | 54,0             | 49,2               | 10,3            |
| Normalbetriebsphasen         | 36                 | 2       | 30,9             | 27,2               | 6,3             |
| Mittlere Eliminationsrate    |                    |         |                  |                    |                 |
| Gesamtbetrieb                | 97,8               | 99,7    | 52,2             | -                  | -               |
| Normalbetriebsphasen         | 98,2               | 99,8    | 74,6             | -                  | -               |

Allein durch die Stand-By Betriebsphasen kam es infolge von Schlammzersetzungprozessen zu hohen Stickstoffablaufkonzentrationen.

Generell liegt der Vorteil der Membrantechnik gegenüber herkömmlichen Verfahren für die Binnenschifffahrt vor allem in der platzsparenden Bauweise. Ein nachgeschaltetes Nachklärbecken zur Phasenseparation des Schlamm-Wassergemisches entfällt. Durch die Möglichkeit, eine höhere Biomassekonzentration im Belebungsbecken

einzustellen, kann das Beckenvolumen bei gleicher Schlammbelastung um bis zu 75% gegenüber konventionellen Anlagen reduziert werden [11].

Während bei konventionellen Anlagen der Trockensubstanzgehalt aus verfahrenstechnischen Gründen möglichst konstant gehalten werden muss (Schwankungsbreite  $\pm 1\text{g/l}$ ), um eine Überlastung des nachfolgenden Nachklärbeckens zu vermeiden, können die Schwankungsbreiten bei Membranbelebungsanlagen größer gewählt werden. Von den Anlagenherstellern Earth Tech Umwelttechnik GmbH und Martin Systems Engineering GmbH ist jeweils eine Speicherung des Überschussschlammes im Bioreaktor vorgesehen worden, ein separater Speichertank mit eigenen Vorrichtungen zur Frischhaltung des Überschussschlammes kann über die kurzen Fahrtzeiten entfallen. Bei Erreichen eines maximalen TS-Gehaltes erfolgt der Überschussschlammabzug direkt aus dem Bioreaktor. Die Steuerung des Sauerstoffeintrages über eine Sauerstoffmesssonde garantiert bei dieser Verfahrensweise eine ausreichende Belüftung des Belebtschlammes zu jeder Zeit.

Da die Trennung des Belebtschlamm-Wasser-Gemisches beim Membranbelebungsverfahren weitgehend unabhängig von den Absetzeigenschaften des Belebtschlammes ist, wird die Abwasserreinigung nicht durch das Auftreten von Fadenbakterien bzw. durch Bläh- und Schwimmschlamm Bildung beeinträchtigt.

Tägliche oder wöchentliche Kontrollen können allein auf ein Kontrollieren der Aggregate reduziert werden, die Überprüfung des Schlammabsetzverhaltens entfällt.

Die Steuerungsschranke der Pilotanlagen der Firmen Martin Systems Engineering GmbH und Earth Tech Umwelttechnik GmbH wurden so ausgelegt, dass durch grüne Betriebsleuchten der ordnungsgemäße Betrieb des jeweiligen Aggregates (Belüftungsgebläse, Zulauf- und Permeatpumpe usw.) angezeigt und durch eine entsprechende rote Signalleuchte Störungen gemeldet wurden. Diese Konzeption ermöglichte es auch dem fachunkundigen Bordpersonal, den Betriebszustand der Anlage auf einfache Weise zu kontrollieren.

Wartungs- und Reparaturarbeiten sind jedoch von Fachkräften vorzunehmen. Es empfiehlt sich zu diesem Zweck, Wartungsverträge abzuschließen.

Wie die Untersuchungen zur Permeabilität (vgl. Tabelle 21 und Tabelle 30) gezeigt haben, empfiehlt es sich zur Gewährleistung des Betriebs der Membrantrennstufe die Membranfilterfläche mit ausreichenden Sicherheiten zu dimensionieren und gegeb-

nenfalls im Vergleich zu Landanlagen mit geringeren Fluxraten zu kalkulieren. Eine dadurch mögliche Reduzierung notwendiger Wartungen (Membranreinigung) berücksichtigt zusätzlich die Einsatzzeiten bzw. kann zu geringeren Liegezeiten von Fahrgastschiffen führen.

### **Gewässerbelastung durch die Fahrgastschiffahrt**

Zur Beurteilung der von Fahrgastbinnenschiffen ausgehenden Gewässerbelastungen soll im Folgenden beispielhaft für das Fahrgastschiff MS Asbach Frachtberechnungen eingeleiteter Frachten mit und ohne Abwasserbehandlung für die Jahre 2003 (Praxistest mit Pilotanlage der Firma Martin System Engineering GmbH) und 2004 (Praxistest mit Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH) vorgestellt werden.

Als Berechnungsgrundlagen werden folgende Größen herangezogen:

- Mittlerer Wasserverbrauch an Bord der MS Asbach für die Jahre 2003 und 2004 aus Abbildung 37 und Abbildung 38.
- Mittlere Zulaufkonzentrationen an Bord der MS Asbach für die Jahre 2003 und 2004. Für das Jahr 2003 werden die gemessenen Zulaufkonzentrationen aus den Normalbetriebsphasen des Praxistests herangezogen, für das Jahr 2004 die gemessenen Zulaufkonzentrationen aus dem Fäkaliensammeltank gemäß Tabelle 12 (vgl. auch dortige Begründung).
- Mittlere Eliminationsleistungen der Pilotanlagen der Firmen Martin Systems Engineering GmbH und Earth Tech Umwelttechnik GmbH für die Normalbetriebsphasen.
- Saisondauer von 210 Tagen.

Vorausgesetzt, dass das verwendete Brauch- und Frischwasser komplett dem Entsorgungssystem der MS Asbach zugeleitet wird, ergeben sich folgende, in Tabelle 35 dargestellte, jährliche Abwasservolumenströme.

**Tabelle 35: Ermittlung der jährlichen Abwasservolumenströme an Bord der MS Asbach anhand der Einsatzdauer und der mittleren täglichen Wasserverbräuche für die Jahre 2003 und 2004**

|                                   |                     | Fahrtsaison<br>2003 | Fahrtsaison<br>2004 |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Einsatzdauer Schiff (Fahrtsaison) | [d/a]               | 210                 | 210                 |
| Mittlerer Wasserverbrauch         | [m <sup>3</sup> /d] | 10,9                | 10,0                |
| Abwasservolumenstrom              | [m <sup>3</sup> /a] | 2.289               | 2.100               |

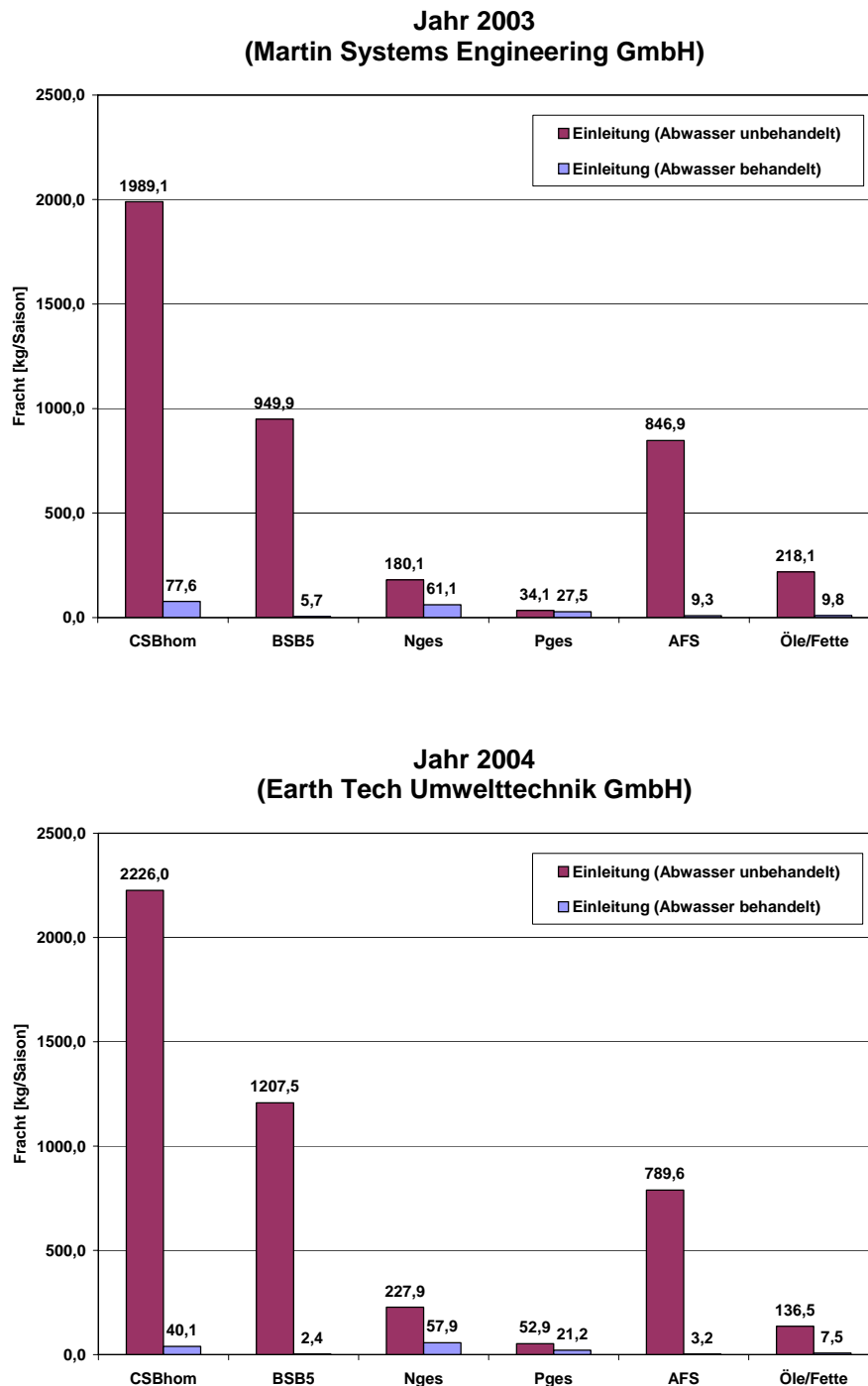
Ausgehend von den jährlichen Volumenströmen und den mittleren Abwasserkonzentrationen ergeben sich folgende mittlere jährliche Einleitfrachten, wenn das Abwasser unbehandelt in den Rhein eingeleitet wird.

**Tabelle 36: Mittlere jährliche Frachten der MS Asbach bei unbehandelter Einleitung des Abwassers**

|                          | Mittlere<br>Konzentration | Mittlerer Abwasser-<br>volumenstrom | Mittlere<br>Fracht |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------|
|                          | [mg/l]                    | [m <sup>3</sup> /a]                 | [kg/a]             |
| <b>Jahr 2003</b>         |                           |                                     |                    |
| <b>CSB<sub>hom</sub></b> | <b>869</b>                | <b>2.289</b>                        | <b>1.988,1</b>     |
| <b>BSB<sub>5</sub></b>   | <b>415</b>                |                                     | <b>949,4</b>       |
| <b>N<sub>ges</sub></b>   | <b>78,7</b>               |                                     | <b>180,1</b>       |
| <b>P<sub>ges</sub></b>   | <b>14,9</b>               |                                     | <b>34,1</b>        |
| <b>AFS</b>               | <b>370</b>                |                                     | <b>846,2</b>       |
| <b>Öle/Fette</b>         | <b>95,3</b>               |                                     | <b>218,0</b>       |
| <b>Jahr 2004</b>         |                           |                                     |                    |
| <b>CSB<sub>hom</sub></b> | <b>1.060</b>              | <b>2.100</b>                        | <b>2.226,0</b>     |
| <b>BSB<sub>5</sub></b>   | <b>575</b>                |                                     | <b>1.207,5</b>     |
| <b>N<sub>ges</sub></b>   | <b>108,5</b>              |                                     | <b>227,9</b>       |
| <b>P<sub>ges</sub></b>   | <b>25,2</b>               |                                     | <b>52,9</b>        |
| <b>AFS</b>               | <b>376</b>                |                                     | <b>789,6</b>       |
| <b>Öle/Fette</b>         | <b>65,0</b>               |                                     | <b>136,5</b>       |

Auf Basis von 60 g BSB<sub>5</sub>/(E\*d) entsprechen die eingeleiteten BSB<sub>5</sub>-Frachten etwa 75 Einwohner- (Jahr 2003) bzw. etwa 95 Einwohnergleichwerten (Jahr 2004).

Werden nun für die Pilotanlagen der Firmen Martin Systems Engineering GmbH und Earth Tech Umwelttechnik GmbH die ermittelten mittleren Eliminationsraten aus Tabelle 31 herangezogen, ergeben sich folgende Reststofffrachten bzw. Frachtreduzierungen wie sie in Abbildung 53 dargestellt sind.



**Abbildung 53: Mittlere jährliche Einleitfrachten der MS Asbach bei unbehandeltem bzw. bei behandeltem Abwasser**

Bezogen auf die Gesamteinleitungen in den Rhein vermag die Gewässerbelastung durch die Fahrgastschifffahrt gering erscheinen. Im Hinblick auf die Anstrengungen und Anforderungen, die im Bereich der dezentralen Abwasserbehandlung unternommen und gestellt werden, ist der Zustand der Einleitung unbehandelter Abwässer in der heutigen Zeit allerdings nicht mehr vertretbar.

Mit Blick auf die realisierbaren Frachtreduzierungen durch Bordkläranlagen sind daher die von der Zentralkommission getroffenen Maßnahmen im Abfallübereinkommen zu begrüßen.



## 8 Darstellung der Möglichkeiten zur großtechnischen Umsetzung und wirtschaftliche Betrachtung von Bordkläranlagen

In Tabelle 37 sind die von den Anlagenherstellern angegebenen Baukosten der Pilotanlagen dargestellt. Der Aufwand, der die Fördersumme von 35.000 € überstieg, wurde von den Anlagenherstellern als Eigenanteil übernommen.

**Tabelle 37: Herstellungskosten der untersuchten Pilotanlagen**

| Anlagenhersteller               | Baukosten Pilotanlage |
|---------------------------------|-----------------------|
| Delphin Umwelttechnik GmbH      | 28.000 €              |
| Earth Tech Umwelttechnik GmbH   | 88.820 €              |
| Martin Systems Engineering GmbH | 46.620 €              |
| Puron AG                        | 47.500 €              |

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den getesteten Pilotanlagen um Prototypen (Einzelstücke) handelt, können die Preisangaben nur bedingt für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung herangezogen werden. Beachtet werden muss, dass die Anlagen einerseits nur auf einen Teilstrom des anfallenden Abwassers an Bord ausgelegt wurden, andererseits über eine verfeinerte Messtechnik verfügten, die in diesem Rahmen nicht für großtechnische Anlagen notwendig ist.

Nach Beendigung der Praxistests wurden daher jeweils in Zusammenarbeit mit den Anlagenherstellern Martin Systems Engineering GmbH und Earth Tech Umwelttechnik GmbH anhand der gewonnenen Erkenntnisse Lösungsmöglichkeiten für eine großtechnische Umsetzung einer Abwasserbehandlungsanlage an Bord der MS Asbach erarbeitet. Als Bemessungsgröße wurde ein mittlerer Abwasservolumenstrom von 12 m<sup>3</sup>/d herangezogen.

Anschließend wurden die Unternehmen gebeten, Richtpreisangebote einzureichen. Neben den oben genannten Projektpartnern wurde zusätzlich ein Richtpreisangebot von der Firma Aggerwasser GmbH eingereicht, nachdem das Projekt auf einer Tagung zur Membrantechnik vorgestellt wurde.

Es bieten sich 2 Varianten an, wobei Variante 1 die Herstellung einer großtechnischen Umsetzung der Pilotanlage darstellt. In Variante 2 wird der vorhandene vordere Abwassersammeltank als Bioreaktor in die neu zu bauende Bordkläranlage integriert und nur eine separate Membranfilterkammer an den jetzigen Stellplatz der Pilotanlage im vorderen Maschinenraum eingebaut.

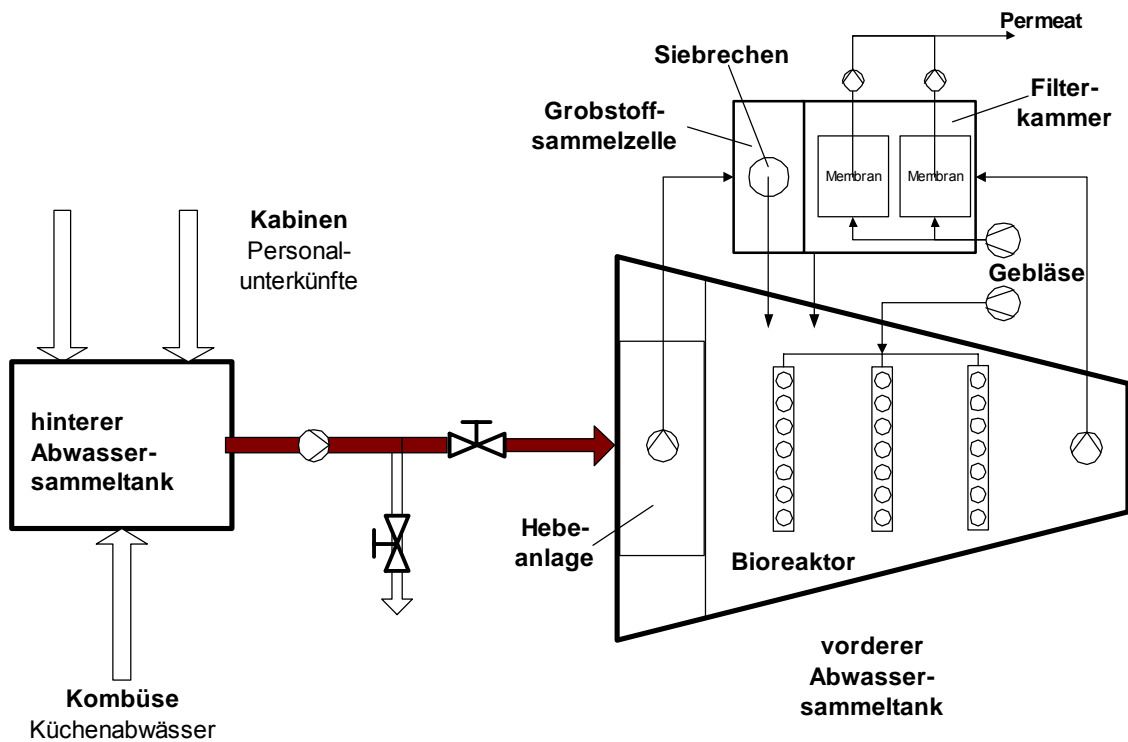
Die Integration einer vollständigen Anlage, wie in Variante 1 vorgesehen, wurde aufgrund der vorhandenen Platzverhältnisse als sehr problematisch angesehen und daher auch von den Unternehmen nicht weiter verfolgt. Allein die Firma Martin Systems Engineering GmbH schätzt die Mehrkosten für Variante 1 im Vergleich zu den Kosten aus Variante 2 (vgl. Tabelle 38) in Höhe von 30.000 € ab.

Bei Variante 2 wird der vorhandene vordere Abwassersammeltank umgerüstet und in eine Vorlage mit Hebeanlage und einen Bioreaktor unterteilt. Die Verfahrensweisen der drei angebotenen technischen Umsetzungen weichen nur geringfügig voneinander ab, so dass auf detaillierte Beschreibungen verzichtet und nur die generelle Verfahrensweise vorgestellt wird.

Die Beschickung vom hinteren Abwassersammeltank bleibt bestehen, dass Abwasser wird vor dem Zulauf zum Bioreaktor über einen Feinrechen vorgereinigt und die zurückbleibenden Feststoffe in einer Grobstoffsammelzelle gespeichert. Die Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH sieht keinen Rechen sondern eine Beschickungspumpe mit Schneidwerk zum Bioreaktor vor. Über eine im Bioreaktor integrierte Rezirkulationspumpe wird der Belebtschlamm in die Filterkammer gepumpt und umgewälzt. Die Trennung des gereinigten Abwassers vom Belebtschlamm erfolgt in der Filterkammer mit der Membranfiltrationsstufe. Überschussschlamm wird im Bioreaktor durch Aufkonzentrierung gespeichert und ist in regelmäßigen Abständen mit dem Primärschlamm abzugeben.

In Abbildung 54 ist das Prinzip für Variante 2 nach den Angaben der Firma Martin Systems Engineering GmbH dargestellt.

## Draufsicht



## Seitenansicht der Bordkläranlage

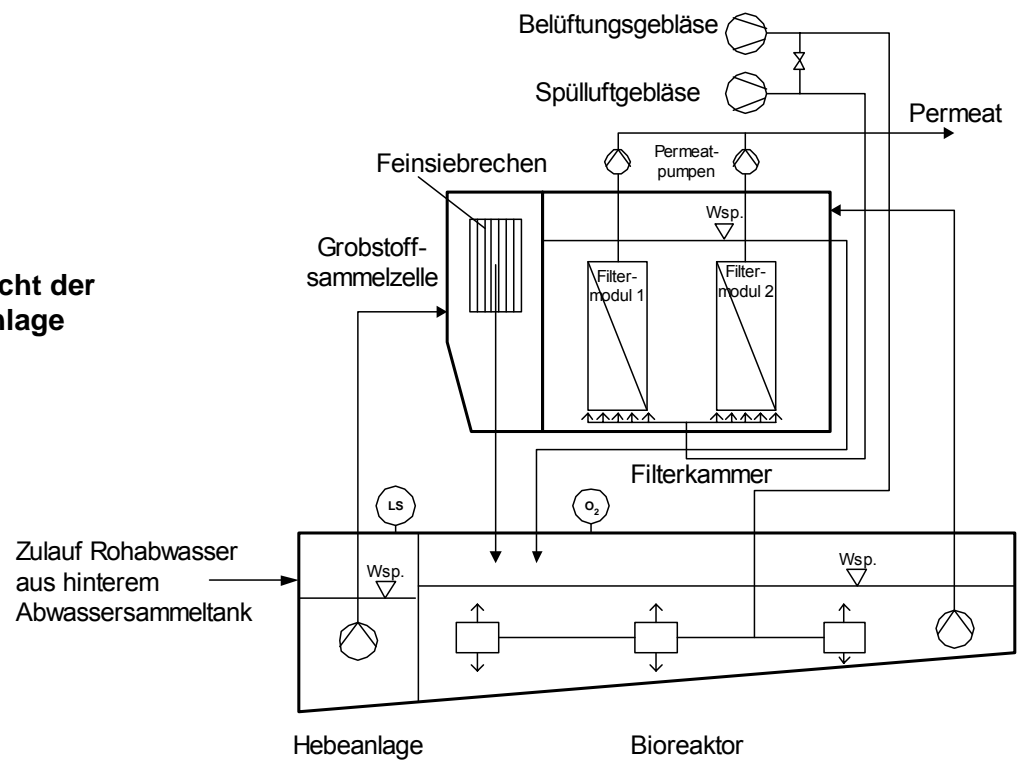


Abbildung 54: Großtechnische Umsetzung einer Bordkläranlage auf der MS Asbach (Variante 2)

In Tabelle 38 sind die von den Unternehmen genannten Richtpreise dargestellt.

**Tabelle 38: Richtpreisangebote zur großtechnischen Umsetzung einer Bordkläranlage auf der MS Asbach**

| <b>Leistungsbeschreibung</b>  | <b>Richtpreis<br/>Martin Systems<br/>Engineering<br/>GmbH</b> | <b>Richtpreis<br/>Earth Tech<br/>Umwelttechnik<br/>GmbH</b> | <b>Richtpreis<br/>Aggerwasser<br/>GmbH</b> |
|---|---|---|--|
| <b><u>Anlagenkosten:</u></b><br>Maschinentechnische Ausrüstung:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Filterkammer mit Membranmodulen</li> <li>• Elektrische Steuerung</li> <li>• Permeatpumpen</li> <li>• Zulauf- und Rezirkulationspumpe</li> <li>• Membranbelüfter</li> <li>• Verrohrung</li> <li>• Messtechnik</li> </ul> | 73.000 €  | gesamt<br>110.400 €   | gesamt<br>99.000 €                         |
| <b><u>Werftleistungen:</u></b><br><b>(Kosten Anlageneinbau)</b><br>Fundamentierung, Rohränänderungen<br>und Durchführungen<br>Anpassen Fäkalienzelle<br>Elektroanschluss  | 20.000 €  |   |  |
| <b>Gesamt</b>   | <b>93.000 €</b>   | <b>110.400 €</b>  | <b>99.000 €</b>                            |

Die Investitionskosten belaufen sich zwischen 93.000 € und 110.400 €. Folgende Anmerkungen sind bezogen auf die Richtpreisangebote zu machen:

Aufgrund der Erfahrung der Firma Martin Systems Engineering GmbH mit der Ausstattung von Schiffen mit Bordkläranlagen wurden von dieser Firma die Investitionskosten in Anlagenkosten und Kosten Anlageneinbau (zu erbringende Werftleistung) unterteilt. Die Firmen Earth Tech Umwelttechnik GmbH und Aggerwasser GmbH haben aufgrund zurzeit noch fehlender Detailkenntnisse die Werftleistungskosten im Rahmen der Richtpreisangebotserstellung nicht separat ausgewiesen und in die Anlagengesamtkosten mit einbezogen.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich bei den genannten Kosten allein um Richtpreise handelt, die zur Orientierung der Größenordnung erforderlicher

Investitionen dienen sollen. Ein direkter Kostenvergleich ist vor diesem Hintergrund nicht sinnvoll.

Neben den Investitionskosten sind weiterhin jährliche Betriebskosten zu berücksichtigen. Aufgrund der heute noch sehr geringen Datengrundlage können nur bedingt konkrete Aussagen zu einzelnen Kostenpunkten getroffen werden. Folgende Punkte werden bei den Betriebskosten berücksichtigt:

- Reparaturkosten mit pauschal 1.000 € pro Jahr.

**Reparaturkosten: 1.000 €/a**

- **Wartungs- und Betriebsmittelkosten** gemäß Angaben der drei Anbieter. Die Kosten umfassen sowohl Personal- als auch Reisekosten für die Wartungen.

|                       | Martin Systems Engineering GmbH | Earth Tech Umwelttechnik GmbH | Aggerwasser GmbH |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------|
| <b>Wartungskosten</b> | gesamt                          | 1.600 €                       | 1.800 €          |
| <b>Betriebsmittel</b> | 3.000 €                         | 100 €                         | 750 €            |
| <b>Gesamt</b>         | <b>3.000 €/a</b>                | <b>1.700 €/a</b>              | <b>2.550 €/a</b> |

- **Membranersatzkosten** gemäß untenstehender Übersicht bezogen auf Angaben der drei Anbieter bzgl. eingesetzter Membranfilterfläche und Membranersatzkosten. Es wird allgemein von einer Membranstandzeit von 5 Jahren ausgegangen. Es wird davon ausgegangen, dass in der angegebenen Standzeit die Membranfilterfläche einmal komplett ausgetauscht werden muss.

|  | Martin Systems Engineering GmbH | Earth Tech Umwelttechnik GmbH | Aggerwasser GmbH  |
|--|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| <b>eingesetzte Membranfilterfläche</b> | 96 m <sup>2</sup>               | 35 m <sup>2</sup>             | 30 m <sup>2</sup> |
| <b>Standzeit</b>                       | 5 Jahre                         | 5 Jahre                       | 5 Jahre           |
| <b>durchschnittliche Jahreskosten</b>  | <b>1.536 €/a</b>                | <b>2.500 €/a</b>              | <b>480 €/a</b>    |

- **Energiekosten** gemäß den Erfahrungswerten zum Energieverbrauch von Membrankläranlagen der drei Anbieter. Berücksichtigt wird, dass während des

Schiffbetriebes auf Bordstrom zurückgegriffen werden kann, der keine zusätzlichen Kosten verursacht. Der Schiffsbetrieb wird mit 12 h/d angenommen. Die Betriebsdauer der Anlage wird mit 365 Tagen angenommen. Außerhalb der Saison wird die Anlage im Stand-By Betrieb (Belüftung Bioreaktor) gefahren und es kann nicht auf Bordstrom zurückgegriffen werden. Es wird angenommen, dass der Energieverbrauch im Stand-By Betrieb bei 50 % des Energieverbrauchs des Normalbetriebs liegt, so dass über das Jahr betrachtet pro Tag die gleiche Zahl Kilowattstunden aus dem Stromversorgungsnetz entnommen werden muss.

Die Kosten beruhen weiterhin auf folgenden Grundlagen:

Preis pro kWh: 0,10 €  
mittl. Abwasseranfall: 2.200 m<sup>3</sup>/a

|   |                                | Martin Systems Engineering GmbH | Earth Tech Umwelttechnik GmbH | Aggerwasser GmbH |
|---|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------|
| <b>Energieverbrauch</b><br>Erfahrungswerte Anbieter | kWh/m <sup>3</sup><br>Abwasser | 2 – 4                           | 2 – 4                         | 1 – 1,5          |
| <b>mittl. Energieverbrauch (gewählt)</b>            | kWh/m <sup>3</sup><br>Abwasser | 3                               | 3                             | 1,25             |
| <b>Energiekosten</b>                                | €/a                            | 660                             | 660                           | 275              |

Kosten zur Klärschlamm Entsorgung werden später separat betrachtet, in Tabelle 39 sind die bisherigen Betriebskosten zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 39: Übersicht der Betriebskosten**

|   | Martin Systems Engineering GmbH | Earth Tech Umwelttechnik GmbH | Aggerwasser GmbH |
|---|---------------------------------|-------------------------------|------------------|
| <b>Reparaturkosten</b>                    | 1.000 €/a                       | 1.000 €/a                     | 1.000 €/a        |
| <b>Wartungs- und Betriebsmittelkosten</b> | 3.000 €/a                       | 1.700 €/a                     | 2.550 €/a        |
| <b>Membranersatzkosten</b>                | 1.536 €/a                       | 2.500 €/a                     | 480 €/a          |
| <b>Energiekosten</b>                      | 660 €/a                         | 660 €/a                       | 275 €/a          |
| <b>Gesamt</b>                             | <b>6.196 €/a</b>                | <b>5.860 €/a</b>              | <b>4.305 €/a</b> |

Die angesetzt bzw. zum Teil angenommenen Betriebskosten schwanken zwischen 4.300 € bis 6.200 €. Größte Differenz stellen dabei die Membranersatzkosten mit über 2.000 € dar. Für die Betriebskosten gelten die gleichen Aussagen wie die für die Investitionskosten (vgl. Anmerkungen zu Tabelle 38). Inwieweit die Differenzen zwischen den Betriebskosten als realistisch angesehen werden können, ist zum jetzigen Zeitpunkt schwer zu beurteilen.

Für einen anschließenden Vergleich werden die einzelnen Kosten für unterschiedliche Nutzungszeiträume von 5 bis 15 Jahren nach der Barwertmethode für den Zeitpunkt der Bordkläranlagenanschaffung (Zeitpunkt  $t = 0$ ) berechnet. Der angesetzte Zinssatz beträgt 3%, zusätzlich ist eine jährliche Preissteigerungsrate von 1% berücksichtigt worden. Die Berechnungen sind in Tabelle 40 zusammengefasst.

**Tabelle 40: Aufwendungen zum Zeitpunkt der Bordkläranlagenbeschaffung (Projektkostenbarwerte PKBW; Zeitpunkt  $t = 0$ ) ohne Klärschlamm Entsorgungskosten**

|  | Martin Systems Engineering | Earth Tech Umwelttechnik | Aggerwasser      |
|--|----------------------------|--------------------------|------------------|
|  | <b>Zeitraum 5 Jahre</b>    |                          |                  |
| Projektkostenbarwert<br><i>Anlagenbau und Einbau</i> | 93.000 €                   | 110.400 €                | 99.000 €         |
| Projektkostenbarwert<br><i>Betrieb</i>               | 29.222 €                   | 27.637 €                 | 20.303 €         |
| <b>Projektkostenbarwert<br/>Gesamt</b>               | <b>122.222 €</b>           | <b>138.037 €</b>         | <b>119.303 €</b> |
|  | <b>Zeitraum 10 Jahre</b>   |                          |                  |
| Projektkostenbarwert<br><i>Anlagenbau und Einbau</i> | 93.000 €                   | 110.400 €                | 99.000 €         |
| Projektkostenbarwert<br><i>Betrieb</i>               | 55.714 €                   | 52.693 €                 | 38.710 €         |
| <b>Projektkostenbarwert<br/>Gesamt</b>               | <b>148.714 €</b>           | <b>163.093 €</b>         | <b>137.710 €</b> |
|  | <b>Zeitraum 15 Jahre</b>   |                          |                  |
| Projektkostenbarwert<br><i>Anlagenbau und Einbau</i> | 93.000 €                   | 110.400 €                | 99.000 €         |
| Projektkostenbarwert<br><i>Betrieb</i>               | 79.732 €                   | 75.408 €                 | 55.398 €         |
| <b>Projektkostenbarwert<br/>Gesamt</b>               | <b>172.732 €</b>           | <b>185.808 €</b>         | <b>154.398</b>   |

Zinssatz:3%; Preissteigerungsrate 1% /a

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Bordkläranlagenbetriebs wurden alternativ zu den Investitions- und Betriebskosten die Kostenaufwendungen ermittelt, die anfallen, wenn die Abwässer an Bord gesammelt und an Land abgegeben werden müssen. Da zurzeit am Rhein ein dichtes Entsorgungsnetz fehlt, werden die entstehenden Entsorgungskosten herangezogen, die anfallen, wenn die Abwässer, ähnlich wie bei Abwassersammelgruben, durch Pumpwagen entsorgt werden müssen.

Wie in folgender Tabelle gezeigt wird, variieren diese Entsorgungskosten regional sehr stark. Zur Abschätzung der Entsorgungskosten wurden von den Entwässerungs- bzw. Kanalbetrieben der Städte Köln, Düsseldorf und Koblenz die Entsorgungsgebühren eingeholt.

**Tabelle 41: Kosten der Abwasserentsorgung durch Pumpwagen für ausgewählte Städte am Rhein**

| Stadt           | Entsorgungskosten durch Pumpwagen pro m <sup>3</sup> Abwasser |
|-----------------|---|
| Köln [12]       | 27,40 €   |
| Düsseldorf [13] | 10,50 €   |
| Koblenz [14]    | 1,95 €  |

Die Entsorgungskosten für die Stadt Düsseldorf setzten sich zusammen aus

- An- und Abfahrt 40,- € (pauschal),
- Arbeitsaufwand ½ Stunde 50,- €,
- Entsorgungsgebühr 7,50 €/ m<sup>3</sup> Abwasser,

so dass sich für eine Tankentleerung von 30 m<sup>3</sup> Abwasser (entspricht dem vorderen Volumen des Sammel tanks) ein mittlerer Preis von 10,50 €/ m<sup>3</sup> Abwasser ergibt. Die Entsorgungskosten der Städte Köln und Koblenz beziehen sich direkt auf den Kubikmeterpreis. Auf Basis der mitgeteilten Kosten ergeben sich nach der Barwertmethode für die MS Asbach bei einem mittleren jährlichen Wasserverbrauch von 2.200 m<sup>3</sup> die in Tabelle 42 dargestellten Aufwendungen für den Zeitpunkt t = 0. Der angesetzte Zinssatz beträgt analog zu den Berechnungen aus Tabelle 40 auch 3%, weiter ist wieder eine jährliche Preissteigerungsrate von 1% berücksichtigt worden.



**Tabelle 42: Aufwendungen zum Zeitpunkt  $t = 0$  zur Abwasserentsorgung mittels Pumpwagen für ausgewählte Städte am Rhein und unterschiedliche Nutzungszeiträume**

| Stadt   | Köln      | Düsseldorf | Koblenz  |
|---|-----------|------------|----------|
| Preis/ m <sup>3</sup> Abwasser                          | 27,40 €   | 10,50 €    | 1,95 €   |
| Kosten/ a<br>(Wasserverbrauch 2.200 m <sup>3</sup> / a) | 60.280 €  | 23.100 €   | 4.290 €  |
| Zeitraum: 5 Jahre                                       | 284.293 € | 108.944 €  | 20.232 € |
| Zeitraum: 10 Jahre                                      | 542.032 € | 207.713 €  | 38.575 € |
| Zeitraum: 15 Jahre                                      | 775.701 € | 297.258 €  | 55.205 € |

Zinssatz: 3%; Preissteigerungsrate: 1% /a

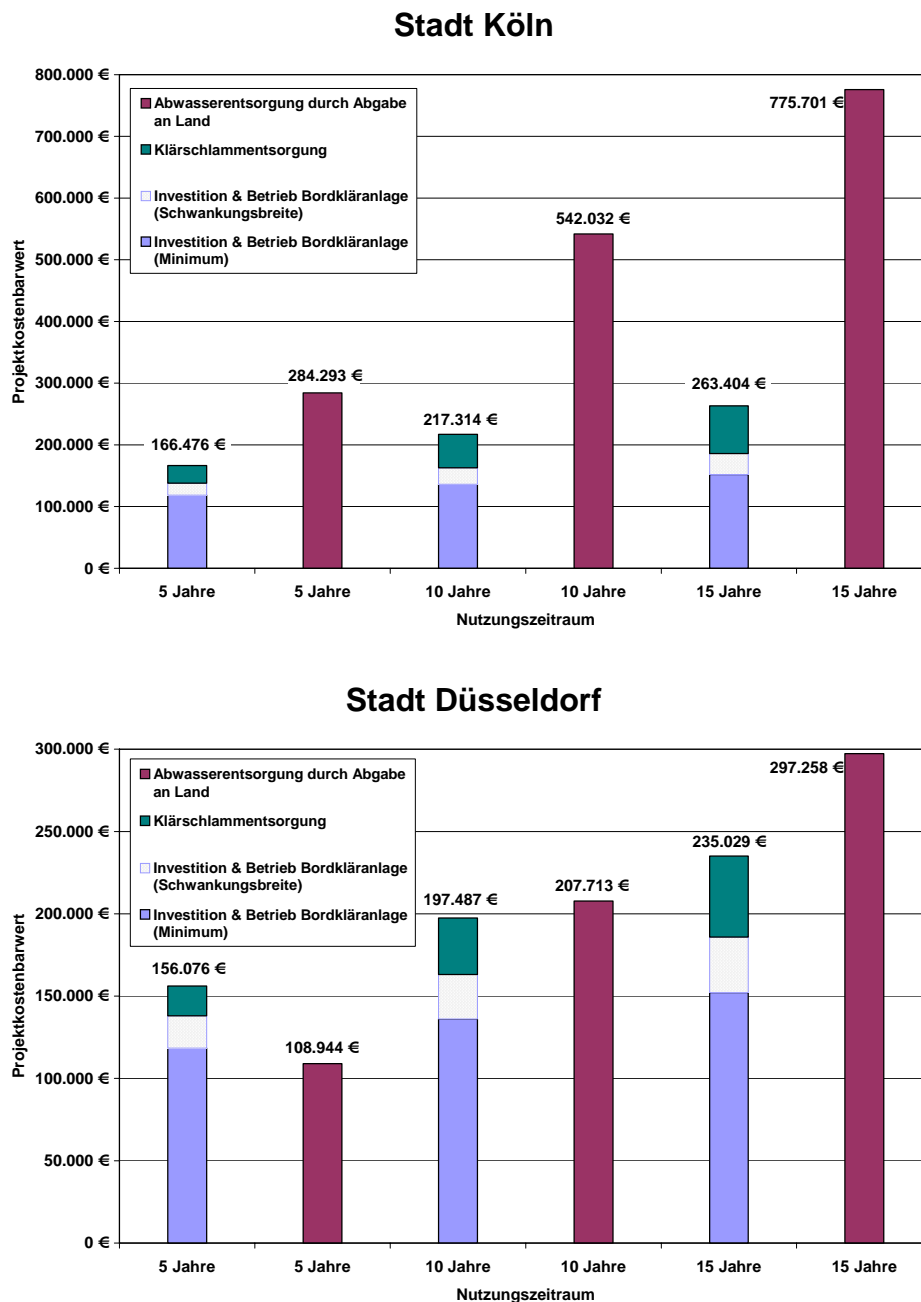
In der gleichen Art wurden auch die erforderlichen Aufwendungen für die Klärschlamm Entsorgung ermittelt. Der jährliche Klärschlammfall (Primär- und Sekundärschlamm) an Bord der MS Asbach wurde mit 150 m<sup>3</sup> angesetzt. Anhand der von den Städten mitgeteilten Entsorgungsgebühren (Zeile 2 in Tabelle 43) lassen sich folgende Aufwendungen zur Klärschlammabgabe an Land nach der Barwertmethode berechnen.

**Tabelle 43: Aufwendungen zum Zeitpunkt  $t = 0$  zur Klärschlamm Entsorgung mittels Pumpwagen für ausgewählte Städte am Rhein und unterschiedliche Nutzungszeiträume**

| Stadt   | Köln     | Düsseldorf | Koblenz  |
|---|----------|------------|----------|
| Preis/ m <sup>3</sup>                                 | 40,20 €  | 25,50 €    | 25,56 €  |
| Kosten/ a<br>(Klärschlammfall 150 m <sup>3</sup> / a) | 6.030 €  | 3.825 €    | 3.834 €  |
| Zeitraum: 5 Jahre                                     | 28.439 € | 18.039 €   | 18.082 € |
| Zeitraum: 10 Jahre                                    | 54.221 € | 34.394 €   | 34.475 € |
| Zeitraum: 15 Jahre                                    | 77.596 € | 49.221 €   | 49.337 € |

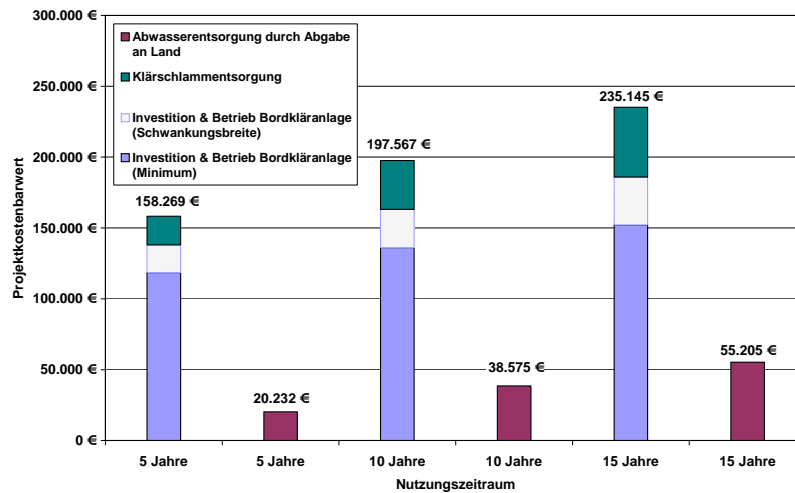
Zinssatz: 3%; Preissteigerungsrate: 1% /a

Zum abschließenden Vergleich sind für die ausgewählten Städte die Gesamtkostenaufwendungen (Kostenbarwerte) der verschiedenen Verfahrensweisen „**Abwasserbehandlung an Bord**“ unter Verwendung einer Bordkläranlage und „**Abwasserabgabe an Land**“ in Abbildung 55 gegenübergestellt. Die unterschiedlichen Kostenbarwerte der drei Bordkläranlagen wurden zusammengefasst und als minimaler Kostenbarwert plus Schwankungsbreite (Differenz zwischen Maximum- und Minimum) dargestellt.



**Abbildung 55: Vergleich der Gesamtaufwendungen zum Zeitpunkt  $t = 0$  für eine Abwasserbehandlung an Bord bzw. Abwasserabgabe an Land für ausgewählte Städte entlang des Rheins**

## Stadt Koblenz



### Fortsetzung

**Abbildung 55: Vergleich der Gesamtaufwendungen zum Zeitpunkt  $t = 0$  für eine Abwasserbehandlung an Bord bzw. Abwasserabgabe an Land für ausgewählte Städte entlang des Rheins**

Wie bereits die variierenden Entsorgungskosten aus Tabelle 41 zeigten, ist auf Grundlage der vorgestellten Berechnungen die Wirtschaftlichkeit einer Bordkläranlage stark vom regionalen Einsatz des Fahrgastschiffs bestimmt, wenn alternativ das Abwasser nicht behandelt, sondern an Land über Pumpwagen entsorgt werden soll.

Bei einer Entsorgung des gespeicherten Abwassers durch Pumpwagen in der Stadt Köln ergeben sich bereits für kurze Nutzungszeiträume (5 Jahre) von Bordkläranlagen deutliche Einsparungen von über 110.000 €. Für längere Zeiträume (bis 15 Jahre) reichen die Einsparungen bis hin zu 510.000 €. In der Stadt Düsseldorf ist die Abwasserabgabe an Land für kürzere Zeiträume wiederum preisgünstiger, bei längerer Nutzungsdauer (ab 10 Jahre) kann eine Bordkläranlage rentabler sein.

Im Hinblick auf die Gebührengestaltung in der Stadt Koblenz stellt die Abwasserbehandlung durch Bordkläranlagen eine äußerst unwirtschaftliche Lösung dar, da bei den getroffenen Berechnungsansätzen allein die Aufwendungen zur Klärschlamm-entsorgung nur 450 € im Jahr weniger betragen würden als die Aufwendungen zur Abwasserabgabe an Land.

Insgesamt muss bei dem Vergleich der Abwasserbehandlung an Bord mit der Abwasserabgabe an Land berücksichtigt werden, inwieweit die Entsorgung durch Pumpwagen und die damit verbundenen Entsorgungsgebühren als realistische Mög-

lichkeit der Abwasserentsorgung für Fahrgastbinnenschiffe anzusehen sind. Wesentliche Voraussetzungen zur Abwasserentsorgung durch Pumpwagen in den Städten sind dort vorhandene freie Kapazitäten zur Weiterbehandlung und die Bereitschaft der Städte, Abwässer und Klärschlämme von Fahrgastschiffen anzunehmen. Inwiefern die angesetzten Entsorgungsgebühren auch für die Fahrgastschiffahrt gelten werden, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht mit Bestimmtheit gesagt werden. Im Abfallübereinkommen der ZKR ist geregelt, dass die Kosten für die Annahme und Entsorgung von häuslichem Abwasser und Klärschlamm dem Schiffsführer gesondert angelastet werden können.

Werden an Hauptliegeplätzen feste Übernahmestellen mit direkter Anbindung zu den städtischen Abwasserkanälen geplant, ist eine deutliche Reduzierung der Gebühren wie beispielsweise in den Städten Köln und Düsseldorf wahrscheinlich. Der Betrieb einer Bordkläranlage wäre dann allein aus den oben aufgestellten wirtschaftlichen Betrachtungen nicht mehr rentabel. Neben dieser Kostenbetrachtung wäre allerdings darüber hinaus zu betrachten, ob der Schiffsbetrieb wie z.B. die Fahrplangestaltung bei Verwendung einer Bordkläranlage flexibler gestaltet und der Zeitaufwand zur Bereitstellung des Schiffeinsatzes reduziert werden könnte. Auch hierbei fehlen zurzeit noch Erfahrungswerte, um dies ausreichend beurteilen zu können.

Personalkosten sind ebenfalls aufgrund fehlender Erfahrungswerte insgesamt nicht berücksichtigt worden; die oben durchgeführten Vergleichsrechnungen zu den Kostenaufwendungen können zum jetzigen Zeitpunkt nur als Orientierung dienen.

## 9 Zusammenfassung

Mit dem "Übereinkommen über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt" (Abfallübereinkommen) der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) soll im Interesse des Umweltschutzes die zukünftige Behandlung aller auf einem Binnenschiff anfallenden Abfälle mit international einheitlichen Vorgaben geregelt werden. Durch Artikel 9.01 Abs. 3 „Verbot der Einbringung und Einleitung“ wird die Einleitung von häuslichem Abwasser von Fahrgastbinnenschiffen in die Bundeswasserstraßen geregelt. Vorgesehen ist, dass ab dem 1. Januar 2005 für Kabinenschiffe mit mehr als 50 Schlafplätzen und ab dem 1. Januar 2010 für Fahrgastschiffe mit einer Zulassung zur Beförderung von mehr als 50 Fahrgästen ein Einleitverbot existieren soll. Fahrgastschiffe, die über zugelassene Bordkläranlagen verfügen, unterliegen diesem Verbot gemäß Artikel 9.01 Abs. 4 nicht.

Das Übereinkommen wird in Kraft treten, wenn es durch alle Vertragsstaaten (Frankreich, Niederlande, Belgien, Luxemburg, Schweiz und Deutschland) in nationales Recht umgesetzt wurde.

Im Jahr 2000 waren 361 in Deutschland ansässige Unternehmen in der Personenschifffahrt tätig. Im Jahr 2001 betrug die Gesamtzahl der gemeldeten Tagesausflugschiffe 909 Schiffe mit einer Gesamtkapazität von 227.631 Plätzen und 34 Fahrgastkabinenschiffe mit 3.304 Betten. Eine Abschätzung des Bundesverbandes der deutschen Binnenschifffahrt e.V. (BDB) über das in der Fahrgastschifffahrt eingenommene Entgelt ergab für das Jahr 2001 rund 11 Mio. beförderte Fahrgäste. Haupteinsatzstrecken der Fahrgastschifffahrt sind entlang des Rheins, der Mosel, der Donau und der Elbe, regionale Schwerpunkte um Berlin, am Bodensee sowie am Chiemsee zu finden.

Die im Rahmen des F+E-Vorhabens durchgeführten Untersuchungen zur Einsatzfähigkeit von Bordkläranlagen unter Verwendung der Membrantechnologie ergaben, dass die untersuchten Prototypen der beteiligten Firmen Earth Tech Umwelttechnik GmbH, Martin Systems Engineering GmbH und Puron AG den gestellten Anforderungen an Bordkläranlagen des Abfallübereinkommens der ZKR entsprachen. Aufgrund verfahrenstechnischer Mängel mussten die Tests mit der Pilotanlage der Firma Delphin Umwelttechnik GmbH abgebrochen werden. Die Anlage konnte nicht hinreichend auf ihre Einsatzfähigkeit als Bordkläranlage untersucht werden.

Die Ablaufwerte der untersuchten Pilotanlagen lagen konstant unter den geforderten Überwachungswerten von  $CSB \leq 180 \text{ mg/l}$  und  $BSB_5 \leq 40 \text{ mg/l}$ . Die erreichten Eliminationsleistungen betragen für den Parameter CSB  $\sim 95\%$ , für den Parameter  $BSB_5 \sim 99\%$ . Neben der geforderten Kohlenstoffelimination wurden auch zufriedenstellende Stickstoffeliminationsleistungen erreicht, die im Bereich zwischen 43% bis 60% lagen.

Der Einsatz der Membrantechnologie ermöglichte zudem eine Elimination der Keimbelastungen (*E.coli* und coliforme Keime) im Ablaufwasser, so dass die Grenzwerte gemäß den Empfehlungen der Donaukommission (coliforme Keime  $< 1.000/100 \text{ ml}$ ) mit den Anlagen der Firmen Martin Systems Engineering GmbH und Earth Tech Umwelttechnik GmbH während der Eignungstests auf dem Prüffeld eingehalten werden konnten. Allein die Pilotanlage der Firma Puron AG konnte mit dem derzeitigen Anlagenkonzept aufgrund der teils sehr hohen Keimzahlen diesen Anforderungen nicht entsprechen.

Neben den Untersuchungen und Tests auf dem Prüffeld des PIA wurden während der Fahrtsaison 2003 (April bis Oktober) die Pilotanlage der Firma Martin Systems Engineering GmbH und während der Fahrtsaison 2004 (April bis Oktober) die Pilotanlage der Firma Earth Tech Umwelttechnik GmbH auf dem Fahrgastschiff MS Asbach der Köln-Düsseldorfer Deutsche Rheinschiffahrt AG betrieben. Die MS Asbach ist ein Fahrgastschiff für den Tagesausflugsverkehr und für maximal 600 Passagiere zugelassen; die Passagierzahl liegt in der Regel zwischen 150 bis 400 Passagieren. An Bord ist ein Restaurantbetrieb mit schiffseigener Küche vorhanden. Das an Bord anfallende Abwasser aus den Sanitär- und Küchenbereichen fließt einem hinteren kleineren Sammeltank zu und wird dort gespeichert. Durch Steuerung von Ventilen kann das Abwasser direkt nach außenbords bzw. in einen vorderen Sammeltank zur weiteren Speicherung gepumpt werden. Während des Projektes wurde ein Abwasserteilstrom in den vorderen Abwassersammeltank gepumpt, so dass von dort aus eine kontinuierliche Beschickung der Pilotanlagen mit Abwasser möglich war. Der Aufstellplatz der Pilotanlagen war im Maschinenraum direkt über dem vorderen Abwassersammeltank. Der für die Praxistests zur Verfügung gestellte Platz an Bord der MS Asbach führte zu einer Auslegung der Pilotanlagen mit einem Durchsatz von etwa  $1,8 \text{ m}^3/\text{d}$ .

Eine Erfassung des Wasserverbrauchs an Bord der MS Asbach ergab einen mittleren Volumenstrom von  $10 \text{ m}^3/\text{d}$  (Fahrtsaison 2004) bis  $10,9 \text{ m}^3/\text{d}$  (Fahrtsaison 2003). Bei einer Saisondauer von 210 Tagen ergab sich damit ein mittlerer jährlicher Abwasservolumenstrom von  $2.100 \text{ m}^3$  bis  $2.289 \text{ m}^3$ . Die Abwasserzusammensetzung an Bord des Fahrgastschiffes war stark vom Küchenbetrieb bzw. von der Auslastung der Küche geprägt, so dass zum Teil hohe Konzentrationsschwankungen im Zulauf zu den Pilotanlagen festgestellt wurden. Biogene Küchenabfälle und Essensreste werden an Bord über einen Mazerator zerkleinert und anschließend dem Fäkalien-sammeltank zugeleitet. Insgesamt lagen die Konzentrationen des Rohabwassers während der Fahrtsaison 2004 über denen der Fahrtsaison 2003. Zurückzuführen war dies in erster Linie auf eine Zunahme des Restaurant- bzw. Küchenbetriebes. Die Konzentrationen des Rohabwassers lagen im Mittel für den Parameter CSB zwischen  $900 - 1.100 \text{ mg/l}$ , für den Parameter  $\text{BSB}_5$  zwischen  $430 - 580 \text{ mg/l}$  und für den Parameter  $\text{N}_{\text{ges}}$  zwischen  $80 - 110 \text{ mg/l}$ . Die von dem Fahrgastschiff MS Asbach ausgehende, beispielhaft ermittelte Gewässerbelastung entsprach dem Rohabwasseraufkommen von etwa 75 (Fahrtsaison 2003) bis 95 (Fahrtsaison 2004) Einwohnergleichwerten (Basis:  $60 \text{ g BSB}_5/\text{E} \cdot \text{d}$ ), wenn das Abwasser unbehandelt in den Rhein geleitet wird.

Die auf dem Prüffeld des PIA erreichten Eliminationsraten konnten mit den Pilotanlagen während des Bordbetriebs bestätigt werden. Infolge veränderter Betriebsweisen konnte die Eliminationsleistung für den Parameter Stickstoff teilweise sogar verbessert werden. Anhand der Eliminationsleistungen wurde ermittelt, dass durch den Einsatz einer Bordkläranlage mit Membrantechnologie im Mittel Frachtreduzierungen von  $2.050 \text{ kg CSB}$ ,  $1.075 \text{ kg BSB}_5$  und  $145 \text{ kg N}_{\text{ges}}$  für die MS Asbach pro Fahrtsaison realisierbar sind. Auch wenn eine erhöhte Reinigungsleistung wie die Stickstoffelimination aus Umweltschutzgründen wünschenswert ist, sollte vorrangiges Ziel dennoch die Einhaltung der Anforderungen des Abfallübereinkommens bei gleichzeitiger größtmöglicher Berücksichtigung der (Platz-) Verhältnisse an Bord der Fahrgastschiffe bleiben.

Ein wesentlicher Vorteil der Membrantechnik ist es, Bordkläranlagen raumsparend ausführen zu können und somit dem geringen Platzangebot auf Fahrgastschiffen gerecht zu werden. Wie die Untersuchungen zur Permeabilität gezeigt haben, empfiehlt es sich zur Gewährleistung des Betriebs der Membrantrennstufe die Membranfilterfläche mit ausreichenden Sicherheiten zu dimensionieren und gegebenenfalls im

Vergleich zu Landanlagen mit geringeren Fluxraten zu kalkulieren. Eine dadurch mögliche Reduzierung notwendiger Wartungen (Membranreinigung) berücksichtigt zusätzlich die Einsatzzeiten bzw. kann zu geringeren Liegezeiten von Fahrgastschiffen führen.

Abschließend wurden nach Beendigung der Praxistests mit den Anlagenherstellern Martin Systems Engineering GmbH und Earth Tech Umwelttechnik GmbH Lösungsmöglichkeiten für eine großtechnische Umsetzung einer Abwasserbehandlungsanlage an Bord der MS Asbach erarbeitet. Die Firmen wurden gebeten, Richtpreisangebote einzureichen. Zusätzlich wurde ein Richtpreisangebot der Firma Aggerwasser GmbH eingereicht, nachdem das Projekt auf einer Tagung zur Membrantechnik vorgestellt wurde.

Die Umsetzung einer großtechnischen Anlage sieht vor, aus Platzgründen den im Schiff vorhandenen vorderen Abwassersammeltank in die neu zu bauende Bordkläranlage zu integrieren und eine separate Membranfilterkammer an den jetzigen Stellplatz der Pilotanlage im vorderen Maschinenraum einzubauen. Gemäß den Richtpreisangeboten und Auskünften der drei Firmen belaufen sich die Investitionskosten (Anlagen- und Einbaukosten) auf 93.000 € bis 110.400 €. Betriebskosten ergeben sich zu 4.300 € bis 6.200 € pro Jahr ohne Berücksichtigung von Personal- und Klärschlamm Entsorgungskosten. Ein direkter Kostenvergleich der drei Anbieter erfolgte nicht, da es sich bei den genannten Preisen allein um Richtpreise handelte, die zur Orientierung der Größenordnung erforderlicher Investitionen dienen sollten.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Bordkläranlagen wurden zu Vergleichszwecken die Entsorgungsgebühren eingeholt, die aufgewendet werden müssen, wenn die Abwässer alternativ an Bord gespeichert und durch Pumpwagen zur weiteren Behandlung an Land entsorgt werden. Hierzu wurden die Gebühren zur Entleerung von Abwassersammelgruben für die Städte Köln, Düsseldorf und Koblenz herangezogen. In gleicher Weise wurden für diese drei Städte auch anfallende Klärschlamm Entsorgungskosten bei dem Betrieb einer Bordkläranlage berücksichtigt.

Bedingt durch stark variierende Entsorgungskosten in den drei Städten zeigte sich, dass auf Basis der angestellten Berechnungen die Wirtschaftlichkeit einer Bordkläranlage stark vom regionalen Einsatz eines Fahrgastschiffs abhängt. So ergeben sich für die Stadt Köln bereits für kurze Nutzungszeiträume deutliche Einsparungen beim



Betrieb einer Bordkläranlage gegenüber einer Abwasserabgabe an Land, für die Stadt Koblenz ist die Entsorgung über Pumpwagen die preisgünstigere Lösung.

Wesentliche Voraussetzungen für die Abgabe von gespeichertem Abwasser bzw. Klärschlamm an Land sind dort vorhandene freie Kapazitäten und die Bereitschaft der Städte, Abwässer und Klärschlämme von Fahrgastschiffen anzunehmen. Werden an Hauptliegeplätzen feste Übernahmestellen mit direkter Anbindung zu den städtischen Abwasserkanälen geplant, ist eine deutliche Reduzierung der Gebühren wie beispielsweise in den Städten Köln und Düsseldorf wahrscheinlich. Der Betrieb einer Bordkläranlage wäre dann allein aus den oben aufgestellten wirtschaftlichen Betrachtungen nicht mehr rentabel. Neben dieser Kostenbetrachtung wäre allerdings darüber hinaus zu betrachten, ob der Schiffsbetrieb wie z.B. die Fahrplangestaltung bei Verwendung einer Bordkläranlage flexibler gestaltet und der Zeitaufwand zur Bereitstellung des Schiffeinsatzes reduziert werden könnte. Auch hierbei fehlen zurzeit noch Erfahrungswerte, um dies ausreichend beurteilen zu können.

Im Hinblick auf den Gewässerschutz und unter der Voraussetzung finanzierbarer Entsorgungsgebühren sind daher die von der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt getroffenen Vorgaben bezüglich der Einleitung von Grau- und Schwarzwasser von Fahrgastbinnenschiffen zu begrüßen.

## 10 Literatur

- [1] Übereinkommen über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt, 9. September 1996, ZKR, Ausgabe 2002
- [2] Merkblatt für die Abfallbeseitigung sowie die Verwendung von Reinigungsmitteln in der Binnenschifffahrt, Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), 2001
- [3] Rheinschifffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV), Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), Ausgabe 2000
- [4] Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO), ZKR, Ausgabe: 2004
- [5] Statistisches Bundesamt, Pressemitteilung zur Binnenschifffahrt; 7. Juni 2002
- [6] N.N.: Persönliche Mitteilung der deutschen Binnenschifffahrt (BDB) vom 23.09.2002
- [7] [http://www.elvis.de/Binnenwasserstraßen/karte\\_bwstr/karte\\_bwstr.html](http://www.elvis.de/Binnenwasserstraßen/karte_bwstr/karte_bwstr.html)
- [8] Verordnung des Bundesministers für Wissenschaft und Verkehr betreffend eine Wasserstraßen-Verkehrsordnung;  
Normen zur Behandlung von Abfällen (§ 9.06)  
<http://www.via-donau.org/deutsch/documents/pdf/wvo.pdf>
- [9] N.N.: Abwasserreinigung mit Membrantechnik; Membraneinsatz im kommunalen und industriellen Bereich; Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW; Düsseldorf 2003
- [10] Delewski; Abwasserbehandlung in der Binnenschifffahrt; Fachhochschule Aachen; Diplomarbeit; Aachen 2002
- [11] N.N.: Persönliche Mitteilung des Kanalbetriebes der Stadt Düsseldorf vom 05.12.2003
- [12] N.N.: Persönliche Mitteilung des Entwässerungsbetriebes der Stadt Koblenz vom 05.12.2003
- [13] N.N.: Bemessungsgrundlagen für Abwasseranlagen; Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198;
- [14] W. Wagner: Abwassertechnik und Gewässerschutz S. 1221; C.F. Müller Verlag; Heidelberg; Sept. 2001

## Anhang

### Anmerkungen

Folgende Vereinbarungen sind bei den Auswertungen zu den Analyseergebnissen getroffen worden:

- Messwerte, die kleiner als der Grenzwert sind, werden bei statistischen Auswertungen durch den Grenzwert ersetzt.
- Mittlere Eliminationsleistungen beziehen sich auf den mittleren Zu- und mittleren Ablaufwert für den jeweiligen Betrachtungszeitraum.