

**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

**Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften** Fachrichtung Wasserwesen

Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, Professur für Siedlungswasserwirtschaft

## **Abschlussbericht**

# **Untersuchung des Anreicherungsverhaltens von schwer abbaubaren gelösten organischen Substanzen in Membranbelebungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung von Industriekläranlagen**

AZ: 24007-23

*gefördert durch*



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

Dresden, 31.03.2009



Abschlussbericht

# **Untersuchung des Anreicherungsverhaltens von schwer abbaubaren gelösten organischen Substanzen in Membranbelebungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung von Industriekläranlagen**

AZ: 24007-23

*gefördert durch*



[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

Gerichtet an:

Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
Postfach 1705  
49007 Osnabrück

Bearbeiter:

Technische Universität Dresden  
Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft  
01062 Dresden

Dipl.-Ing. T. Schalk  
Dr.-Ing. V. Kühn  
Prof. Dr. sc. techn. P. Krebs

Dresden, den 31.03.2009



# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abkürzungen und Symbole</b> .....	<b>XXX</b>
<b>1 Einführung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand des Wissens</b> .....	<b>3</b>
<b>3 Durchführung des Forschungsvorhabens</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1 Durchführung eines Screenings an großtechnisch realisierten Anlagen</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2 Versuche im halbtechnischen Maßstab</b> .....	<b>7</b>
<b>4 Material und Methoden</b> .....	<b>8</b>
<b>4.1 Angewendete Nachweismethoden</b> .....	<b>8</b>
4.1.1 Nachweis der Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen .....	8
4.1.2 Fraktionierung von Belebtschlamm, Kläranlagenzuflüssen und Prozesswasser.....	10
4.1.3 Einfluss der Vorbereitung der Belebtschlammproben auf die Analytik .....	15
4.1.4 Datenaufbereitung .....	18
4.1.5 Atmungsmessung .....	21
<b>4.2 Versuchsanlagen</b> .....	<b>23</b>
4.2.1 Membranbelebungsanlage .....	23
4.2.2 Halbtechnische Versuchsanlage.....	24
4.2.3 Versuchsaufbau .....	26
4.2.3.1 <i>Versuche mit kommunalem Abwasser</i> .....	26
4.2.3.2 <i>Versuche mit kommunalem Abwasser unter dem Einfluss der Einleitung von BDF-Abwasser, Versuche zur Industrieabwasserbehandlung</i> .....	28
<b>4.3 Analytische Methoden</b> .....	<b>31</b>

<b>5</b>	<b>Screening an großtechnischen Anlagen.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1</b>	<b>Kommunale Kläranlagen .....</b>	<b>33</b>
5.1.1	Anlage K1 .....	33
5.1.1.1	Anlagenbeschreibung .....	33
5.1.1.2	Probenahme .....	37
5.1.1.3	Zuflussfraktionierung.....	37
5.1.1.4	Fraktionierung des Prozesswassers .....	45
5.1.1.5	Fraktionierung des Belebtschlammms .....	52
5.1.1.6	Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen.....	56
5.1.2	Anlage K2 .....	61
5.1.2.1	Anlagenbeschreibung .....	61
5.1.2.2	Probenahme .....	65
5.1.2.3	Zuflussfraktionierung.....	65
5.1.2.4	Fraktionierung des Belebtschlammms .....	72
5.1.2.5	Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen.....	75
5.1.3	Anlage K3 .....	80
5.1.3.1	Anlagenbeschreibung .....	80
5.1.3.2	Probenahme .....	84
5.1.3.3	Zuflussfraktionierung.....	84
5.1.3.4	Fraktionierung des Prozesswassers .....	92
5.1.3.5	Fraktionierung des Belebtschlammms .....	93
5.1.3.6	Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen.....	97
5.1.4	Anlage K4 .....	102
5.1.4.1	Anlagenbeschreibung .....	102
5.1.4.2	Probenahme .....	106
5.1.4.3	Zuflussfraktionierung.....	106
5.1.4.4	Fraktionierung des Prozesswassers .....	114
5.1.4.5	Fraktionierung des Belebtschlammms .....	121
5.1.4.6	Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen.....	126
5.1.5	Anlage K5 .....	131
5.1.5.1	Anlagenbeschreibung .....	131
5.1.5.2	Probenahme .....	134
5.1.5.3	Zuflussfraktionierung.....	134
5.1.5.4	Fraktionierung des Belebtschlammms .....	141
5.1.5.5	Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen.....	147

<b>5.2</b>	<b>Industrielle und gewerbliche Kläranlagen .....</b>	<b>152</b>
5.2.1	Anlage I1 – Gewerbliche Wäscherei .....	152
5.2.1.1	<i>Anlagenbeschreibung</i> .....	152
5.2.1.2	<i>Probenahme</i> .....	155
5.2.1.3	<i>Zuflussfraktionierung</i> .....	155
5.2.1.4	<i>Fraktionierung des Belebtschlamm</i> s.....	162
5.2.1.5	<i>Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen</i> .....	168
5.2.2	Anlage I2 – Textilveredelung .....	172
5.2.2.1	<i>Anlagenbeschreibung</i> .....	172
5.2.2.2	<i>Probenahme</i> .....	176
5.2.2.3	<i>Zuflussfraktionierung</i> .....	176
5.2.2.4	<i>Fraktionierung des Belebtschlamm</i> s.....	183
5.2.2.5	<i>Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen</i> .....	188
5.2.3	Anlage I3 – Kartoffelstärkeproduktion .....	192
5.2.3.1	<i>Anlagenbeschreibung</i> .....	192
5.2.3.2	<i>Probenahme</i> .....	196
5.2.3.3	<i>Zuflussfraktionierung</i> .....	196
5.2.3.4	<i>Fraktionierung des Belebtschlamm</i> s.....	203
5.2.3.5	<i>Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen</i> .....	210
5.2.4	Anlage I4 – Grün- und Bioabfallbehandlung .....	214
5.2.4.1	<i>Anlagenbeschreibung</i> .....	214
5.2.4.2	<i>Probenahme</i> .....	217
5.2.4.3	<i>Zuflussfraktionierung</i> .....	217
5.2.4.4	<i>Fraktionierung des Belebtschlamm</i> s.....	223
5.2.4.5	<i>Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen</i> .....	229
<b>6</b>	<b>Halbtechnische Versuche .....</b>	<b>232</b>
<b>6.1</b>	<b>Betriebsdaten und Reinigungsleistung .....</b>	<b>232</b>
6.1.1	Parallelversuche mit kommunalem Abwasser.....	232
6.1.2	Versuche zur Behandlung von Abwasser aus der Biodiesel- Produktion.....	242
6.1.2.1	<i>Halbtechnische Versuche</i> .....	242
6.1.2.2	<i>Kleintechnische Versuche</i> .....	250
<b>6.2</b>	<b>Zuflussfraktionierung .....</b>	<b>253</b>
6.2.1	Fraktionierung des kommunalen Abwassers .....	253
6.2.2	Fraktionierung des BDF-Abwassers .....	261

---

<b>6.3</b>	<b>Belebtschlammfraktionierung.....</b>	<b>262</b>
6.3.1	Fraktionierung des Belebtschlammes aus HTVA und Membranbelebungsanlage während des Parallelbetriebs mit kommunalem Abwasser.....	262
6.3.2	Fraktionierung des Belebtschlammes aus der Membranbelebungsanlage während der Behandlung von BDF-Abwasser .....	269
<b>6.4</b>	<b>Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen.....</b>	<b>276</b>
<b>6.5</b>	<b>Einfluss der Dosierung von Fällmitteln auf die Anreicherung hochmolekularer Substanzen .....</b>	<b>281</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>284</b>
<b>8</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>294</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Im Rahmen der Messkampagne untersuchte kommunale ABA.....	5
Tabelle 3.2:	Im Rahmen der Messkampagne untersuchte Betriebs-ABA .....	5
Tabelle 4.1:	Technische Daten der verwendeten Filter .....	8
Tabelle 4.2:	Zur Fraktionierung verwendete Filter .....	10
Tabelle 4.3:	Gegenüberstellung der Aufbereitungsmethoden (CSB).....	15
Tabelle 4.4:	Gegenüberstellung der Aufbereitungsmethoden (Trübung).....	16
Tabelle 4.5:	Nasschemische Analysen.....	31
Tabelle 4.6:	Physikalische Messgrößen .....	31
Tabelle 4.7:	Mikroskopie .....	32
Tabelle 5.1:	Charakterisierung des Zuflusses zur KA K1 .....	37
Tabelle 5.2:	Charakterisierung des Prozesswassers der KA K1 .....	45
Tabelle 5.3:	Kennwerte der Membranbelebungsstufe der Anlage K1 .....	52
Tabelle 5.4:	Permeatbeschaffenheit der Anlage K1 .....	56
Tabelle 5.5:	CSB-Anreicherung in der KA K1 (Mittelwerte aller Proben).....	59
Tabelle 5.6:	CSB-Anreicherung in der KA K1 (Mittelwerte aller Proben mit Ausnahme der Probe 03/07) .....	60
Tabelle 5.7:	TOC-Anreicherung in der KA K1 (Mittelwerte aller Proben).....	60
Tabelle 5.8:	TOC-Anreicherung in der KA K1 (Mittelwerte aller Proben mit Ausnahme der Probe 03/07) .....	60
Tabelle 5.9:	Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in KA K1 (Mittelwerte aller Proben) .....	60
Tabelle 5.10:	Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in KA K1 (Mittelwerte aller Proben mit Ausnahme der Probe 03/07) .....	60
Tabelle 5.11:	Charakterisierung des Zuflusses zur KA K2 .....	65

Tabelle 5.12:	Kennwerte der biologischen Reinigungsstufe der KA K2.....	72
Tabelle 5.13:	Permeatbeschaffenheit der KA K2.....	75
Tabelle 5.14:	CSB-Anreicherung in der KA K2 (Mittelwerte der Proben 12/06, 02/07, 04/07, 06/07).....	78
Tabelle 5.15:	TOC-Anreicherung in der KA K2 (Mittelwerte der Proben 12/06, 02/07, 04/07, 06/07) .....	79
Tabelle 5.16:	CSB-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in Kläranlage K2 (Mittelwerte der Proben 12/06, 02/07, 04/07, 06/07).....	79
Tabelle 5.17:	TOC-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in Kläranlage K2 (Mittelwerte der Proben 12/06, 02/07, 04/07, 06/07).....	79
Tabelle 5.18:	Charakterisierung des Zuflusses zur KA K3 .....	85
Tabelle 5.19:	Beschaffenheit des Prozesswasser der KA K3 .....	92
Tabelle 5.20:	Kennwerte der biologischen Reinigungsstufe der KA K3.....	93
Tabelle 5.21:	Permeatbeschaffenheit der KA K3.....	97
Tabelle 5.22:	CSB-Anreicherung in der KA K3 (Mittelwerte aller Proben) .....	99
Tabelle 5.23:	TOC-Anreicherung in der KA K3 (Mittelwerte aller Proben) .....	99
Tabelle 5.24:	CSB-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen .....	99
Tabelle 5.25:	TOC-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen.....	100
Tabelle 5.26:	Charakterisierung des Zuflusses zur KA K4 .....	106
Tabelle 5.27:	Charakterisierung des Prozesswassers der KA K4 .....	114
Tabelle 5.28:	Kennwerte der biologischen Reinigungsstufe der KA K4.....	121
Tabelle 5.29:	Permeatbeschaffenheit der KA K4.....	126
Tabelle 5.30:	CSB-Anreicherung in der KA K4 (Mittelwerte aller Proben) .....	128
Tabelle 5.31:	TOC-Anreicherung in der KA K4 (Mittelwerte aller Proben) .....	129
Tabelle 5.32:	CSB-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen .....	129
Tabelle 5.33:	TOC-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen.....	129

Tabelle 5.34:	Charakterisierung des Zuflusses zur KA K5 .....	134
Tabelle 5.35:	Kennwerte der Membranbelebungsstufe der Anlage K5 .....	141
Tabelle 5.36:	Permeatbeschaffenheit der KA K5 .....	147
Tabelle 5.37:	CSB-Anreicherung in der KA K5 (Mittelwerte der Proben 10/06 und 06/07) .....	150
Tabelle 5.38:	TOC-Anreicherung in der KA K5 (Mittelwerte der Proben 10/06 und 06/07) .....	150
Tabelle 5.39:	CSB-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen.....	150
Tabelle 5.40:	TOC-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen.....	150
Tabelle 5.41:	Charakterisierung des Zuflusses zur KA I1.....	155
Tabelle 5.42:	Kennwerte des Membranbelebungsbeckens der KA I1 .....	163
Tabelle 5.43:	Kennwerte des Belebungsbeckens der KA I1.....	163
Tabelle 5.44:	Permeatbeschaffenheit der KA I1 .....	168
Tabelle 5.45:	CSB-Anreicherung in der KA I1 (Mittelwerte aller Proben, ohne Probe 11/06) .....	171
Tabelle 5.46:	TOC-Anreicherung in der KA I1 (Mittelwerte aller Proben, ohne Probe 11/06) .....	171
Tabelle 5.47:	Charakterisierung des Zuflusses zur KA I2.....	176
Tabelle 5.48:	Kennwerte des Membranbelebungsbeckens der KA I2.....	183
Tabelle 5.49:	Permeatbeschaffenheit der KA I2.....	188
Tabelle 5.50:	CSB-Anreicherung in der KA I2 (Mittelwerte aller Proben).....	191
Tabelle 5.51:	Charakterisierung des Zuflusses zur KA I3.....	196
Tabelle 5.52:	Kennwerte des Filtrationsbeckens der KA I3.....	203
Tabelle 5.53:	Kennwerte des Belebungsbeckens der KA I3.....	203
Tabelle 5.54:	Permeatbeschaffenheit der Anlage I3.....	211
Tabelle 5.55:	Charakterisierung des Zuflusses zur KA I4.....	217
Tabelle 5.56:	Kennwerte des Filtrationsbeckens der KA I4 .....	223
Tabelle 5.57:	Kennwerte des Belebungsbeckens der KA I4.....	223
Tabelle 5.58:	Permeatbeschaffenheit der Anlage I4.....	229
Tabelle 6.1:	Bewertung des mikroskopischen Bildes .....	236

---

Tabelle 6.2:	Mittlerer ÜSS-Anfall .....	241
Tabelle 6.3:	Beschaffenheit des behandelten BDF-Abwassers .....	242
Tabelle 6.4:	Charakterisierung des Zuflusses zur Versuchsanlage .....	253
Tabelle 6.5:	Fraktionierung des BDF-Abwassers .....	261
Tabelle 6.6:	Einfluss von Flockungsmitteln auf den Nachweis der Anreicherung hochmolekularer Substanzen (Versuchsreihe 1).....	281
Tabelle 6.7:	Einfluss von Flockungsmitteln auf den Nachweis der Anreicherung hochmolekularer Substanzen (Versuchsreihe 2).....	282
Tabelle 7.1:	Verlagerung angereicherter hochmolekularer Substanzen aus kommunalen Kläranlagen der 0,45 µm- und der 0,025 µm-Fraktion mit dem entsorgten ÜSS auf andere Kläranlagen zur Schlammbehandlung .....	291
Tabelle 7.2:	Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen in vier Industriekläranlagen .....	291
Tabelle 7.3:	Verlagerung bzw. potentiell mögliche Verlagerung angereicherter hochmolekularer Substanzen aus Kläranlagen mit gewerblichem Zufluss der 0,45 µm- und der 0,025 µm-Fraktion mit dem entsorgten ÜSS auf andere Kläranlagen.....	292

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Zeitlicher Ablauf der Versuche (Angabe in Monaten) .....	7
Abbildung 4.1:	Membranfiltrationseinheiten (links), Papierfiltration mit Büchner-Trichter (rechts).....	11
Abbildung 4.2:	Durchführung der Fraktionierung (Bsp. Zuflussprobe).....	12
Abbildung 4.3:	Einfluss der Deckschicht bei der Membranfiltration auf die CSB- und TOC-Analysen .....	13
Abbildung 4.4:	Einfluss der Probenaufbereitung durch Zentrifugation und Filtration über Papierfilter auf die anschließende Membranfiltration .....	17
Abbildung 4.5:	Methoden zur Datenauswertung .....	19
Abbildung 4.6:	Atmungsmessplatz .....	21
Abbildung 4.7:	Verwendetes Membranmodul .....	23
Abbildung 4.8:	Halbtechnische Versuchsanlage.....	25
Abbildung 4.9:	Versuchsaufbau während der Parallelversuche mit kommunalem Abwasser .....	26
Abbildung 4.10:	Versuchsaufbau während der Behandlung von BDF-Abwasser .....	28
Abbildung 4.11:	Membranbelebungsanlage während der Versuche zum Abbau von BDF-Abwasser .....	29
Abbildung 5.1:	Vereinfachte schematische Darstellung der KA K1 .....	33
Abbildung 5.2:	Mechanische Reinigungsstufe der Kläranlage K1 .....	34
Abbildung 5.3:	Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage K1 .....	35
Abbildung 5.4:	Membranbelebungsstufe der Anlage K1 mit abgedeckten Becken.....	36
Abbildung 5.5:	TOC/CSB-Verhältnis der Zuflüsse der KA K1.....	38
Abbildung 5.6:	AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage K1 .....	38
Abbildung 5.7:	Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage K1 .....	39

Abbildung 5.8:	Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage K1 .....	39
Abbildung 5.9:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K1 .....	40
Abbildung 5.10:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der Anlage K1 .....	41
Abbildung 5.11:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der Anlage K1 (Zusammenfassung alle Proben).....	42
Abbildung 5.12:	Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage K1 .....	43
Abbildung 5.13:	Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K1 .....	43
Abbildung 5.14:	Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K1 (Fortsetzung) .....	44
Abbildung 5.15:	TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Prozesswassers der KA K1 .....	45
Abbildung 5.16:	AFS-Verteilung im Prozesswassers mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage K1.....	46
Abbildung 5.17:	Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Prozesswasser der Anlage K1 an den Untersuchungstagen.....	46
Abbildung 5.18:	Relative Verteilung der Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K1 (Bezug: papierfiltrierte Probe) .....	46
Abbildung 5.19:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Prozesswasser der KA K1 an den Untersuchungstagen.....	47
Abbildung 5.20:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Prozesswasser der Anlage K1 (Zusammenfassung alle Proben).....	48
Abbildung 5.21:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Prozesswasser-Fraktionen der KA K1 .....	49
Abbildung 5.22:	Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K1 .....	50

Abbildung 5.23:	Änderung der AFS aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K1 .....	50
Abbildung 5.24:	Änderung der AFS aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K1 (Fortsetzung) .....	51
Abbildung 5.25:	CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes der Membranbelebungsstufe der KA K1 .....	52
Abbildung 5.26:	TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes der Membranbelebungsstufe der KA K1 .....	53
Abbildung 5.27:	Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen im Belebtschlamm der Membranbelebungsstufe der KA K1 ....	53
Abbildung 5.28:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen im Belebtschlamm der Membranbelebungsstufe der KA K1 .....	54
Abbildung 5.29:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB der Belebtschlammproben 10/06 und 12/06 .....	55
Abbildung 5.30:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben der Membranbelebungsstufe der KA K1 .....	55
Abbildung 5.31:	CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der Anlage K1 .....	56
Abbildung 5.32:	CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der Anlage K1 .....	57
Abbildung 5.33:	Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage K1 .....	57
Abbildung 5.34:	Angereicherte Fracht in KA K1 am Tag der Probenahme....	58
Abbildung 5.35:	Spezifische Anreicherung in der KA K1 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme .....	58
Abbildung 5.36:	Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in K1 .....	58
Abbildung 5.37:	Spezifische Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in KA K1 .....	58
Abbildung 5.38:	Vereinfachte schematische Darstellung der KA K2 .....	61
Abbildung 5.39:	Mechanische Reinigungsstufe der Anlage K2 .....	62

Abbildung 5.40:	Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage K2 .....	62
Abbildung 5.41:	Biologische Reinigungsstufe der Anlage K2 .....	63
Abbildung 5.42:	TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA K2 .....	66
Abbildung 5.43:	AFS-Verteilung im Zufluss der KA K2 mit Bezug zur 8 µm-Probe .....	66
Abbildung 5.44:	Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der KA K2.....	67
Abbildung 5.45:	Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der KA K2 .....	67
Abbildung 5.46:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der KA K2 .....	68
Abbildung 5.47:	Zusammenhang zw. AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen (KA K2) .....	69
Abbildung 5.48:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC (Zusammenfassung alle Proben) der KA K2 .....	69
Abbildung 5.49:	Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Zuflussfraktionen der KA K2 .....	70
Abbildung 5.50:	Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der KA K2 .....	71
Abbildung 5.51:	CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes der KA K2.....	72
Abbildung 5.52:	TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes der KA K2 .....	73
Abbildung 5.53:	Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen im Belebtschlamm der KA K2 (Bezug: 0,45 µm-Fraktion) .....	73
Abbildung 5.54:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA K2 .....	74
Abbildung 5.55:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben der KA K2.....	74
Abbildung 5.56:	CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA K2 .....	75

Abbildung 5.57:	CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA K2.....	76
Abbildung 5.58:	Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage K2 .....	76
Abbildung 5.59:	Angereicherte Fracht in der KA K2 am Tag der Probenahme.....	77
Abbildung 5.60:	Spezifische Anreicherung in der KA K2 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme .....	78
Abbildung 5.61:	Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in KA K2 .....	78
Abbildung 5.62:	Spezifische Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in KA K2.....	78
Abbildung 5.63:	Vereinfachte schematische Darstellung der KA K3 mit Vorklärbeckenbetrieb.....	80
Abbildung 5.64:	Vereinfachte schematische Darstellung der KA K3 (Bio-P) .....	80
Abbildung 5.65:	Mechanische Reinigungsstufe der Anlage K3 .....	81
Abbildung 5.66:	Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage K3 .....	82
Abbildung 5.67:	Mechanische Abwasserbehandlung im Innenring des Kreisringbeckens und erster Stufe der biologischen Behandlung im Außenring.....	83
Abbildung 5.68:	Membranbelebungsstufe der KA K3 mit abgedeckten Becken.....	83
Abbildung 5.69:	TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA K3 .....	85
Abbildung 5.70:	AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage K3.....	85
Abbildung 5.71:	Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage K3 .....	86
Abbildung 5.72:	Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage K3.....	86
Abbildung 5.73:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K3.....	87

Abbildung 5.74:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der Anlage K3 .....	88
Abbildung 5.75:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der Anlage K3 (Zusammenfassung alle Proben).....	89
Abbildung 5.76:	Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage K3 .....	90
Abbildung 5.77:	Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K3 .....	90
Abbildung 5.78:	Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K3 (Fortsetzung) .....	91
Abbildung 5.79:	CSB- und TOC-Fraktionierung des Prozesswassers der KA K3.....	92
Abbildung 5.80:	AFS im Prozesswasser der KA K3.....	92
Abbildung 5.81:	CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes der KA K3.....	93
Abbildung 5.82:	TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes der KA K3 .....	94
Abbildung 5.83:	Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen im Belebtschlamm der KA K3 (Bezug: 0,45 µm-Fraktion) .....	94
Abbildung 5.84:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA K3 .....	95
Abbildung 5.85:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben der KA K3.....	95
Abbildung 5.86:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Belebtschlamm der KA K3.....	96
Abbildung 5.87:	CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA K3 .....	97
Abbildung 5.88:	CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA K3.....	98
Abbildung 5.89:	Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage K3 .....	99

Abbildung 5.90:	Angereicherte Fracht in der KA K3 am Tag der Probenahme.....	100
Abbildung 5.91:	Spezifische Anreicherung in der KA K3 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme .....	100
Abbildung 5.92:	Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen .....	100
Abbildung 5.93:	Spezifische Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen.....	101
Abbildung 5.94:	Vereinfachte schematische Darstellung der KA K4 .....	102
Abbildung 5.95:	Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage K4 .....	103
Abbildung 5.96:	Biologische Reinigungsstufe der KA K4 (Nitrifikationsstufe mit getauchten Membranmodulen) .....	104
Abbildung 5.97:	Sandfang (links), Chemikalienlager (rechts) .....	105
Abbildung 5.98:	TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA K4 .....	107
Abbildung 5.99:	AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage K4.....	107
Abbildung 5.100:	Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage K4 .....	108
Abbildung 5.101:	Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage K4 (Bezug: papierfiltrierte Probe).....	108
Abbildung 5.102:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K4.....	109
Abbildung 5.103:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der Anlage K4 .....	110
Abbildung 5.104:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der Anlage K4 (links: alle Proben, rechts: alle Proben ohne Probe 09/07) .....	111
Abbildung 5.105:	Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage K4 .....	112
Abbildung 5.106:	Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K4 .....	112

Abbildung 5.107: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K4 (Fortsetzung) .....	113
Abbildung 5.108: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Prozesswassers der KA K4 .....	114
Abbildung 5.109: AFS-Verteilung im Prozesswassers mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage K4.....	115
Abbildung 5.110: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Prozesswasser der Anlage K4 an den Untersuchungstagen.....	115
Abbildung 5.111: Relative Verteilung der Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K4 (Bezug: papierfiltrierte Probe) .....	116
Abbildung 5.112: Fugatbeschaffenheit der Probe 11/06 der KA K4 .....	116
Abbildung 5.113: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Prozesswasser der KA K4 an den Untersuchungstagen.....	117
Abbildung 5.114: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Prozesswasser der Anlage K4 (Zusammenfassung alle Proben).....	117
Abbildung 5.115: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Prozesswasser-Fraktionen der KA K4 .....	118
Abbildung 5.116: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K4 .....	119
Abbildung 5.117: Änderung der AFS aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K4.....	119
Abbildung 5.118: Änderung der AFS aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K4 (Fortsetzung).....	120
Abbildung 5.119: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes der KA K4.....	121
Abbildung 5.120: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes der KA K4 .....	122
Abbildung 5.121: Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fraktionen im Belebtschlamm der KA K4 (Bezug: 0,45 µm-Fraktion) .....	122
Abbildung 5.122: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA K4 .....	123

Abbildung 5.123: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB u. part. TOC aller Proben der KA K4 (oben), ohne Probe 09/07 (unten) .....	123
Abbildung 5.124: CSB- und TOC-Analysen der fraktionierten Probe 09/07 nach verschiedenen Aufbereitungsarten .....	124
Abbildung 5.125: Leitfähigkeit und Trübung der fraktionierten Probe 09/07 nach verschiedenen Aufbereitungsarten .....	125
Abbildung 5.126: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA K4 .....	126
Abbildung 5.127: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA K4.....	127
Abbildung 5.128: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage K4 .....	128
Abbildung 5.129: Angereicherte Fracht in der KA K4 am Tag der Probenahme.....	129
Abbildung 5.130: Spezifische Anreicherung in der KA K4 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme .....	129
Abbildung 5.131: Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen .....	130
Abbildung 5.132: Spezifische Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen.....	130
Abbildung 5.133: Vereinfachte schematische Darstellung der KA K5 .....	131
Abbildung 5.134: Mechanische Reinigungsstufe der Anlage K5 .....	132
Abbildung 5.135: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage K5 .....	132
Abbildung 5.136: Biologische Reinigungsstufe der Anlage K5 mit Betriebsgebäude.....	133
Abbildung 5.137: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA K5 .....	135
Abbildung 5.138: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage K5.....	135
Abbildung 5.139: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage K5 .....	136
Abbildung 5.140: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage K5.....	136

Abbildung 5.141: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K5 .....	137
Abbildung 5.142: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der Anlage K5 .....	138
Abbildung 5.143: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der Anlage K5 (alle Proben) .....	138
Abbildung 5.144: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage K5 .....	139
Abbildung 5.145: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K5 (Fortsetzung) .....	140
Abbildung 5.146: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes der Membranbelebungsstufe der KA K5 .....	142
Abbildung 5.147: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes der Membranbelebungsstufe 12/06 der KA K5 .....	142
Abbildung 5.148: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes der Membranbelebungsstufe der KA K5 .....	142
Abbildung 5.149: Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen im Belebtschlamm der Membranbelebungsstufe der KA K5.....	143
Abbildung 5.150: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen im Belebtschlamm der Membranbelebungsstufe der KA K5 .....	144
Abbildung 5.151: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der Anlage K5.....	144
Abbildung 5.152: Änderung der AFS aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der Anlage K5 .....	145
Abbildung 5.153: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben der Membranbelebungsstufe der KA K5 .....	145
Abbildung 5.154: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB der Belebtschlammproben .....	146
Abbildung 5.155: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA K5 .....	147

Abbildung 5.156: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA K5.....	148
Abbildung 5.157: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage K5 .....	149
Abbildung 5.158: Angereicherte Fracht in der KA K5 am Tag der Probenahme.....	150
Abbildung 5.159: Spezifische Anreicherung in der KA K5 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme .....	151
Abbildung 5.160: Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen .....	151
Abbildung 5.161: Spezifische Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen.....	151
Abbildung 5.162: Vereinfachte schematische Darstellung der KA I1.....	152
Abbildung 5.163: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage I1.....	153
Abbildung 5.164: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA I1.....	156
Abbildung 5.165: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I1 .....	156
Abbildung 5.166: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage I1 .....	157
Abbildung 5.167: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage I1 .....	157
Abbildung 5.168: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I1 .....	158
Abbildung 5.169: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der KA I1 .....	159
Abbildung 5.170: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der KA I1 (alle Proben).....	159
Abbildung 5.171: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage I1.....	160
Abbildung 5.172: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I1.....	161

Abbildung 5.173: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I1 .....	164
Abbildung 5.174: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlamm aus dem Belebungsbecken der KA I1 .....	164
Abbildung 5.175: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I1 .....	164
Abbildung 5.176: Relative Verteilung der CSB- u. TOC-Fractionen im Belebtschlamm d. Filtrationsbeckens der KA I1 .....	165
Abbildung 5.177: Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen im Belebtschlamm des Belebungsbeckens der KA I1 .....	165
Abbildung 5.178: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fractionen des Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I1 .....	166
Abbildung 5.179: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB bzw. TOC im Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I1 .....	166
Abbildung 5.180: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben aus dem Filtrationsbecken der KA I1 .....	167
Abbildung 5.181: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA I1 .....	168
Abbildung 5.182: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA I1 .....	169
Abbildung 5.183: Angereicherte Fracht in der KA I1 am Tag der Probenahme .....	170
Abbildung 5.184: Spezifische Anreicherung in der KA I1 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme .....	170
Abbildung 5.185: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage I1 .....	171
Abbildung 5.186: Vereinfachte schematische Darstellung der KA I2 .....	172
Abbildung 5.187: Biologische Behandlungsstufe der KA I2 .....	173
Abbildung 5.188: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der KA I2 nach der Erweiterung .....	174
Abbildung 5.189: Erweiterte Abwasserbehandlungsanlage .....	175

Abbildung 5.190: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA I2.....	177
Abbildung 5.191: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I2 .....	177
Abbildung 5.192: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage I2 .....	178
Abbildung 5.193: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage I2.....	178
Abbildung 5.194: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I2 .....	179
Abbildung 5.195: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage I2.....	180
Abbildung 5.196: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I2.....	180
Abbildung 5.197: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I2 (Fortsetzung) .....	181
Abbildung 5.198: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der KA I2.....	181
Abbildung 5.199: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der KA I2 (alle Proben).....	182
Abbildung 5.200: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I2.....	184
Abbildung 5.201: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlamm aus dem Membranbelebungsbecken der KA I2.....	184
Abbildung 5.202: Relative Verteilung der CSB- u. TOC-Fraktionen im Belebtschlamm der KA I2 (Bezug: 0,45 µm) .....	185
Abbildung 5.203: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen des Belebtschlamm KA I2.....	185
Abbildung 5.204: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB bzw. TOC im Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I2.....	186
Abbildung 5.205: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben aus dem Filtrationsbecken der KA I2.....	186

Abbildung 5.206: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben aus dem Filtrationsbecken der KA I2 (ohne Probe 02/07) .....	187
Abbildung 5.207: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA I2.....	188
Abbildung 5.208: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA I2 .....	189
Abbildung 5.209: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage I2.....	190
Abbildung 5.210: Angereicherte Fracht in der KA I2.....	190
Abbildung 5.211: Spezifische Anreicherung in der KA I2 in Abhängigkeit des oTS .....	191
Abbildung 5.212: Vereinfachte schematische Darstellung der KA I3.....	192
Abbildung 5.213: Biologische Behandlungsstufe (Straße 1) der KA I3.....	193
Abbildung 5.214: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der KA I3 .....	194
Abbildung 5.215: Filtrationscontainer der KA I3 (Straße 1).....	194
Abbildung 5.216: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA I3.....	197
Abbildung 5.217: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I3 .....	197
Abbildung 5.218: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage I3.....	198
Abbildung 5.219: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage I3 .....	198
Abbildung 5.220: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I3 .....	199
Abbildung 5.221: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der KA I3 .....	200
Abbildung 5.222: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der KA I3 (alle Proben).....	200
Abbildung 5.223: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage I3.....	201

Abbildung 5.224: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I3 .....	202
Abbildung 5.225: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I3.....	204
Abbildung 5.226: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlamm aus dem Membranbelebungsbecken der KA I3.....	204
Abbildung 5.227: Relative Verteilung der CSB- u. TOC-Fraktionen im Belebtschlamm der KA I3.....	204
Abbildung 5.228: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen des Belebtschlamm KA I3.....	205
Abbildung 5.229: AFS-Verteilung im filtrierten Belebtschlamm mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I3.....	206
Abbildung 5.230: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA I3.....	207
Abbildung 5.231: Änderung der AFS aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA I3.....	208
Abbildung 5.232: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB bzw. TOC im Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I3.....	209
Abbildung 5.233: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben aus dem Filtrationsbecken der KA I3.....	209
Abbildung 5.234: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der Anlage I3 .....	210
Abbildung 5.235: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der Anlage I3.....	211
Abbildung 5.236: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage I3.....	212
Abbildung 5.237: Angereicherte Fracht in KA I3 am Tag der Probenahme .....	212
Abbildung 5.238: Spezifische Anreicherung in KA I3 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme .....	213
Abbildung 5.239: Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen .....	213

Abbildung 5.240: Spezifische Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen .....	213
Abbildung 5.241: Vereinfachte schematische Darstellung der Kläranlage I4 .....	214
Abbildung 5.242: Betriebskläranlage I4 – Biologische Behandlungsstufe .....	215
Abbildung 5.243: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der KA I4 .....	216
Abbildung 5.244: Filtrationsbecken, Rückspüllbehälter, Permeatbehälter der KA I4 .....	216
Abbildung 5.245: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA I4 .....	218
Abbildung 5.246: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I4 .....	218
Abbildung 5.247: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage I4 .....	219
Abbildung 5.248: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage I4 .....	219
Abbildung 5.249: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I4 .....	219
Abbildung 5.250: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I4 .....	220
Abbildung 5.251: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage I4 .....	221
Abbildung 5.252: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der KA I4 .....	221
Abbildung 5.253: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der KA I4 (alle Proben) .....	222
Abbildung 5.254: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I4 .....	224
Abbildung 5.255: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlamm aus dem Membranbelebungsbecken der KA I4 .....	224
Abbildung 5.256: Relative Verteilung der CSB- u. TOC-Fractionen im Belebtschlamm der KA I4 .....	224

Abbildung 5.257: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen des Belebtschlammes KA I4.....	225
Abbildung 5.258: AFS-Verteilung im filtrierten Belebtschlamm mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I4.....	226
Abbildung 5.259: Änderung des partikulären CSB- und TOC aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA I4.....	226
Abbildung 5.260: Änderung der AFS aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA I4.....	227
Abbildung 5.261: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB bzw. TOC im Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I4.....	228
Abbildung 5.262: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben aus dem Filtrationsbecken der KA I4.....	228
Abbildung 5.263: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der Anlage I4.....	229
Abbildung 5.264: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der Anlage I4.....	230
Abbildung 5.265: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage I4.....	231
Abbildung 5.266: Angereicherte Fracht in der KA I4 am Tag der Probenahme.....	231
Abbildung 5.267: Spezifische Anreicherung in der KA I4 in Abhängigkeit des oTS.....	231
Abbildung 6.1: Raumbelastung von HTVA und Membranbelebungsanlage im Vergleichszeitraum.....	232
Abbildung 6.2: Temperaturverlauf in den biologischen Behandlungsstufen.....	232
Abbildung 6.3: pH-Wert-Verlauf in HTVA und Membranbelebungsanlage.....	233
Abbildung 6.4: NH <sub>4</sub> -N- und NO <sub>3</sub> -N-Ablaufkonzentrationen der Versuchsanlagen.....	233
Abbildung 6.5: TS-Gehalt und oTS-Anteil der Versuchsanlagen.....	234
Abbildung 6.6: Schlammbelastung der Versuchsanlagen.....	234

Abbildung 6.7:	ISV-Verlauf in den Versuchsanlagen .....	235
Abbildung 6.8:	Zusammenhang zwischen ISV und Temperatur .....	235
Abbildung 6.9:	Auszüge aus dem mikroskopischen Aufnahmen des Belebtschlammes der halbtechnischen konventionellen Versuchsanlage.....	237
Abbildung 6.10:	Auszüge aus dem mikroskopischen Aufnahmen des Belebtschlammes der Membranbelebungsanlage .....	238
Abbildung 6.11:	Verlauf der Grundatmung in beiden Versuchsanlagen .....	239
Abbildung 6.12:	Vergleich der Grundatmung beider Versuchsanlagen .....	239
Abbildung 6.13:	Anteil von $OVC_G$ an $OVC_G+OVN_G$ .....	240
Abbildung 6.14:	CSB- und $BSB_5$ -Ablaufkonzentrationen ( $BSB_5$ -Nachweisgrenze: 5 mg/l).....	240
Abbildung 6.15:	CSB-Abbaugrad.....	241
Abbildung 6.16:	CSB-Zulauffracht, CSB-Raumbelastung .....	243
Abbildung 6.17:	Anteil der BDF-Abwasserfracht am Gesamt-CSB im Zulauf, CSB-Mischkonzentration.....	243
Abbildung 6.18:	Dosierte Natronlauge, Lufteintrag in die Anlage.....	244
Abbildung 6.19:	CSB-Konzentrationen im Ablauf; Gegenüberstellung von Sauerstoffkonzentration, Zulauf- und Ablauffracht.....	245
Abbildung 6.20:	Änderung des TS- und oTS-Gehaltes im Versuchszeitraum, Anstieg des TS-Gehaltes im Belebungsbecken im Vergleich zur behandelten BDF-Abwasserfracht .....	245
Abbildung 6.21:	Schlammbelastung und Grundatmung während der Versuche zum Abbau von BDF-Abwasser .....	246
Abbildung 6.22:	Mikroskopisches Bild des Belebtschlammes: A, B: vor der Behandlung von BDF-Abwasser (TS = 3,1 g TS/l, oTS = 68 % TS); C, D: während der BDF-Abwasser-Behandlung (TS = 24 g/l, oTS = 92 % TS).....	247
Abbildung 6.23:	Überschussschlammanfall unter Einbeziehung aller Werte (links); Bereinigter ÜSS-Anfall (rechts).....	248
Abbildung 6.24:	Verteilung des zugeführtem CSB auf den abgebauten und abgeführten CSB .....	248
Abbildung 6.25:	TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse .....	254

Abbildung 6.26:	AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe .....	254
Abbildung 6.27:	Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss .....	255
Abbildung 6.28:	Relative Verteilung der Zuflussfraktionen (Bezug: papierfiltrierte Probe) .....	255
Abbildung 6.29:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen .....	256
Abbildung 6.30:	Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB bzw. TOC .....	257
Abbildung 6.31:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC (Fortsetzung) .....	258
Abbildung 6.32:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC (Zusammenfassung alle Proben) ...	259
Abbildung 6.33:	Änderung des part. CSB- bzw. TOC aufeinander folgender Fraktionen .....	259
Abbildung 6.34:	Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen .....	260
Abbildung 6.35:	CSB/TOC-Verhältnisse der filtrierten Belebtschlämme aus HTVA und Membranbelebungsanlage während des Parallelbetriebs .....	262
Abbildung 6.36:	CSB- und TOC-Konzentrationen der filtrierten Belebtschlämme .....	263
Abbildung 6.37:	Korrelation zwischen den CSB- und TOC-Konzentrationen der filtrierten Belebtschlämme aus Membranbelebungsanlage und HTVA .....	263
Abbildung 6.38:	CSB- und TOC-Fraktionierung im Zeitraum vom 20.11.07 bis 23.01.08 .....	264
Abbildung 6.39:	Zusammenhang zwischen ISV und Temperatur im Belebtschlamm der Membranbelebungsanlage .....	264
Abbildung 6.40:	Korrelation zwischen ISV und der 0,45 µm-Belebtschlammfraktion aus der Membranbelebungsanlage .....	265
Abbildung 6.41:	Auswirkungen von Temperaturänderungen auf die Konzentration des filtrierten Belebtschlammes der Membranbelebungsanlage .....	266

Abbildung 6.42:	Zusammenhang zwischen oTS-Gehalt und CSB-Konzentration des membranfiltrierten Belebtschlammes der Membranbelebungsanlage .....	266
Abbildung 6.43:	Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen im Belebtschlamm .....	267
Abbildung 6.44:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen.....	268
Abbildung 6.45:	Änderung der AFS-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen .....	268
Abbildung 6.46:	TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes während der Behandlung von BDF-Abwasser .....	269
Abbildung 6.47:	CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes während der Behandlung von BDF-Abwasser (Raumbelastung $\leq 1,0$ kg CSB/(m <sup>3</sup> ·d)) .....	270
Abbildung 6.48:	Relative Zusammensetzung des Belebtschlammes während der Behandlung von BDF-Abwasser (Bezug: papierfiltrierte Probe, $B_R \leq 1,0$ kg CSB/(m <sup>3</sup> ·d)).....	270
Abbildung 6.49:	CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes während der Behandlung von BDF-Abwasser (Raumbelastung $> 1,0$ kg CSB/(m <sup>3</sup> ·d)) .....	271
Abbildung 6.50:	Relative Zusammensetzung des Belebtschlammes während der Behandlung von BDF-Abwasser (Bezug: papierfiltrierte Probe, $B_R > 1,0$ kg CSB/(m <sup>3</sup> ·d)).....	272
Abbildung 6.51:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen während der Behandlung von BDF-Abwasser (ab 04.12.07).....	273
Abbildung 6.52:	Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen während der Behandlung von BDF-Abwasser .....	274
Abbildung 6.53:	Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Belebtschlamm während der Behandlung von BDF-Abwasser ( $B_R > 1,0$ kg CSB/(m <sup>3</sup> ·d)).....	275
Abbildung 6.54:	CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen .....	276

Abbildung 6.55:	Spezifische Anreicherung in Abhängigkeit des oTS-Gehaltes und den Belebtschlammfraktionen .....	277
Abbildung 6.56:	Spezifische Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in Abhängigkeit der Belebtschlammfraktionen .....	278
Abbildung 6.57:	Korrelation zwischen oTS-Gehalt und angereichertem CSB während der Versuche mit kommunalem Abwasser ...	278
Abbildung 6.58:	Korrelation zwischen ISV und angereichertem CSB während der Versuche mit kommunalem Abwasser.....	279
Abbildung 6.59:	Korrelation zwischen ISV und angereichertem CSB im Zeitraum 11/08 bis 01/08.....	279
Abbildung 6.60:	Korrelation zwischen oTS-Gehalt und angereichertem CSB im Zeitraum 11/08 bis 01/08.....	280
Abbildung 6.61:	Korrelation zwischen oTS-Gehalt und angereichertem CSB im Zeitraum der BDF-Abwasserbehandlung .....	280
Abbildung 7.1:	Änderung von CSB und TOC zwischen zwei Fraktionen während der Fraktionierung der Zuflüsse von sechs kommunalen Kläranlagen .....	285
Abbildung 7.2:	Änderung der AFS zwischen zwei Fraktionen während der Fraktionierung der Zuflüsse von sechs kommunalen Kläranlagen .....	286
Abbildung 7.3:	partikulärer CSB bzw. TOC als organischer Anteil der partikulären Substanzen der Zuflüsse von sechs kommunalen Kläranlagen.....	286
Abbildung 7.4:	TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse von sechs kommunalen Kläranlagen und vier Industriekläranlagen.....	287
Abbildung 7.5:	Verringerung von CSB und TOC zwischen 0,45 µm- und 0,1 µm- bzw. 0,025 µm-Fraktion .....	287
Abbildung 7.6:	Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in kommunalen Kläranlagen in Abhängigkeit des Schlammalters als Vergleich zwischen 0,45 µm- bzw. 0,025 µm-Belebtschlammfraktion mit dem Permeat .....	289

## Abkürzungen und Symbole

### *Chemische Zeichen und Summenparameter*

AFS	... Abfiltrierbare Stoffe
AFS <sub>mf</sub>	... Abfiltrierbare Stoffe nach Membranfiltration über 0,45 µm
BSB <sub>5</sub>	... Biologischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
CH <sub>4</sub>	... Methan
Co	... Cobalt
CSB	... Chemischer Sauerstoffbedarf
CSB <sub>AUS</sub>	... mit ÜSS aus einer ABA ausgeschleuster angereicherter CSB
CSB <sub>mf</sub>	... Chemischer Sauerstoffbedarf nach Membranfiltration über 0,45 µm
CSB <sub>unfiltr.</sub>	... CSB der unfiltrierten, homogenisierten Probe
CSB <sub>ZB, mf</sub>	... CSB im Zulauf zur biologischen Stufe nach Membranfiltration über 0,45 µm
ISV	... Schlammvolumenindex
NH <sub>4</sub> -N	... Ammonium-Stickstoff
NH <sub>3</sub> -N	... Ammoniak-Stickstoff
Ni	... Nickel
NO <sub>2</sub> -N	... Nitrit-Stickstoff
NO <sub>3</sub> -N	... Nitrat-Stickstoff
N <sub>ges</sub>	... Summe aus: NH <sub>4</sub> -N + NO <sub>3</sub> -N + NO <sub>2</sub> -N
O <sub>2</sub>	... Sauerstoff
oTS	... organischer Anteil der Trockensubstanz
oPO <sub>4</sub> -P	... Orthophosphat
P <sub>ges</sub>	... Phosphor (gesamt)
Se	... Selen
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	... Sulfat
T	... Temperatur
TKN	... Kjeldahl-Stickstoff, Summe aus organisch gebundenem Stickstoff und NH <sub>4</sub> -N
TOC	... Total Organic Carbon (gesamter organischer Kohlenstoffgehalt)
TOC <sub>mf</sub>	... TOC nach Membranfiltration über 0,45 µm
TOC <sub>unfiltr.</sub>	... TOC der unfiltrierten, homogenisierten Probe
TS	... Trockensubstanz

**Sonstige Abkürzungen**

ABA	...	Abwasserbehandlungsanlage
BB	...	Belebungsbecken
Betriebs-ABA	...	Abwasserbehandlungsanlage für gewerbliches bzw. industrielles Abwasser
BDF-Abwasser	...	Abwasser aus der Biodieselproduktion
$B_R$	...	Raumbelastung
BS	...	Belebtschlamm
$B_{TS}$	...	Schlammbelastung
DN	...	Denitrifikation
HRT	...	Hydraulische Verweilzeit
HTVA	...	Halbtechnische Versuchsanlage
$I_j, \dot{I}_j$	...	Kläranlagen mit industriellem oder gewerblichem Zufluss
KA	...	Kläranlage
$K_i, k_i$	...	kommunale Kläranlagen
$K_{NMGs}$	...	Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen
MBR	...	Membranbelebungsanlage
MW	...	Mischwasser
N	...	Nitrifikation
$OVC_G + OVN_G$	...	Grundatmung
$OVC_G$	...	Grundatmung der Kohlenstoffelimination
$OVN_G$	...	Grundatmung der Nitrifikation
$P_e$	...	Permeat
PS	...	Primärschlamm
PW	...	Prozesswasser
RW	...	Regenwetter
RZ	...	Rezirkulation
TW	...	Trockenwetter
ÜSS	...	Überschussschlamm
VA	...	Versuchsanlage
Zu	...	Zulauf



# 1 Einführung und Zielsetzung

Membranbelebungsanlagen werden vielfach zur Behandlung industrieller und gewerblicher Abwässer, zunehmend auch zur Reinigung häuslicher Abwasser in mittleren und kleinen Kläranlagen eingesetzt. Die Verfahren haben sich in der Praxis bewährt. Die positiven Auswirkungen der Membrantechnik auf die Abwasserbehandlung und die damit verbundenen hohen Eliminationsleistungen sind eingehend beschrieben [Cornel, 2002; Greil, 2003; Britz und Janke, 2004; Buer, 2004; DWA, 2005a; DWA, 2005b; Pinnekamp et al., 2006; Borchmann und Rosenwinkel, 2008].

Ein bekanntes Phänomen beim Betrieb von Membranen stellt die Bildung von Deckschichten (gel-artige Strukturen) dar, die einerseits eine Verbesserung der Abscheidung bewirken, andererseits zur Verblockung der Membranen [Hardt et al., 1971] und damit ggf. zur Störung des Trennprozesses führen. Während Untersuchungen von Lützner et al. (2002) an einer Membranbelebungsanlage wurde festgestellt, dass sich in der Belebungsstufe, schwer abbaubare hochmolekulare Stoffe anreicherten. Mit Hilfe einer einfachen Methode konnte der Nachweis geführt werden, dass diese Substanzen ausschließlich im Belebtschlamm, nicht aber im Permeat enthalten waren. Die Ausschleusung aus dem System erfolgte mit dem Überschussschlammabzug. In der Literatur wird über ähnliche Beobachtungen berichtet (vgl. Abschnitt 2). In Abhängigkeit der Schlammbehandlung können diese Stoffe entweder erneut einer Membranbelebungsanlage zugeführt oder bei externer Schlammbehandlung auf andere Anlagen verlagert werden.

Ein Ziel des Forschungsvorhabens bestand darin, mit Hilfe eines Screenings festzustellen, ob die Anreicherung von schwer abbaubaren hochmolekularen Substanzen in der Praxis ein spezifisches Problem von Membranbelebungsanlagen darstellt, ob es an bestimmte Bedingungen geknüpft ist und, ob eine Verlagerung dieser Substanzen auf andere Kläranlagen stattfindet. Dies ist insbesondere für Anlagen zur Industrieabwasserbehandlung von Bedeutung, da diese häufig Indirekt-einleiter sind und ggf. anfallende Prozesswässer in die Kanalisation abgeben und diese damit auf kommunale Kläranlagen verlagern würden.

Darüber hinaus wurden halbtechnische Versuche zur Anreicherung hochmolekularer Substanzen in einer Membranbelebungsanlage unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt. Zunächst wurde die Anreicherung bei der Behandlung kommunalen Abwassers untersucht. Als Referenzanlage diente eine unter weitgehend gleichen Randbedingungen (Abwasserbeschaffenheit, Raumbelastung, Schlammalter) betriebene halbtechnische konventionelle Belebtschlammanlage. Im Folgenden wurde geprüft, inwieweit die Anreicherung durch die Behandlung von Industrieabwasser in einer kommunalen Kläranlage (Indirekteinleitung) beeinflusst wird. Die Versuche wurden mit Abwasser aus der Biodieselproduktion (BDF-Abwasser) durchgeführt. Im letzten Teil der Anreicherungsversuche wurde die Membranbelebungsanlage ausschließlich als Industriekläranlage zur Behandlung von BDF-Abwasser betrieben.

## 2 Stand des Wissens

Die Anreicherung hochmolekularer Substanzen in Membranbelebungsanlagen als Konzentrationsunterschied zwischen filtriertem Belebtschlamm und Permeat wurde sowohl im Labor mit synthetischem Abwasser [Yamamoto *et al.*, 1989; Nagaoaka *et al.*, 1996; Çiçek *et al.*, 1999; Huang *et al.*, 2000; Shin und Kang, 2003; Ng und Hermanowicz, 2005] bzw. an halbtechnischen Versuchsanlagen [Rosenberger *et al.*, 2006; Lyko *et al.*, 2007] als auch an einzelnen großtechnisch realisierten Anlagen [Lützner *et al.*, 2002; Lyko *et al.*, 2007] untersucht. Das Ziel der bisher durchgeführten Arbeiten bestand im Wesentlichen darin, Erkenntnisse über das Foulingverhalten der Membranen einerseits und über das Anreicherungsverhalten andererseits zu gewinnen.

Technisch bedingt, reichern sich alle partikulären Substanzen oberhalb der Trenngrenze der installierten Membran an. Darüber hinaus können hochmolekulare Substanzen infolge der Ausbildung einer Gelschicht auf der Membran im Belebtschlamm akkumuliert werden [Hardt *et al.*, 1971; Huang *et al.*, 2000; Laabs *et al.*, 2004]. Allerdings wird in der Literatur auch darauf hingewiesen, dass die Deckschichtbildung als Erklärung für die Anreicherung nicht ausreichend ist [Song *et al.*, 2007]. Als eine wesentliche Ursache gilt der im Vergleich zum Wasser verzögerte Transport der organischen Substanzen durch die Poren der Membran [Song *et al.*, 2007].

Die Grad der Anreicherung ist u. a. vom Schlammalter abhängig. Bei hohem Schlammalter sind niedrigere Konzentrationen der angereicherten Substanzen beobachtet worden [Zhang und Yamamoto, 1996; Huang *et al.*, 2000; Hasar *et al.*, 2004; Jinsong *et al.*, 2006; Massé *et al.*, 2006; Liang *et al.*, 2007], was darauf hindeutet, dass es sich nicht ausschließlich um inerte Substanzen handelt, die mit dem Zulauf in die Anlage gelangen, sondern auch um schwer bzw. langsam abbaubare Substanzen [Çiçek *et al.*, 2003; Shin und Kang, 2003; Hasar *et al.*, 2004; Holbrook *et al.*, 2005], die vom Belebtschlamm gebildet werden. Die Ausschleusung angereicherter Substanzen erfolgt mit dem Überschussschlamm [Lützner *et al.*, 2002; Çiçek *et al.*, 2003; Hasar *et al.*, 2004].

Im Zuge von Untersuchungen zum Foulingverhalten von Membranen wurde festgestellt, dass sich insbesondere von den Mikroorganismen des Belebtschlammes gebildete Extracellular Polymeric Substances (EPS) bzw. Soluble Microbial Products (SMP), z. B. Polysaccharide, Proteine, Glycoproteine, Lipide, Phospholipide, Glycolipide und Nucleinsäuren [Flemming und Wingender, 2001; Flemming und Wingender, 2002], anreichern können [Nagaoka et al., 1996; Huang et al., 2000; Rosenberger et al., 2006; Drews et al., 2007].

Es ist unklar, ob sich die angereicherten Substanzen hemmend auf die aktive Biomasse auswirken. Während einige Autoren eine Hemmung mit steigender Anreicherung beobachteten [Huang et al., 2000] bzw. vermuten [Hardt et al., 1971], konnten Shin und Kang (2003) keine hemmende Wirkung feststellen. Allerdings beeinflussen die angereicherten Substanzen Holbrook et al. (2005) zufolge Größe und Form der Schlammflocken und die Sauerstoffaufnahme.

Der Nachweis von EPS oder SMP ist relativ kompliziert. Im durchgeführten Forschungsvorhaben wurden die angereicherten Substanzen mit einer einfachen Aufbereitungsmethode summarisch als CSB und TOC erfasst.

### 3 Durchführung des Forschungsvorhabens

#### 3.1 Durchführung eines Screenings an großtechnisch realisierten Anlagen

Im Abstand von zwei Monaten wurden an neun großtechnisch realisierten Kläranlagen jeweils fünf Probenahmen durchgeführt. Es wurden Proben aus dem Zufluss, dem Membranbelebungsbecken, in begründeten Fällen auch aus ggf. vorhandenen weiteren Belebungsbecken, dem Permeat und insofern vorhanden, aus dem Prozesswasser entnommen.

Die Messkampagne umfasste die Probenahme auf fünf kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen (ABA, Tabelle 3.1) mit verschiedenen Anlagenkonfigurationen und Ausbaugrößen sowie vier Anlagen zur Industrieabwasserbehandlung (Industrie-ABA) aus verschiedenen Branchen (Tabelle 3.2).

**Tabelle 3.1: Im Rahmen der Messkampagne untersuchte kommunale ABA**

Bez.	Ausbaugröße	Membrantyp	Hersteller/Bezeichnung	Porengröße [µm]
K1	12.000	Plattenmembran	Kubota EK 400	0,4
K2	12.000	Hohlfasermembran	Zenon ZeeWeed 500C	0,1
K3	10.500	Plattenmembran	Kubota EK 400	0,4
K4	80.000	Hohlfasermembran	Zenon ZeeWeed 500C	0,1
K5	230	Plattenmembran	Kubota	0,4

**Tabelle 3.2: Im Rahmen der Messkampagne untersuchte Betriebs-ABA**

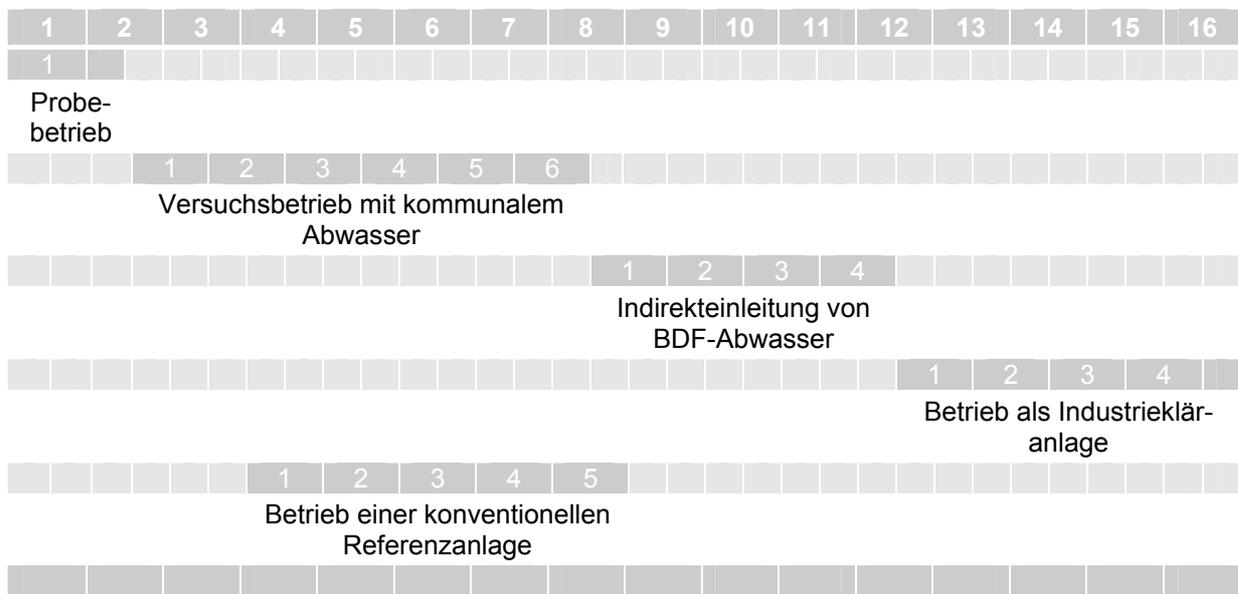
Bez.	Branche	Membrantyp	Hersteller/Bezeichnung	Porengröße [µm]
I1	Großwäscherei	Plattenmembran	Kubota EK 300	0,4
I2	Textilveredlung	Plattenmembran	MaxFlow A40	0,4
I3	Kartoffelstärkeproduktion	Hohlfasermembran	Zenon ZeeWeed 500	0,04
I4	Bioabfallbehandlung	Hohlfasermembran	Zenon ZeeWeed 500 OKC	0,4

Die Anlagenbeschreibungen, Probenahmestellen und die Art der Probenahme (einfache Stichprobe, qualifizierte Stichprobe) sind anlagenspezifisch in den entsprechenden Abschnitten enthalten. Aus jeder Verfahrensstufe wurden vor Ort Leitfähigkeit, pH-Wert und Temperatur bestimmt. Darüber hinaus wurden im Belebungsbecken bzw. Membranbelebungsbecken der Sauerstoffgehalt und die Grundatmung des Belebtschlammes ermittelt.

Die entnommenen Zufluss-, Prozesswasser- und Belebtschlammproben wurden in PE-Probenahmebehälter ( $V = 1\text{ l}$ ) gefüllt, die Permeatproben in jeweils 2 Glasflaschen ( $V = 350\text{ ml}$ ). Aufgrund des Aufwandes im Hinblick auf die Probeaufbereitung und -analytik konnten vor Ort keine Analysen durchgeführt werden. Die Proben wurden in einer Kompressorkühlbox (Waeco CF 40) bei  $5\text{ °C}$  gekühlt von den Kläranlagen zum Labor des ISI der TU Dresden transportiert und am nächsten Tag aufbereitet und analysiert.

### 3.2 Versuche im halbertechnischen Maßstab

Parallel zur Messkampagne wurden im Technikum des ISI der TU Dresden Versuche zum Anreicherungsverhalten hochmolekularer organischer Substanzen im halbertechnischen Maßstab durchgeführt. Der Versuchszeitraum (16 Monate, Abbildung 3.1) umfasste drei Versuchsreihen. Zunächst wurde das Anreicherungsverhalten an einer Membranbelebungsanlage untersucht, die mit kommunalem Abwasser beschickt wurde (rd. 6 Monate). Als Referenzanlage diente eine unter weitgehend identischen Betriebsbedingungen betriebene, konventionelle Belebtschlammanlage. Anschließend wurde geprüft, wie sich die Einleitung eines organisch hochbelasteten Abwasserteilstroms aus der Biodieselproduktion (BDF-Abwasser) auf den Betrieb der Anlage und die Anreicherung auswirkt (Indirekteinleitung in eine kommunale Kläranlage). Im letzten Abschnitt wurde die Membranbelebungsanlage als Industriekläranlage betrieben. Der kommunale Zufluss wurde auf ein Minimum zur Sicherstellung der zum Abbau erforderlichen Spurenstoffe reduziert, die BDF-Abwasserfracht wurde aufgestockt. Ziel war es, die maximale Raumbelastung und die daraus resultierende Stoffaufkonzentration zu ermitteln.



**Abbildung 3.1: Zeitlicher Ablauf der Versuche (Angabe in Monaten)**

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Angewendete Nachweismethoden

#### 4.1.1 Nachweis der Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Der Nachweis der angereicherten hochmolekularen organischen Substanzen erfolgte durch eine Fraktionierung des Belebtschlammes über verschiedene Membranfilter (vgl. Abschnitt 4.1.2, Tabelle 4.2) und dem anschließenden Vergleich der ermittelten CSB- und TOC-Konzentrationen mit den Permeatproben. Das Permeat wurde unterhalb der Trenngröße der in der betreffenden Kläranlage installierten Membran fraktioniert. Anhand der Differenzen zwischen den Konzentrationen im filtrierten Belebtschlamm und im Permeat konnte gefolgert werden, ob eine Anreicherung vorliegt. Aufgrund der fünfmaligen Beprobung jeder Anlage ist eine Aussage darüber möglich, ob es sich um eine permanent auftretende Erscheinung handelt und, ob das Ausmaß der Anreicherung Schwankungen unterworfen ist.

**Tabelle 4.1: Technische Daten der verwendeten Filter**

Porengröße	Durchmesser	Filtermaterial	Hersteller
[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]		
12...15	90	Cellulose	Sartorius AG
12...15	240	Cellulose	Sartorius AG
8	50	Cellulosenitrat	Sartorius AG
3	50	Cellulosenitrat	Sartorius AG
1,2	50	Cellulosenitrat	Sartorius AG
0,45	47	Celluloseacetat	Sartorius AG
0,2	47	Celluloseacetat	Sartorius AG
0,1	47	Mischcelluloseester	Millipore Corporation
0,025	47	Mischcelluloseester	Millipore Corporation

Die Ermittlung der angereicherten Fracht erfolgte auf Basis der Größe der biologischen Stufe, insofern eine Rezirkulation zwischen Membranfiltration und ggf. vorhandenen weiteren Belebtschlammbecken zur Denitrifikation und Nitrifikation stattfand. Die Berechnung der auf die oTS-Fracht bezogenen Anreicherung und deren Bezug auf das Schlammalter zur Bestimmung der Bildungsrate der nicht

membrängängigen Substanzen ( $K_{\text{NMGS}}$ ) erlaubte den Vergleich der untersuchten Kläranlagen, unabhängig von Ausbaugröße und Belastung.

#### 4.1.2 Fraktionierung von Belebtschlamm, Kläranlagenzuflüssen und Prozesswasser

Die vorgenommene Fraktionierung stellt eine Charakterisierung des Abwassers anhand der Partikelgrößenverteilung der untersuchten Proben dar. Zur Durchführung der Fraktionierung wurden die Proben in Abhängigkeit ihrer Beschaffenheit filtriert (Tabelle 4.2). Der erste Aufbereitungsschritt der Proben bestand im Regelfall bei allen Verfahrensstufen, mit Ausnahme des Permeats, in der Filtration über einen Papierfilter (Porengröße: 12...15 µm) mit einem Büchner-Trichter (Durchmesser: 240 mm). Anschließend erfolgte die Membranfiltration parallel in zwei Vakuumfiltrationseinheiten (Filtrationseinheiten: Volumen 250 ml, Glasbauteile aus Borosilicatglas, PTFE-Filterhalter – Sartorius AG; Membran-Vakkumpumpen: DIVAC 1,2 L – Oerlikon Leybold Vacuum GmbH). Der zur Papierfiltration eingesetzte Büchner-Trichter und die Membranfiltrationseinheiten wurden auf einen Wittschen Topf aufgesetzt, der ein separates Glasgefäß beinhaltete, so dass ein einfacher Wechsel der Filtrationsgefäße gewährleistet und eine Verschleppung innerhalb der Proben vermieden wurde (Abbildung 4.1).

**Tabelle 4.2: Zur Fraktionierung verwendete Filter**

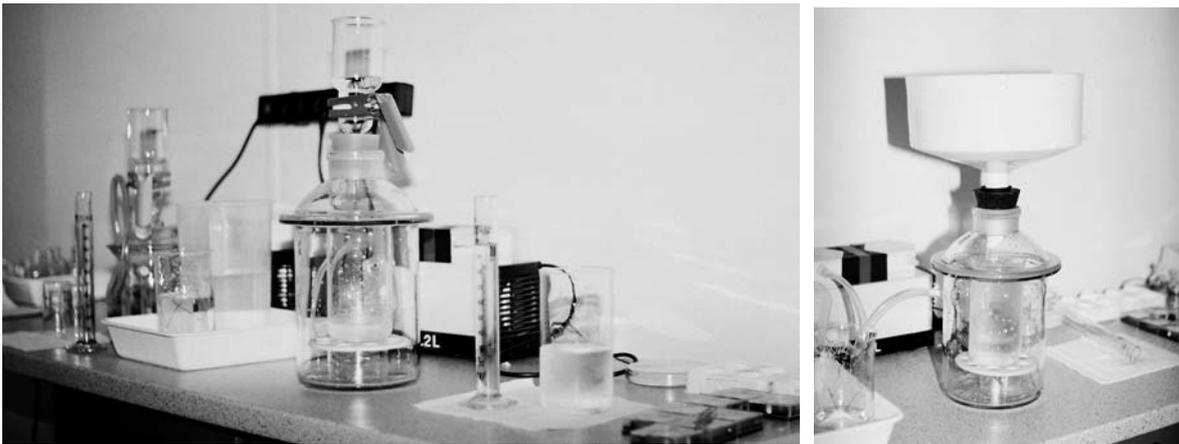
Filter	Porengröße [µm]	Zufluss	Belebtschlamm	Prozesswasser	Permeat <sup>1</sup>
Papierfilter	12...15	X	X	X	
Membranfilter	8	X	X <sup>1</sup>	X	
Membranfilter	3	X	X <sup>1</sup>	X	
Membranfilter	1,2	X	X <sup>1</sup>	X	
Membranfilter	0,45	X	X	X	
Membranfilter	0,2	X	X	X	X <sup>2</sup>
Membranfilter	0,1	X	X	X	X <sup>2</sup>
Membranfilter	0,025	X	X	X	X

<sup>1</sup> bei Anlage I3 und I4 sowie bei den Versuchen zum Abbau von BDF-Abwasser

<sup>2</sup> in Abhängigkeit der Porengröße der auf der Kläranlage installierten Membran

Vom Filtrat der papierfiltrierten Probe (1 l) wurde ein Teil des Volumens (30 ml) abgezweigt und in eine zuvor mit 10 ml Filtrat gespülte Klarglasflasche (50 ml) gefüllt. Der Hauptteil des Filtrats wurde anschließend über die nächste Filterstufe filtriert (Abbildung 4.2). Alle verwendeten Geräte (Filtrationseinheit, Messbecher,

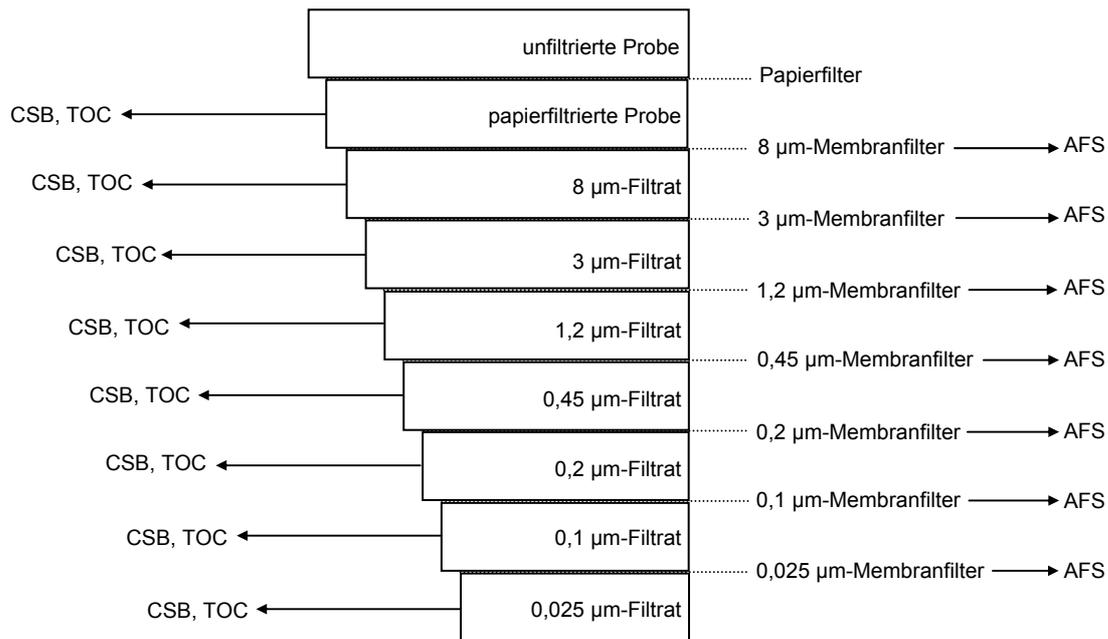
Messzylinder, Auffanggefäße) bestanden aus Glas und wurden ausschließlich mehrfach mit destilliertem Wasser und dem jeweiligen Filtrat gespült und, um eine Verdünnung der filtrierte Proben zu vermeiden, mit Labortüchern (Kimtech<sup>®</sup> Science) getrocknet. Für jedes Glasgerät wurden ausschließlich unbenutzte Tücher verwendet. In Voruntersuchungen konnte ausgeschlossen werden, dass von den Labortüchern eine Beeinflussung der nachfolgenden Proben, durch Auswaschung von organischen Bestandteilen aus den Tüchern ausging.



**Abbildung 4.1: Membranfiltrationseinheiten (links), Papierfiltration mit Büchner-Trichter (rechts)**

Vor Beginn der Untersuchungen wurden alle Geräte mit einer verdünnten Natriumhypochloritlösung behandelt (30 min Einwirkzeit) und mehrfach mit destilliertem Wasser gespült. Während der Versuche wurden Geräte und Glasflaschen bedarfsweise mit verdünnter Salzsäure gereinigt. Organische Reinigungsmittel kamen nicht zur Anwendung.

Alle Filter wurden vor ihrem Einsatz 30 min in destilliertem Wasser gewaschen, danach wurde das Waschwasser gewechselt und der Waschvorgang wiederholt (30 min). Nach jedem Filterwechsel wurde die Filtrationseinheit, insbesondere der Filterhalter mit dem unbeladenen Filter zunächst mit destilliertem Wasser (20 ml), anschließend mit 20 ml Probe gespült, das dabei aufgefangene Filtrat verworfen. Nach Einsetzen eines gereinigten Auffanggefäßes wurde mit der Filtration der Probe begonnen. Das filtrierte Volumen war von der Beschaffenheit des Abwassers abhängig und wurde bei kommunalem Abwasser durch Trocken- und Regenwetterbedingungen beeinflusst.



**Abbildung 4.2: Durchführung der Fraktionierung (Bsp. Zuflussprobe)**

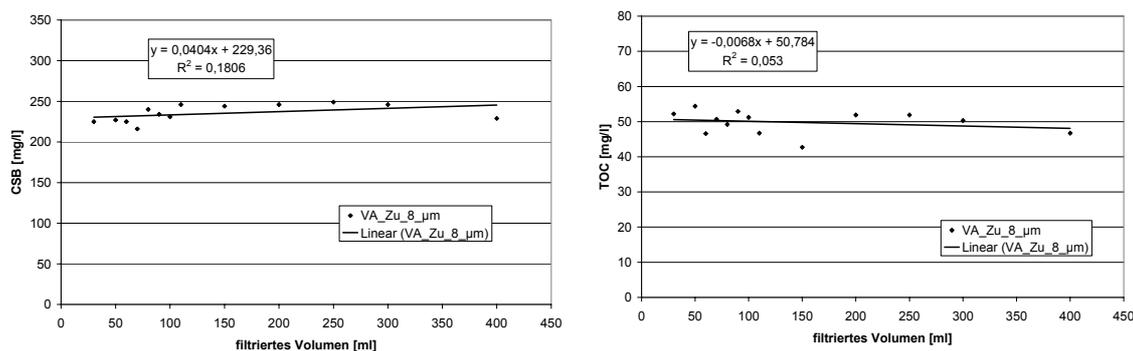
Vor Beginn der Untersuchungen wurde eine vollständige Fraktionierung (8 µm bis 0,025 µm) mit destilliertem Wasser durchgeführt, um zu prüfen, ob es trotz der Filterwäsche zu einer Auswaschung von organischen Bestandteilen (TOC-Messung) aus den Membranfiltern kommt. Für die Filtration von destilliertem Wasser konnte dies ausgeschlossen werden. Unabhängig davon kann bei der Filtration von lösungsmittelhaltigen Abwässern eine Auswaschung von CSB oder TOC aus den Filtern stattfinden. Eine signifikante Beeinflussung der Proben ist eher unwahrscheinlich, da organische Lösungsmittel im Regelfall einen hohen CSB bzw. TOC aufweisen.

Um Verschleppungen zwischen den Proben der einzelnen Anlagen zu vermeiden, wurde für die Dauer der Messkampagne für jede Anlage und zu jeder Verfahrensstufe ein Flaschensatz für die entsprechenden Filtratstufen angelegt. Die Messung von Leitfähigkeit, Temperatur (Multiline P4 - WTW Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH) und Trübung (NEPHLA Labor-Trübungsphotometer – Hach Lange GmbH) erfolgte im Filtrat, nachdem die entsprechende Probe zur CSB- und TOC-Analyse in die zugehörige Filtratflasche abgefüllt worden war. Die AFS-Bestimmung fand anhand gewaschener und gewogener Membranfilter aller Filterstufen statt. Die Sonden zur Leitfähigkeits- und Temperaturmessung wurden ebenso wie die Messküvette des Trübungsmessgerätes mit destilliertem Wasser

gereinigt und getrocknet. Das zur Trübungsmessung abgezweigte Filtrat wurde verworfen.

Neben der angewendeten Methode der Reihenfiltration besteht die Möglichkeit, die unfiltrierte Probe direkt über einen Membranfilter einer bestimmten Porengröße zu filtrieren, d. h. ohne Zwischenschritte direkt bspw. über 0,1 µm. Dieses Vorgehen weist einige Nachteile auf. Zum einen ist es technisch bedingt schwierig, unfiltriertes oder ggf. papierfiltriertes Abwasser über einen Filter mit kleiner Porengröße zu filtrieren. Dies gilt insbesondere für Abwasser mit einem hohen Anteil partikulärer Substanzen, wie z. B. Prozesswasser oder das Industrieabwasser der Anlagen I3 und I4. Zum anderen bilden auf Filtern abgeschiedene AFS einen Filterkuchen bzw. eine Deckschicht, die zur Verengung des Porendurchmessers führt. Die analysierten AFS-, CSB- und TOC-Konzentrationen entsprechen damit nicht der Porengröße des Filters. Infolge der schrittweisen Aufbereitung mit der gewählten Methode wurde dieser Effekt minimiert.

Zur Überprüfung der Auswirkungen der Deckschichtbildung auf die CSB- und TOC-Analysen wurde eine Versuchsreihe zur Filtration von kommunalem Abwasser über Membranfilter (Porengröße: 8 µm) durchgeführt. Dabei konnte im Bereich des filtrierten Volumens von 30...400 ml kein signifikanter Zusammenhang zwischen CSB bzw. TOC mit dem filtrierten Volumen nachgewiesen werden. Die Standardabweichung lag beim CSB bei 10 mg/l, beim TOC bei 3,1 mg/l.



**Abbildung 4.3: Einfluss der Deckschicht bei der Membranfiltration auf die CSB- und TOC-Analysen**

Aus unfiltrierten Proben bestimmte AFS sind in vielen Fällen, im Hinblick auf die vorgenommene Partikelgrößenfraktionierung, nicht plausibel, da die Probenahme und die Homogenisierung der Proben einen entscheidenden Einfluss auf das Er-

gebnis der Analysen haben. Unbehandeltes kommunales Abwasser enthält eine Reihe von partikulären Substanzen verschiedener Größe und Zusammensetzung. Unabhängig von der labortechnischen Aufbereitung der Probe ist es zweifelhaft, dass eine im Sinne des AFS-Gehaltes repräsentative Probe zur Verfügung steht. Es ist günstiger, den Einfluss der partikulären Substanzen, die mit Hilfe der Filtration über einen Papierfilter entfernt werden können, zu eliminieren. Bei Abwässern mit homogener Zusammensetzung, wie bspw. bei einigen Industrieabwässern oder mechanisch vorgereinigtem kommunalem Abwasser (Vorklärbecken) ist dieser Einfluss dagegen vergleichsweise gering.

### 4.1.3 Einfluss der Vorbereitung der Belebtschlammproben auf die Analytik

Grundsätzlich stehen drei Möglichkeiten zur Verfügung, mit denen Belebtschlammproben zur Fraktionierung aufbereitet werden können. Die Membranfiltration kann einerseits aus dem Überstand des sedimentierten Belebtschlammes erfolgen, andererseits aus der homogenisierten Belebtschlammprobe, entweder nach Zentrifugation mit anschließender Papierfiltration oder nach der direkten Filtration über Papierfilter.

Belebtschlämme aus Membranbelebungsanlagen weisen im Regelfall, u. a. infolge des hohen TS-Gehaltes (> 10 g TS/l), ein vergleichsweise hohes Schlammvolumen auf. Eine mehrstündige Absetzzeit (> 10 h, vgl. Abschnitt 3.1) im Probenahmebehälter führte im Regelfall zur Abtrennung von bis zu 100...200 ml Klarwasser. Bei den untersuchten Industrieanlagen trat teilweise keine sichtbare Sedimentation ein. Zur Bereitstellung der zur Fraktionierung benötigten Klarwassermenge (1 l) stellte daher, unter den Randbedingungen der durchgeführten Messkampagne, die Aufbereitung aus der homogenisierten Probe das Mittel der Wahl dar.

**Tabelle 4.3: Gegenüberstellung der Aufbereitungsmethoden (CSB)**

Anlage	K1	K2	K3	K4	K5	I2
	CSB	CSB	CSB	CSB	CSB	CSB
Aufbereitungsart	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Filtration <sup>1)</sup>						
[ml]						
100	35,0	44,1	31,7	39,0	23,6	488
200	32,4	35,1	24,7	40,4	23,5	501
300	30,3	35,7	23,4	38,0	23,5	503
400	28,3	34,0	22,7	38,1	21,8	514
500	26,8	31,6	21,8	40,3	22,7	517
600	26,0	32,9	20,7	36,4	21,6	513
700	25,6	31,5	20,7	36,9	19,7	508
800	25,7	nicht bestimmt	20,9	37,4	19,6	500
900	25,6	nicht bestimmt	19,4	39,5	nicht bestimmt	514
1.000	23,5	29,2	19,4	38,8	20,2	509
Zentrifugation <sup>2)</sup>	33,2	28,5	24,9	42,3	23,7	501
Sedimentation <sup>3)</sup>	21,1	30,5	17,0	nicht bestimmt	21,0	492

<sup>1)</sup>Filtration einer homogenisierten Schlammprobe über Papierfilter (Porengröße: 12...15 µm, d = 240 mm); <sup>2)</sup>Dauer: 10 min, 3.600 min<sup>-1</sup>; <sup>3)</sup>Klarwasserphase

Es besteht die Frage, welche der Aufbereitungsarten – Filtration und Zentrifugation – zum Erhalt einer ungestörten Klarwasserprobe führt. Während der Messkampagne wurden verschiedene Belebtschlämme hinsichtlich der Auswirkung von Zentrifugation und Filtration miteinander verglichen (Tabelle 4.3, Tabelle 4.4). Aus den Ergebnissen dieser orientierenden Untersuchung lässt sich kein eindeutiger Schluss ableiten. Der Belebtschlamm wirkt bei der Filtration als Anströmfilter (vgl. *Evenblij und van der Graf, 2004*). In der Folge ist den meisten Fällen eine Verringerung des CSB und der Trübung mit Zunahme der filtrierten Menge zu beobachten. Der Vergleich der zentrifugierten Probe mit der Klarwasserprobe nach der Sedimentation zeigt allerdings auch keine Übereinstimmung, so dass davon auszugehen ist, dass keine der beiden Aufbereitungsmöglichkeiten als ideal anzusehen ist.

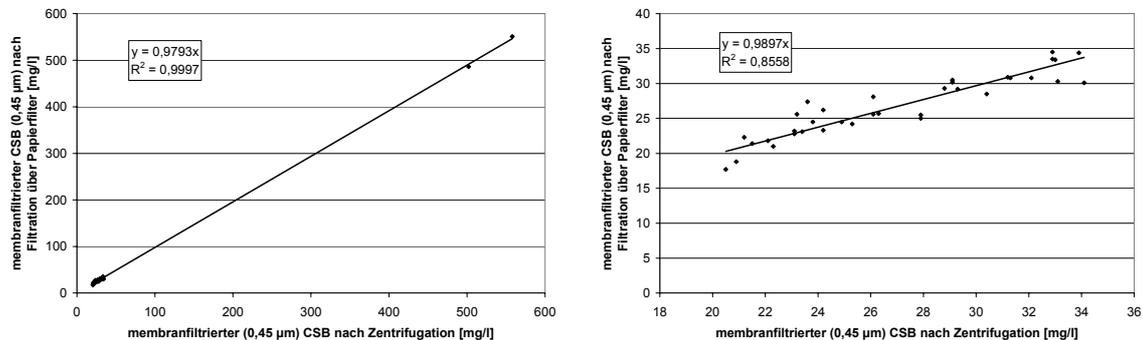
**Tabelle 4.4: Gegenüberstellung der Aufbereitungsmethoden (Trübung)**

Anlage	K1	K2	K3	K4	K5	I2	
	Trübung	Trübung	Trübung	Trübung	Trübung	Trübung	
Aufbereitungsart	[FNU]	[FNU]	[FNU]	[FNU]	[FNU]	[FNU]	
Filtration <sup>1)</sup>							
[ml]	100	13,96	7,55	5,59	10,31	4,49	15,82
	200	7,74	4,35	4,39	9,82	3,11	11,75
	300	6,57	4,19	3,69	7,09	3,29	9,04
	400	5,74	3,95	3,26	6,58	2,54	8,15
	500	5,13	4,35	3,02	5,33	2,68	8,08
	600	4,50	3,35	2,77	5,49	2,33	7,01
	700	3,95	3,16	2,40	5,46	1,77	6,71
	800	3,50	nicht bestimmt	2,37	4,79	1,43	6,00
	900	3,33	nicht bestimmt	2,09	4,38	nicht bestimmt	4,58
	1.000	2,94	2,57	2,07	4,92	1,28	4,57
Zentrifugation <sup>2)</sup>	7,84	1,80	3,87	2,45	1,25	4,35	
Sedimentation <sup>3)</sup>	2,82	2,83	1,16	nicht bestimmt	0,86	5,04	

<sup>1)</sup>Filtration einer homogenisierten Schlammprobe über Papierfilter (Porengröße: 12...15 µm, d = 240 mm); <sup>2)</sup>Dauer: 10 min, 3.600 min<sup>-1</sup>; <sup>3)</sup>Klarwasserphase

Ein Unterschied zwischen den CSB-Konzentrationen membranfiltrierter Proben (0,45 µm; 0,2 µm; 0,1 µm; 0,025 µm) nach Zentrifugation im Vergleich zur Papierfiltration ist nicht nachweisbar (Abbildung 4.4). Die in Abbildung 4.4 dargestellten Wertepaare stammen aus Proben aller kommunalen Kläranlagen, der Versuchs-

anlage und aus der Betriebskläranlage I2. Die TS-Gehalte der Proben lagen zwischen 3,5 g TS/l und 22 g TS/l, die oTS-Gehalte zwischen 60 % TS und 90 % TS.



**Abbildung 4.4: Einfluss der Probenaufbereitung durch Zentrifugation und Filtration über Papierfilter auf die anschließende Membranfiltration**

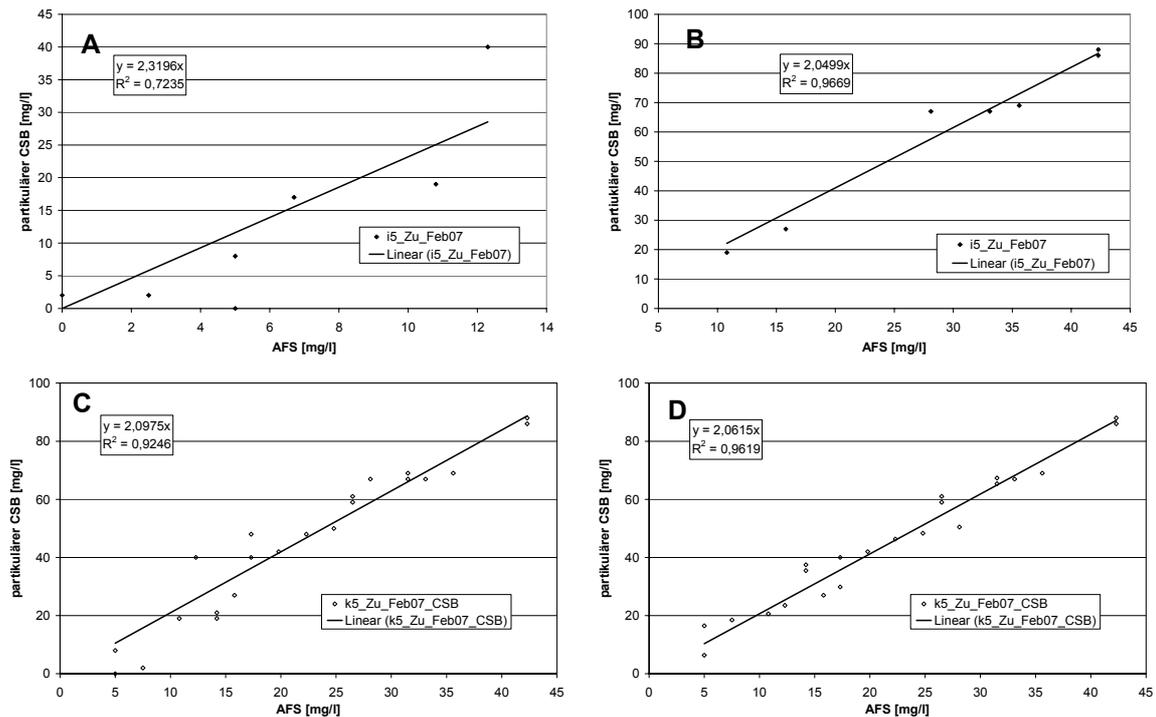
Die Aufbereitung der Belebtschlammproben der kommunalen Kläranlagen erfolgte ebenso wie die der Anlage I2 nach Papierfiltration. Der Belebtschlamm der Proben I3 und I4 wies einen hohen Anteil partikulärer, nicht absetzbarer Substanzen auf. Die Proben der Anlage I3 wurden daher nach der Papierfiltration nochmals zentrifugiert, die der Anlage I4 zunächst zentrifugiert und danach über einen Papierfilter filtriert; gleiches gilt für die an der Versuchsanlage entnommenen Proben im Zeitraum der BDF-Abwasserbehandlung. Im Gegensatz dazu erfolgte die Aufbereitung der Belebtschlammproben aus der Versuchsanlage im Zeitraum der Versuche mit kommunalem Abwasser (vgl. Abschnitt 3.2) überwiegend nach kurzer Sedimentation (< 30 min).

#### 4.1.4 Datenaufbereitung

Die CSB-, TOC- und AFS-Konzentrationen der fraktionierten Proben wurden dahingehend überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen den partikulären Anteilen von CSB und TOC mit den AFS besteht. Der partikuläre organische Anteil wurde als Differenz zwischen den CSB- und TOC-Konzentrationen aus zwei filtrierten Proben ermittelt. Zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen partikulärem CSB und TOC mit den AFS können die Werte aufeinander folgender Fraktionen genutzt werden. Die auf einem Filter zurückgehaltenen AFS werden direkt dem partikulären CSB bzw. TOC zwischen den betreffenden Filtrationsstufen gegenüber gestellt. Der Nachteil des direkten Vergleichs besteht darin, dass aufgrund der teilweise geringen Konzentrationsunterschiede keine Auswertung möglich ist, bzw. negative Differenzen (Fehlerbereich der Analysen) auftreten.

Eine andere Methode besteht darin, die Differenz auf Basis eines Bezugswertes zu bilden, z. B. anhand der CSB-Konzentration der papierfiltrierten Probe. Der partikuläre CSB der folgenden Filterstufen wird als Differenz zum papierfiltrierten CSB gebildet. Im Gegensatz dazu werden die auf den Membranfiltern gemessenen AFS bis zur jeweiligen Filterstufe aufsummiert. Der Vorteil äußert sich darin, dass aufgrund der größeren Differenzen zwischen den Werten ein Zusammenhang nachweisbar ist. Ein Problem dieser Methode liegt darin, dass der Bezugswert für den Anstieg der Funktion wesentlich ist. Eine fehlerhafte Bestimmung dieses Wertes wirkt sich auf den gefundenen Zusammenhang aus. Daher wurde die Methode dahingehend geändert, neben dem papierfiltrierten CSB bzw. TOC die analysierten Werte nach der Filtration über 8  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  und 1,2  $\mu\text{m}$  als Bezugswerte zu nutzen und alle damit ermittelten Wertepaare in einer Funktion darzustellen, so dass der Einfluss von ggf. aufgetretenen Analysefehler minimiert bzw. nachweisbar wird und die Möglichkeit besteht, fehlerbehaftete Werte anzupassen.

Die Anpassung von Messwerten wurde iterativ anhand der AFS und des Anstiegs zwischen den AFS und den partikulären organischen Substanzen (CSB, TOC) vorgenommen. Nach Auswahl eines plausiblen Bezugswertes wurde der zu prüfende CSB bzw. TOC berechnet und mit dem Messwert verglichen. Anhand einer Zulaufprobe der Anlage K5 sind die Ergebnisse der verschiedenen Methoden in Abbildung 4.5 zusammengestellt.



**Abbildung 4.5: Methoden zur Datenauswertung – A: Direktvergleich; B: Methode mit einem Bezugswert; C – Methode mit vier Bezugswerten; D – Methode mit vier Bezugswerten (plausibilisiert)**

Die gewählte Methode zur Prüfung und Plausibilisierung von Analysen ist ausschließlich dann anwendbar, wenn Werte in ausreichender Zahl zur Verfügung stehen, so dass mehrere Bezugswerte eingesetzt werden können. Im Rahmen der durchgeführten Messungen wurde das Verfahren zur Prüfung der Zulaufkonzentrationen, des Prozesswassers und der Belebtschlammkonzentrationen bei Anlage I3 und I4 angewendet. Die wesentliche Voraussetzung besteht in der korrekten Bestimmung der AFS. Einen Hinweis auf eine fehlerhafte AFS-Bestimmung liefert die Methode, wenn sowohl CSB als auch TOC einer Fraktion in etwa dem gleichen Fehlerbereich liegen. Eine Prüfung der AFS kann mit Hilfe der Trübungsmessung erfolgen, die aber insbesondere bei kommunalem Abwasser im Regelfall nur bis  $0,2 \mu\text{m}$  belastbar ist. Unterhalb der  $0,2 \mu\text{m}$ -Fraktion liegen die Trübungswerte der Fraktionen dicht beieinander bzw. lassen keinen Unterschied erkennen, so dass eine Auswertung nicht zielführend ist.

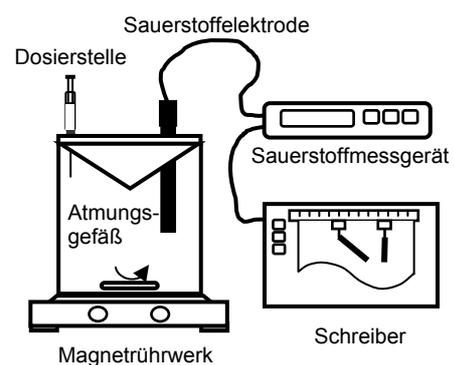
Einen weiteren kritischen Punkt stellt die Prüfung des infolge der Anpassung einiger Werte erhaltenen Zusammenhangs zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. TOC dar. Zwischen TOC- und CSB-Konzentrationen der Fraktionen einer Probe besteht im Regelfall ein Zusammenhang. Ist dieser Zusammenhang

nachweisbar, dann gilt er auch für den abgeschiedenen partikulären CSB bzw. partikulären TOC. Aus dem Ergebnis der Division der Anstiege von  $AFS/CSB_{part.}$  und  $AFS/TOC_{part.}$  geht hervor, ob die gefundenen Zusammenhänge schlüssig sind.

#### 4.1.5 Atmungsmessung

Die Vorbereitung zur Durchführung von Atmungsmessungen unterscheidet sich zwischen den großtechnischen Anlagen, die während der Messkampagne untersucht worden sind und den Versuchen an den halbtechnischen Anlagen im Technikum. Grundsätzlich wurden die Belebtschlammproben (1 l) während der belüfteten Phase aus einem Belebungs- bzw. Membranbelebungsbecken entnommen.

Für die Untersuchungen im halbtechnischen Maßstab wurde anschließend eine dreistündige zusätzliche Belüftung im Probenahmebehälter durchgeführt, um eine Beeinflussung durch ggf. verfügbares Substrat auszuschließen. Die Proben der großtechnischen Anlagen wurden direkt der Atmungsmessung (Grundatmung  $OVG_C+OVG_N$ ) zugeführt. Dazu wurde der Belebtschlamm mit Sauerstoff angereichert, in ein Atmungsgefäß (Plexiglas,  $V = 285 \text{ ml}$ ) gefüllt, das mit einem konischen Deckel zur Verhinderung des Einschlusses von Luftblasen verschlossen wurde. Während der Messung der Sauerstoffkonzentration mit einer Sauerstoffelektrode (Oxi 340i, Oxi 323, Cellox 325 Sensor – WTW Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH) und deren kontinuierliche Aufzeichnung mit einem Labor-Flachsreiber (Linseis L200 – LINSEIS Messgeräte GmbH; Servorec 220 – GMC-I Messtechnik GmbH) wurde der Belebtschlamm mit einem Magnetrührer (IKAMAG REO – IKA® Werke GmbH & Co. KG) homogenisiert (Abbildung 4.6).



**Abbildung 4.6: Atmungsmessplatz**

Die Grundatmung der aus den Versuchsanlagen entnommenen Belebtschlämme wurde mit Ausnahme der Vorbelüftung analog zur Verfahrensweise mit den Schlämmen der großtechnischen Anlagen bestimmt. Zusätzlich wurden die Stickstoff-Maximalatmung ( $OVN_{max.}$ ) und die Kohlenstoff-Grundatmung ( $OVG_C$ ) ermit-

telt. Zur  $OVN_{max}$ -Bestimmung wurden 2 ml  $NH_4-N$  (10 g/l) direkt in den Belebtschlamm eingespritzt, an dem die Grundatmung ( $OVC_G+OVN_G$ ) bestimmt worden ist, ohne dabei die Messung und die Homogenisierung zu unterbrechen. Zur Ermittlung von  $OVC_G$  wurden 500 ml der vorbelüfteten Belebtschlammprobe in eine Probenahmeflasche gefüllt, mit ATH versetzt (2 ml ATH/285 ml Probe) und belüftet. Die Atmungsmessung erfolgte nach einer Einwirkzeit von 30 min.

## 4.2 Versuchsanlagen

### 4.2.1 Membranbelebungsanlage

Die halbtechnischen Untersuchungen wurden mit einem handelsüblichen Einbausatz (Abbildung 4.7) für Membran-Kleinbelebungsanlagen der Fa. Hans Huber AG durchgeführt (MembranClearbox<sup>®</sup>, Anschlussgröße 4 EW, DIBt-Zulassungsnummer Z-55.3-107). Die technische Ausrüstung der Anlage umfasst im Wesentlichen eine Steuereinheit, eine Permeatpumpe (SEISUN Diaphragmapumpe DP 60, SEISUN Pumps Co., Ltd.), einen Kompressor (Linearmembranpumpe LP-80 HN, Luftvolumenstrom 80 l/min, ASF Thomas GmbH & Co. KG) zur Belüftung der Anlage über einen Rohrbelüfter sowie einen baugleichen Kompressor zur Cross-Flow-Belüftung des Membranmoduls.

Das Membranmodul besteht aus neun Plattenmembranen mit einer Filterfläche von 3,8 m<sup>2</sup> und einer Trenngrenze von rd. 0,04 µm. Der Einbausatz wurde in einem PE-Behälter (Nutzvolumen 1,5 m<sup>3</sup>) installiert, der in einer Versuchshalle im Technikum aufgestellt worden war.



**Abbildung 4.7: Verwendetes Membranmodul (links: Plattenmembran; Mitte: Nachrüstsatz mit Rohrbelüfter; rechts: Steuerung, Kompressoren, Permeatpumpe)**

Die Reinigung der Membranen erfolgte in Abhängigkeit des transmembranen Drucks beim Erreichen von etwa 0,4...0,6 bar. Bis 01/08 setzte sich der Reinigungsvorgang aus Rückspülung mit klarem Wasser (15 min) und mechanischer Reinigung der Plattenoberflächen zusammen. Ab 02/08 wurde die Reinigung

chemisch durchgeführt. Das Modul wurde zunächst mechanisch gereinigt, danach für 45 min einem Reinigungsbad mit Natriumhypochlorit (500 ppm) ausgesetzt. Nach einer Zwischenspülung mit klarem Wasser wurde die Membran für 45 min in einem Zitronensäurebad (500 ppm) behandelt.

Die Anlagensteuerung umfasst drei Betriebszustände: Normalbetrieb, Sparbetrieb, Hochlastbetrieb. Der aktive Betriebszustand ist vom Füllstand in der Anlage abhängig und wird über zwei Schwimmerkontakte erfasst. Sind beide Schwimmer deaktiviert, befindet sich die Anlage im Sparmodus, d. h. das dafür hinterlegte Belüftungsregime für Anlagenbelüftung und Membranspülung wird abgerufen; die Permeatpumpe ist deaktiviert. Nach Auslösen des unteren Schwimmers wird der Normalbetrieb aktiviert, d. h. das hinterlegte Belüftungsregime wird gestartet, ebenso die Permeatpumpe. Wird zusätzlich der obere Schwimmer ausgelöst (Hochlastbetrieb) wird die Förderleistung der Permeatpumpe erhöht. Während der Versuche wurde das Belüftungsregime für Spar- und Normalbetrieb im Wesentlichen identisch gestaltet.

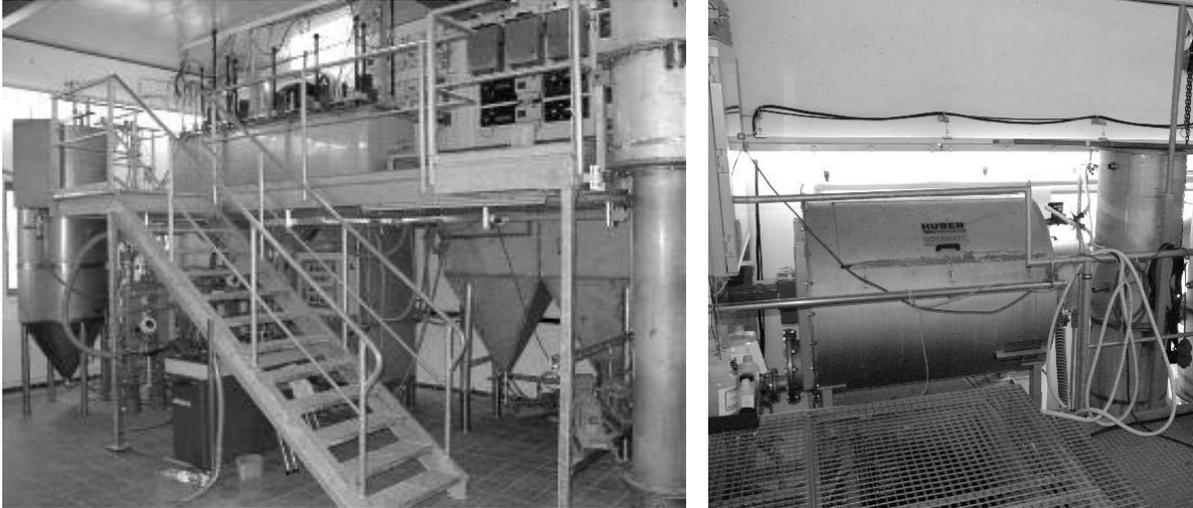
Die Sauerstoffkonzentration wurde kontinuierlich mit einer LDO-Sonde (Hach Lange GmbH) erfasst und über einen Controller (Sc 100, Hach Lange GmbH) auf einen Datenlogger (Tinytag, Gemini Data Loggers) übertragen.

#### **4.2.2 Halbtechnische Versuchsanlage**

Die halbtechnische Versuchsanlage (HTVA, Abbildung 4.8) befindet sich auf dem Gelände der KA Dresden-Kaditz (740.000 EW). Das Rohabwasser wird aus dem Zulaufkanal der Kläranlage nach der Grobstoffabscheidung in Grob- und Feinrechen unmittelbar hinter dem Sandfang entnommen und mit einer Pumpe zur Versuchsanlage gefördert. Die mechanische Vorreinigung der HTVA besteht aus einer Trommelsiebanlage (Rotamat Ro13, Spaltweite 0,5 mm, Hans Huber AG) und einem Vorklärbecken. Der anfallende Primärschlamm wird kontinuierlich abgezogen.

Die einstraßige biologische Behandlungsstufe (Gesamtvolumen: 6,25 m<sup>3</sup>) wurde mit vorgeschalteter Denitrifikation betrieben (2,5 m<sup>3</sup>). Das Nitrifikationsvolumen lag bei 3,75 m<sup>3</sup>. Zur Belüftung stehen in Abhängigkeit des Luftbedarfs grundsätzlich

drei Belüftersysteme zur Verfügung: zwei Kompressoren Rietschle D63B2P (Luftvolumenstrom: 2·120 l/min) ein Kompressor BABATZ-BL750 (Luftvolumenstrom 750 l/min) sowie ein Drehkolbengebläse (Aerzener Drehkolbengebläse GM S3, Luftvolumenstrom 100 m<sup>3</sup>/h).



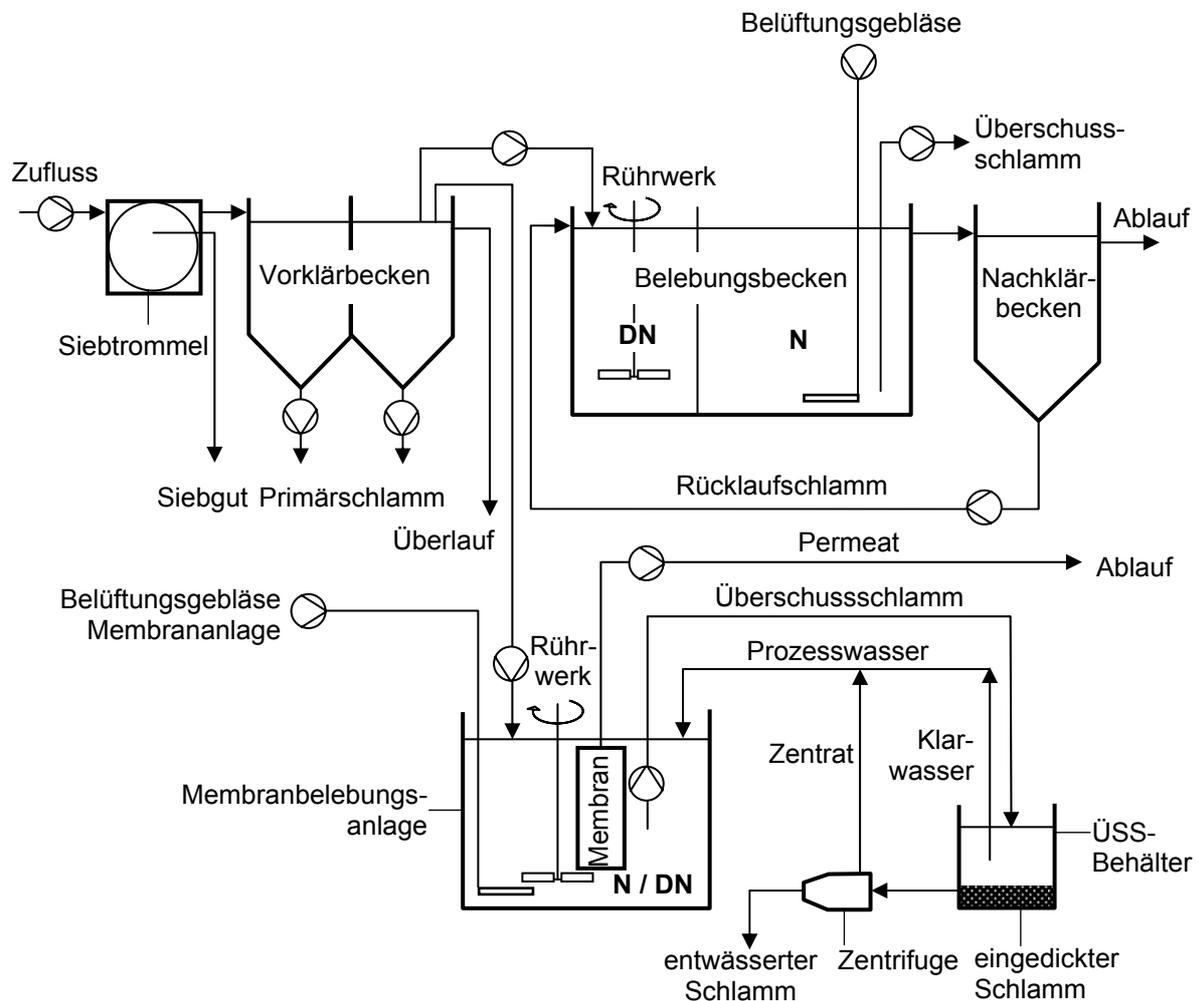
**Abbildung 4.8: Halbtechnische Versuchsanlage (links: NKB, Belebungsbecken, Vorklärbecken (mit zwei Schlammtrichtern); rechts: Trommelsieb)**

Die Trennung von Belebtschlamm und gereinigtem Abwasser erfolgt in einem vertikal durchströmten Nachklärbecken (Dortmundbrunnen), der Überschussschlammabzug direkt aus dem Belebungsbecken.

### 4.2.3 Versuchsaufbau

#### 4.2.3.1 Versuche mit kommunalem Abwasser

Die Membranbelebungsanlage wurde in die bestehende halbtechnische Versuchsanlage (HTVA) eingebunden (Abbildung 4.9). Die Beschickung von Membranbelebungsanlage und konventionell betriebener Belebungsanlage erfolgte zeitgesteuert, schwallweise aus dem Vorklärbecken der HTVA unter der Maßgabe der Sicherstellung einer gleichen hydraulischen Belastung (HRT i. M. 1,5 d). Da der Zufluss beider Anlagen der gleichen Abwasserlamelle entstammte, wurde eine vergleichbare Raumbelastung eingestellt.



**Abbildung 4.9: Versuchsaufbau während der Parallelversuche mit kommunalem Abwasser**

Die HTVA wurde mit vorgeschalteter Denitrifikation betrieben ( $N/DN = 1,5$ ;  $RV = 1,7$ ), die Membranbelebungsanlage mit intermittierender Denitrifikation. Das Ver-

hältnis der belüfteten Phasen zu den unbelüfteten Phasen lag weitgehend bei 1,5. Die Denitrifikationszone der konventionellen Anlage wurde ebenso wie die Membranbelebungsanlage ständig mit Rührwerken durchmischt.

Der Lufteintrag in beide Anlagen erfolgte mit dem Ziel einen Sauerstoffgehalt von  $> 2 \text{ mg O}_2/\text{l}$  in der belüfteten Phase zu gewährleisten. Dazu wurde an der HTVA ein Gebläse Rietschle D63B2P in Betrieb genommen. Das werkseitig installierte Gebläse der Membranbelebungsanlage führte unabhängig vom Betriebszustand (Nitrifikation, Denitrifikation) zu hohen Sauerstoffkonzentrationen, die zur Behinderung der Denitrifikation führten. Daher wurde ein Teil des Sauerstoffs über ein Ventil vor der Anlage abgeschlagen. Unabhängig davon wurde der Zielwert  $> 2,0 \text{ mg O}_2/\text{l}$  eingehalten.

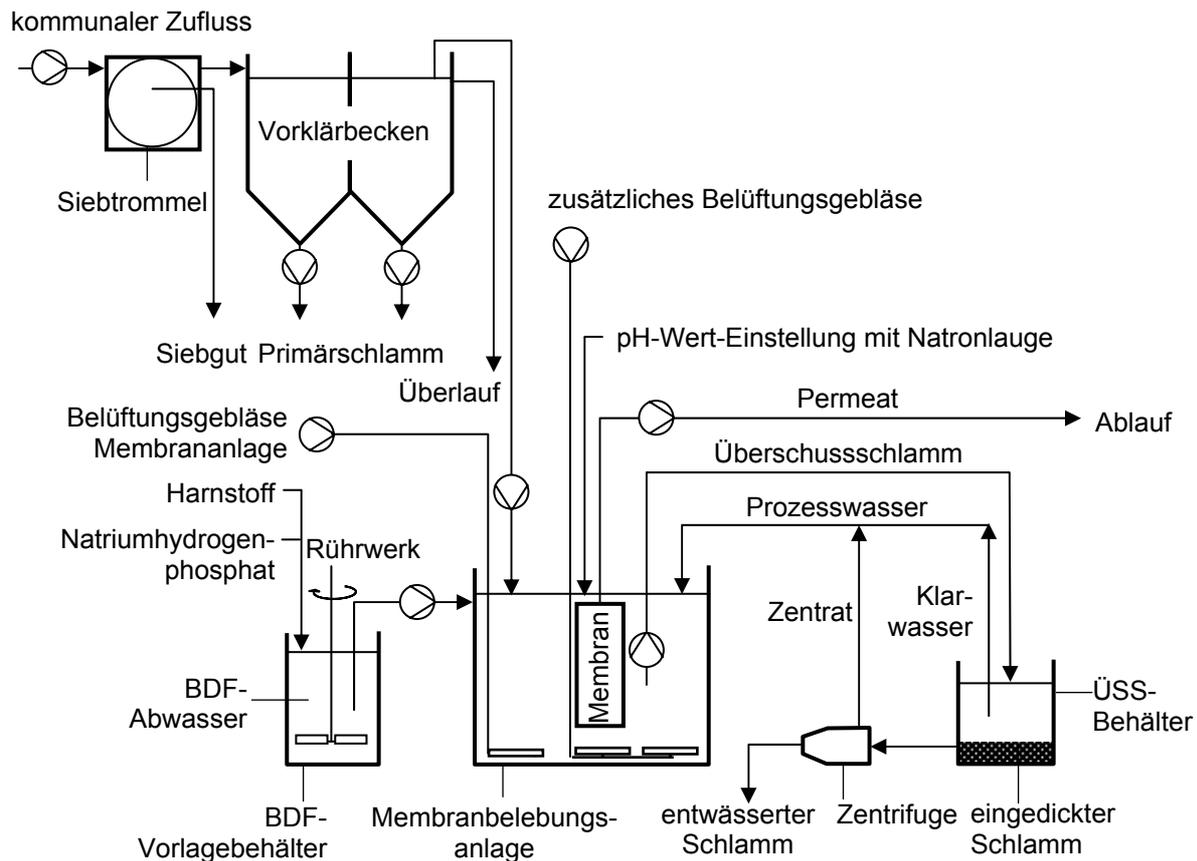
Beide Anlagen wurden mit Belebtschlamm der KA Dresden-Kaditz angeimpft (Schlammalter: 13 d). Das Schlammalter wurde während des Einfahrbetriebes auf 30 d erhöht und im gesamten Versuchszeitraum nicht geändert. Der ÜSS-Abzug erfolgte in beiden Anlagen aus dem Belebungsbecken. Der ÜSS-Anfall wurde volumetrisch erfasst.

Der aus der Membranbelebungsanlage abgezogene Überschussschlamm wurde statisch eingedickt, das Klarwasser in die Anlage zurückgefördert, der eingedickte Schlamm zentrifugiert (3...10 min,  $3.600 \text{ min}^{-1}$ , Heraeus Megafuge 3.0R, Kendro Laboratory Products GmbH). Das Zentrat wurde ebenfalls in die Anlage zurückgegeben. Ziel war es, die Ausschleusung hochmolekularer organischer Substanzen zu minimieren (Kläranlagenbetrieb mit Schlammbehandlung). Bei der halotechnischen Versuchsanlage wurde auf die Prozesswasserrückführung verzichtet, da einerseits aufgrund der fehlenden Barriere keine Anreicherung im Belebungsbecken stattfinden konnte, andererseits technisch keine Möglichkeit bestand, mit vertretbarem Zeitaufwand eine Entwässerung des Belebtschlammes vorzunehmen.

Das Permeat der Membranbelebungsanlage wurde nach füllstandabhängigem, automatischen Abzug zur Volumenstromprüfung und zur Entnahme einer Tagesmischprobe aufgefangen. Die Probenahmestelle zur Beprobung des Zuflusses befand sich im Ablauf des Vorklärbeckens. Die Probenahme aus dem Zulauf und den Belebungsbecken erfolgte als 24 h-Mischprobe.

#### 4.2.3.2 Versuche mit kommunalem Abwasser unter dem Einfluss der Einleitung von BDF-Abwasser, Versuche zur Industrieabwasserbehandlung

Die biologische Stufe der halbtechnischen Versuchsanlage wurde nach Beginn der zweiten Versuchsphase stillgelegt. Versuchsaufbau und Betrieb der Membranbelebungsanlage blieben im Wesentlichen unverändert (Abbildung 4.10). Zusätzlich wurde ein Vorlagebehälter für die Dosierung des BDF-Abwassers aufgestellt, der nach Installation eines Rührwerks (Heidolph RZR 2102 control, Heidolph Instruments GmbH & Co. KG) zur Einmischung von Natriumhydrogenphosphat und Harnstoff zur Einstellung des für den aeroben Abbau erforderlichen C:N:P-Verhältnisses diente.



**Abbildung 4.10: Versuchsaufbau während der Behandlung von BDF-Abwasser**

Die Zugabe des BDF-Abwassers erfolgte quasikontinuierlich einmal stündlich, mit einer Beschickungspause zur täglichen Probenahme zunächst zwischen 8:00 h und 12:00 h, später zwischen 6:00 h und 12:00 h. Der Permeatabzug erfolgte nicht

mehr automatisch, sondern wurde manuell in der Beschickungspause um 10:00 h ausgelöst. Zur pH-Wert-Einstellung (10 %-ige NaOH) wurde eine Dosierstelle in der Membranbelebungsanlage (Prominent Dulcometer PHD, ProMinent Dosier-technik GmbH) eingerichtet.



**Abbildung 4.11: Membranbelebungsanlage während der Versuche zum Abbau von BDF-Abwasser**

Die schrittweise Erhöhung der Raumbelastung durch die Behandlung von BDF-Abwasser bedingte eine Erhöhung des Luftbedarfs, der vom werkseitigen Belüftungsaggregat der Membranbelebungsanlage nicht mehr gedeckt werden konnte. Ab 02/08 wurde die Anlage kontinuierlich belüftet, bis dahin wichen die Belüftungseinstellungen nicht von denen zur intermittierenden Nitrifikation/Denitrifikation von kommunalem Abwasser ab. Nach Erreichen einer Raumbelastung von  $1 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  (02/08), wurde zunächst ein Rietschle-Gebläse zusätzlich in Betrieb genommen, drei Wochen später folgte das zweite Rietschle-Gebläse, bei nahezu unveränderter Raumbelastung. Nach Einstellung einer Raumbelastung von  $4 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  wurde an Stelle der Rietschle-Gebläse ein Kompressor mit höherer Leistung in Betrieb genommen (BABATZ-BL750, Luftvolumenstrom

750 l/min), zu dem parallel ab 06/08 ( $B_R > 5 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ) ein Kompressor BABATZ-B320-50 (Luftvolumenstrom 210 l/min) angeschlossen wurde. Eine weitere Erhöhung der Raumbelastung auf  $> 6 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  erforderte anstelle der Kompressoren den Anschluss eines leistungsstärkeren Drehkolbengebläses (1.670 l/min). Zeitweise wurde parallel Reinsauerstoff dosiert (Abbildung 4.11).

Im Zuge der Erhöhung des Lufteintrages wurden zusätzliche Gummimembran-Tellerbelüfter in der Membrananlage installiert. Am Ende der Versuche befanden sich neben dem werksseitig vorgesehenen Rohrbelüfter sechs Tellerbelüfter in der Membrananlage. Das Rührwerk wurde aufgrund der hohen Turbulenz infolge der kontinuierlichen Belüftung im Belebungsbecken 03/08 deinstalliert.

### 4.3 Analytische Methoden

**Tabelle 4.5: Nasschemische Analysen**

Parameter	Methode	Messbereich [mg/l]	Firma
Ammonium	Spectroquant 14752	0,03...3,0	Merck KGaA
BSB <sub>5</sub>	DIN 38 409 Teil 51	> 3	-
CSB	LCK 414	5...60	Hach Lange GmbH
	LCK 314	15...150	Hach Lange GmbH
	LCK 514	100...2.000	Hach Lange GmbH
	LCK 014	1.000...10.000	Hach Lange GmbH
Nitrat	DIN 38405 Teil 9	0,2...25,0	-
Nitrit	Spectroquant 14776	0,02...0,8	Merck KGaA
oPO <sub>4</sub> -P	Spectroquant 14848	0,2...5,0	Merck KGaA
oTS	DIN 38409 Teil 2	-	-
P <sub>ges</sub>	LCK 348	0,2...5,0	Hach Lange GmbH
	LCK 350	0,5...20	Hach Lange GmbH
Sulfid	Spectroquant 14779	0,03...3,3	Merck
TKN	EN 25 663	> 2	BÜCHI Labortechnik GmbH
TOC	LCK 380	2...65	Hach Lange GmbH
	LCK 381	60...735	Hach Lange GmbH
	LCK 385	3...30	Hach Lange GmbH
	DIN EN 1484	0,2...4.000	Shimadzu Cop.
TS	DIN 38409 Teil 2	-	-

**Tabelle 4.6: Physikalische Messgrößen**

Parameter	Bezeichnung	Hersteller
Leitfähigkeit	Gerät: Multiline P3, Sensor: TetraCon® 325	WTW Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH
Sauerstoff	Gerät: Oxi 323, Oxi 340i, Sensor: Cellox 325	
pH-Wert	Gerät: pH 323, Sensor: Sentix 21	
Trübung	NEPHLA Labor-Trübungsphotometer Messverfahren: 90°C Streulicht-Verfahren Messbereich: FNU 0,001 bis 1.000 Messmethode: DIN 38404 / ISO 7027	Hach Lange GmbH

**Tabelle 4.7: Mikroskopie**

Parameter	Bezeichnung	Hersteller
Mikroskopie	Leica DM L32	Leica Microsystems Wetzlar GmbH

## 5 Screening an großtechnischen Anlagen

### 5.1 Kommunale Kläranlagen

#### 5.1.1 Anlage K1

##### 5.1.1.1 Anlagenbeschreibung

Die kommunale Kläranlage K1 (Abbildung 5.1), verfügt über eine Ausbaugröße von rd. 46.500 EW. Die Kläranlage ist aufgrund mangelnder Kapazität um eine Membranbelebungsstufe (Inbetriebnahme 2005) erweitert worden, war allerdings nach der Einstellung der Produktion eines großen Betriebes aus der Textilbranche zum Zeitpunkt der Untersuchungen (10/2006...07/2007) nur mit rd. 21.000 EW belastet. Die verbleibenden industriellen Einleitungen stammen von einigen kleinen metallbearbeitenden Betrieben und einem Betrieb aus der Lebensmittelindustrie. Die Umlandgemeinden sind im Trennsystem, der Standort der Kläranlage ist im Mischsystem erschlossen. Der mittlere Zufluss zur Kläranlage betrug im Jahr 2005 rd. 7.900 m<sup>3</sup>/d und im Jahr 2006 rd. 7.000 m<sup>3</sup>/d.

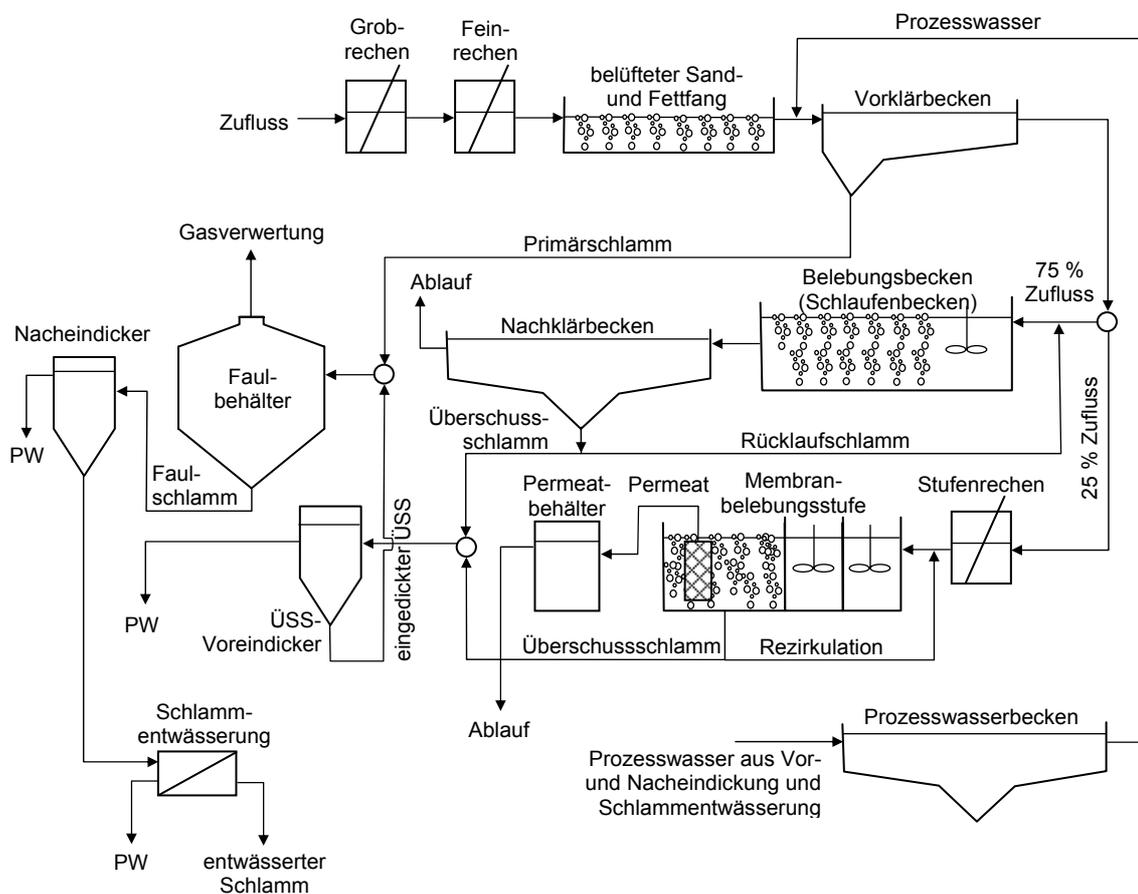
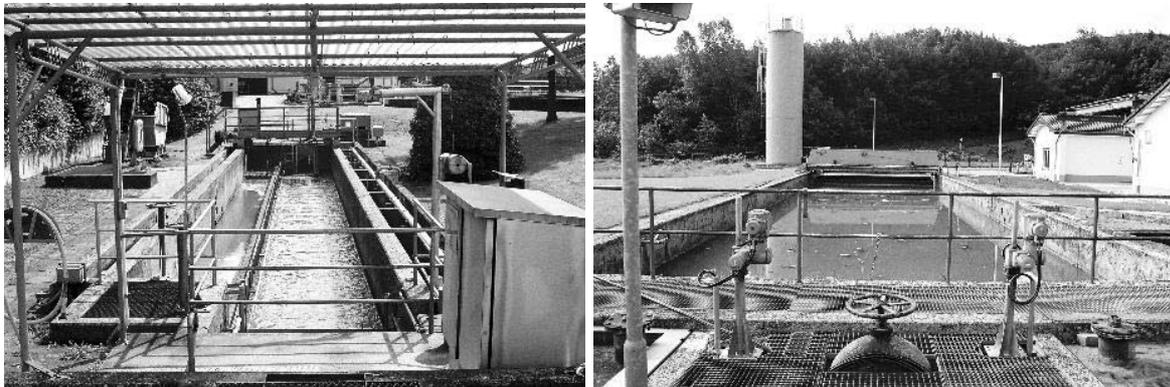


Abbildung 5.1: Vereinfachte schematische Darstellung der Kläranlage K1

Die Kläranlage ist ursprünglich als konventionelle Belebtschlammanlage mit anaerober Schlammstabilisierung konzipiert worden. Die Membranbelebungsanlage wurde als Parallelanlage zur Belebtschlammanlage in die vorhandene ABA integriert (Abbildung 5.1). Die mechanische Reinigungsstufe besteht zum einen aus einem Regenwetterrechen (Mittstromrechen, Stababstand: 5 cm) und einem unter Trockenwetterbedingungen aktiven Mittstromrechen (Stababstand: 1 cm), zum anderen aus einem belüfteten kombinierten Sand- und Fettfang (Abbildung 5.2) und einem Vorklärbecken ( $V = 500 \text{ m}^3$ ) (Abbildung 5.2). Unter Trockenwetterbedingungen beträgt die Vorklärzeit etwa 1 h. Der Primärschlamm wird im Becken auf rd. 4 % TS eingedickt.

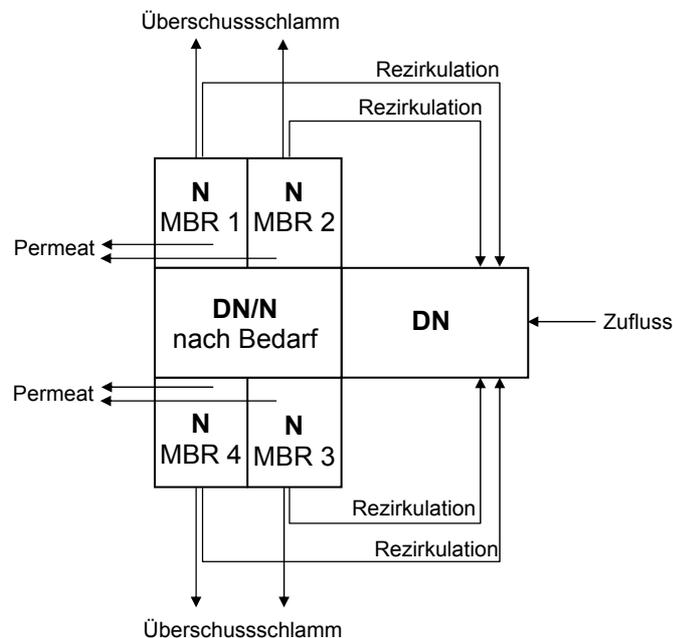


**Abbildung 5.2: Mechanische Reinigungsstufe der Kläranlage K1 (links: Sand- und Fettfang, rechts: Vorklärbecken)**

Die Aufteilung des mechanisch gereinigten Zuflusses erfolgt über einen an ein MID gekoppelten Schieber. 75 % des Zuflusses werden konventionell in einem mit Mammutrotoren belüfteten Schlaufenbecken ( $6.300 \text{ m}^3$ , simultane P-Fällung mit Eisen-III-chlorid) mit anschließendem Nachklärbecken ( $3.300 \text{ m}^3$ ,  $D = 34 \text{ m}$ ) behandelt, 25 % in der Membranbelebungsanlage. Der TS-Gehalt der konventionellen Anlage liegt bei  $3,2 \text{ g/l}$ , das Schlammalter bei 39 d.

Zur weitergehenden Feststoffabtrennung ist der Membranbelebungsanlage ein zweistraßig aufgebauter Stufenrechen (Spaltweite: 1 mm) vorgeschaltet. Die Anlage besteht aus einem Denitrifikationsbecken ( $300 \text{ m}^3$ ) einem wahlweise zur Denitrifikation oder Nitrifikation nutzbaren Variobecken ( $300 \text{ m}^3$ ) sowie 4 abgedeckten Nitrifikationsbecken (jeweils  $150 \text{ m}^3$ ), in denen sich gleichzeitig die Membranfiltrationsmodule (8 Doppelstockmodule/Straße) befinden (Abbildung 5.3, Abbildung 5.4). Das Rezirkulationsverhältnis liegt bei rd. 3. Der Überschussschlamm wird quasikontinuierlich halbstündlich abgezogen; die Menge wurde im Untersuchungs-

zeitraum nicht erfasst. Die Berechnung des ÜSS-Anfalls zu rd. 31 m<sup>3</sup>/d und des Schlammalters mit 39 d wurde auf Basis der Laufzeit der ÜSS-Pumpen (0,85 h/d) und der Förderleistung (10 l/(s·Pumpe)) vorgenommen. Die P-Fällung erfolgt mit Eisen-III-chlorid im DN-Bereich.



**Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage K1**

Die Filtrationsmodule (32 Doppelstockmodule EK 400) bestehen aus Plattenmembranen der Fa. Kubota mit einer Porenweite von 0,4 µm und einer Filtrationsfläche von insgesamt 10.240 m<sup>2</sup> bzw. 2.560 m<sup>2</sup>/Membranstraße. Der Filtrationszyklus der Membranen setzt sich aus Filtration des Belebtschlammes (540 s) und anschließender Filtrationspause (60 s) zusammen. Der Filtrationsbetrieb findet unter Belüftung statt, vor Beginn der Filtration wird eine 60 s dauernde Belüftung durchgeführt. Im Stand-By-Betrieb der Membranen (Beginn nach 1 h Betriebszeit, Dauer: 1 h) werden die Membranmodule 10 min mit Luft gespült. Ein Teil des Permeats wird u. a. als Ansatzwasser für die Membranreinigung in einem Permeatbehälter (V = 4,7 m<sup>3</sup>) vorgehalten. Die Reinigung der Membranen findet mit Natriumhypochlorit bzw. Oxalsäure statt. Die letzte Reinigung vor Beginn der Untersuchungen lag im Zeitraum 04/06. Während der Untersuchungen wurde im Anschluss an die Probenahme 03/07 eine Membranreinigung aller Straßen durchgeführt.



**Abbildung 5.4: Membranbelebungsstufe der Anlage K1 mit abgedeckten Becken**

Der aus dem Nachklärbecken und den Filtrationsbecken abgezogene ÜSS wird in einem statischen Eindicker auf rd. 3,5 % TS ohne Zusatz von Konditionierungsmitteln eingedickt und mit dem im Vorklärbecken eingedickten Primärschlamm der Schlammfäulung zugeführt (Volumen:  $2 \cdot 1.000 \text{ m}^3$ , Temperatur:  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ , Verweilzeit: 33 d). Die tägliche Schlammzufuhr liegt bei rd.  $40 \dots 45 \text{ m}^3/\text{d}$  (TS = 4 %, oTS = 75 % TS). Der Glühverlust des ausgefaulten Schlamms (TS  $\sim$  2 %) beträgt rd. 50 %. Das Faulgas (Methangehalt rd. 66 %) wurde im Wesentlichen zu Heizzwecken genutzt.

Der abgezogene Faulschlamm wird in zwei als Stapelbehälter genutzten Standeindickern (jeweils  $500 \text{ m}^3$ ) zwischengelagert und durch eine mobile Entwässerungseinrichtung, im Zeitraum der Untersuchungen durch eine Kammerfilterpresse, entwässert. Das Prozesswasser aus Vor- und Nacheindickung sowie maschineller Entwässerung wird in einem Prozesswasserbecken zwischengespeichert. Die manuell ausgelöste Rückführung in den Reinigungsprozess erfolgt vor der Vorklärung. Der Prozesswasseranfall wurde messtechnisch nicht erfasst.

### 5.1.1.2 Probenahme

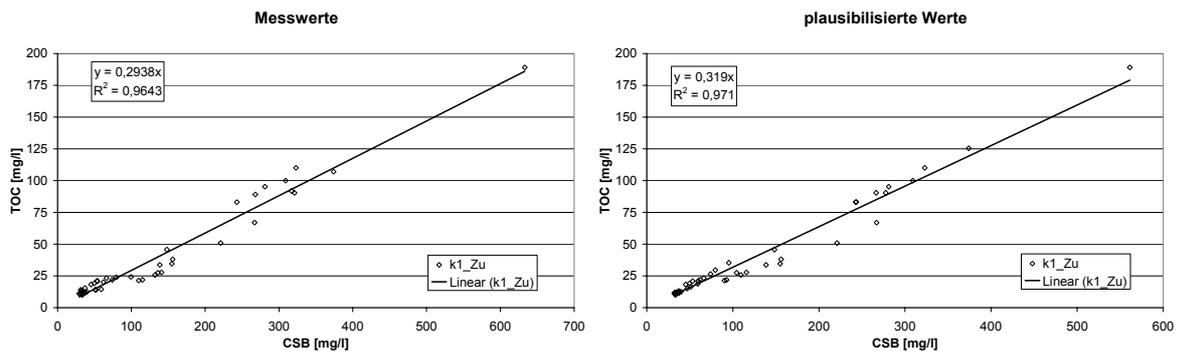
Die Anlage K1 wurde im Abstand von 2 Monaten 10/06, 12/06, 03/07, 05/07 und 07/07 beprobt. Die Zulaufproben wurden als qualifizierte Stichproben aus dem Ablauf des Vorklärbeckens entnommen, die Belebtschlammproben als Stichproben aus allen vier Membranfiltrationsbecken, insofern sie belüftet waren, die Permeatproben ebenfalls als Stichproben aus dem Permeatbehälter der Kläranlage. Die Proben des Prozesswassers wurden als einfache Stichprobe zum einen aus einem Probenahmeschacht nach dem Prozesswasserbecken bzw. direkt aus dem Prozesswasserbecken entnommen.

### 5.1.1.3 Zuflussfraktionierung

Es wurden ein Trockenwetter- und zwei Mischwasserzuflüsse sowie zwei Regennachläufe erfasst. Einige vor Ort bestimmte Abwasserkenwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die CSB-, BSB<sub>5</sub>- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Die pH-Werte lagen im für kommunales Abwasser typischen neutralen bis leicht basischen Bereich. Auffällig ist der hohe pH-Wert im Zulauf der Regenwetterprobe 12/06, ggf. liegt ein Gerätefehler vor. Das TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,29 (CSB/TOC = 3,4), nach der Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) bei 0,32 (CSB/TOC = 3,1) (Abbildung 5.5). Das CSB/TOC-Verhältnis der Probe 05/07 lag mit 4,3 über den Verhältnissen der anderen Proben, dabei ist ungeklärt, ob es sich um eine Beeinflussung durch Industrieabwasser oder andere Gründe, ggf. analytisch bedingte, handelt.

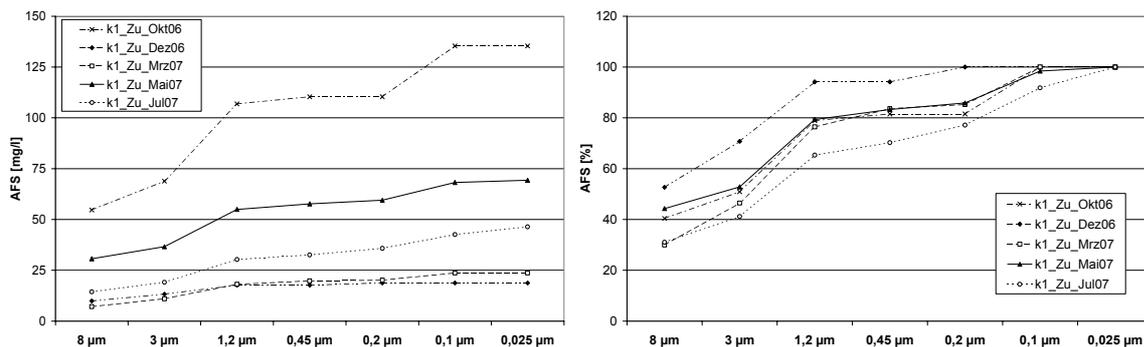
**Tabelle 5.1: Charakterisierung des Zuflusses zur KA K1**

Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unfiltr.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[μS/cm]	[-]	[°C]
10/06	249	633	321	169	1.192	7,9	16,8
12/06	26	66,3	32,2	38	343	9,7	10,4
03/07	56	148,2	37,4	106	617	7,4	10,1
05/07	120	267	136	108	838	7,8	13,2
07/07	48	138,6	54	50	622	7,6	16,5



**Abbildung 5.5: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA K1**

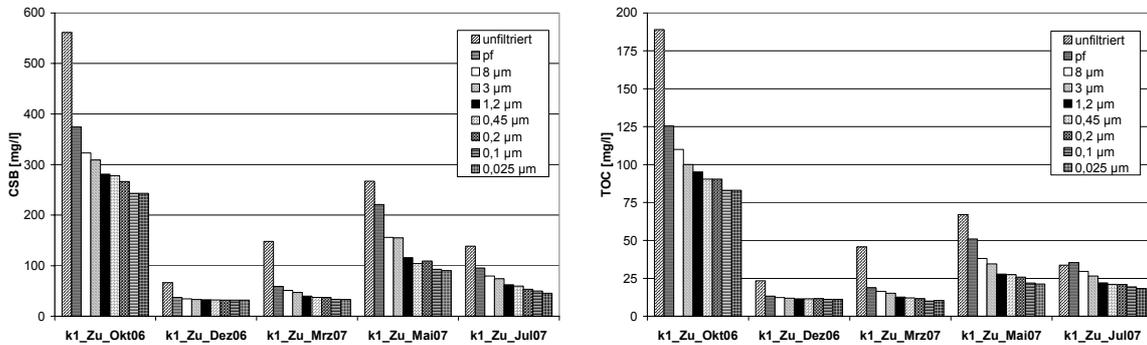
In Abbildung 5.6 ist die Änderung der abgeschiedenen partikulären Substanzen als AFS im Bereich 8  $\mu\text{m}$  bis 0,025  $\mu\text{m}$  dargestellt. Die absoluten Werte zeigen kein einheitliches Bild, während sich beim Vergleich der relativen Werte der membranfiltrierten Proben, unabhängig von den Zuflussbedingungen, ein ähnlicher Verlauf einstellt. Im Fall der Proben 10/06 (TW), 03/07 (RWN) und 05/07 (MW) ist mit Ausnahme der 8  $\mu\text{m}$ -Fraktion kein wesentlicher Unterschied erkennbar.



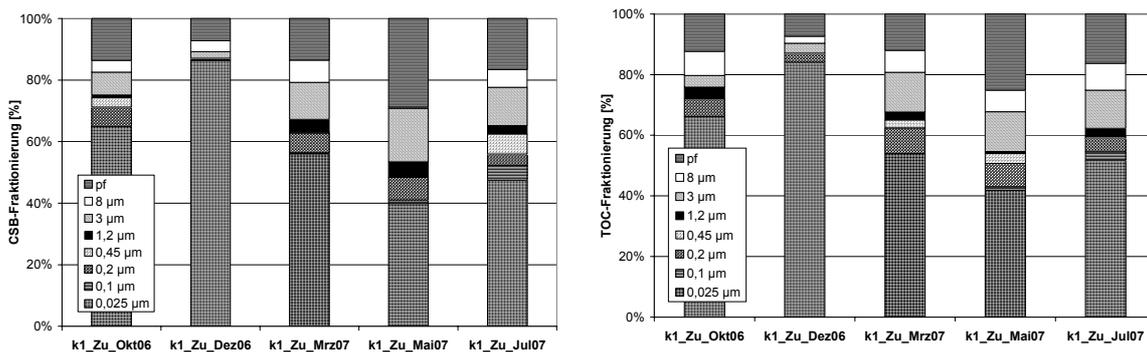
**Abbildung 5.6: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8  $\mu\text{m}$ -Probe der Anlage K1**

Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen insbesondere unter Trockenwetterbedingungen einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.7, Abbildung 5.8). Bei Mischwasserzuflüssen bzw. Regenwetternachläufen ist der Konzentrationsverlauf infolge des Verdünnungseffektes weniger deutlich, was sich vor allem bei Betrachtung der Probe 12/06 auch in der relativen Zusammensetzung widerspiegelt (Abbildung 5.8). Die 8  $\mu\text{m}$ -Fraktion liegt rd. 10...30 % unterhalb der nach der Filtration über Papierfilter analysierten TOC- bzw. CSB-Konzentrationen (Abbildung 5.9). In Probe 12/06 ist die 8  $\mu\text{m}$ -Fraktion beim CSB nicht nachweisbar, beim TOC schwach ausgeprägt. Der Unterschied zwischen der 8  $\mu\text{m}$ - und 3  $\mu\text{m}$ -Fraktion ist beim CSB mit < 5 % relativ gering, beim TOC mit etwa 10 % deutlicher erkennbar.

Der Unterschied zwischen 1,2  $\mu\text{m}$ - und die 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion ist mit  $< 5\%$  gering. Zusammenfassend beträgt die Summe aus 1,2  $\mu\text{m}$ , 0,45  $\mu\text{m}$  und 0,2  $\mu\text{m}$ -Fraktion etwa 10 % der papierfiltrierten Konzentrationen. Es ist naheliegend, dass der Verdünnungsgrad bei der Analytik, insbesondere bei der CSB-Bestimmung aufgrund der Nachweismethode eine größere Rolle spielt, als bei höheren Konzentrationen.

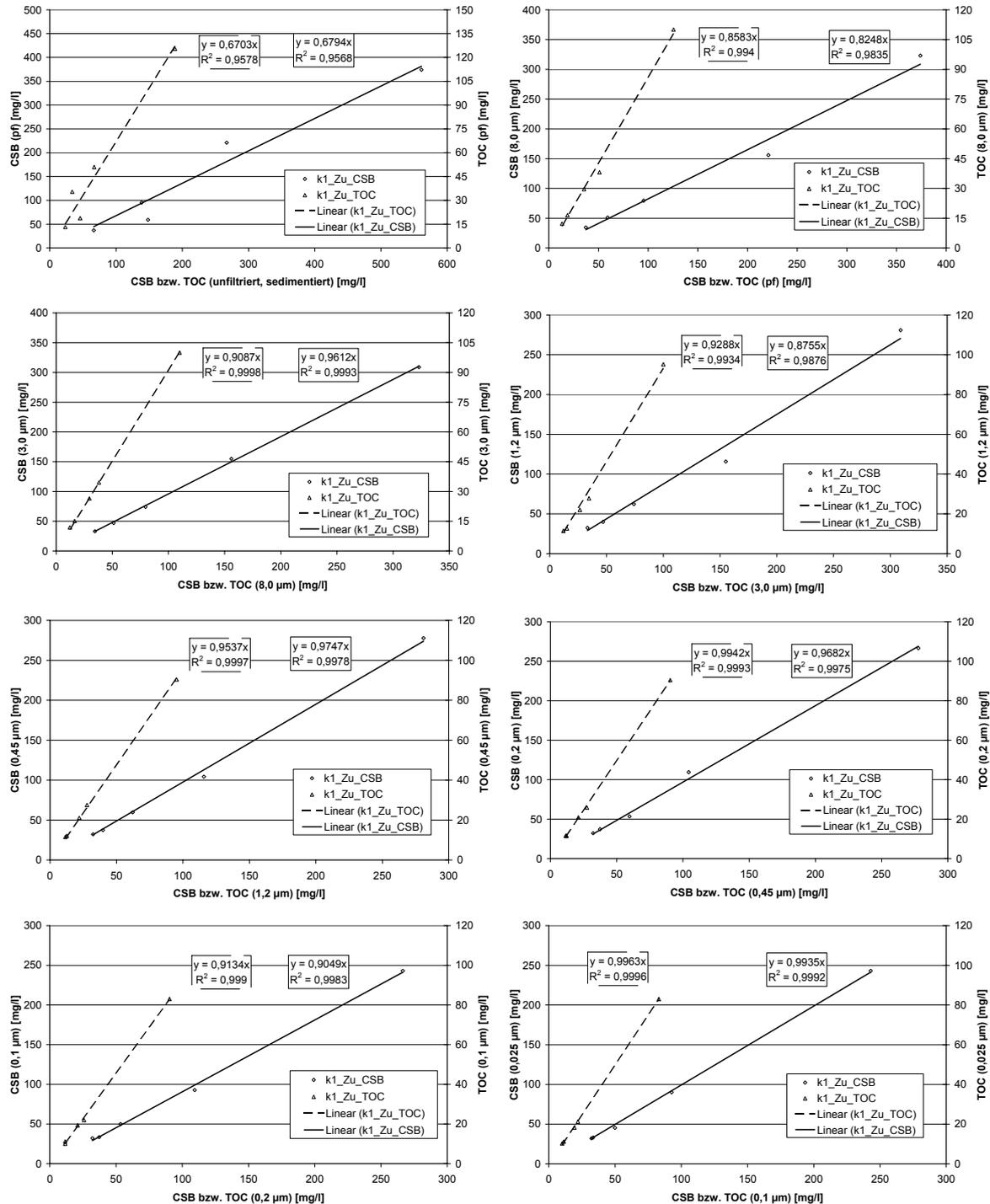


**Abbildung 5.7: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage K1**



**Abbildung 5.8: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage K1 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

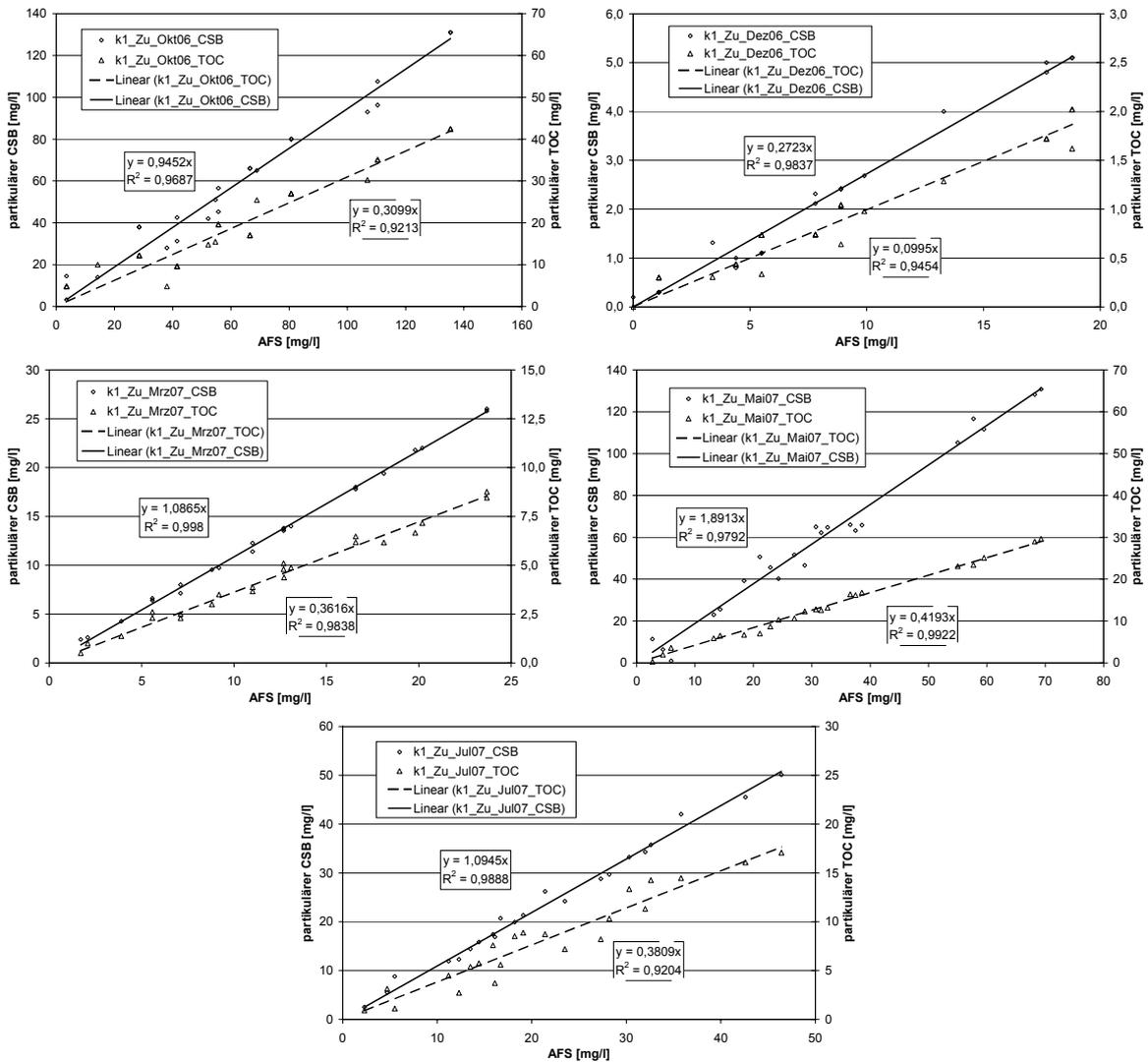
In allen Proben betrug die Ausdehnung der 0,2  $\mu\text{m}$ -Fraktion weniger als 10 % der papierfiltrierten Probe. Sowohl zwischen der 0,2  $\mu\text{m}$ - und der 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion, als auch zwischen der 0,1  $\mu\text{m}$ - und 0,025  $\mu\text{m}$ -Fraktion sind nur geringe Unterschiede erkennbar, die ggf. auf Fehler bei der Analyse oder der Aufbereitung der Proben im Zuge der Fraktionierung zurückzuführen sind. Im Vergleich zur papierfiltrierten Probe zeigt sich, dass die 0,025  $\mu\text{m}$ -Fraktion zwar einen großen Anteil einnimmt, aber auch eine relativ breite Streuung sowohl im CSB als auch im TOC von 40...90 % aufweist. Wird die in der Abwassertechnik gebräuchliche 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion als Bezugswert für membranfiltrierte Proben gewählt, so sind mindestens 80 % des 0,45- $\mu\text{m}$  Durchgangs kleiner als 0,1  $\mu\text{m}$  und mindestens 75 % des 0,45- $\mu\text{m}$  Durchgangs kleiner als 0,025  $\mu\text{m}$ .



**Abbildung 5.9: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K1**

Die größten Änderungen der Konzentrationen treten zwischen der papierfiltrierten und der 8 µm-Probe (CSB: 14 %, TOC: 18 %), zwischen 8 µm- und 1,2 µm-Fraktion (CSB und TOC rd. 16 %) und zwischen der 0,2 µm- und 0,1 µm-Fraktion (CSB und TOC rd. 10 %) auf (Abbildung 5.8, Abbildung 5.9).

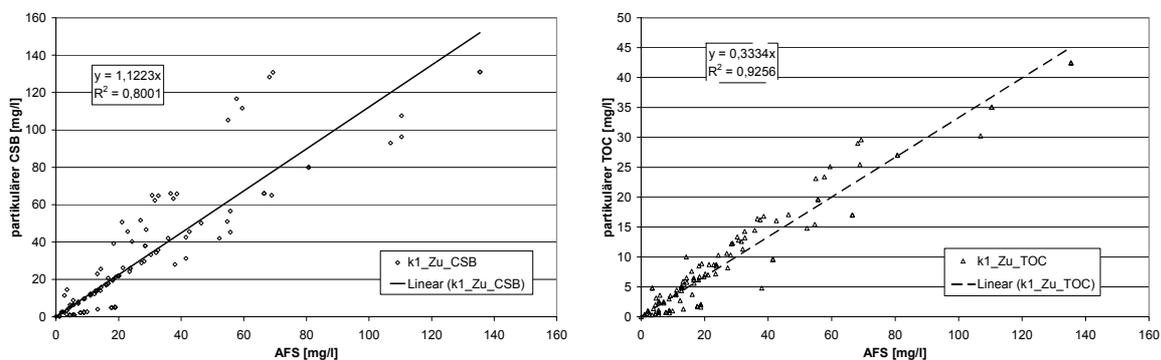
Die lineare Abhängigkeit aller Fraktionen ist ein Hinweis auf eine homogene Abwasserbeschaffenheit, die nur durch die Verdünnung mit Fremdwasser, d. h. Niederschlagswasser beeinflusst wird. Die Bestimmung von partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC und deren Korrelation mit den AFS führte bei allen untersuchten Proben zu einer deutlichen linearen Abhängigkeit (Abbildung 5.10).



**Abbildung 5.10: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der Anlage K1**

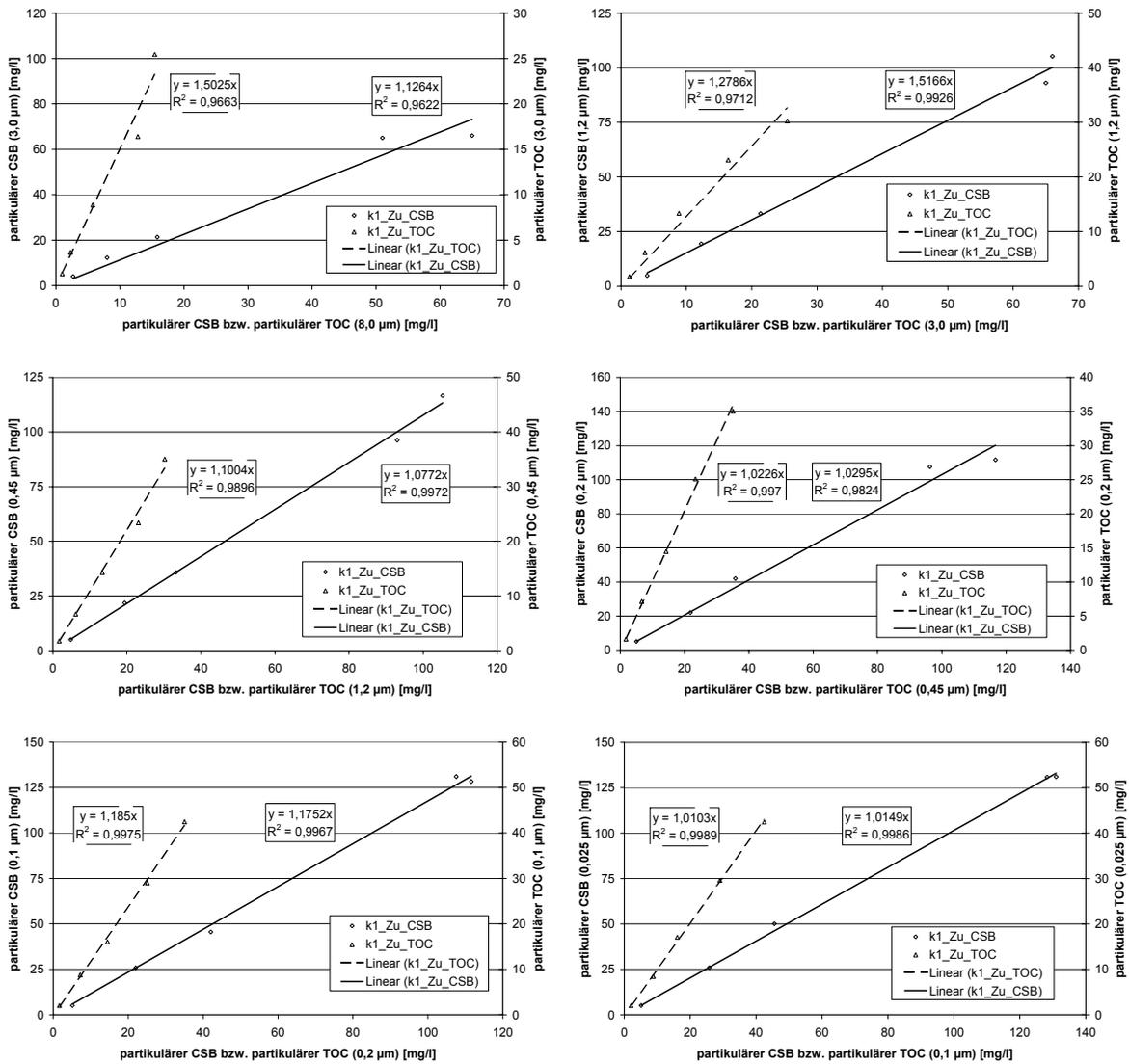
Während sich in den einzelnen Proben ein Zusammenhang zwischen partikulärem CSB bzw. TOC und AFS abzeichnet, tritt bei der zusammenfassenden Darstellung aller Werte eine Divergenz, insbesondere beim CSB, deutlich hervor (Abbildung 5.11). Die Ursache für die schlechtere Korrelation, die maßgebend durch die Probe 05/07 beeinflusst wird, ist im bereits erwähnten, von den anderen Proben abweichenden, CSB/TOC-Verhältnis zu suchen. Unabhängig davon, ist der in

Abbildung 5.9 dargestellte lineare Zusammenhang der Nachweis dafür, dass die Fraktionierung der Probe 05/07 in sich als stimmig zu erachten ist. Zusätzlich zur Probe 05/07 ist bei Probe 12/06 ein anderer Trend sowohl beim CSB als auch beim TOC feststellbar. Da diese Probe durch äußerst geringe Konzentrationsunterschiede gekennzeichnet war, ist es naheliegend, dass die analytischen Nachweismethoden von CSB, TOC und AFS in geringen Konzentrationsbereichen zur Darstellung des Zusammenhangs von partikulärem CSB und AFS bzw. partikulärem TOC mit AFS mit dem gewählten Ansatz zur Auswertung nur bedingt geeignet sind.

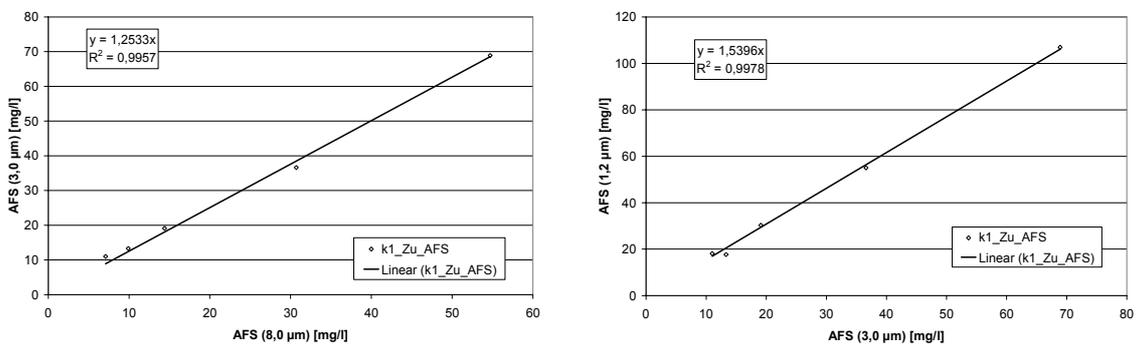


**Abbildung 5.11: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der Anlage K1 (Zusammenfassung alle Proben)**

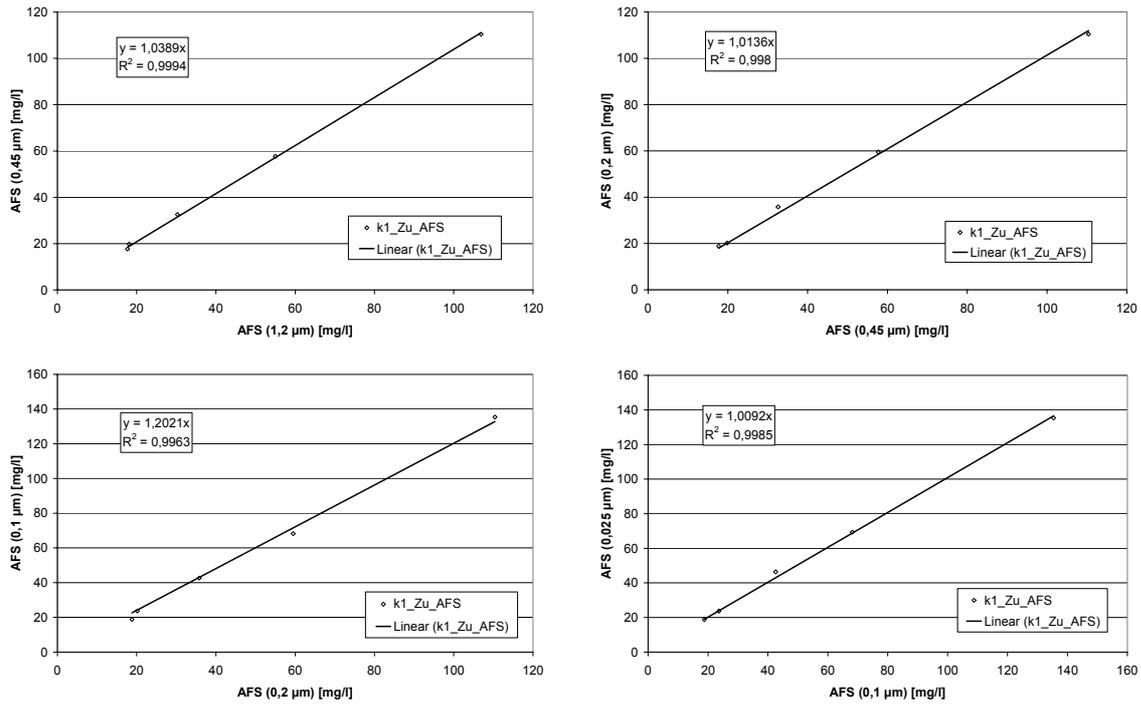
Der Vergleich der Änderung des partikulären CSB sowie des partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen mit den zu diesen Fraktionen gehörenden AFS zeigt eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung der Anstiege aller drei Parameter (Abbildung 5.12, Abbildung 5.13, Abbildung 5.14), wenngleich dieser Zusammenhang durch die Auswertung weiterer Proben zu erhärten ist.



**Abbildung 5.12: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage K1**



**Abbildung 5.13: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K1**



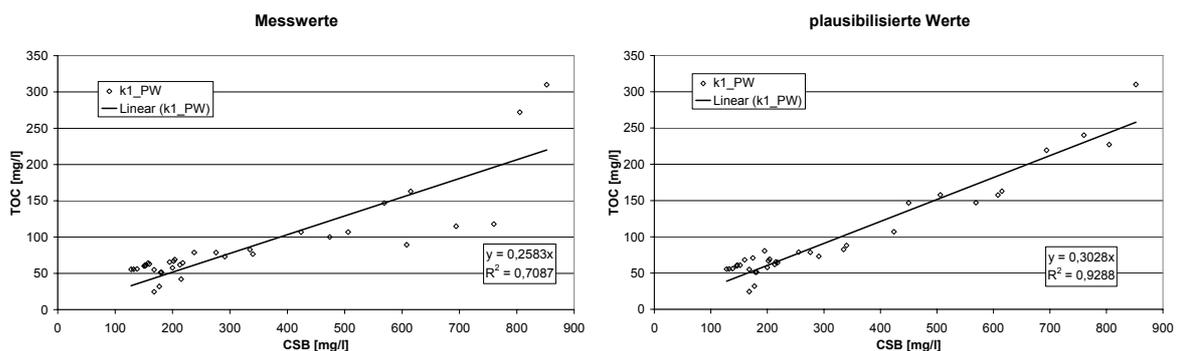
**Abbildung 5.14: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K1 (Fortsetzung)**

### 5.1.1.4 Fraktionierung des Prozesswassers

Die Beschaffenheit des unfiltrierten Prozesswassers (CSB, AFS) ist uneinheitlich und wird maßgebend durch das Vorkommen partikulärer Substanzen beeinflusst. Die nach der Membranfiltration über 0,45 µm bestimmten CSB-Konzentrationen liegen zum Teil wesentlich unter den unfiltrierten Werten (Tabelle 5.2). Einige vor Ort bestimmte Abwasserkennwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die BSB<sub>5</sub>- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Die pH-Werte liegen im leicht basischen Bereich bei 7,6...8. Das TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Prozesswassers lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,26 (CSB/TOC = 3,9), nach der Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) bei 0,30 (CSB/TOC = 3,3) (Abbildung 5.15). Das CSB/BSB<sub>5</sub>-Verhältnis der unfiltrierten Proben lag bei 5...6.

**Tabelle 5.2: Charakterisierung des Prozesswassers der KA K1**

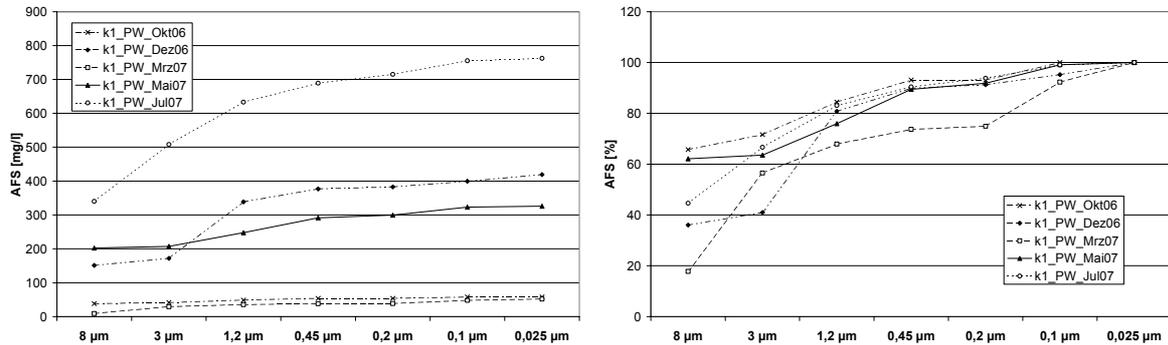
Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unfiltr.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mS/cm]	[-]	[°C]
10/06	49	238	160	60	4,44	7,9	18,7
12/06	118	760	204	497	4,62	8,2	13,1
03/07	36	195	152	53	4,32	7,6	26,2
05/07	121	615	218	298	5,04	8,0	18,4
07/07	170	852	215	550	4,03	8,1	19,3



**Abbildung 5.15: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Prozesswassers der KA K1**

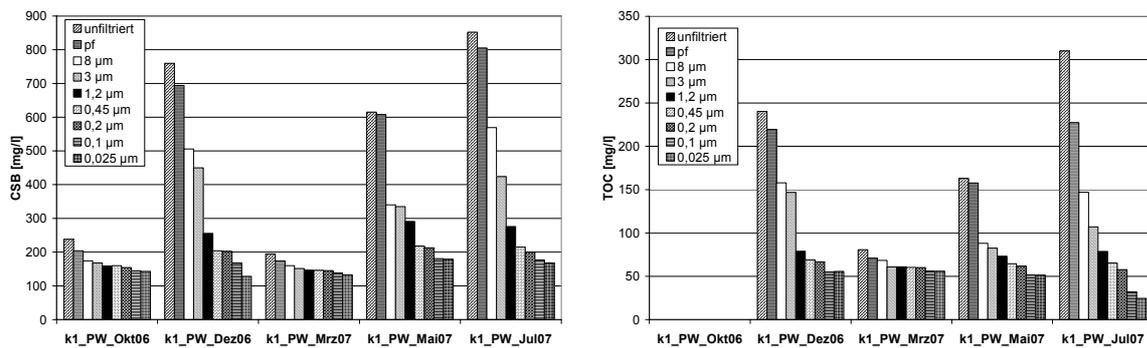
Der Verlauf der abgeschiedenen partikulären Substanzen zeigt im Fall der Absolutwerte kein einheitliches Bild, während sich beim Vergleich der relativen Werte der membranfiltrierten Proben ein ähnlicher Verlauf einstellt (Abbildung 5.16). Der

größte Unterschied mit rd. 40 % zwischen den bestimmten AFS ist beim Vergleich der 8 µm-Fraktion festzustellen.

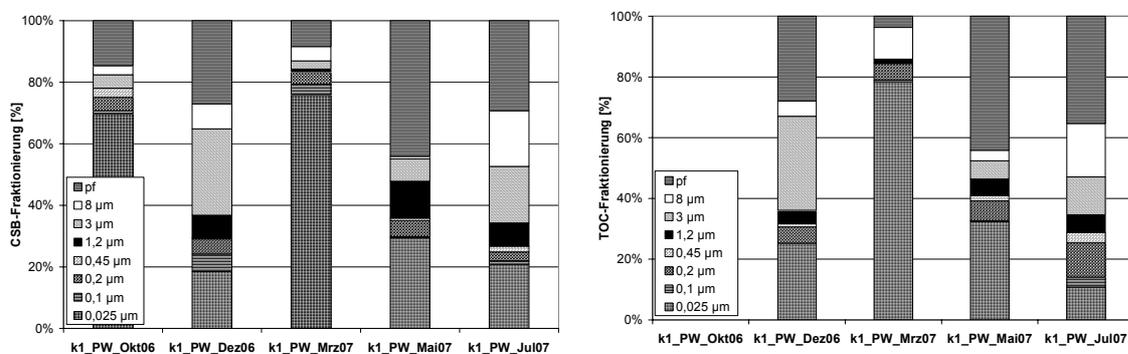


**Abbildung 5.16: AFS-Verteilung im Prozesswassers mit Bezug zur 8 µm- Probe der Anlage K1**

Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.17, Abbildung 5.18). Die Verteilung der Fraktionen ist uneinheitlich, so dass eine verallgemeinerbare Aussage zur Beschaffenheit des Prozesswassers nicht sinnvoll ist.

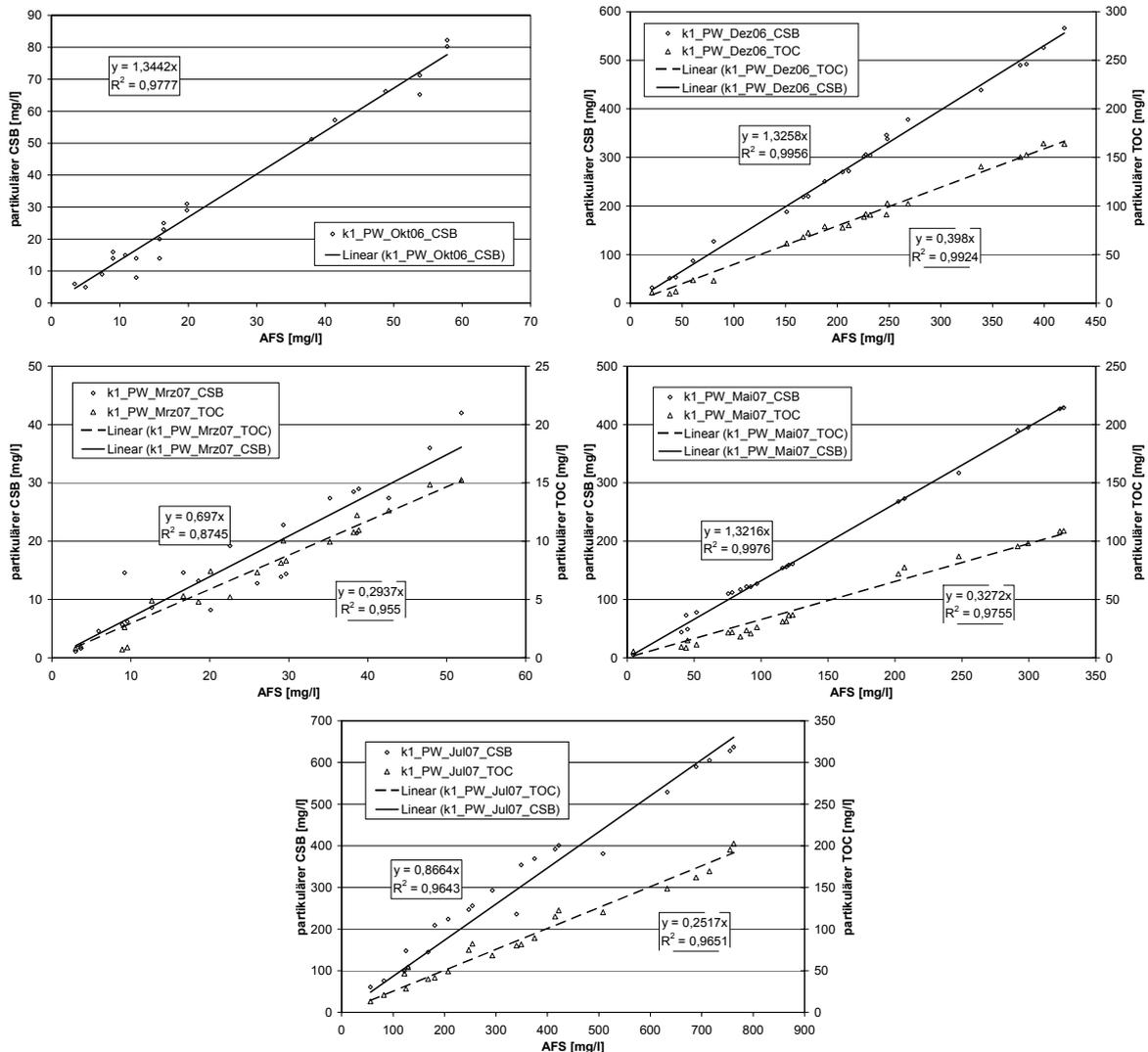


**Abbildung 5.17: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Prozesswasser der Anlage K1 an den Untersuchungstagen**



**Abbildung 5.18: Relative Verteilung der Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K1 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

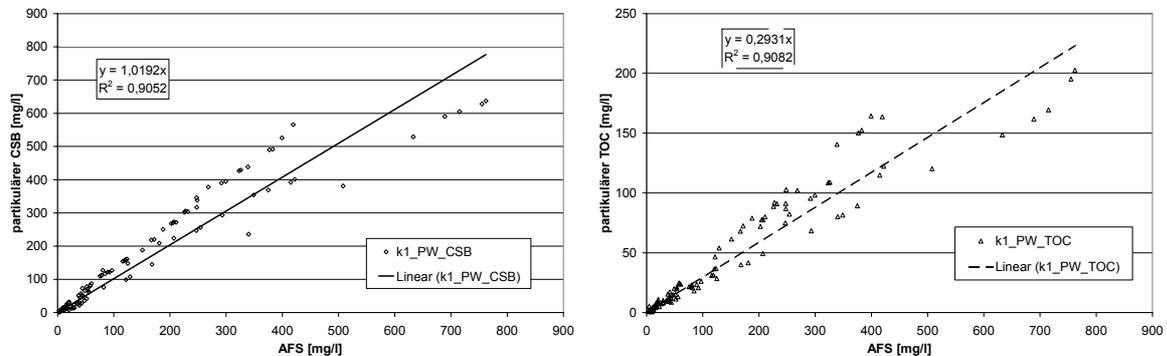
Die Bestimmung von partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC und deren Korrelation mit den AFS führte bei allen untersuchten Proben zu einer linearen Abhängigkeit (Abbildung 5.19), die sich bei Zusammenfassung aller Proben (Abbildung 5.20), ggf. durch die Beeinflussung durch Messwerterhebung und Datenanalyse, nicht im selben Maß bestätigte.



**Abbildung 5.19: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Prozesswasser der KA K1 an den Untersuchungstagen**

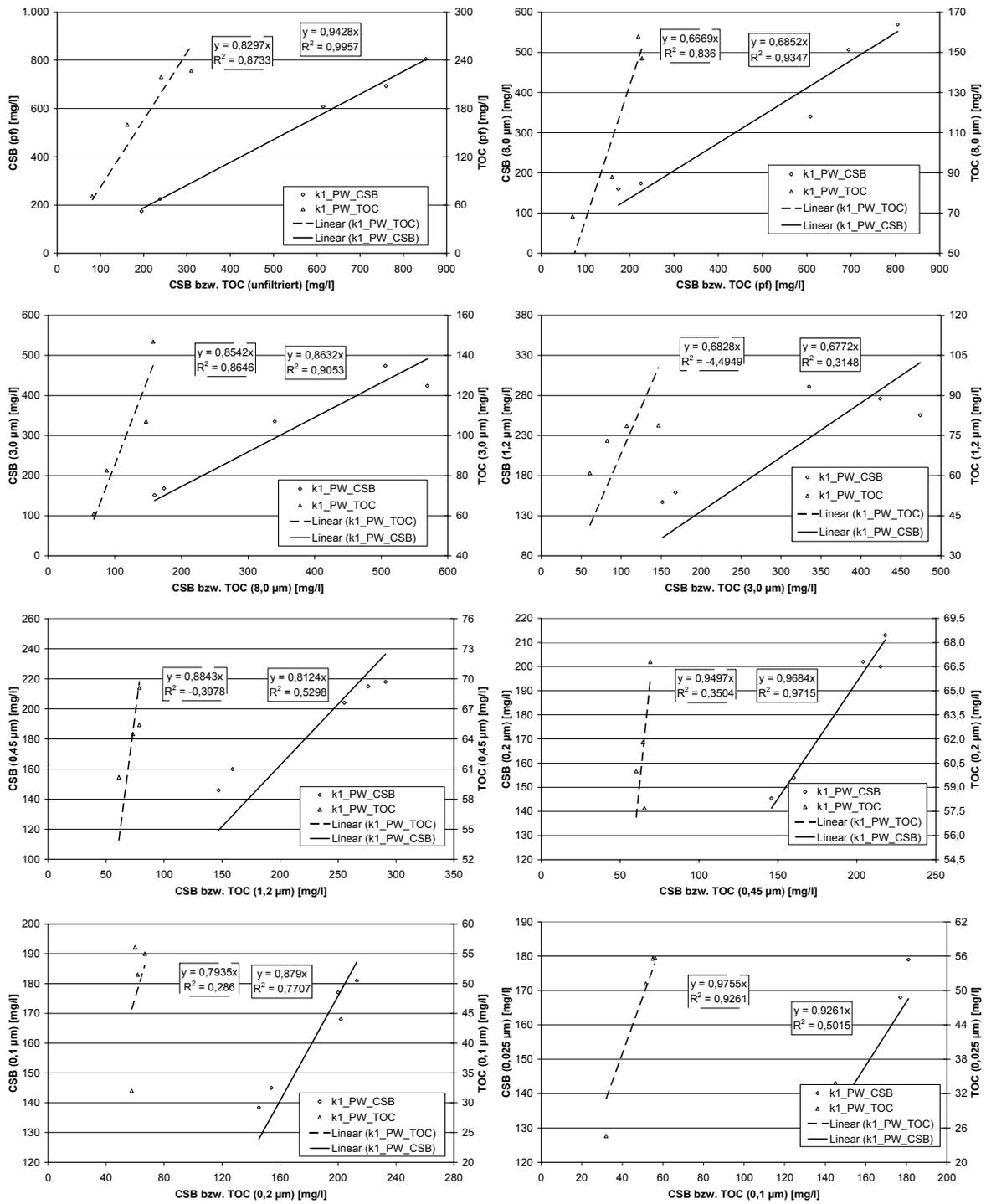
Ein linearer Trend zwischen zwei aufeinander folgenden Fraktionen aller Proben ist nicht in jedem Fall nachweisbar (Abbildung 5.21). Einen Hinweis auf das mögliche Vorhandensein der Korrelation bildet die Tatsache, dass mindestens einer der beiden Parameter CSB oder TOC eine lineare Abhängigkeit erkennen lässt, wenngleich diese beim Vergleich der 3  $\mu\text{m}$ - und 1,2  $\mu\text{m}$ -Fraktion schwach

ausgeprägt ist. Im Gegensatz dazu ist die Korrelation der partikulären CSB- und TOC-Konzentrationen sowie der AFS-Konzentrationen signifikant (Abbildung 5.22, Abbildung 5.23, Abbildung 5.24); dabei folgen die partikulären organischen Konzentrationen direkt den AFS-Konzentrationen.

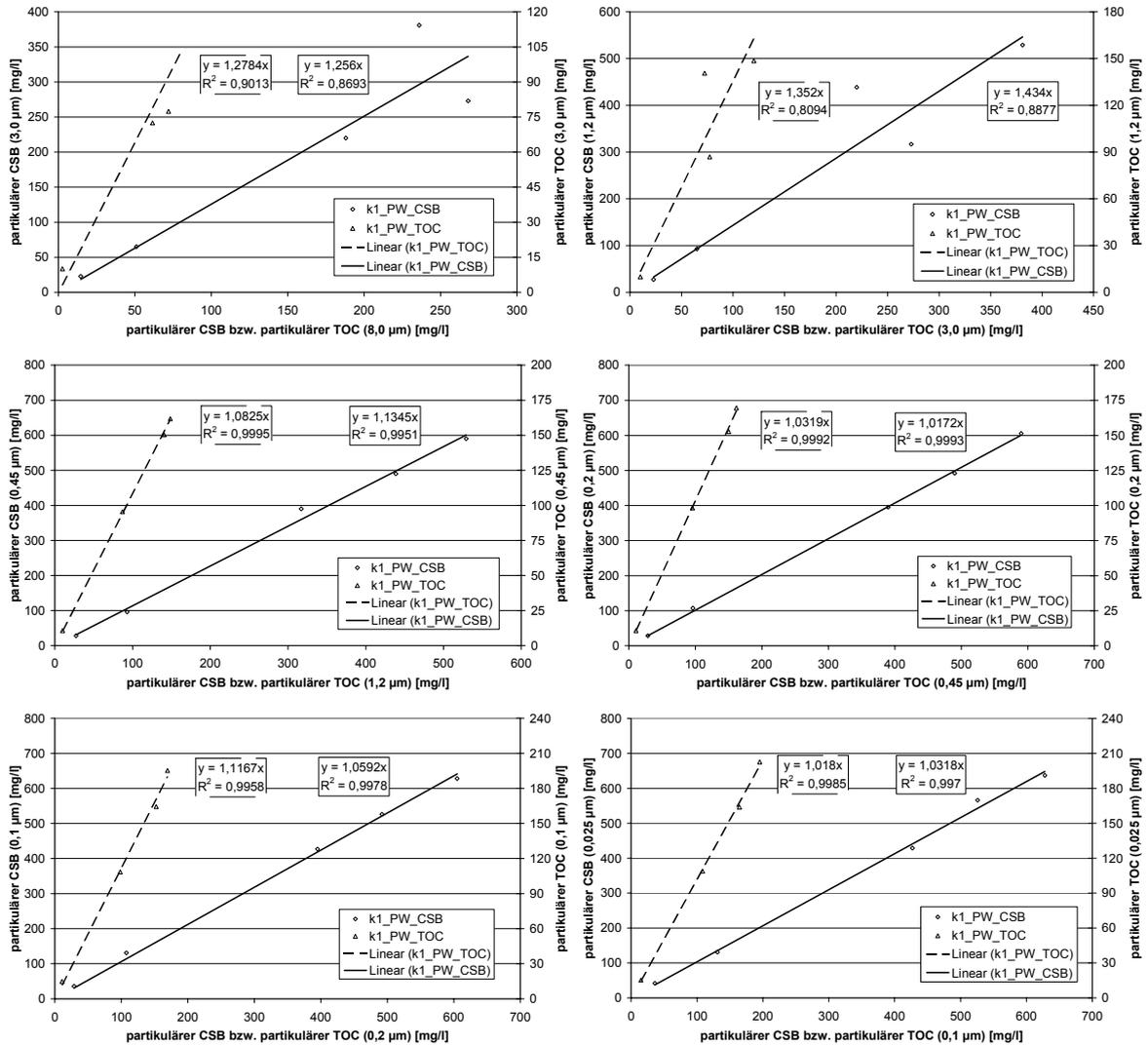


**Abbildung 5.20: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Prozesswasser der Anlage K1 (Zusammenfassung alle Proben)**

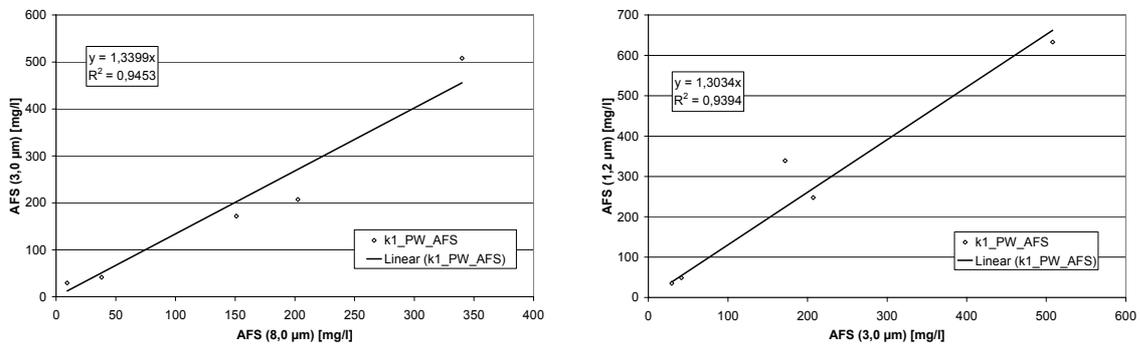
Eine Ursache für die Divergenz der Korrelationen kann im Anteil gelöster Substanzen (Partikelgröße  $< 0,025 \mu\text{m}$ ) zu finden sein. Wenn sich der partikuläre Anteil (Partikelgröße  $> 0,025 \mu\text{m}$ ) aller Proben proportional zueinander verhält, dies beim gelösten Anteil (Partikelgröße  $< 0,025 \mu\text{m}$ ) aber nicht der Fall ist, so besteht die Möglichkeit, dass der Gesamt-CSB der Proben untereinander bei entsprechend hohem Anteil keine Korrelation ergibt. Dies wäre ein Indiz dafür, dass sich die Proben nicht nur durch ihren Verdünnungsgrad, sondern in ihrer Natur unterscheiden und somit nur bedingt vergleichbar sind. Zur Erhärtung dieser These sind weitergehende Untersuchungen erforderlich.



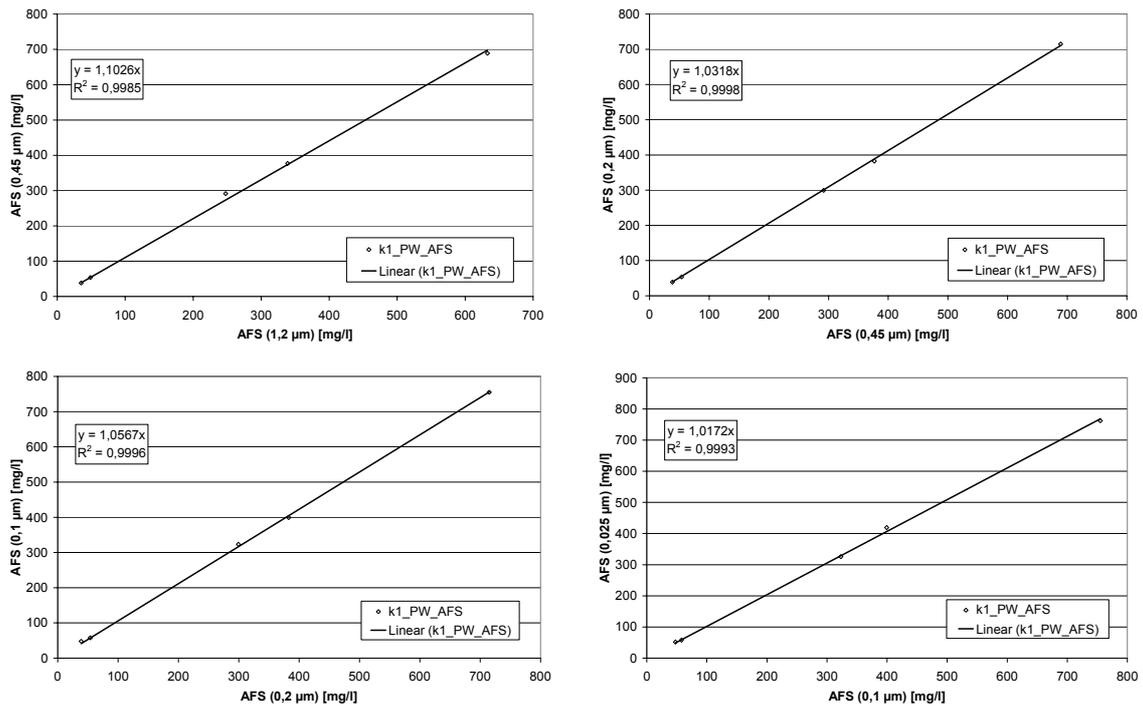
**Abbildung 5.21: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Prozesswasser-Fractionen der KA K1**



**Abbildung 5.22: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K1**



**Abbildung 5.23: Änderung der AFS aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K1**



**Abbildung 5.24: Änderung der AFS aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K1 (Fortsetzung)**

### 5.1.1.5 Fraktionierung des Belebtschlamm

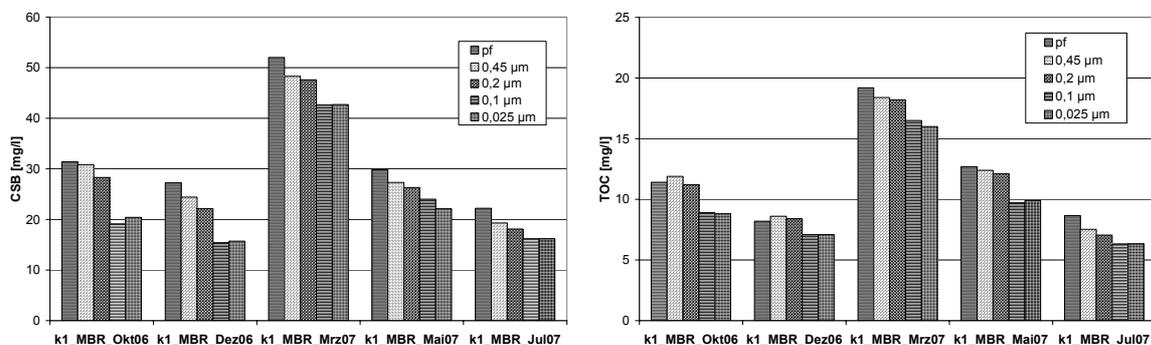
Der TS-Gehalt des Belebtschlammes der untersuchten Proben lag im Bereich von 12,0...14,0 g TS/l, der oTS-Gehalt zwischen 59 % TS und 63 % TS (Tabelle 5.3). Die temperaturnormierte Grundatmung ( $OVC_G + OVN_G$ ) lag im Bereich von 0,8 mg  $O_2$ /(g oTS·h) bis 2,6 mg  $O_2$ /(g oTS·h) und zeigte damit für stabilisierten Schlamm typische Werte von < 5 mg  $O_2$ /(g oTS·h). Die Temperatur wies jahreszeitlich bedingte Schwankungen von 11,4 °C bis 20,0 °C auf. Die Leitfähigkeit erreichte in Abhängigkeit der Zuflussverhältnisse (TW, MW) 340...694  $\mu$ S/cm. Der pH-Wert war mit 6,8...7,1 stabil.

**Tabelle 5.3: Kennwerte der Membranbelebungsstufe der Anlage K1**

Probe	TS	oTS	oTS	Atmung $OVC_G + OVN_G$	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg } O_2}{\text{g oTS} \cdot \text{h}}$	[-]	[°C]	[ $\mu$ S/cm]
10/06	12,0	7,5	63	2,6	7,1	20,0	694
12/06	12,9	8,1	63	0,8	7,0	11,4	340
03/07	14,0	8,7	62	1,1	7,0	9,2	458
05/07	12,6	8,1	64	1,3	6,8	15,2	411
07/07	13,5	8,0	59	1,6	7,1	17,4	571

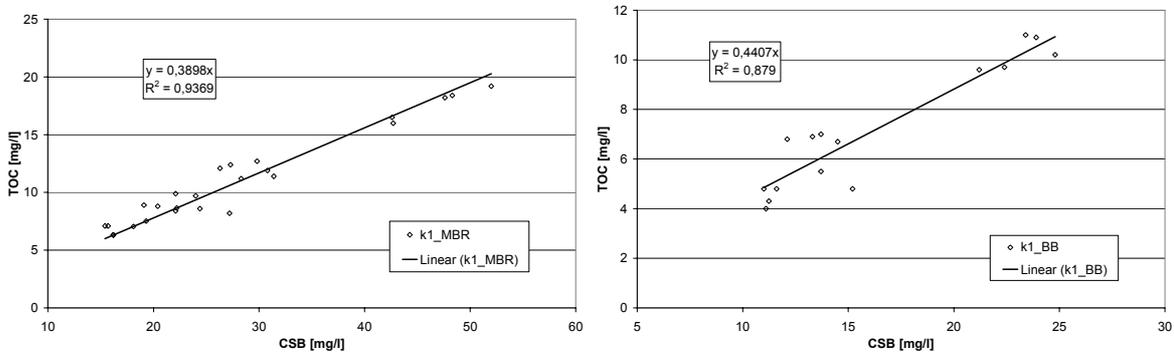
n. b. ... nicht bestimmt

Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlammes unterliegen einem teils ausgeprägten Verlauf, dessen Differenz beim Vergleich der 0,45  $\mu$ m- mit der 0,025  $\mu$ m-Fraktion 3...10 mg CSB/l bzw. 1,2...3,1 mg TOC/l beträgt (Abbildung 5.25).



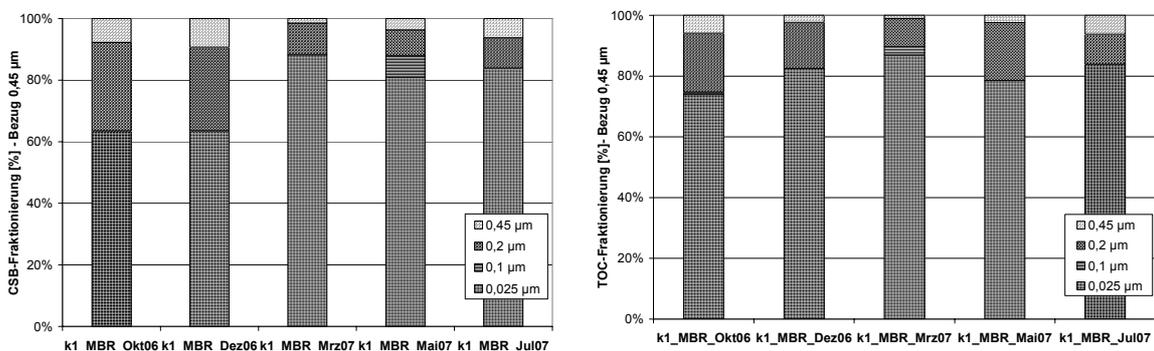
**Abbildung 5.25: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes der Membranbelebungsstufe der KA K1**

Das TOC/CSB-Verhältnis aller Proben liegt bei 0,39 (CSB/TOC = 2,6). Im Vergleich dazu beträgt das TOC/CSB-Verhältnis des Belebtschlammes aus dem Schlaufenbecken 0,44 (CSB/TOC = 2,3), wobei aber nur drei fraktionierte Proben zur Verfügung standen (Abbildung 5.25).

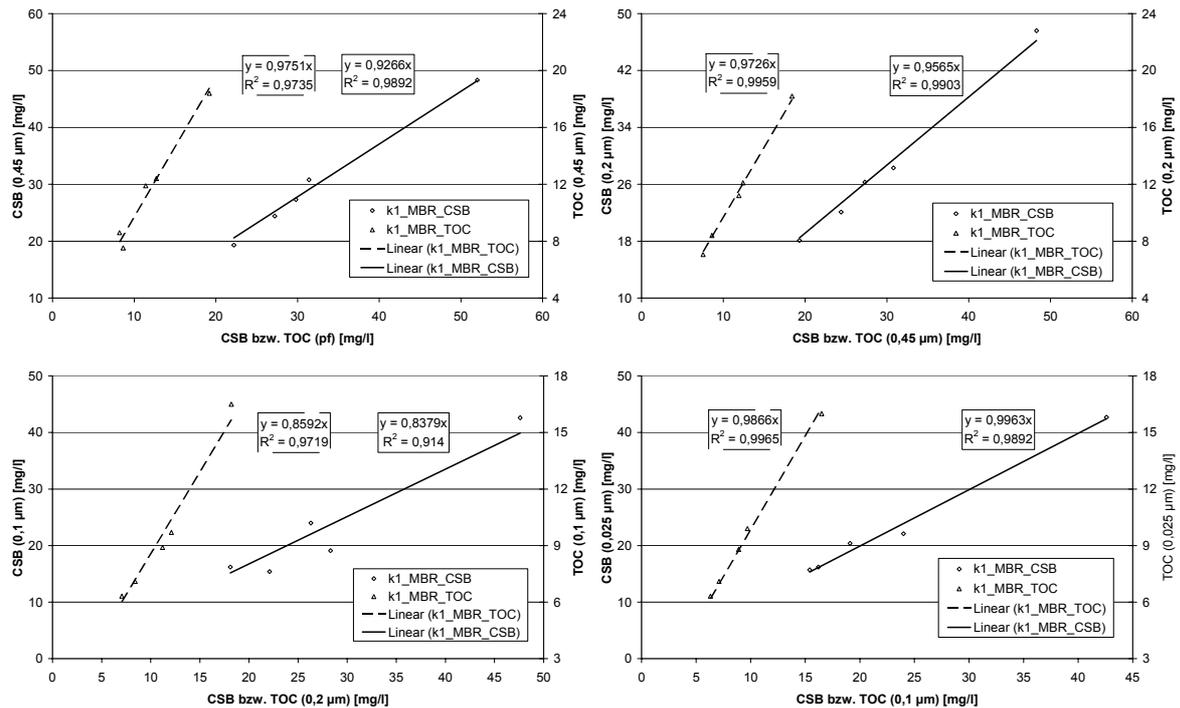


**Abbildung 5.26: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes der Membranbelebungsstufe der KA K1**

Der überwiegende Teil des membranfiltrierten Belebtschlammes (0,45 µm) besteht zu 80 % aus Substanzen mit einer Größe von weniger als 0,025 µm (Abbildung 5.27, Abbildung 5.28). In den Proben 10/06 und 12/06 ist 0,025-µm-Fraktion mit rd. 60 % des über 0,45 µm filtrierten Belebtschlammes wesentlich kleiner als bei den übrigen Proben. Im Vergleich dazu ist dieser Unterschied beim TOC nicht sichtbar, ggf. ist die Abweichung zwischen CSB und TOC analytisch bedingt. Am Beispiel des TOC lässt sich ein geringfügiger Anstieg der 0,025 µm-Fraktion bis einschließlich zur Probe 03/07 feststellen, der in den folgenden Proben, möglicherweise durch die an 03/07 anschließende Membranreinigung bedingt, sinkt.



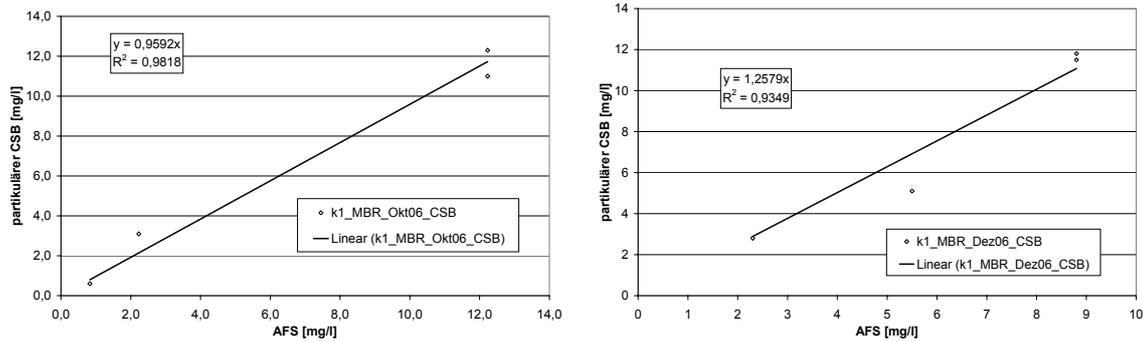
**Abbildung 5.27: Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen im Belebtschlamm der Membranbelebungsstufe der KA K1 (Bezug: 0,45 µm-Fraktion)**



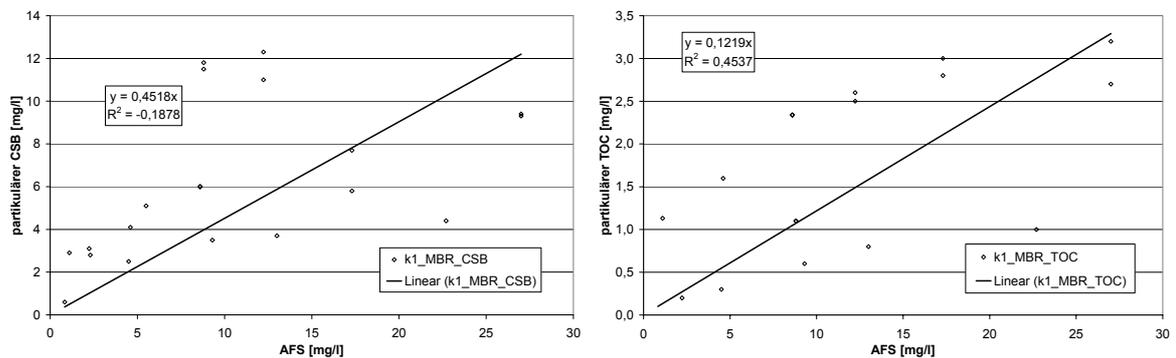
**Abbildung 5.28: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen im Belebtschlamm der Membranbelebungsstufe der KA K1**

Der Unterschied zwischen der 0,45 µm-Fraktion und der 0,2 µm-Fraktion ist mit < 10 % gering; die 0,1 µm-Fraktion ist noch schwächer ausgeprägt. Die Unterschiede zwischen der Verteilung der CSB- und TOC-Fraktionen sind auf die verschiedenen Bestimmungsmethoden und deren spezifische Fehler zurückzuführen. Die CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen verhalten sich linear zueinander. Der größte Unterschied tritt zwischen 0,2 µm und 0,1 µm auf (TOC: 14 %, CSB: 16 %) (Abbildung 5.28).

Ein Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB konnte ausschließlich für die Proben 10/06 und 12/06 nachgewiesen werden (Abbildung 5.29), wobei es naheliegend ist, dass die beschriebene Abweichung der 0,025 µm-Fraktion vom TOC der beiden Proben sowie von den übrigen Proben einen Einfluss auf die Korrelation hat. Für die Zusammenfassung aller Proben konnte, aufgrund der geringen Konzentrationsunterschiede, kein allgemeiner Zusammenhang nachgewiesen werden.



**Abbildung 5.29: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB der Belebtschlammproben 10/06 und 12/06**



**Abbildung 5.30: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben der Membranbelebungsstufe der KA K1**

### 5.1.1.6 Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Die CSB-Ablaufkonzentrationen der Proben 12/06 bis 07/07 waren relativ stabil und lagen im Untersuchungszeitraum bei < 9 mg CSB/l. Die TOC-Analysen der genannten Proben waren geringer als 5 mg TOC/l, der Unterschied zwischen den Proben 05/07 und 07/07 und den beiden davor beträgt 1 mg TOC/l bis 2 mg TOC/l (Abbildung 5.31). Dieser Verlauf ist am CSB nicht erkennbar. Dem entgegen sind sowohl die CSB- als auch die TOC-Konzentrationen der Probe 10/06 höher als bei den folgenden Proben. Die Unterschiede innerhalb der Fraktionen liegen im Bereich von Messfehlern. Die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen lagen bei < 5 mg BSB<sub>5</sub>/l; pH-Wert und Leitfähigkeit entsprachen in etwa den in den Membranbelebungsbecken ermittelten Werten (Tabelle 5.4).

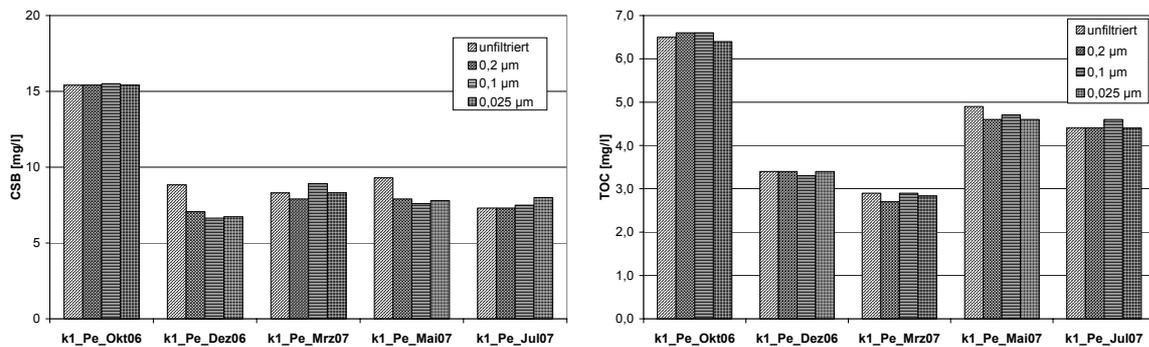


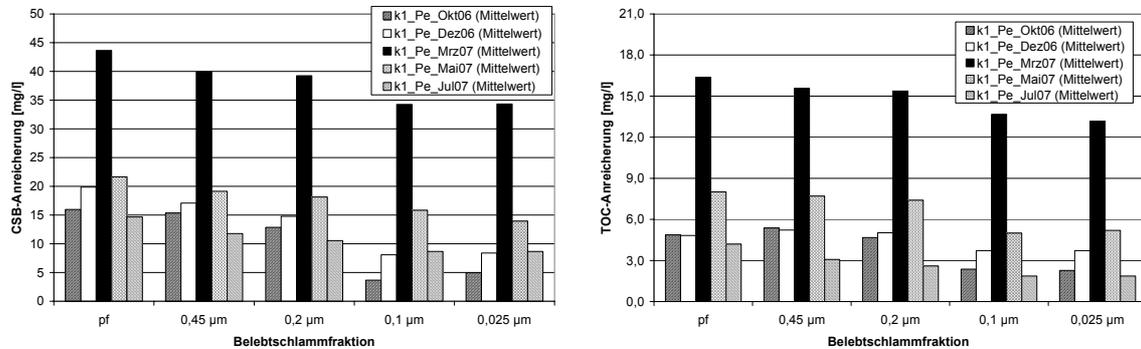
Abbildung 5.31: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der Anlage K1

Tabelle 5.4: Permeatbeschaffenheit der Anlage K1

Probe	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	pH-Wert [-]	T [°C]	Leitfähigkeit [µs/cm]
10/06	< 5	7,1	17,8	326
12/06	< 5	7,1	12,1	471
03/07	< 5	7,1	11,3	459
05/07	< 5	6,9	15,6	450
07/07	< 5	7,2	17,3	711

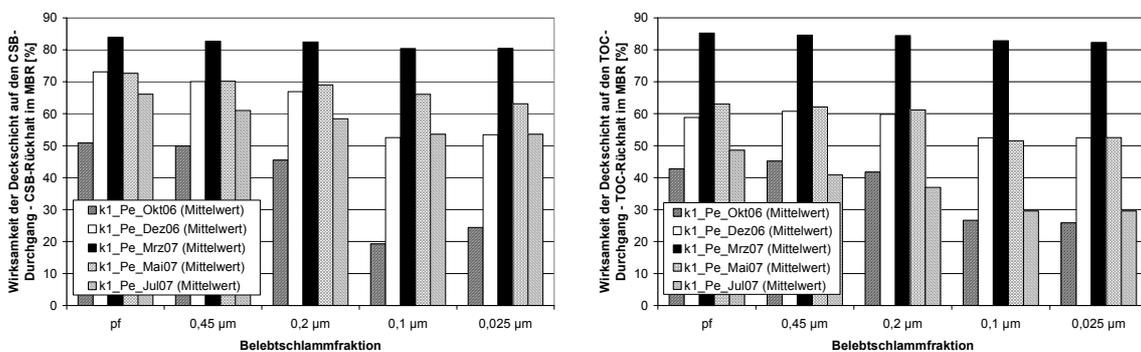
Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen wurde für die Belebtschlammfraktionen mit dem Mittelwert aus den unfiltrierten und filtrierten Permeatproben berechnet. Die Differenzen zwischen dem Permeatmittelwert und den Fraktionen sind deutlich (Abbildung 5.32). In allen Fraktionen ist sowohl beim TOC als auch beim CSB ein Anstieg der Konzentrationen bis 03/07 erkennbar, der vor allem von 12/07 auf 03/07 besonders stark zunimmt. Im Anschluss an die Probe-

nahme wurde eine Membranreinigung durchgeführt, deren Auswirkung im signifikanten Absinken der Konzentrationen erkennbar ist. Im Vergleich zur Probe 05/07 fällt die Anreicherung 07/07 in allen Fraktionen noch geringer aus und liegt unter bzw. auf dem Niveau der Probe 12/06.



**Abbildung 5.32: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der Anlage K1**

Unabhängig vom beobachteten Ausmaß der Anreicherung hochmolekularer organischer Stoffe in Anlage K1 bewirkt die sich im Betrieb ausbildende Deckschicht der Membran an allen Untersuchungstagen eine Verengung des Porendurchmessers der Anlage von 0,4 µm auf < 0,025 µm. Beim Vergleich der 0,45 µm-Fraktion mit dem Permeat werden infolge der Deckschicht in Abhängigkeit der Betriebszeit seit der letzten Membranreinigung 20...80 % des membranfiltrierten Belebtschlammes (Abbildung 5.33) zurückgehalten. Dieser CSB bzw. TOC würde unter deckschichtfreiem Betrieb zu gleichen Teilen im Permeat und in der Anlage enthalten sein. Es werden, neben der aufgrund der Porenweite der Membran, technisch bedingten partikulären Fraktion oberhalb 0,4 µm, Substanzen angereichert, deren Partikelgröße mindestens bei 0,025 µm liegt.



**Abbildung 5.33: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage K1**

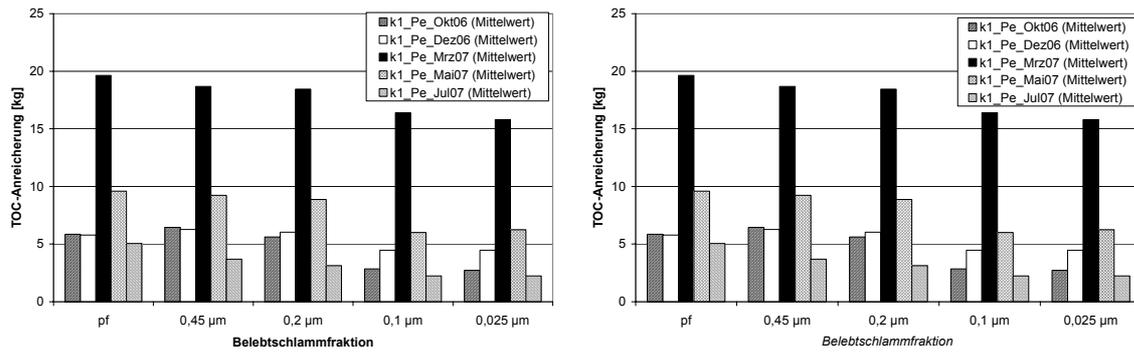


Abbildung 5.34: Angereicherte Fracht in der KA K1 am Tag der Probenahme

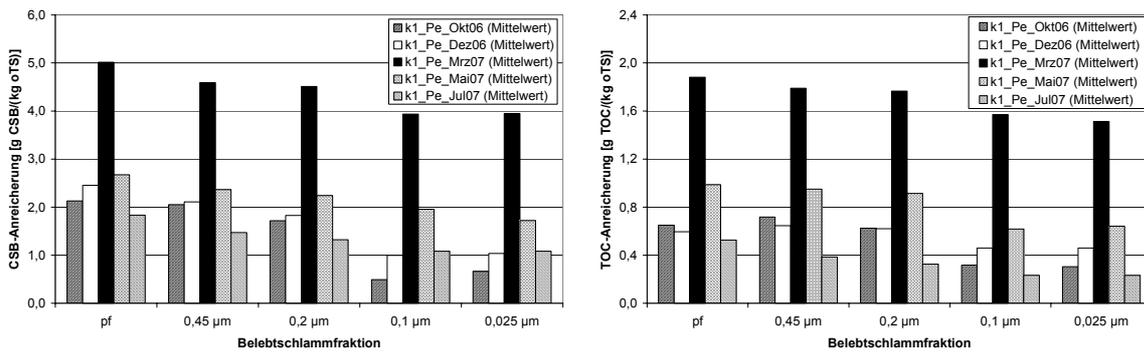


Abbildung 5.35: Spezifische Anreicherung in der KA K1 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme

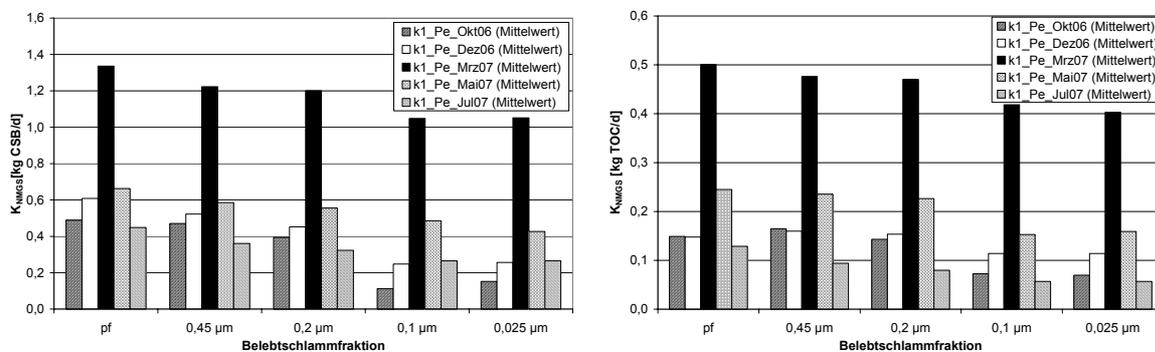


Abbildung 5.36: Bildungsrate nicht membrängängiger Substanzen in KA K1

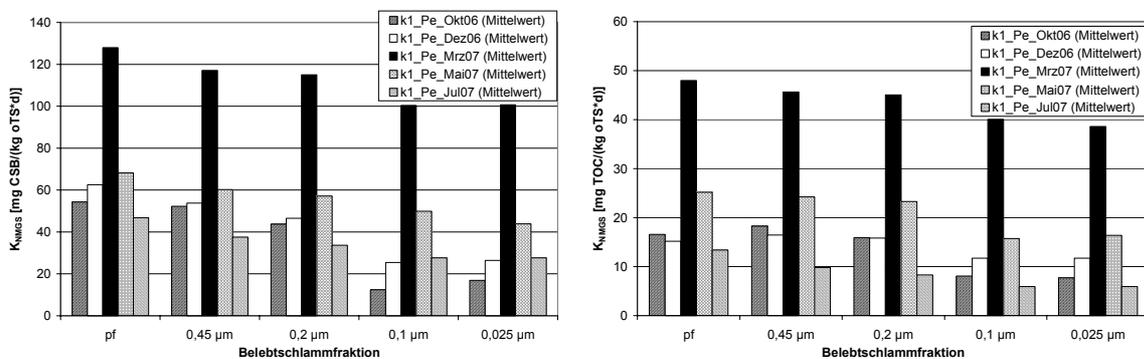


Abbildung 5.37: Spezifische Bildungsrate nicht membrängängiger Substanzen in KA K1

Eine Ausschleusung angereicherter Substanzen aus einer Membrananlage erfolgt durch Überschussschlammabzug. Aufgrund der relativ langen Betriebszeiträume zwischen den Membranreinigungen in KA K1 kommt es infolge der zunehmenden Deckschichtbildung zur überproportionalen Anreicherung im Belebtschlamm (Probe 03/07) in deren Folge 80 % des gelösten CSB und TOC ( $0,45 \mu\text{m}$ ) des Belebtschlammes in der Anlage zurückgehalten werden. Es konnte nicht ermittelt werden, inwieweit sich für die Bildung und den Austrag der nicht membrangängigen Stoffe ein Gleichgewichtszustand zwischen Output mit dem Überschussschlamm und Input (Summe aus gebildeten und aus dem Zulauf stammenden nicht membrangängigen Verbindungen) einstellte. Nach der Membranreinigung sinkt das Ausmaß der Anreicherung, so dass es naheliegend ist, dass infolge der Verbesserung der Membranpermeabilität ein Teil der angereicherten Substanzen aus dem System ausgeschwemmt wurde.

Die angereicherte Fracht ist in Abhängigkeit der Betriebszeit ohne Membranreinigung (etwa 1 Jahr) angestiegen (Abbildung 5.34, Abbildung 5.35). Bei kürzeren Reinigungsintervallen würde die Anreicherung nicht in dem beobachteten Maß ansteigen. Die Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen ( $K_{\text{NMGS}}$ ) beträgt unter Bezug auf das Schlammalter, in Abhängigkeit der Fraktionen,  $0,4 \dots 0,7 \text{ kg CSB/d}$  (Abbildung 5.36) oder, bezogen auf den oTS-Gehalt der Anlage  $72 \text{ mg CSB/(kg oTS}\cdot\text{d)}$  in der  $0,45 \mu\text{m}$ -Fraktion und  $43 \text{ mg CSB/(kg oTS}\cdot\text{d)}$  in der  $0,025 \mu\text{m}$ -Fraktion (Abbildung 5.37, Tabelle 5.9). Im Falle von kürzeren Reinigungsintervallen (bspw. halbjährlich) kann damit gerechnet werden, dass sich die nicht membrangängigen Stofffrachten in Abhängigkeit der Belebtschlammfraktion reduzieren. Die spezifische Bildungsrate beträgt damit rd.  $60 \text{ mg CSB/(kg oTS}\cdot\text{d)}$  in der  $0,45 \mu\text{m}$ -Fraktion und  $30 \text{ mg CSB/(kg oTS}\cdot\text{d)}$  in der  $0,025 \mu\text{m}$ -Fraktion (Tabelle 5.10).

**Tabelle 5.5: CSB-Anreicherung in der KA K1 (Mittelwerte aller Proben)**

Einheit	Belebtschlammfraktion			
	$0,45 \mu\text{m}$	$0,2 \mu\text{m}$	$0,1 \mu\text{m}$	$0,025 \mu\text{m}$
[kg]	28	25	23	17
[g/(kg oTS)]	2,8	2,5	2,3	1,7

**Tabelle 5.6: CSB-Anreicherung in der KA K1 (Mittelwerte aller Proben mit Ausnahme der Probe 03/07)**

	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	22	19	17	11
[g/(kg oTS)]	2,3	2,0	1,8	1,1

**Tabelle 5.7: TOC-Anreicherung in der KA K1 (Mittelwerte aller Proben)**

	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	9,2	8,9	8,4	6,4
[g/(kg oTS)]	0,93	0,90	0,85	0,64

**Tabelle 5.8: TOC-Anreicherung in der KA K1 (Mittelwerte aller Proben mit Ausnahme der Probe 03/07)**

	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	6,6	6,4	5,9	3,9
[g/(kg oTS)]	0,69	0,67	0,62	0,41

**Tabelle 5.9: Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in KA K1 (Mittelwerte aller Proben)**

	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg CSB/d]	0,71	0,63	0,59	0,43
[mg CSB/(kg oTS·d)]	72	64	59	43
[kg TOC/d]	0,23	0,23	0,21	0,16
[mg TOC/(kg oTS·d)]	24	23	22	16

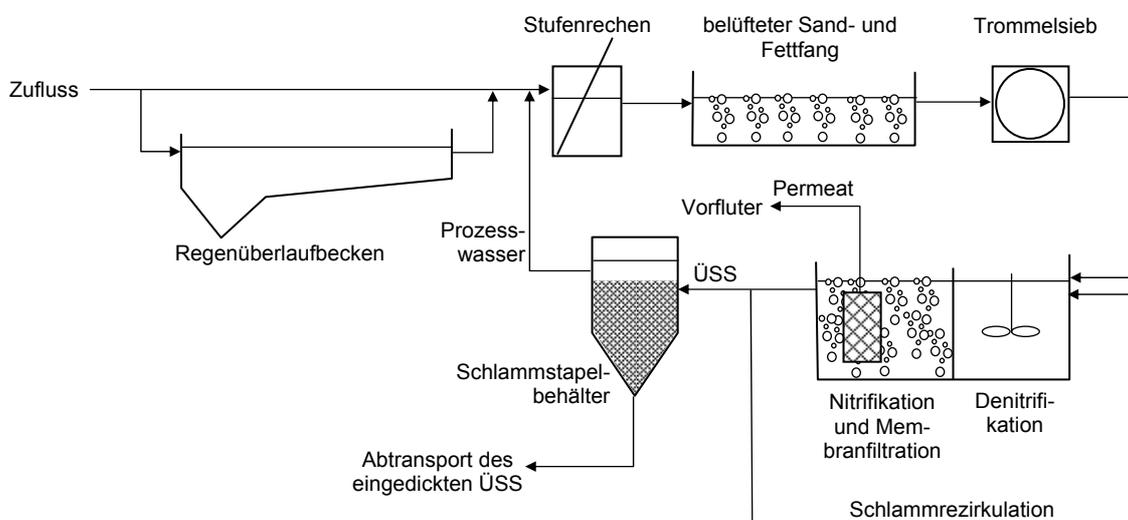
**Tabelle 5.10: Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in KA K1 (Mittelwerte aller Proben mit Ausnahme der Probe 03/07)**

	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg CSB/d]	0,55	0,48	0,43	0,28
[mg CSB/(kg oTS·d)]	58	51	45	29
[kg TOC/d]	0,17	0,16	0,15	0,10
[mg TOC/(kg oTS·d)]	18	17	16	10

## 5.1.2 Anlage K2

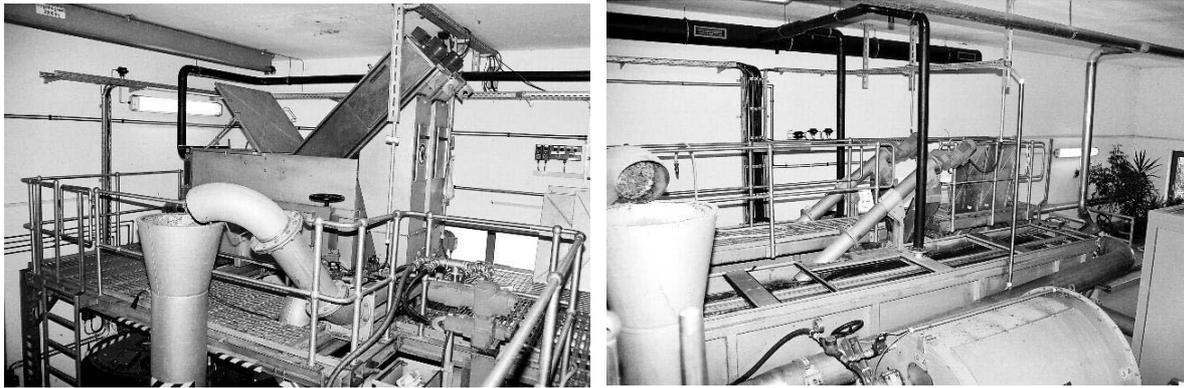
### 5.1.2.1 Anlagenbeschreibung

Die kommunale Kläranlage K2 (Abbildung 5.38, Inbetriebnahme 2002) war zum Zeitpunkt der Untersuchungen (10/2006...06/2007) bei einer Ausbaugröße von 12.000 EW mit rd. 11.500 EW belastet. Nennenswerte industrielle Einleiter waren nicht vorhanden. Das Einzugsgebiet ist im Mischsystem erschlossen. Der mittlere Zufluss zur Kläranlage betrug in den Jahren 2005 und 2006 rd. 2.000 m<sup>3</sup>/d. Die Kläranlage ist als simultane aerobe Schlammstabilisierungsanlage konzipiert. Das mittlere Schlammalter lag bei einem ÜSS-Abzug im Jahr 2005 von i. M. 44 m<sup>3</sup>/d bei 41 d; im Jahr 2006 erreichte es infolge eines geringeren ÜSS-Abzugs von i. M. 38 m<sup>3</sup>/d rd. 47 d. An den Untersuchungstagen entsprach die abgezogene Überschussschlammfracht einem Schlammalter von 46...48 d. Eine Ausnahme stellt die Beprobung 12/2006 dar, als infolge der Inbetriebnahme eines neuen Prozessleitsystems weniger ÜSS abgezogen wurde.



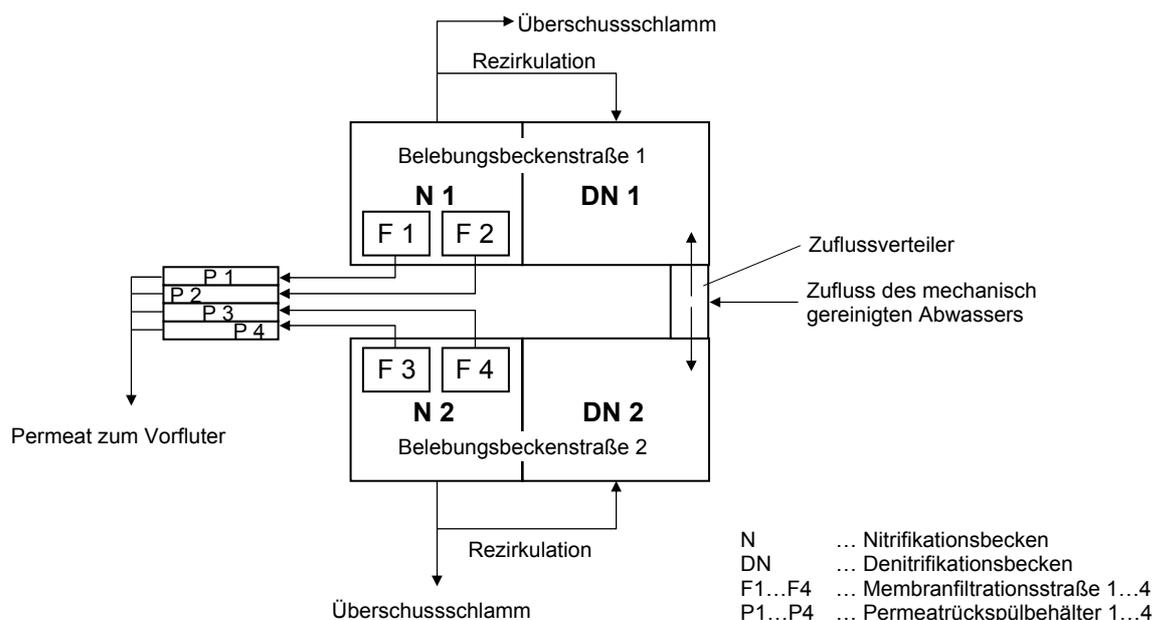
**Abbildung 5.38: Vereinfachte schematische Darstellung der Kläranlage K2**

Die zweistraßig aufgebaute mechanische Reinigungsstufe umfasst jeweils einen Stufenrechen mit einem Stababstand von 3 mm und einen kombinierten und belüfteten Sand- und Fettfang (Abbildung 5.39). Zur weitergehenden Feststoffabscheidung ist der Anlage ein Trommelsieb mit einer Maschenweite von 0,75 mm nachgeschaltet.



**Abbildung 5.39: Mechanische Reinigungsstufe der Anlage K2**

Die zweistraßige biologische Reinigungsstufe (Abbildung 5.40, Abbildung 5.41) mit einem Gesamtvolumen von 1.780 m<sup>3</sup> besteht jeweils aus einem vorgeschalteten Denitrifikationsbecken (455 m<sup>3</sup> pro Straße) und einem Nitrifikationsbecken (435 m<sup>3</sup> pro Straße) und wird über einen Zulaufverteiler beschickt. Das Rezirkulationsverhältnis liegt bei 3...4. In den DN-Becken ist eine Dosierstelle zur P-Fällung mit Eisen-III-Chlorid installiert. Der Überschussschlamm wird aus den Nitrifikationsbecken abgezogen und in einem Schlammstapelbehälter (V = 250 m<sup>3</sup>) gepumpt. Der Prozesswasserabzug erfolgt automatisch aus dem Stapelbehälter in den Zulauf der Kläranlage; eine Erfassung des Prozesswasseranfalls findet nicht statt. Der eingedickte ÜSS wird täglich per LKW zu einer zentralen Kläranlage abgefahren.



**Abbildung 5.40: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage K2**

In den Nitrifikationsbecken sind jeweils zwei Membranfiltrationsstraßen installiert. Es handelt sich um getauchte Ultrafiltrationsmembranmodule (ZeeWeed 500 C) der Fa. Zenon mit einer Filterfläche von insgesamt 8.800 m<sup>2</sup>. Die Membranmodule sind aus Hohlfasermembranen mit einer Porengröße von 0,1 µm aufgebaut und werden im Cross-Flow-Betrieb intermittierend im 10 s Intervall grobblasig belüftet. Der Betriebszyklus der Membranen besteht aus Filtration des Belebtschlammes, anschließender Entlüftung der Membranleitung zum Entfernen von aus dem Permeat ausgasenden Sauerstoff (30 s) und Rückspülung der Membranen mit Permeat (30 s). Die Filtrationszeit lag zu Beginn der Untersuchungen bei 500 s und wurde im Juni 2006 zunächst auf 600 s und anschließend auf 700 s ausgedehnt. Ein Teil des Permeats wird zur Rückspülung der Membranen zwischengespeichert. Jeder Membranstraße ist dazu ein Rückspülbehälter zugeordnet (jeweils 2,4 m<sup>3</sup>). Ein weiterer Teil wird für Reinigungsarbeiten auf der Kläranlage vorgehalten.



**Abbildung 5.41: Biologische Reinigungsstufe der Anlage K2 (Blick vom DN-Becken der Straße 1 auf Straße 2)**

Die Reinigung der Membranmodule umfasst eine wöchentliche Zwischenreinigung und eine jährliche Intensivreinigung. Zur Intensivreinigung werden die Racks aus den Becken entfernt, gespült, auf Schäden kontrolliert und in einem Reinigungs-

schacht chemisch gereinigt. Zum Einsatz kommen Natriumhypochlorit gegen Fouling und Zitronensäure gegen Scaling. Die Aufenthaltszeit beträgt jeweils 4 h, danach werden die Racks gespült. Der Zeitraum der letzten Intensivreinigung lag im September 2006, d. h. etwa einen Monat vor Beginn der Probenahme. Während der Probenahme wurde keine weitere Intensivreinigung durchgeführt.

Die Zwischenreinigung erfolgte für die Membranstraßen 1 und 2 (Belebungsbeckenstraße 1) dienstags und mittwochs; für die Membranstraßen 3 und 4 (Belebungsbeckenstraße 2) donnerstags und freitags. Die Probenahme fand montags in der Belebungsbeckenstraße 1 statt, so dass eine Beeinflussung der Proben durch die Reinigung vermieden wurde. Die Reinigung umfasst die Schritte Permeatverdrängung aus den Permeatleitungen, Chemikaliendosierung in die Leitungen mit einer sich daran anschließenden Einwirkzeit von 10 min. Im Unterschied zur Intensivreinigung wird ausschließlich eine Chemikalie dosiert, wobei Natriumhypochlorit an zwei aufeinander folgenden Wochen dosiert wird, Zitronensäure dagegen alle drei Wochen einmal.

### 5.1.2.2 Probenahme

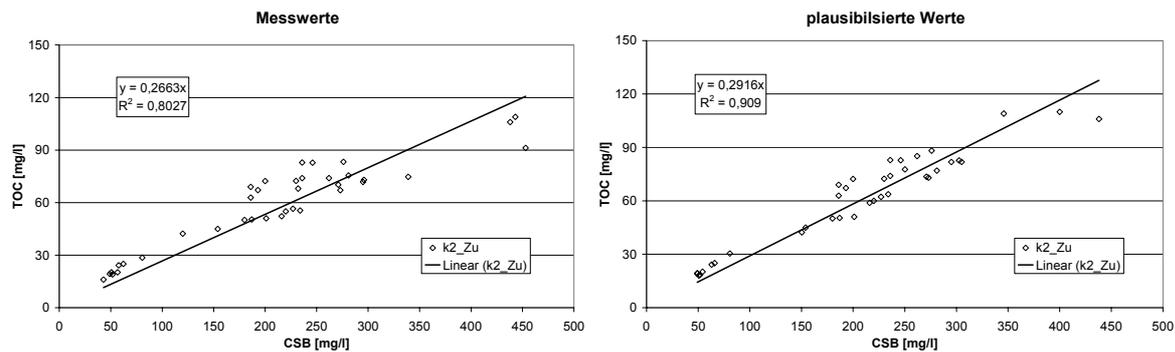
Die Anlage K2 wurde im Abstand von 2 Monaten 10/06, 12/06, 02/07, 04/07 und 06/07 beprobt. Die Zulaufproben wurden als qualifizierte Stichproben aus dem Zuflussverteiler entnommen, die Belebtschlammproben als Stichproben aus der Belebungsbeckenstraße 1, die Permeatproben ebenfalls als Stichproben aus dem Ablaufschacht der Kläranlage. Eine einfache Möglichkeit, eine Probe des Prozesswassers an den Untersuchungstagen dem Schlammstapelbehälter zu entnehmen, bestand aufgrund der automatischen Betriebsweise (Befüllen, Absetzen, Trübwasserabzug) und der vor-Ort-Bedingungen nicht.

### 5.1.2.3 Zuflussfraktionierung

Es wurden vier Trockenwetter- und ein Mischwasserzufluss erfasst. Einige vor Ort bestimmte Abwasserkenwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen sind in Tabelle 5.11 dargestellt. Die pH-Werte lagen im für kommunales Abwasser typischen leicht basischen Bereich. Am ersten Untersuchungstag wurden die 8 µm-, 3 µm- und 1,2 µm-Fractionen und die AFS nicht bestimmt. Das TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,27 (CSB/TOC = 3,8), nach der Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) bei 0,29 (CSB/TOC = 3,4) (Abbildung 5.42).

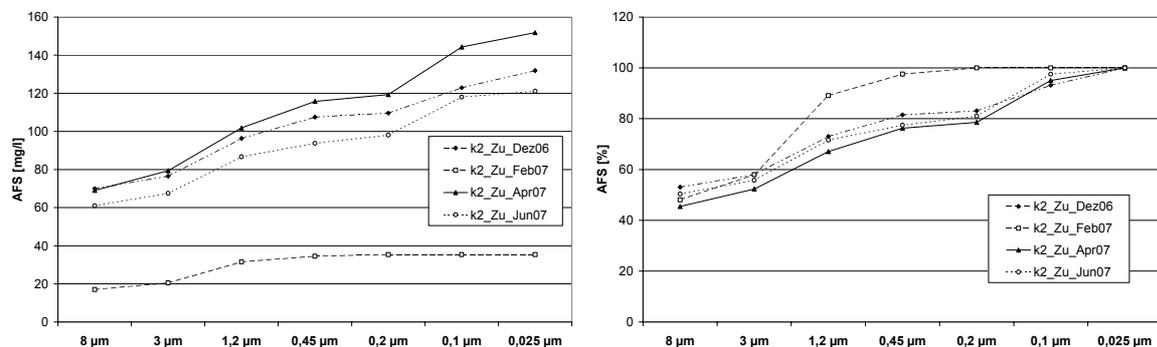
**Tabelle 5.11: Charakterisierung des Zuflusses zur KA K2**

Probe	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	Leitfähigkeit [µS/cm]	pH-Wert [-]	Temperatur [°C]
10/06	293	1.725	8,6	16,4
12/06	253	1.673	8,7	12,1
02/07	300	718	7,6	8,6
04/07	393	1.577	8,1	13,3
06/07	212	1.685	8,1	18,2



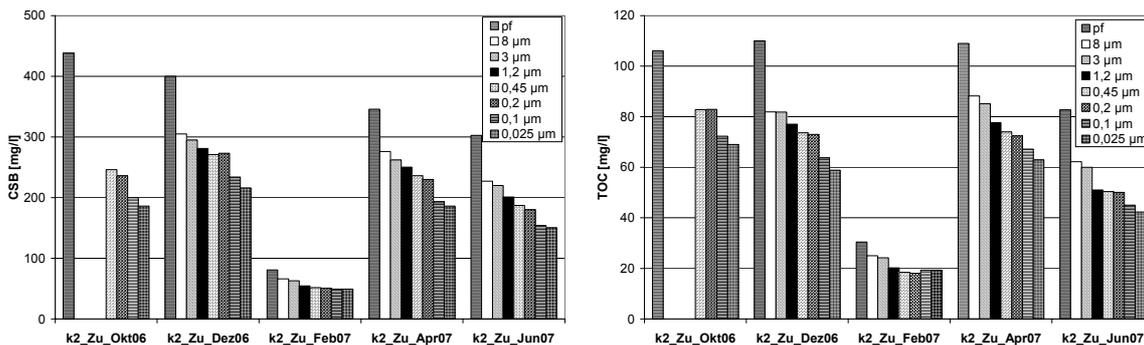
**Abbildung 5.42: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA K2**

In Abbildung 5.43 ist die Änderung der abgeschiedenen partikulären Substanzen als AFS im Bereich 8 µm bis 0,025 µm dargestellt. Der relative Verlauf der membranfiltrierten Proben im Bereich der 8 µm- und der 3 µm-Fraktion ist ähnlich, danach treten Unterschiede zwischen Mischwasser- und Trockenwetterproben auf, deren Bestätigung durch weitere Regenwetterproben aussteht. Die Trockenwetterproben verhalten sich beim Vergleich der absoluten und der relativen Werte ähnlich.

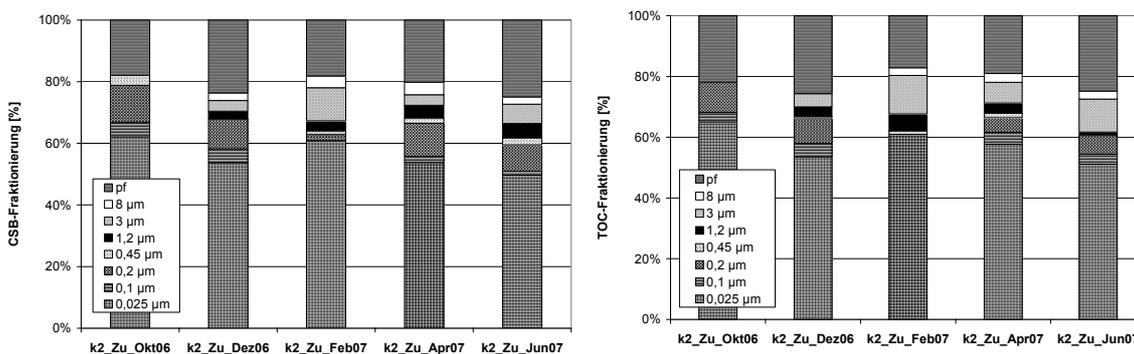


**Abbildung 5.43: AFS-Verteilung im Zufluss der KA K2 mit Bezug zur 8 µm-Probe**

Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen insbesondere an den Trockenwettertagen einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.44, Abbildung 5.45). Die 8 µm-Fraktion liegt rd. 20...25 % unterhalb der nach der Filtration über Papierfilter analysierten TOC- bzw. CSB-Konzentrationen. Der Unterschied zwischen der 8 µm- und 3 µm-Fraktion ist mit < 5 % relativ gering. Gleiches gilt für die 1,2 µm- und die 0,45 µm-Fraktion. Zusammenfassend beträgt die Summe aus 1,2 µm, 0,45 µm und 0,2 µm-Fraktion etwa 15...20 % der papierfiltrierten Konzentrationen.



**Abbildung 5.44: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der KA K2**

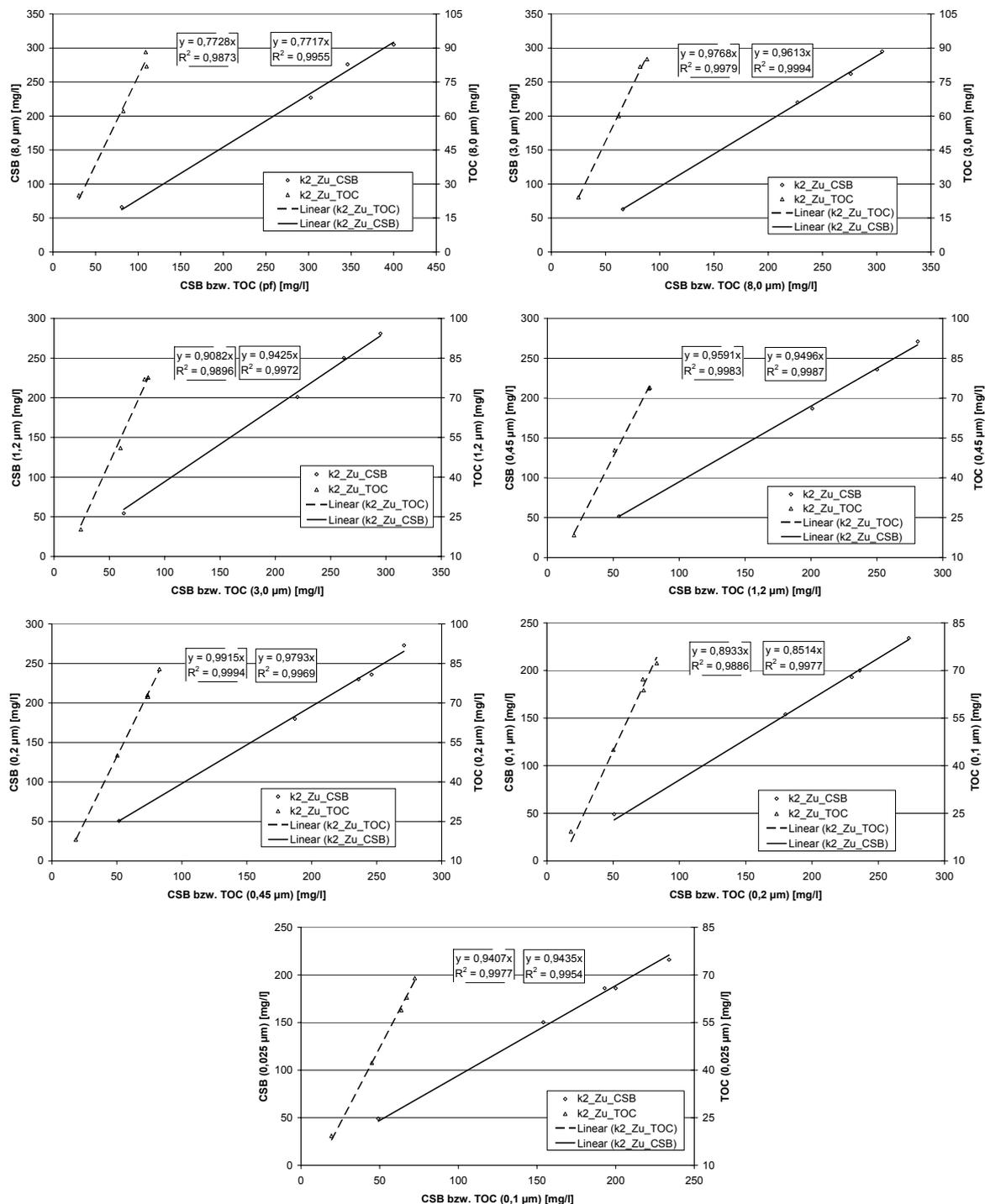


**Abbildung 5.45: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der KA K2 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

An den Trockenwettertagen betrug die Ausdehnung der 0,2 µm-Fraktion rd. 10...15 % der papierfiltrierten Probe, während bei der Mischwasserprobe dieser Unterschied nicht festgestellt werden konnte. Im Gegensatz dazu war die 3 µm-Fraktion in dieser Probe ausgeprägter, als an den Trockenwettertagen. Da keine weitere Regenwetterprobe zur Verfügung stand, ist eine Wertung dieser Beobachtung nicht möglich. Darüber hinaus können aufgrund der geringen Konzentrationen (50...80 mg CSB/l) während der Analyse höhere Fehler auftreten, die ggf. das Ergebnis in der beschriebenen Weise beeinflussen.

Sowohl zwischen der 0,2 µm- und der 0,45 µm-Fraktion als auch zwischen der 0,1 µm- und 0,025 µm-Fraktion sind nur geringe Unterschiede erkennbar (Abbildung 5.46), die ggf. auf Fehler bei der Analyse oder der Aufbereitung der Proben im Zuge der Fraktionierung zurückzuführen sind. Im Vergleich zur papierfiltrierten Probe zeigt sich, dass der wesentliche Anteil mit 50...60 %, eine Partikelgröße von weniger als 0,025 µm aufweist. Wird die in der Abwassertechnik gebräuchliche 0,45 µm-Fraktion als Bezugswert für membranfiltrierte Proben ge-

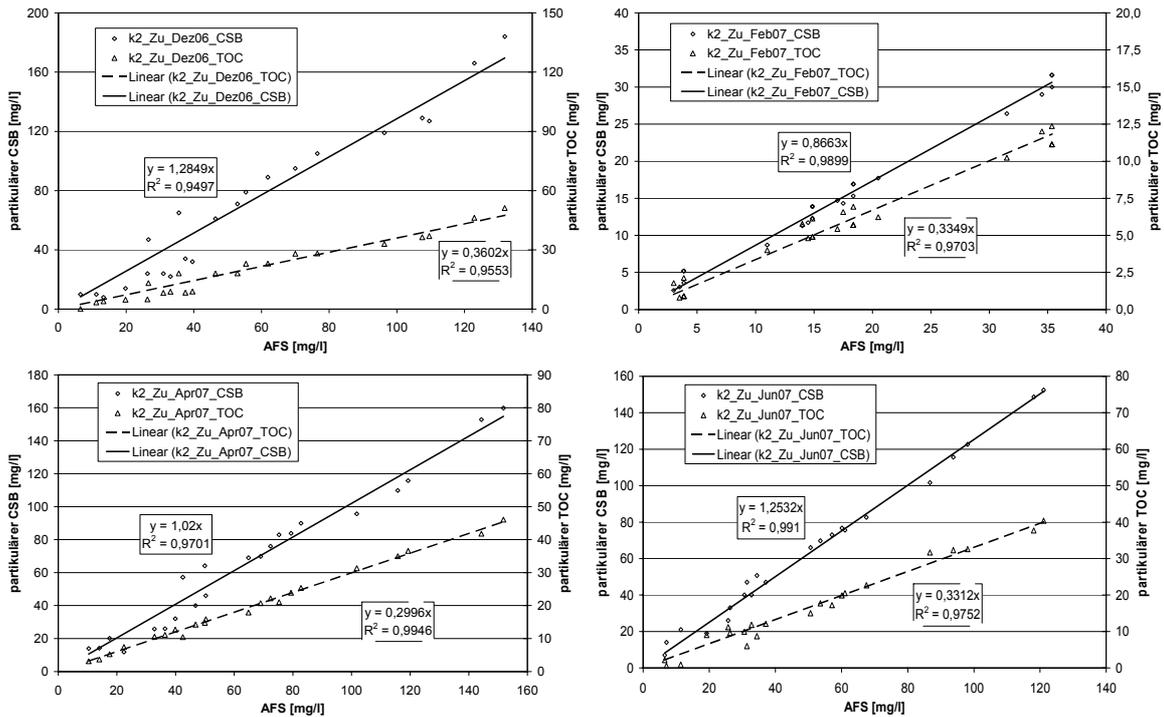
wählt, so sind mindestens 80 % des 0,45- $\mu\text{m}$  Durchgangs kleiner als 0,1  $\mu\text{m}$  und mindestens 75 % des 0,45- $\mu\text{m}$  Durchgangs kleiner als 0,025  $\mu\text{m}$ .



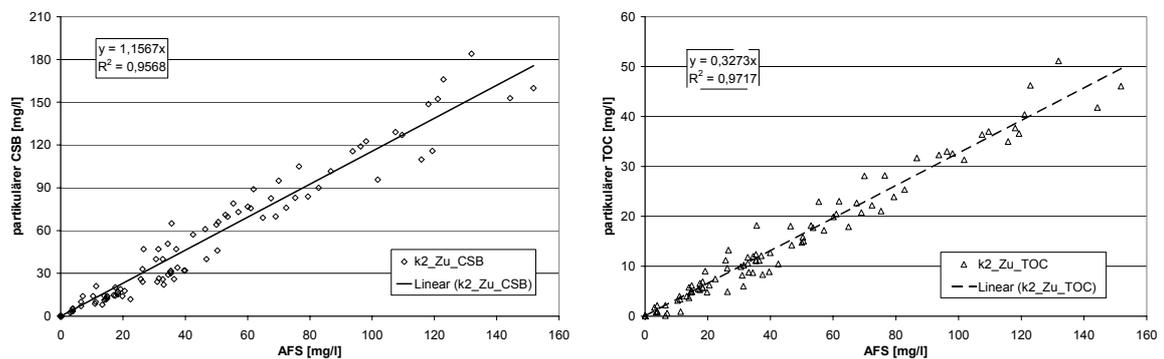
**Abbildung 5.46: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der KA K2**

Die größten Änderungen der Konzentrationen treten zwischen der papierfiltrierten und der 8  $\mu\text{m}$ -Probe einerseits (23 %), zwischen der 0,2  $\mu\text{m}$ - und 0,1  $\mu\text{m}$ -Fraktion (11...15 %) andererseits auf (Abbildung 5.45, Abbildung 5.46). Die lineare Abhän-

gigkeit aller Fraktionen deutet darauf hin, dass die Abwasserbeschaffenheit homogen ist und nur durch die Verdünnung mit Fremdwasser, d. h. Niederschlagswasser beeinflusst wird. Die Bestimmung von partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC und deren Korrelation mit den AFS führte bei allen untersuchten Proben, unabhängig von Trockenwetter- oder Mischwasserzuflüssen, zu einer linearen Abhängigkeit (Abbildung 5.47, Abbildung 5.48).



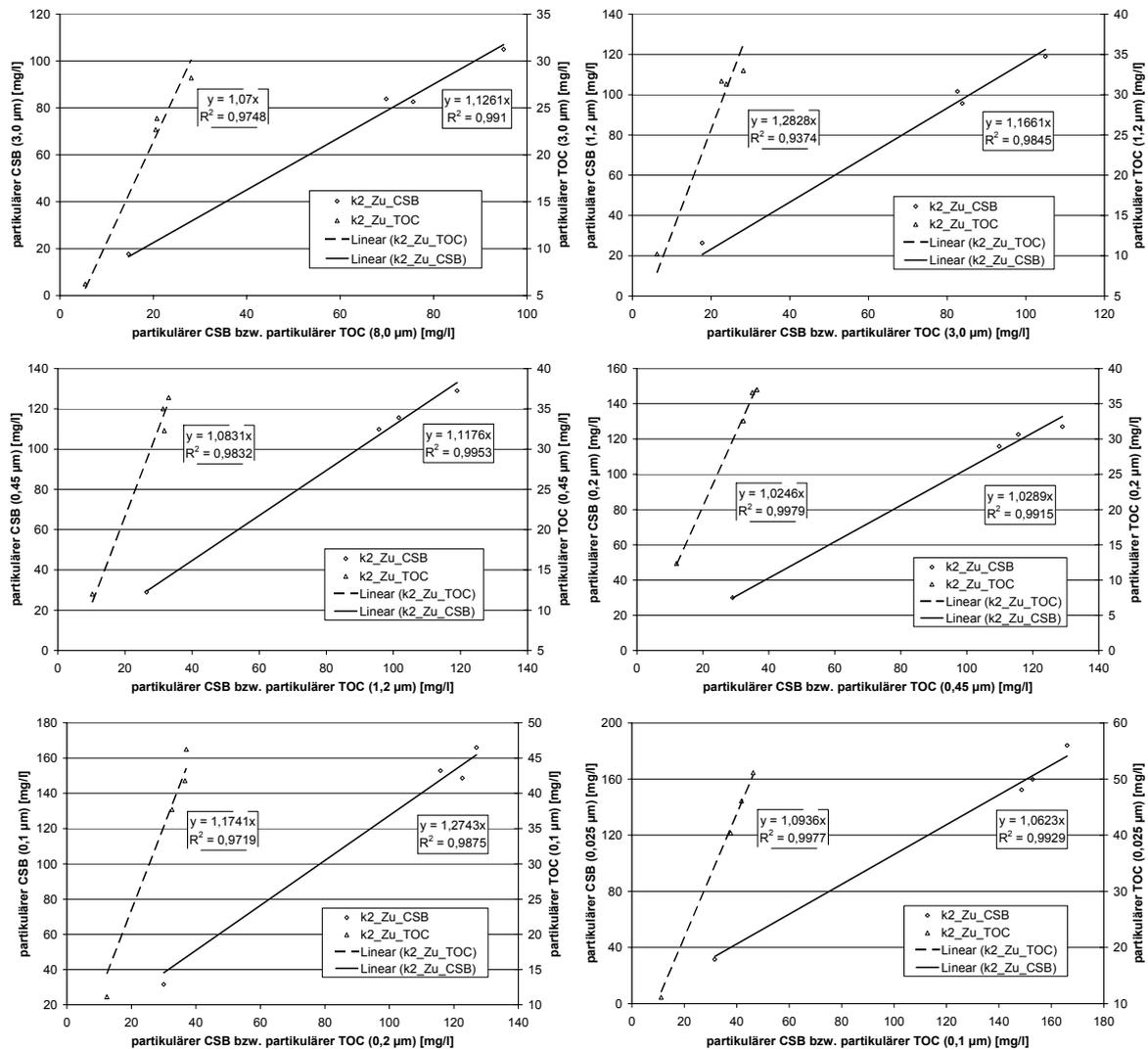
**Abbildung 5.47: Zusammenhang zw. AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen (KA K2)**



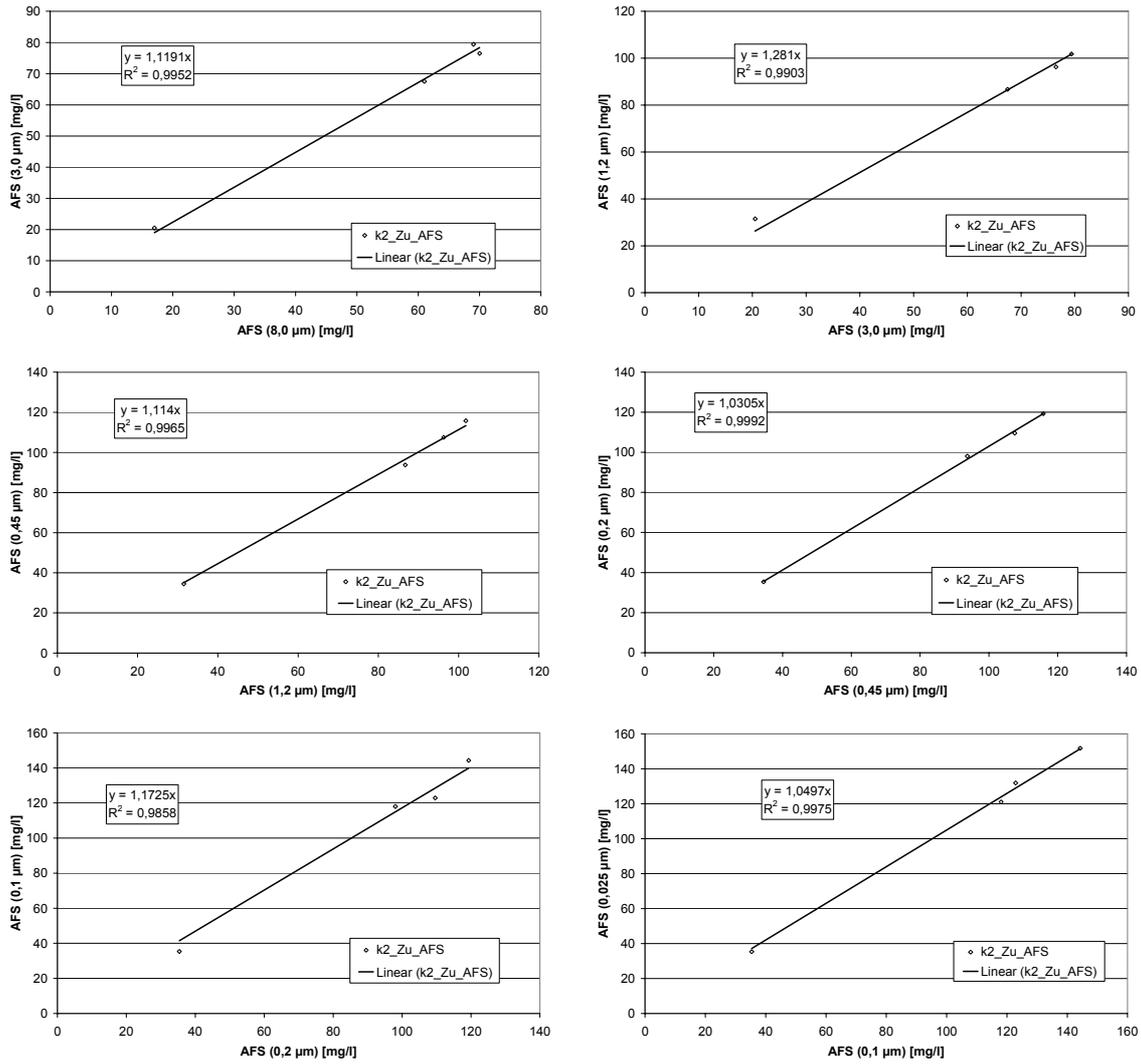
**Abbildung 5.48: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC (Zusammenfassung alle Proben) der KA K2**

Der Vergleich der Änderung des partikulären CSB sowie des partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen mit den zu diesen Fraktionen gehörenden AFS

zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der Anstiege aller drei Parameter (Abbildung 5.49, Abbildung 5.50), wenngleich dieser Zusammenhang durch Auswertung weiterer Proben zu erhärten ist.



**Abbildung 5.49: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Zuflussfraktionen der KA K2**



**Abbildung 5.50: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der KA K2**

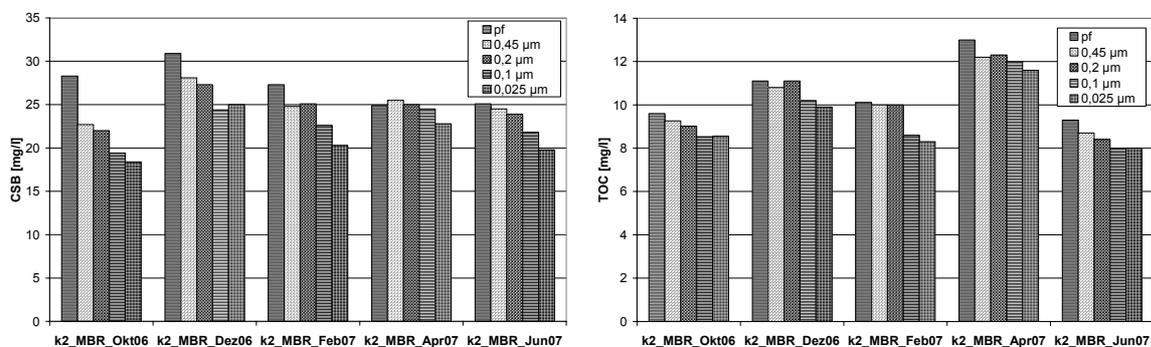
### 5.1.2.4 Fraktionierung des Belebtschlamm

Der TS-Gehalt des Belebtschlamm der untersuchten Proben lag im Bereich von 10,3...12,4 g TS/l, der oTS-Gehalt zwischen 61 % TS und 79 % TS (Tabelle 5.12). Die temperaturnormierte Grundatmung ( $OVC_G + OVN_G$ ) lag im Bereich von 1,2...2,3 mg  $O_2/(g \text{ oTS} \cdot h)$  und damit im für stabilisierten Schlamm typischen Rahmen von  $< 5 \text{ mg } O_2/(g \text{ oTS} \cdot h)$ . Die Temperatur wies jahreszeitlich bedingte Schwankungen von 11,1 °C bis 19,7 °C auf. Die Leitfähigkeit war mit 1.233  $\mu\text{S/cm}$  bis 1.355  $\mu\text{S/cm}$  relativ stabil; ebenso der pH-Wert mit 7,0...7,2.

**Tabelle 5.12: Kennwerte der biologischen Reinigungsstufe der KA K2**

Probe	TS	oTS	oTS	Atmung $OVC_G + OVN_G$	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg } O_2}{\text{g oTS} \cdot h}$	[-]	[°C]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]
10/06	11,3	8,9	79	2,2	7,2	17,5	1.355
12/06	10,3	7,1	69	1,2	7,2	13,3	1.277
02/07	11,9	8,4	71	1,2	7,0	11,1	1.233
04/07	12,4	8,7	70	2,3	7,0	14,9	1.307
06/07	12,2	7,6	62	2,1	7,1	19,7	1.309

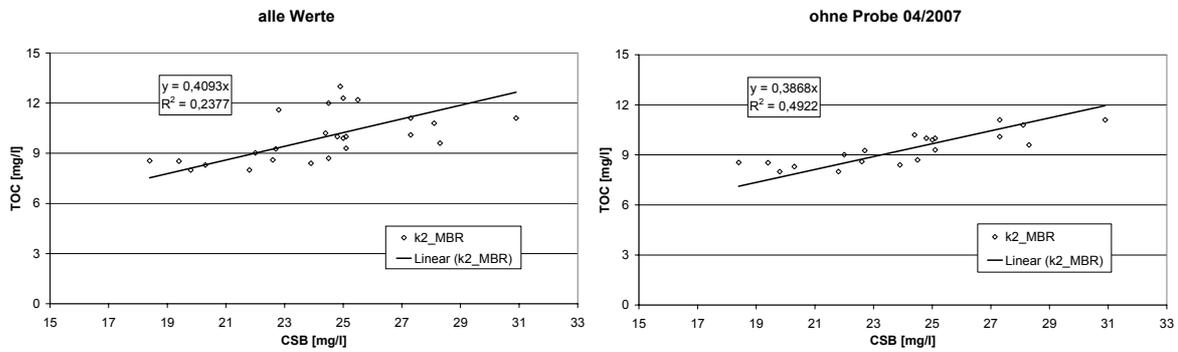
Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlamm unterliegen einem gering ausgeprägten Verlauf, dessen Differenz bei Gegenüberstellung der 0,45  $\mu\text{m}$ - mit der 0,025  $\mu\text{m}$ -Fraktion etwa 5 mg CSB/l bzw.  $< 2 \text{ mg TOC/l}$  beträgt (Abbildung 5.51).



**Abbildung 5.51: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlamm der KA K2**

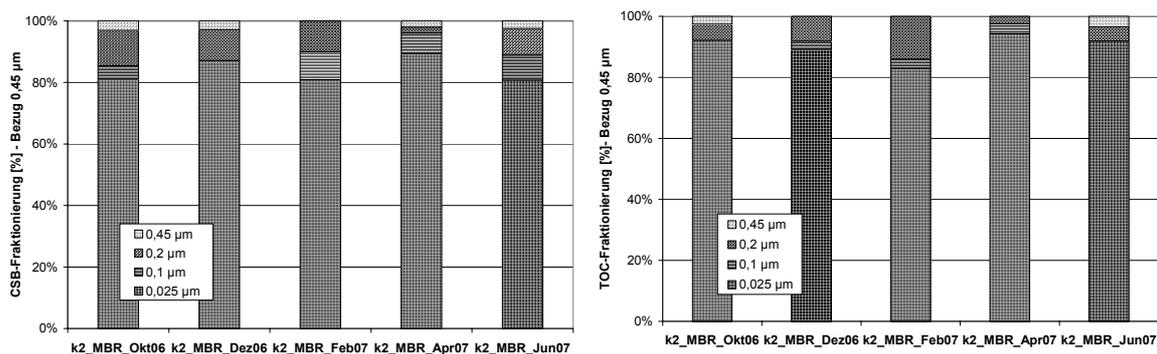
Das TOC/CSB-Verhältnis aller Proben liegt bei 0,41 (CSB/TOC = 2,4), wobei die Probe 04/07 mit einem CSB/TOC-Verhältnis von 2,1 unter dem der anderen Pro-

ben mit i. M. 2,6 liegt (Abbildung 5.52). Dier Gegenüberstellung der Proben zeigt, dass die TOC-Bestimmung Werte lieferte, die etwa 3 mg TOC/l über den Werten der übrigen analysierten Proben liegen. Es ist naheliegend, dass der TOC fehlerbehaftet ist. Ein weiteres Indiz dafür, stellt der Verlauf der TOC-Anreicherung bzw. deren Vergleich mit der CSB-Anreicherung dar (vgl. Abschnitt 5.1.2.5).



**Abbildung 5.52: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes der KA K2**

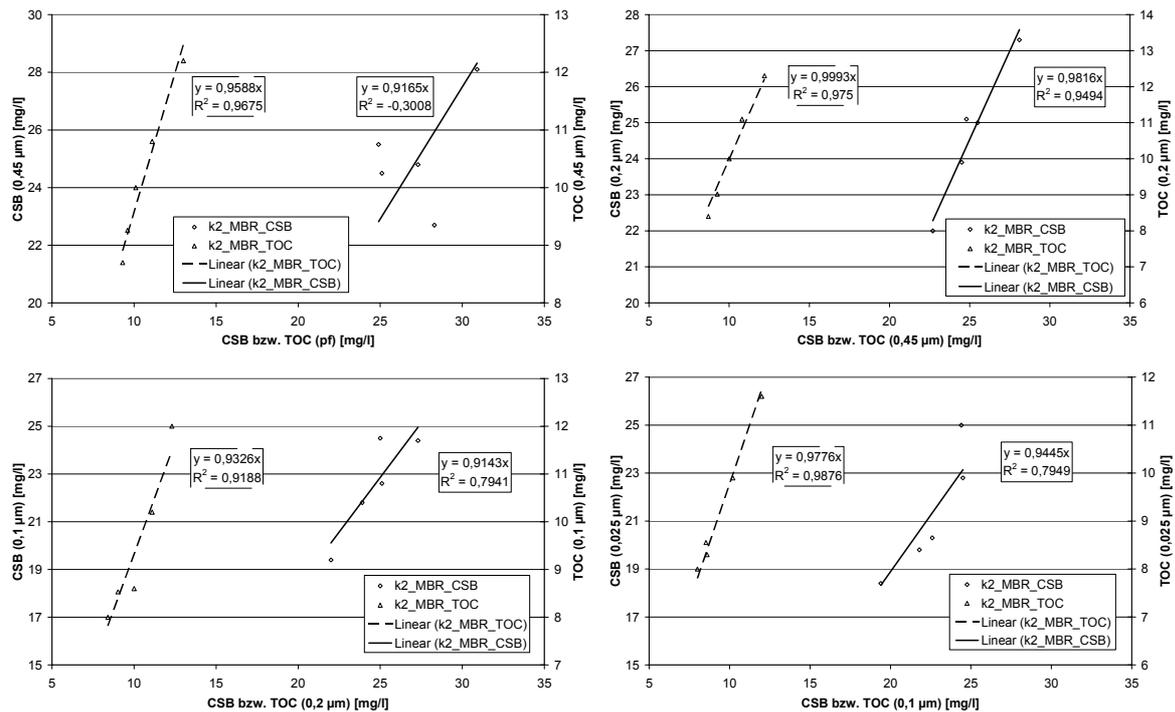
Der überwiegende Teil des membranfiltrierten Belebtschlammes (0,45 µm) besteht zu 80...90 % aus Substanzen mit einer Größe von weniger als 0,025 µm (Abbildung 5.53, Abbildung 5.54). Die 0,45 µm-Fraktion ist weitgehend identisch mit der 0,2 µm-Fraktion. Die 0,1 µm-Fraktion ist, insbesondere bei Betrachtung des TOC, gering ausgeprägt. Die Unterschiede zwischen der Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen sind auf die verschiedenen Bestimmungsmethoden und deren spezifische Fehler zurückzuführen.



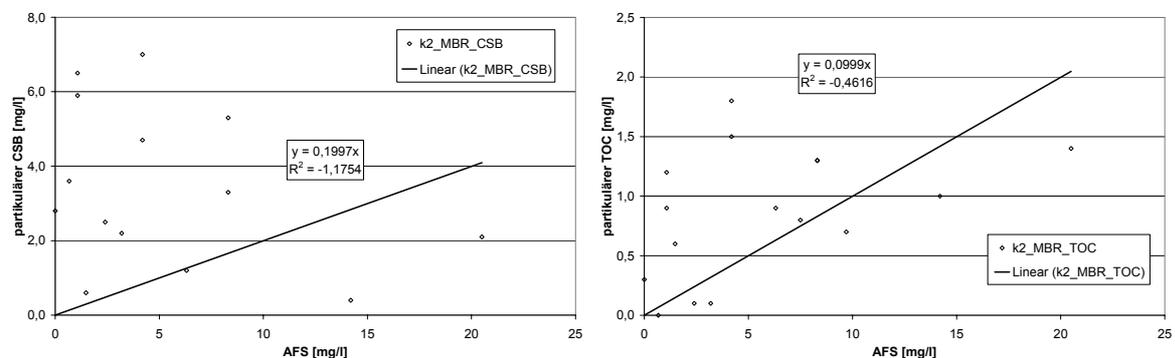
**Abbildung 5.53: Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen im Belebtschlamm der KA K2 (Bezug: 0,45 µm-Fraktion)**

Mit Ausnahme von papierfiltrierter CSB-Fraktion und 0,45 µm-CSB-Fraktion verhalten sich die Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen, linear zueinander. Der größte Unterschied tritt zwischen 0,2 µm und 0,1 µm auf (TOC: 7 %, CSB: 10 %).

CSB: 9 %). Unabhängig davon ist die Korrelation beim TOC zwischen papierfiltrierter Fraktion und 0,45 µm-Fraktion deutlich, was ein Indiz dafür ist, dass ein Zusammenhang beim CSB prinzipiell vorhanden ist, aber aufgrund der analytischen Methode nicht hervortritt. Ein Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC konnte sowohl für die Einzelproben, als auch bei Zusammenfassung aller Proben (Abbildung 5.55), aufgrund der geringen Konzentrationsunterschiede, nicht nachgewiesen werden.



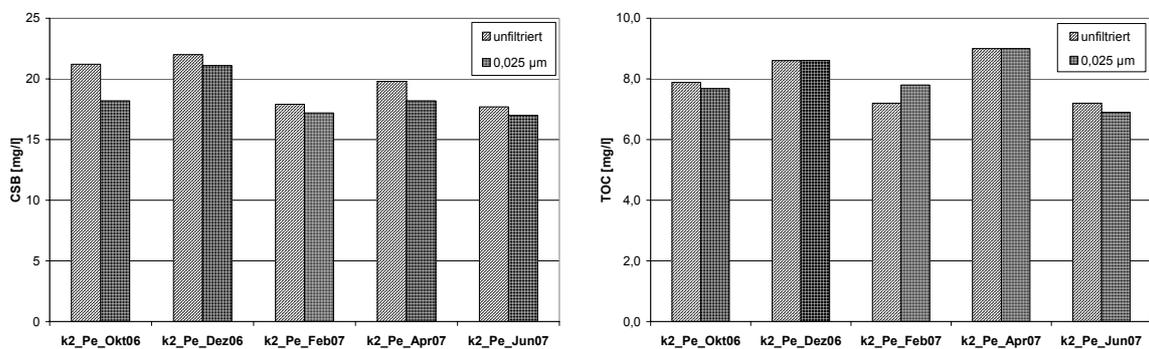
**Abbildung 5.54: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA K2**



**Abbildung 5.55: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben der KA K2**

### 5.1.2.5 Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Die Ablaufkonzentrationen waren relativ stabil und lagen im Untersuchungszeitraum bei 7...9 mg TOC/l bzw. 17...22 mg CSB/l (Abbildung 5.56). Die Unterschiede innerhalb der Fraktionen liegen im Bereich von Messfehlern. Die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen im Ablauf lagen bei < 5 mg BSB<sub>5</sub>/l, pH-Wert und Leitfähigkeit waren etwas höher als an der MBR-Probenahmestelle (Tabelle 5.13), was ggf. darauf zurückzuführen ist, dass die Permeatprobe aus dem Gesamtablauf der Kläranlage entnommen wurde.

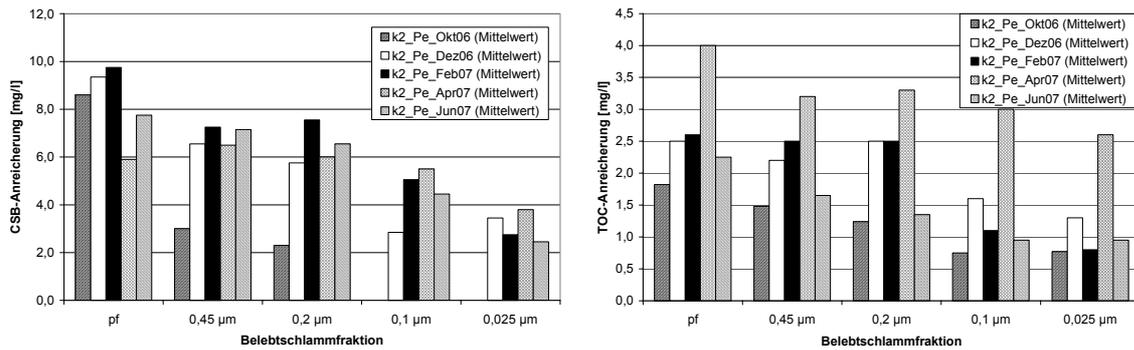


**Abbildung 5.56: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA K2**

**Tabelle 5.13: Permeatbeschaffenheit der KA K2**

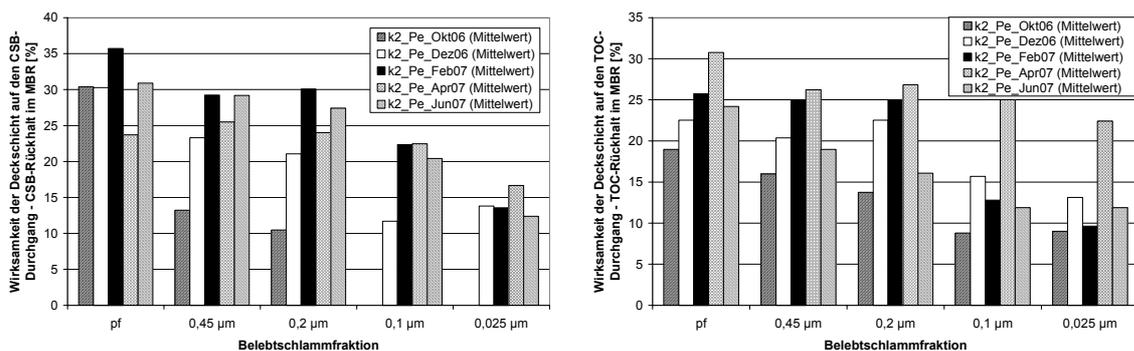
Probe	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	pH-Wert [-]	T [°C]	Leitfähigkeit [µS/cm]
10/06	< 5	7,3	16,2	1.403
12/06	< 5	7,3	13,2	1.314
02/07	< 5	7,0	11,4	1.229
04/07	< 5	7,2	15,4	1.420
06/07	< 5	7,2	20,1	1.336

Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen wurde für die Belebtschlammfraktionen mit dem Mittelwert aus der unfiltrierten und der über 0,025 µm filtrierten Permeatprobe berechnet. Die Differenzen zwischen dem Permeatmittelwert und den Fraktionen sind gering (Abbildung 5.57) und liegen für die membranfiltrierten Proben bei < 8 mg CSB/l und < 3,5 mg TOC/l. Die in Abschnitt 0 festgestellte TOC-Abweichung der Probe 04/07 tritt klar hervor.



**Abbildung 5.57: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA K2**

Der Verlauf der Proben zeigt einen Anstieg von der ersten Probe 10/06 zur darauf folgenden Probe 12/06 und ein Verharren der Proben 02/07, 04/07 und 06/07 auf dem Niveau der Probe 12/06. Der Anstieg der Anreicherung ist auf die einen Monat vor Beginn der Beprobung zurückliegende Intensivreinigung der Membranen zurückführbar. Mit Ausnahme der papierfiltrierten Fraktion sind die membranfiltrierten Fraktionen der Probe 10/06 deutlich geringer als die der folgenden Proben. Im Bereich des CSB war in diesem Fall keine Anreicherung unterhalb der 0,2 µm-Fraktion feststellbar, da die Konzentration im Permeat den Konzentrationen der 0,1 µm- und der 0,025 µm-Fraktion entsprach. Beim TOC war der Unterschied mit < 1 mg TOC/l vergleichsweise gering ausgeprägt.

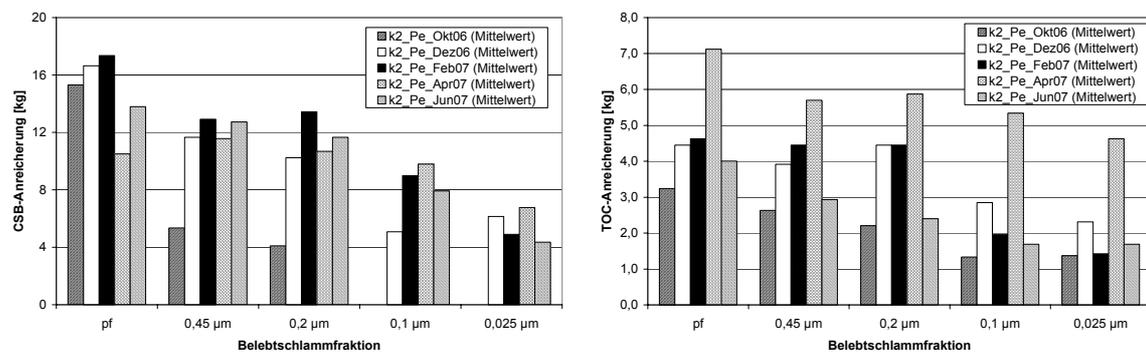


**Abbildung 5.58: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage K2**

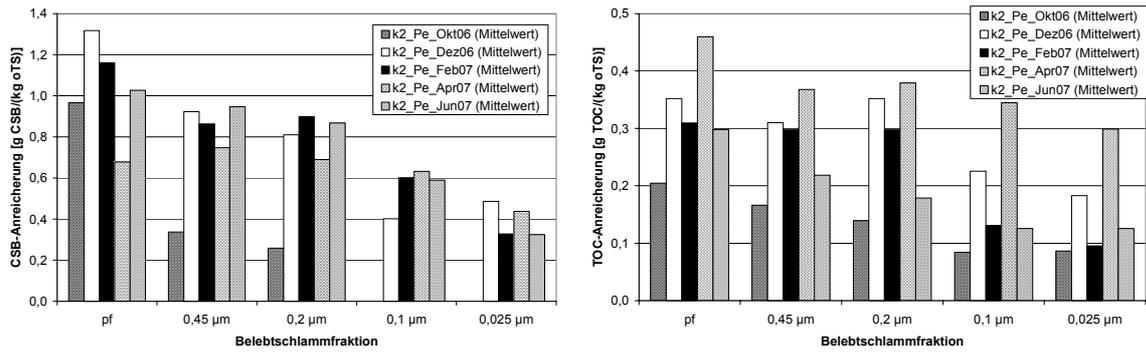
Unabhängig davon ist die Anreicherung von hochmolekularen organischen Stoffen in der Anlage K2 von geringem Ausmaß und bewegt sich insbesondere beim Vergleich mit der 0,025 µm-Fraktion an der Nachweisgrenze. Die sich im Betrieb ausbildende Deckschicht der Membran hat in jedem Fall eine Verengung des Porendurchmessers der Anlage von 0,1 µm auf < 0,025 µm zur Folge. Im Vergleich zur

0,45 µm-Fraktion bewirkt die Deckschicht, dass 25...30 % des CSB des membranfiltrierten Belebtschlamm (Abbildung 5.58) in der Anlage zurückgehalten werden, d. h. 75 % bzw. 70 % des 0,45 µm-membranfiltrierten CSB passieren die Membran, was in etwa auch auf die 0,2 µm-Fraktion zutrifft. Der Rückhalt im Hinblick auf die 0,1 µm- bzw. 0,025 µm-Fraktion liegt sowohl für TOC als auch für CSB bei rd. 10 %.

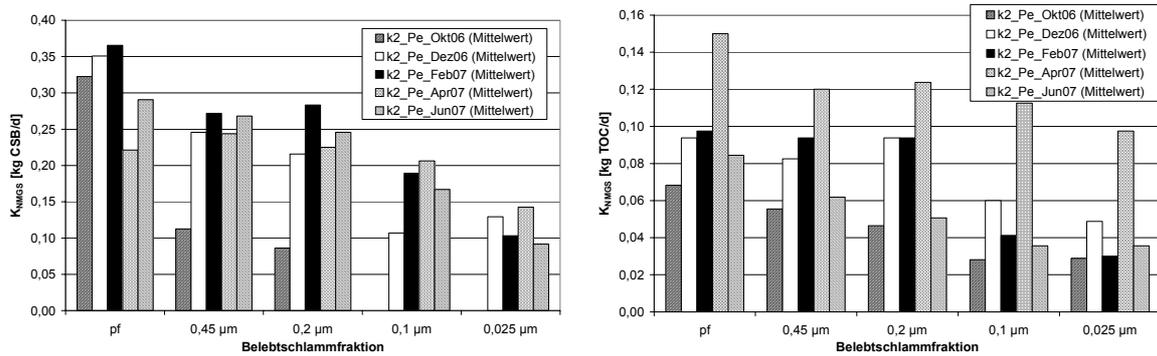
Im Zuge des täglichen Überschussschlammabzugs und der Zwischenreinigung der Membranen stellt sich ein Gleichgewicht zwischen im System angereicherter und mit dem ÜSS ausgetragener CSB bzw. TOC ein. Aufgrund der ähnlichen Charakteristik der Belebtschlammfraktionen war die angereicherte Fracht der einzelnen Fraktionen mit Ausnahme der Probe 10/06 in etwa gleich hoch (Abbildung 5.59, Abbildung 5.60, Tabelle 5.14, Tabelle 5.15). Die Bildung nicht membranängiger Substanzen ( $K_{NMGS}$ ) beträgt unter Bezug auf das Schlammalter, in Abhängigkeit der Fraktionen, 0,1 kg CSB/d (0,025 µm) bis 0,25 kg CSB/d (Abbildung 5.59) oder, bezogen auf den oTS-Gehalt der Anlage, ohne Berücksichtigung der Probe 10/06, i. M. 18 mg CSB/(kg oTS·d) in der 0,45 µm-Fraktion und i. M. 8 mg CSB/(kg oTS·d) in der 0,025 µm-Fraktion (Abbildung 5.61, Abbildung 5.62, Tabelle 5.16, Tabelle 5.17).



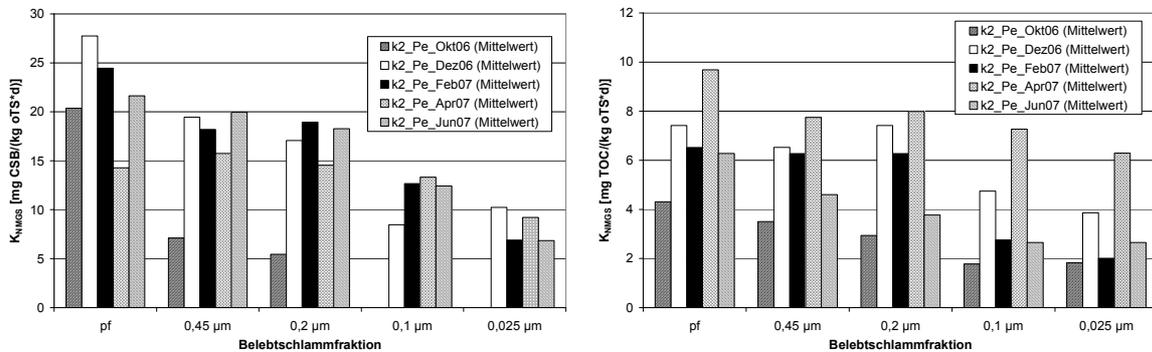
**Abbildung 5.59: Angereicherte Fracht in der KA K2 am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.60: Spezifische Anreicherung in der KA K2 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.61: Bildungsrate nicht membrängängiger Substanzen in KA K2**



**Abbildung 5.62: Spezifische Bildungsrate nicht membrängängiger Substanzen in KA K2**

**Tabelle 5.14: CSB-Anreicherung in der KA K2 (Mittelwerte der Proben 12/06, 02/07, 04/07, 06/07)**

	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	12,2	11,5	7,9	5,5
[g/(kg oTS)]	0,9	0,8	0,6	0,4

**Tabelle 5.15: TOC-Anreicherung in der KA K2 (Mittelwerte der Proben 12/06, 02/07, 04/07, 06/07)**

	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	4,2	4,3	3,0	2,5
[g/(kg oTS)]	0,30	0,30	0,21	0,18

**Tabelle 5.16: CSB-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in Kläranlage K2 (Mittelwerte der Proben 12/06, 02/07, 04/07, 06/07)**

	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg/d]	0,26	0,24	0,17	0,12
[mg/(kg oTS·d)]	18,3	17,2	11,7	8,3

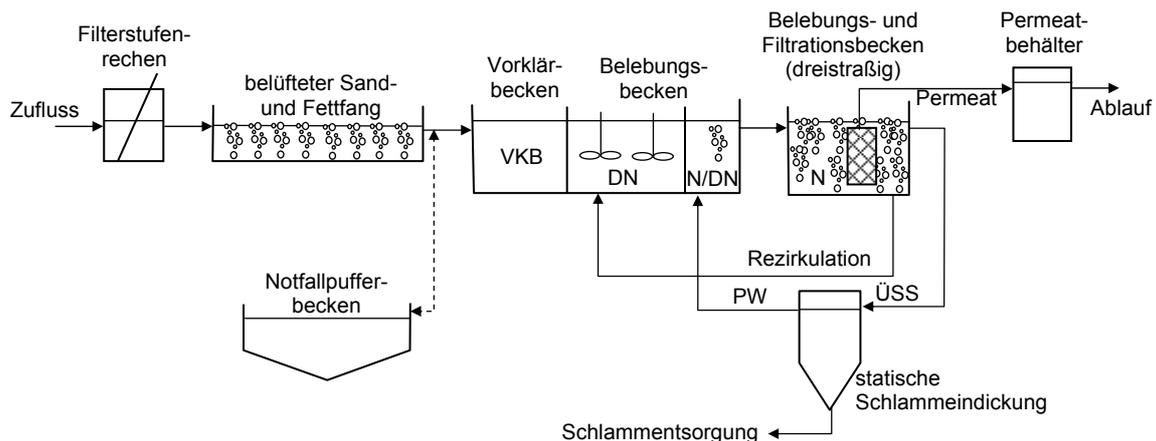
**Tabelle 5.17: TOC-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in Kläranlage K2 (Mittelwerte der Proben 12/06, 02/07, 04/07, 06/07)**

	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg/d]	0,09	0,09	0,06	0,05
[mg/(kg oTS·d)]	6,3	6,4	4,4	3,7

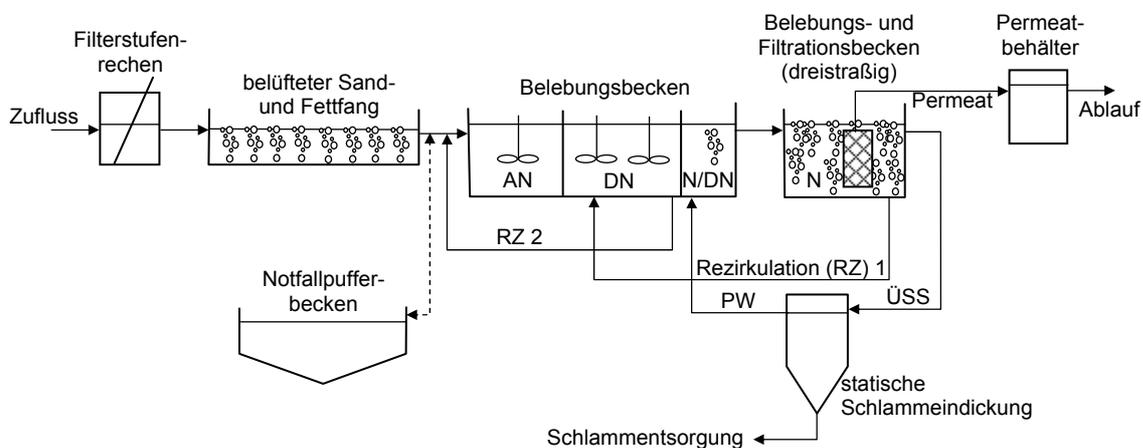
### 5.1.3 Anlage K3

#### 5.1.3.1 Anlagenbeschreibung

Die kommunale Kläranlage K3 (Abbildung 5.63, Abbildung 5.64, Inbetriebnahme 2004) war zum Zeitpunkt der Untersuchungen (10/2006...07/2007) bei einer Ausbaugröße von 10.500 EW mit rd. 8.000...8.500 EW belastet. Nennenswerte industrielle Einleiter waren nicht vorhanden. Das Einzugsgebiet ist im Trennsystem erschlossen. Der mittlere Zufluss zur Kläranlage betrug im Jahr 2005 rd. 1.820 m<sup>3</sup>/d, im Jahr 2006 rd. 1.610 m<sup>3</sup>/d. Die Kläranlage ist als simultane aerobe Schlammstabilisierungsanlage konzipiert. Das mittlere Schlammalter lag bei einem ÜSS-Abzug im Jahr 2005 von i. M. 42 m<sup>3</sup>/d bei 47 d; im Jahr 2006 erreichte es infolge eines geringeren ÜSS-Abzugs von i. M. 32 m<sup>3</sup>/d rd. 62 d. Der ÜSS-Abzug an den Untersuchungstagen entsprach einem Schlammalter von 24...60 d.



**Abbildung 5.63: Vereinfachte schematische Darstellung der KA K3 mit Vorklärbeckenbetrieb**



**Abbildung 5.64: Vereinfachte schematische Darstellung der KA K3 (Bio-P)**

Die Kläranlage verfügt über ein variabel nutzbares Becken ( $580 \text{ m}^3$ ) im Innenring eines Kreisringbeckens, das zur Vorklärung des Abwassers oder als Anaerobbecken zur biologischen P-Elimination genutzt werden kann (Abbildung 5.66, Abbildung 5.67). Während der Beprobungstage war das Becken entweder nicht in Betrieb oder wurde als Vorklärbecken (Abbildung 5.67) eingesetzt.

Die mechanische Reinigungsstufe umfasst eine zweistraßig ausgeführte Rechenanlage (Filterstufenrechen, Spaltweite: 3 mm), einen kombinierten und belüfteten Sand- und Fettfang (Abbildung 5.65) und ein zuschaltbares Vorklärbecken (Abbildung 5.67). Zusätzlich steht für Störfälle ein Notfallpufferbecken ( $420 \text{ m}^3$ ) zur Verfügung.

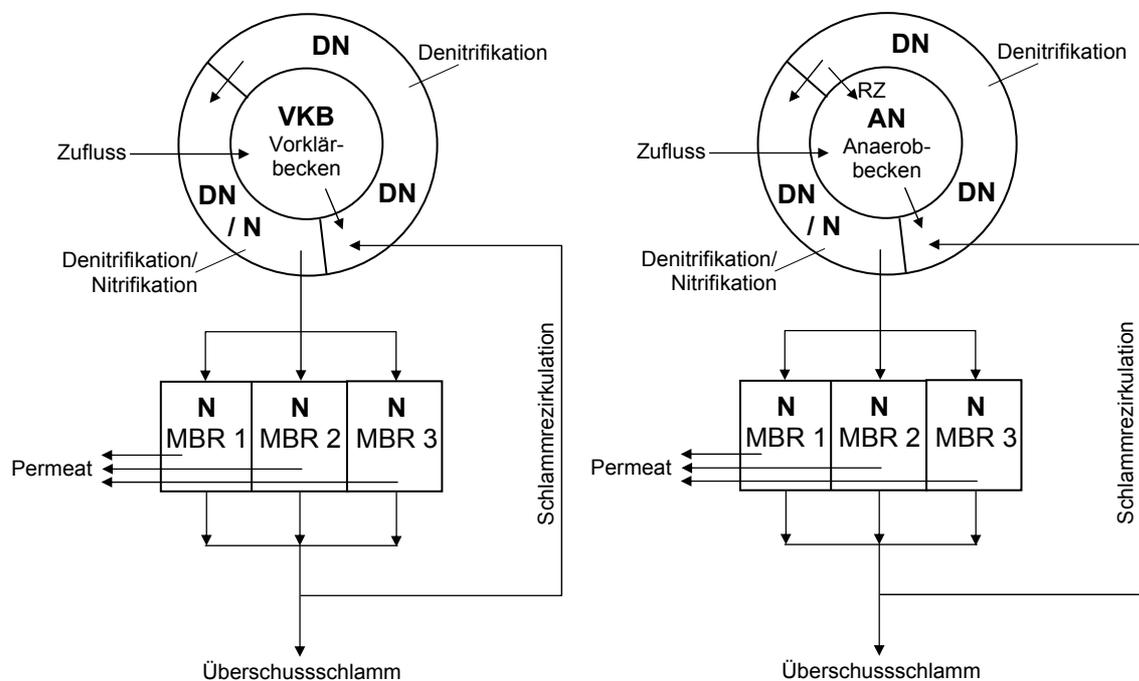


**Abbildung 5.65: Mechanische Reinigungsstufe der Anlage K3 (links: Rechenanlage, rechts: Sand- und Fettfang)**

Die biologische Behandlungsstufe besteht aus einem sich im Außenring eines Kreisringbeckens befindenden Bereiches zur vorgeschalteten Denitrifikation ( $800 \text{ m}^3$ ), mit einem darauf folgenden variabel zur Nitrifikation oder Denitrifikation einsetzbaren Beckens ( $400 \text{ m}^3$ ) (Abbildung 5.66, Abbildung 5.67). Daran schließt sich eine nitrifizierende dreistraßige Membranbelebungsstufe (Abbildung 5.66, Abbildung 5.68) mit einem Gesamtvolumen von  $780 \text{ m}^3$  ( $260 \text{ m}^3/\text{Straße}$ ) an. Das Rezirkulationsverhältnis liegt bei 2...4. Vom Volumen der vorgeschalteten Denitrifikationsstufe sind aufgrund der Sauerstoffverschleppung aus den Membranbelebungsbecken  $600 \text{ m}^3$  wirksam. Im Ablauf des DN-Beckens befindet sich eine Fällmitteldosierstation zur Dosierung von Aluminiumchlorid zur P-Fällung. Der Überschussschlamm wird aus den Membranbelebungsbecken abgezogen und in zwei statische Eindicker ( $V = 2 \cdot 100 \text{ m}^3$ , kein Einsatz von FHM) gepumpt. Das Prozesswasser wird im Regelfall nachts automatisch aus den Behältern in den N/DN-Bereich des Kreisringbeckens gepumpt; eine Erfassung des Prozesswasseranfalls

findet nicht statt. Der eingedickte ÜSS wird mehrfach wöchentlich per LKW auf im Umfeld liegende Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung abgefahren.

Die dreistraßig angelegte Nitrifikationsstufe dient gleichzeitig als Membranfiltrationseinheit. Jede Membranstraße besteht aus 13 Doppelstockmodulen (EK 400) der Fa. Kubota. Die Porengröße beträgt  $0,4 \mu\text{m}$ , die installierte Membranfläche  $12.480 \text{ m}^2$  ( $4.160 \text{ m}^2/\text{Straße}$ ). Der Abzug des Permeats kann aufgrund des Höhenunterschiedes zwischen Membranstraßen und Ablauf im Gravity-Flow-Betrieb erfolgen; bedarfsweise ist die Zuschaltung von Permeatpumpen möglich. Ein Teil des Permeats wird zu Reinigungsarbeiten in einem Filtratvorlagebehälter ( $100 \text{ m}^3$ ) zwischengespeichert.



**Abbildung 5.66: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage K3 (links: Vorklärbeckenbetrieb, rechts: Bio-P)**

Die Membranmodule werden zwei- bis dreimal jährlich mit Wasserstoffperoxid unter Zusatz von Natriumhypochlorit gereinigt. Im Normalbetrieb wird keine Reinigung durchgeführt. Im Untersuchungszeitraum wurde 11/06 eine Reinigung aller Membranstraßen zwischen der ersten und zweiten Probenahme vorgenommen sowie 05/07 nach der dritten Probenahme in Straße 2 und 3 und 07/07 zum Zeitpunkt der Probenahme in Straße 1.



**Abbildung 5.67: Mechanische Abwasserbehandlung im Innenring des Kreisringbeckens und erster Stufe der biologischen Behandlung im Außenring**



**Abbildung 5.68: Membranbelebungsstufe der KA K3 mit abgedeckten Becken**

### 5.1.3.2 Probenahme

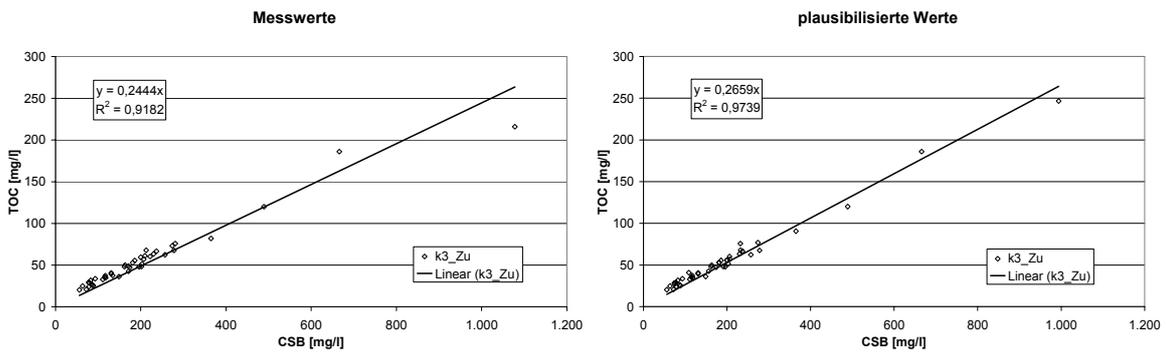
Die Anlage K3 wurde im Abstand von 2 Monaten 10/06, 12/06, 03/07, 05/07 und 07/07 beprobt. Da das Vorklärbecken nicht im gesamten Untersuchungszeitraum in Betrieb war, wurden die Proben als qualifizierte Stichproben aus dem Ablauf des Sand- und Fettfangs entnommen, die Belebtschlammproben als Stichproben aus allen Membranbelebungsbecken, insofern keine Reinigung durchgeführt wurde, die Permeatproben ebenfalls als Stichproben aus dem Ablauf der Kläranlage. Eine Möglichkeit, eine Probe des Prozesswassers an den Untersuchungstagen den Schlammstapelbehältern zu entnehmen, bestand aufgrund der automatischen Betriebsweise (Befüllen, Absetzen, Trübwasserabzug) nicht. Zum Zeitpunkt der Probenahme fand mit Ausnahme der Probe 03/07 keine Prozesswassereinleitung in die ABA statt.

### 5.1.3.3 Zuflussfraktionierung

Während der Probenahme lagen 10/06 und 07/07 Trockenwetterbedingungen vor, 12/06 und 05/07 Mischwasserbedingungen, der Probe 03/07 war ein Niederschlagsereignis vorausgegangen. Der Einfluss der Wetterbedingungen auf die entnommenen Proben war vergleichsweise gering (Tabelle 5.18, Abbildung 5.71). Einige vor Ort bestimmte Abwasserkenwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die CSB-, BSB<sub>5</sub>- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 5.18 dargestellt. Die pH-Werte lagen im für kommunales Abwasser typischen leicht basischen Bereich. Das TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,24 (CSB/TOC = 4,2), nach der Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) bei 0,27 (CSB/TOC = 3,8) (Abbildung 5.5).

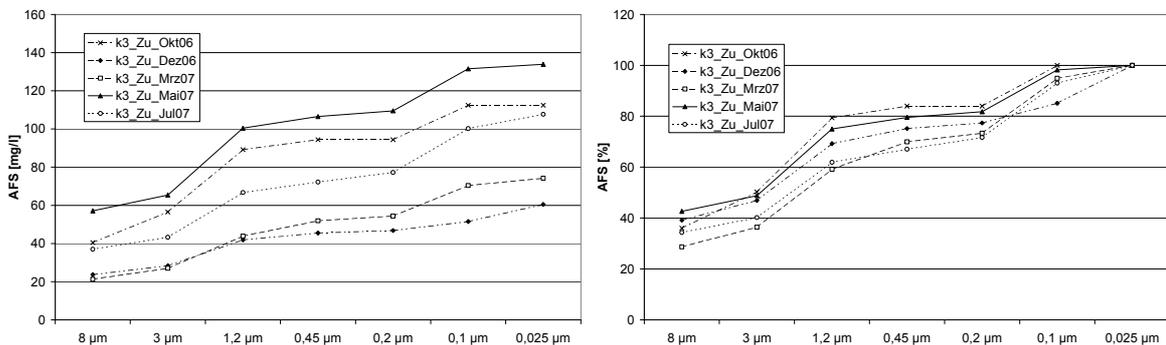
**Tabelle 5.18: Charakterisierung des Zuflusses zur KA K3**

Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unfiltr.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[µS/cm]	[-]	[°C]
10/06	388	1.078	210	866	1.138	8,2	15,7
12/06	89	281	84,3	194	601	7,8	11,9
03/07	190	489	118	307	n. b.	7,8	10,2
05/07	363	994	196	554	1.006	8,1	13,6
07/07	232	666	117	302	826	7,8	16,4



**Abbildung 5.69: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA K3**

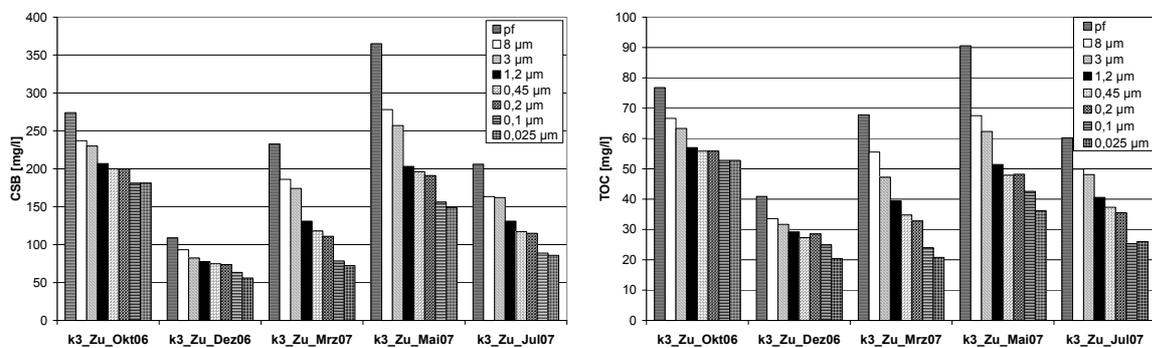
In Abbildung 5.70 ist die Änderung der abgeschiedenen partikulären Substanzen als AFS im Bereich 8 µm bis 0,025 µm dargestellt. Die absoluten Werte zeigen kein einheitliches Bild, lassen aber auf einen ähnlichen Verlauf schließen, der sich beim Vergleich der relativen Werte, unabhängig von den Zuflussbedingungen, einstellt. Der Unterschied innerhalb einer Fraktion beträgt rd. 15...20%.



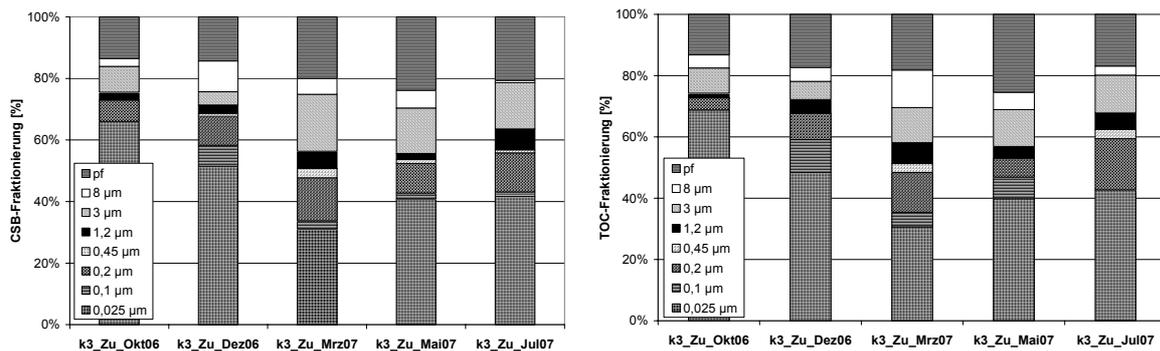
**Abbildung 5.70: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage K3**

Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.71, Abbildung 5.72). Die 8 µm-Fraktion liegt rd. 15...20 % unterhalb der nach der Filtration über Papierfilter analysierten TOC- bzw. CSB-Konzentra-

tionen. Die Breite der 8  $\mu\text{m}$ -Fraktion beträgt  $< 5 \dots 10 \%$  und geht beim Vergleich der CSB- und TOC-Analysen der separaten Proben teilweise in die 3  $\mu\text{m}$ -Fraktion über. Die 3  $\mu\text{m}$ -Fraktion liegt beim TOC bei rd.  $5 \dots 15 \%$ , beim CSB reicht sie bis zu  $20 \%$ . In der Summe sind 3  $\mu\text{m}$ - und 8  $\mu\text{m}$ -Fraktion der einzelnen Proben etwa gleich groß. Die Unterschiede sind den Analysemethoden und dem höheren Fehlerbereich beim CSB zuzuschreiben. Die 1,2  $\mu\text{m}$ -Fraktion ist in allen Proben beim TOC und CSB in etwa gleich ausgebildet ( $\sim 5 \%$ ). Dagegen ist die 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion beim TOC nahezu nicht nachweisbar, beim CSB mit  $< 2,5 \%$ . Im Gegensatz dazu ist die 0,2  $\mu\text{m}$ -Fraktion deutlich ausgeprägt ( $5 \dots 20 \%$ ). Die Summe aus 1,2  $\mu\text{m}$ , 0,45  $\mu\text{m}$  und 0,2  $\mu\text{m}$ -Fraktion liegt bei  $10 \dots 25 \%$  der papierfiltrierten Konzentrationen.



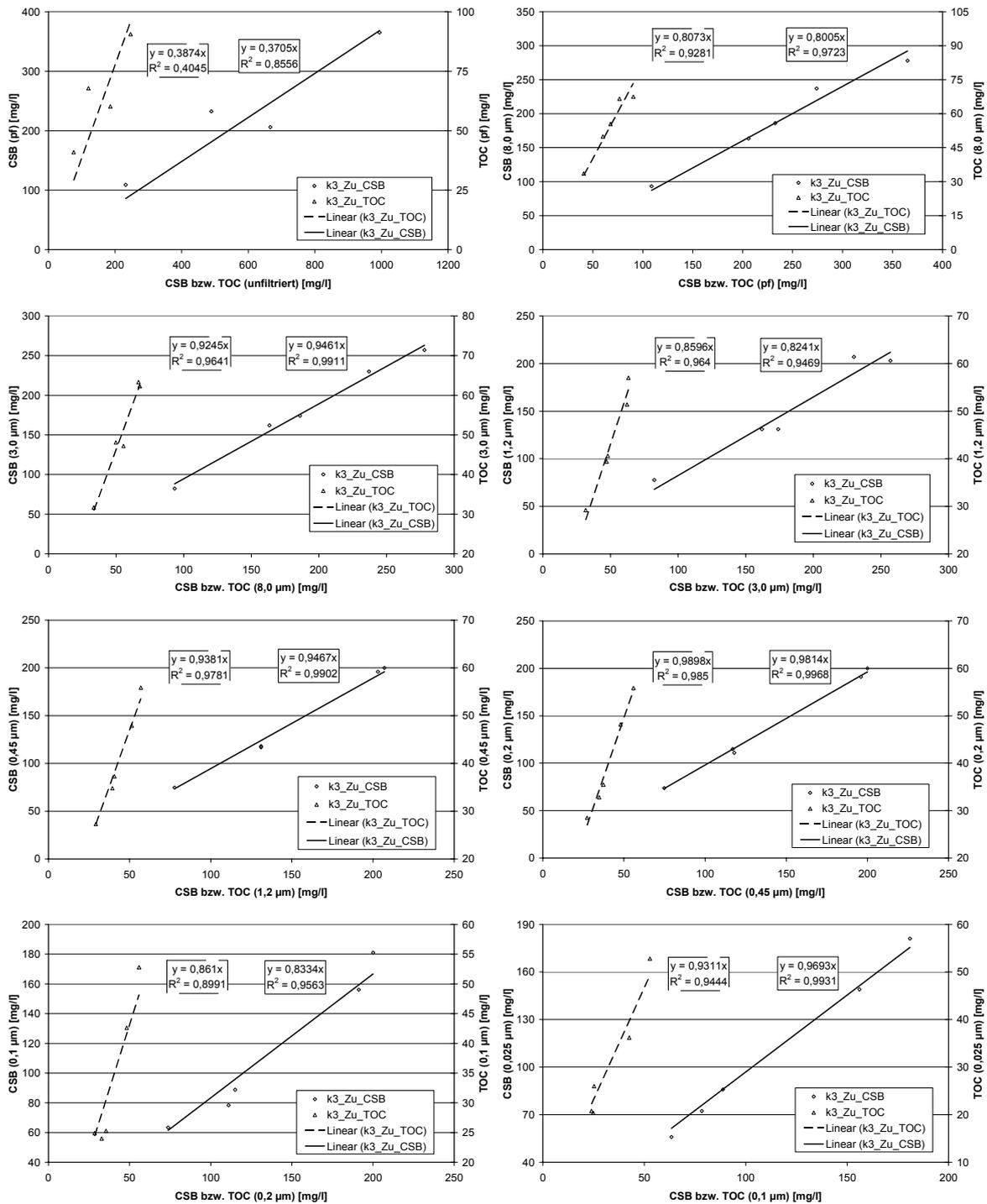
**Abbildung 5.71: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage K3**



**Abbildung 5.72: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage K3 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

Zwischen der 0,2  $\mu\text{m}$ - und der 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion sind nur geringe Unterschiede erkennbar, die ggf. auf Fehler bei der Analyse oder der Aufbereitung der Proben im Zuge der Fraktionierung zurückzuführen sind. Zwischen der 0,1  $\mu\text{m}$ - und 0,025  $\mu\text{m}$ -Fraktion treten teilweise Unterschiede von bis zu  $10 \%$  auf. Im Vergleich zur papierfiltrierten Probe nimmt die 0,025  $\mu\text{m}$ -Fraktion einen großen Anteil ein, weist

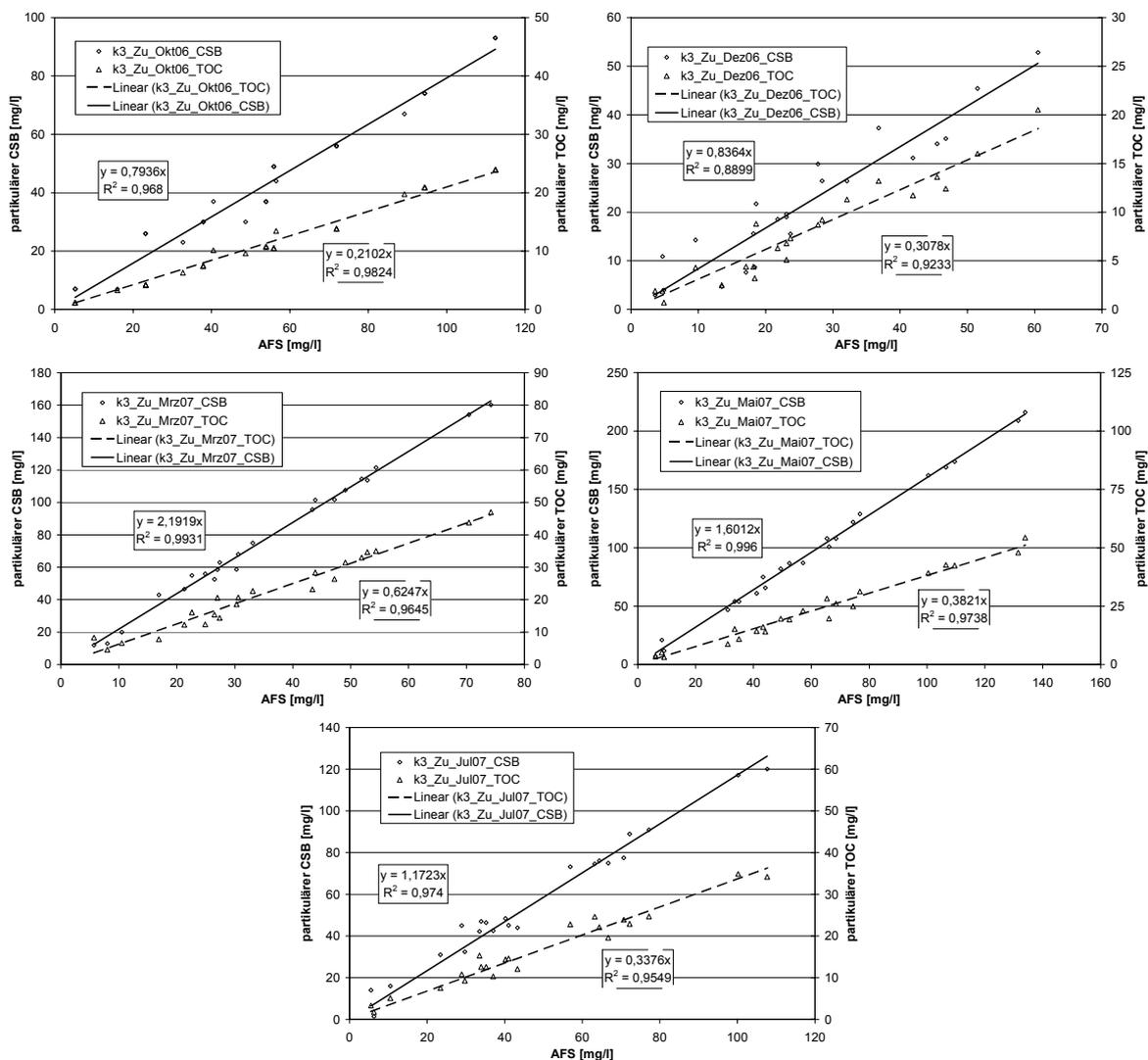
aber auch eine relativ breite Streuung im CSB und im TOC von 30...70 % auf. Wird die in der Abwassertechnik gebräuchliche 0,45 µm-Fraktion als Bezugswert für membranfiltrierte Proben gewählt, so sind mindestens 65 % (65...95 %) des 0,45-µm Durchgangs kleiner als 0,1 µm und mindestens 60 % (60...95 %) des 0,45-µm Durchgangs kleiner als 0,025 µm (Abbildung 5.72).



**Abbildung 5.73: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K3**

Die größten Änderungen der Konzentrationen treten zwischen der papierfiltrierten und der 8 µm-Probe (CSB und TOC rd. 20 %), zwischen 3 µm- und 1,2 µm-Fraktion (CSB rd. 18 %, TOC rd. 14 %) und zwischen der 0,2 µm- und 0,1 µm-Fraktion (CSB rd. 17 %, TOC rd. 14 %) auf (Abbildung 5.73).

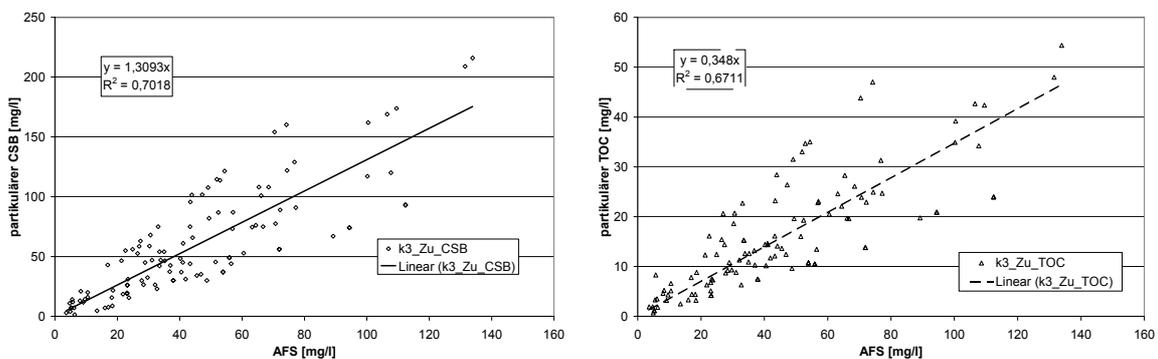
Die lineare Abhängigkeit aller Fraktionen deutet darauf hin, dass die Abwasserbeschaffenheit homogen ist und nur durch die Verdünnung mit Fremdwasser, d. h. Niederschlagswasser beeinflusst wird. Die Bestimmung von partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC und deren Korrelation mit den AFS führte bei allen untersuchten Proben zu einer linearen Abhängigkeit (Abbildung 5.74).



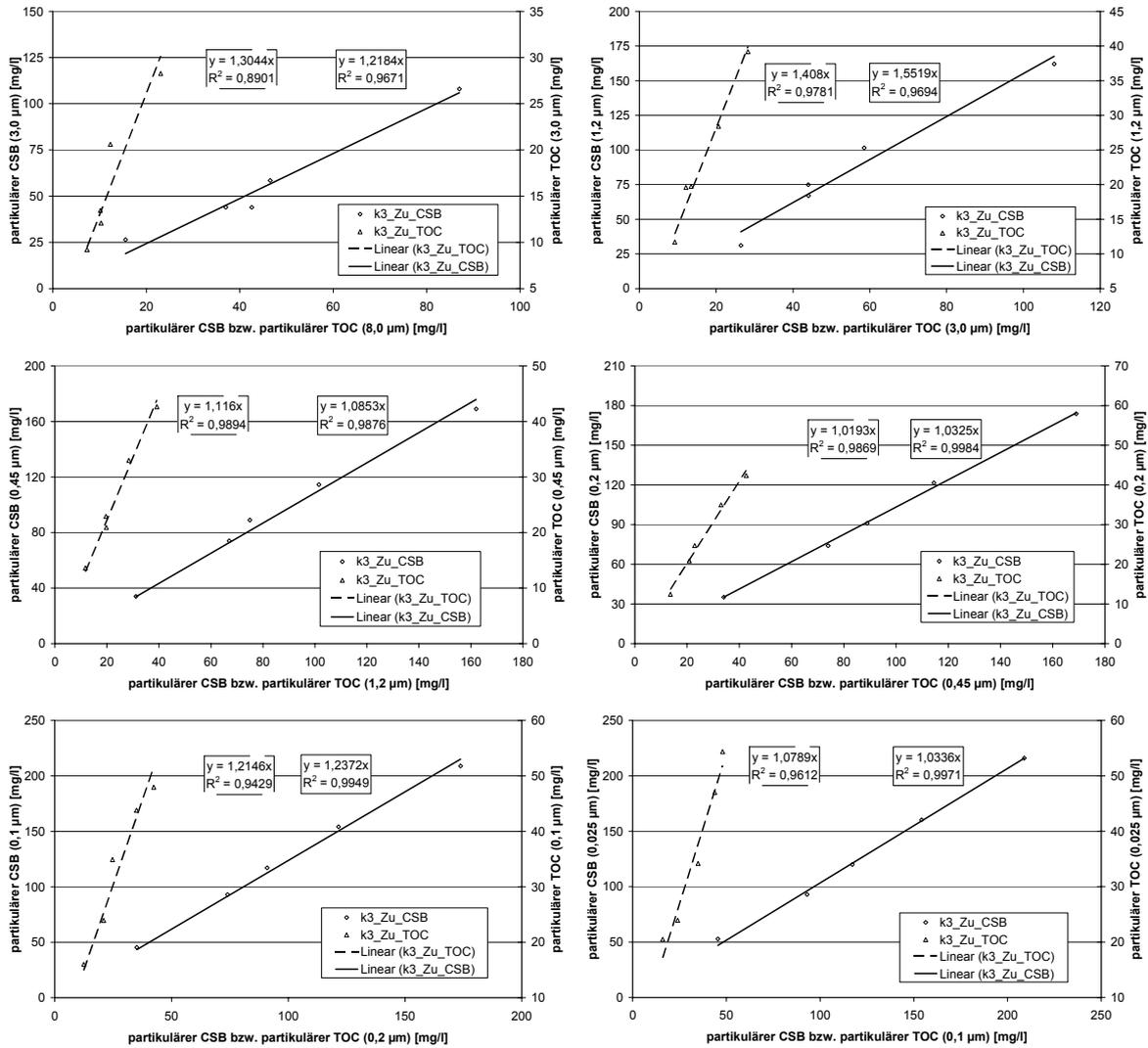
**Abbildung 5.74:** Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der Anlage K3

Während sich in den einzelnen Proben eine klare Korrelation zwischen partikulärem CSB bzw. TOC und AFS abzeichnet, ist dies bei der zusammenfassenden Darstellung aller Werte nicht der Fall (Abbildung 5.75). Jeweils die Anstiege der ersten beiden Proben und die der letzten beiden Proben sind ähnlich. Ein Zusammenhang mit Trocken- oder Mischwasserbedingungen ist nicht nachweisbar. Möglicherweise ist das Verhältnis der partikulären organischen Substanzen zu den AFS jahreszeitlich bedingten Änderungen unterworfen. Das Einzugsgebiet der KA K3 ist zwar im Trennsystem erschlossen, nach Aussage des Betriebspersonals tritt aber in der ersten Jahreshälfte ein signifikanter Anstieg des Kläranlagenzuflusses auf, der aller Wahrscheinlichkeit nach durch den Eintrag von Fremdwasser verursacht wird. Für eine gesicherte Aussage sind weitere Untersuchungen erforderlich.

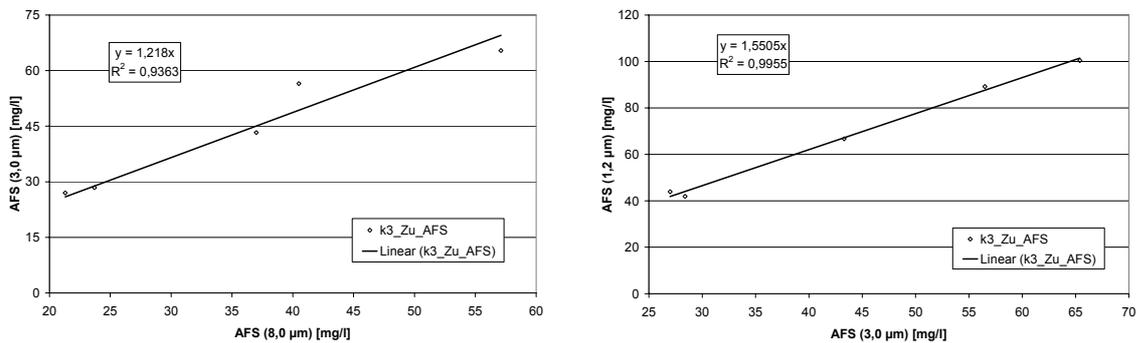
Ein Einfluss auf die relative Änderung von partikulärem CSB und TOC ist nicht nachweisbar. Unabhängig vom organischen Anteil der AFS zeigt der Vergleich der Änderung des partikulären CSB sowie des partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen mit den zu diesen Fraktionen gehörenden eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung der Anstiege aller drei Parameter (Abbildung 5.76, Abbildung 5.77, Abbildung 5.78).



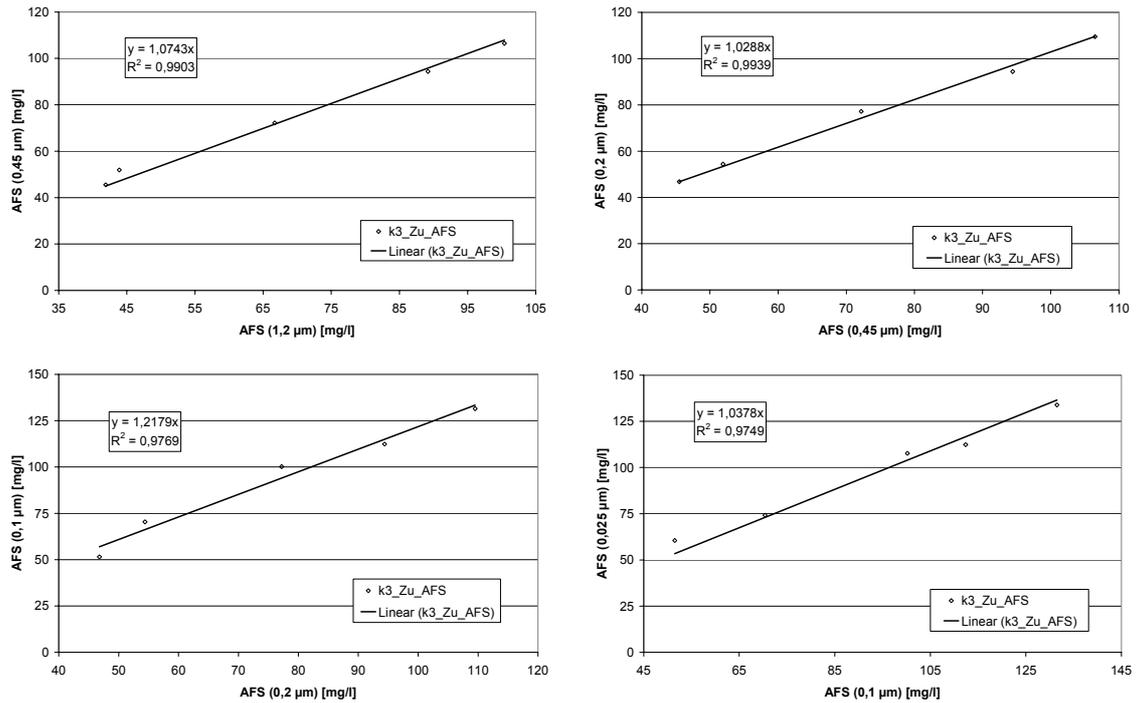
**Abbildung 5.75: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der Anlage K3 (Zusammenfassung alle Proben)**



**Abbildung 5.76: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage K3**



**Abbildung 5.77: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K3**



**Abbildung 5.78: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K3 (Fortsetzung)**

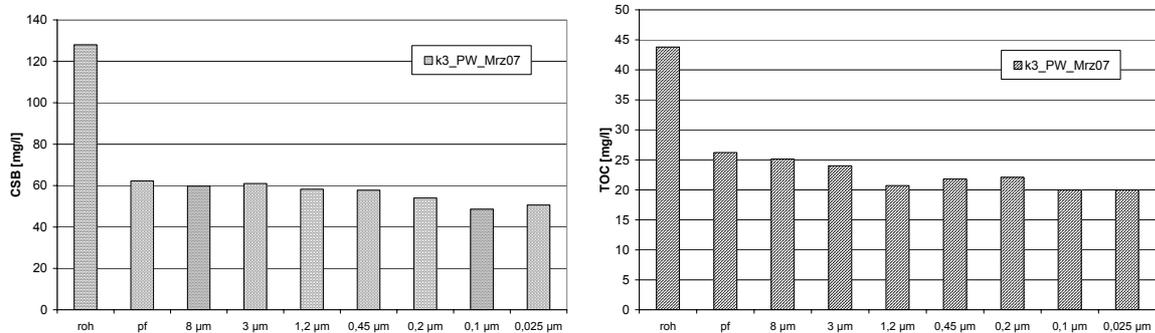
### 5.1.3.4 Fraktionierung des Prozesswassers

Es wurde eine Prozesswasserprobe analysiert (vgl. Abschnitt 5.1.3.2). Das CSB/BSB<sub>5</sub>-Verhältnis der unfiltrierten Probe beträgt rd. 1,9. Der AFS-Anteil der unfiltrierten Probe ist im Gegensatz zu den filtrierten Proben vergleichsweise hoch (Tabelle 5.19, Abbildung 5.80).

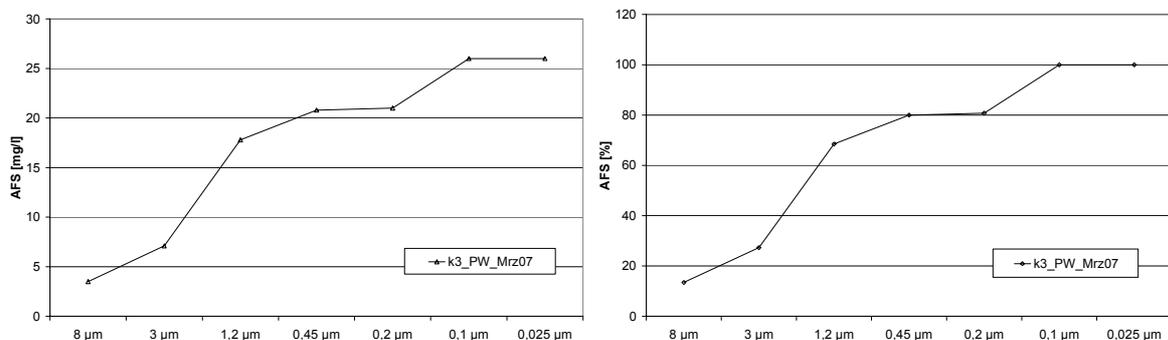
**Tabelle 5.19: Beschaffenheit des Prozesswasser der KA K3**

Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unfiltr.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[μS/cm]	[-]	[°C]
03/07	69	128	57,8	81	620	7,2	10,5

Es ist eine schwach ausgeprägte Fraktionierung erkennbar (Abbildung 5.79). Der größte Teil des papierfiltrierten Prozesswassers mit rd. 75...80 % des TOC bzw. CSB liegt gelöst mit einer Partikelgröße von weniger als 0,025 μm vor. Mit Bezug zur unfiltrierten Probe liegen aufgrund des hohen AFS-Anteils rd. 50...60 % des CSB und TOC partikulär vor.



**Abbildung 5.79: CSB- und TOC-Fraktionierung des Prozesswassers der KA K3**



**Abbildung 5.80: AFS im Prozesswasser der KA K3**

### 5.1.3.5 Fraktionierung des Belebtschlamm

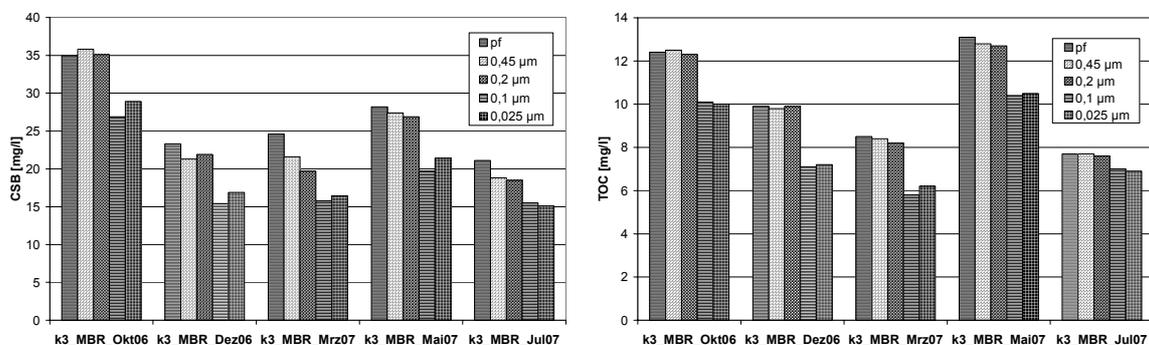
Der TS-Gehalt des Belebtschlamm der untersuchten Proben lag im Bereich von 11,5...13,3 g TS/l, der oTS-Gehalt zwischen 64 % TS und 67 % TS (Tabelle 5.12). Die temperaturnormierte Grundatmung ( $OVC_G + OVN_G$ ) lag im Bereich von 1,2...2,6 mg  $O_2/(g \text{ oTS} \cdot h)$  und damit im für stabilisierten Schlamm typischen Rahmen von  $< 5 \text{ mg } O_2/(g \text{ oTS} \cdot h)$ . Die Temperatur wies jahreszeitlich bedingte Schwankungen von 10,7 °C bis 18,5 °C auf. Die Leitfähigkeit war mit 415  $\mu\text{S/cm}$  bis 674  $\mu\text{S/cm}$  relativ stabil; ebenso der pH-Wert mit 7,1...7,4.

**Tabelle 5.20: Kennwerte der biologischen Reinigungsstufe der KA K3**

Probe	TS	oTS	oTS	Atmung $OVC_G + OVN_G$	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg } O_2}{\text{g oTS} \cdot h}$	[-]	[°C]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]
10/06	13,1	8,7	66	2,6	7,1	18,5	668
12/06	13,3	8,9	67	1,3	7,4	12,9	415
03/07	12,1	7,9	65	1,2	7,3	10,7	n. b.
05/07	11,5	7,6	66	1,9	7,3	16,7	674
07/07	12,6	8,1	64	1,7	7,1	17,2	541

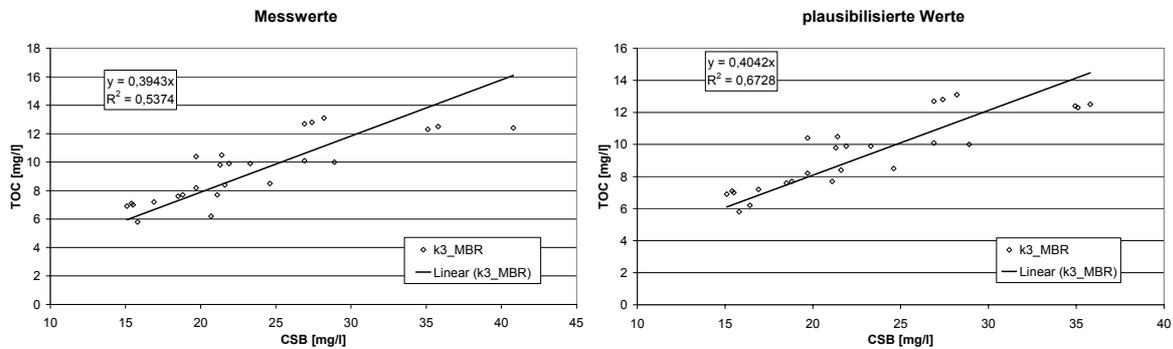
n. b. ... nicht bestimmt

Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlamm unterliegen einem mehr oder weniger ausgeprägten Verlauf, dessen Differenz beim Vergleich der 0,45  $\mu\text{m}$ - mit der 0,025  $\mu\text{m}$ -Fraktion etwa 4...7 mg CSB/l bzw. 1...3 mg TOC/l beträgt (Abbildung 5.81).



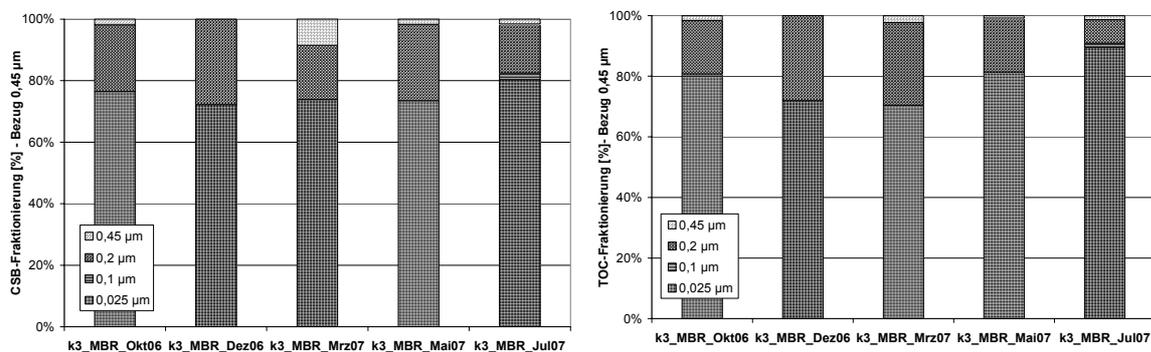
**Abbildung 5.81: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlamm der KA K3**

Das TOC/CSB-Verhältnis aller Proben liegt bei 0,39 bzw. CSB/TOC bei 2,7 (Abbildung 5.82). Nach Korrektur von jeweils einem Wert der Probe 12/06 und 03/07 mit dem am selben Tag aufgetretenen TOC/CSB-Verhältnis liegt das allgemeine TOC/CSB-Verhältnis bei 0,40 bzw. CSB/TOC bei 2,5 (Abbildung 5.82).

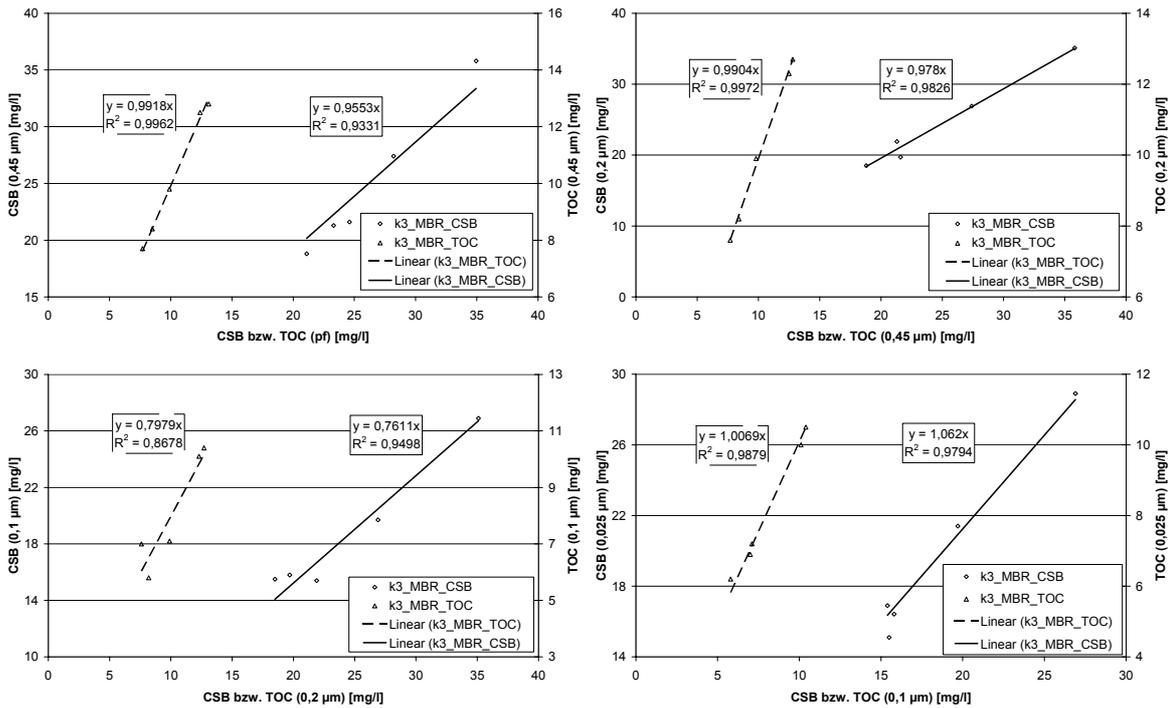


**Abbildung 5.82: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes der KA K3**

Der überwiegende Teil des membranfiltrierten Belebtschlammes (0,45  $\mu\text{m}$ ) besteht zu 75...90 % aus Substanzen mit einer Größe von weniger als 0,025  $\mu\text{m}$  (Abbildung 5.83, Abbildung 5.84). Die 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion ist weitgehend identisch mit der 0,2  $\mu\text{m}$ -Fraktion; die 0,1  $\mu\text{m}$ -Fraktion weitgehend mit der 0,025  $\mu\text{m}$ -Fraktion. Die Unterschiede zwischen der Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen sind auf die verschiedenen Bestimmungsmethoden und deren spezifische Fehler zurückzuführen. Die CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen verhalten sich linear zueinander. Der größte Unterschied tritt zwischen 0,2  $\mu\text{m}$  und 0,1  $\mu\text{m}$  auf (TOC: 20 %, CSB: 24 %).

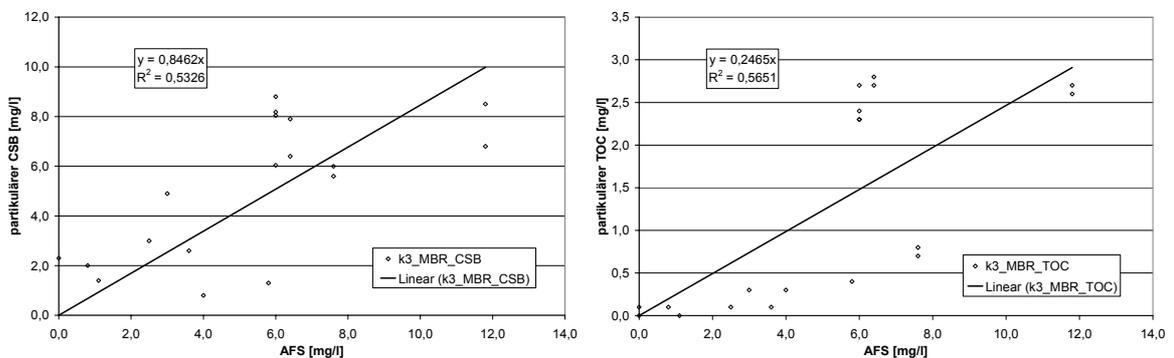


**Abbildung 5.83: Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen im Belebtschlamm der KA K3 (Bezug: 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion)**

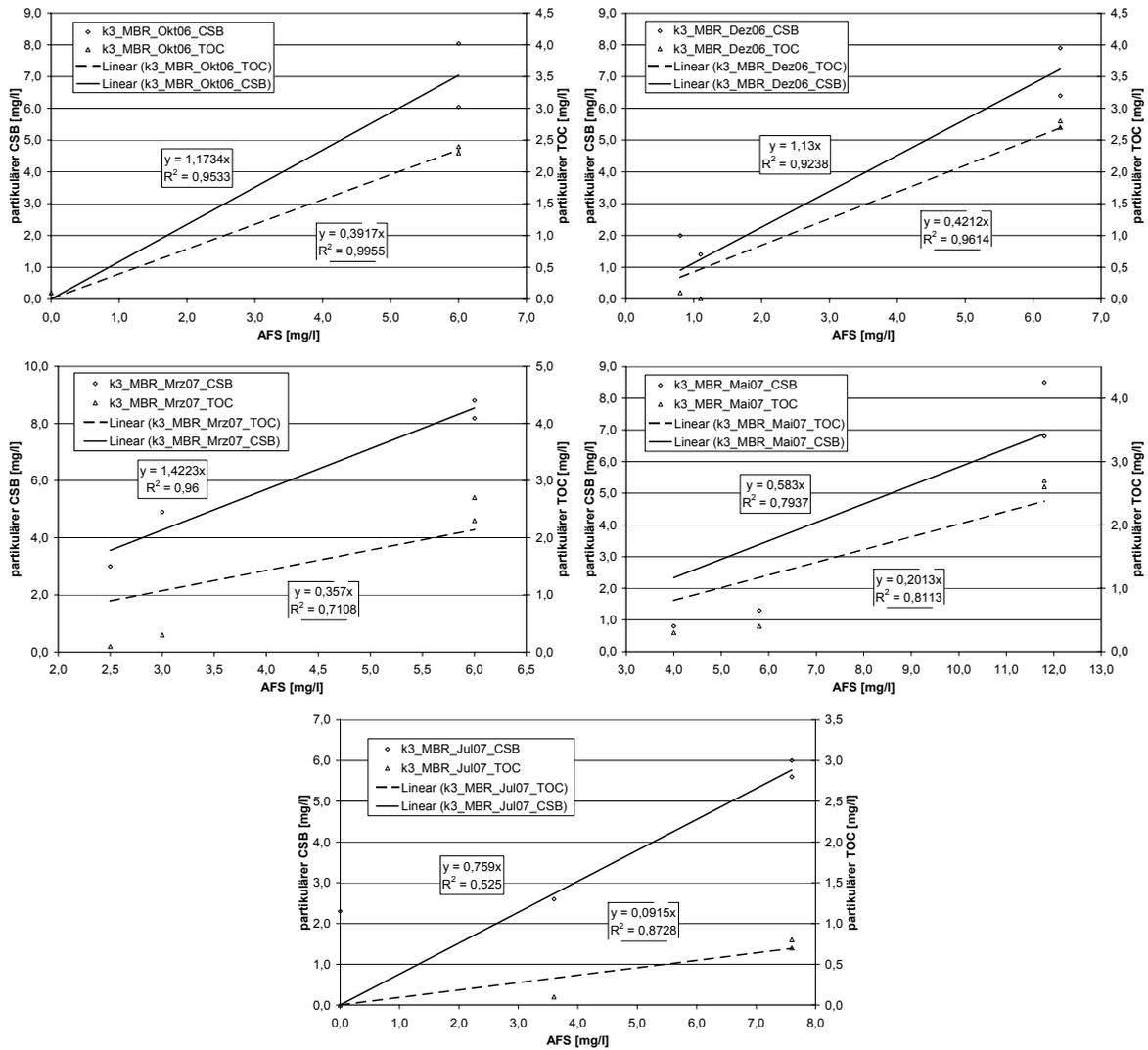


**Abbildung 5.84: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA K3**

Ein Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC konnte für die Einzelproben nachgewiesen werden, wobei die Korrelation davon beeinflusst wird, dass 0,45 µm- und 0,2 µm- sowie 0,1 µm- und 0,025 µm-Fraktion nahezu identisch sind. Es ist zu hinterfragen, inwieweit die in einigen Fällen praktisch anhand von zwei Werten ermittelte Korrelation belastbar ist (Abbildung 5.86). Die Zusammenfassung aller Proben (Abbildung 5.85) zeigt keinen signifikanten Zusammenhang.



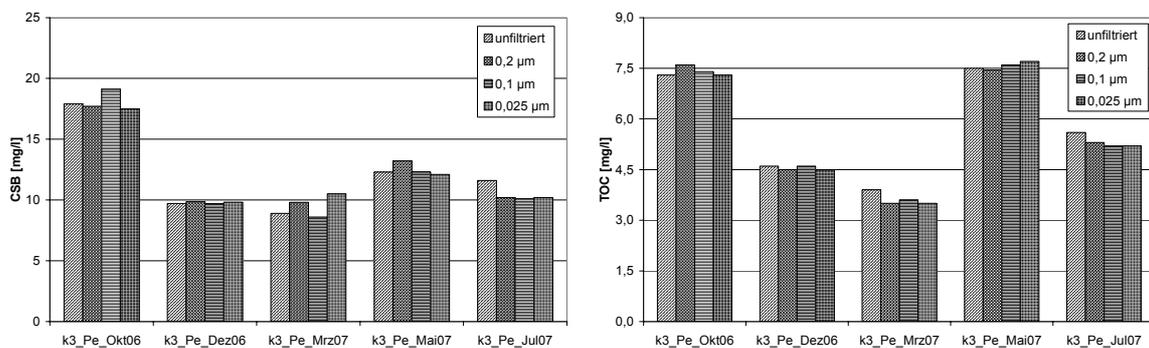
**Abbildung 5.85: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben der KA K3**



**Abbildung 5.86: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Belebtschlamm der KA K3**

### 5.1.3.6 Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Die CSB-Ablaufkonzentrationen der Proben 12/06 bis 07/07 waren relativ stabil und lagen im Untersuchungszeitraum bei  $< 13$  mg/l (Abbildung 5.87). Die TOC-Analysen zeigen eine höhere Variabilität, insbesondere Probe 05/07 ist signifikant höher als die Proben 12/06, 03/07, 07/07. Dieser Verlauf ist am CSB nicht in dieser Deutlichkeit erkennbar. Es ist anzunehmen, dass die Erhöhung beim TOC analytisch bedingte Ursachen hat. Dem entgegen sind sowohl CSB- als auch TOC-Konzentrationen der Probe 10/06 höher als bei den folgenden Proben. Die Unterschiede innerhalb der Fraktionen liegen im Bereich von Messfehlern. Die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen lagen bei  $< 5$  mg/l; pH-Wert und Leitfähigkeit entsprachen etwa den in den Membranreaktoren ermittelten Werten (Tabelle 5.21).



**Abbildung 5.87: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA K3**

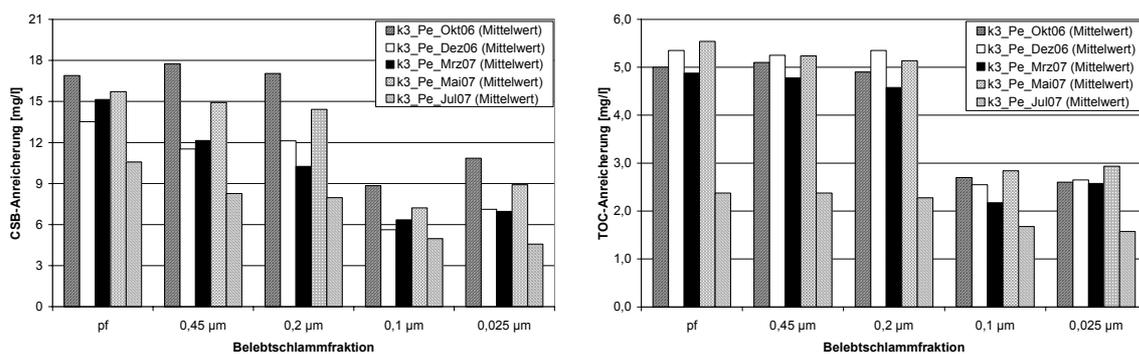
**Tabelle 5.21: Permeatbeschaffenheit der KA K3**

Probe	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	pH-Wert [-]	T [°C]	Leitfähigkeit [µS/cm]
10/06	< 5	7,3	18,3	673
12/06	< 5	7,5	12,4	437
03/07	< 5	7,2	10,7	n. b.
05/07	< 5	7,3	16,1	680
07/07	< 5	7,1	16,7	555

n. b. ... nicht bestimmt

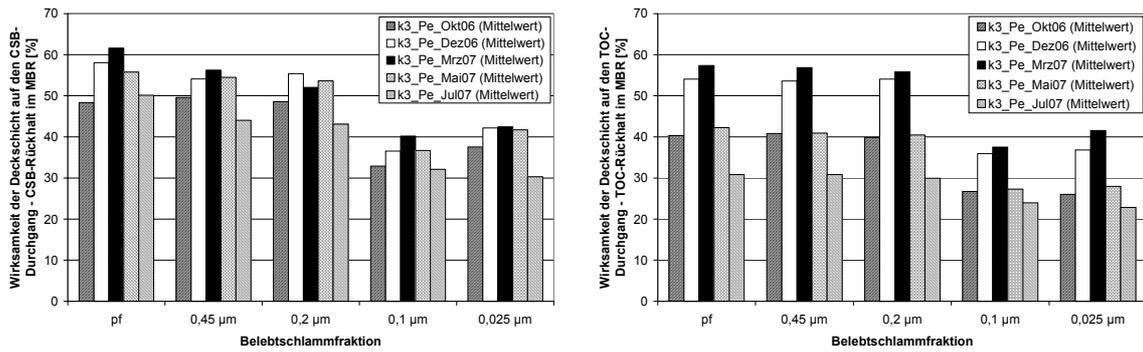
Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen wurde für die Belebtschlammfraktionen mit dem Mittelwert aller Permeatproben berechnet. Die Differenzen zwischen dem Permeatmittelwert und den Fraktionen sind z. T. deutlich (Abbildung 5.88). Der Effekt der Membranreinigung nach Probe 10/06 ist nur am

CSB nachvollziehbar. Eine Beeinflussung durch die am Tag der Probenahme 10/06 im Vergleich zu den übrigen Proben erhöhten Permeatkonzentrationen ist nicht ausgeschlossen, aber relativ gering. Der Belebtschlamm 10/06 wies ebenfalls höhere Konzentrationen in den filtrierten Fraktionen auf, so dass anzunehmen ist, dass es sich nicht um eine Anreicherung hochmolekularer Substanzen handelt, sondern um eine Erhöhung der CSB- bzw. TOC-Konzentrationen infolge eines geringeren Abbaus, die in der Folge mit dem Permeat ausgeschwemmt wurden. Die im Untersuchungszeitraum durchgeführte zweite Membranreinigung nach Probe 05/07 ist sowohl beim CSB als auch beim TOC deutlich sichtbar. Die verschiedenen Wirkungen der beiden erfassten Membranreinigungen können durch die 11/06 und 05/07 herrschenden unterschiedlichen Temperaturen beeinflusst worden sein. Im Zeitraum zwischen beiden Reinigungen ist ein leichter Anstieg der CSB-Konzentrationen erkennbar, beim TOC tritt keine signifikante Veränderung ein.



**Abbildung 5.88: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA K3**

Unabhängig vom beobachteten Ausmaß der Anreicherung hochmolekularer organischer Stoffe in Anlage K3 bewirkt die sich im Betrieb ausbildende Deckschicht der Membran an allen Untersuchungstagen eine Verengung des Porendurchmessers der Anlage von 0,4 µm auf < 0,025 µm. Beim Vergleich der 0,45 µm-Fraktion mit dem Permeat werden infolge der Deckschicht in Abhängigkeit des Zeitpunktes der letzten Membranreinigung 50...55 % des membranfiltrierten Belebtschlammes (Abbildung 5.89) zurückgehalten; im Fall der 0,025 µm-Fraktion 30 % bis 40 %. Dieser CSB bzw. TOC würde unter deckschichtfreiem Betrieb zu gleichen Teilen im Permeat und in der Anlage enthalten sein. Es werden neben der technisch bedingten (Porengröße der Membran; 0,4 µm) partikulären Fraktion oberhalb 0,4 µm, Substanzen angereichert, deren Partikelgröße mindestens bei 0,025 µm liegt.



**Abbildung 5.89: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage K3**

Eine Ausschleusung angereicherter Substanzen aus einer Membrananlage erfolgt durch Überschussschlammabzug. Aufgrund der halbjährlichen Membranreinigungen und der Einstellung eines Gleichgewichtes zwischen Anreicherung und Ausschleusung ist die Anreicherung in Anlage K3 relativ gleichmäßig ausgeprägt. Die Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen ( $K_{NMGS}$ ) beträgt unter Bezug auf das Schlammalter, in Abhängigkeit der Fraktionen, 0,2...0,5 kg CSB/d bzw. 0,08...0,15 kg TOC/d (Abbildung 5.90) oder, bezogen auf den oTS-Gehalt 28 mg CSB/(kg oTS·d) in der 0,45 µm-Fraktion und 13 mg CSB/(kg oTS·d) in der 0,025 µm-Fraktion (Abbildung 5.91, Tabelle 5.22, Tabelle 5.23).

**Tabelle 5.22: CSB-Anreicherung in der KA K3 (Mittelwerte aller Proben)**

	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	28,5	25,6	24,5	13,1
[g/(kg oTS)]	1,75	1,57	1,50	0,80

**Tabelle 5.23: TOC-Anreicherung in der KA K3 (Mittelwerte aller Proben)**

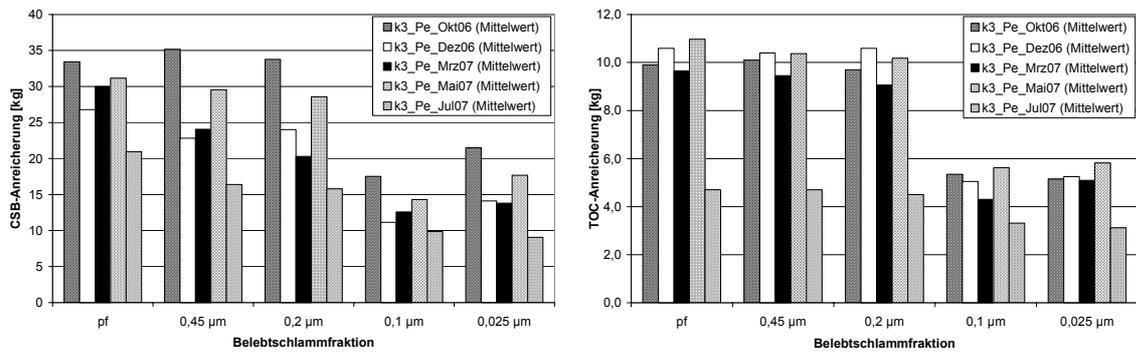
	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	9,2	9,0	8,8	4,7
[g/(kg oTS)]	0,56	0,55	0,54	0,29

**Tabelle 5.24: CSB-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen**

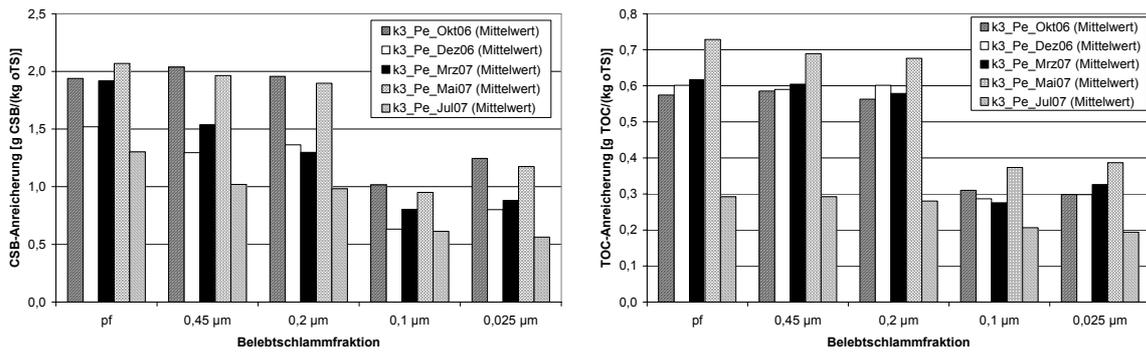
	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg/d]	0,46	0,41	0,39	0,21
[mg/(kg oTS·d)]	28	25	24	13

**Tabelle 5.25: TOC-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen**

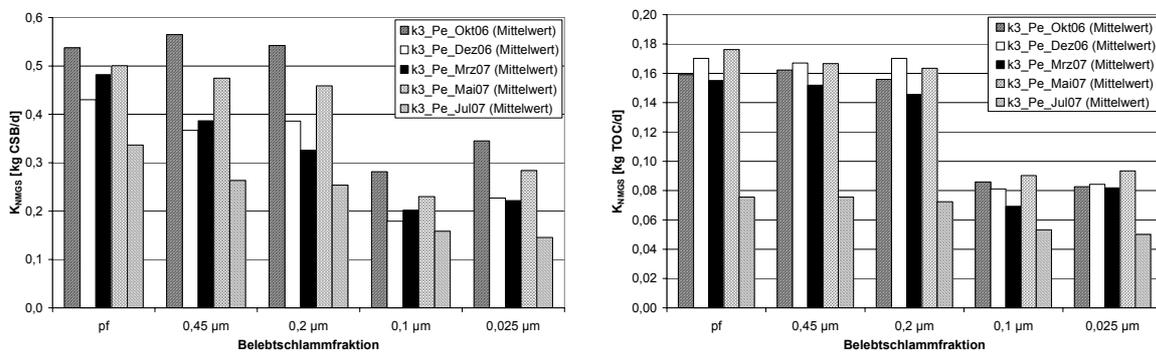
	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg/d]	0,15	0,14	0,14	0,08
[mg/(kg oTS·d)]	9,0	8,9	8,7	4,7



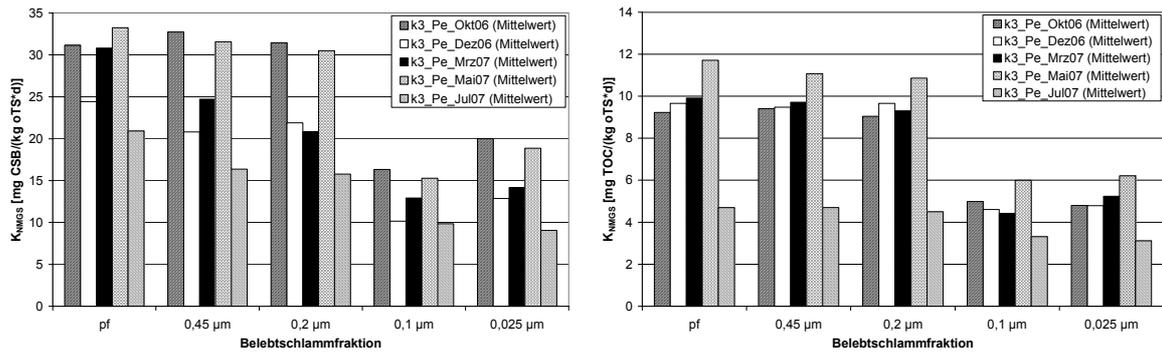
**Abbildung 5.90: Angereicherte Fracht in der KA K3 am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.91: Spezifische Anreicherung in der KA K3 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.92: Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen**

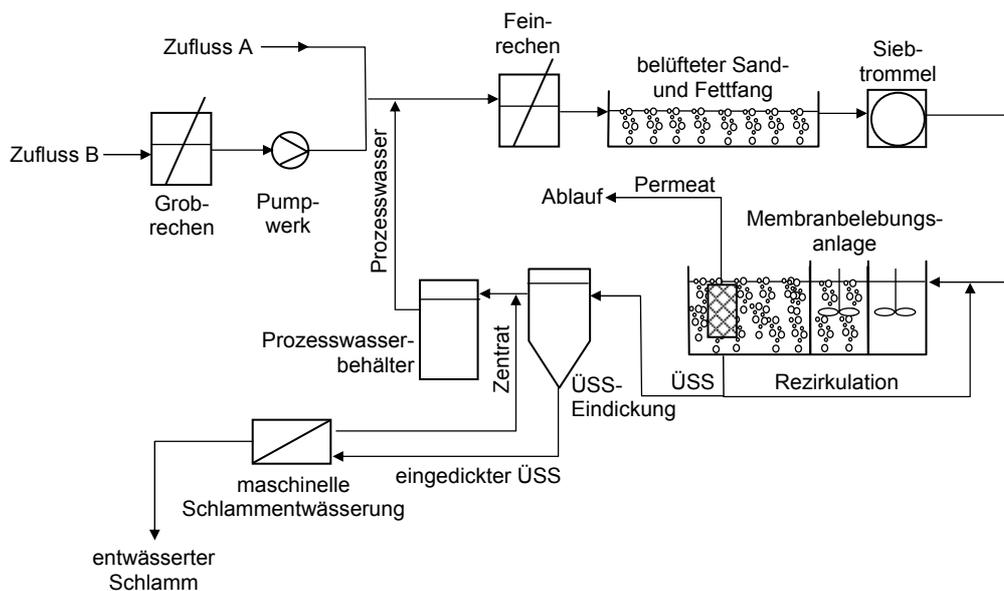


**Abbildung 5.93: Spezifische Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen**

## 5.1.4 Anlage K4

### 5.1.4.1 Anlagenbeschreibung

Die kommunale Kläranlage K4 (Abbildung 5.94, Inbetriebnahme 2004) war zum Zeitpunkt der Untersuchungen (11/2006...09/2007) bei einer Ausbaugröße von 80.000 EW nahezu ausgelastet. Nennenswerte industrielle Einleiter waren nicht vorhanden. Das Einzugsgebiet ist im Mischsystem erschlossen. Der mittlere Zufluss zur Kläranlage betrug im Jahr 2005 rd. 15.900 m<sup>3</sup>/d, im Jahr 2006 rd. 13.900 m<sup>3</sup>/d. Die Kläranlage ist als simultane aerobe Schlammstabilisierungsanlage konzipiert. Das mittlere Schlammalter lag bei einem ÜSS-Abzug im Jahr 2005 von i. M. 366 m<sup>3</sup>/d bei 25 d; im Jahr 2006 erreichte es infolge eines etwas geringeren ÜSS-Abzugs von i. M. 360 m<sup>3</sup>/d rd. 26 d. An den Untersuchungstagen entsprach die abgezogene Überschussschlammfracht einem Schlammalter von 19...24 d.

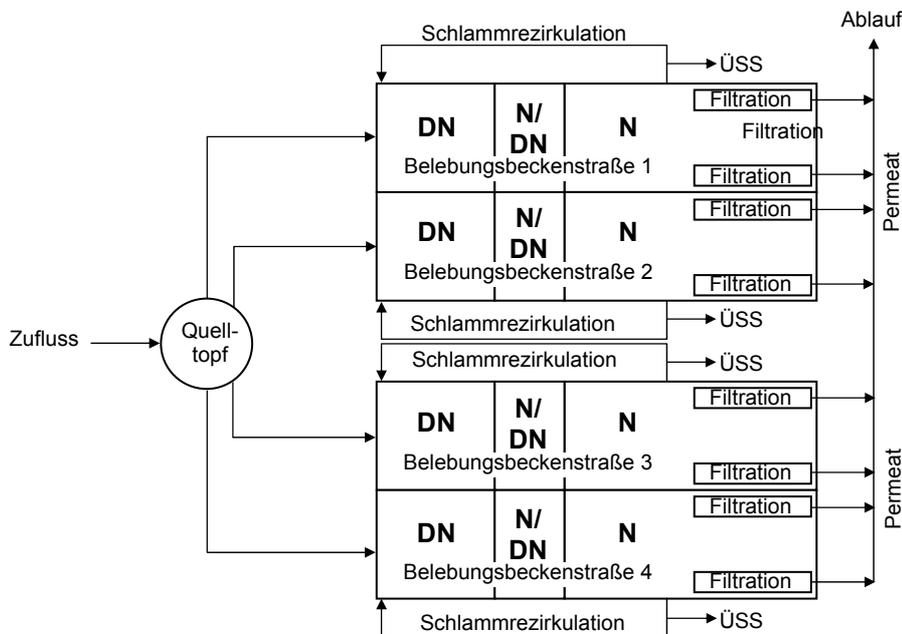


**Abbildung 5.94: Vereinfachte schematische Darstellung der Kläranlage K4**

Der Gesamtzufluss zur Kläranlage setzt sich aus dem Abwasser der Teilzuflüsse A und B zusammen. Das Abwasser von Zufluss B gelangt nach einer Grobstoffabscheidung in einem Grobrechen (Spaltweite: 20 mm) auf die Kläranlage. Die durchgängig zweistraßige mechanische Reinigungsstufe der KA K4 umfasst jeweils einen Filterstufenrechen mit einer Spaltweite von 5 mm, einen kombinierten und belüfteten Sand- und Fettfang (Abbildung 5.97) und zur weitergehenden Fest-

stoffabscheidung eine Siebtrommel (Maschensiebweite: 1 mm<sup>2</sup>). Darüber hinaus ist für Notfälle ein einstraßig ausgeführtes Umlaufsieb (Spaltweite: 1 mm) vorhanden.

Die biologische Reinigungsstufe besteht aus vier Belebungsbeckenstraßen (Abbildung 5.95, Abbildung 5.96) mit einem Gesamtvolumen von 9.200 m<sup>3</sup>. Jede Straße verfügt über ein Becken zur vorgeschalteten Denitrifikation mit jeweils 650 m<sup>3</sup>/Straße, einem variabel für Nitrifikation oder Denitrifikation nutzbaren Becken mit einem Volumen von 250 m<sup>3</sup>/Straße und einem sich daran anschließenden Nitrifikationsbecken (1.400 m<sup>3</sup>/Straße), das gleichzeitig die Membranfiltrationsmodule enthält. Das Rezirkulationsverhältnis ist variabel und wird in Abhängigkeit der N<sub>ges</sub>- und NH<sub>4</sub>-N-Ablaufkonzentration gesteuert.



**Abbildung 5.95: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage K4**

Die Zulaufverteilung erfolgt in einem Quelltopf, in dem eine Dosierstelle zur P-Elimination mit einem Eisen-III-Salz installiert ist. Die Belebungsbeckenstraßen werden nicht kontinuierlich mit Abwasser beschickt, sondern auf eine Weise, die eine möglichst gleichmäßige Beaufschlagung der Membranen erlaubt. Zu diesem Zweck ist der Füllstand der Becken in einem Bereich von 0,5 m variabel.

Der Überschussschlamm wird aus den Nitrifikationsbecken abgezogen und in drei statischen Eindickern (Gesamtvolumen: 1.425 m<sup>3</sup>) eingedickt. Der ÜSS-Abzug ist vom Füllstand der Eindicker abhängig und erfolgt diskontinuierlich. Zur Verbesserung des Eindickprozesses wurden zwei Eindicker zusätzlich mit Siebgut beaufschlagt, was im Vergleich zum dritten Eindicker zur Erhöhung des TS-Gehaltes im Schlamm von 2,5 % auf 3 % führte. Der eingedickte Schlamm wird in einer Zentrifuge maschinell auf 25...30 %TS entwässert und anschließend entsorgt. Das Prozesswasser aus ÜSS-Eindickung und Zentrifugation wird in einem Behälter (300 m<sup>3</sup>) zwischengespeichert und zeitgesteuert in den Zulauf der Kläranlage vor der mechanischen Reinigungsstufe gepumpt.



**Abbildung 5.96: Biologische Reinigungsstufe der KA K4 (Nitrifikationsstufe mit getauchten Membranmodulen)**

In jeder der vier Belebungsbeckenstraßen sind jeweils zwei Membranfiltrationsstraßen installiert. Es handelt sich um getauchte Ultrafiltrationsmembranen (ZeeWeed 500 C) der Fa. Zenon mit einer Filtrationsfläche von insgesamt 84.480 m<sup>2</sup> bzw. 10.560 m<sup>2</sup>/Filtrationsstraße. Die Membranmodule sind aus Hohlfasermembranen mit einer Porengröße von 0,1 µm aufgebaut und werden im Cross-Flow-Betrieb intermittierend im 10 s Intervall grobblasig belüftet. Der Betriebszyklus der Membranen besteht aus Filtration des Belebtschlammes (800 s), anschließender Entlüftung der Membranleitung zum Entfernen von aus dem Permeat ausgasenden Sauerstoff (30 s) und Rückspülung der Membranen mit Permeat (50 s).

Die Reinigung der Membranmodule umfasst eine wöchentliche Zwischenreinigung und eine jährliche externe Intensivreinigung (vgl. Abschnitt 5.1.2.1). Die letzte Intensivreinigung vor Beginn der Probenahme lag im Zeitraum 09/06...10/06. Wäh-

rend der Probenahme wurden seit 07/07 Membranmodule sukzessive einer externen weiteren Intensivreinigung zugeführt, die über das Ende der Beprobung 09/07 hinaus andauerte.



**Abbildung 5.97: Sandfang (links), Chemikalienlager (rechts)**

Die Zwischenreinigung erfolgt im Regelfall für die Membranstraßen 1 und 2 (Belebungsbeckenstraße 1) montags, für die Membranstraßen 3 und 4 (Belebungsbeckenstraße 2) dienstags, für die Membranstraßen 5 und 6 (Belebungsbeckenstraße 3) mittwochs, für die Membranstraßen 7 und 8 (Belebungsbeckenstraße 4) donnerstags. Mit Ausnahme der Membranstraßen 3 und 4 wurden wöchentlich zwei Straßen on-Air, die übrigen insitu gereinigt. Die Membranstraßen 3 und 4 wurden ausschließlich insitu gereinigt. Ein Unterschied in den Reinigungsergebnissen konnte vom Betreiber nicht festgestellt werden. Aus betrieblicher Sicht hat sich die on-Air-Reinigung infolge der partiellen Beckenentleerung und Verteilung des Belebtschlammes auf die übrigen Belebungsbecken in Verbindung mit der lastabhängigen Anlagensteuerung, insbesondere zur Gewährleistung eines gleichmäßigen TS-Gehaltes als komplizierter, aber beherrschbarer Vorgang erwiesen. In Abhängigkeit der Reinigungsart und des zeitlichen Intervalls kommen als Reinigungschemikalien Zitronensäure, Natriumhypochlorit und Wasserstoffperoxid, sowie zur pH-Wert-Anpassung Salzsäure und Natronlauge zum Einsatz.

### 5.1.4.2 Probenahme

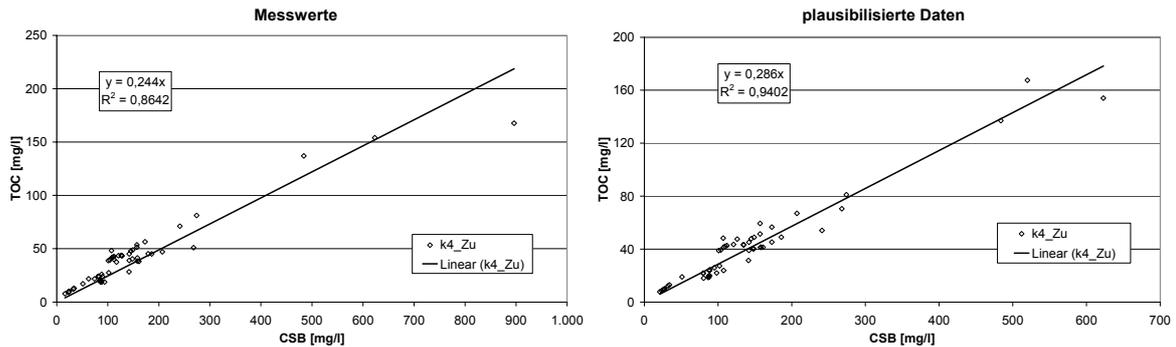
Die Anlage K4 wurde im Abstand von 2 Monaten 11/06, 01/07, 03/07, 05/07, 07/07 und 09/07 beprobt. Die Zulaufproben wurden als qualifizierte Stichproben aus dem Quelltopf entnommen, die Belebtschlammproben als Stichproben aus der Belebungsbeckenstraße 2, die Permeatproben ebenfalls als Stichproben aus dem Ablaufschacht der Kläranlage. Prozesswasser wurde als Stichprobe aus dem Prozesswasserbehälter der Kläranlage entnommen; 11/06 wurde zusätzlich eine Probe des Zentrats analysiert. Die Probenahme fand im Regelfall mittwochs, d. h. nach der turnusmäßigen Membranreinigung der Membranstraßen 3 und 4 statt.

### 5.1.4.3 Zuflussfraktionierung

Während der Probenahmen lagen mit Ausnahme 05/07 Trockenwetterbedingungen vor. Den Probenahmen 01/07, 07/07 und 09/07 ging tags zuvor Regenwetter voraus. Der Einfluss der Wetterbedingungen auf die entnommenen Proben ist erkennbar (Tabelle 5.26, Abbildung 5.100). Von Mischwasser unbeeinflusste Proben liegen demnach 11/06 und 03/07 vor. Einige vor Ort bestimmte Abwasserkennwerte sowie die CSB-, BSB<sub>5</sub>- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 5.26 dargestellt. Die pH-Werte lagen im für kommunales Abwasser typischen Bereich. Das TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,24 (CSB/TOC = 4,1), nach der Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) bei 0,29 (CSB/TOC = 3,5) (Abbildung 5.98).

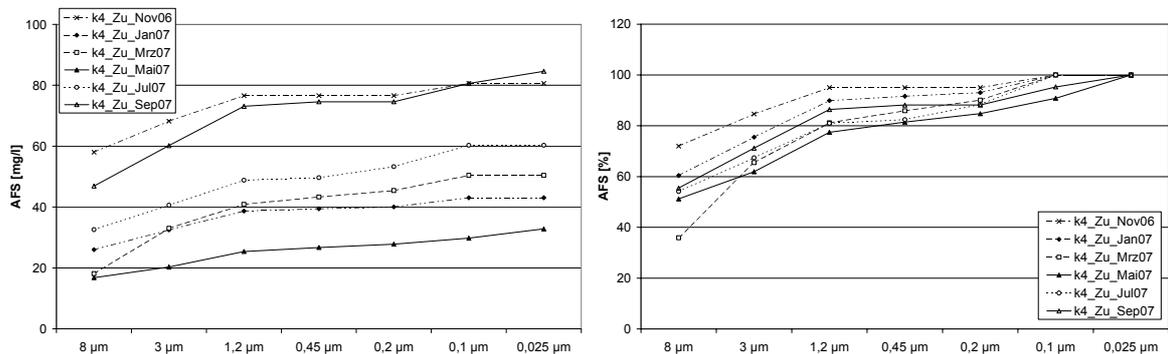
**Tabelle 5.26: Charakterisierung des Zuflusses zur KA K4**

Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unfiltr.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[μS/cm]	[-]	[°C]
11/06	228	623	158	237	1.355	7,5	15,0
01/07	89	241	81,9	77	477	7,1	10,3
03/07	279	896	145	582	1.245	7,0	10,3
05/07	68	107	23,1	118	211	6,8	14,0
07/07	167	484	110	252	724	7,0	18,7
09/07	143	274	87,5	128	640	7,0	15,5



**Abbildung 5.98: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA K4**

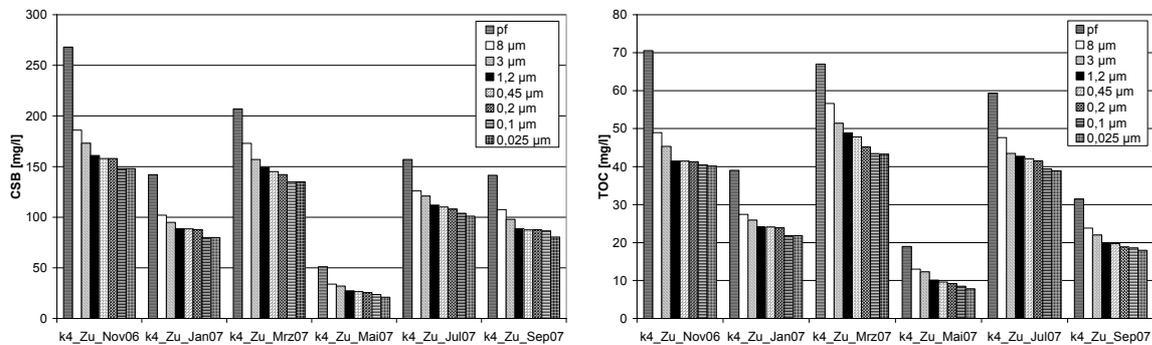
In Abbildung 5.99 ist die Änderung der abgeschiedenen partikulären Substanzen als AFS im Bereich 8 µm bis 0,025 µm dargestellt. Die absoluten Werte zeigen kein einheitliches Bild, lassen aber auf einen ähnlichen Verlauf schließen, der sich beim Vergleich der relativen Werte, unabhängig von den Zuflussbedingungen, einstellt. Der Unterschied innerhalb einer Fraktion beträgt mit Ausnahme der 8 µm-Fraktion rd. 20% und verringert sich mit kleiner werdender Porengröße der verwendeten Membranfilter.



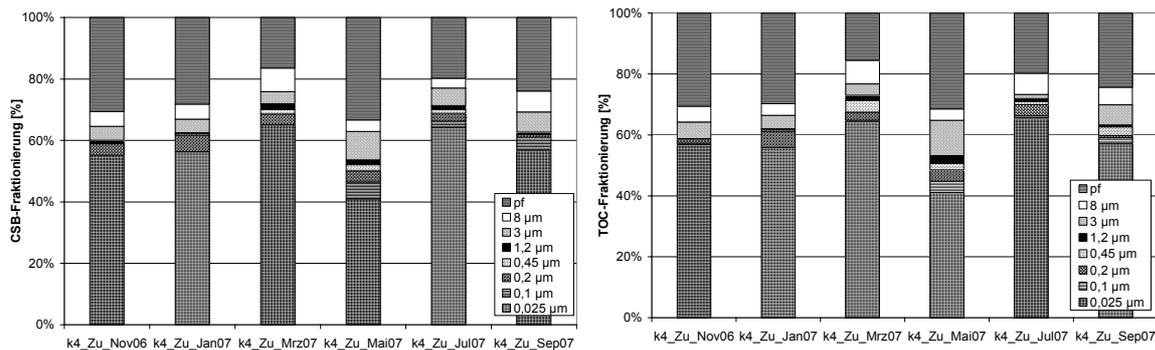
**Abbildung 5.99: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage K4**

Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.100, Abbildung 5.101). Die 8 µm-Fraktion liegt rd. 20...35 % unterhalb der nach der Filtration über Papierfilter analysierten TOC- bzw. CSB-Konzentrationen. Die Breite der 8 µm-Fraktion beträgt 4...9 %. Die 3 µm-Fraktion liegt bei rd. 5...10 %. Eine Ausnahme stellt Mischwasserprobe 05/07 mit 15 % beim CSB bzw. 18 % beim TOC dar. Sowohl die 1,2 µm- als auch die 0,45 µm-Fraktion sind mit < 5 % gering ausgeprägt. Im Gegensatz dazu tritt die 0,2 µm-Fraktion mit bis zu 10 % deutlicher hervor.

Die Summe aus 1,2  $\mu\text{m}$ , 0,45  $\mu\text{m}$  und 0,2  $\mu\text{m}$ -Fraktion beträgt mit Ausnahme der Probe 05/07 etwa 10 % beim CSB und 5...15 % beim TOC im Vergleich zur papierfiltrierten Probe. Die Unterschiede sind den Analysemethoden und dem höheren Fehlerbereich beim CSB zuzuschreiben.

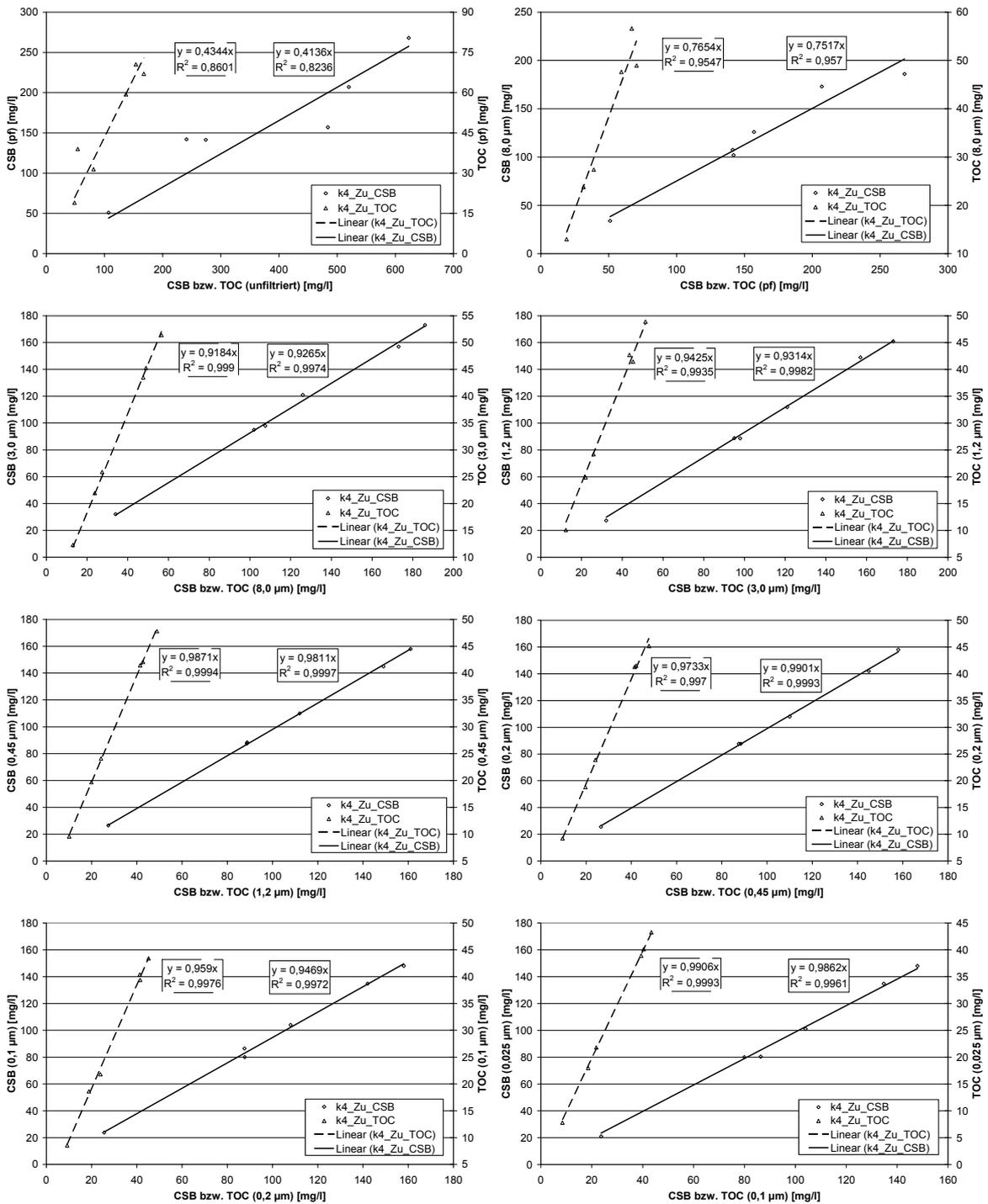


**Abbildung 5.100: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage K4**



**Abbildung 5.101: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage K4 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

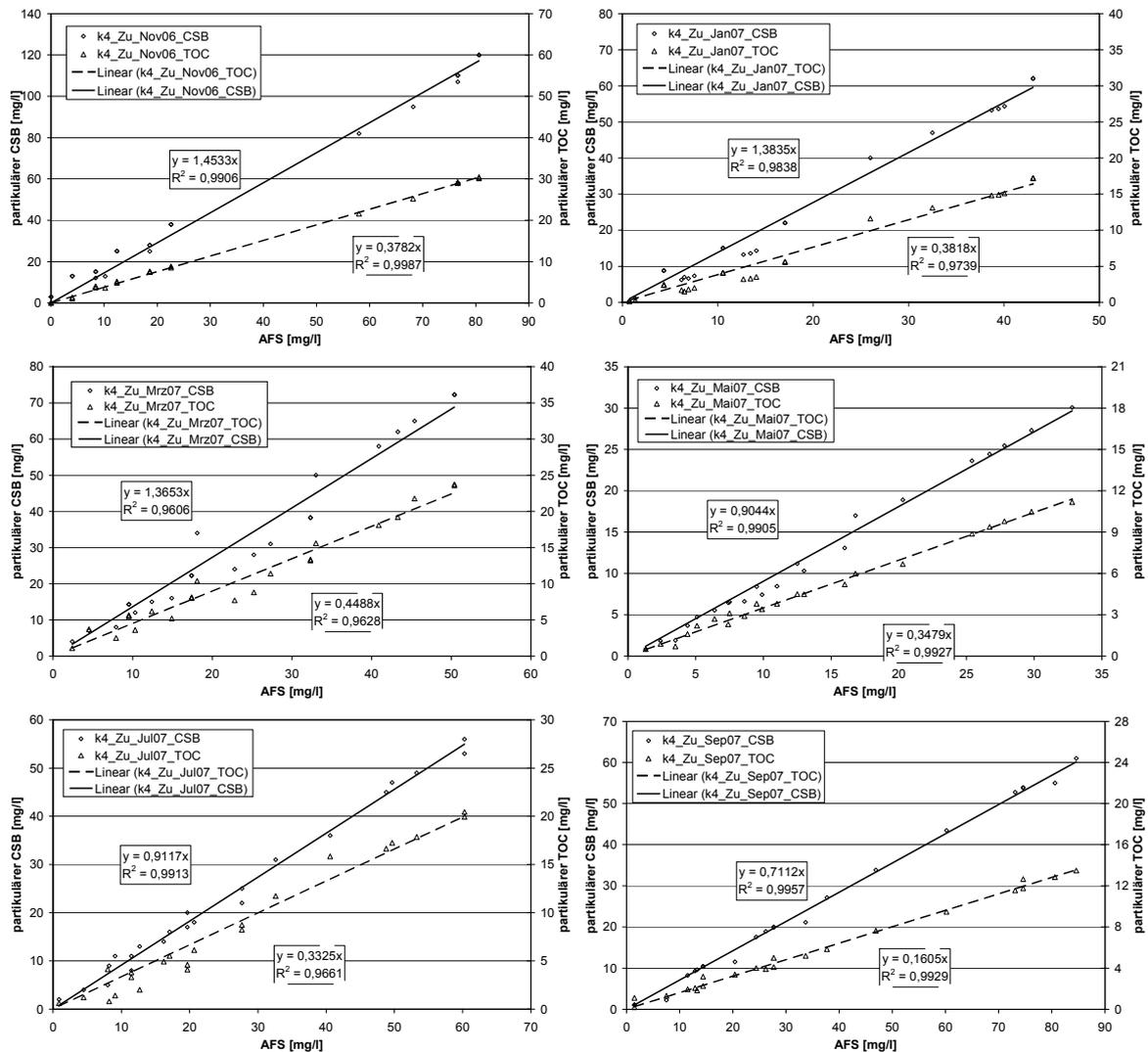
Im Vergleich zur papierfiltrierten Probe nimmt die 0,025  $\mu\text{m}$ -Fraktion einen großen Anteil mit 55...65 % ein, mit Ausnahme der Probe 05/07 mit rd. 40 %. Wird die in der Abwassertechnik gebräuchliche 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion als Bezugswert für membranfiltrierte Proben gewählt, so sind mindestens 90 % des 0,45- $\mu\text{m}$  Durchgangs kleiner als 0,1  $\mu\text{m}$  und mindestens 80 % des 0,45- $\mu\text{m}$  Durchgangs kleiner als 0,025  $\mu\text{m}$  (Abbildung 5.101).



**Abbildung 5.102: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K4**

Die größten Änderungen der Konzentrationen treten zwischen der papierfiltrierten und der 8 µm-Probe (CSB und TOC rd. 25 %), zwischen 3 µm- und 1,2 µm-Fraktion (CSB rd. 7 %, TOC rd. 8 %) und zwischen der 0,2 µm- und 0,1 µm-Fraktion (CSB rd. 5 %, TOC rd. 4 %) auf (Abbildung 5.102).

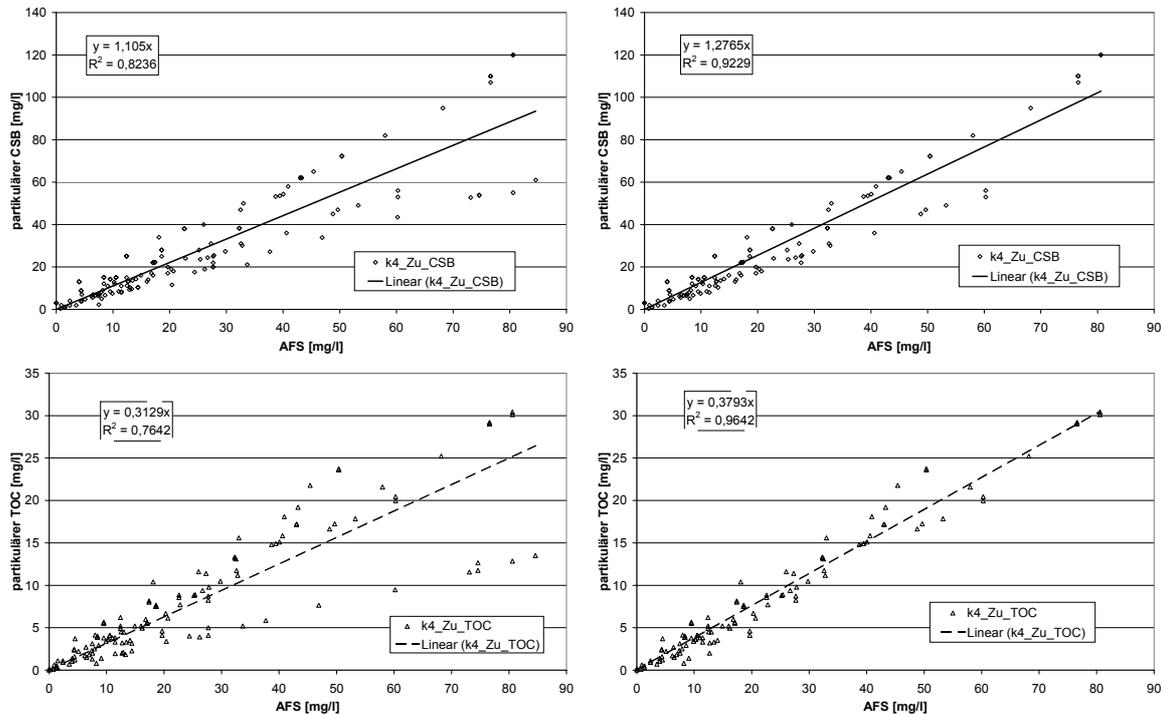
Die lineare Abhängigkeit aller Fraktionen deutet darauf hin, dass die Abwasserbeschaffenheit homogen ist und nur durch die Verdünnung mit Fremdwasser, d. h. Niederschlagswasser beeinflusst wird. Die Bestimmung von partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC und deren Korrelation mit den AFS führte bei allen untersuchten Proben zu einer linearen Abhängigkeit (Abbildung 5.103).



**Abbildung 5.103: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der Anlage K4**

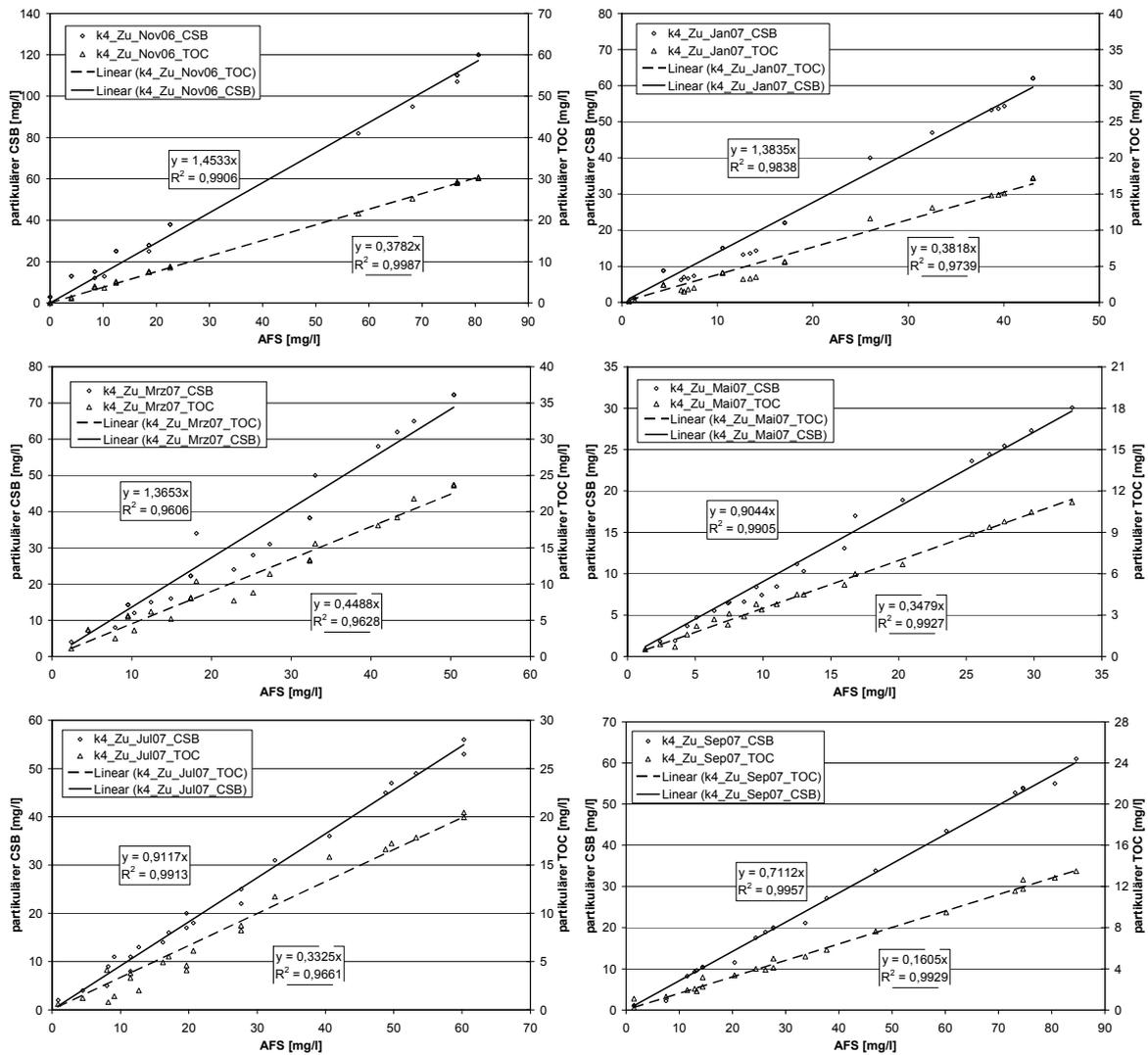
Während sich in den einzelnen Proben ein deutlicher Zusammenhang zwischen partikulärem CSB bzw. TOC und AFS abzeichnet, ist dies bei der zusammenfassenden Darstellung aller Werte nur bedingt der Fall (Abbildung 5.104). Die Proben 11/06 bis 07/07 haben bei CSB und TOC ähnliche Anstiege. Im Gegensatz dazu weichen die Anstiege der partikulären organischen Substanzen zu den AFS der Probe 09/07 signifikant davon ab. Ein Zusammenhang mit Trocken- oder Misch-

wasserbedingungen ist nicht nachweisbar. Es fällt auf, dass die Absolutwerte der AFS (Abbildung 5.99) trotz des vergleichsweise dünnen Zulaufs, in etwa denen der Trockenwetterprobe 11/06 entsprechen. Inwieweit zum Zeitpunkt der Probenahme durchgeführte Wartungsarbeiten an der Siebanlage eine Auswirkung auf die Probe hatten, ist unklar.

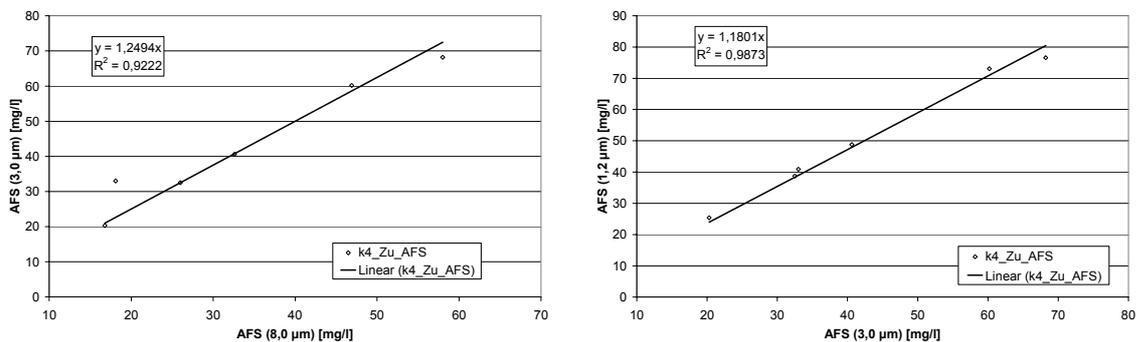


**Abbildung 5.104: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der Anlage K4 (links: alle Proben, rechts: alle Proben ohne Probe 09/07)**

Der Vergleich der Änderung des partikulären CSB sowie des partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen mit den zu diesen Fraktionen gehörenden AFS zeigt eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung der Anstiege aller drei Parameter (Abbildung 5.105, Abbildung 5.106, Abbildung 5.107), wengleich dieser Zusammenhang durch Auswertung weiterer Proben zu erhärten ist.



**Abbildung 5.105: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage K4**



**Abbildung 5.106: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K4**

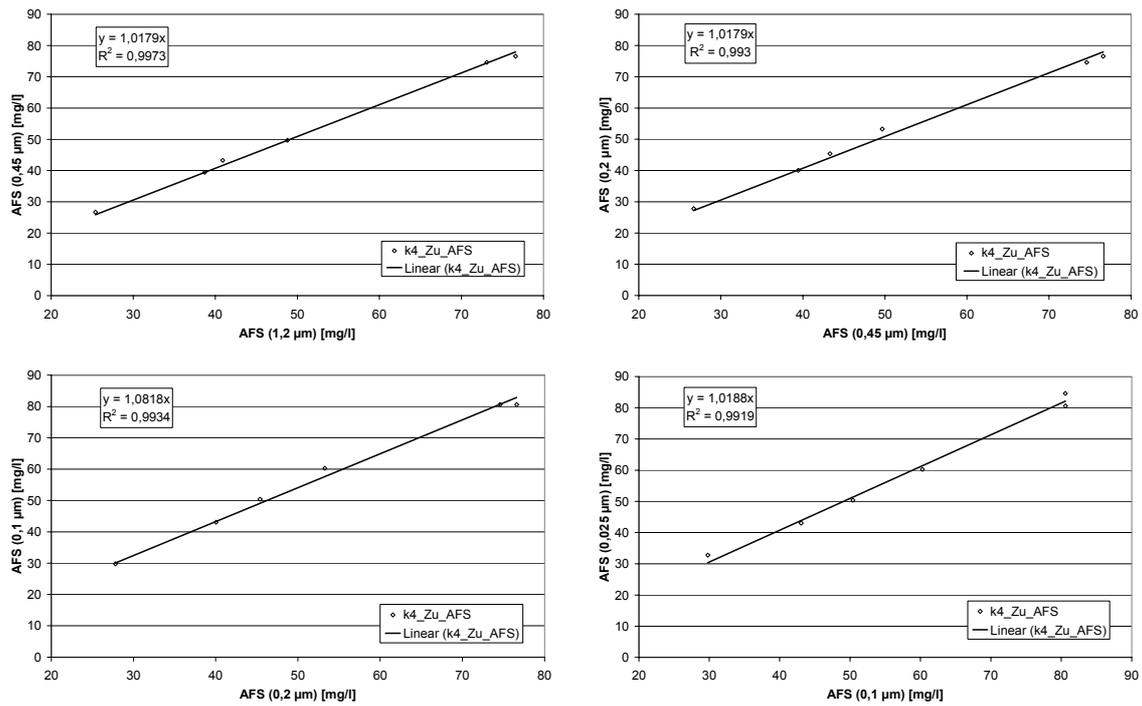


Abbildung 5.107: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K4 (Fortsetzung)

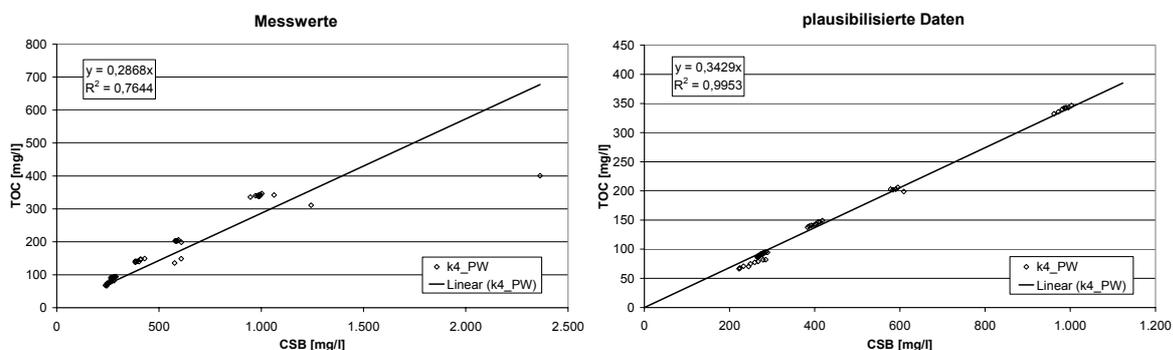
### 5.1.4.4 Fraktionierung des Prozesswassers

Die Beschaffenheit des unfiltrierten Prozesswassers (CSB, AFS) ist uneinheitlich und wird überwiegend maßgebend durch das Vorkommen partikulärer Substanzen, infolge von nicht sedimentiertem Schlamm beeinflusst. Die nach der Membranfiltration über 0,45 µm bestimmten CSB-Konzentrationen liegen zum Teil wesentlich unter den unfiltrierten Werten (Tabelle 5.27), und deuten ebenfalls auf eine heterogene Beschaffenheit hin. Einige vor Ort bestimmte Abwasserkennwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die BSB<sub>5</sub>- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Die pH-Werte liegen im neutralen Bereich von 6,6...7,3. Das TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Prozesswassers lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,29 (CSB/TOC = 3,5), nach der Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) bei 0,34 (CSB/TOC = 2,9) (Abbildung 5.108). Das CSB/BSB<sub>5</sub>-Verhältnis der unfiltrierten Proben lag bei 5...6.

**Tabelle 5.27: Charakterisierung des Prozesswassers der KA K4**

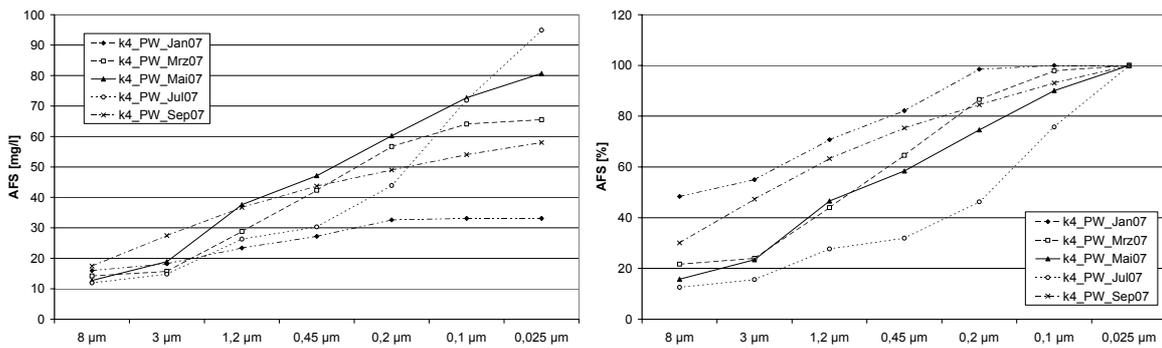
Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unfiltr.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mS/cm]	[-]	[°C]
11/06	519	1.243	595	354	n. b.	n. b.	n. b.
01/06	232	576	267	380	1030	7,1	12,2
03/07	144	285	245	980	1051	7,1	12,4
05/07	527	2.363	392	1.700	1074	7,1	18,0
07/07	624	1.062	990	21	1486	6,6	21,7
09/07	220	608	278	205	1398	7,3	18,6

n. b. ... nicht bestimmt



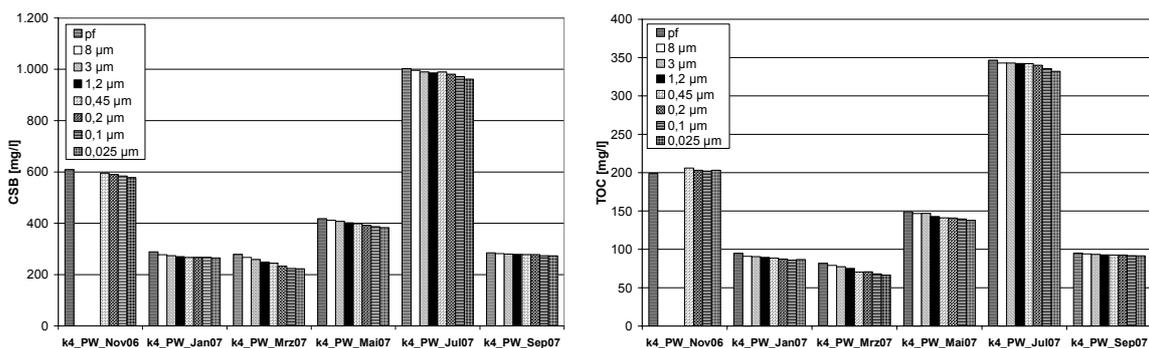
**Abbildung 5.108: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Prozesswassers der KA K4**

Der Verlauf der abgeschiedenen partikulären Substanzen zeigt im Fall der Absolutwerte kein einheitliches Bild, während sich bei Gegenüberstellung der relativen Werte der membranfiltrierten Proben ein ähnlicher Verlauf einstellt (Abbildung 5.109), der aber durch eine große Bandbreite gekennzeichnet ist. Auffällig ist der im Regelfall geringe Unterschied der AFS bis zu 3 µm und das danach folgende Auseinanderdriften der AFS.

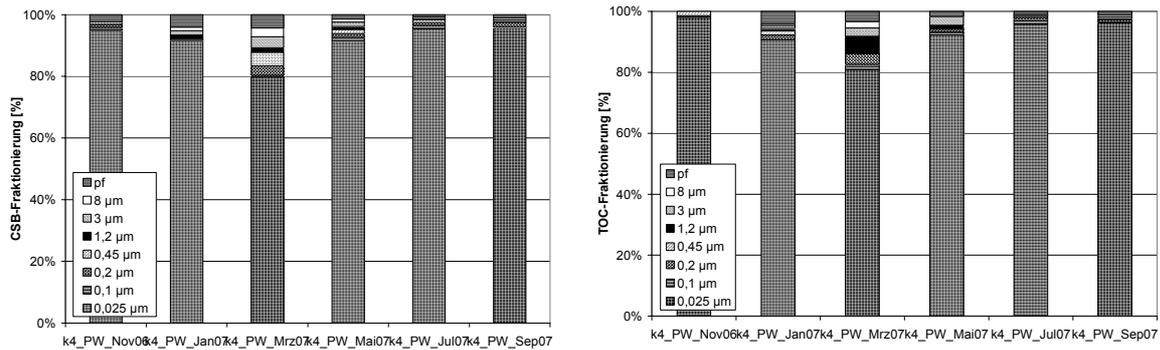


**Abbildung 5.109: AFS-Verteilung im Prozesswassers mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage K4**

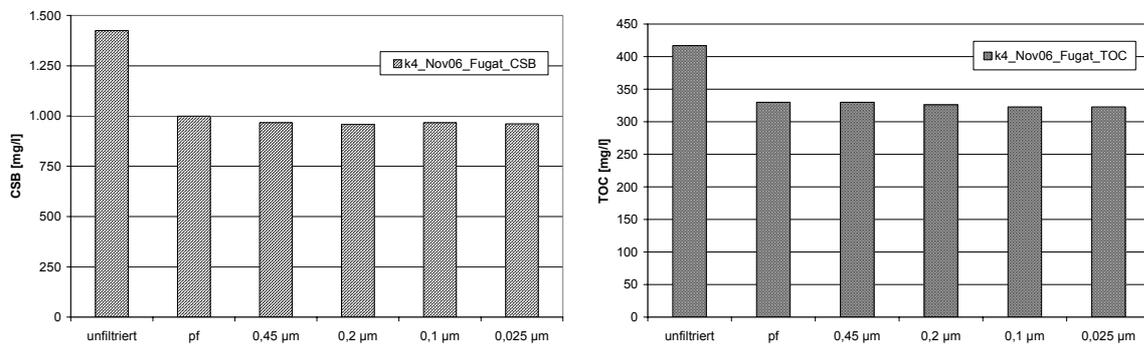
Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen keinen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.110, Abbildung 5.111). Die Verteilung der Fraktionen ist einheitlich. Das papierfiltrierte Prozesswasser bestand bei 5 von 6 Proben zu 90...95 % aus Substanzen mit einer Partikelgröße von weniger als 0,025 µm. Es ist anzunehmen, dass dies auch auf das Fugat zutrifft. Die Analysen der Fugatprobe 11/06 sind ein Indiz dafür (Abbildung 5.112).



**Abbildung 5.110: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Prozesswasser der Anlage K4 an den Untersuchungstagen**



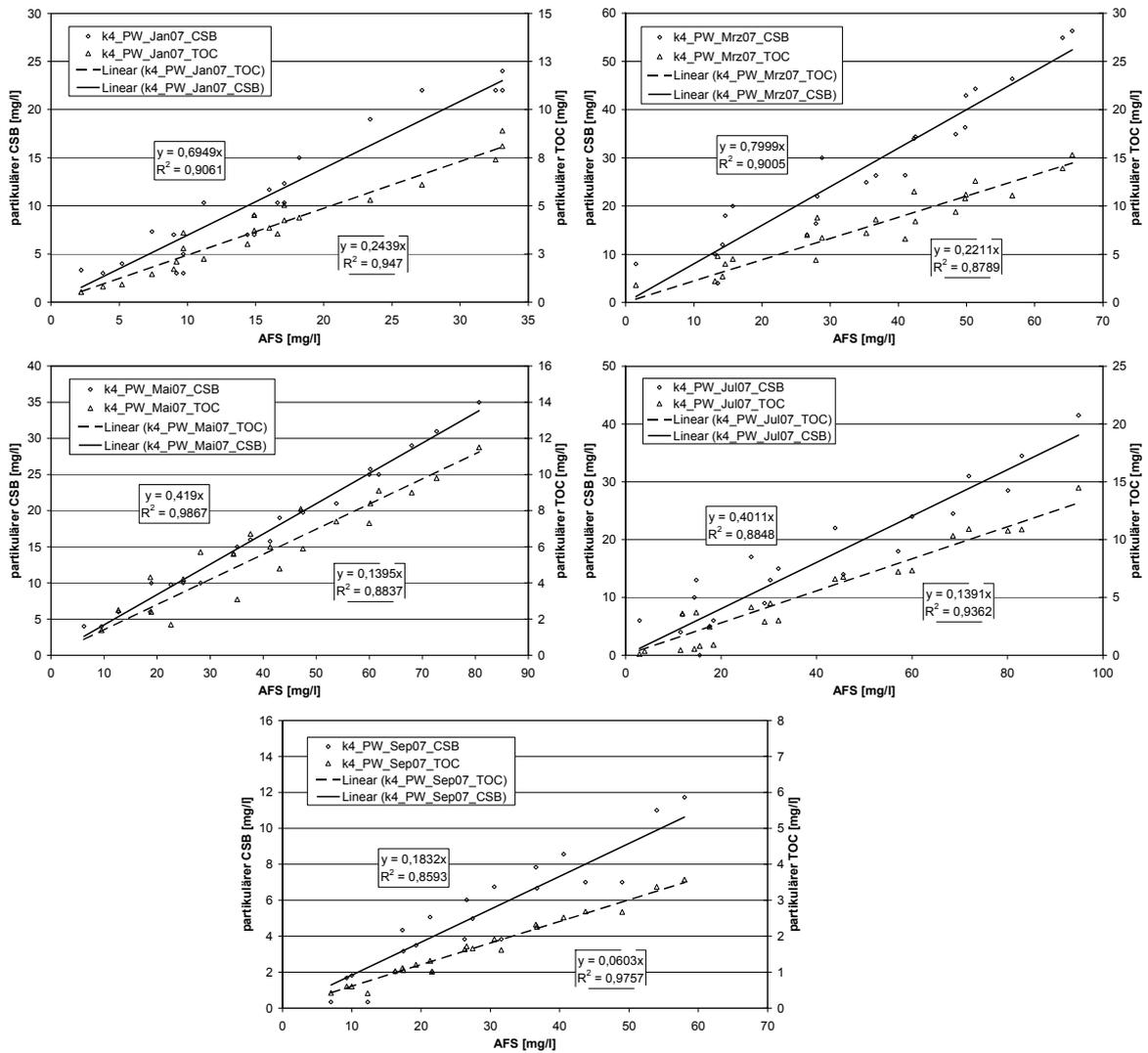
**Abbildung 5.111: Relative Verteilung der Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K4 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**



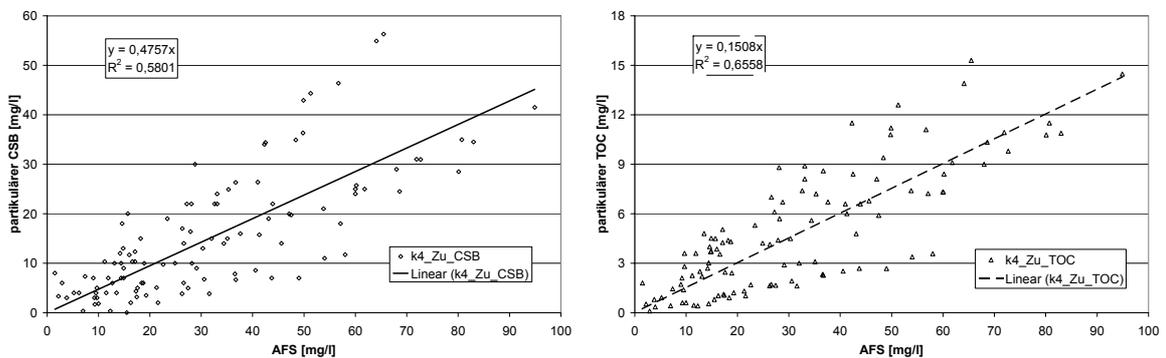
**Abbildung 5.112: Fugateschaffenheit der Probe 11/06 der KA K4**

Die Bestimmung von partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC und deren Korrelation mit den AFS führte bei allen untersuchten Proben zu einer linearen Abhängigkeit (Abbildung 5.113), die sich bei Zusammenfassung aller Proben (Abbildung 5.114), ggf. durch die Beeinflussung durch Messwerterhebung und Datenanalyse, dabei insbesondere durch die geringen Konzentrationsunterschiede, nicht im selben Maß bestätigte.

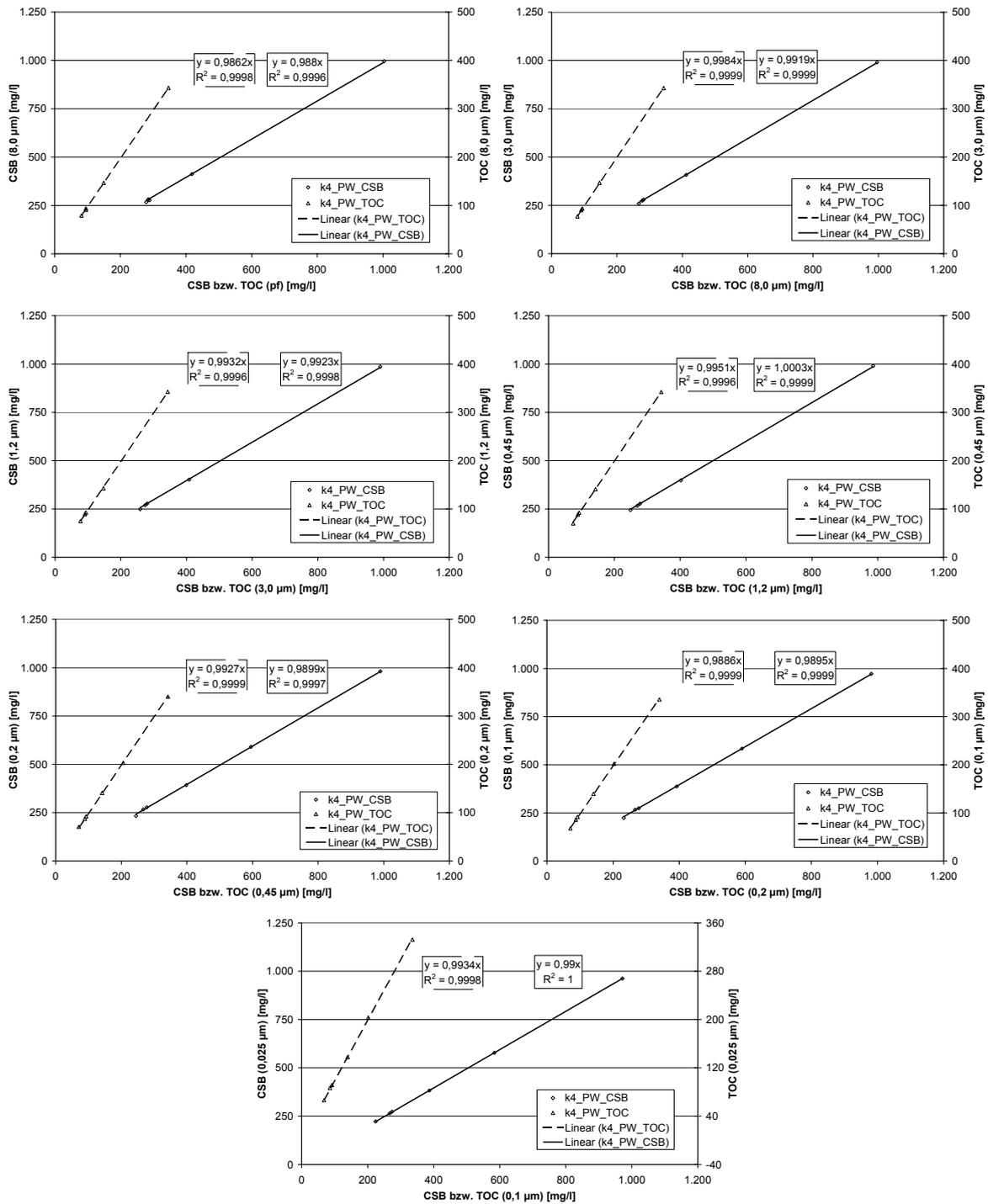
Ein linearer Trend der aufeinander folgenden Fraktionen aller Proben ist in jedem Fall nachweisbar (Abbildung 5.115). Die Fraktionen sind weitgehend identisch. Die Korrelation der partikulären CSB- und TOC-Konzentrationen und der AFS-Konzentrationen führt nicht immer zu eindeutigen Ergebnissen (Abbildung 5.116, Abbildung 5.117, Abbildung 5.118). Bei Betrachtung der AFS ist teils kein Zusammenhang nachweisbar. Ein Grund dafür liegt in den verhältnismäßig geringen Konzentrationen der partikulären Substanzen. Da der partikuläre Anteil im Vergleich zum gelösten Anteil eine eher untergeordnete Rolle spielt (Abbildung 5.111), ist eine Beeinflussung der Gesamtkonzentration (Abbildung 5.115) nicht nachweisbar.



**Abbildung 5.113: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Prozesswasser der KA K4 an den Untersuchungstagen**



**Abbildung 5.114: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Prozesswasser der Anlage K4 (Zusammenfassung alle Proben)**



**Abbildung 5.115: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Prozesswasser-Fractionen der KA K4**

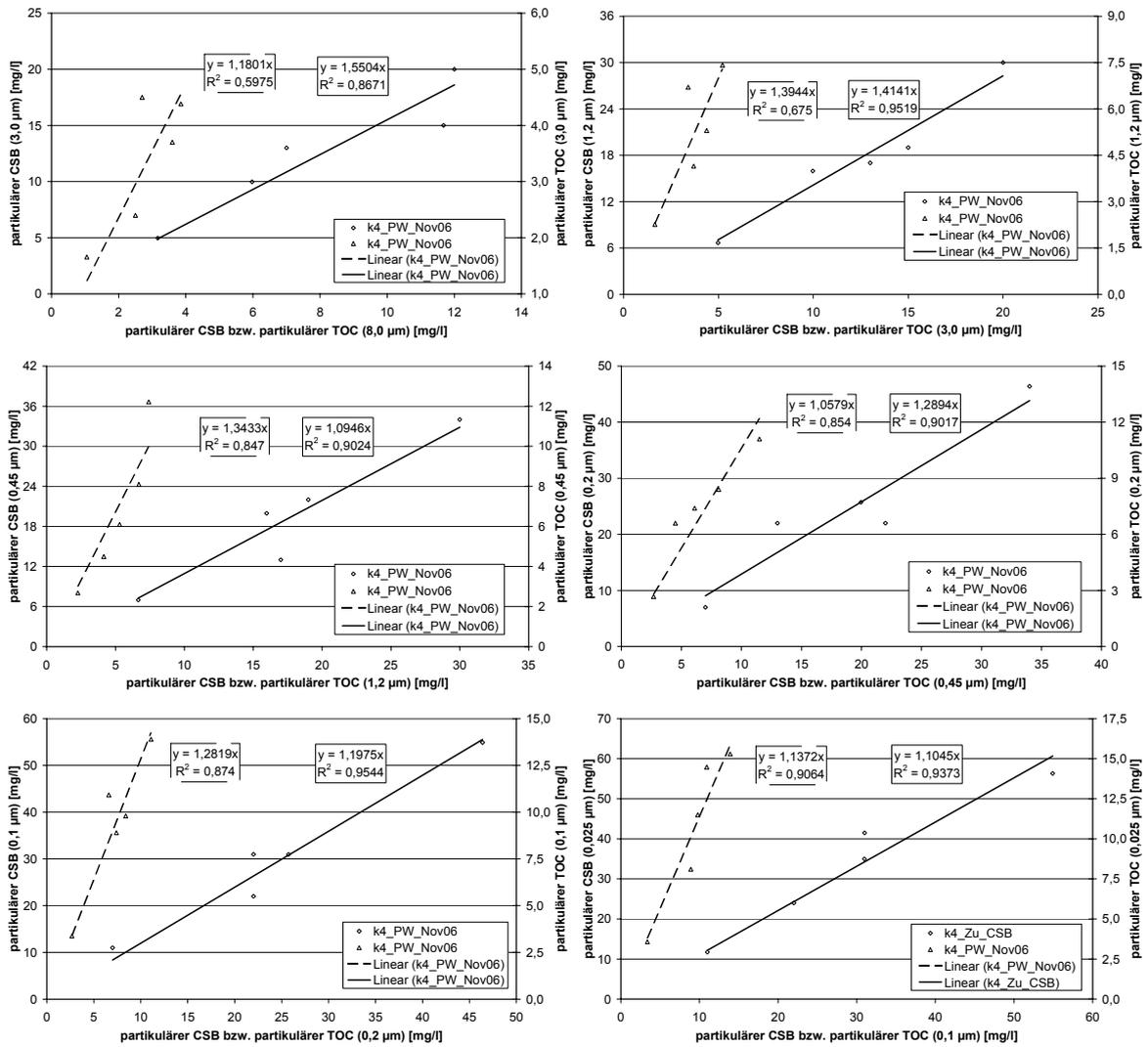


Abbildung 5.116: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K4

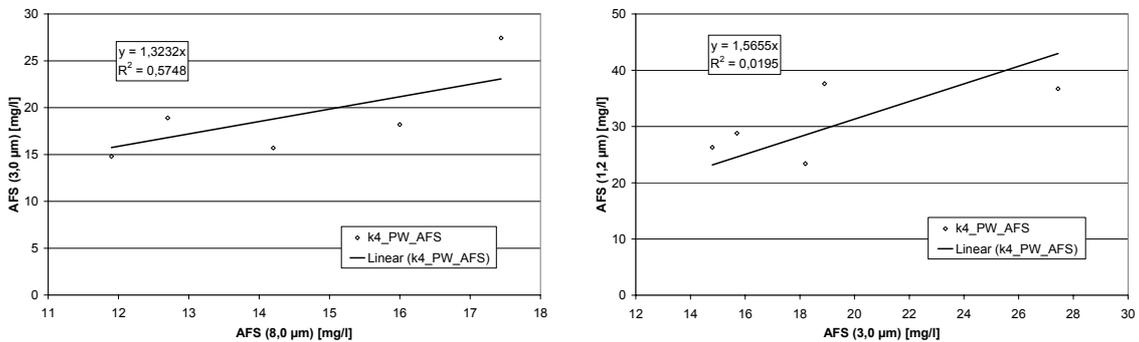


Abbildung 5.117: Änderung der AFS aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K4

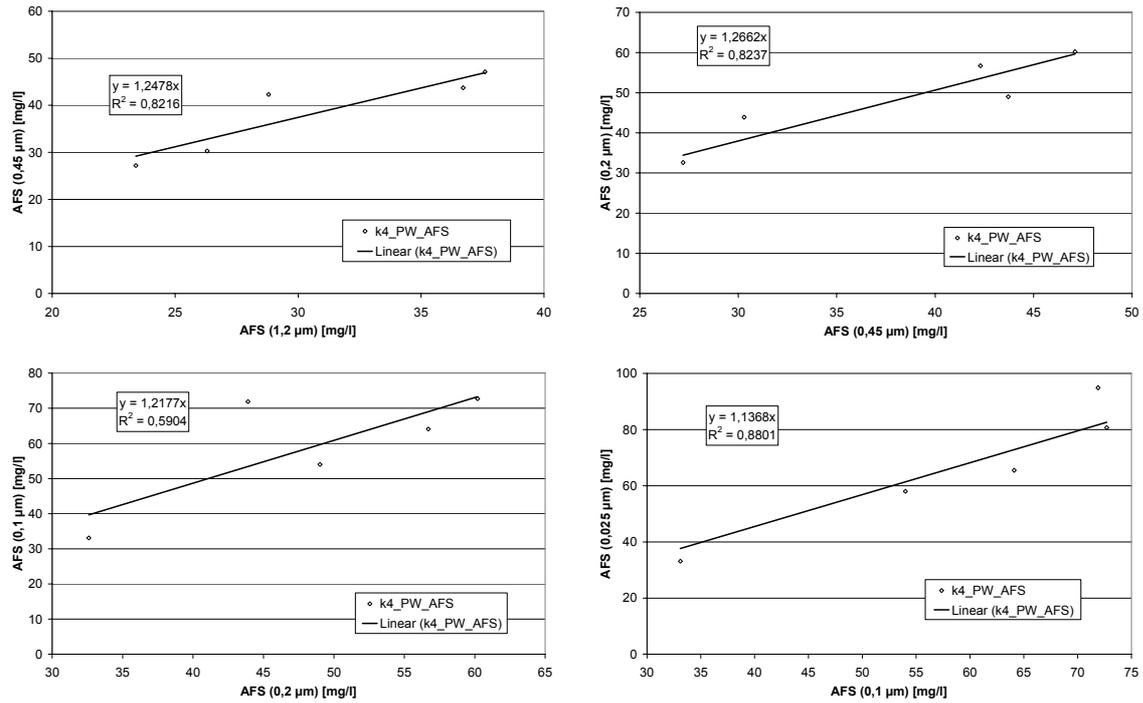


Abbildung 5.118: Änderung der AFS aufeinander folgender Fraktionen im Prozesswasser der Anlage K4 (Fortsetzung)

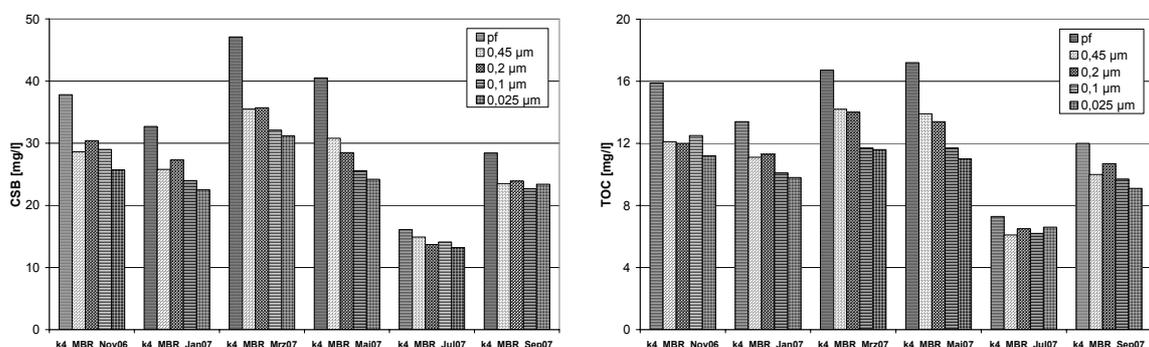
### 5.1.4.5 Fraktionierung des Belebtschlamm

Der TS-Gehalt des Belebtschlammes der untersuchten Proben lag im Bereich von 10,4...14,4 g TS/l, der oTS-Gehalt zwischen 57 % TS und 67 % TS (Tabelle 5.28). Die temperaturnormierte Grundatmung ( $OVC_G + OVN_G$ ) lag im Bereich von 1,4...3,0 mg  $O_2$ /(g oTS·h) und damit im für stabilisierten Schlamm typischen Rahmen von < 5 mg  $O_2$ /(g oTS·h). Die Temperatur wies jahreszeitlich bedingte Schwankungen von 12,0 °C bis 20,5 °C auf. Die Leitfähigkeit erreichte in Abhängigkeit der Zuflussverhältnisse (TW, MW) 465...967  $\mu$ S/cm. Der pH-Wert war mit 6,9...7,0 stabil.

**Tabelle 5.28: Kennwerte der biologischen Reinigungsstufe der KA K4**

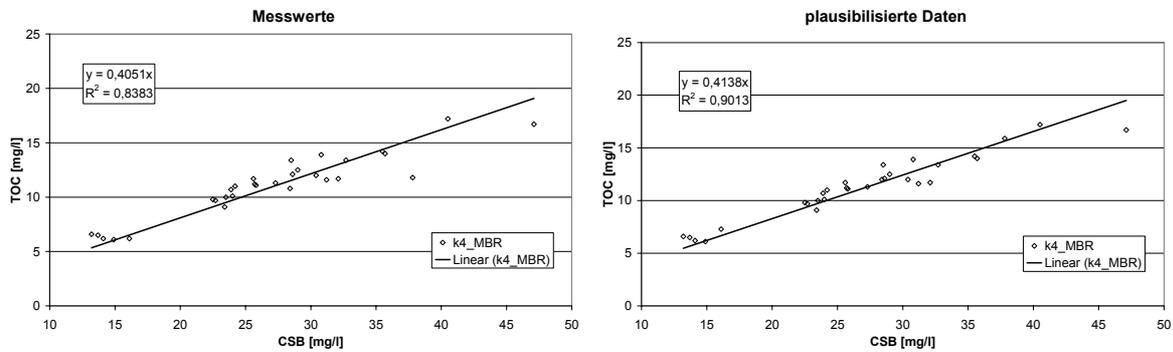
Probe	TS	oTS	oTS	Atmung $OVC_G + OVN_G$	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg } O_2}{\text{g oTS} \cdot \text{h}}$	[-]	[°C]	[ $\mu$ S/cm]
11/06	14,4	9,2	64	2,9	6,9	15,9	847
01/07	12,5	8,3	66	1,4	6,9	13,4	636
03/07	10,4	6,6	63	1,8	7,0	12,0	967
05/07	13,4	8,5	64	3,0	7,0	16,8	465
07/07	11,4	6,5	57	3,0	7,0	20,5	586
09/07	11,8	7,8	67	2,3	7,0	18,1	630

Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlammes unterliegen einem mehr oder weniger ausgeprägten Verlauf, dessen Differenz beim Vergleich der 0,45  $\mu$ m- mit der 0,025  $\mu$ m-Fraktion bis zu 6,6 mg CSB/l bzw. bis zu 3 mg TOC/l beträgt (Abbildung 5.119).



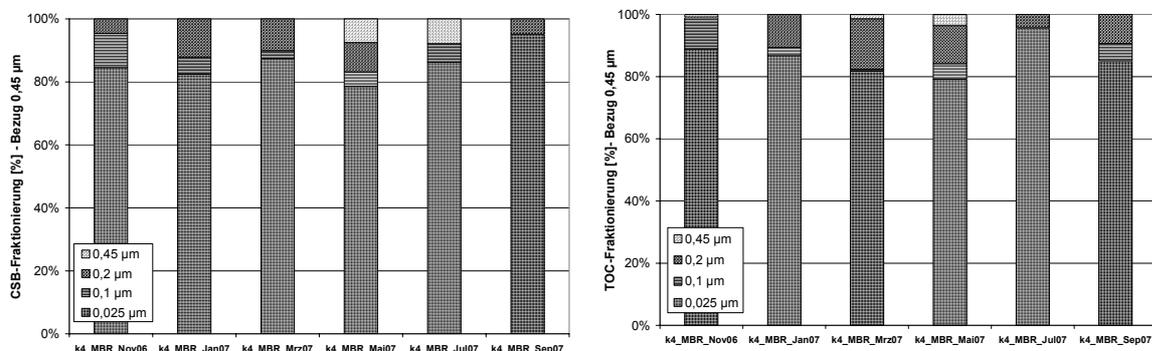
**Abbildung 5.119: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes der KA K4**

Das TOC/CSB-Verhältnis aller Proben liegt bei 0,405 (CSB/TOC = 2,5). Nach Korrektur von jeweils einem Wert der Proben 11/06, 07/07 und 09/07 mit dem am selben Tag aufgetretenen TOC/CSB-Verhältnis liegt das TOC/CSB-Verhältnis bei 0,414 bzw. das CSB/TOC-Verhältnis bei 2,4 (Abbildung 5.120).

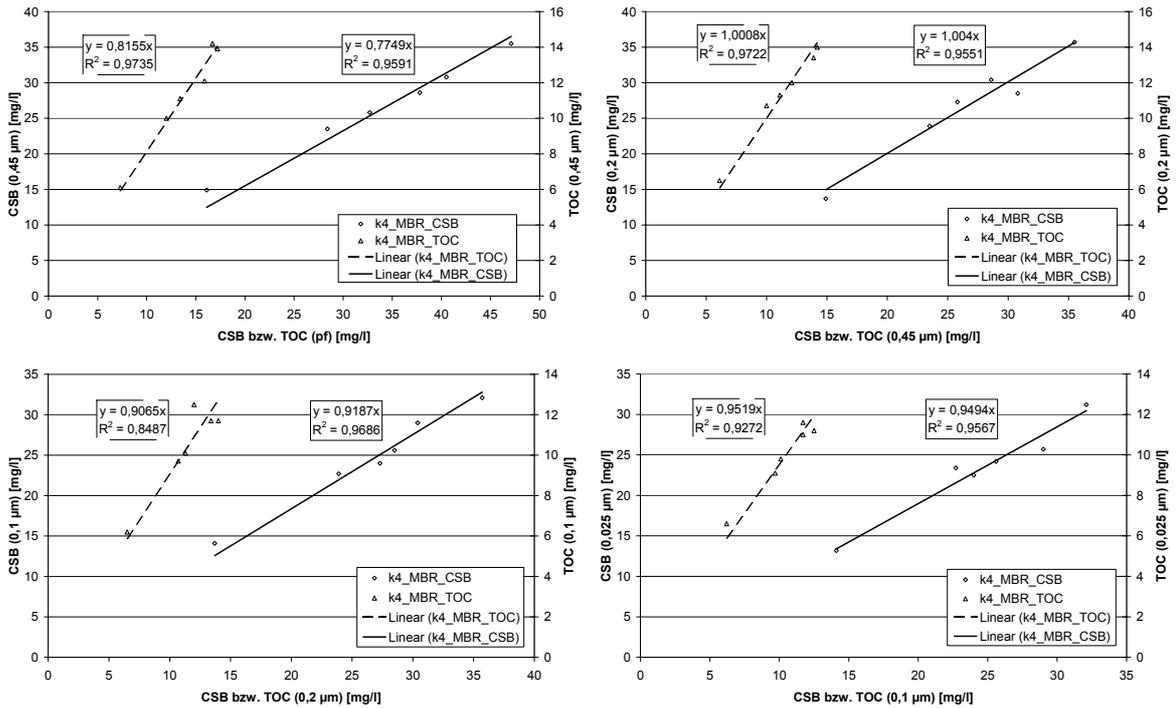


**Abbildung 5.120: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes der KA K4**

Der überwiegende Teil des membranfiltrierten Belebtschlammes ( $0,45 \mu\text{m}$ ) besteht zu 80...95 % aus Substanzen mit einer Größe von weniger als  $0,025 \mu\text{m}$  (Abbildung 5.119, Abbildung 5.121). Die restlichen Fraktionen variieren im Bereich von 0...10 %. Die Unterschiede zwischen der Verteilung der CSB- und TOC-Fraktionen sind auf die verschiedenen Bestimmungsmethoden und deren spezifische Fehler zurückzuführen. Die CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen verhalten sich linear zueinander. Die größten Unterschiede treten zwischen der papierfiltrierten Probe und der  $0,45 \mu\text{m}$ - (TOC: 18 %, CSB: 22 %) sowie zwischen der  $0,2 \mu\text{m}$ - und  $0,1 \mu\text{m}$ -Fraktion auf (TOC: 9 %, CSB: 8 %).

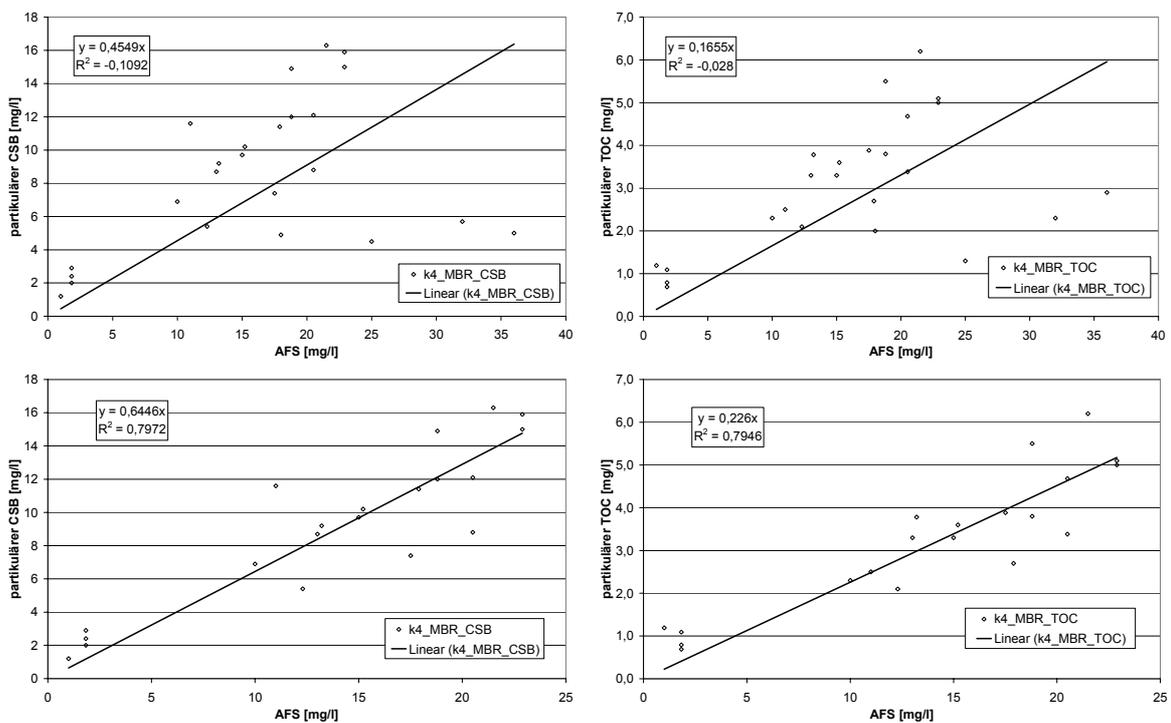


**Abbildung 5.121: Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fraktionen im Belebtschlamm der KA K4 (Bezug:  $0,45 \mu\text{m}$ -Fraktion)**



**Abbildung 5.122: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA K4**

Ein Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC konnte sowohl für die Einzelproben als auch für die Zusammenfassung aller Proben nicht nachgewiesen werden. Wird Probe 09/07 vernachlässigt ist allerdings eine Korrelation erkennbar (Abbildung 5.123).

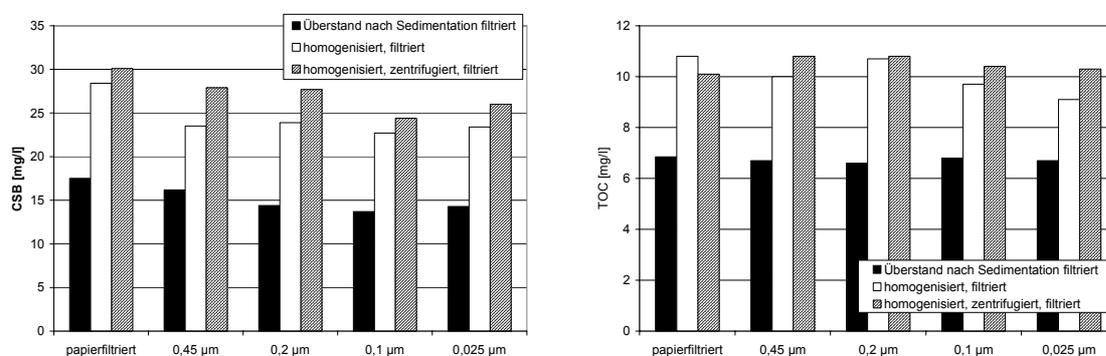


**Abbildung 5.123: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB u. part. TOC aller Proben der KA K4 (oben), ohne Probe 09/07 (unten)**

Während die Konzentrationen der membranfiltrierten Proben 11/06, 01/07, 03/07, 05/07, 09/07 in einem relativ engen Bereich liegen, sind die Konzentrationen der Probe 07/07 deutlich geringer. Im Gegensatz zur Mehrzahl der Proben wurde die Fraktionierung 07/07 nicht aus der homogenisierten Probe durchgeführt, sondern aus der über Nacht sedimentierten Probe. Zusätzlich wurden CSB und TOC nach 0,45 µm-Filtration aus einer homogenisierten Probe bestimmt. Die Ergebnisse liegen mit 36 mg CSB/l und 10,9 mg TOC/l deutlich über den Werten der Fraktionierung.

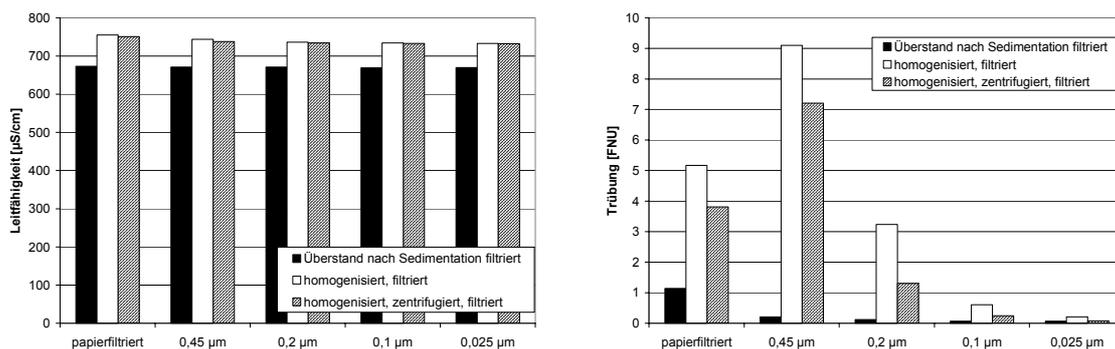
Um Fehler bei der Probenahme auszuschließen fand 07/09 eine zusätzliche Probenahme statt. Die Probe wurde geteilt und auf drei verschiedene Weisen aufbereitet. Alle drei Proben wurden über Nacht in gleichen Probenahmeflaschen gekühlt aufbewahrt. In allen Proben kam es zur Sedimentation des Belebtschlammes. Eine Fraktionierung wurde aus dem Überstand der über Nacht sedimentierten Probe durchgeführt. Die Fraktionierung der beiden anderen Proben erfolgte nach Homogenisierung des Schlammes, wobei eine der Proben vor der Filtration zentrifugiert worden ist.

Es bestätigte sich, dass die fraktionierten Konzentrationen aus dem Überstand der sedimentierten Probe wesentlich geringer als die der homogenisierten und anschließend fraktionierten Proben waren (Abbildung 5.124). Da dies beim CSB und TOC beobachtet wurde, ist ein analytischer Fehler weitgehend unwahrscheinlich, da CSB und TOC unabhängig voneinander und mit verschiedenen Nachweismethoden bestimmt wurden.



**Abbildung 5.124: CSB- und TOC-Analysen der fraktionierten Probe 09/07 nach verschiedenen Aufbereitungsarten**

Inwieweit die Dosierung des Fällmittels einen Einfluss hat, ist ungeklärt. Es hat den Anschein, dass ein Teil des CSB bzw. TOC bei hinreichend langer Sedimentationszeit gebunden wird. Diese Bindung ist vergleichsweise schwach, da nach Homogenisierung der Probe alle membranfiltrierten Konzentrationen ansteigen. Leitfähigkeit und Trübung waren in den homogenisierten Proben signifikant höher als in der sedimentierten Probe (Abbildung 5.125). Nach der Filtration der homogenisierten Proben über 0,45 µm kam es zunächst zu einem Anstieg der Trübung.

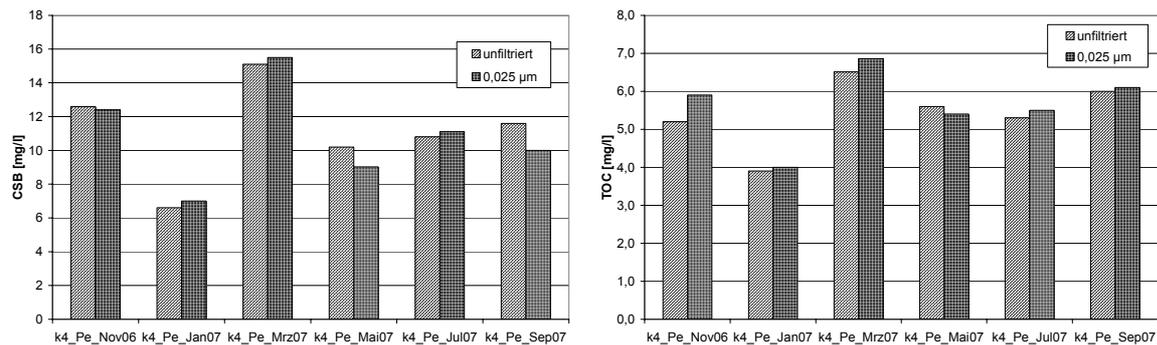


**Abbildung 5.125: Leitfähigkeit und Trübung der fraktionierten Probe 09/07 nach verschiedenen Aufbereitungsarten**

Darüber hinaus wurden von den papierfiltrierten Proben nach Abschluss der Fraktionierung nochmals Leitfähigkeit und Trübung bestimmt. Es wurde beobachtet, dass die Trübung der Proben zunahm und die Leitfähigkeit sich verringerte. Dies spricht auch dafür, dass Ausfällungen stattfinden. Unabhängig davon ist die Aufbereitung ausgehend von der homogenisierten Probe die sinnvollere, da einerseits die Filtration des Belebtschlammes in der Großanlage ebenfalls aus dem homogenisierten Schlamm erfolgt, andererseits die vermutete Ausfällung gelöster Substanzen reversibel ist.

### 5.1.4.6 Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Die Ablaufkonzentrationen der Proben lagen im Untersuchungszeitraum bei weniger als 16 CSB mg/l bzw. < 7 mg TOC/l (Abbildung 5.126). Die Unterschiede innerhalb der Fraktionen liegen im Bereich von Messfehlern. Die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen lagen bei < 5 mg/l; pH-Wert und Leitfähigkeit entsprachen etwa den in den Membranreaktoren ermittelten Werten (Tabelle 5.29).



**Abbildung 5.126: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA K4**

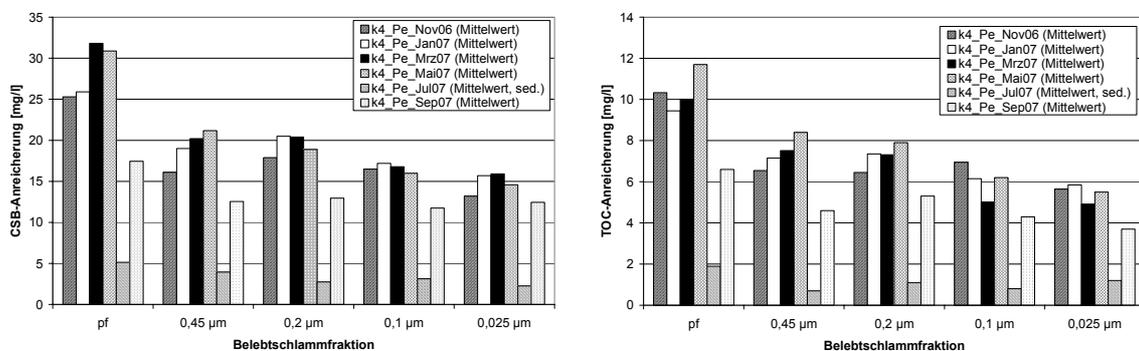
**Tabelle 5.29: Permeatbeschaffenheit der KA K4**

Probe	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	pH-Wert [-]	T [°C]	Leitfähigkeit [µS/cm]
11/06	< 5	7,3	15,9	891
01/07	< 5	7,1	11,3	448
03/07	< 5	7,1	12,8	1.014
05/07	< 5	7,0	16,2	483
07/07	< 5	7,0	20,2	560
09/07	< 5	6,9	17,4	647

Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen wurde für die Belebtschlammfraktionen mit dem Mittelwert aus der unfiltrierten und der über 0,025 µm filtrierten Permeatprobe berechnet. Die Differenzen zwischen dem Permeatmittelwert und den Fraktionen sind deutlich (Abbildung 5.127) und liegen für die membranfiltrierten Proben bei < 20 mg CSB/l und < 8 mg TOC/l.

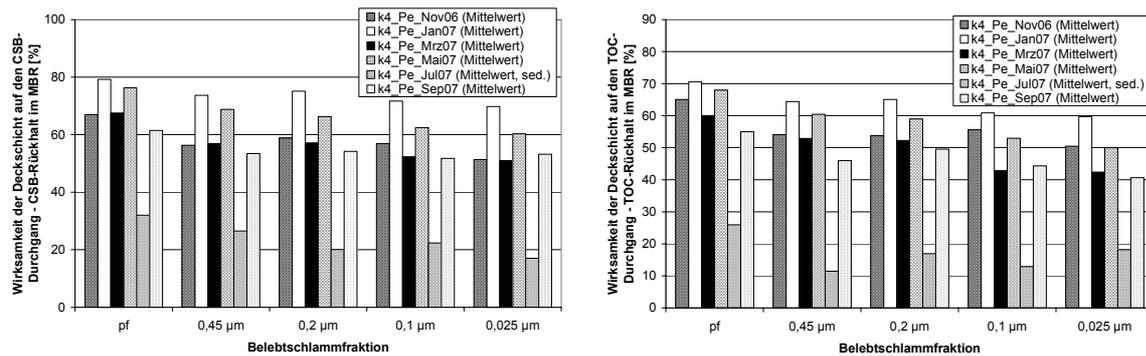
Während sich die ersten vier Proben im Hinblick auf die Anreicherung auf etwa einem Niveau bewegen, liegen die folgenden, insbesondere die Probe 07/07 wesentlich darunter. Die Abweichung der CSB- und TOC-Konzentrationen 07/07 von den übrigen Proben ist in Abschnitt 5.1.4.5 diskutiert worden. Bei Betrachtung

des aus der homogenisierten Probe bestimmten, über 0,45 µm membranfiltrierten CSB (36 mg CSB/l) zeichnet sich mit einer absoluten CSB-Anreicherung in der 0,45 µm-Fraktion von 25 mg CSB/l ein ähnliches Bild ab. Im Vergleich dazu sind die Konzentrationen der Probe 09/07 tatsächlich zurückgegangen. Da in diesem Zeitraum eine Intensivreinigung der Membranen begonnen hatte, ist dies als Ursache dafür anzunehmen, wobei in diesem Zusammenhang die wöchentliche on-Air-Reinigung von zwei Filtrationsstraßen auch einen Einfluss hat, da ein Teil des Belebtschlammes des betreffenden Beckens auf die übrigen drei Belebungsbeckenstraßen verteilt wird und nach Ende der Reinigung von den drei Becken wiederum ein Teil zurückgeführt wird.



**Abbildung 5.127: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA K4**

Unabhängig vom beobachteten Ausmaß der Anreicherung hochmolekularer organischer Stoffe in Anlage K4 bewirkt die sich im Betrieb ausbildende Deckschicht der Membran an allen Untersuchungstagen eine Verengung des Porendurchmessers der Anlage von 0,1 µm auf < 0,025 µm. Beim Vergleich der 0,45 µm-Fraktion mit dem Permeat werden infolge der Deckschicht rd. 60 % des membranfiltrierten Belebtschlammes (Abbildung 5.128) zurückgehalten; im Fall der 0,025 µm-Fraktion rd. 50 %. Dieser CSB bzw. TOC würde unter deckschichtfreiem Betrieb zu gleichen Teilen im Permeat und in der Anlage enthalten sein. Es werden neben der technisch bedingten (Porengröße der Membran; 0,1 µm) partikulären Fraktion oberhalb 0,1 µm, Substanzen angereichert, deren Partikelgröße mindestens bei 0,025 µm liegt.



**Abbildung 5.128: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage K4**

Im Zuge des täglichen Überschussschlammabzugs und der Zwischenreinigung der Membranen stellt sich ein Gleichgewicht zwischen im System angereicherter und mit dem ÜSS ausgetragener CSB bzw. TOC ein. Aufgrund der ähnlichen Charakteristik der Belebtschlammfraktionen war die angereicherte Fracht der einzelnen Fraktionen mit Ausnahme der Probe 07/07 in etwa gleich hoch (Abbildung 5.129, Abbildung 5.130, Tabelle 5.30, Tabelle 5.31). Die Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen ( $K_{NMGS}$ ) beträgt unter Bezug auf das Schlammalter, in Abhängigkeit der Fraktionen, 5,6...9,5 kg CSB/d bzw. 2,1...3,5 kg TOC/d (Tabelle 5.32, Tabelle 5.33, Abbildung 5.131) oder, bezogen auf den oTS-Gehalt 129 mg CSB/(kg oTS·d) in der 0,45 µm-Fraktion und 77 mg CSB/(kg oTS·d) in der 0,025 µm-Fraktion (Tabelle 5.32, Tabelle 5.33, Abbildung 5.132) und ist damit im Vergleich zur Anlage K2 (gleicher Membrantyp) trotz des geringeren Schlammalters wesentlich höher. Bei alleiniger Betrachtung der aus dem Überstand der sedimentierten Probe bestimmten Werte stellt sich ein ähnliches Bild ein. Ungeachtet dessen ist die anhand der Probe 07/07 bestimmte Anreicherung höher als bei K2.

**Tabelle 5.30: CSB-Anreicherung in der KA K4 (Mittelwerte aller Proben)**

Einheit	Belebtschlammfraktion			
	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	242	164	167	144
[g/(kg oTS)]	3,3	2,2	2,3	2,0

**Tabelle 5.31: TOC-Anreicherung in der KA K4 (Mittelwerte aller Proben)**

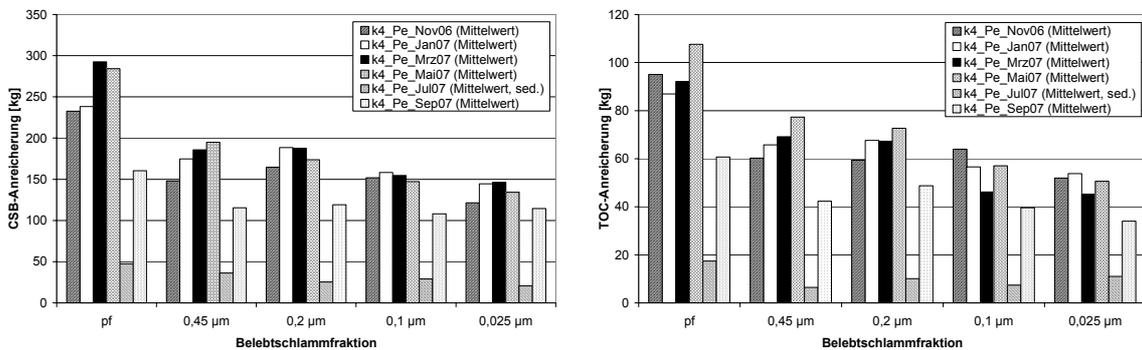
	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	88	63	63	53
[g/(kg oTS)]	1,2	0,9	0,9	0,7

**Tabelle 5.32: CSB-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen**

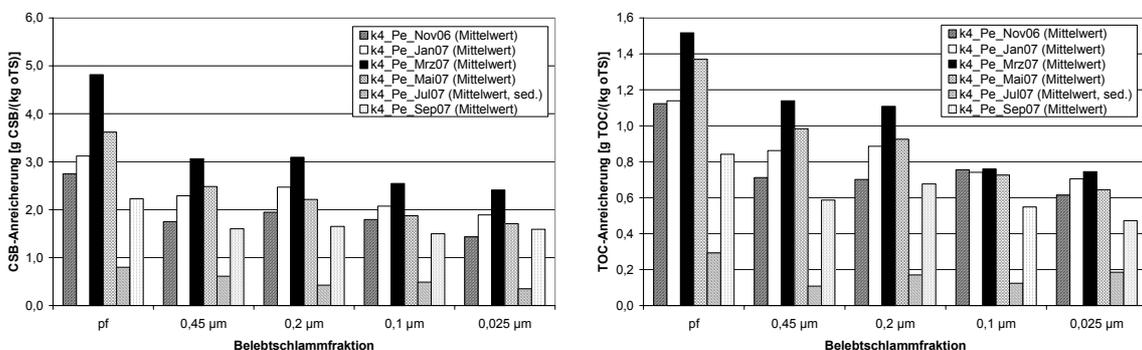
	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg/d]	9,5	6,4	6,5	5,6
[mg/(kg oTS·d)]	129	88	89	77

**Tabelle 5.33: TOC-Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen**

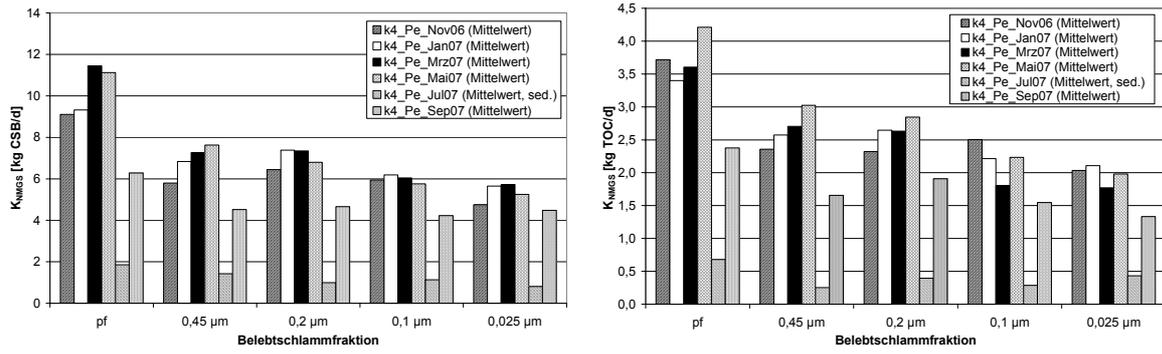
	Belebtschlammfraktion			
Einheit	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg/d]	3,5	2,5	2,5	2,1
[mg/(kg oTS·d)]	47	34	34	28



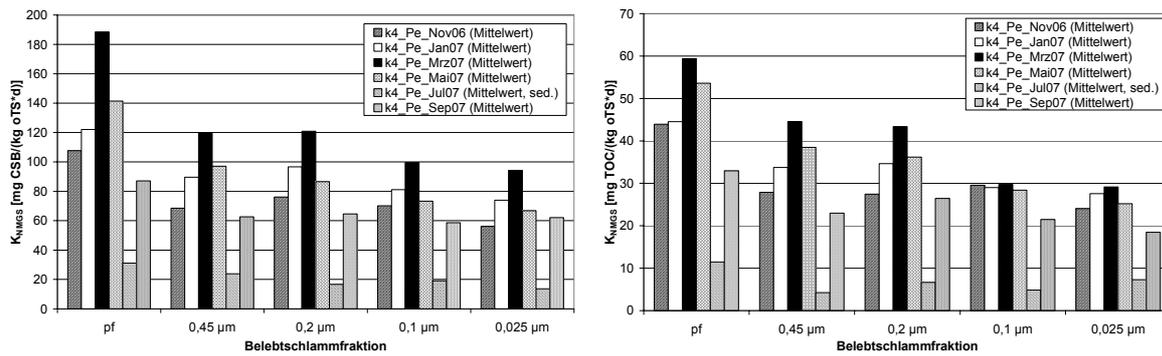
**Abbildung 5.129: Angereicherte Fracht in der KA K4 am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.130: Spezifische Anreicherung in der KA K4 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.131: Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen**

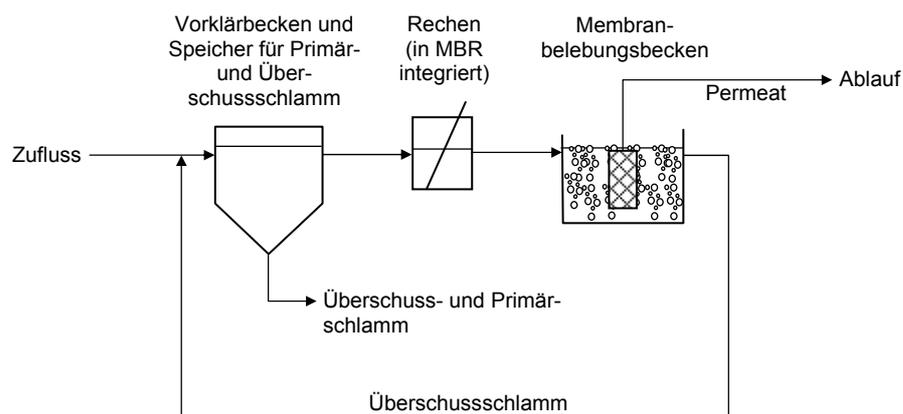


**Abbildung 5.132: Spezifische Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen**

## 5.1.5 Anlage K5

### 5.1.5.1 Anlagenbeschreibung

Die kommunale Kläranlage K5 (Abbildung 5.133, Inbetriebnahme 2004) war zum Zeitpunkt der Untersuchungen (10/2006...06/2007) bei einer Ausbaugröße von 230 EW nahezu vollständig ausgelastet. Industrielle Einleiter waren nicht vorhanden. Das Einzugsgebiet ist im Trennsystem erschlossen. Der mittlere Zufluss zur Kläranlage betrug im Jahr 2005 rd. 22,5 m<sup>3</sup>/d, im Jahr 2006 rd. 24,5 m<sup>3</sup>/d. Die Kläranlage ist als simultane aerobe Schlammstabilisierungsanlage konzipiert. Das mittlere Schlammalter lag bei einem ÜSS-Abzug im Jahr 2005 von i. M. 0,38 m<sup>3</sup>/d bei rd. 70 d; im Jahr 2006 erreichte es infolge eines geringeren ÜSS-Abzugs von i. M. 24 m<sup>3</sup>/d rd. 110 d. An den Untersuchungstagen lag das Schlammalter aufgrund des unregelmäßigen ÜSS-Abzugs theoretisch bei 130...230 d.

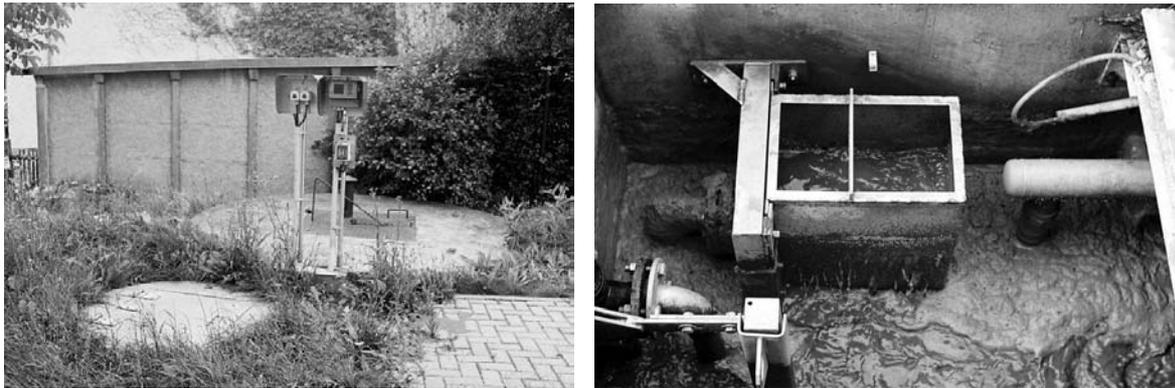


**Abbildung 5.133: Vereinfachte schematische Darstellung der Kläranlage K5**

Die mechanische Reinigungsstufe umfasst ein Vorklärbecken (Einkammergrube, 40 m<sup>3</sup>), das gleichzeitig als Schlamm-speicher für Primär und Überschussschlamm dient und einen Rechen mit einem Stababstand von 3 mm, der direkt im Membranbelebungsbecken installiert ist (Abbildung 5.134). Die Schlammabfuhr erfolgt viertel- bis halbjährlich im Rahmen der Membranreinigung zur zentralen kommunalen Kläranlage (17.500 EW, konventionelles Belebtschlammverfahren, simultane aerobe Schlammstabilisierung).

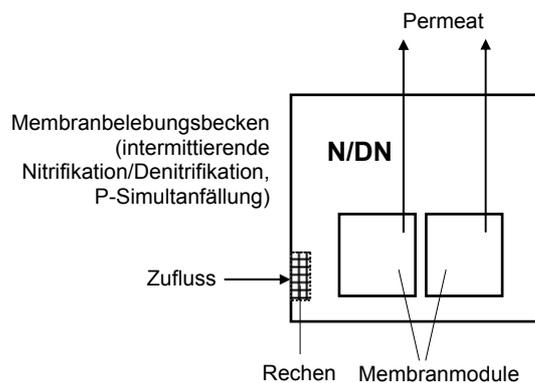
Die biologische Behandlung findet in einem abgedeckten Becken statt (26 m<sup>3</sup>), das gleichzeitig zwei Membranfiltrationsmodule enthält (Abbildung 5.135,

Abbildung 5.136). Nitrifikation und Denitrifikation sind zeitlich getrennt; die Phasen werden bedarfsgerecht angepasst. Eine simultane P-Elimination wird durch Fällung mit Eisen-III-chlorid durchgeführt. Erfahrungen des Betreibers haben gezeigt, dass der anfangs angestrebte Ablaufwert für  $P_{ges.}$  infolge des hohen Fällmitteleinsatzes zur Verkürzung der Standzeit der Membranen führte, so dass eine Erhöhung des Ablaufwertes zugelassen wurde.



**Abbildung 5.134: Mechanische Reinigungsstufe der Anlage K5 (links im Hintergrund: Vorklärbecken, rechts: Rechen im Membranbelebungsbecken)**

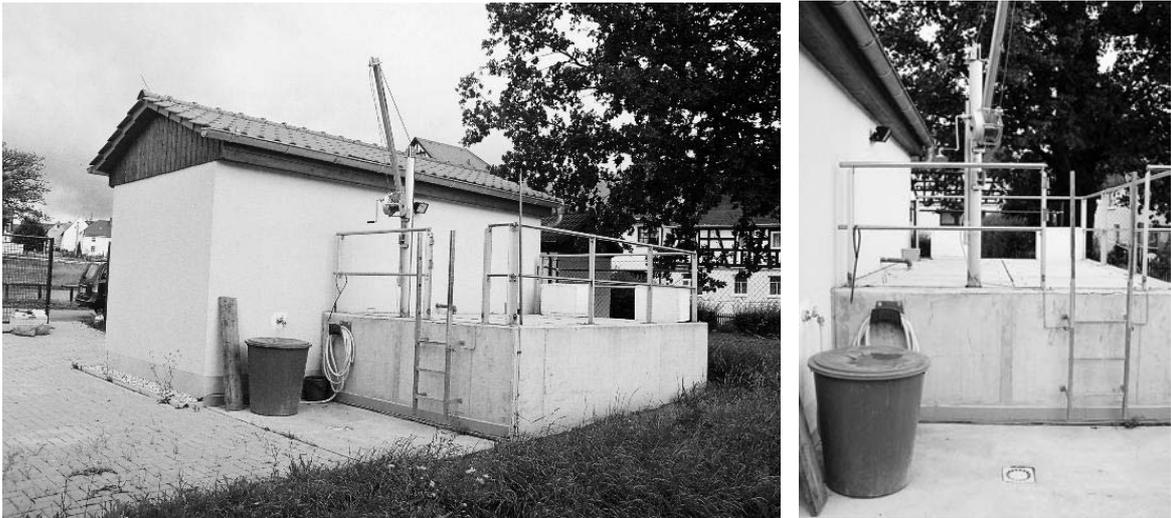
Die zwei installierten Membranfiltrationsmodule enthalten Plattenmembranen der Fa. Kubota mit einer Filtrationsfläche von insgesamt 320 m<sup>2</sup> mit einer Porenweite von 0,4 µm. Der Betriebszyklus der Membranen besteht aus Filtration des Belebtschlammes (9 min) und anschließender Filtrationspause (1 min). Beginn und Ende des Filtrationsbetriebes sind füllstandsabhängig.



**Abbildung 5.135: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage K5**

Die Reinigung der Membranmodule erfolgt etwa vierteljährlich mit Oxalsäure und Natriumhypochlorit. Die Arbeiten dauern etwa 8 h und erfordern eine Außerbe-

triebnahme der Kläranlage. Da bis zum Ende der Untersuchungen kein Reinigungsschacht vorhanden war, wurde die Reinigung insitu durchgeführt, was zu einer Schädigung des Schlammes führte (Weißverfärbung des Belebtschlammes, Nitrifikationshemmung), die einen Austausch des Belebungsbeckeninhaltes notwendig machte. Das Anfahren erfolgte mit Rücklaufschlamm der zentralen Kläranlage.



**Abbildung 5.136: Biologische Reinigungsstufe der Anlage K5 mit Betriebsgebäude**

Der letzte Reinigung vor Beginn der Probenahme fand 07/06 statt. Im Zeitraum der Untersuchungen wurde die Membranen eine Woche vor der Probenahme 12/06 sowie zwischen den Probenahmen 04/07 und 06/07 gereinigt.

### 5.1.5.2 Probenahme

Die Anlage K5 wurde im Abstand von 2 Monaten 10/06, 12/06, 02/07, 04/07 und 06/07 beprobt. Die Zulaufproben wurden als qualifizierte Stichproben aus dem Zulaufschacht entnommen, die Belebtschlammproben als Stichproben aus dem Membranbelebungsbecken, die Permeatproben ebenfalls als Stichproben aus dem Ablaufschacht der Kläranlage.

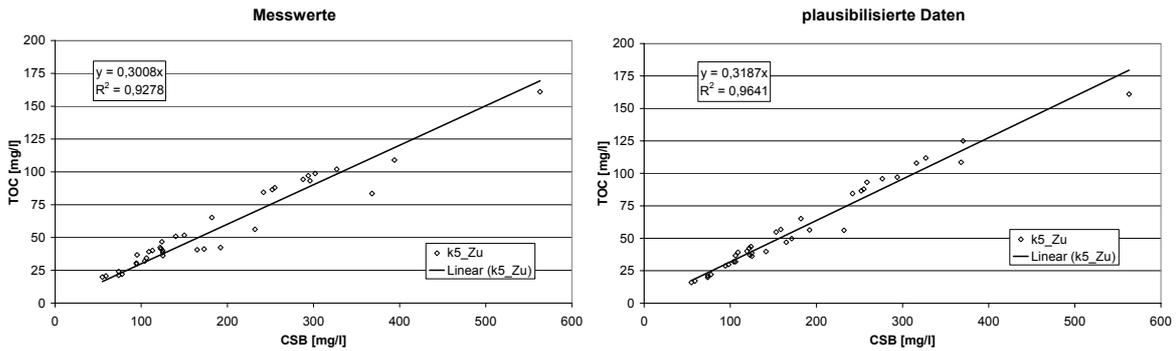
### 5.1.5.3 Zuflussfraktionierung

Während der Probenahme herrschten 10/06 und 12/06 Trockenwetterbedingungen, 02/07, 04/07 und 06/07 Regenwetterbedingungen. Der Einfluss der Wetterbedingungen auf die entnommenen Proben ist trotz des vergleichsweise kleinen, im Trennsystem erschlossenen Einzugsgebietes erkennbar (Tabelle 5.34, Abbildung 5.139). Einige vor Ort bestimmte Abwasserkenwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die CSB-, BSB<sub>5</sub>- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 5.18 dargestellt. Die pH-Werte lagen im für kommunales Abwasser typischen neutralen bis leicht basischen Bereich. Das TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,30 (CSB/TOC = 3,3), nach der Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) bei 0,32 (CSB/TOC = 3,1) (Tabelle 5.34).

**Tabelle 5.34: Charakterisierung des Zuflusses zur KA K5**

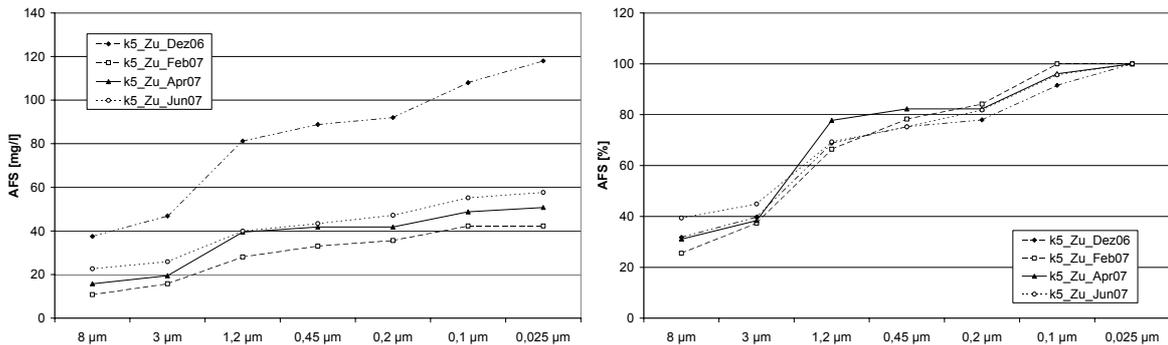
Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unfiltr.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[μS/cm]	[-]	[°C]
10/06	298	669	321	226	1.365	7,5	16,1
12/06	247	563	296	128	1.261	7,8	9,6
02/07	127	368	125	126	915	7,7	7,0
04/07	106	294	122	n. b.	854	8,3	12,8
06/07	71	232	73,8	94	722	7,4	16,9

n. b. ... nicht bestimmt



**Abbildung 5.137: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA K5**

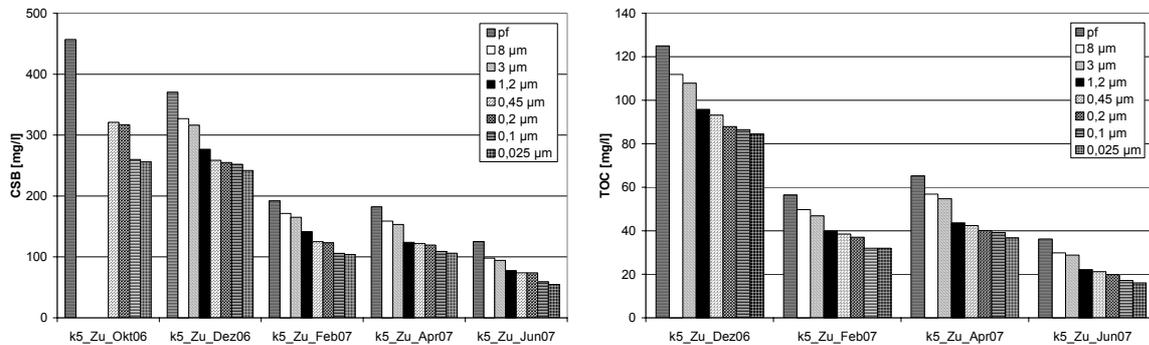
In Abbildung 5.138 ist die Änderung der abgeschiedenen partikulären Substanzen als AFS im Bereich 8 µm bis 0,025 µm dargestellt. Die absoluten Werte zeigen kein einheitliches Bild, lassen aber auf einen ähnlichen Verlauf schließen, der sich beim Vergleich der relativen Werte, unabhängig von den Zuflussbedingungen, einstellt. Der Unterschied innerhalb einer Fraktion beträgt maximal 15 %. Die AFS der Probe 10/06 wurden nicht bestimmt.



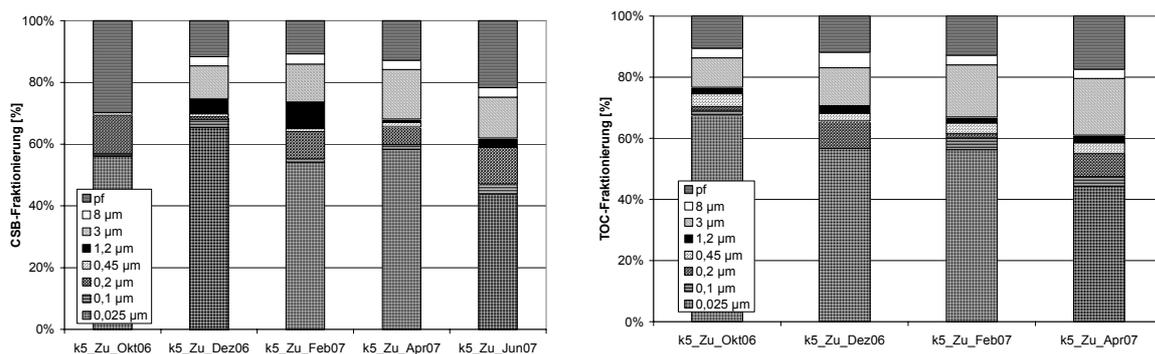
**Abbildung 5.138: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage K5**

Die 8 µm-, 3 µm- und 1,2 µm-Fractionen der Probe 10/06 wurden nicht bestimmt, ebenso die gesamte TOC-Fraktionierung der Probe 10/06. Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.139, Abbildung 5.140). Die 8 µm-Fraktion liegt rd. 10...20 % unterhalb der nach der Filtration über Papierfilter analysierten TOC- bzw. CSB-Konzentrationen. Die Breite der 8 µm-Fraktion beträgt 3,3...3,9 % beim CSB und 3,7...5,7 % beim TOC. Die 3 µm-Fraktion variiert stärker und liegt beim TOC bei 11...23 %, beim CSB reicht sie von 12,5...19 %. Die 1,2 µm-Fraktion ist beim TOC gleichmäßig ausgebildet (3...4 %), beim CSB schwankt sie in einem relativ breiten Rahmen von 2...12 %. Die 0,45 µm-Fraktion ist beim CSB relativ gering (0...2,2 %), beim TOC mit 4...6 % et-

was höher. Im Gegensatz dazu weist die 0,2 µm-Fraktion unabhängig von den Zuflussbedingungen deutliche Schwankungen auf (CSB: 1...20 %, TOC: 2...14 %). Die Summe aus 1,2 µm, 0,45 µm und 0,2 µm-Fraktion liegt bei rd. 20...30 % der papierfiltrierten Konzentrationen. Die Unterschiede sind den Analysemethoden und dem höheren Fehlerbereich beim CSB zuzuschreiben.



**Abbildung 5.139: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage K5**

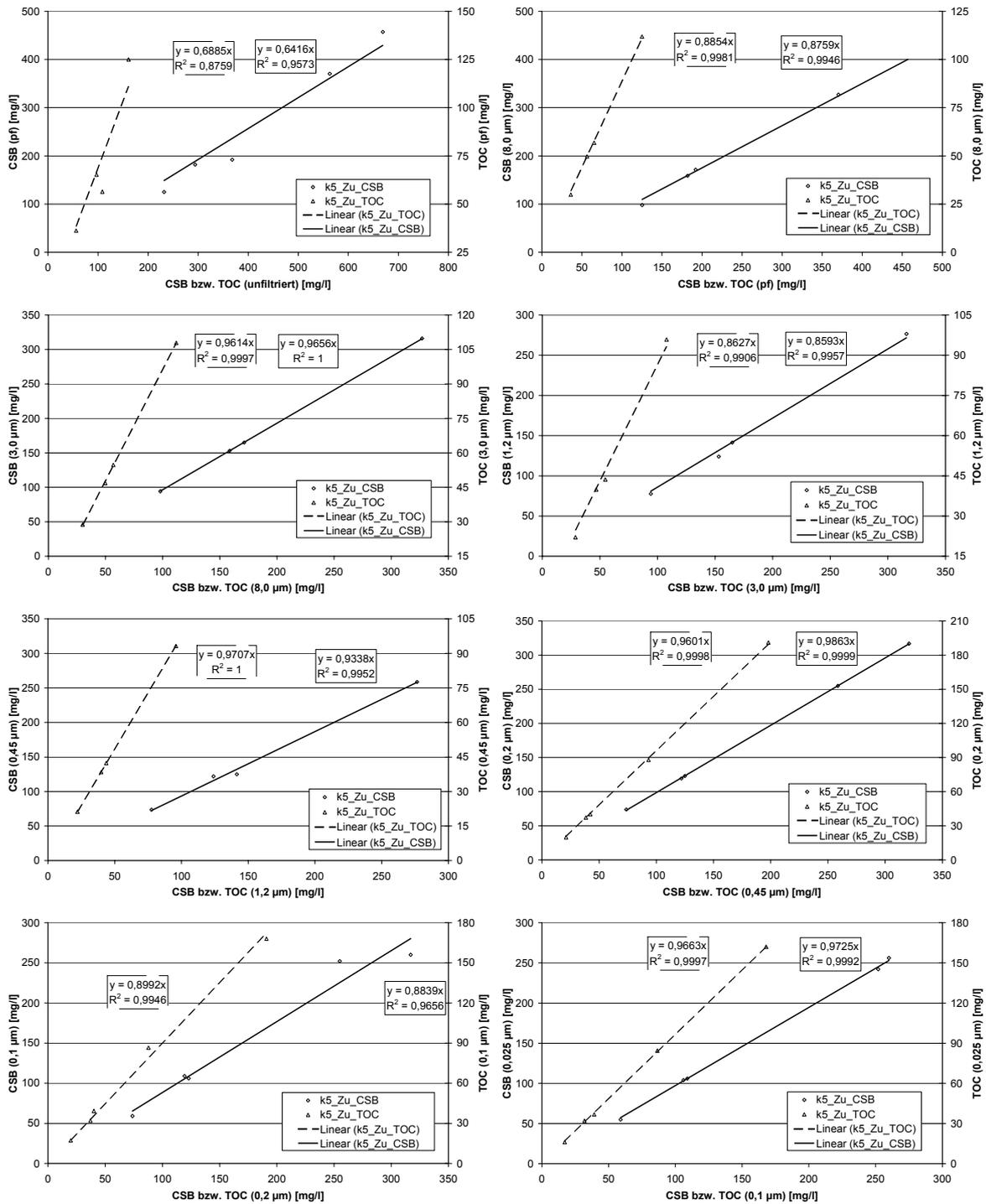


**Abbildung 5.140: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage K5 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

Zwischen der 0,2 µm- und der 0,45 µm-Fraktion sind ebenso wie zwischen der 0,1 µm- und 0,025 µm-Fraktion nur geringe Unterschiede erkennbar. Im Vergleich zur papierfiltrierten Probe nimmt die 0,025 µm-Fraktion einen großen Anteil ein, weist aber auch eine relativ breite Streuung im CSB und im TOC von 45...70 % auf. Wird die in der Abwassertechnik gebräuchliche 0,45 µm-Fraktion als Bezugswert für membranfiltrierte Proben gewählt, so sind mindestens 80 % (80...95 %) des 0,45-µm Durchgangs kleiner als 0,1 µm und mindestens 75 % (75...95 %) des 0,45-µm Durchgangs kleiner als 0,025 µm (Abbildung 5.140).

Die größten Änderungen der Konzentrationen treten zwischen der papierfiltrierten und der 8 µm-Probe (CSB: 12 %, TOC rd. 11 %), zwischen 3 µm- und 1,2 µm-

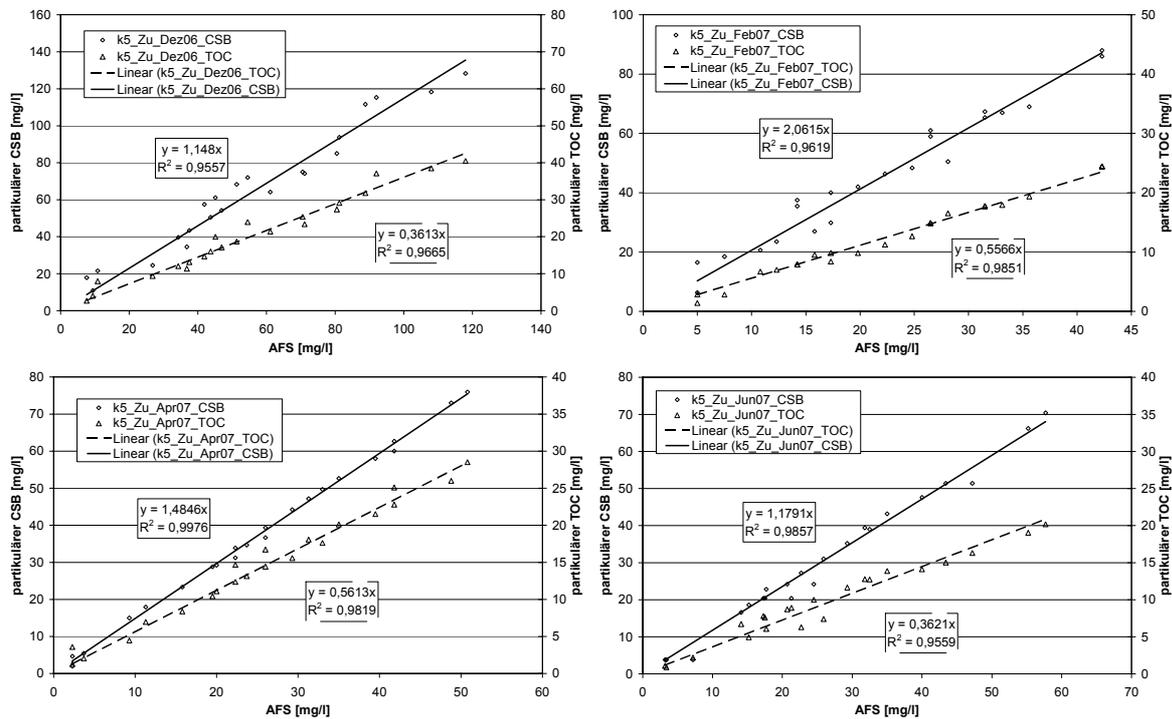
Fraktion (CSB und TOC: 14 %) und zwischen der 0,2 µm- und 0,1 µm-Fraktion (CSB: 12 %, TOC: 10 %) auf (Abbildung 5.141).



**Abbildung 5.141: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K5**

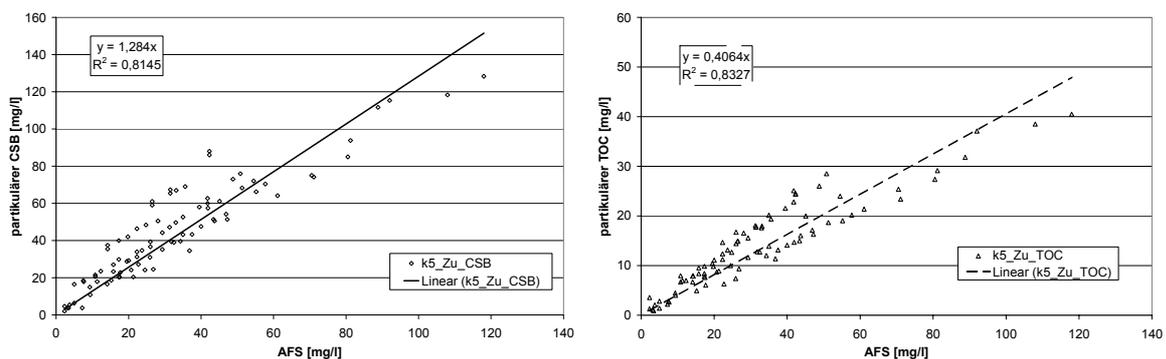
Die lineare Abhängigkeit aller Fraktionen deutet darauf hin, dass die Abwasserbeschaffenheit homogen ist und nur durch die Verdünnung mit Fremdwasser, d. h. Niederschlagswasser beeinflusst wird. Die Bestimmung von partikulärem CSB

bzw. partikulärem TOC und deren Korrelation mit den AFS führte bei allen untersuchten Proben zu einer linearen Abhängigkeit (Abbildung 5.142).



**Abbildung 5.142: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der Anlage K5**

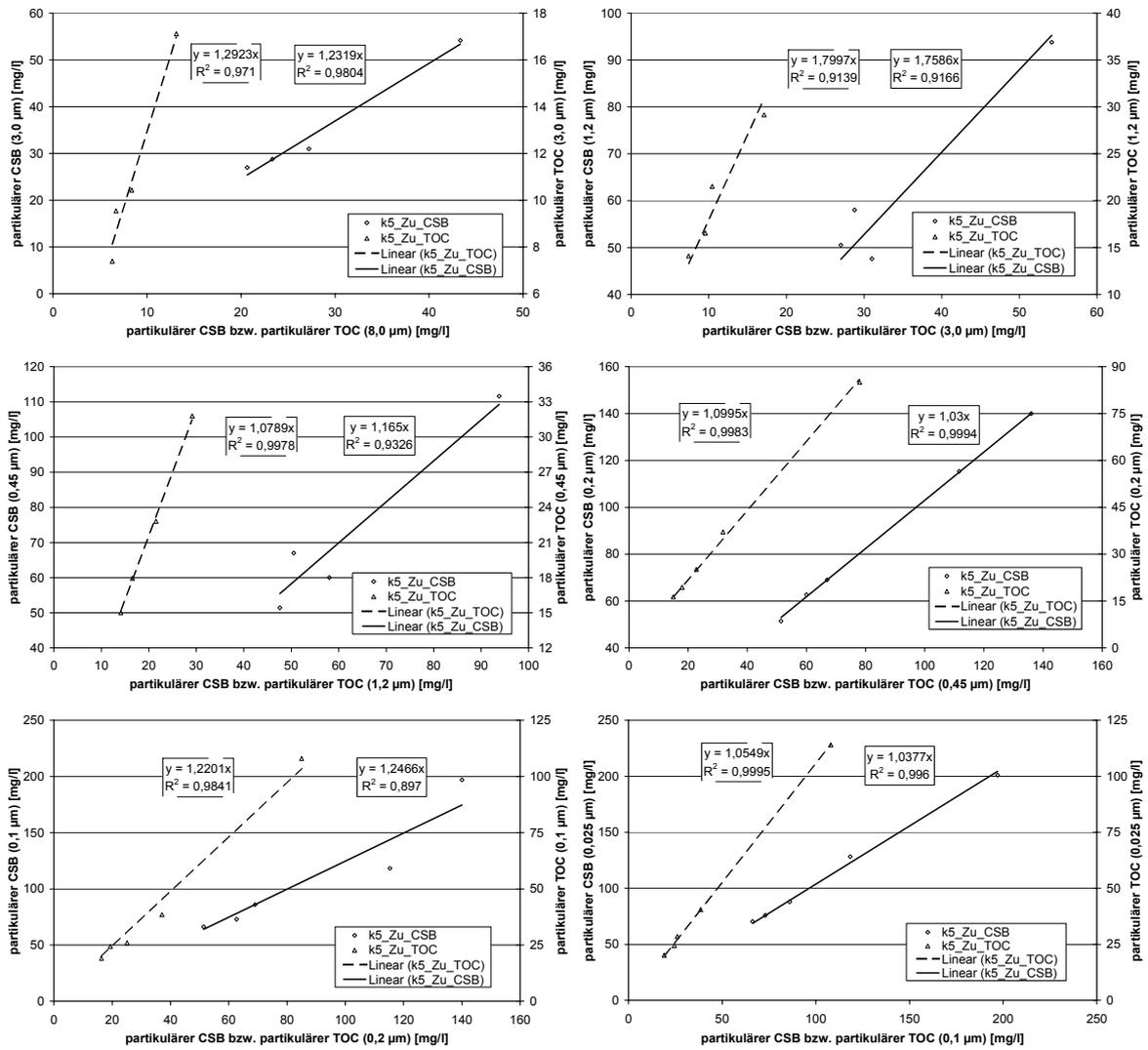
Während sich in den einzelnen Proben eine klare Korrelation zwischen partikulärem CSB bzw. TOC und AFS abzeichnet, ist bei der zusammenfassenden Darstellung aller Werte ein Auseinanderstreben zu erkennen (Abbildung 5.143).



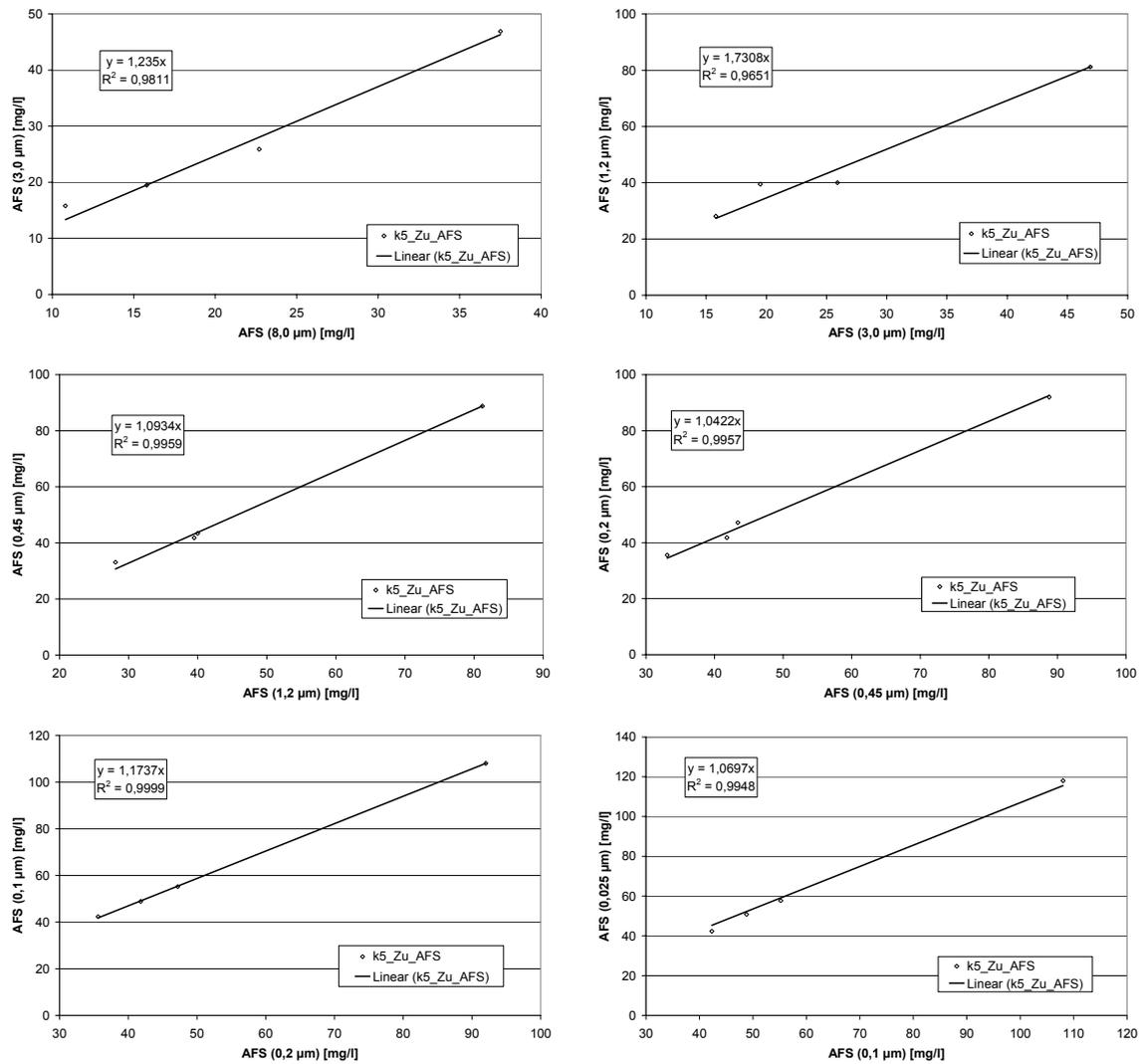
**Abbildung 5.143: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der Anlage K5 (alle Proben)**

Der Vergleich der Änderung des partikulären CSB sowie des partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen mit den zu diesen Fraktionen gehörenden AFS zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der Anstiege aller drei Parameter

(Abbildung 5.144, Abbildung 5.145), wenngleich dieser Zusammenhang durch Auswertung weiterer Proben zu erhärten ist.



**Abbildung 5.144: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage K5**



**Abbildung 5.145: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage K5 (Fortsetzung)**

#### 5.1.5.4 Fraktionierung des Belebtschlamm

Der TS-Gehalt des Belebtschlammes der untersuchten Proben lag im Bereich von 13,2...22,0 g TS/l, der oTS-Gehalt zwischen 55 % TS und 69 % TS (Tabelle 5.35). Der Schwankungsbereich des TS-Gehaltes ist relativ groß und wird maßgeblich durch den im Zuge der Membranreinigung erforderlichen Austausch des Belebungsbeckeninhaltes mit Rücklaufschlamm aus einer konventionellen Kläranlage beeinflusst (vgl. Abschnitt 5.1.5.1). Der TS-Anstieg von Probe 10/06 auf 12/06 von 13,3 g TS/l auf 22 g TS/l ist auf den eine Woche vor Probenahme 12/06 vorgenommenen Austausch des Schlammes zurückzuführen. Im Verlauf der folgenden Probenahmen (02/07, 04/07) sinkt der TS-Gehalt aufgrund ÜSS-Abzug und einer zur Aufrechterhaltung des hohen TS-Gehaltes zu geringen organischen Belastung auf einen für kommunale Membranbelebungsanlagen nicht untypischen Wert von 13 g TS/l. Beim vor Probenahme 06/07 stattgefundenen Schlammaustausch wurde ein ähnlicher TS-Gehalt in der Anlage eingestellt. Die temperaturnormierte Grundatmung ( $OVC_G + OVN_G$ ) lag im Bereich von 1,7 ...5,0 mg O<sub>2</sub>/(g oTS·h) und zeigte damit für stabilisierten Schlamm typische Werte von < 5 mg O<sub>2</sub>/(g oTS·h). Die Temperatur wies jahreszeitlich bedingte Schwankungen von 8,7...18,5 °C auf. Die Leitfähigkeit erreichte in Abhängigkeit der Zuflussverhältnisse (TW, RW) 625...1.008 µS/cm. Der pH-Wert war mit 7,1...7,7 relativ stabil.

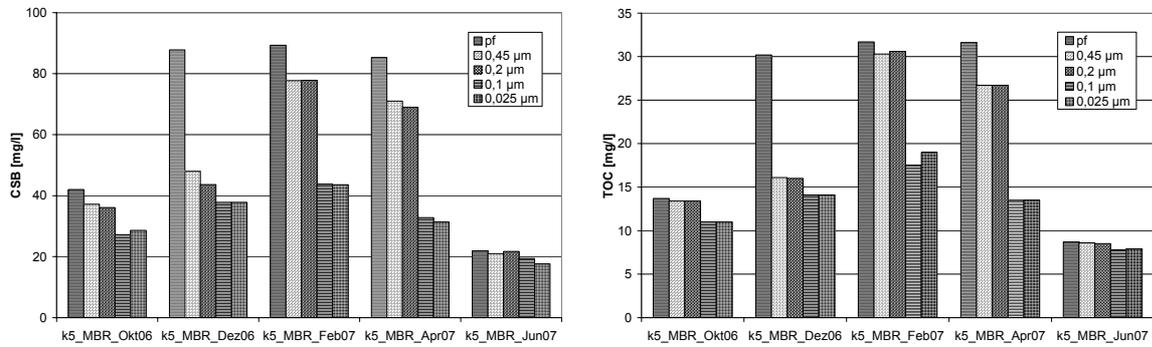
**Tabelle 5.35: Kennwerte der Membranbelebungsstufe der Anlage K5**

Probe	TS	oTS	oTS	Atmung $OVC_G + OVN_G$	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg O}_2}{\text{g oTS} \cdot \text{h}}$	[-]	[°C]	[µS/cm]
10/06	13,3	7,3	55	n. b.	7,5	17,2	1.008
12/06	22,0	14,6	66	1,7	7,7	11,5	756
02/07	17,6	12,2	69	3,0	7,1	8,7	742
04/07	12,8	8,6	67	1,9	7,2	13,7	890
06/07	13,2	7,7	58	5,0	7,2	18,5	625

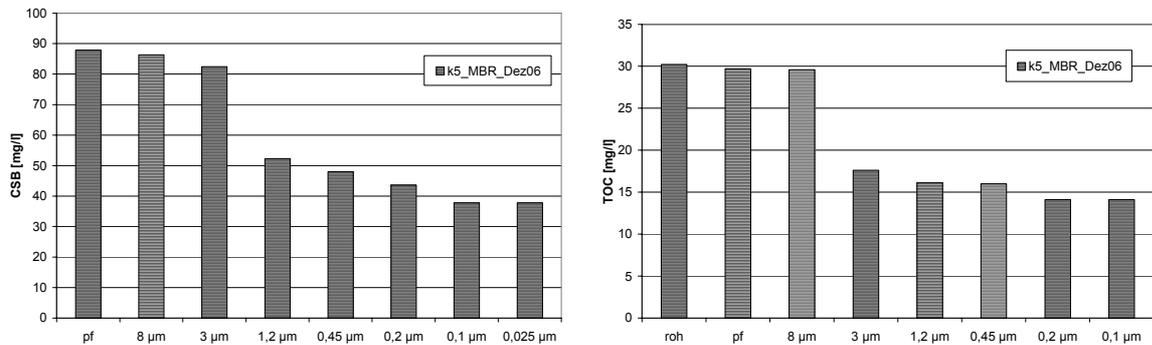
n. b. ... nicht bestimmt

Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlammes unterliegen einem teils ausgeprägten Verlauf, dessen Differenz insbesondere beim Vergleich der 0,45 µm- mit der 0,025 µm-Fraktion der Probe 02/07 und der Probe 04/07 bis zu

34 mg CSB/l bzw. bis zu 13 mg TOC/l beträgt (Abbildung 5.146, Abbildung 5.147). Die Konzentrationsunterschiede der Proben 10/06 und 06/07 sind mit 3...8 mg CSB/l wesentlich geringer.

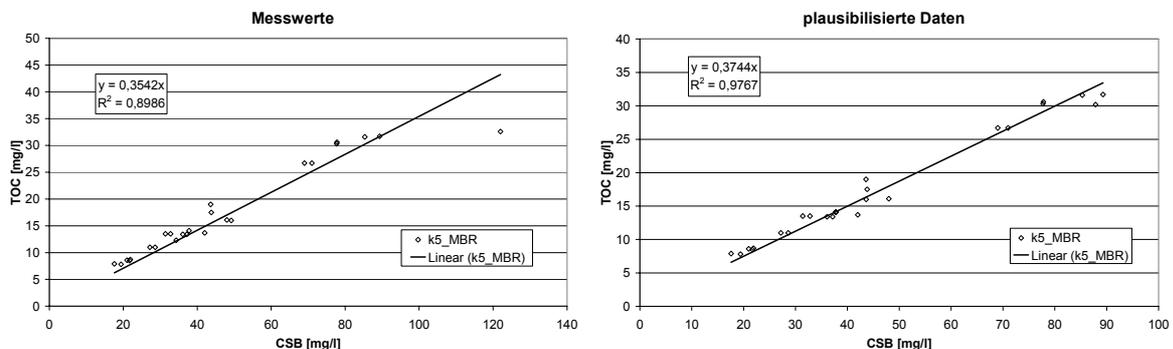


**Abbildung 5.146: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes der Membranbelebungsstufe der KA K5**



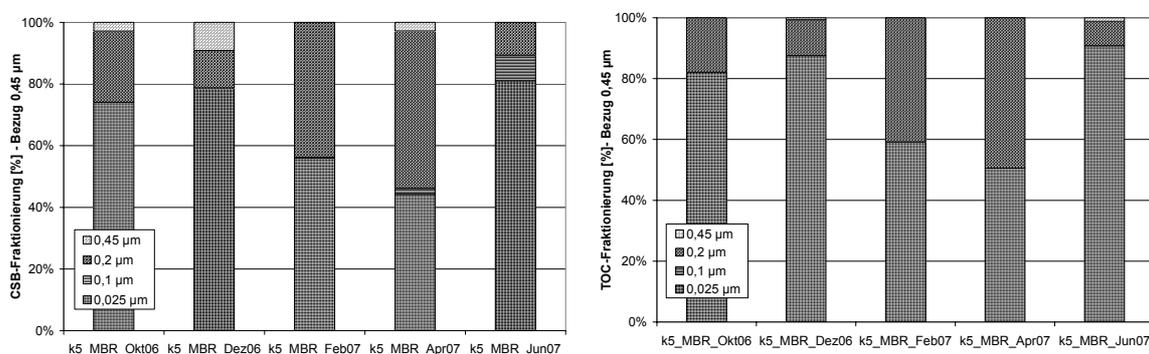
**Abbildung 5.147: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes der Membranbelebungsstufe 12/06 der KA K5**

Das TOC/CSB-Verhältnis aller Proben liegt bei 0,35 bzw. CSB/TOC bei 2,8 (Abbildung 5.148). Nach Plausibilisierung der Probe 12/06 (vgl. Abschnitt 4.1.4) durch zusätzliche Erfassung der 8 µm-, 3 µm- und 1,2 µm-Fractionen liegt das TOC/CSB-Verhältnis bei 0,37 bzw. CSB/TOC bei 2,7 (Abbildung 5.148).



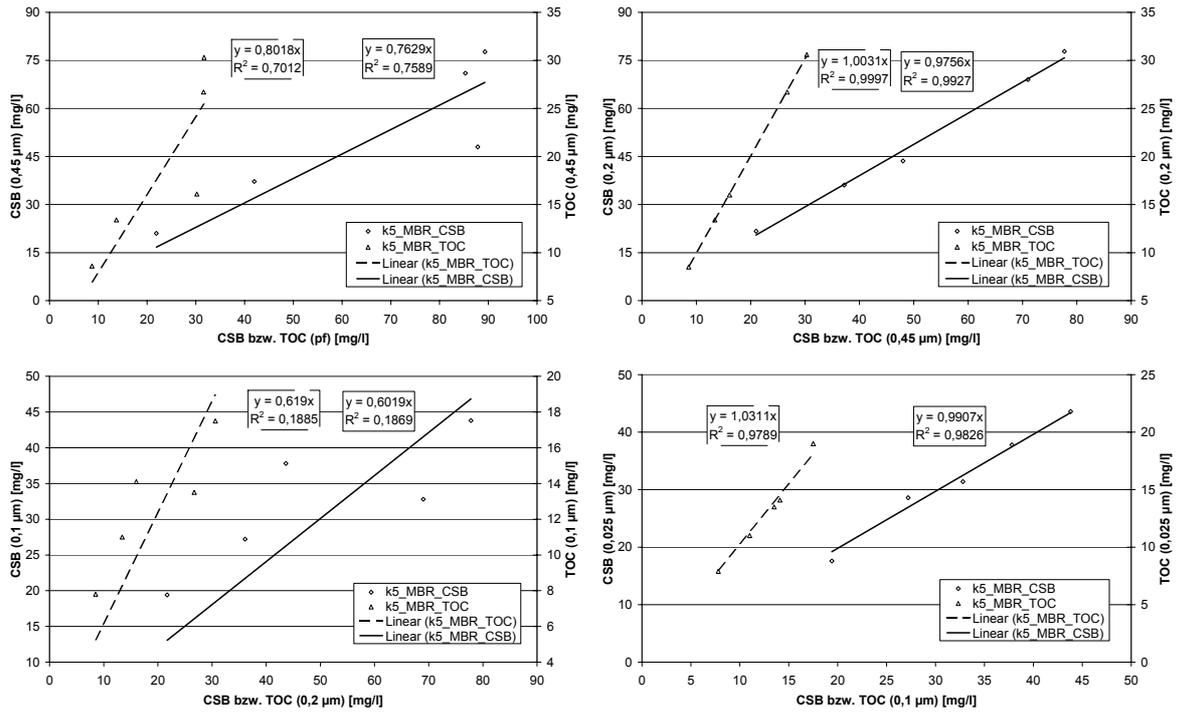
**Abbildung 5.148: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes der Membranbelebungsstufe der KA K5**

Der überwiegende Teil des membranfiltrierten Belebtschlamm (0,45  $\mu\text{m}$ ) der Proben 10/06, 12/06 und 06/07 besteht zu > 80 % aus Substanzen mit einer Größe von weniger als 0,025  $\mu\text{m}$  (Abbildung 5.146, Abbildung 5.149). In Probe 02/07 und 04/07 sinkt der Anteil, bezogen auf die 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion, auf 60 % und 50 %. Dem entgegen vergrößert sich die 0,2  $\mu\text{m}$ -Fraktion von 10 % auf bis zu 50 %. Die Ursache dafür besteht in der Umwandlung von partikulären Substanzen oberhalb der 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion (Abbildung 5.147) in Substanzen mit einer Partikelgröße zwischen 0,2  $\mu\text{m}$  und 0,1  $\mu\text{m}$  infolge der Verringerung des TS-Gehaltes im Belebungsbecken von 12/06 bis 04/07.

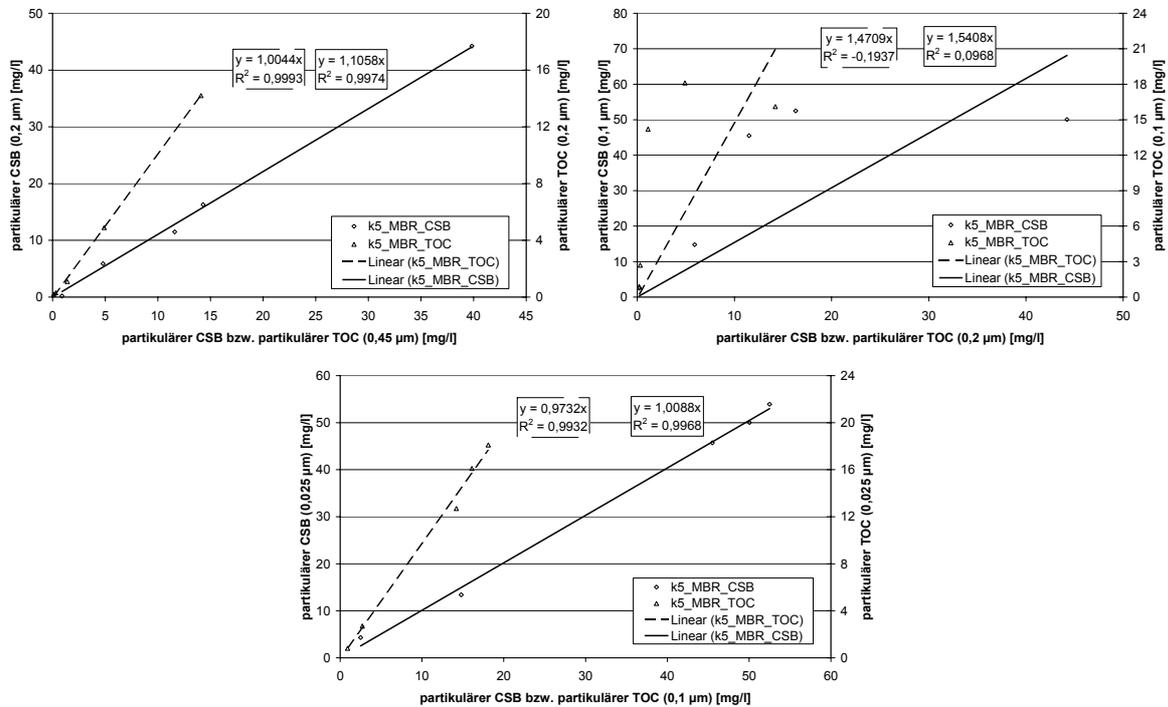


**Abbildung 5.149: Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fraktionen im Belebtschlamm der Membranbelebungsstufe der KA K5 (Bezug: 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion)**

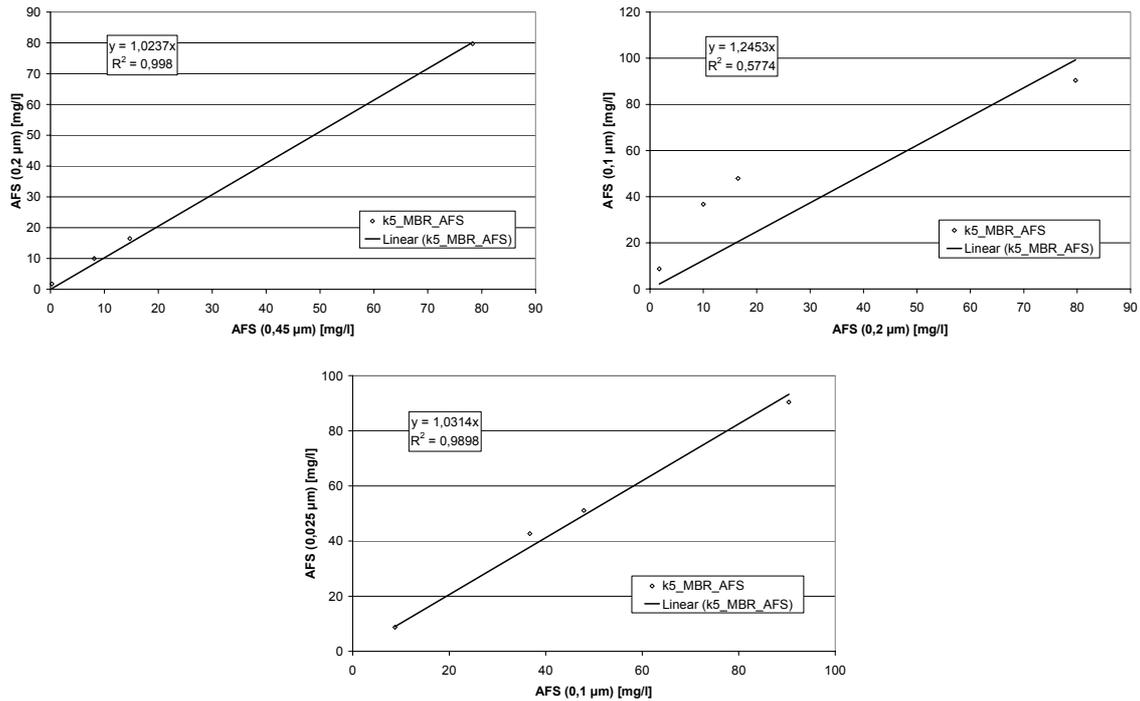
Der Unterschied zwischen der 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion und der 0,2  $\mu\text{m}$ -Fraktion ist mit < 10 % gering; die 0,1  $\mu\text{m}$ -Fraktion ist noch schwächer ausgeprägt. Die Unterschiede zwischen der Verteilung der CSB- und TOC-Fraktionen sind auf die verschiedenen Bestimmungsmethoden und deren spezifische Fehler zurückzuführen. Ein linearer Zusammenhang zwischen den CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen ist infolge der Verschiebung des Verhältnisses der partikulären Substanzen zwischen 0,2  $\mu\text{m}$ - und 0,1  $\mu\text{m}$ -Fraktion nicht immer nachweisbar (Abbildung 5.150, Abbildung 5.151, Abbildung 5.152).



**Abbildung 5.150: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen im Belebtschlamm der Membranbelebungsstufe der KA K5**

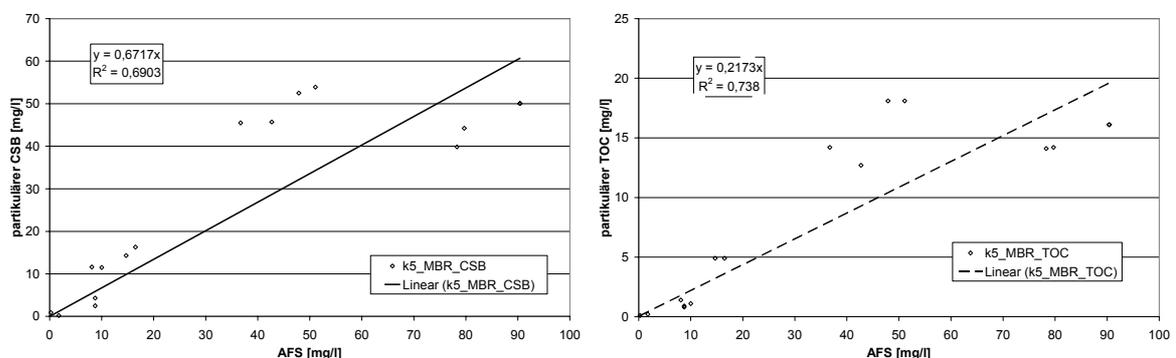


**Abbildung 5.151: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der Anlage K5**

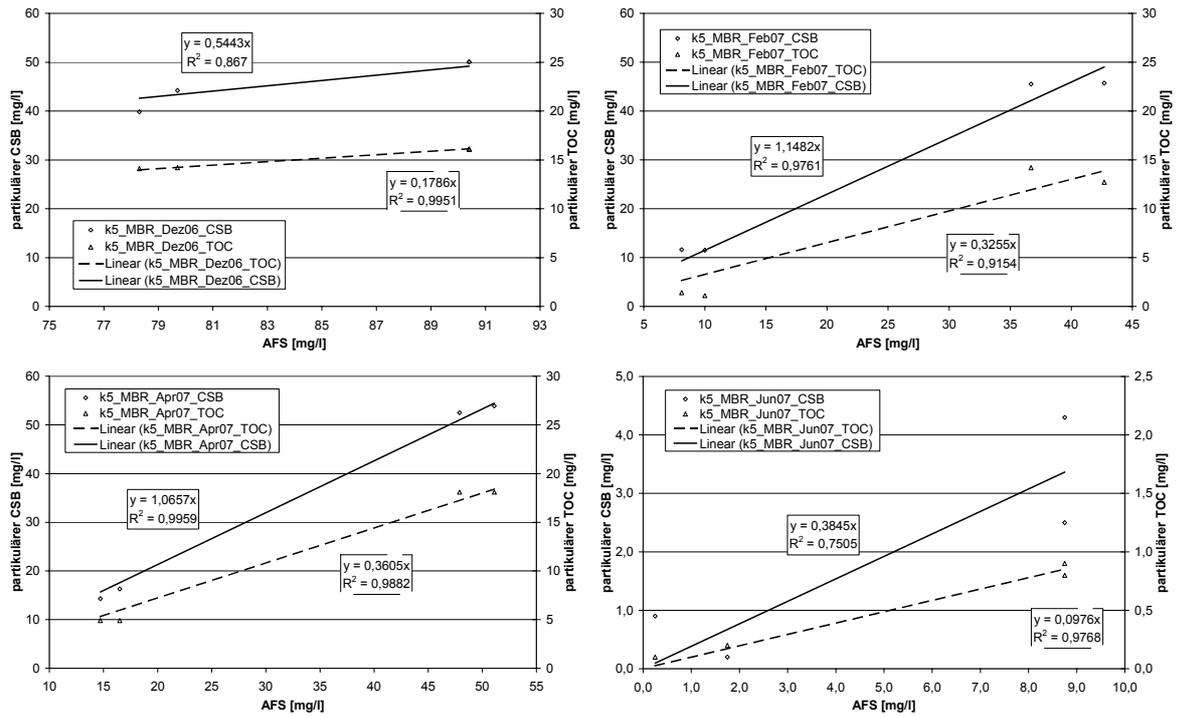


**Abbildung 5.152: Änderung der AFS aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der Anlage K5**

Ein Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. TOC konnte im Regelfall für die Einzelproben nachgewiesen werden (Abbildung 5.154). Beginnend von Probe 12/06 ist, im Zuge der Verringerung des TS-Gehaltes in der biologischen Behandlungsstufe, ein Anstieg des Verhältnisses von partikulärem CSB bzw. TOC zu den AFS bis zum Schlammaustausch nach 04/07 zu beobachten. Aufgrund dessen besteht kein Zusammenhang zwischen den partikulären organischen Substanzen und der AFS aller Proben (Abbildung 5.153).



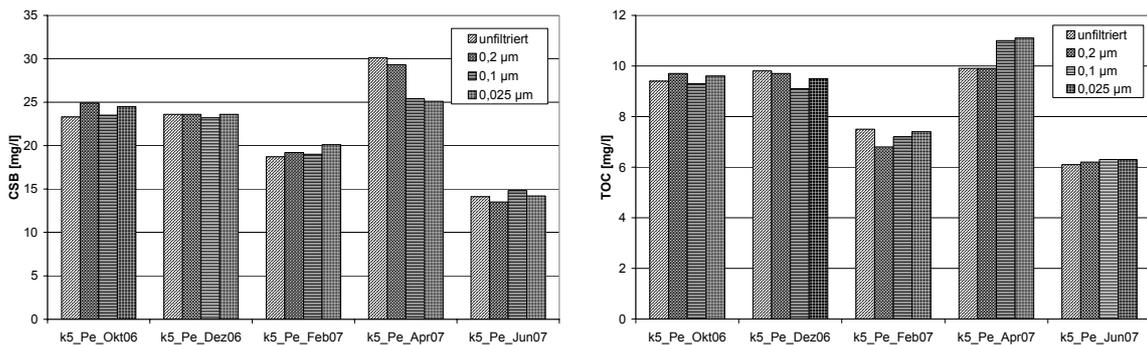
**Abbildung 5.153: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben der Membranbelebungsstufe der KA K5**



**Abbildung 5.154: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB der Belebtschlammproben**

### 5.1.5.5 Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Die CSB-Ablaufkonzentrationen lagen im Untersuchungszeitraum zwischen 14 mg CSB/l und 30 mg CSB/l bzw. bei 6...11 mg TOC/l (Abbildung 5.155). Die Unterschiede innerhalb der Fraktionen liegen im Bereich von Messfehlern. Die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen lagen bei < 5 mg/l; pH-Wert und Leitfähigkeit entsprachen etwa den im Membranreaktor ermittelten Werten (Tabelle 5.36).



**Abbildung 5.155: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA K5**

**Tabelle 5.36: Permeatbeschaffenheit der KA K5**

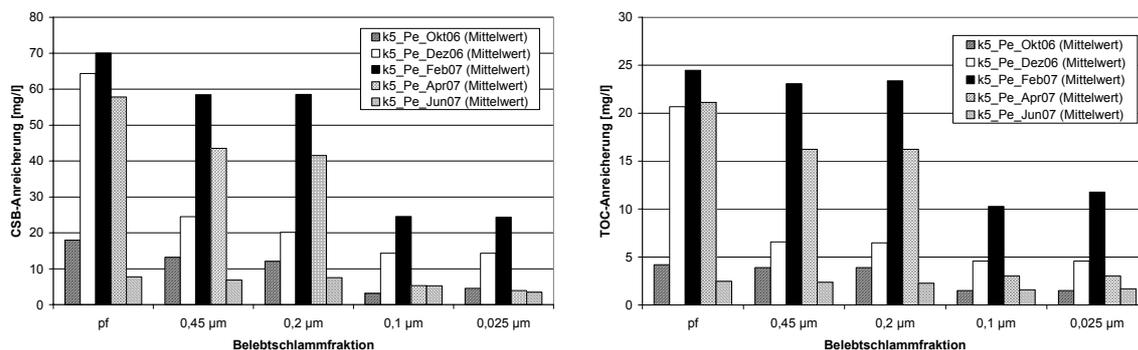
Probe	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	pH-Wert [-]	T [°C]	Leitfähigkeit [µS/cm]
10/06	< 5	7,6	17,4	1.052
12/06	< 5	7,8	10,0	782
02/07	< 5	7,2	8,9	767
04/07	< 5	7,1	14,0	907
06/07	< 5	7,2	18,2	652

Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen wurde für die Belebtschlammfraktionen mit dem Mittelwert aller Permeatproben berechnet. Die Differenzen zwischen dem Permeatmittelwert und den Fraktionen sind z. T. deutlich (Abbildung 5.156).

Im Vergleich zu den kommunalen Kläranlagen K1, K2, K3 und K4 resultiert die beobachtete Anreicherung im Zeitraum 12/06 bis 04/07 aus dem Austausch des Belebtschlammes, in dessen Folge es teilweise zum Zerfall des Schlammes kam, so dass es einerseits zur Verschiebung der Fraktionen mit einer Partikelgröße von > 0,45 µm in einen Bereich zwischen 0,1 µm und 0,2 µm kam, andererseits zu

einer temporalen Anreicherung in der 0,1 µm- und 0,025 µm-Fraktion. Mit Probe 04/07 war beim Vergleich der 0,1 µm- und der 0,025 µm-Fraktion in etwa das Niveau erreicht, dass vor dem ersten Schlammwechsel herrschte und das nach dem Schlammwechsel 05/07 hergestellt wurde. Es ist möglich, dass es sich bei den anhand der Proben 10/06 und 06/07 ermittelten Konzentrationen tatsächlich um angereicherte Substanzen handelt. Der Einfluss des Austausches des Belebtschlammes ist aber nicht vernachlässigbar, da es in jedem Fall einerseits zu einer vollständigen Abreicherung aus der Anlage kommt (Entleerung der Anlage), andererseits der Rücklaufschlamm infolge der Betriebsbedingungen auf der zentralen Kläranlage und des Transportes 'vorbelastet' ist (Befüllung der Anlage).

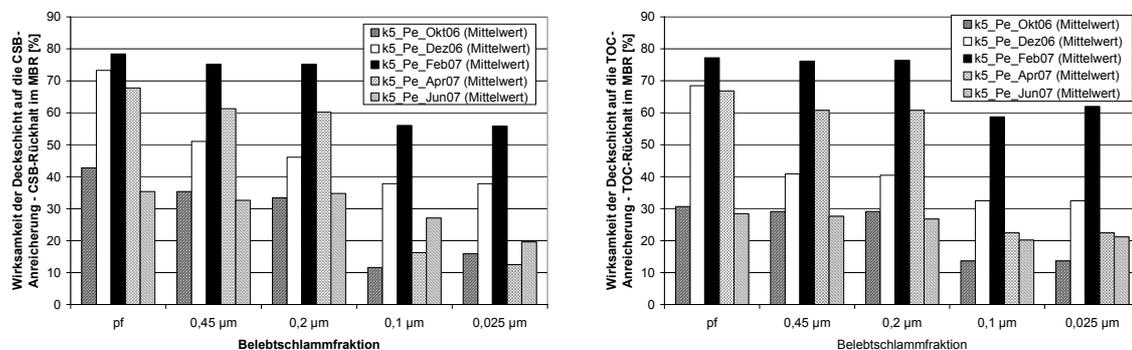
Es ist anzunehmen, dass es wie bei den anderen kommunalen Kläranlagen zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Anreicherung hochmolekularer Substanzen kommt, die aber vor dem Hintergrund der hohen CSB-Gehalte im Belebungsbecken und dem Schlammzerfall nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte.



**Abbildung 5.156: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA K5**

Unabhängig vom beobachteten Ausmaß der Anreicherung und der Herkunft der hochmolekularen organischen Substanzen in Anlage K5, bewirkt die sich im Betrieb ausbildende Deckschicht der Membran an allen Untersuchungstagen eine Verengung des Porendurchmessers der Anlage von 0,4 µm auf < 0,025 µm. Beim Vergleich der 0,45 µm-Fraktion mit dem Permeat werden infolge der Deckschicht in Abhängigkeit des Betriebszeitpunktes 30...75 % des membranfiltrierten Belebtschlammes (Abbildung 5.157) zurückgehalten; im Fall der 0,025 µm-Fraktion 10 % bis 60 %. Es werden neben der technisch bedingten (Porengröße der Membran; 0,4 µm) partikulären Fraktion oberhalb 0,4 µm, Substanzen angereichert, deren

Partikelgröße mindestens bei 0,025  $\mu\text{m}$  liegt. Es ist damit zu rechnen, dass bei einer externen Reinigung der Membranen eine Anreicherung der hochmolekularen Substanzen im Belebtschlamm im Bereich von 10...30 % des filtrierten Belebtschlammes liegen wird.



**Abbildung 5.157: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage K5**

Eine Ausschleusung der angereicherten Substanzen aus dem Belebungsbecken erfolgt durch Überschussschlammabzug und durch den Austausch des Belebtschlammes. Die Berechnung der Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen ( $K_{\text{NMGS}}$ ) unter Bezug auf das Schlammalter ist ausschließlich anhand der Proben 10/06 und 06/07 sinnvoll. Darüber hinaus wird das Schlammalter durch das Schlammalter der zentralen Kläranlage beeinflusst. Die in Abbildung 5.158 bis Abbildung 5.161 dargestellten Werte für die übrigen Proben dienen ausschließlich der Vollständigkeit.

Die Anreicherung beträgt in Abhängigkeit der Fraktionen, 0,6...1,7 g CSB/kg oTS bzw. 0,2...0,45 g TOC/kg oTS (Tabelle 5.37, Tabelle 5.38, Abbildung 5.158, Abbildung 5.159). Die Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen liegt bei 0,2...0,5 kg CSB/d bzw. 0,08...0,15 kg TOC/d (Abbildung 5.160, Tabelle 5.39, Tabelle 5.40) oder, bezogen auf den oTS-Gehalt bei 28 mg CSB/(kg oTS·d) in der 0,45  $\mu\text{m}$ -Fraktion und bei 13 mg CSB/(kg oTS·d) in der 0,025  $\mu\text{m}$ -Fraktion (Abbildung 5.161, Tabelle 5.39, Tabelle 5.40).

**Tabelle 5.37: CSB-Anreicherung in der KA K5 (Mittelwerte der Proben 10/06 und 06/07)**

Einheit	Belebtschlammfraktion			
	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	0,33	0,26	0,25	0,11
[g/(kg oTS)]	1,74	1,35	1,32	0,56

**Tabelle 5.38: TOC-Anreicherung in der KA K5 (Mittelwerte der Proben 10/06 und 06/07)**

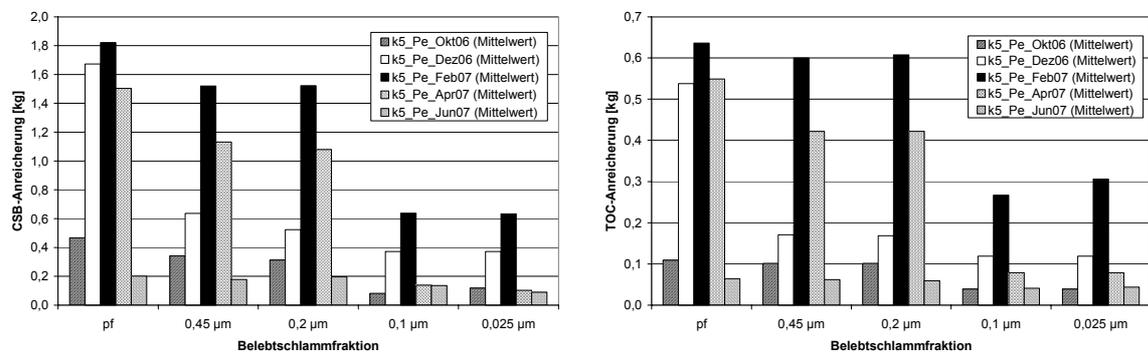
Einheit	Belebtschlammfraktion			
	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	0,09	0,08	0,08	0,04
[g/(kg oTS)]	0,45	0,42	0,42	0,21

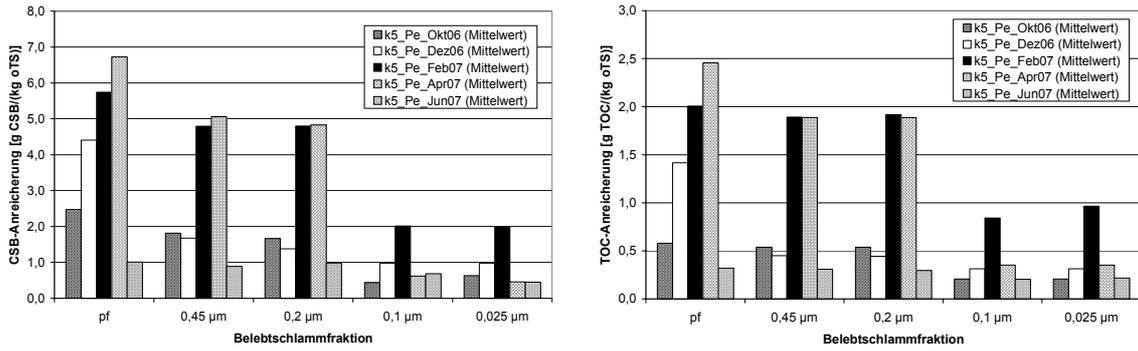
**Tabelle 5.39: CSB-Bildungsrate nicht membrängängiger Substanzen**

Einheit	Belebtschlammfraktion			
	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[g/d]	3,10	2,42	2,37	1,02
[mg/(kg oTS·d)]	16,2	12,6	12,3	5,2

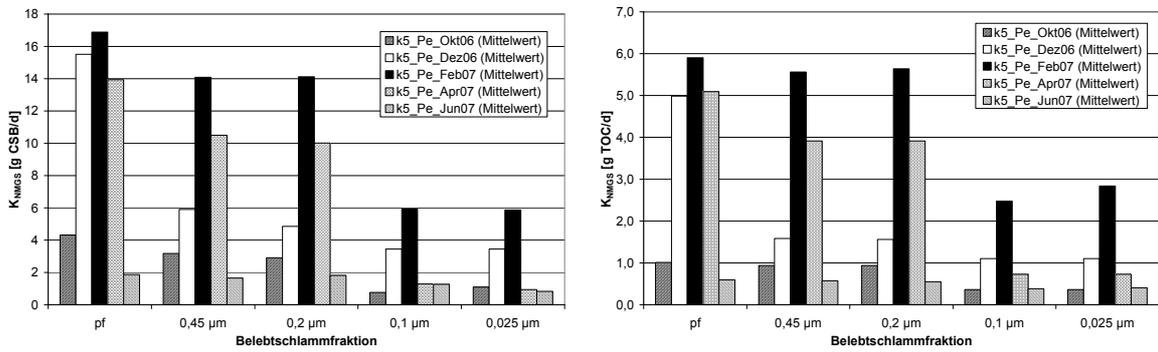
**Tabelle 5.40: TOC-Bildungsrate nicht membrängängiger Substanzen**

Einheit	Belebtschlammfraktion			
	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[g/d]	0,83	0,78	0,77	0,40
[mg/(kg oTS·d)]	4,3	4,1	4,0	2,0

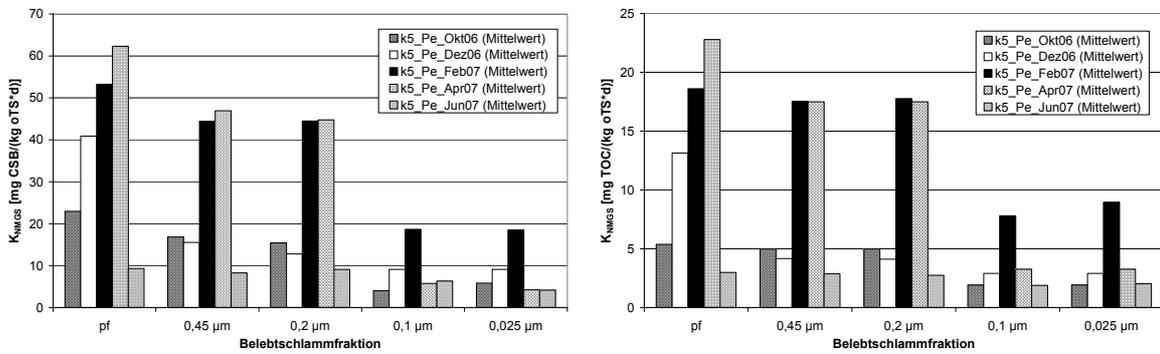
**Abbildung 5.158: Angereicherte Fracht in der KA K5 am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.159: Spezifische Anreicherung in der KA K5 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.160: Bildungsrate nicht membranängiger Substanzen**



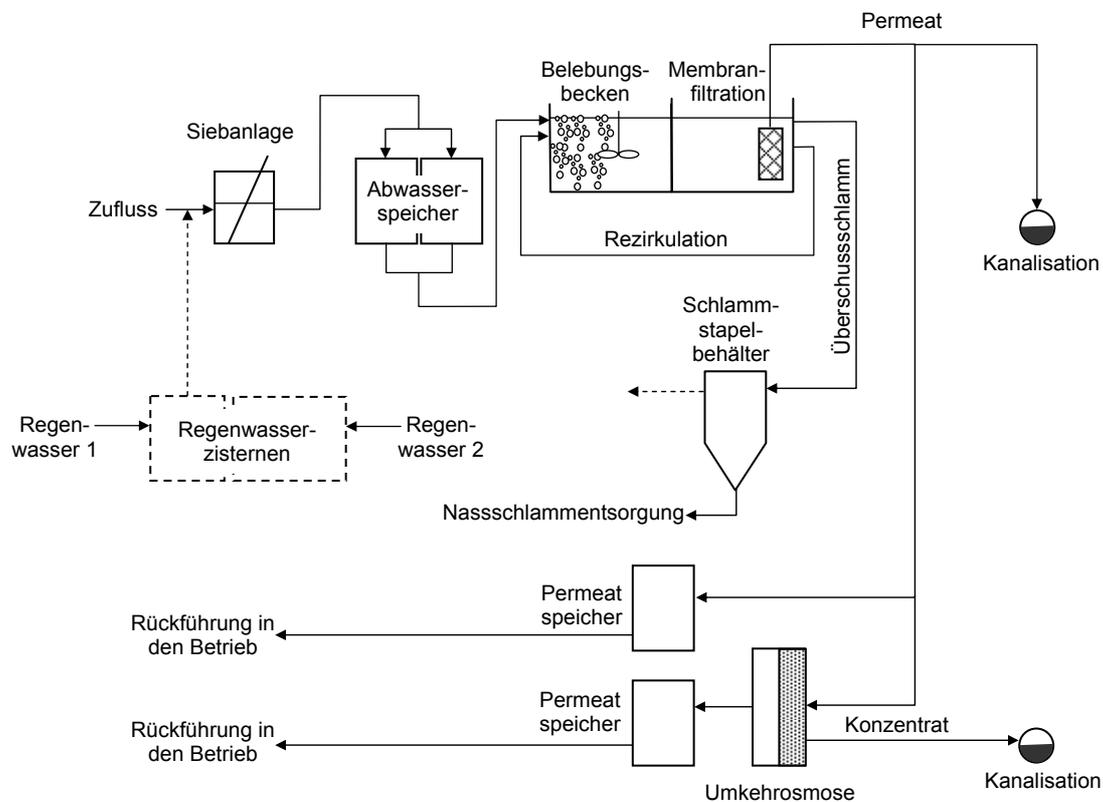
**Abbildung 5.161: Spezifische Bildungsrate nicht membranängiger Substanzen**

## 5.2 Industrielle und gewerbliche Kläranlagen

### 5.2.1 Anlage I1 – Gewerbliche Wäscherei

#### 5.2.1.1 Anlagenbeschreibung

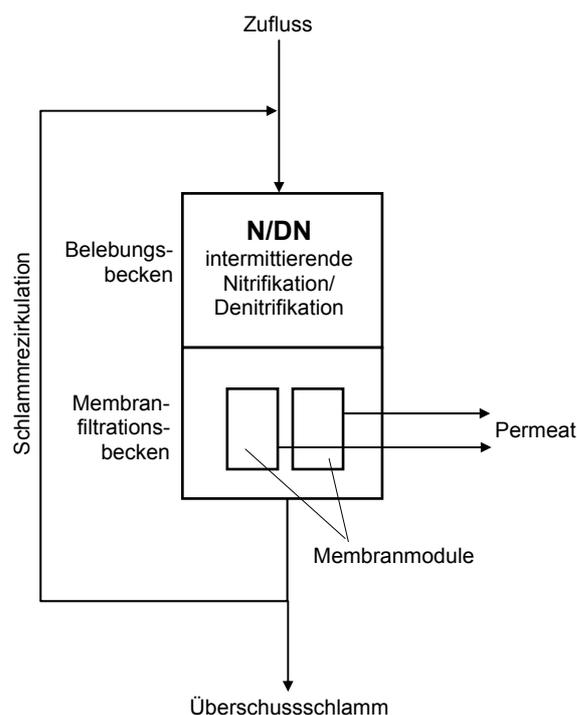
Die Kläranlage I1 (Abbildung 5.162) behandelt das Abwasser aus einer gewerblichen Großwäscherei. Das Waschgut setzt sich hauptsächlich aus Krankenhaus- und Heimwäsche, Berufsbekleidung u. a. aus fleisch- und fischverarbeitenden Gewerbebetrieben, Chemie- und metallbearbeitenden Betrieben sowie aus Putztüchern, Teppichen und Matten zusammen.



**Abbildung 5.162: Vereinfachte schematische Darstellung der Kläranlage I1**

Die Betriebskläranlage ist zur Behandlung von 2.000 EW (240 kg CSB/d) ausgebaut und wurde 06/06 in Betrieb genommen. Die während der Messkampagne vorliegende CSB-Belastung lag bei etwa 40...50 % der Bemessung. Das Ziel der Abwasserbehandlung besteht in einer nahezu vollständigen Kreislaufführung des gereinigten Abwassers zur Wiedernutzung im Betrieb für die Waschprozesse. Sanitärabwasser wird nicht in der Anlage behandelt, sondern der Kanalisation zugeführt.

Das verbrauchte Waschwasser wird zunächst in zwei parallel betriebenen Rüttel-sieben (Maschenweite: 122  $\mu\text{m}$ ) mechanisch gereinigt und nach einer Zwischen-speicherung tagsüber von 8...12 h der biologischen Behandlungsstufe zugeführt. Die Abwasserzwichenspeicherung findet in zwei Mengenausgleichsbehältern statt ( $2 \cdot 200 \text{ m}^3$ ), von denen im Regelfall ein Behälter befüllt wird und vom an-deren Behälter das Belebungsbecken beschickt wird. Die biologische Behand-lungsstufe besteht aus einem in offener Bauweise erstellten Belebungsbecken ( $63 \text{ m}^3$ ) und einem sich direkt daran anschließenden Membranfiltrationsbecken ( $63 \text{ m}^3$ ) (Abbildung 5.163). Das Belebungsbecken wird intermittierend belüftet; eine P-Elimination ist aufgrund des Einsatzes von phosphatfreien Waschmitteln nicht erforderlich. Bei Bedarf wird ein Entschäumungsmittel (Struktol) dosiert. Die Rezirkulation von Belebtschlamm aus dem Membranfiltrationsbecken in das Belebungsbecken erfolgt diskontinuierlich in wechselnden Abständen.



**Abbildung 5.163: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der Anlage I1**

Die Filtrationsmodule (2 x EK 300) bestehen aus rückspülfreien Plattenmembranen der Fa. Kubota mit einer Porenweite von 0,4  $\mu\text{m}$  und einer Filtrationsfläche von insgesamt 480  $\text{m}^2$ . Der Filtrationszyklus setzt sich aus Filtration des Belebtschlammes (3...9 min) und anschließender Filtrationspause und Luftspülung

(7...1 min) zusammen. Der Filtrationsbetrieb findet unter Belüftung statt. Seit Inbetriebnahme und bis einschließlich der letzten Probenahme wurde keine Membranreinigung durchgeführt.

Ein Teil des Permeats wird in einem Behälter zwischengespeichert (200 m<sup>3</sup>), ein anderer Teil einer Umkehrosmoseeinheit zugeführt, zwischengespeichert (200 m<sup>3</sup>) und in Abhängigkeit der Anforderungen ggf. nach Desinfektion mit dem Permeat der Membranbelebungsanlage verschnitten und im Waschprozess wiederverwendet. Das Konzentrat der Umkehrosmoseeinheit und nicht genutztes Permeat werden in die öffentliche Kanalisation eingeleitet. Eine Anlage zur Nutzung von Regenwasser befand sich im Untersuchungszeitraum im Bau. Die Einbindung in den Aufbereitungsprozess erfolgt vor der Siebanlage.

Der Überschussschlamm wurde diskontinuierlich aus dem Membranfiltrationsbecken abgezogen und in einen Schlammstapelbehälter (60 m<sup>3</sup>) gepumpt. Eine Prozesswasserrückführung fand nicht statt. Im Abstand von etwa einem Monat wurden ab 03/07 insgesamt 32 m<sup>3</sup>, d. h. ein Viertel des Schlammes abgezogen. Das mittlere Schlammalter war vergleichsweise hoch und lag rechnerisch 03/07 bei 3.000 d, 04/07 bei 1.800 d und 05/07 bei 1.400 d.

### 5.2.1.2 Probenahme

Die Anlage I1 wurde im Abstand von 2 Monaten 11/06, 01/07, 03/07, 05/07 und 07/07 beprobt. Die Zulaufproben wurden als Stichprobe aus einem Abwasserzweischenspeicher entnommen, die Belebtschlammproben als Stichproben aus dem Membranfiltrationsbecken, die Permeatproben ebenfalls als Stichproben aus dem Filtratbehälter. Darüber hinaus wurden aus dem Belebungsbecken 03/07, 05/07 und 07/07 Stichproben entnommen.

### 5.2.1.3 Zuflussfraktionierung

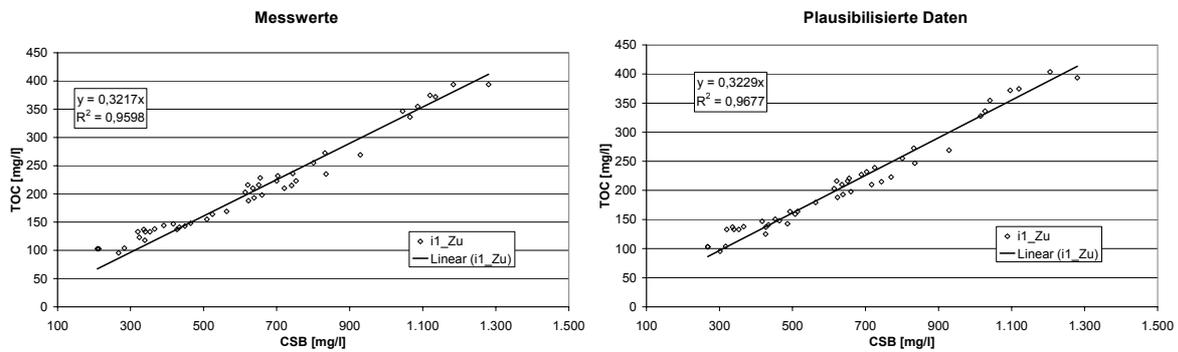
Die CSB-Zulaufkonzentrationen waren, abhängig vom Waschgut, relativ großen Schwankungen unterworfen (621...1.280 mg CSB/l). Einige vor Ort bestimmte Abwasserkenwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die CSB-, BSB<sub>5</sub>- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 5.41 dargestellt. Die pH-Werte lagen im alkalischen Bereich bei 9,6...10,4. Die Temperaturen sind aufgrund des Waschprozesses relativ hoch (28...37 °C). Das TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,32 (CSB/TOC = 3,1) und wurde durch die Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) gering beeinflusst (Abbildung 5.164). Das CSB/BSB<sub>5</sub>-Verhältnis der unfiltrierten Proben lag zwischen 2,3 und 2,8.

**Tabelle 5.41: Charakterisierung des Zuflusses zur KA I1**

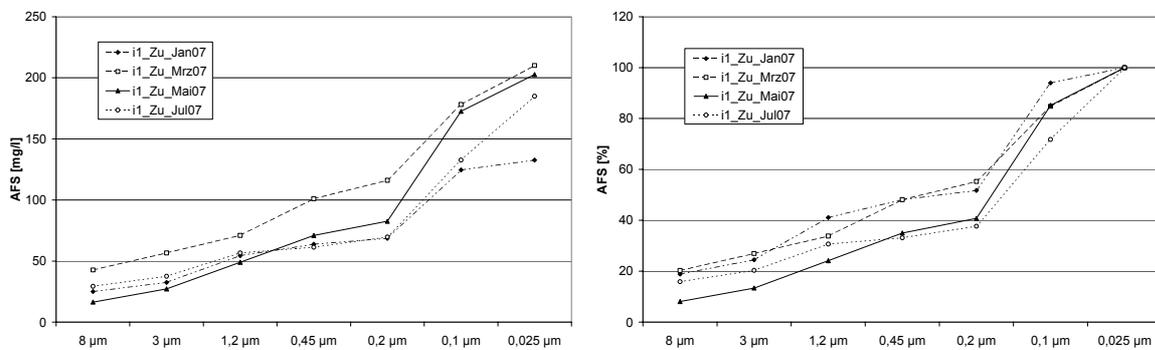
Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unfiltr.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[µS/cm]	[-]	[°C]
11/06	225	621	336	169	2.980	9,7	28,0
01/07	237	638	434	121	1.980	9,6	34,5
03/07	328	929	660	136	1.883	10,4	32,9
05/07	349	801	635	114	851	9,6	35,1
07/07	501	1.280	1.065	142	1.822	9,8	37,3

In Abbildung 5.165 ist die Änderung der abgeschiedenen partikulären Substanzen als AFS im Bereich 8 µm bis 0,025 µm dargestellt. Die absoluten Werte zeigen

einen ähnlichen Verlauf, der sich beim Vergleich der relativen Werte, unabhängig von den Zuflusskonzentrationen, einstellt. Der Unterschied innerhalb einer Fraktion liegt unter 20 %.



**Abbildung 5.164: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA I1**

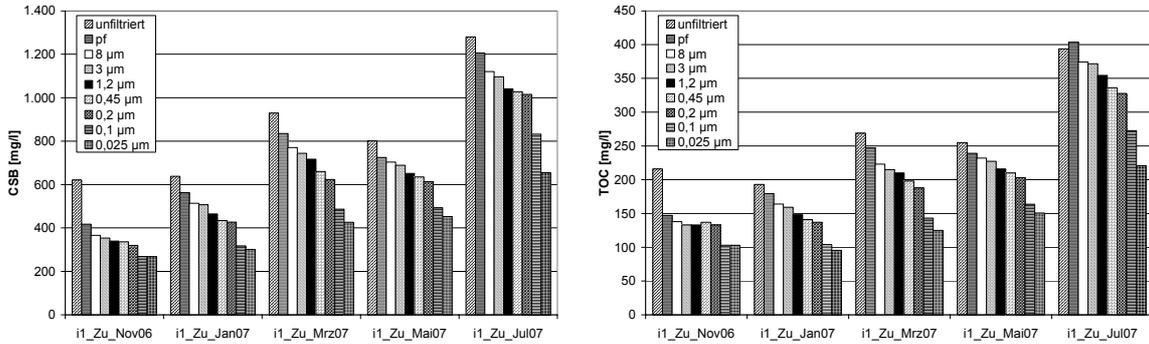


**Abbildung 5.165: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I1**

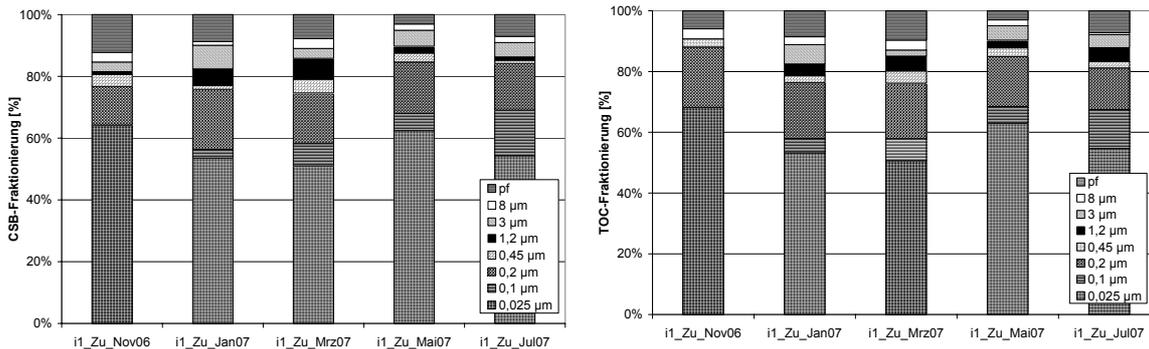
Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.166, Abbildung 5.167). Die Fraktionen variieren zwischen den Proben. Beim Vergleich von TOC und CSB der Einzelproben ist mit Ausnahme von Probe 11/06 eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Bei Probe 11/06 wurden die AFS nicht bestimmt, so dass eine Plausibilitätsprüfung der CSB- und TOC-Konzentrationen nicht durchgeführt wurde.

Die 8 µm-Fraktion liegt rd. 3...12 % unterhalb der nach der Filtration über Papierfilter analysierten TOC- bzw. CSB-Konzentrationen (Abbildung 5.167). Der Unterschied zwischen der 8 µm- und 3 µm-Fraktion ist mit < 5 % relativ gering. Die 3 µm-Fraktion ist mit 3...9 % (CSB und TOC) in einigen Proben etwas breiter. Ähnlich wie die 3 µm-Fraktion ist die 1,2 µm-Fraktion mit 1...8 % Schwankungen unterworfen. Im Gegensatz dazu ist die 0,45 µm-Fraktion in allen Proben mit < 5 % von geringer Bedeutung. Eine in allen Proben deutlich ausgeprägte Fraktion

ist die 0,2 µm-Fraktion. Mit einer Breite von 16...26 % stellt sie im Regelfall die zweitstärkste Fraktion im Vergleich zur papierfiltrierten Probe dar. Die 0,1 µm-Fraktion ist in Probe 11/06 nicht nachweisbar, in Probe 07/07 mit rd. 20 % signifikant. Im Vergleich zur papierfiltrierten Probe nimmt die 0,025 µm-Fraktion den größten Anteil mit 50...70 % ein.



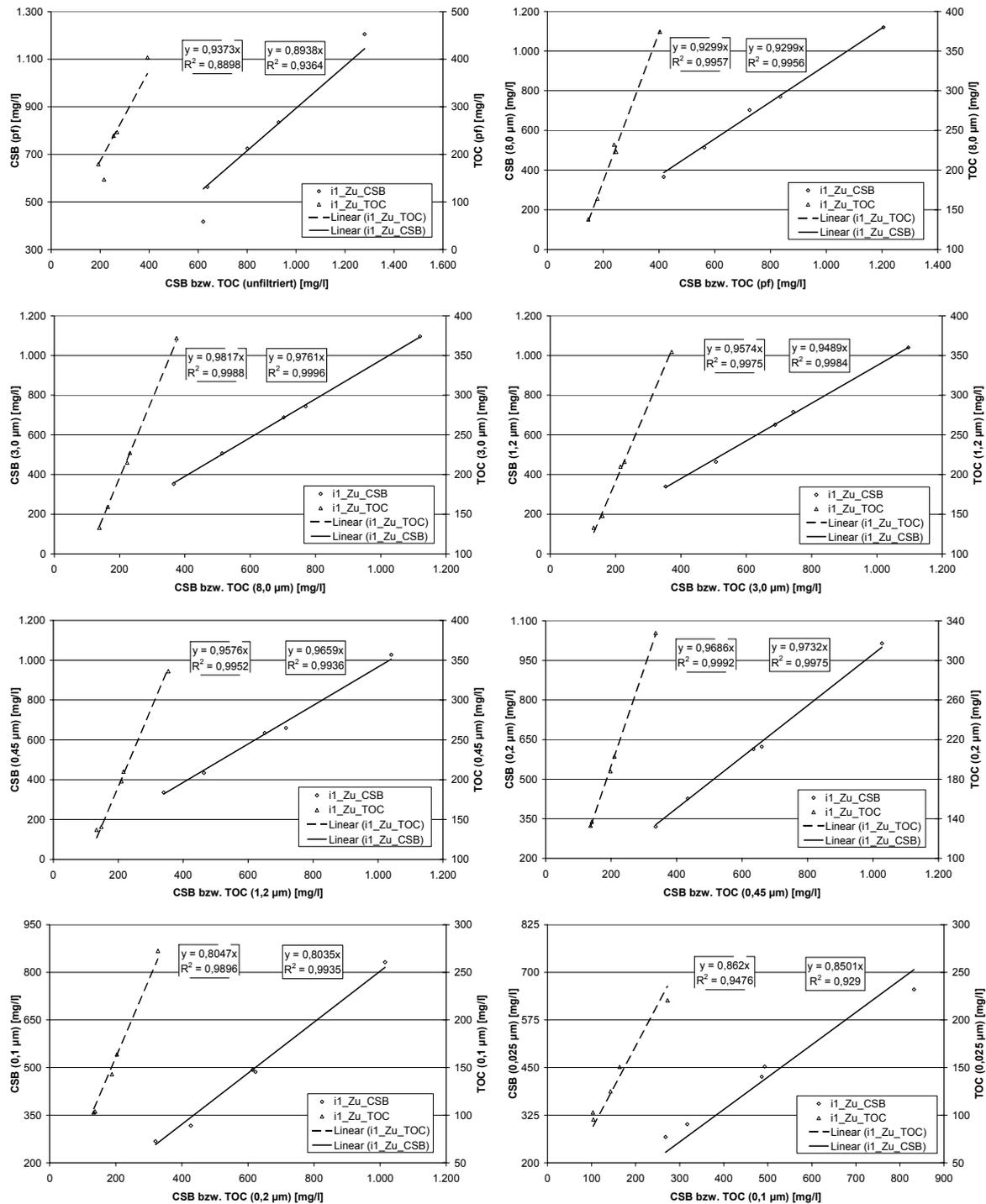
**Abbildung 5.166: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage I1**



**Abbildung 5.167: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage I1 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

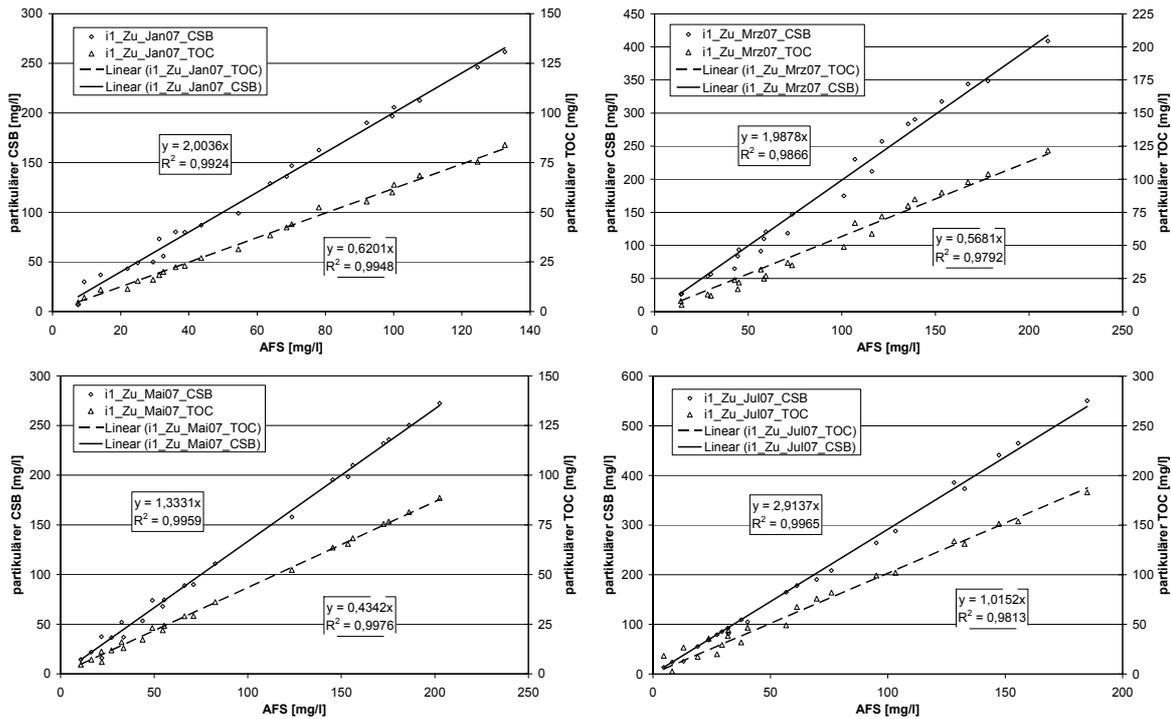
Wird die in der Abwassertechnik gebräuchliche 0,45 µm-Fraktion als Bezugswert für membranfiltrierte Proben gewählt, so sind 70...80 % des 0,45-µm Durchgangs kleiner als 0,1 µm und 65...80 % des 0,45-µm Durchgangs kleiner als 0,025 µm.

Die größten Änderungen der Konzentrationen treten zwischen der papierfiltrierten und der 8 µm-Probe (CSB und TOC: 7 %), zwischen der 0,2 µm- und 0,1 µm-Probe (CSB und TOC rd. 20 %) und zwischen der 0,1 µm- und 0,025 µm-Probe (CSB und TOC rd. 15 %) auf (Abbildung 5.168).

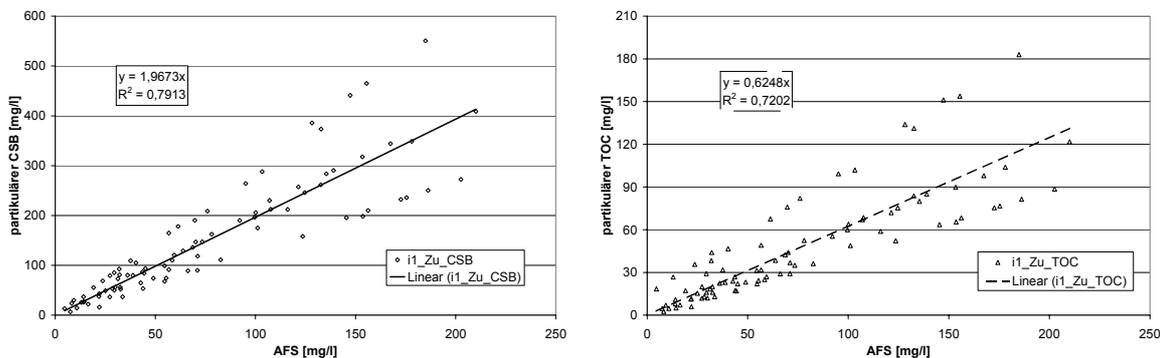


**Abbildung 5.168: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I1**

Die lineare Abhängigkeit aller Fraktionen ist ein Hinweis auf eine grundsätzlich ähnliche Abwasserbeschaffenheit unabhängig vom Waschgut. Die Bestimmung von partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC und deren Korrelation mit den AFS führte bei allen untersuchten Proben zu einer linearen Abhängigkeit (Abbildung 5.169).



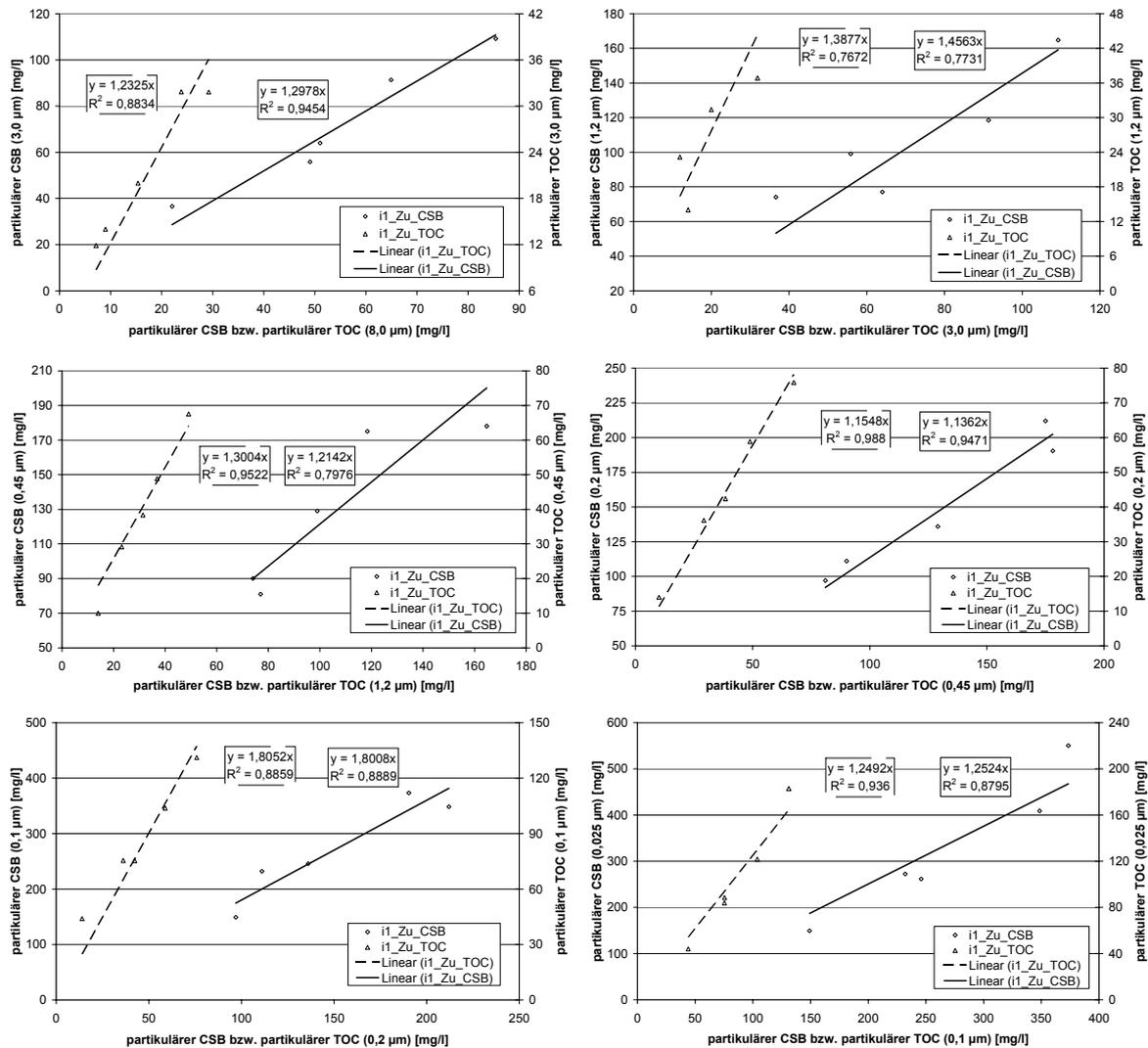
**Abbildung 5.169: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der KA I1**



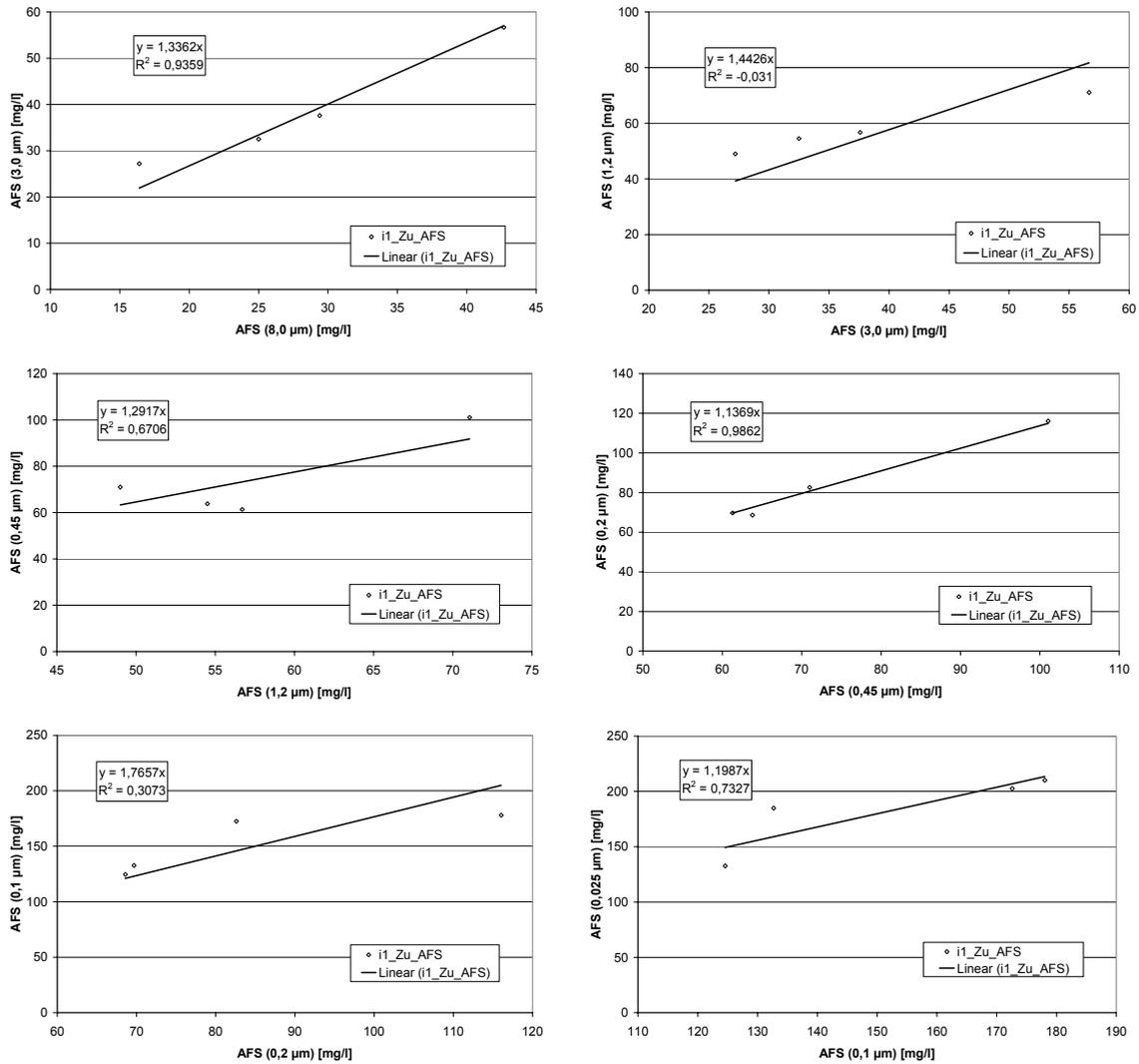
**Abbildung 5.170: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der KA I1 (alle Proben)**

Während sich in den einzelnen Proben ein deutlicher Zusammenhang zwischen partikulärem CSB bzw. TOC und AFS abzeichnet (Abbildung 5.169), tritt bei der zusammenfassenden Darstellung aller Werte kein einheitlicher Trend ein (Abbildung 5.170). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die AFS innerhalb der Fraktionen nicht korrelieren (Abbildung 5.172), d. h. die AFS weisen in Abhängigkeit der Probe einen anderen organischen Anteil auf. Es ist anzunehmen, dass dies durch das Waschgut bzw. den Waschvorgang beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu korrelieren die Konzentrationen von partikulärem CSB und partikulärem TOC (Abbildung 5.171). Dieser scheinbare Widerspruch zeigt nur, dass der relative or-

ganische Anteil der partikulär abscheidbaren Substanzen zwischen zwei Fraktionen gleichen Änderungen unterworfen ist, d. h. der nicht nachweisbare Zusammenhang der AFS weist auf eine Änderung der Konzentrationen anorganischer Bestandteile im Abwasser hin. Das Abwasser ist in seiner organischen Prägung ähnlich, in seiner anorganischen dagegen nicht.



**Abbildung 5.171:** Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage I1



**Abbildung 5.172: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I1**

#### 5.2.1.4 Fraktionierung des Belebtschlamm

Der TS-Gehalt im Membranbelebungsbecken stieg im Lauf der Messkampagne u. a. aufgrund des geringen ÜSS-Abzugs von 8,2 g TS/l auf 41 g TS/l (Tabelle 5.42). Im Belebungsbecken war der TS-Gehalt mit 1,7...4,4 g TS/l wesentlich geringer (Tabelle 5.43). Der Grund dafür liegt in der mangelnden Schlammrezirkulation (vgl. Abschnitt 5.2.1.1), in deren Folge der Belebtschlamm aus dem Belebungsbecken in das Filtrationsbecken verlagert wurde. Der oTS-Gehalt war mit 79...80 % TS stabil.

Aus betriebstechnischen Erwägungen (z. B. Auslastung der Belüftungssysteme, Verbesserung des Membranfluxes bei geringeren TS-Gehalten) wäre es günstiger, die Rezirkulation zu erhöhen, um eine gleichmäßige TS-Verteilung in beiden Becken zu gewährleisten. Dies erhöht auch die Sicherheit gegenüber Frachtstößen, da in beiden Becken die gleiche Abbaukapazität zur Verfügung steht. Darüber hinaus führt ein regelmäßiger ÜSS-Abzug zu einer Verbesserung des Sauerstoffeintrags insbesondere im Filtrationsbecken. Während der Probenahme 07/07 konnte aufgrund des hohen TS-Gehaltes keine nennenswerte Sauerstoffkonzentration gemessen werden ( $< 0,2 \text{ mg O}_2/\text{l}$ ). Das Filtrationsbecken steht damit potentiell nur eingeschränkt für den biologischen Abbau zur Verfügung. Unabhängig davon ist eine optimale Belüftung der Membranen zur Deckschichtkontrolle erforderlich.

Die temperaturnormierte Grundatmung ( $\text{OVC}_G + \text{OVN}_G$ ) lag im Belebungsbecken bei 2,2...8,4  $\text{mg O}_2/(\text{g oTS}\cdot\text{h})$ , im Filtrationsbecken bei 1,5...3,6  $\text{mg O}_2/(\text{g oTS}\cdot\text{h})$ . Der sich im Filtrationsbecken befindende Schlamm war damit aerob stabilisiert. Die Temperatur war in beiden Becken, unabhängig von der Jahreszeit, mit rd. 30...35 °C relativ hoch, aber stabil. Die Leitfähigkeit lag in Abhängigkeit der Zulaufbeschaffenheit im Belebungsbecken zwischen 790  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und 2.670  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , im Filtrationsbecken bei 836...2.400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . In beiden Becken herrschten leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert = 7,7...8,7).

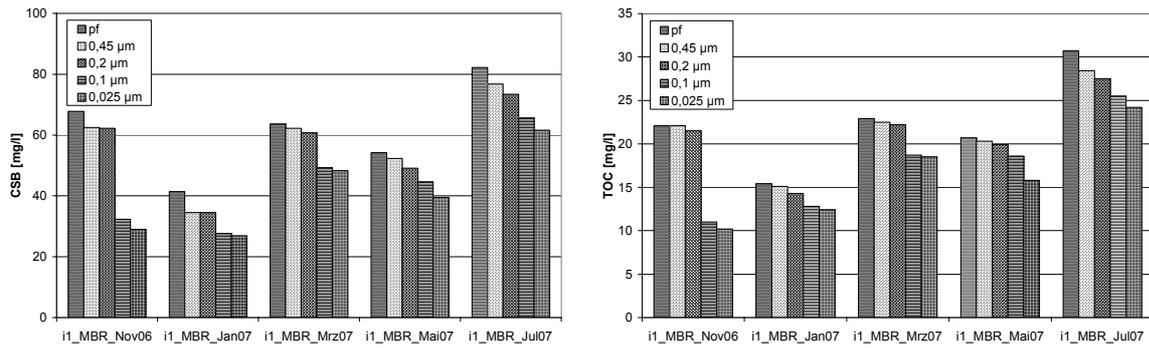
**Tabelle 5.42: Kennwerte des Membranbelebungsbeckens der KA I1**

Probe	TS	oTS	oTS	Atmung OVC <sub>G</sub> +OVN <sub>G</sub>	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg O}_2}{\text{g oTS} \cdot \text{h}}$	[-]	[°C]	[μS/cm]
11/06	8,2	6,5	79	nicht bestimmt	8,4	29,0	2.400
01/07	12,3	9,6	78	3,2	7,9	33,1	1.640
03/07	27,3	21,8	80	1,5	7,8	27,4	1.737
05/07	28,0	22,3	80	2,2	7,7	33,1	836
07/07	41,3	33,2	80	3,6	8,0	35,5	1.603

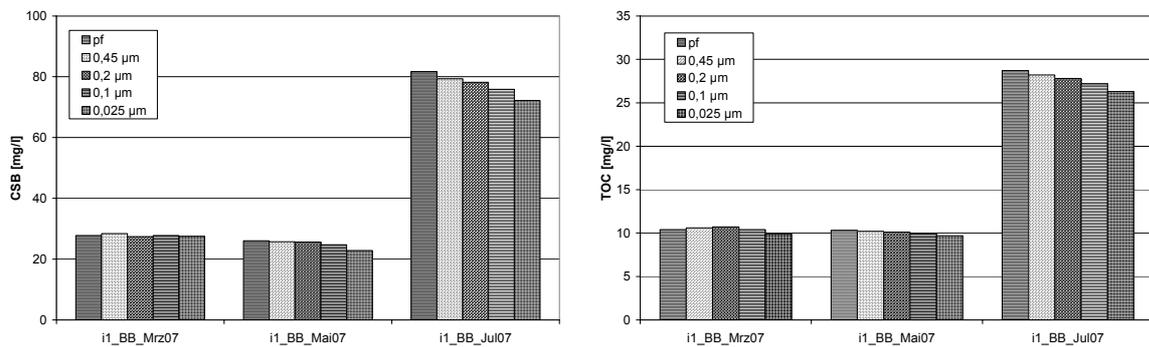
**Tabelle 5.43: Kennwerte des Belebungsbeckens der KA I1**

Probe	TS	oTS	oTS	Atmung OVC <sub>G</sub> +OVN <sub>G</sub>	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg O}_2}{\text{g oTS} \cdot \text{h}}$	[-]	[°C]	[μS/cm]
11/06	3,8	3,0	79	2,2	8,7	27,4	2.670
01/07	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt
03/07	1,7	1,4	82	8,2	8,3	30,4	1746
05/07	3,5	2,8	80	3,9	8,2	33,7	790
07/07	4,4	3,5	80	6,4	8,4	33,7	1.602

Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlammes des Filtrationsbeckens unterliegen einem ausgeprägten Verlauf, dessen Differenz beim Vergleich der 0,45 μm- mit der 0,025 μm-Fraktion der Proben 03/07, 05/07 und 07/07 12...15 mg CSB/l bzw. 4 mg TOC/l beträgt. In Probe 01/07 ist dieser Unterschied geringer ausgeprägt (Abbildung 5.173). Probe 11/06 zeigt ein dem entgegengesetztes Bild mit einer Differenz von 24 mg CSB/l und 12 mg TOC/l. Eine nachvollziehbare Ursache konnte dafür nicht gefunden werden. Im Gegensatz dazu sind die Unterschiede der filtrierten Belebtschlammproben des Belebungsbeckens gering bzw. nicht nachweisbar. Selbst bei annähernd gleichen CSB-Konzentrationen in den papierfiltrierten Proben beiden Becken (07/07) sind die Differenzen halb so stark ausgeprägt wie im Schlamm des Filtrationsbeckens. Möglicherweise ist der Schlamm des Belebungsbeckens stärker durch das zufließende Abwasser beeinflusst als der Schlamm des Filtrationsbeckens und/oder es kommt im Filtrationsbecken zu einem weiteren Abbau innerhalb der kleinen Fraktionen.

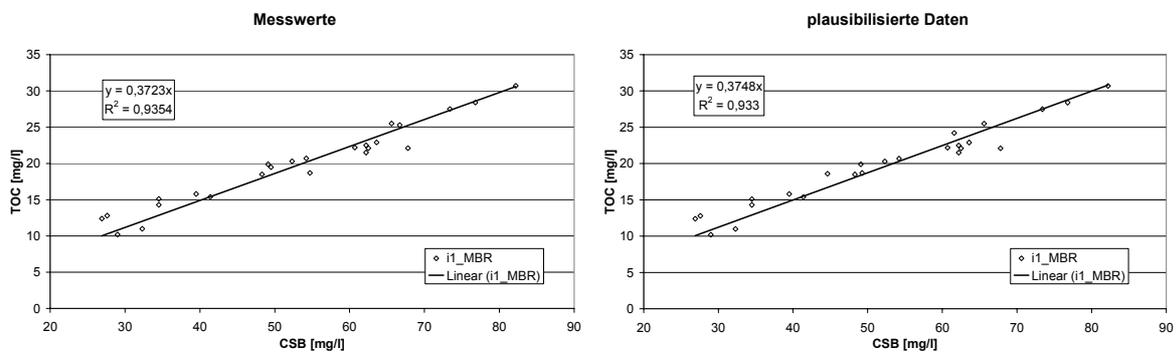


**Abbildung 5.173: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes aus dem Filtrationsbecken der KA I1**



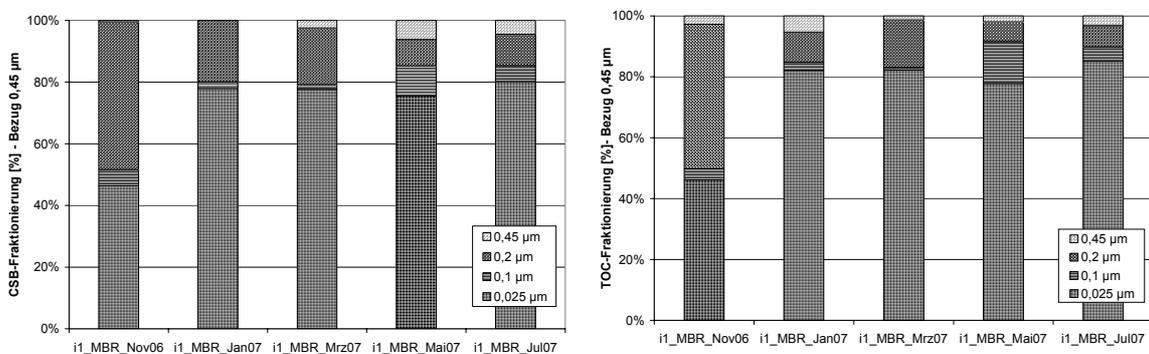
**Abbildung 5.174: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes aus dem Belebungsbecken der KA I1**

Das TOC/CSB-Verhältnis aller dem Filtrationsbecken entnommenen Proben lag bei 0,37 (CSB/TOC = 2,7, Abbildung 5.82). Die Korrektur von drei Einzelwerten der Proben 03/07, 05/07 und 07/07 mit dem am selben Tag aufgetretenen TOC/CSB-Verhältnis führte zu keiner signifikanten Beeinflussung des TOC/CSB-Verhältnisses (Abbildung 5.175). Das TOC/CSB-Verhältnis der Belebtschlammproben aus dem Belebungsbecken liegt bei 0,36 (CSB/TOC = 2,8).

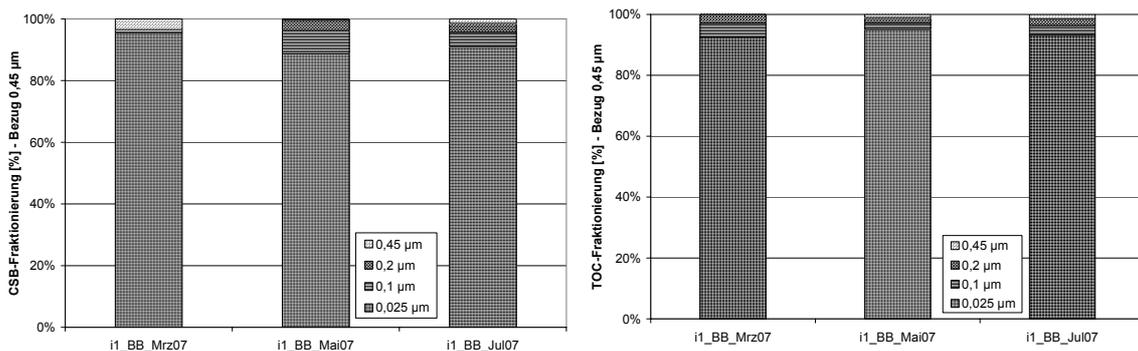


**Abbildung 5.175: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes aus dem Filtrationsbecken der KA I1**

Mit Ausnahme der Probe 11/06 besteht der überwiegende Teil des membranfiltrierten Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken (0,45 µm) mit 80 % aus Substanzen mit einer Größe von weniger als 0,025 µm (Abbildung 5.83, Abbildung 5.84). Die übrigen 20 % bestehen zum großen Teil aus der Substanzen mit einer Partikelgröße zwischen 0,2 µm und 0,1 µm. Die Unterschiede zwischen der Verteilung der CSB- und TOC-Fraktionen sind auf die verschiedenen Bestimmungsverfahren und deren spezifische Fehler zurückzuführen. Der filtrierte Belebtschlamm aus Probe 11/06 besteht zu 50 % aus Substanzen die größer als 0,025 µm sind. Im Unterschied zum Schlamm des Filtrationsbeckens ist die 0,025 µm-Fraktion des Belebtschlamm aus dem Belebungsbecken mit 90...95 % des 0,45 µm-Durchgangs etwas größer (Abbildung 5.177).



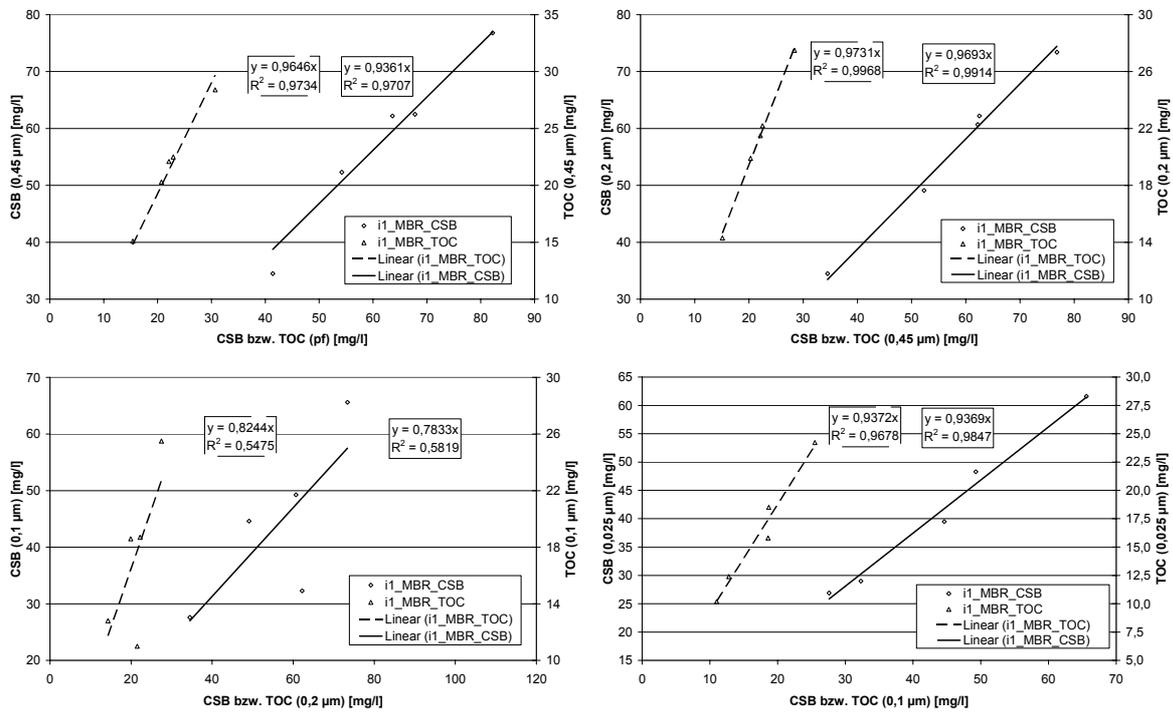
**Abbildung 5.176: Relative Verteilung der CSB- u. TOC-Fraktionen im Belebtschlamm d. Filtrationsbeckens der KA I1 (Bezug: 0,45 µm)**



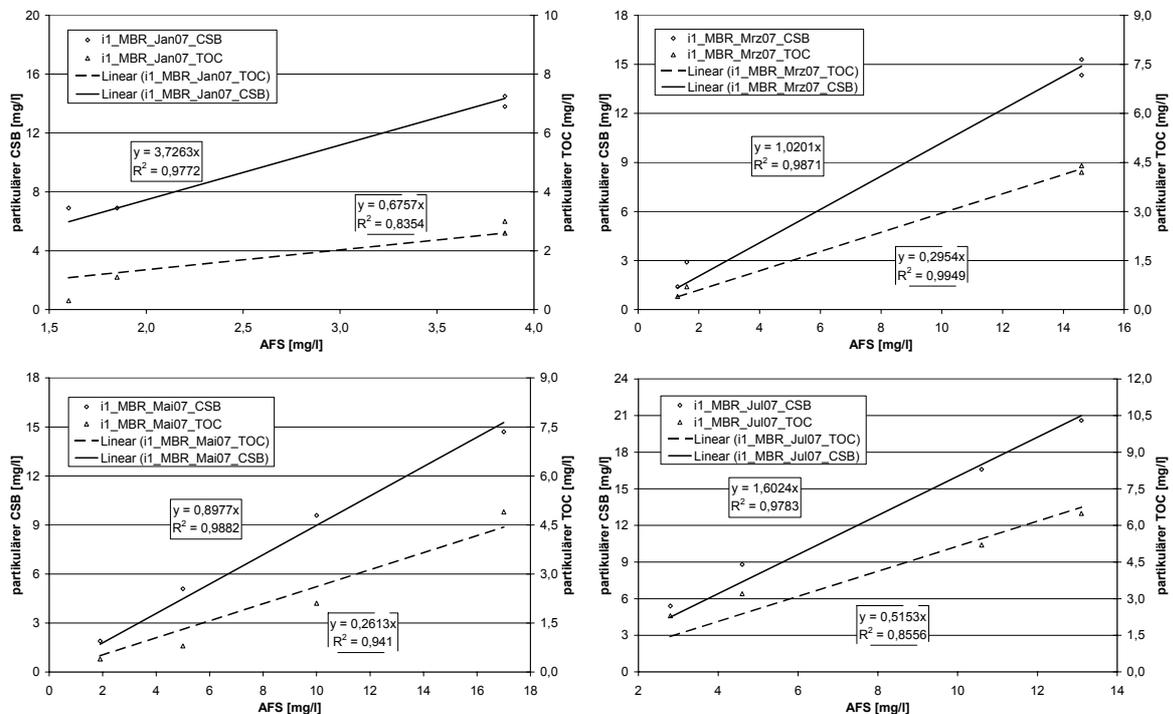
**Abbildung 5.177: Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fraktionen im Belebtschlamm des Belebungsbeckens der KA I1 (Bezug: 0,45 µm-Fraktion)**

Hinsichtlich des Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken besteht eine Korrelation zwischen den Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen, die aber zwischen 0,2 µm und 0,1 µm durch die von den anderen Proben abweichende Probe 11/06 beeinflusst wird (Abbildung 5.178). Ein Zusammenhang zwischen

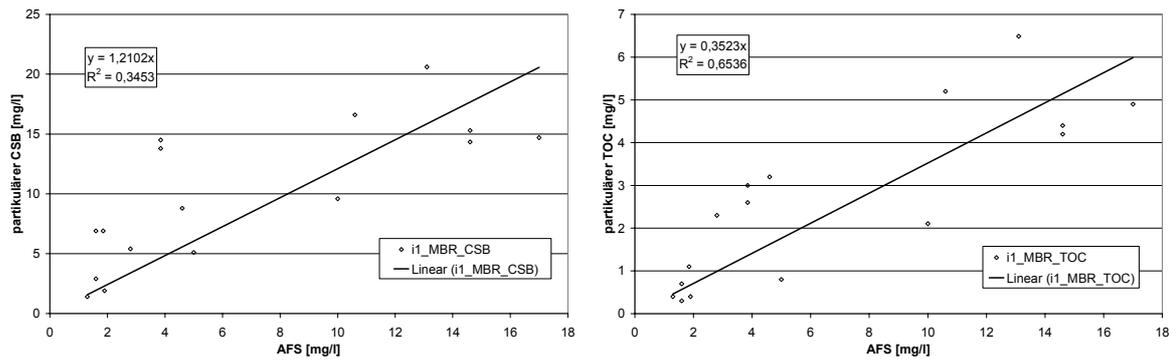
AFS und partikulärem CSB bzw. TOC konnte im Gegensatz für alle Werte (Abbildung 5.180), für die Einzelproben nachgewiesen werden (Abbildung 5.179).



**Abbildung 5.178: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen des Belebtschlammes aus dem Filtrationsbecken der KA I1**



**Abbildung 5.179: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB bzw. TOC im Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I1**



**Abbildung 5.180: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben aus dem Filtrationsbecken der KA I1**

### 5.2.1.5 Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Die Ablaufkonzentrationen der Proben 11/06 bis 05/07 waren relativ stabil und lagen im Untersuchungszeitraum um 20 mg CSB/l bzw. < 9 mg TOC/l (Abbildung 5.181). Die CSB und TOC-Analysen der Probe 07/07 sind etwa doppelt so hoch, ggf. infolge der rd. 50 % höheren Zulaufkonzentration im Vergleich zu den anderen Tagen und des gewählten Betriebsregimes. Die Unterschiede innerhalb der Fraktionen liegen im Bereich von Messfehlern. Die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen lagen bei < 5 mg/l; pH-Wert und Leitfähigkeit entsprachen etwa den im Membranreaktor ermittelten Werten (Tabelle 5.44).

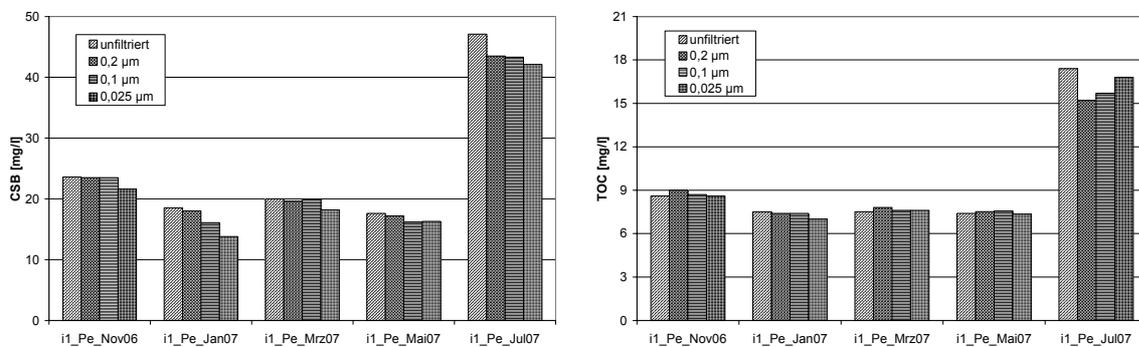
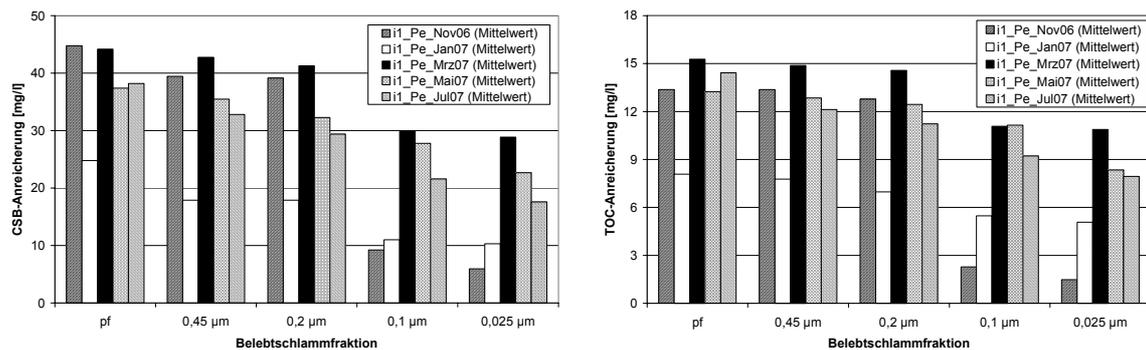


Abbildung 5.181: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA I1

Tabelle 5.44: Permeatbeschaffenheit der KA I1

Probe	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	pH-Wert [-]	T [°C]	Leitfähigkeit [µS/cm]
11/06	< 5	8,4	25,0	2.670
01/07	< 5	8,3	27,6	1.761
03/07	< 5	8,3	18,2	1.864
05/07	< 5	8,3	28,1	897
07/07	< 5	8,4	31,2	1.749

Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen im Filtrationsbecken wurde für die Belebtschlammfraktionen mit dem Mittelwert aller Permeatproben berechnet. Die Differenzen zwischen dem Permeatmittelwert und den Fraktionen sind z. T. deutlich (Abbildung 5.182). Ein Einfluss der höheren Permeatkonzentrationen 07/07 ist erkennbar, so dass der Eindruck entsteht, die Anreicherung sei rückläufig. Dieser Eindruck wird bei Berechnung der angereicherten Fracht widerlegt.



**Abbildung 5.182: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA I1**

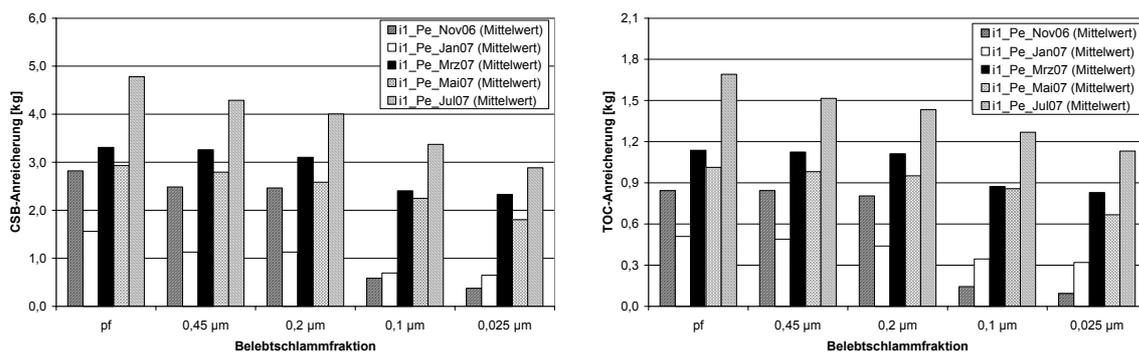
Das Problem der Darstellung der angereicherten organischen Substanzen der Anlage I1 besteht darin, dass es aufgrund der geringen Rezirkulation zu einem Konzentrationsgradienten im Belebtschlamm kommt. Das Belebungsbeckenvolumen wird theoretisch hydraulisch täglich durch den Zufluss verdrängt. Es ist anzunehmen, dass praktisch ein großer Teil des Belebtschlammes im Becken gehalten wird, da die Zuflussbeschickung zwischen 8 h und 12 h stattfindet und in dieser Zeit das Belebungsbecken aufgrund von Denitrifikationsphasen (alle 15 min für 15 min) nicht vollständig durchmischt ist. Das installierte Rührwerk verhinderte nicht, dass während der DN-Phasen Sedimentationsprozesse einsetzen. Durch die diskontinuierliche Rezirkulation von Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken wird ein Teil der angereicherten organischen Substanzen in das Belebungsbecken verlagert und dort teilweise gehalten.

Die angereicherte Fracht kann ermittelt werden, indem die Frachten des fraktionierten Belebtschlammes aus dem Filtrationsbecken und dem Belebungsbecken addiert werden. Ein ggf. unvollständiger Abbau von organischen Substanzen im Belebungsbecken wird auf diese Weise mit erfasst. Diese Vorgehensweise gilt für die Proben 03/07, 05/07, 07/07, wobei der ggf. mangelnde Abbau ausschließlich bei Probe 07/07 relevant werden könnte, da die CSB- und TOC-Konzentrationen 03/07 und 05/07 im Belebungsbecken so gering sind (Abbildung 5.174), dass ein ungestörter Abbau angenommen werden kann.

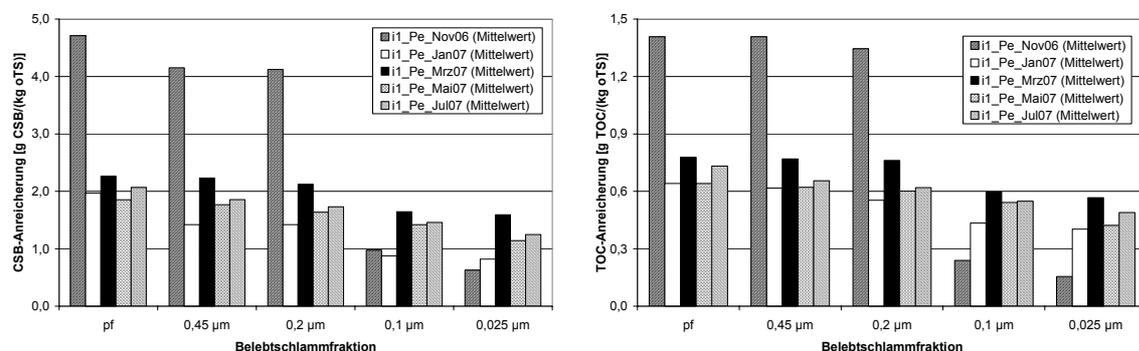
Für die Proben 11/06 und 01/07 wurde die angereicherte Fracht ausschließlich anhand des Belebtschlammes des Filtrationsbehälters berechnet, da bis zu diesem Zeitpunkt keine Rezirkulation stattfand. Es ist anzunehmen, dass zum einen die

für eine Anreicherung relevanten Substanzen zumindest teilweise in das Filtrationsbecken gelangten, da das Belebungsbecken anfangs ständig belüftet und damit nahezu voll durchmischt war. Zum anderen ist die TS-Konzentration im Belebungsbecken im Vergleich zum Filtrationsbecken gering, so dass der Belebtschlamm aus diesem Anlagenteil eine untergeordnete Rolle bei der Bildung von ggf. anreicherbaren extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) spielt.

Die angereicherte Fracht nimmt, ohne Berücksichtigung der Probe 11/06 (vgl. Abschnitt 5.2.1.4), im Verlauf der Messkampagne zu (Abbildung 5.183, Tabelle 5.45, Tabelle 5.46). Die auf den oTS bezogene spezifische Anreicherung nimmt zunächst auch zu, bleibt aber danach vergleichsweise stabil (Abbildung 5.184), d. h. die an Anlage I1 beobachtete Anreicherung steht wahrscheinlich im Zusammenhang mit dem TS bzw. dem oTS-Gehalt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich infolge des ÜSS-Abzugs das Schlammalter verringert.



**Abbildung 5.183: Angereicherte Fracht in der KA I1 am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.184: Spezifische Anreicherung in der KA I1 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme**

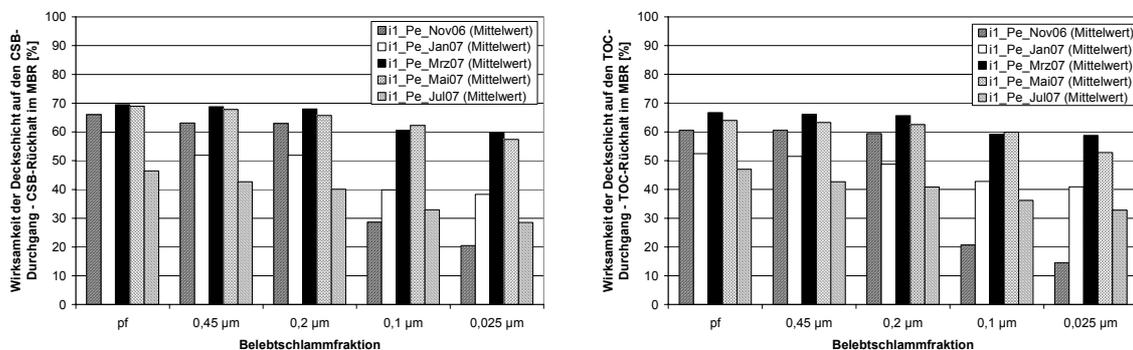
**Tabelle 5.45: CSB-Anreicherung in der KA I1 (Mittelwerte aller Proben, ohne Probe 11/06)**

Einheit	Belebtschlammfraktion			
	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	3,1	2,9	2,7	2,2
[g/(kg oTS)]	2,0	1,8	1,7	1,3

**Tabelle 5.46: TOC-Anreicherung in der KA I1 (Mittelwerte aller Proben, ohne Probe 11/06)**

Einheit	Belebtschlammfraktion			
	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[kg]	1,1	1,0	1,0	0,84
[g/(kg oTS)]	0,70	0,67	0,63	0,53

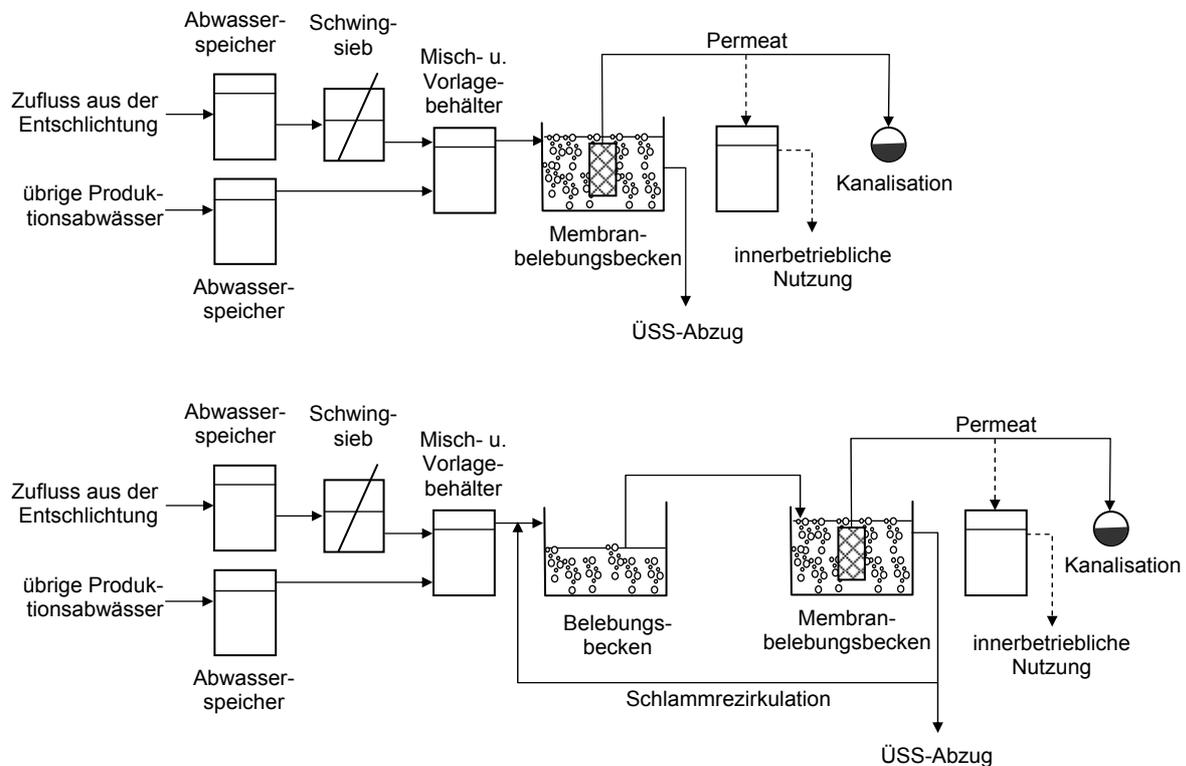
Unabhängig vom beobachteten Ausmaß der Anreicherung hochmolekularer organischer Stoffe in Anlage I1 bewirkt die sich im Betrieb ausbildende Deckschicht der Membran an allen Untersuchungstagen eine Verengung des Porendurchmessers der Anlage von 0,4 µm auf < 0,025 µm. Beim Vergleich der 0,45 µm-Fraktion mit dem Permeat werden infolge der Deckschicht in Abhängigkeit des Betriebsregimes (Rezirkulation) 40...70 % des membranfiltrierten Belebtschlammes des Filtrationsbeckens (Abbildung 5.185) zurückgehalten; im Fall der 0,025 µm-Fraktion 20 % bis 60 %. Es werden neben der technisch bedingten (Porengröße der Membran; 0,4 µm) partikulären Fraktion oberhalb 0,4 µm, Substanzen angereichert, deren Partikelgröße mindestens bei 0,025 µm liegt.

**Abbildung 5.185: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage I1**

## 5.2.2 Anlage I2 – Textilveredelung

### 5.2.2.1 Anlagenbeschreibung

In Kläranlage I2 (Abbildung 5.162) wird das Abwasser eines Betriebs aus der textilveredelnden Industrie behandelt. Im Unternehmen werden Gewebe aus Baumwolle und verschiedenen Kunstfasern produziert und veredelt. Das Abwasser setzt sich im Wesentlichen aus zwei Teilströmen zusammen. Teilstrom A stammt aus der Entschlickung, Teilstrom B umfasst die übrigen Produktionsabwässer; sanitäre Abwässer werden in die Kanalisation eingeleitet.



**Abbildung 5.186: Vereinfachte schematische Darstellung der Kläranlage I2 (oben: vor der Erweiterung bis 02/07, unten; nach der Erweiterung ab 04/07)**

Die Betriebskläranlage ist zur Behandlung von 1.000 EW bis 5.000 EW ausgebaut. Die während der Probenahme festgestellte CSB-Belastung erreichte umgerechnet 1.000...3.150 EW. Nach der Inbetriebnahme Ende 2004 wurde im Laufe der Messkampagne im Zeitraum März/April 2007 eine Erweiterung der Anlage um ein Belebungsbecken vorgenommen.

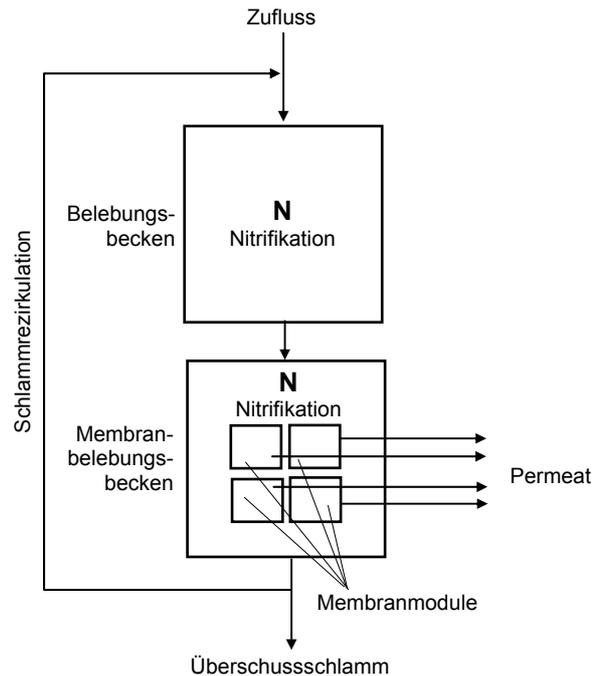
Das Ziel der Abwasserbehandlung bestand zum einen in der Entlastung der kommunalen Kläranlage, zum anderen in der innerbetrieblichen Nutzung des gereinigten Abwassers. Die Anforderungen von Seiten des Betriebs an die Permeatqualität liegen bei 200 mg CSB/l. Aufgrund der unzureichenden Reinigungsleistung, und der Wiederverkeimung im Permeatbehälter wurde das Permeat ungenutzt in die Kanalisation abgeleitet.

Beide Abwasserteilströme werden zum Mengen- und Konzentrationsausgleich in zwei separaten Behältern (jeweils 30 m<sup>3</sup>) zwischengespeichert, bevor sie nach Vermischung in einem Misch- und Vorlagebehälter (0,8 m<sup>3</sup>) in die biologische Reinigungsstufe gelangen (Abbildung 5.187, Abbildung 5.188). Teilstrom A aus der Entschlichtung wird vor der Vermischung zur Abscheidung von partikulären Substanzen über ein Schwingsieb (Maschenweite: 63 µm) geführt.

Die Belebungsstufe bestand bis zur Probenahme 02/07 ausschließlich aus einem nicht abgedeckten Membranbelebungsbecken (230 m<sup>3</sup>). Im Zuge der Erweiterung wurde ein baugleicher Behälter der Membranstufe als Belebungsbecken vorgeschaltet. Im Unterschied zum Membranbecken ist der Füllstand des Belebungsbeckens auf 45...50 % reduziert. Die Rezirkulation erfolgt ständig infolge des statischen Druckgefälles zwischen beiden Behältern über ein Rohr (Abbildung 5.189). Die Beschickung des Membranbelebungsbeckens wird über Pumpen in Abhängigkeit des Füllstands des Belebungsbeckens realisiert (Einschaltpunkt: 50 % der Füllhöhe, Ausschaltpunkt: 45 % der Füllhöhe). Sowohl Membranbelebungsbecken als auch Belebungsbecken werden im Regelfall kontinuierlich belüftet.



**Abbildung 5.187: Biologische Behandlungsstufe der KA I2 (links: Belebungsbecken, rechts: Membranbelebungsbecken)**



**Abbildung 5.188: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der KA I2 nach der Erweiterung**

Zum Ausgleich des C:N:P-Verhältnisses ist eine Dosierung von Harnstoff und Phosphorsäure vorgesehen, die aber im Untersuchungszeitraum nicht erfolgte. Ein Entschäumungsmittel (Struktol) wird über eine Dosiereinrichtung, bzw. bei Bedarf, manuell dosiert. Der Überschussschlamm ( $30 \text{ m}^3/\text{a}$ ) wird diskontinuierlich aus dem Membranbelebungsbecken abgezogen und einem Entsorger übergeben. Eine ÜSS-Speicherung fand nicht statt. Das rechnerische Schlammalter war mit  $> 2.500 \text{ d}$  vergleichsweise hoch.

Die acht zu vier Doppelstockmodulen zusammengefassten Filtrationsmodule (MaxFlow A40) bestehen aus rückspülfreien Plattenmembranen mit einer Porenweite von  $0,4 \mu\text{m}$  und einer Filtrationsfläche von insgesamt  $320 \text{ m}^2$ . Der Filtrationszyklus setzt sich aus Filtration des Belebtschlammes (8 min) und anschließender Filtrationspause (2 min) zusammen. Alle 12 h wird die Belüftung der Membranen unterbrochen, um nach Wiedereinschalten eine verbesserte Ablösung von ggf. gebildeten Belägen zu erzielen.



**Abbildung 5.189: Erweiterte Abwasserbehandlungsanlage (links: Rezirkulationsrohr aus dem Membran- zum Belebungsbecken)**

Eine Membranreinigung erfolgt in jährlichen Abständen. Die Module werden aus dem Belebungsbecken entfernt, mit Wasser abgespült und anschließend in einem Reinigungsbehälter mit Natriumhypochlorit und Schwefelsäure chemisch gereinigt. Die letzte Reinigung aller Module im Zeitraum der Messkampagne fand 11/06 statt.

### 5.2.2.2 Probenahme

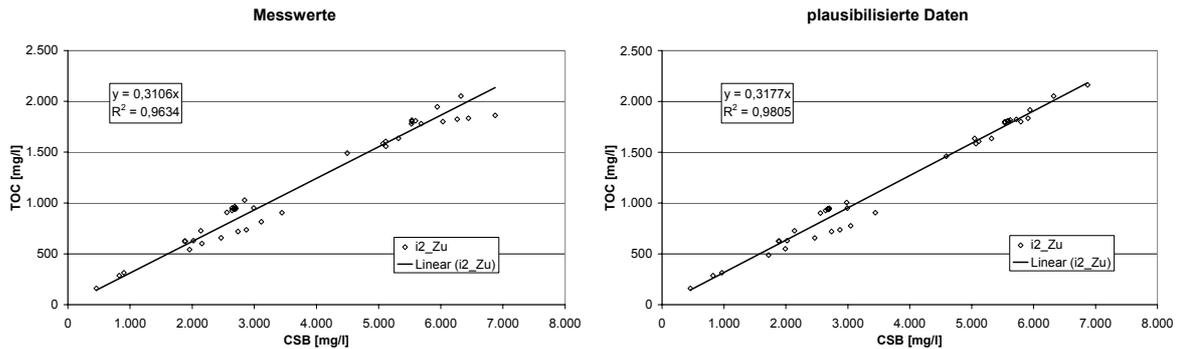
Die Anlage I2 wurde im Abstand von 2 Monaten 10/06, 12/06, 02/07, 04/07 und 06/07 beprobt. Die Zulaufproben wurden aus dem Gesamtzufluss nach der Vermischung der Teilströme als Stichprobe an einer Probenahmestelle entnommen, die Belebtschlammproben als Stichproben aus dem Membranbelebungsbecken, die Permeatproben ebenfalls als Stichproben aus der entsprechenden Probenahmestelle der Permeatleitung.

### 5.2.2.3 Zuflussfraktionierung

Die CSB-Zulaufkonzentrationen waren, abhängig vom Produktionsprozess, relativ großen Schwankungen unterworfen (2.138...6.873 mg CSB/l). Einige vor Ort bestimmte Abwasserkennwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die CSB-, BSB<sub>5</sub>- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 5.47 dargestellt. Die pH-Werte lagen zum Teil im neutralen Bereich bei 6,8, zum Teil im alkalischen Bereich bei 7,8...9,4. Die Temperaturen des Zuflusses sind aufgrund der Temperaturen beim Entschlichten relativ hoch (26...39 °C). Das TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,31 (CSB/TOC = 3,2) und wurde durch die Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) gering beeinflusst (CSB/TOC = 3,1, Abbildung 5.190). Das CSB/BSB<sub>5</sub>-Verhältnis der unfiltrierten Proben liegt zwischen 4 und 9; einem Indiz dafür, dass im Abwasser schwer abbaubare organische Substanzen enthalten sind.

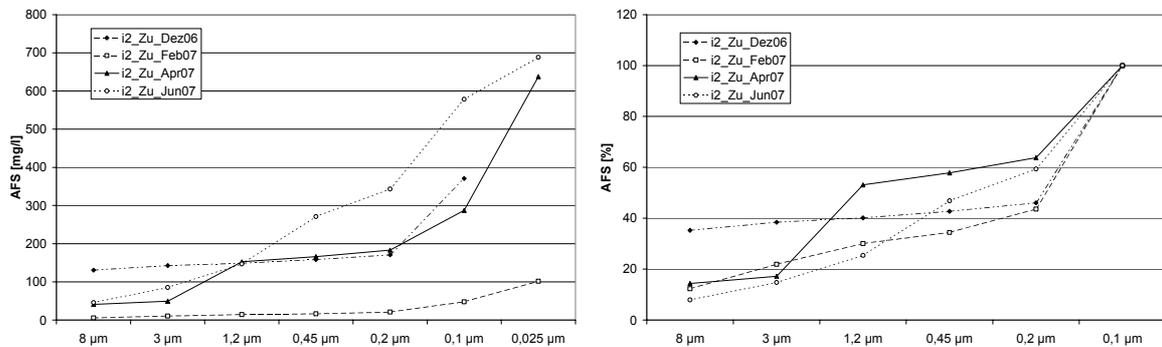
**Tabelle 5.47: Charakterisierung des Zuflusses zur KA I2**

Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unfiltr.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[µS/cm]	[-]	[°C]
10/06	430	2.138	1.889	92	1.024	9,4	25,6
12/06	1.560	6.324	5.533	237	2.200	7,8	31,2
02/07	722	2.992	2.642	26	1.613	6,8	39,4
04/07	1.440	6.873	5.114	466	2.310	6,8	36,1
06/07	392	3.444	2.157	388	910	8,0	33,0



**Abbildung 5.190: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA I2**

In Abbildung 5.165 ist die Änderung der abgeschiedenen partikulären Substanzen als AFS im Bereich 8 µm bis 0,025 µm dargestellt. Weder bei den absoluten noch bei den relativen Werten ist ein gemeinsamer Trend nachweisbar.

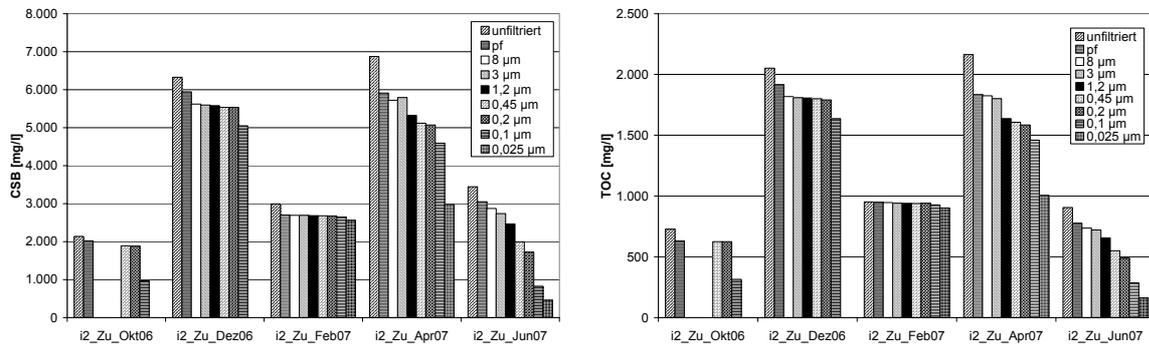


**Abbildung 5.191: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I2**

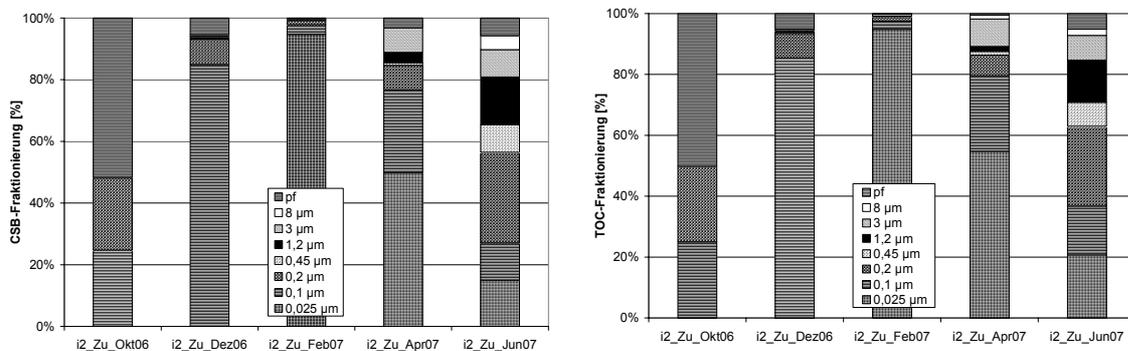
Die 8 µm-, 3 µm-, 1,2 µm- und 0,025 µm-Fractionen der Probe 10/06 wurden nicht bestimmt, ebenso die 0,025 µm-Fraktion der Probe 12/06. Die CSB- und TOC-Konzentrationen der Proben 04/07 und 06/07 zeigen im Gegensatz zur Probe 02/07 einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.192, Abbildung 5.193). Bei den Proben 10/06 und 12/06 tritt bei annähernd gleichen Konzentrationen zwischen den Fraktionen eine Abstufung zwischen 0,2 µm und 0,1 µm auf.

Die Verteilung der Fraktionen ist uneinheitlich, so dass eine verallgemeinerbare Aussage zur Beschaffenheit des Zulaufes nicht sinnvoll ist. In Verbindung mit den AFS deutet sich an, dass die Zuflussbeschaffenheit produktionsbedingt Schwankungen unterworfen ist. Die während der Produktion eingesetzten Substanzen bzw. Ausgangsstoffe führen zu einer anderen Fraktionierung der Zuflüsse. Die Zuflüsse der Proben 12/06, 02/07 und 04/07 liegen beim Vergleich des 0,1 µm-

Durchgangs nahezu vollständig gelöst vor, während die Proben 10/06 und 06/07 wesentlich geringere Anteile unterhalb 0,1  $\mu\text{m}$  aufweisen.

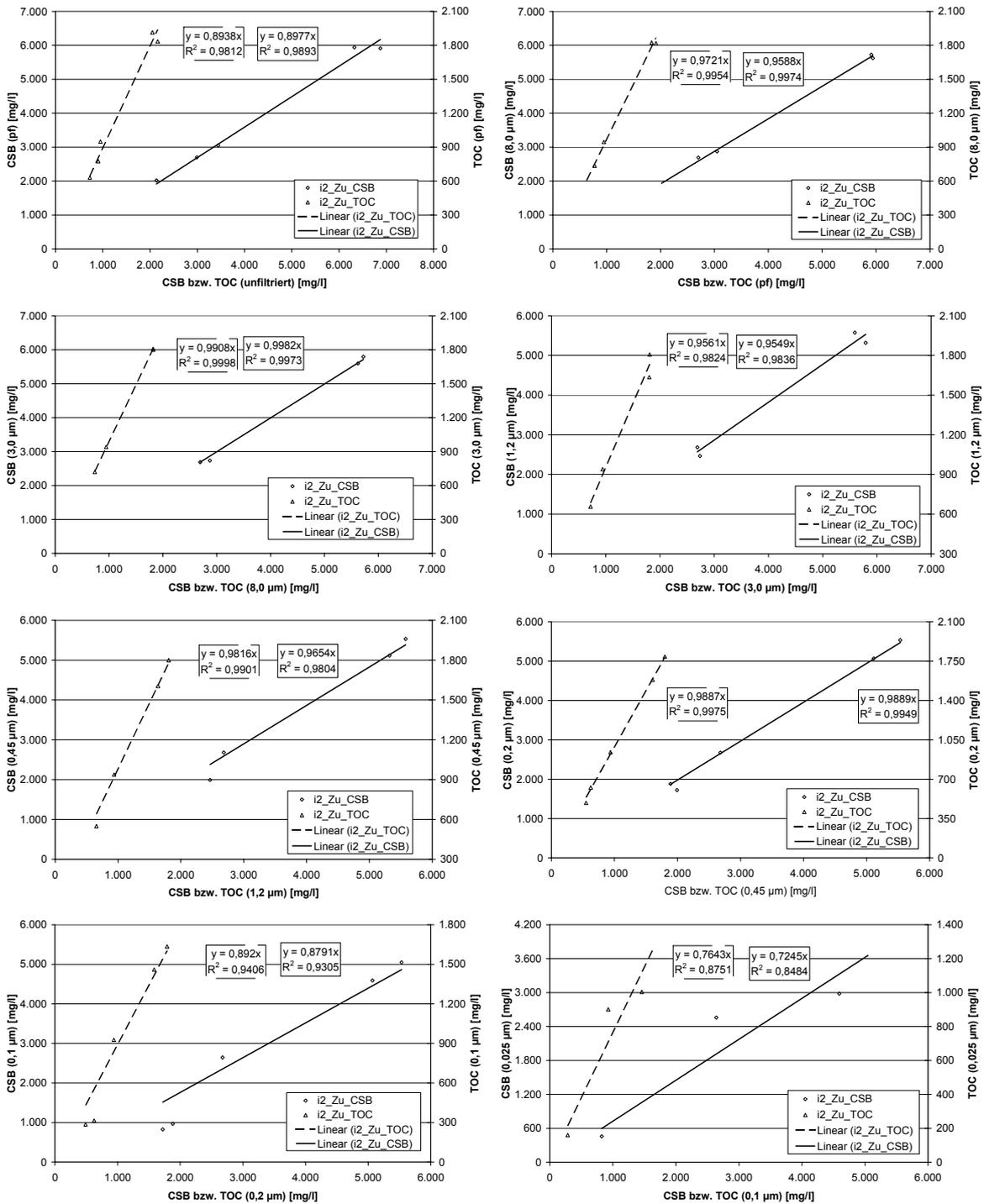


**Abbildung 5.192: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage I2**



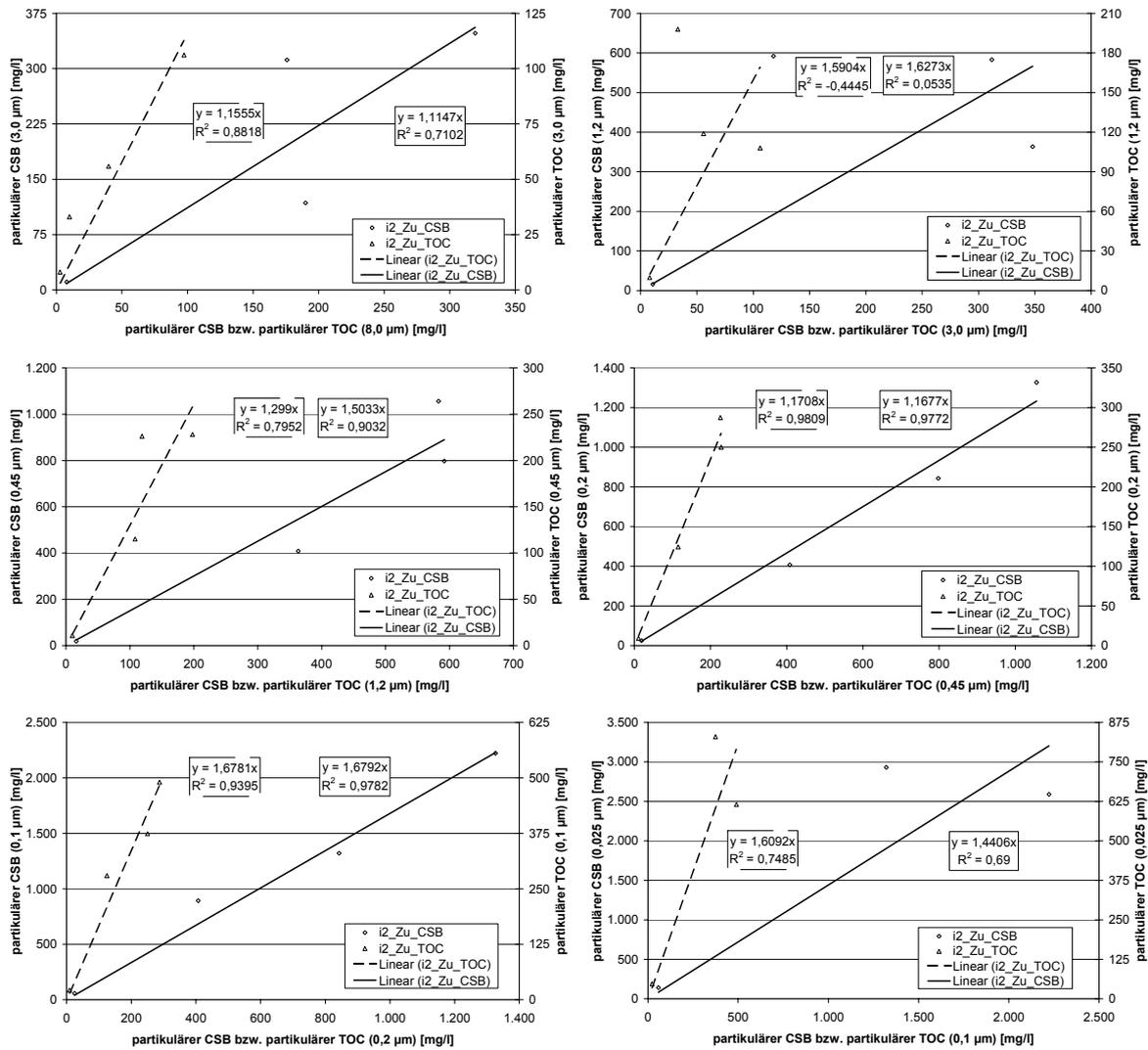
**Abbildung 5.193: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage I2 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

Beim Vergleich der relativen Änderungen zwischen den Fraktionen zeigen sich oberhalb 0,1  $\mu\text{m}$  Gemeinsamkeiten, d. h. es besteht ein Trend in der Abnahme der CSB- und TOC-Konzentrationen; unterhalb 0,2  $\mu\text{m}$  besteht dagegen kein Zusammenhang (Abbildung 5.194). Bei den partikulären CSB- und TOC-Konzentrationen ist ebenso wie bei den AFS keine Korrelation vorhanden (Abbildung 5.195, Abbildung 5.196 Abbildung 5.197). Der partikuläre Anteil ist bei den Fraktionen oberhalb 0,2  $\mu\text{m}$  von untergeordneter Bedeutung; daher ist bei Betrachtung des gesamten CSB ein Trend in diesen Bereichen erkennbar. Unabhängig davon handelt es sich um Proben mit verschiedenen Zusammensetzungen.

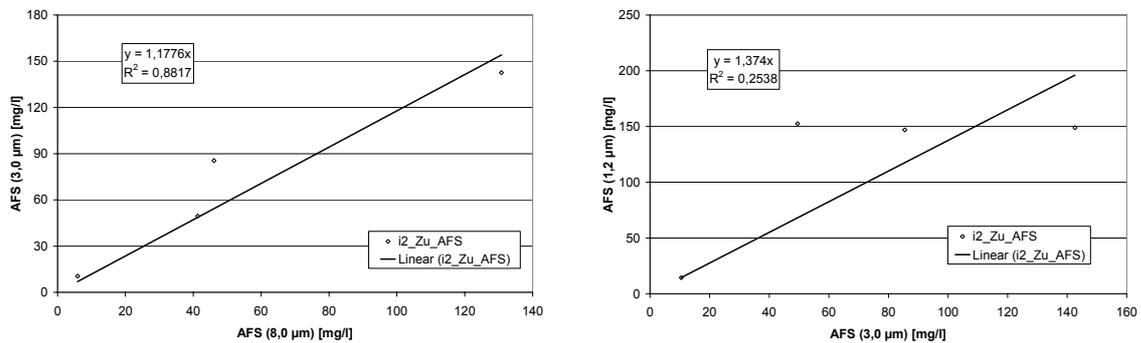


**Abbildung 5.194: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I2**

Während sich in den einzelnen Proben ein deutlicher Zusammenhang zwischen partikulärem CSB bzw. TOC und AFS abzeichnet (Abbildung 5.198), tritt bei der zusammenfassenden Darstellung aller Werte nur ein scheinbarer einheitlicher Trend ein (Abbildung 5.199), der durch die hohen Konzentrationen der Proben 04/07 und 06/06 beeinflusst wurde. Die Einzelanstiege variieren stark.



**Abbildung 5.195: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage I2**



**Abbildung 5.196: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I2**

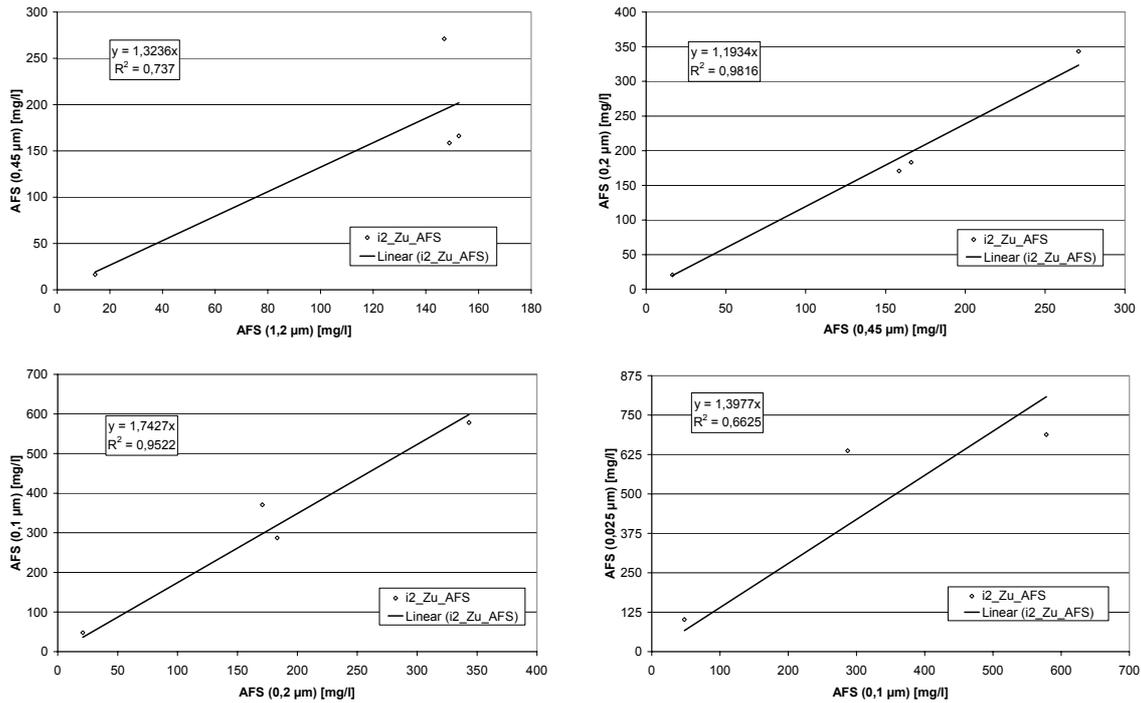


Abbildung 5.197: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I2 (Fortsetzung)

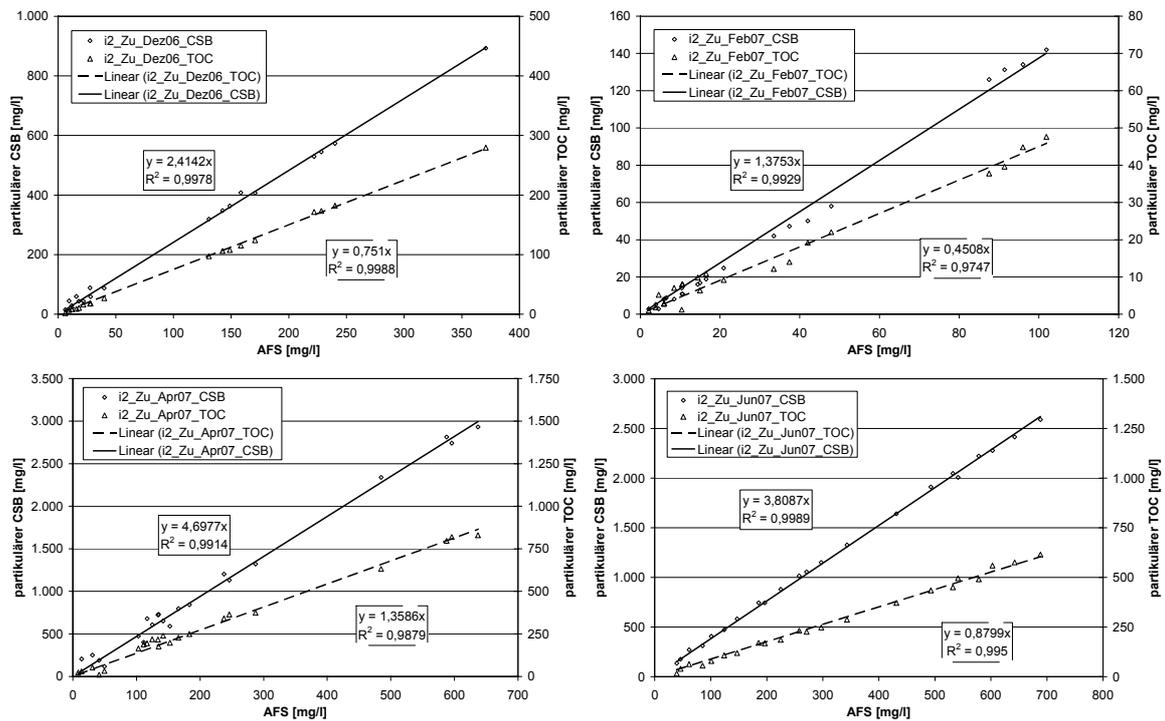
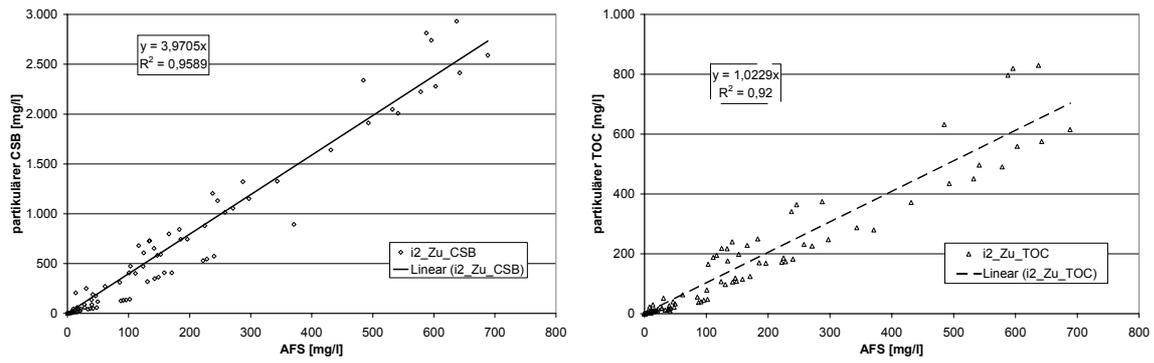


Abbildung 5.198: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der KA I2



**Abbildung 5.199: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der KA I2 (alle Proben)**

#### 5.2.2.4 Fraktionierung des Belebtschlamm

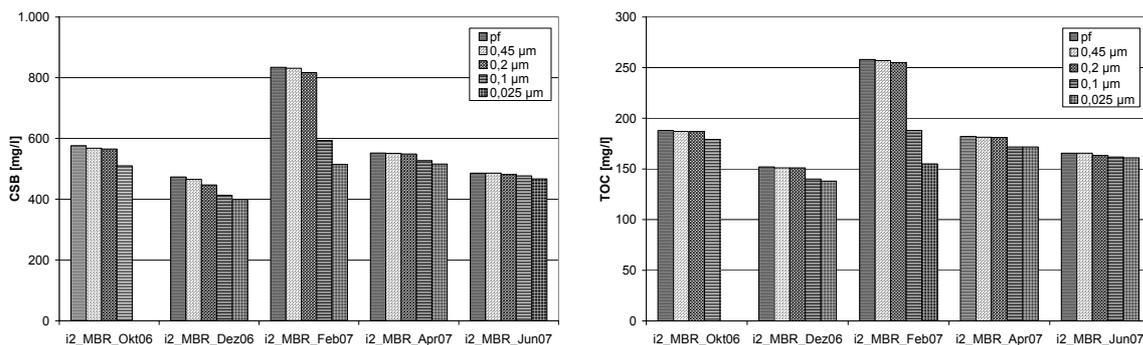
Der TS-Gehalt im Membranbelebungsbecken stieg im Lauf der Messkampagne von 17,2 g TS/l (10/06) auf 25,6 g TS/l (02/07) (Tabelle 5.48) und sank 04/07 infolge der Anlagenerweiterung und der damit einhergehenden Verteilung des Schlammes auf das 1,5-fache des Beckenvolumens auf 16,4 g TS/l ab. Die im System enthaltene TS-Fracht blieb zwischen 02/07 und 04/07 mit 5,9 t TS bzw. 5,7 t TS vergleichsweise konstant. Inwieweit die Änderung der Milieubedingungen dazu geführt hat, dass kein Anstieg des TS bei laufendem Produktionsbetrieb festgestellt wurde, ist nicht nachvollziehbar. Tatsache ist, dass der Sauerstoffgehalt im Membranbelebungsbecken infolge der Verdünnung des Schlammes und der Vergrößerung des belüfteten Volumens von 0,3 mg O<sub>2</sub>/l (12/06, 02/07) auf rd. 4 mg O<sub>2</sub>/l (04/07) stieg. Möglicherweise wurde dadurch der Abbau von Substanzen ermöglicht, die aufgrund des zuvor herrschenden Sauerstoffdefizits nicht für den aeroben Abbau zur Verfügung standen. Ein ÜSS-Abzug in dieser Zeit wäre denkbar, allerdings nicht plausibel. Vom Betreiber wurden dazu keine Angaben gemacht, so dass davon ausgegangen wird, dass kein ÜSS-Abzug stattfand.

Der oTS-Gehalt war mit i. M. 90 % TS stabil. Die temperaturnormierte Grundatmung (OVC<sub>G</sub> + OVN<sub>G</sub>) lag im Membranbelebungsbecken unter 1 mg O<sub>2</sub>/(g oTS·h), der Belebtschlamm war damit aerob stabilisiert. Die Temperatur war unabhängig von der Jahreszeit, mit rd. 21...26 °C relativ hoch, aber stabil. Die Leitfähigkeit lag zwischen 1.768 µS/cm und 2.500 µS/cm. Im Membranbelebungsbecken herrschten neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert = 7,1...7,8).

**Tabelle 5.48: Kennwerte des Membranbelebungsbeckens der KA I2**

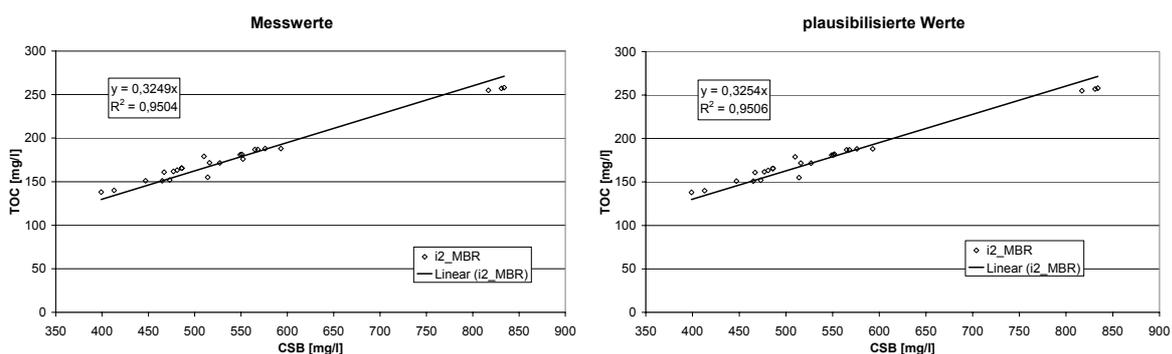
Probe	TS	oTS	oTS	Atmung OVC <sub>G</sub> +OVN <sub>G</sub>	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg O}_2}{\text{g oTS} \cdot \text{h}}$	[-]	[°C]	[µS/cm]
10/06	17,2	15,3	89	0,6	7,8	20,8	1.768
12/06	22,6	20,5	91	0,4	7,6	25,2	1.858
02/07	25,6	23,0	90	0,6	7,5	25,0	2.430
04/07	16,4	14,7	90	0,9	7,1	26,0	2.390
06/07	21,7	19,4	89	0,6	7,8	23,2	2.500

Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlammes des Membranbelebungsbeckens unterliegen im Regelfall einem gleichmäßigen, aber messbaren Verlauf (Abbildung 5.200). Die Differenz zwischen dem 0,45 µm-Durchgang und dem 0,025 µm-Durchgang liegt bei rd. 19...66 mg CSB/l. Ein Ausnahme stellt Probe 02/07 dar, die einerseits durch wesentlich höhere Konzentrationen gekennzeichnet ist, andererseits eine stärkere Fraktionierung zwischen 0,2 µm und 0,1 µm aufweist. Aufgrund der geringen Datenlage ist die Ableitung einer Ursache dafür nicht sinnvoll. Es handelt sich um einen zeitlich begrenzten Effekt.



**Abbildung 5.200: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes aus dem Filtrationsbecken der KA I2**

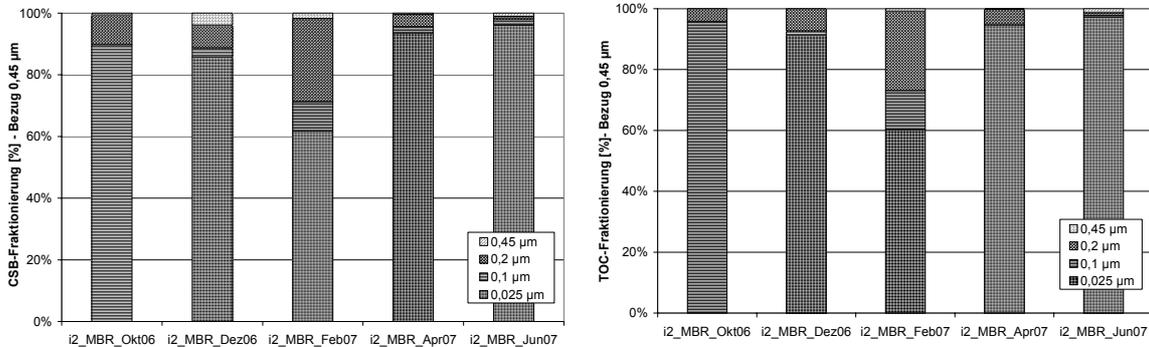
Das TOC/CSB-Verhältnis aller dem Membranbecken entnommenen Proben liegt bei 0,32 bzw. CSB/TOC bei 3,1 (Abbildung 5.201). Die Korrektur eines Wertes der Probe 04/07 mit dem am selben Tag aufgetretenen TOC/CSB-Verhältnis führte zu keiner signifikanten Beeinflussung des TOC/CSB-Verhältnisses (Abbildung 5.201).



**Abbildung 5.201: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes aus dem Membranbelebungsbecken der KA I2**

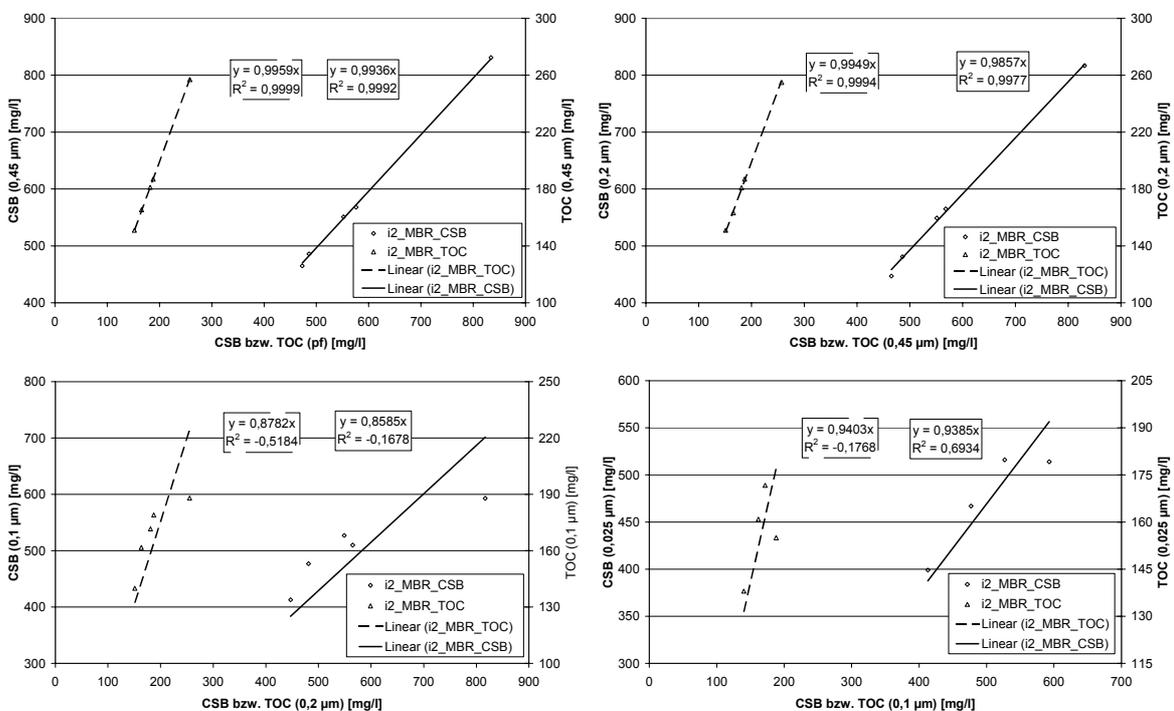
Der überwiegende Teil des Belebtschlammes besteht aus Substanzen mit einer Partikelgröße von weniger als 0,025 µm (Abbildung 5.202). Probe 10/06 wird dabei vernachlässigt, da an diesem Tag die 0,025 µm-Fraktion nicht bestimmt wurde. Die bereits erwähnte Probe 02/07 zeigt im Vergleich zu den anderen Proben eine

deutlich größere 0,2 µm- und 0,1 µm-Fraktion, dafür ist die 0,025 µm-Fraktion kleiner. Die Unterschiede zwischen der Verteilung der CSB- und TOC-Fraktionen sind auf die verschiedenen Bestimmungsmethoden und deren spezifische Fehler zurückzuführen.



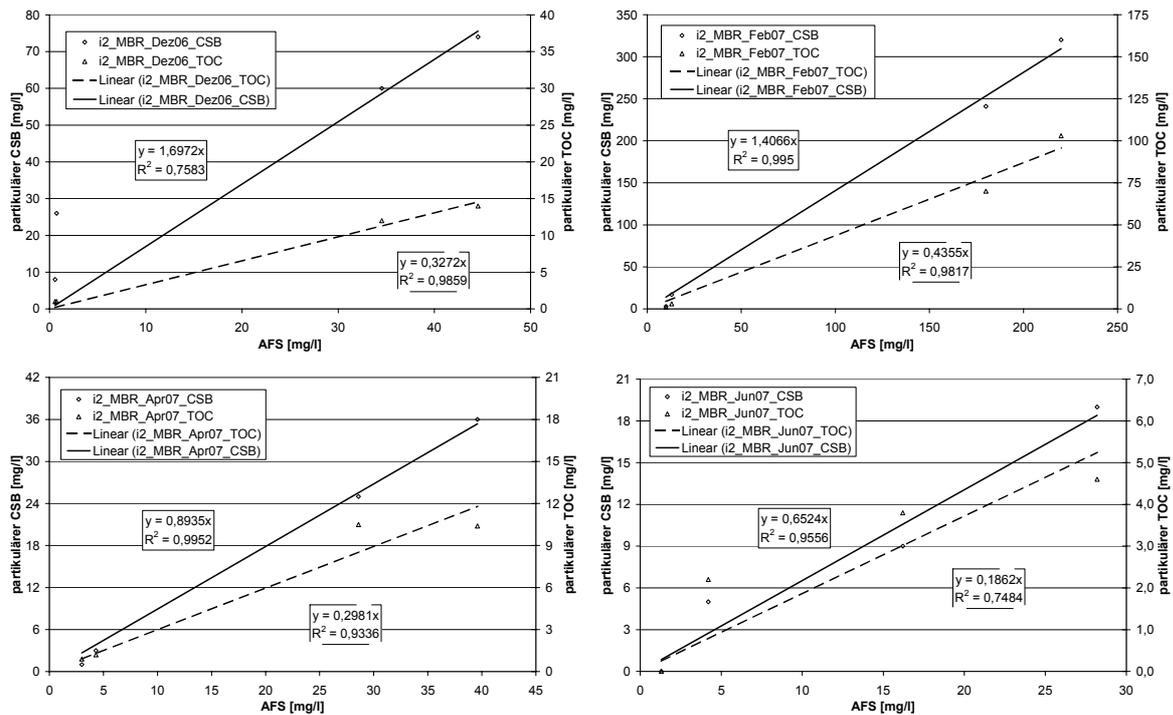
**Abbildung 5.202: Relative Verteilung der CSB- u. TOC-Fraktionen im Belebtschlamm der KA I2 (Bezug: 0,45 µm)**

Es besteht eine Korrelation zwischen den Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen, die aber zwischen 0,2 µm und 0,1 µm durch die von den anderen Proben abweichende Probe 02/07 beeinflusst wird (Abbildung 5.203). Für eine sichere Aussage sind weitere Untersuchungen erforderlich, um ggf. ähnlich wie in Probe 02/07 auftretende Abweichungen bewerten zu können.

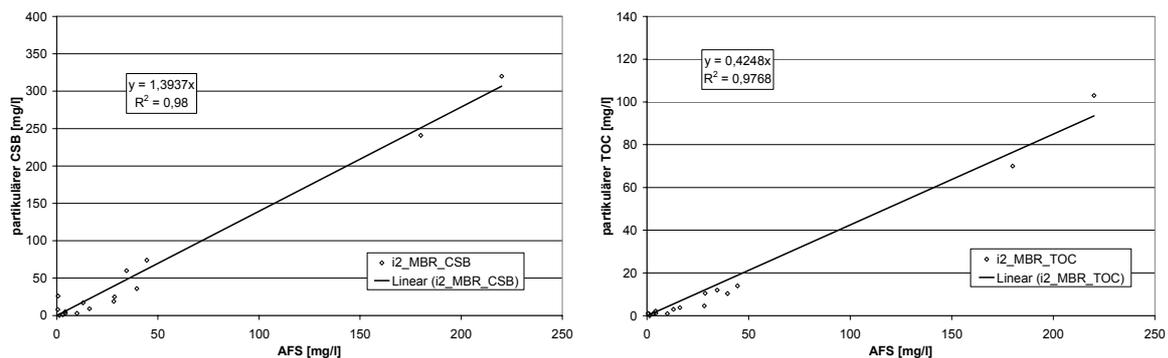


**Abbildung 5.203: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen des Belebtschlammes KA I2**

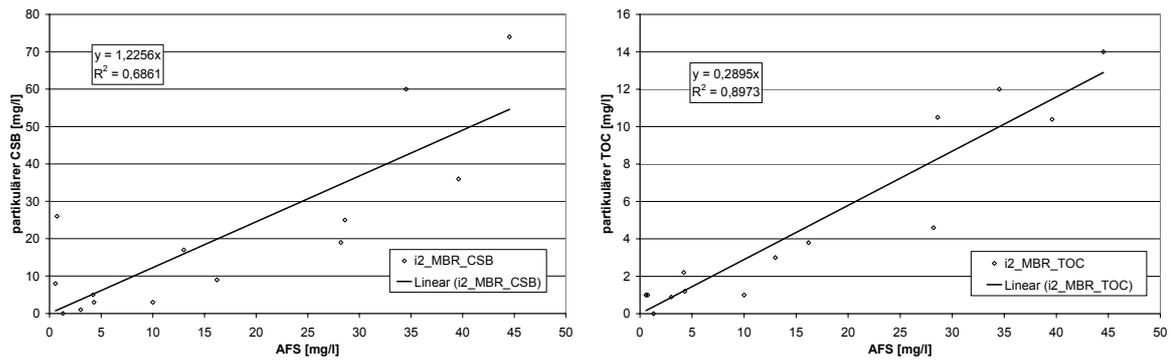
Ein Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC konnte im Regelfall für die Einzelproben nachgewiesen werden (Abbildung 5.204). Der Zusammenhang aller Werte wird durch die hohen CSB- und TOC-Konzentrationen der Probe 02/07 beeinflusst (Abbildung 5.205). Bei Vernachlässigung dieser Werte ist der Zusammenhang nicht mehr deutlich (Abbildung 5.206). Darüber hinaus ist die Anzahl der Proben für eine Aussage zu gering.



**Abbildung 5.204: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB bzw. TOC im Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I2**



**Abbildung 5.205: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben aus dem Filtrationsbecken der KA I2**



**Abbildung 5.206: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben aus dem Filtrationsbecken der KA I2 (ohne Probe 02/07)**

### 5.2.2.5 Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Die Ablaufkonzentrationen der Proben lagen bei 300...400 mg CSB/l bzw. 90...130 mg TOC/l. Die Unterschiede innerhalb der Fraktionen liegen im Bereich von Messfehlern. Vor Erweiterung der Anlage erreichten die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen Werte von 5,2...25 mg/l, d. h. der Abbau war zum Teil unvollständig. Nach Erweiterung der Anlage lagen die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen unterhalb 5 mg/l. pH-Wert und Leitfähigkeit entsprachen etwa den im Membranreaktor ermittelten Werten (Tabelle 5.49).

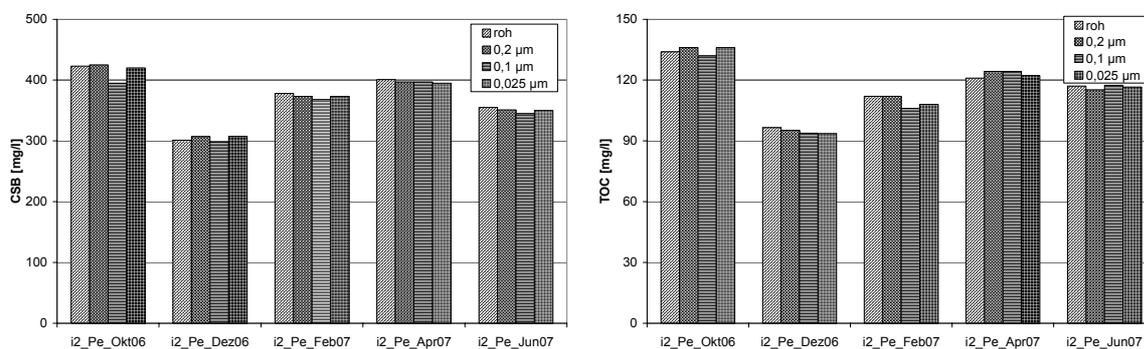


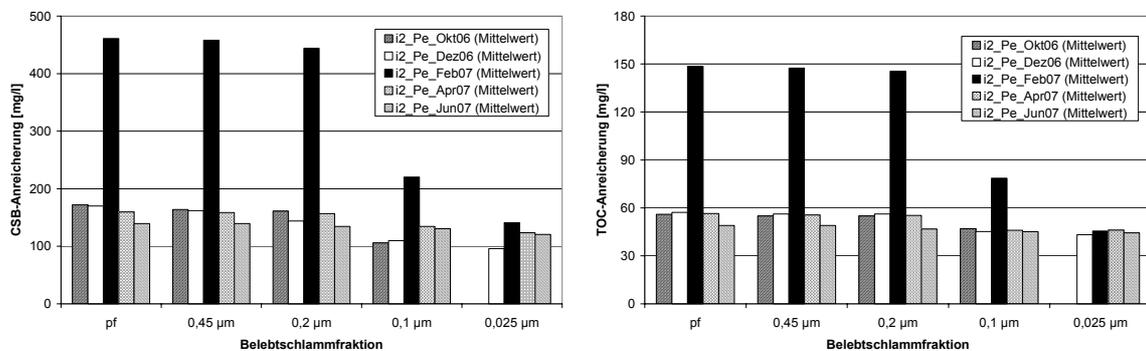
Abbildung 5.207: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der KA I2

Tabelle 5.49: Permeatbeschaffenheit der KA I2

Probe	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	pH-Wert [-]	T [°C]	Leitfähigkeit [µS/cm]
10/06	25	7,6	20,8	1.943
12/06	5,2	7,6	25,4	1.963
02/07	7,6	7,7	23,5	2.630
04/07	< 5	7,2	26,0	2.540
06/07	< 5	7,8	26,0	2.690

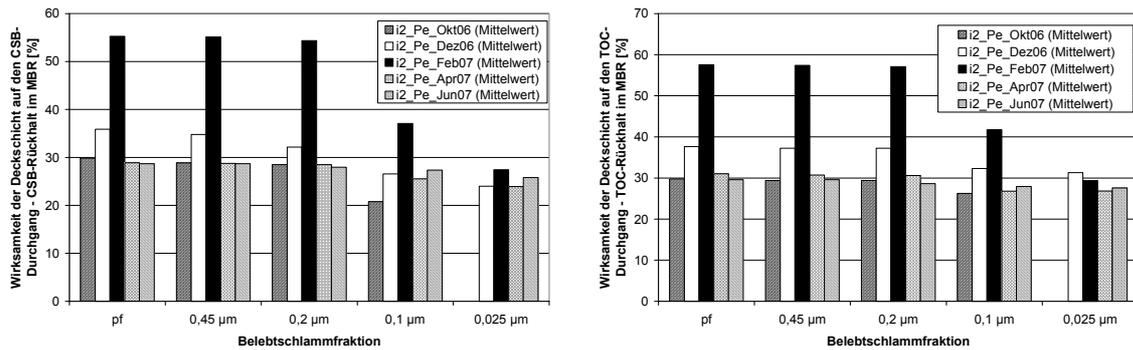
Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen wurde für die Belebtschlammfraktionen mit dem Mittelwert aller Permeatproben berechnet. Die Differenzen zwischen dem Permeatmittelwert und den Fraktionen sind deutlich (Abbildung 5.208) und liegen im Regelfall bei 140...170 mg CSB/l (> 0,1 µm) bzw. 47...57 mg TOC/l. Unterhalb 0,2 µm sind die angereicherten Konzentrationen aufgrund der Belebtschlammfraktionierung (vgl. Abschnitt 5.2.2.4) etwas geringer. Probe 02/07 fällt mit einer besonders hohen Anreicherung von 450 mg CSB/l oberhalb 0,1 µm auf. Im Vergleich dazu liegt die Anreicherung nach der Filtration über

0,025 µm auf dem Niveau der übrigen Proben dieser Fraktion. Die 02/07 bestimmte Anreicherung wird durch die hohen Belebtschlammkonzentrationen oberhalb 0,1 µm beeinflusst (vgl. Abschnitt 5.2.2.4). Warum sich der Belebtschlamm in dieser Weise veränderte und ob ein Einfluss der geänderten Anlagenkonfiguration (verbesserte Sauerstoffversorgung) darauf besteht, dass die Anreicherung in den folgenden Proben 04/07 und 06/07 auf das Ursprungsniveau gesunken ist, kann nicht endgültig beantwortet werden. Eine Ursache liegt mit Sicherheit im geringen Sauerstoffgehalt der Anlage (< 0,3 mg O<sub>2</sub>/l). In diesem Zusammenhang ist es denkbar, dass der Abbau nicht vollständig war und ggf. hochmolekulare Zwischenprodukte im Schlamm angereichert wurden, die bei Erhöhung der Sauerstoffkonzentration eliminiert werden konnten.



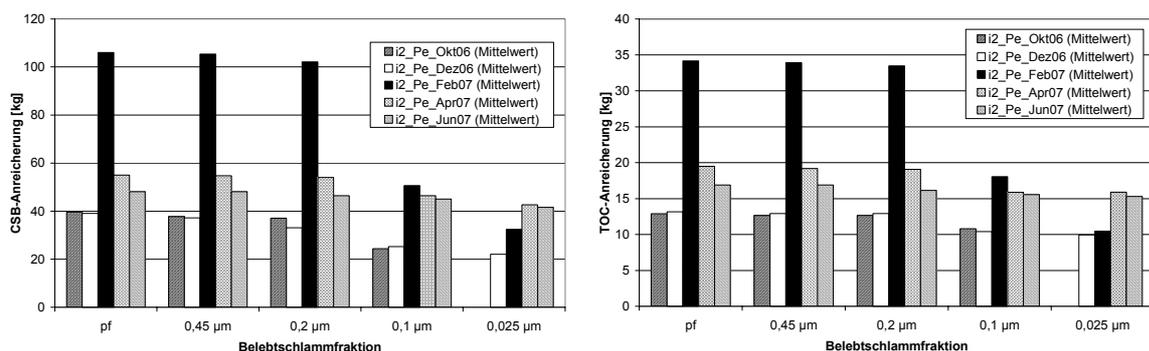
**Abbildung 5.208: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der KA I2**

Unabhängig vom beobachteten Ausmaß der Anreicherung hochmolekularer organischer Stoffe in Anlage I2 bewirkt die sich im Betrieb ausbildende Deckschicht der Membran an allen Untersuchungstagen eine Verengung des Porendurchmessers der Anlage von 0,4 µm auf < 0,025 µm. Beim Vergleich der 0,45 µm-Fraktion mit dem Permeat werden unter Vernachlässigung der Probe 02/07 rd. 30...35 % des membranfiltrierten Belebtschlammes (Abbildung 5.209) zurückgehalten; im Fall der 0,025 µm-Fraktion 25 % bis 30 %. Es werden neben der technisch bedingten (Porengröße der Membran; 0,4 µm) partikulären Fraktion oberhalb 0,4 µm, Substanzen angereichert, deren Partikelgröße mindestens bei 0,025 µm liegt.



**Abbildung 5.209: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage I2**

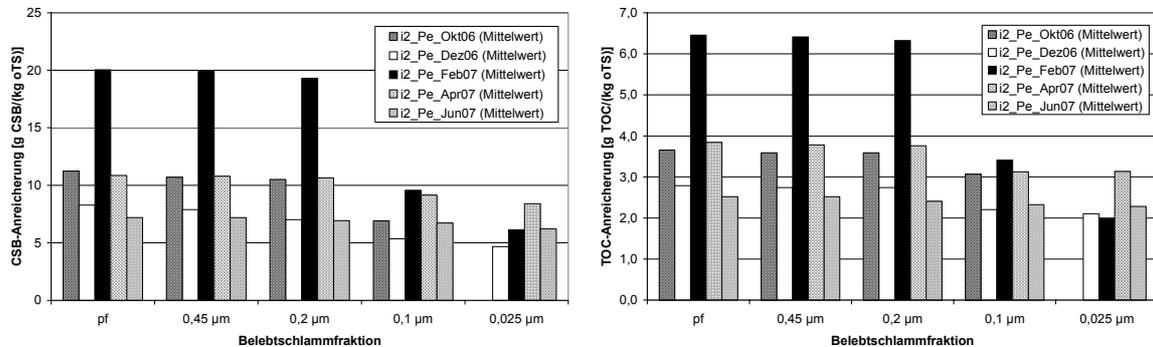
Ein Gleichgewicht zwischen Ausschleusung und Anreicherung stellte sich im Beobachtungszeitraum infolge des fehlenden ÜSS-Abzugs nicht ein. Die angereicherte Fracht nahm mit Ausnahme der Probe 12/06 zu (Abbildung 5.210, Tabelle 5.50). Möglicherweise führte die 11/06 erfolgte Membranreinigung dazu, dass ein Teil der angereicherten Substanzen mit dem Permeat ausgeschwemmt wurde, so dass kein Anstieg der angereicherten Fracht zwischen 10/06 und 12/06 nachgewiesen wurde. Im Hinblick auf die 02/07 erfolgte hohe Anreicherung (105 kg CSB) ist im Verlauf der folgenden Proben zu beobachten, dass diese in den größeren Fraktionen rückläufig ist. Im Gegensatz dazu ist eine Zunahme bei 0,025 µm zu verzeichnen, was darauf hinweist, dass infolge von Abbauvorgängen eine Verschiebung der angereicherten Substanzen in Stoffe mit einer geringeren Partikelgröße erfolgt.



**Abbildung 5.210: Angereicherte Fracht in der KA I2**

An der oTS-bezogenen spezifischen Anreicherung (Abbildung 5.211, Tabelle 5.50) ist der Effekt der Membranreinigung besser zu erkennen, als anhand der angereicherten Fracht. Am Ende der Untersuchungen sinkt sie auf das nach der Membranreinigung herrschende Niveau. Es ist anzunehmen, dass sich die

spezifische Anreicherung aufgrund des hohen Schlammalters relativ konstant verhält, aber durch betriebstechnische Einflüsse (u. a. Sauerstoffgehalt) vorübergehend beeinflusst wird.



**Abbildung 5.211: Spezifische Anreicherung in der KA I2 in Abhängigkeit des oTS**

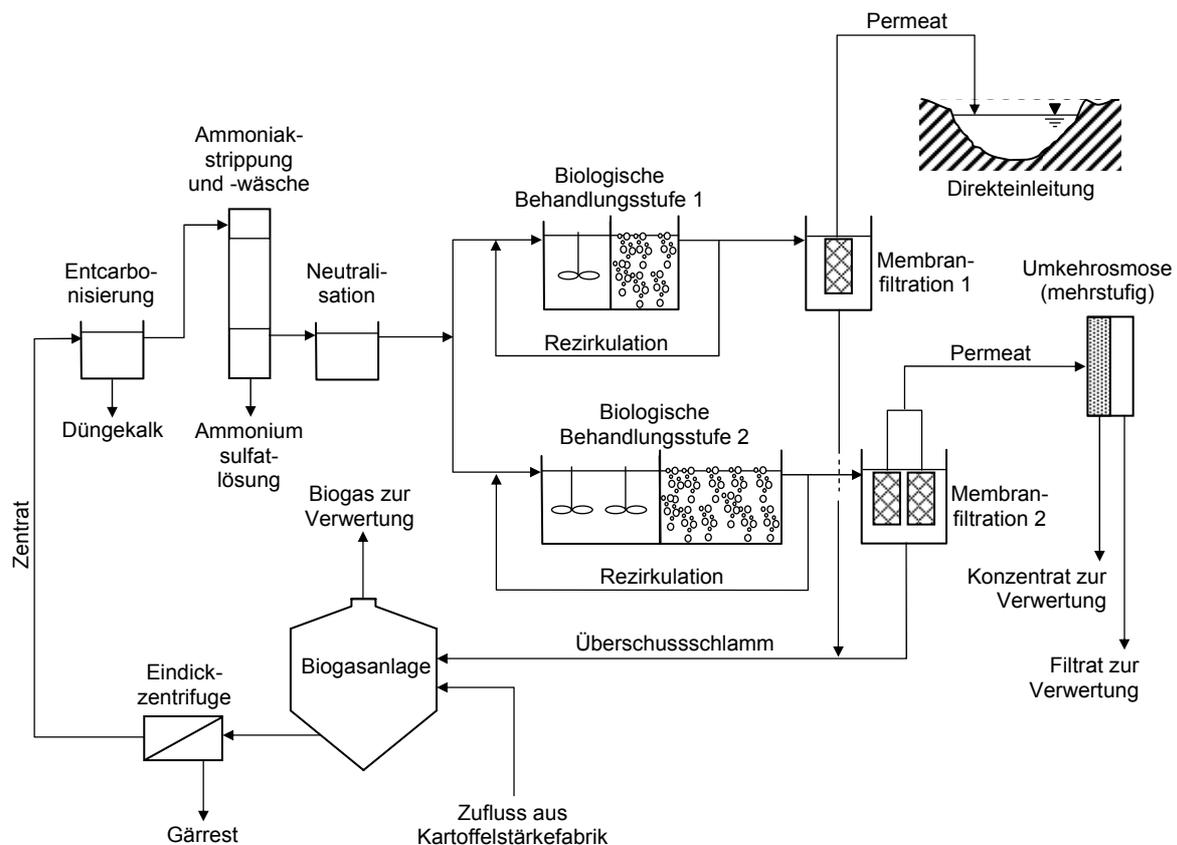
**Tabelle 5.50: CSB-Anreicherung in der KA I2 (Mittelwerte aller Proben)**

Einheit	Belebtschlammfraktion			
	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	0,025 µm
[g CSB/kg oTS]	11,7	11,4	10,9	7,1
[g TOC/kg oTS]	3,9	3,8	3,8	2,8

## 5.2.3 Anlage I3 – Kartoffelstärkeproduktion

### 5.2.3.1 Anlagenbeschreibung

In Kläranlage I3 (Abbildung 5.212) wird das Abwasser eines Betriebes zur Produktion von Kartoffelstärke behandelt. Der Zufluss aus dem Werk setzt sich aus Pülpe, Waschwasser, Prozesswasser und Fruchtwasser zusammen. Sanitäre Abwässer werden nicht in die Betriebskläranlage, sondern mit anfallendem Oberflächenwasser in die Kanalisation eingeleitet.



**Abbildung 5.212: Vereinfachte schematische Darstellung der Kläranlage I3**

Das Abwasser aus der Kartoffelstärkefabrik fällt nur während der Kartoffelkampagne von August bis Januar an (rd. 150 d). Parallel zur Behandlung in der Betriebskläranlage wird ein Teil in zwei Stapelteichen zwischengespeichert, um außerhalb der Kampagne eine gleichmäßige Beschickung der Anlage zu gewährleisten.

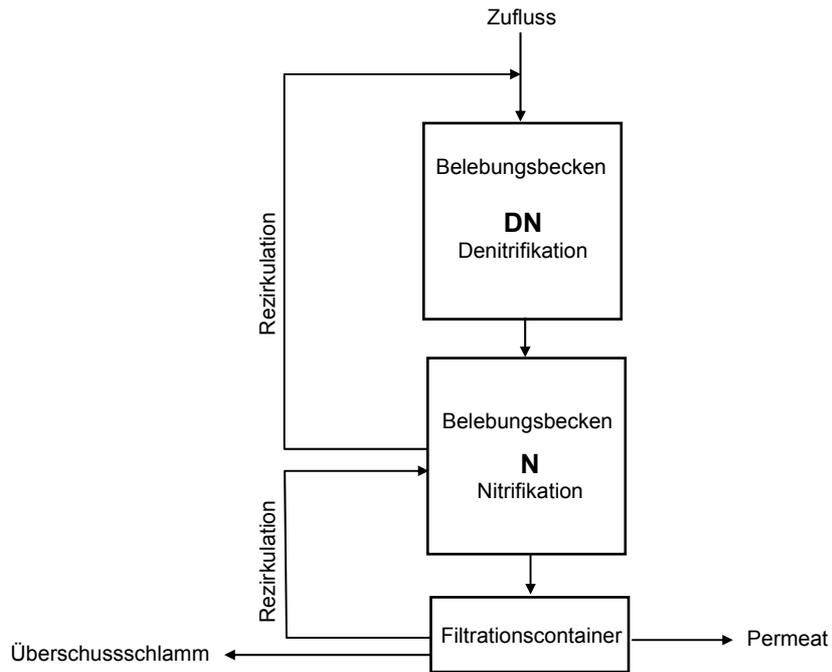
Das abgeleitete Abwasser wird zunächst anaerob zur Biogasgewinnung behandelt, das ausgefaulte Substrat (Gärrest) anschließend mit einer Zentrifuge maschinell auf rd. 8...9 % TR eingedickt. Zur Verminderung der Karbonathärte des Zen-

trats wird eine Entcarbonisierung mit Weißfeinkalk durchgeführt; der anfallende Reststoff als Düngekalk verwertet. Im Abwasser enthaltenes Ammoniak wird durch Strippung, mit danach folgender Gaswäsche ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), eliminiert. Anschließend erfolgt zur Senkung des pH-Wertes von 8,5 eine Dosierung von Salzsäure.



**Abbildung 5.213: Biologische Behandlungsstufe (Straße 1) der KA I3**

Die biologische Behandlungsstufe (Abbildung 5.214) besteht aus zwei prinzipiell gleich aufgebauten Straßen, wobei Straße 1 (S1, Abbildung 5.213) im Jahr 1996 in Betrieb genommen wurde (Erweiterung 2001), Straße 2 (S2) im Jahr 2003. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass S2 mit einem Zufluss von max.  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  eine höhere Kapazität als S1 mit max.  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  aufweist. Die hydraulische Auslastung lag i. M. in den Jahren 2005 und 2006 bei etwa 40 %. Beide Straßen verfügen über ein Belebungsbecken (S1:  $500 \text{ m}^3$ , S2  $1.200 \text{ m}^3$ ) mit einem vorgeschalteten Denitrifikationsbecken (S1:  $500 \text{ m}^3$ , S2:  $1.200 \text{ m}^3$ ). Die Membranfiltration erfolgt jeweils in einem nachgeschalteten Filtrationscontainer (Abbildung 5.215). Der aus den Filtrationsbecken abgezogene Überschussschlamm wird in die Biogasanlage gepumpt. Das Permeat von S1 wird direkt in einen Vorfluter eingeleitet, das Permeat aus S2 einer Behandlung in einer mehrstufigen Umkehrosmoseeinheit zugeführt. Die dabei anfallenden Konzentrate werden als Düngemittel, die Filtrate innerbetrieblich u. a. als Kesselspeisewasser verwertet. Im Rahmen der durchgeführten Messkampagne wurden ausschließlich aus S1 Proben entnommen.



**Abbildung 5.214: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der KA I3**

In den Filtrationsbecken von S1 und S2 sind getauchte Hohlfasermembranen (ZeeWeed 500 bzw. ZeeWeed 500D) der Fa. Zenon mit einer Filtrationsfläche von 3.840 m<sup>2</sup> (S1) bzw. 7.650 m<sup>2</sup> (S2) und einer Porengröße von 0,04 µm installiert. Der Betriebszyklus der Membranen besteht aus Filtration des Belebtschlammes (500 s), anschließender Entlüftung der Membranleitung (30 s) und Rückspülung der Membranen mit Permeat (35 s).



**Abbildung 5.215: Filtrationscontainer der KA I3 (Straße 1)**

Die chemische Reinigung der Membranen erfolgte 2007 in vierteljährlichen Abständen, im Jahr 2006 alle sechs Wochen. Dazu wird der sich in den Filtrationsbecken befindende Belebtschlamm entfernt und die Becken zur Reinigung mit Permeat und Chemikalien (Natriumhypochlorit, Zitronensäure) befüllt.

Der ÜSS-Abzug aus Straße 1 lag 2005 bei 29 m<sup>3</sup>/d, 2006 bei 16 m<sup>3</sup>/d und 2007 bei 10 m<sup>3</sup>/d. Das mittlere Schlammalter stieg damit von 34 d (2005) auf 61 d (2006) bzw. auf 100 d (2007).

### 5.2.3.2 Probenahme

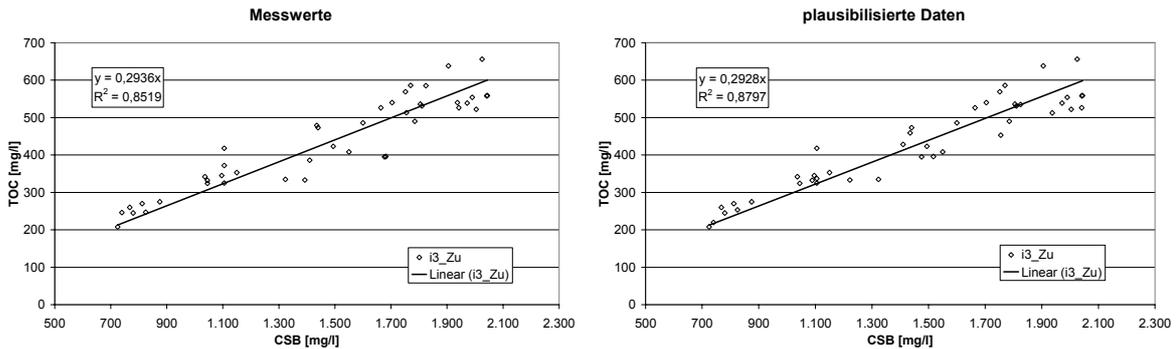
Die Anlage I3 wurde zunächst im Abstand von zwei Monaten 11/06 und 01/07 beprobt. Aufgrund einer technisch bedingten Betriebsunterbrechung an Straße 1 wurde die Probenahme ausgesetzt und nach deren Behebung 08/07, 10/07 sowie 12/07 weitergeführt. Die Zulaufproben wurden als Stichprobe aus dem Gesamtzufluss nach der Neutralisation an einer Probenahmestelle entnommen, die Belebtschlammproben als Stichproben aus dem Filtrationscontainer von S1, die Permeatproben ebenfalls als Stichproben aus der entsprechenden Probenahmestelle von S1.

### 5.2.3.3 Zuflussfraktionierung

Die Zulaufkonzentrationen lagen zwischen 1.100 mg CSB/l und 2.000 mg CSB/l. Einige vor Ort bestimmte Abwasserkenwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die CSB-, BSB<sub>5</sub>-, TKN-, NH<sub>4</sub>-N- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 5.51 dargestellt. Die pH-Werte lagen im neutralen, leicht sauren Bereich bei 5,8...6,7. Die Temperaturen sind ganzjährig relativ hoch (22...27 °C). Das TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,29 (CSB/TOC = 3,4) und wurde durch die Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) gering beeinflusst (Abbildung 5.216). Das CSB/BSB<sub>5</sub>-Verhältnis der unfiltrierten Proben liegt bei 3,0...4,4.

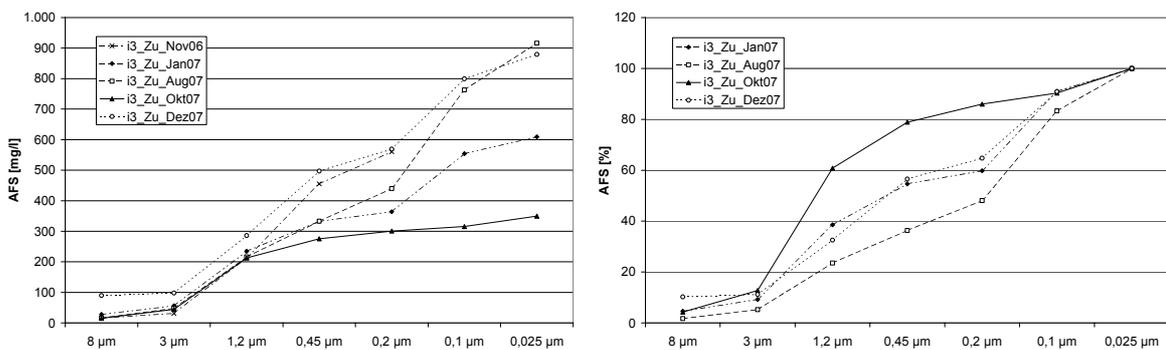
**Tabelle 5.51: Charakterisierung des Zuflusses zur KA I3**

Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unf.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	TKN	NH <sub>4</sub> -N	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mS/cm]	[-]	[°C]
11/06	723	1.990	1.494	850	nicht bestimmt	nicht bestimmt	12,40	6,7	25,4
01/07	465	2.025	1.682	204	nicht bestimmt	nicht bestimmt	16,69	6,4	25,3
08/07	590	1.905	1.435	470	196	109	14,21	6,5	22,4
10/07	305	1.105	825	242	193	125	11,33	6,7	22,5
12/07	581	1.770	1.096	546	210	108	11,37	5,8	26,7



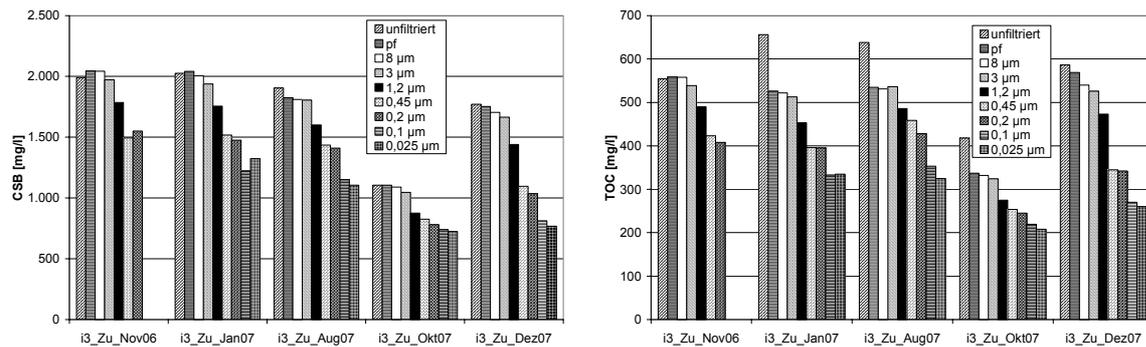
**Abbildung 5.216: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA I3**

In Abbildung 5.217 ist die Änderung der abgeschiedenen partikulären Substanzen als AFS im Bereich 8 µm bis 0,025 µm dargestellt. Die absoluten Werte zeigen bis 1,2 µm einen ähnlichen Verlauf, danach driften die Kurven auseinander. Bei den relativen Werten beginnt dies bereits nach 3 µm.

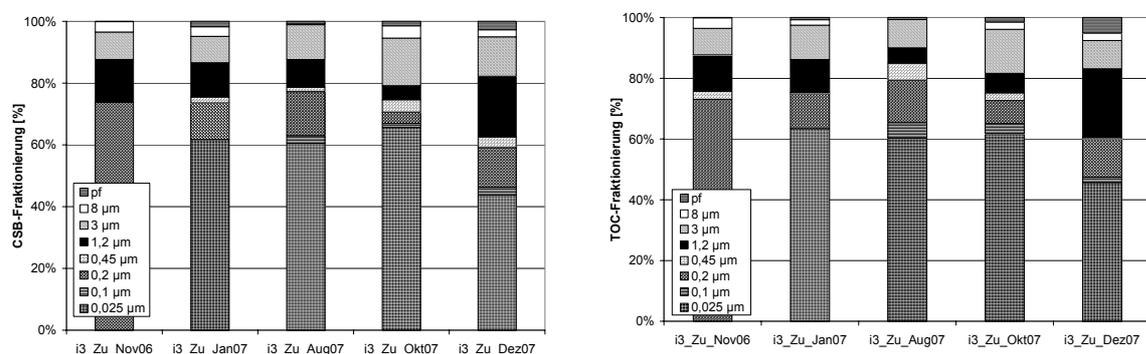


**Abbildung 5.217: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I3**

Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.218, Abbildung 5.219). Die Fraktionen variieren zwischen den Proben. Beim Vergleich von TOC und CSB der Einzelproben ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Die Konzentrationen nach der Filtration über Papierfilter und 8 µm-Membranfilter sind nahezu gleich. Beide Fraktionen haben zusammen einen Umfang von rd. 5 % (Abbildung 5.219). Die 3 µm-Fraktion ist mit 10...15 % (CSB und TOC) ähnlich wie die 1,2 µm-Fraktion deutlich erkennbar, wobei die 1,2 µm-Fraktion Schwankungen von 6...27 % unterworfen ist. Während die 0,45 µm- und die 0,1 µm-Fraktion vergleichsweise gering ausgeprägt sind (rd. 5 %), stellt die 0,2 µm-Fraktion mit 10...20 % eine signifikante Fraktion dar. Im Vergleich zur papierfiltrierten Probe nimmt die 0,025 µm-Fraktion den größten Anteil mit rd. 50...60 % ein.



**Abbildung 5.218: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage I3**



**Abbildung 5.219: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage I3 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

Wird die in der Abwassertechnik gebräuchliche 0,45 µm-Fraktion als Bezugswert für membranfiltrierte Proben gewählt, so sind 70...90 % des 0,45-µm Durchgangs kleiner als 0,1 µm und 70...85 % des 0,45-µm Durchgangs kleiner als 0,025 µm. Die größten Änderungen der Konzentrationen treten zwischen der 3 µm- und der 1,2 µm-Probe (CSB und TOC: 10 %), zwischen der 1,2 µm- und der 0,45 µm-Probe (14...15 %) sowie zwischen der 0,2 µm- und 0,1 µm-Probe (17 %) auf (Abbildung 5.220).

Die lineare Abhängigkeit aller Fraktionen ist ein Hinweis auf eine grundsätzlich ähnliche Abwasserbeschaffenheit. Die Bestimmung von partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC und deren Korrelation mit den AFS führte sowohl bei der Einzelbetrachtung der untersuchten Proben (Abbildung 5.221) als auch bei der Zusammenstellung aller Werte zu einer linearen Abhängigkeit (Abbildung 5.222).

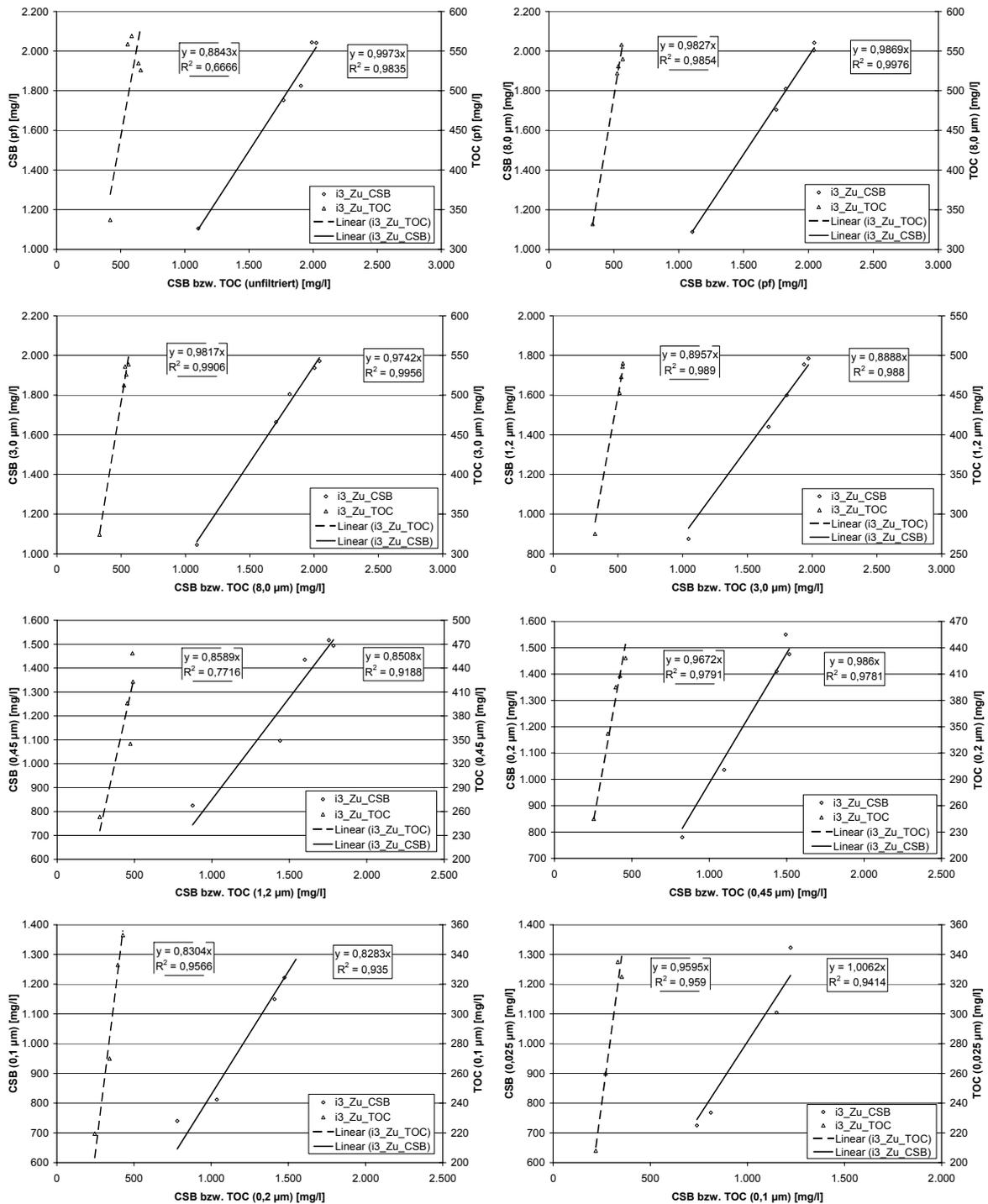
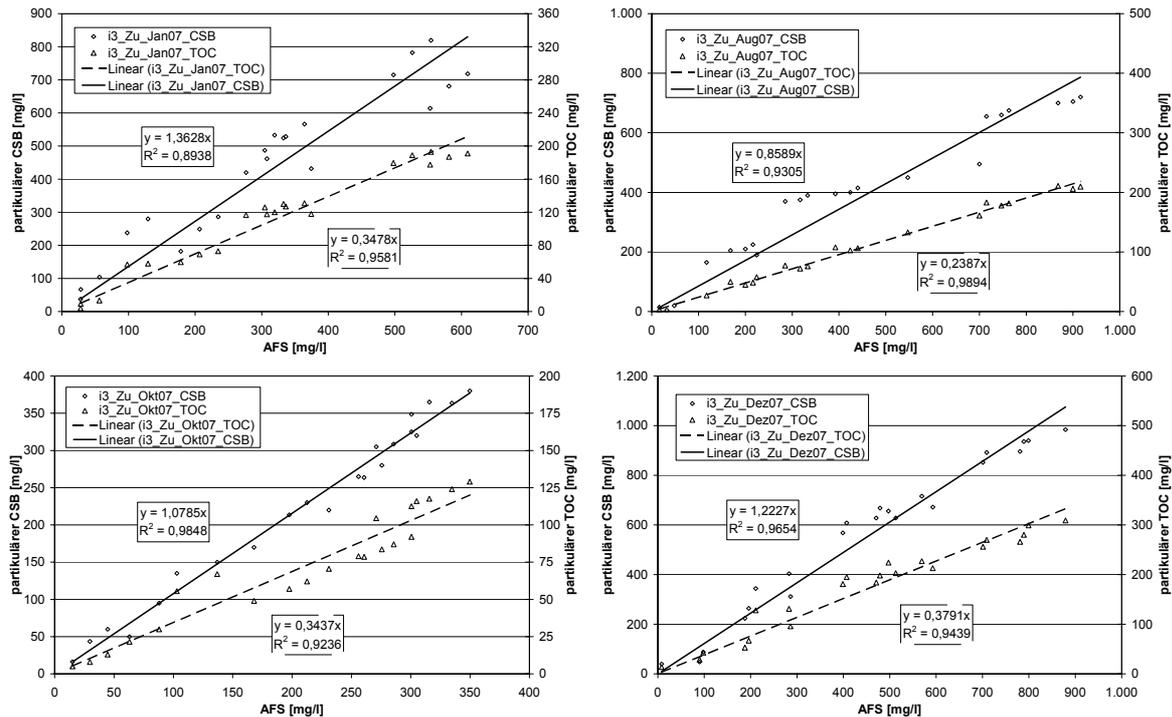
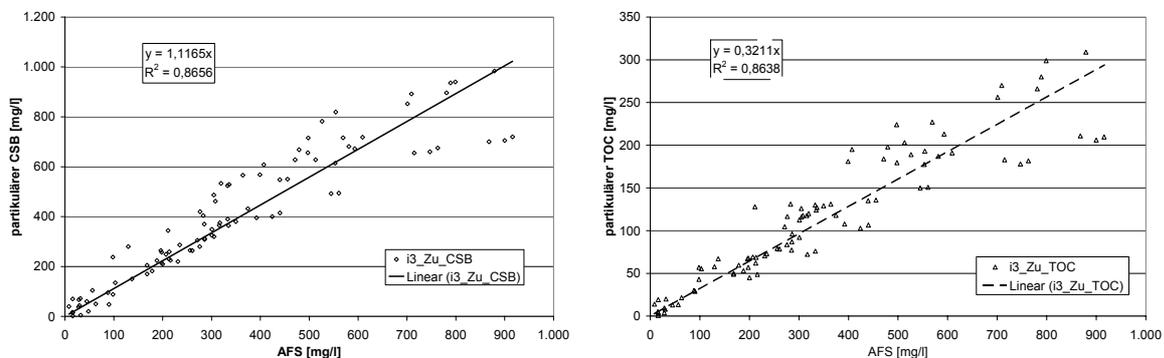


Abbildung 5.220: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I3



**Abbildung 5.221: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der KA I3**



**Abbildung 5.222: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der KA I3 (alle Proben)**

Im Gegensatz dazu sind die partikulären Anteile der Zuflüsse (Abbildung 5.223) nicht mit einander vergleichbar, da die Änderung der AFS (Abbildung 5.224) im Regelfall ebenfalls zu keiner Korrelation führt. Der Zusammenhang zwischen partikulärem CSB bzw. TOC und AFS zeigt (Abbildung 5.222), dass die AFS prinzipiell den gleichen organischen Anteil aufweisen. Unabhängig davon, dass es sich um Abwasser aus einem Betrieb mit relativ stabilen Produktionsprozessen handelt, weist der fehlende Zusammenhang zwischen den partikulären Substanzen aufeinander folgender Fraktionen (TOC, CSB, AFS) darauf hin, dass sich das Abwasser in dieser Hinsicht unterscheidet. Im Vergleich zum Gesamt-CSB bzw.

Gesamt-TOC ist der partikuläre Anteil von untergeordneter Bedeutung, so dass dessen Einfluss auf den Zusammenhang der Änderung der Gesamtkonzentrationen (Abbildung 5.220) aufeinander folgender Fraktionen nicht zum Tragen kommt.

Welchen Einfluss die chemisch-physikalische Vorbehandlung und die Zwischenspeicherung des Abwassers zum Betrieb der Kläranlage außerhalb der Kartoffelkampagne ausüben, kann im Rahmen der durchgeführten Messkampagne nicht beantwortet werden.

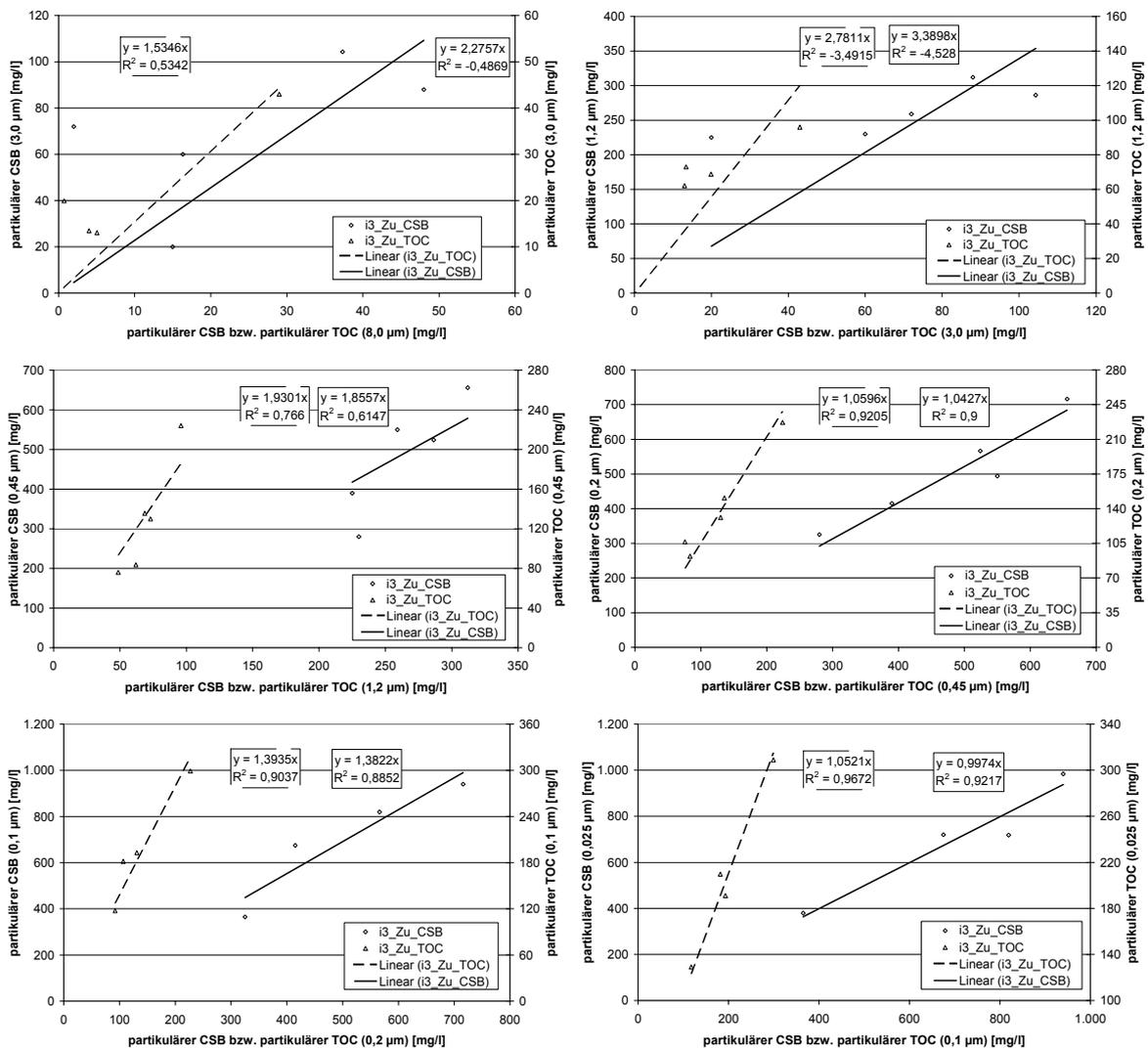
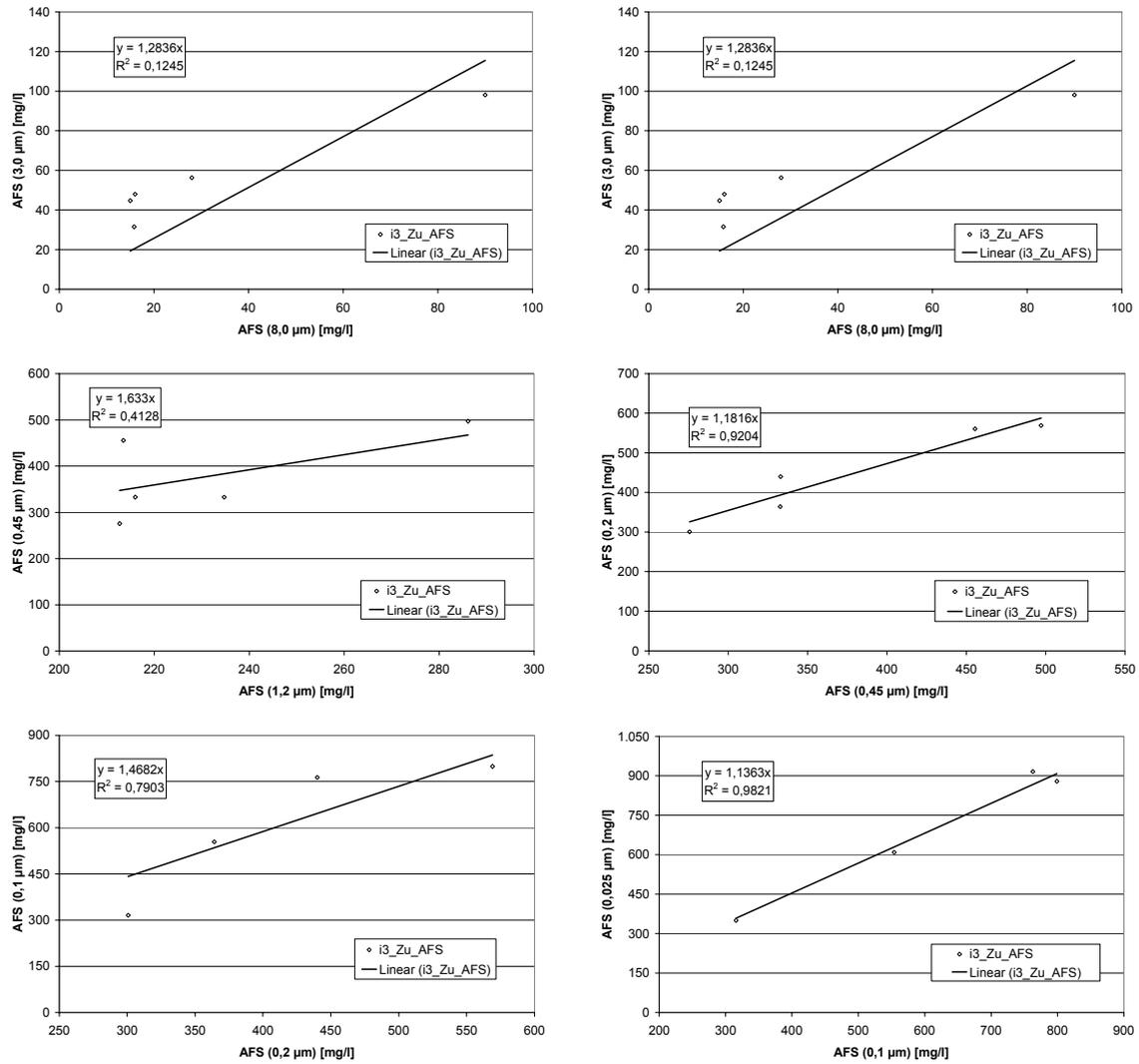


Abbildung 5.223: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage I3



**Abbildung 5.224: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I3**

### 5.2.3.4 Fraktionierung des Belebtschlamm

Der TS-Gehalt des Belebtschlamm der untersuchten Proben lag im Bereich von 8,6...19 g TS/l, der oTS-Gehalt zwischen 61 % TS und 88 % TS (Tabelle 5.52). Die temperaturnormierte Grundatmung ( $OVC_G + OVN_G$ ) lag im Bereich von 0,4...3,6 mg  $O_2$ /(g oTS·h) und damit im für stabilisierten Schlamm typischen Rahmen von < 5 mg  $O_2$ /(g oTS·h). Die Temperatur wies jahreszeitlich unabhängig Werte von über 20 °C auf (24...29 °C). Die Leitfähigkeit war mit 9,4...15 mS/cm vergleichsweise hoch. Im Membranbelebungsbecken herrschten neutrale bis leicht saure Bedingungen (pH-Wert = 6,4...7,0). Die im Filtrationscontainer ermittelten Werte stimmen mit denen des Nitrifikationsbeckens überein (Tabelle 5.53).

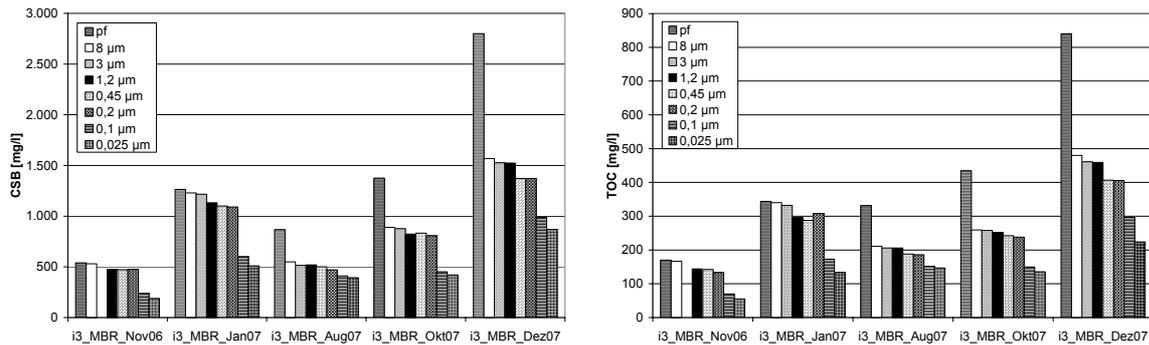
**Tabelle 5.52: Kennwerte des Filtrationsbeckens der KA I3**

Probe	TS	oTS	oTS	Atmung $OVC_G + OVN_G$	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg } O_2}{\text{g oTS} \cdot \text{h}}$	[-]	[°C]	[mS/cm]
11/06	8,6	7,6	88	2,1	6,8	24,3	10,9
01/07	12,3	10,2	83	0,4	6,4	26,1	15,0
08/07	9,8	7,9	80	2,6	7,0	28,9	12,9
10/07	12,0	9,8	81	2,3	7,0	27,2	9,36
12/07	19,0	11,6	61	3,6	6,6	28,2	10,3

**Tabelle 5.53: Kennwerte des Belebungsbeckens der KA I3**

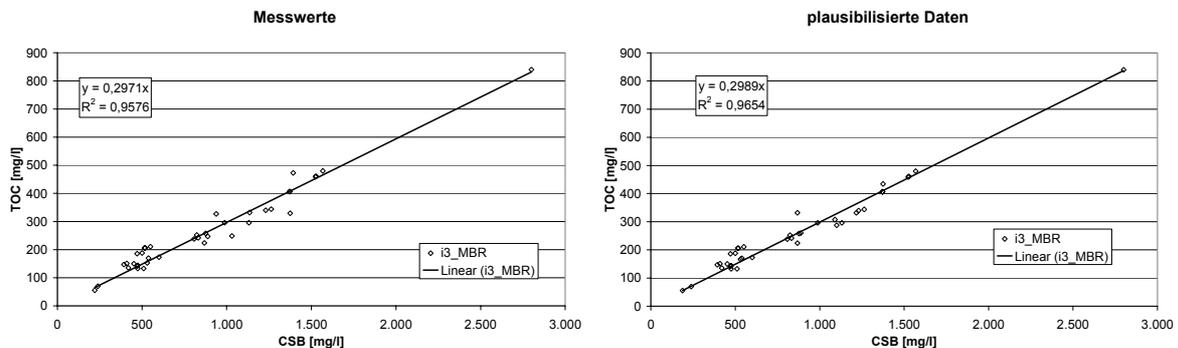
Probe	TS	oTS	oTS	Atmung $OVC_G + OVN_G$	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg } O_2}{\text{g oTS} \cdot \text{h}}$	[-]	[°C]	[mS/cm]
08/07	9,7	7,8	81	2,6	6,7	28,1	13,2
10/07	10,2	8,5	83	2,8	6,7	26,2	10,3
12/07	19,0	11,9	63	6,1	6,6	27,6	10,9

Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlamm des Membranbelebungsbeckens unterliegen einem messbaren Verlauf (Abbildung 5.225). Die Differenz zwischen dem 0,45 µm-Durchgang und dem 0,025 µm-Durchgang liegt bei 107...590 mg CSB/l.

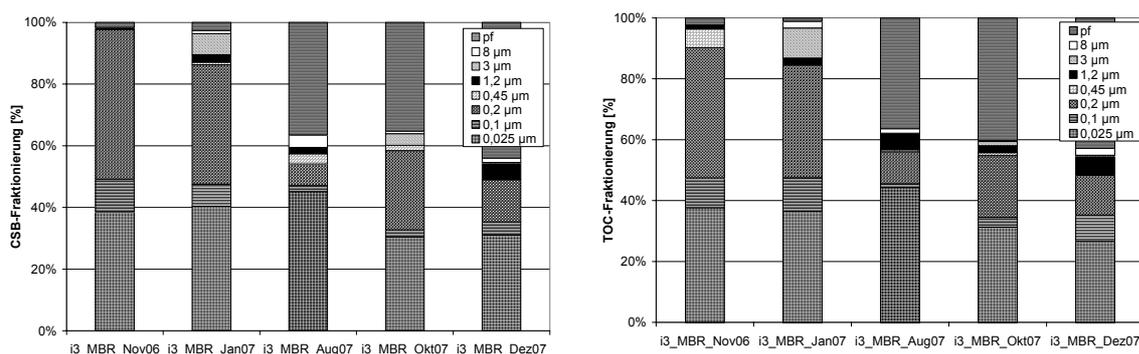


**Abbildung 5.225: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes aus dem Filtrationsbecken der KA I3**

Das TOC/CSB-Verhältnis aller dem Membranbecken entnommenen Proben liegt bei 0,30 (CSB/TOC = 3,4) und wird durch die Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) nur gering beeinflusst (CSB/TOC = 3,3, Abbildung 5.226).



**Abbildung 5.226: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes aus dem Membranbelebungsbecken der KA I3**



**Abbildung 5.227: Relative Verteilung der CSB- u. TOC-Fractionen im Belebtschlamm der KA I3 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

Beim Vergleich der relativen Zusammensetzung fällt auf, dass mit Wiederaufnahme der Beprobung (vgl. Abschnitt 5.2.3.2) eine Änderung der Schlammbeschaffenheit eingetreten ist. Vor der Unterbrechung war die 0,2 µm-Fraktion relativ stark ausgeprägt, nach Wiederinbetriebnahme war eine Zunahme der papierfiltrierten

Fraktion zu verzeichnen, d. h. es hat eine Zunahme von Substanzen mit einer Partikelgröße von  $> 8 \mu\text{m}$  stattgefunden (Abbildung 5.227). Der Belebtschlamm bestand vor der Betriebsunterbrechung zu rd. 85 % aus Substanzen mit einer Partikelgröße von  $< 0,45 \mu\text{m}$ , danach zu rd. 50...60 %. Die Unterschiede zwischen der Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen sind auf die verschiedenen Bestimmungsmethoden und deren spezifische Fehler zurückzuführen.

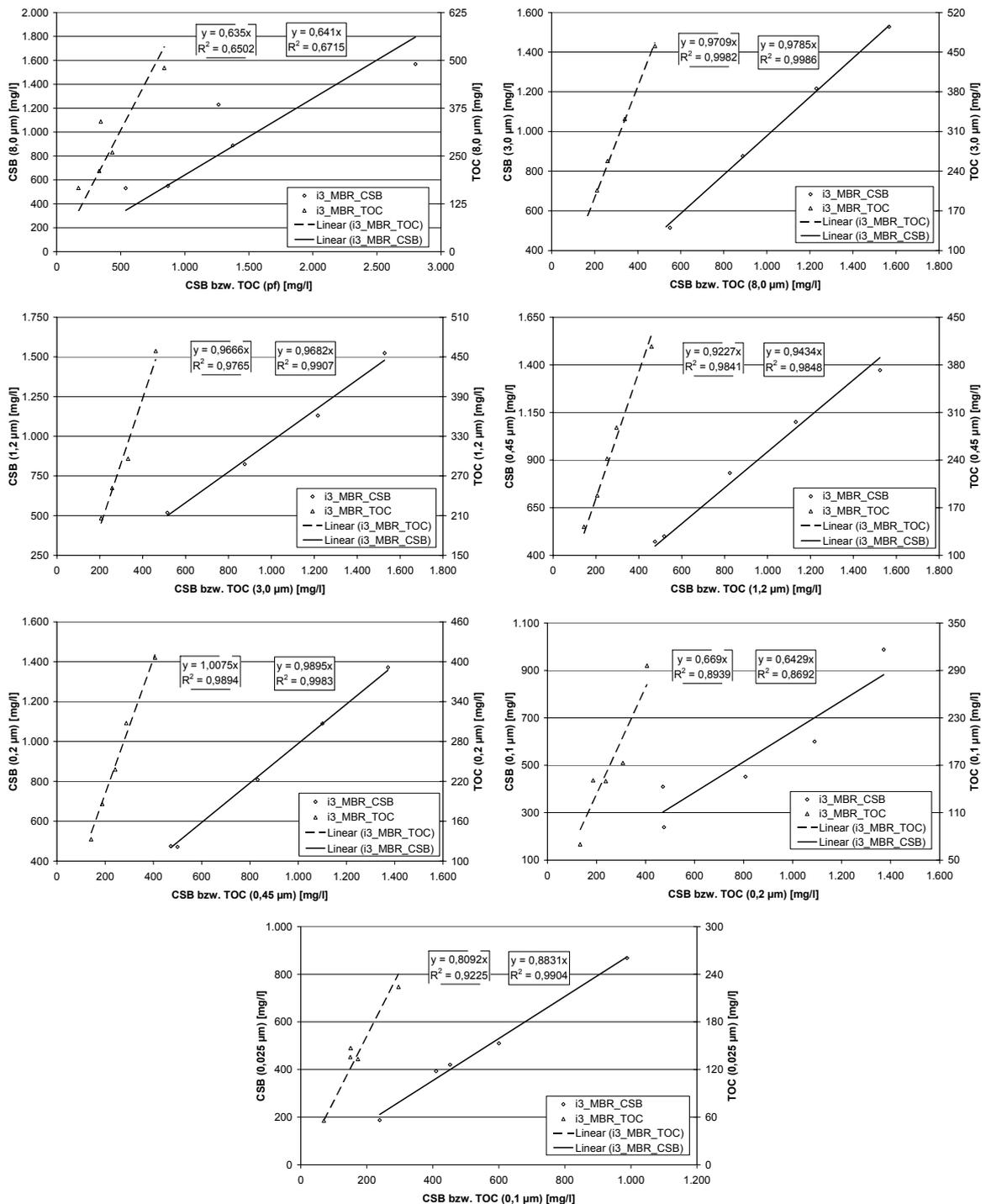
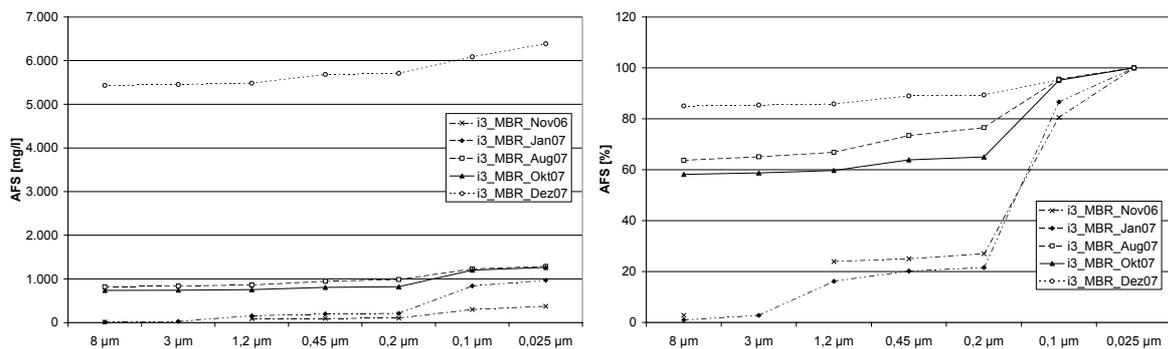


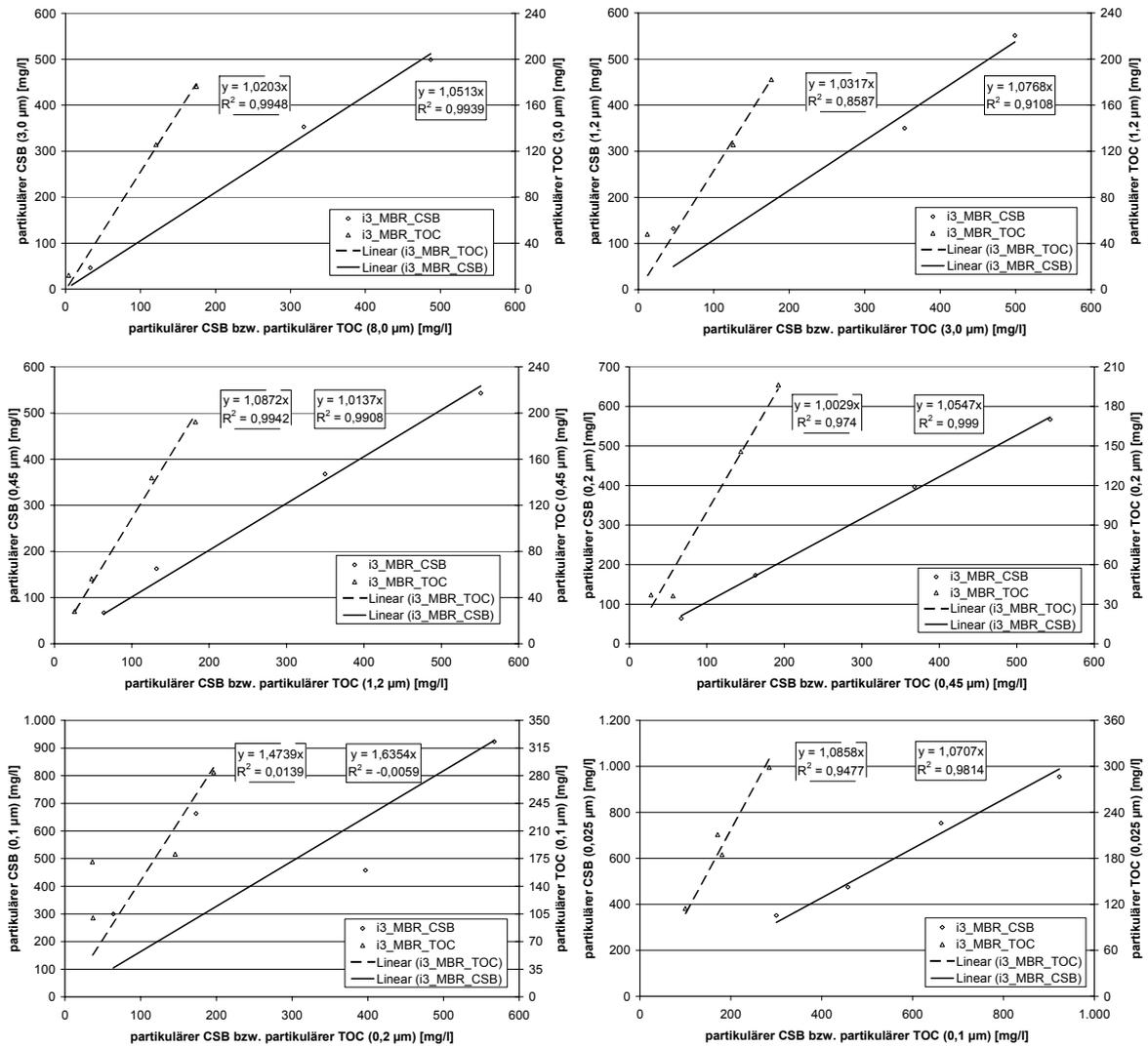
Abbildung 5.228: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen des Belebtschlammes KA I3

Die AFS im membranfiltrierten Belebtschlamm sind in Abhängigkeit des Zeitpunkts zur Betriebsunterbrechung ungleich verteilt (Abbildung 5.229). In Probe 12/07 sind signifikant mehr AFS enthalten, als in den übrigen Proben. Eine Korrelation von AFS nach der Filtration über 8 µm mit dem dazu gehörenden partikulären CSB bzw. TOC (Differenz der Analysen zwischen Papierfilter und 8 µm-Membranfilter) führte im Gegensatz zu allen anderen Wertepaaren zu keinem sinnvollen Ergebnis. Im Folgenden bleiben die genannten Analysen der partikulären Anteile von CSB und TOC unberücksichtigt.

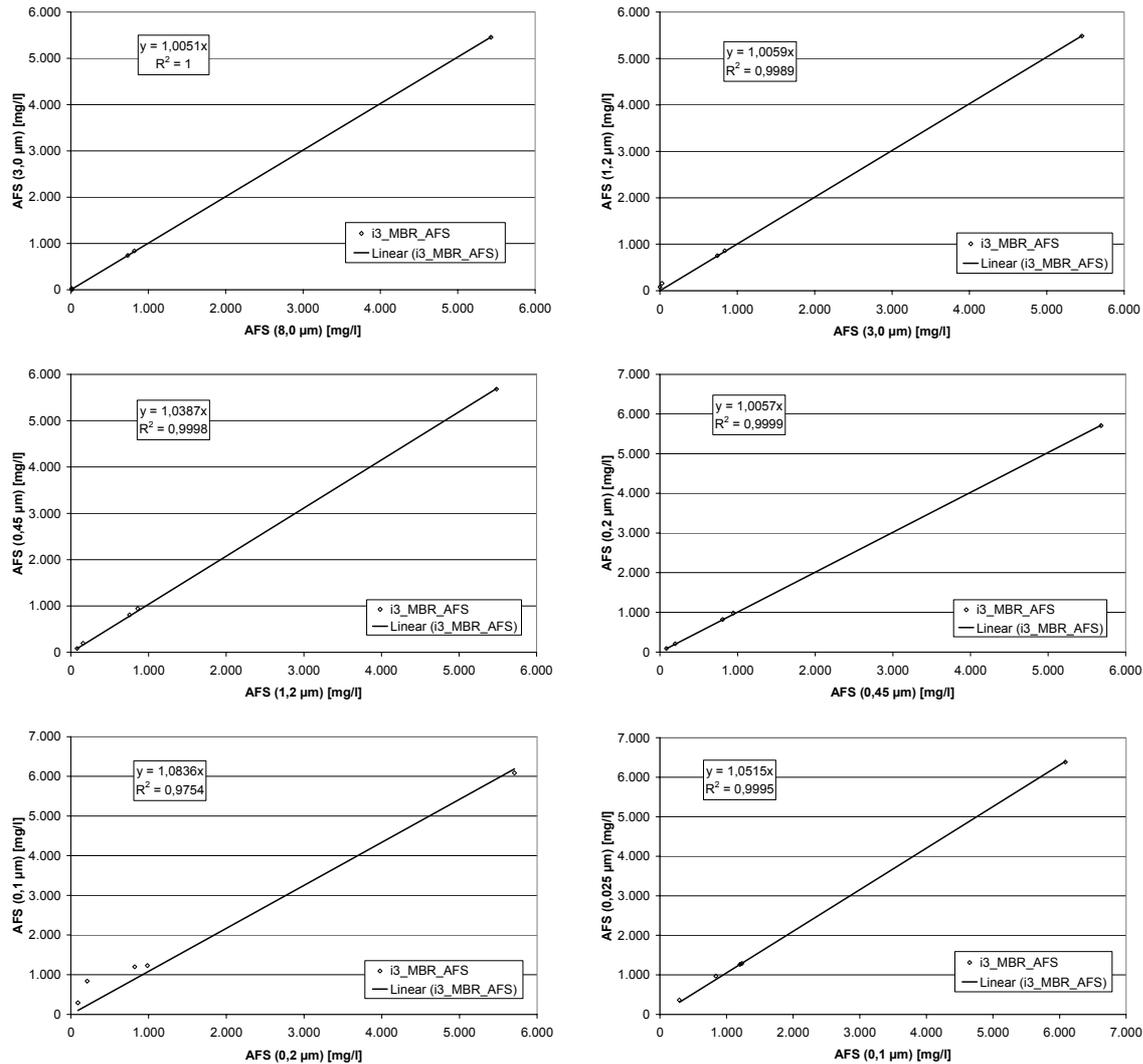


**Abbildung 5.229: AFS-Verteilung im filtrierten Belebtschlamm mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I3**

Aufgrund der geänderten Schlammbeschaffenheit besteht für die relative Änderung zwischen zwei Fraktionen nicht immer ein klarer Zusammenhang (Abbildung 5.228). Es ist zwar bei allen Proben übereinstimmend eine deutliche Trennung zwischen 0,2 µm und 0,1 µm erkennbar, allerdings mit unterschiedlicher Ausprägung. Dies ist auch an der Beziehung zwischen partikulären organischen Substanzen (Abbildung 5.230) und an der Änderung der AFS zwischen 0,2 µm und 0,1 µm (Abbildung 5.231) erkennbar. Für eine sichere Aussage sind weitere Untersuchungen erforderlich.

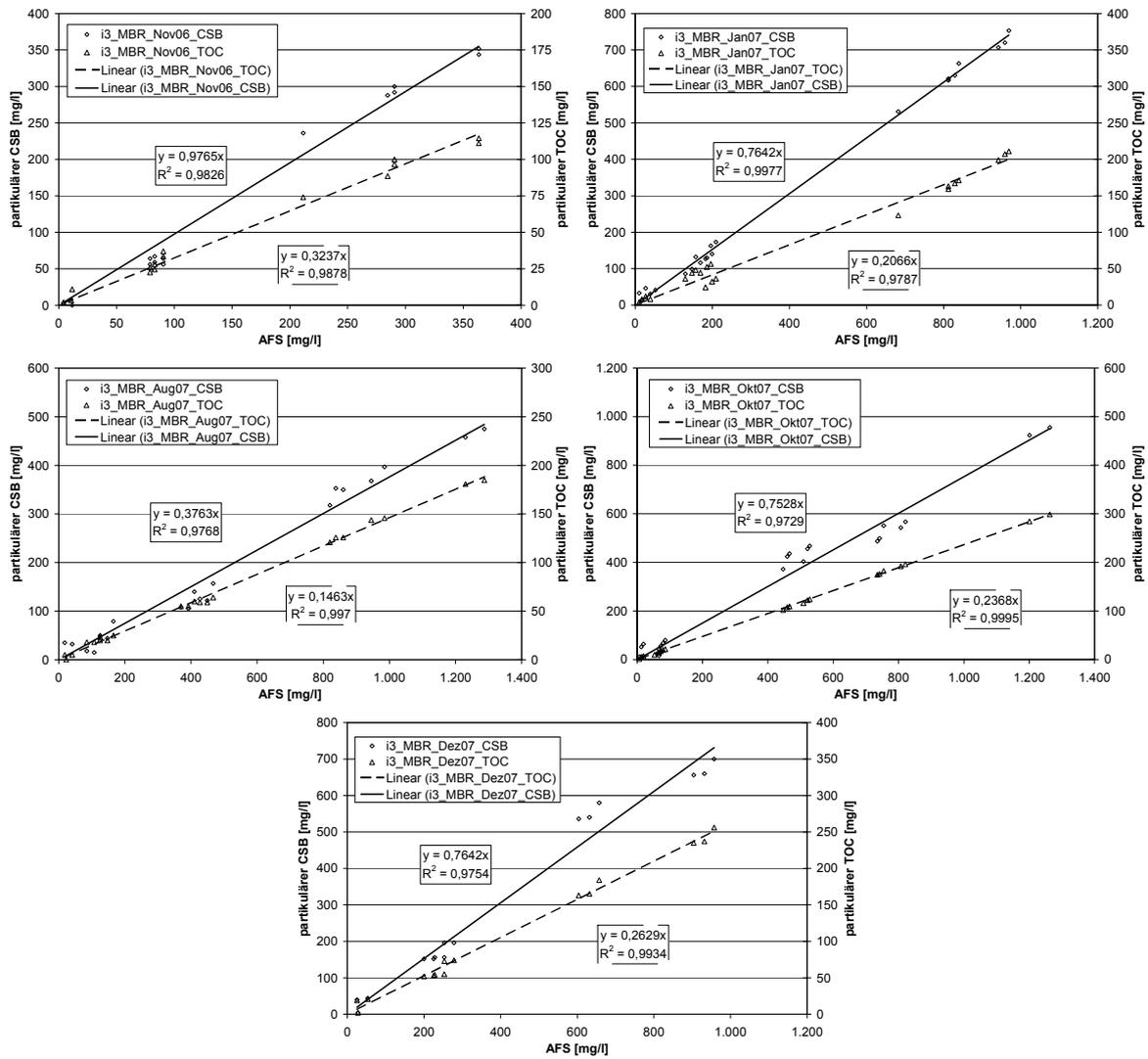


**Abbildung 5.230: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA I3**

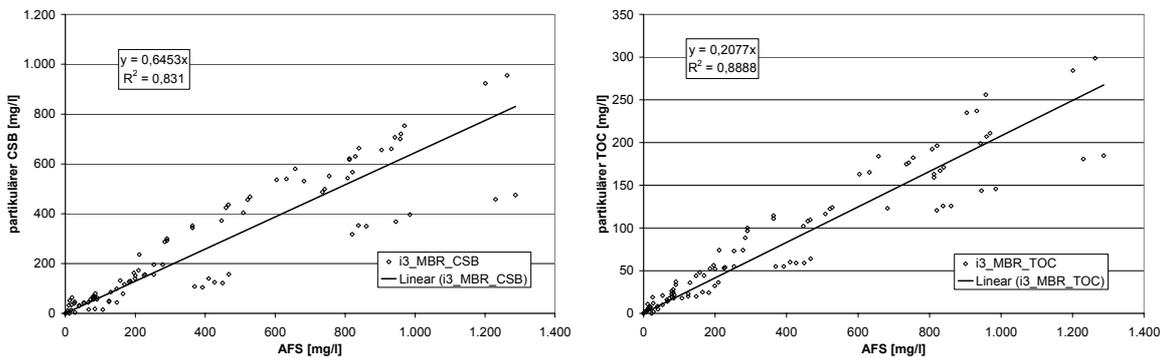


**Abbildung 5.231: Änderung der AFS aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA I3**

Ein Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC konnte für die Einzelproben nachgewiesen werden (Abbildung 5.232). Der Zusammenhang aller Werte (Abbildung 5.233) wird durch das nach Wiederinbetriebnahme vorliegende, im Vergleich zum mittleren CSB/TOC-Verhältnis, niedrigere Verhältnis von CSB/TOC = 2,8 beeinflusst.



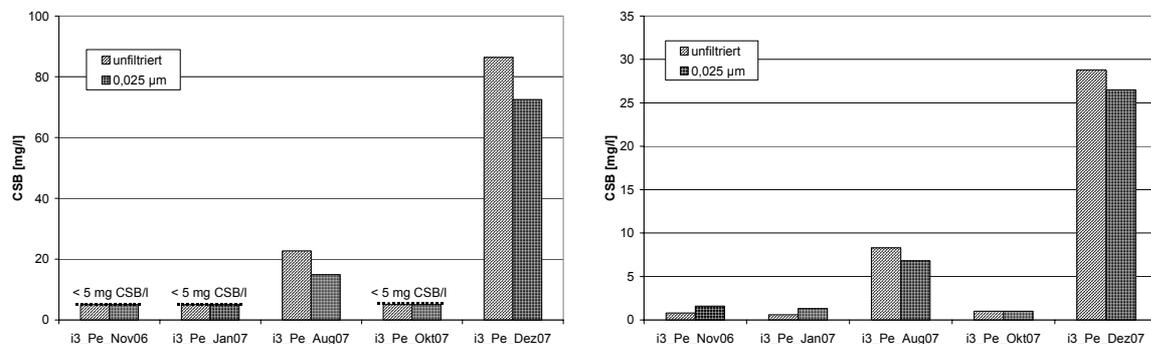
**Abbildung 5.232: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB bzw. TOC im Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I3**



**Abbildung 5.233: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben aus dem Filtrationsbecken der KA I3**

### 5.2.3.5 Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Die CSB-Ablaufkonzentrationen der Proben 11/06, 01/07, 10/07 (Abbildung 5.234) lagen unterhalb der Nachweisgrenze ( $< 5$  mg CSB/l). Probe 08/07 wies mit rd. 23 mg CSB/l höhere, Probe 12/07 mit 86 mg CSB/l wesentlich höhere Werte auf. Beim Vergleich der unfiltrierten mit den membranfiltrierten Konzentrationen dieser Proben fällt auf, dass die dabei auftretenden Unterschiede nicht mehr im Fehlerbereich liegen. Darüber hinaus zeigte die Trübung 08/07 eine Abnahme von 2,65 FNU (unfiltriert) auf 0,04 FNU (membranfiltriert) bzw. 12/07 von 2,96 FNU (unfiltriert) auf 0,48 FNU (membranfiltriert), d. h., im Permeat waren partikuläre Substanzen enthalten. Eine Ursache dafür kann eine ggf. auftretende Bildung von Biofilmen an der Probenahmestelle darstellen. An der Probenahmestelle war zu Reinigungszwecken ein Schlauch installiert, der nicht ständig durchströmt wurde, so dass eine Bildung von Biofilmen nicht ausgeschlossen ist. Bei entsprechender Turbulenz können Teile des Biofilms von der Schlauchwandung abgelöst werden und in die Permeatprobe gelangen. In Anbetracht der hohen CSB- und TOC-Konzentrationen im membranfiltrierten Belebtschlamm ist der Einfluss auf die Anreicherung vernachlässigbar (Abbildung 5.225).



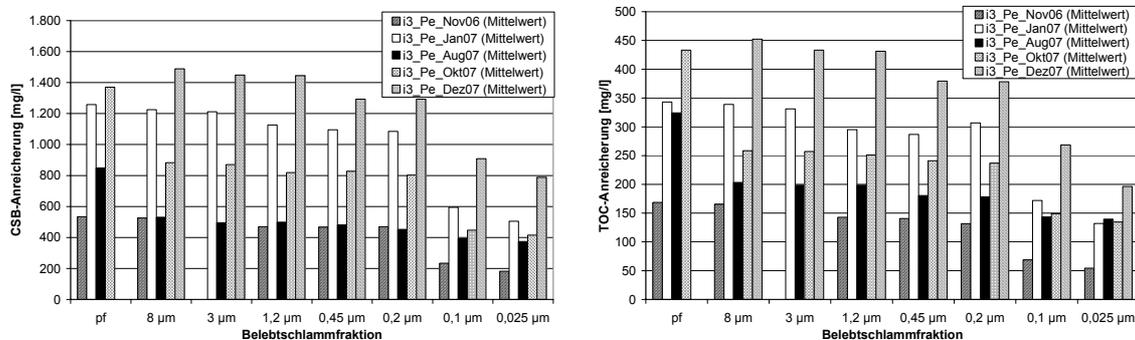
**Abbildung 5.234: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der Anlage I3**

Ähnlich wie beim CSB waren die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen z. T. nicht nachweisbar, z. T. erreichten sie Werte von bis zu 27,2 mg BSB<sub>5</sub>/l (Tabelle 5.54). Die Leitfähigkeit (Tabelle 5.54) lag wesentlich unter den im Filtrationscontainer ermittelten Konzentrationen (Tabelle 5.52, Tabelle 5.53), so dass von einem Rückhalt von gelösten Substanzen auszugehen ist.

**Tabelle 5.54: Permeatbeschaffenheit der Anlage I3**

Probe	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	pH-Wert [-]	T [°C]	Leitfähigkeit [µs/cm]
11/06	< 5	6,6	14,8	716
01/07	< 5	6,2	25,2	671
08/07	11,1	7,4	17,5	936
10/07	< 5	6,3	22,5	701
12/07	27,2	4,9	17,9	738

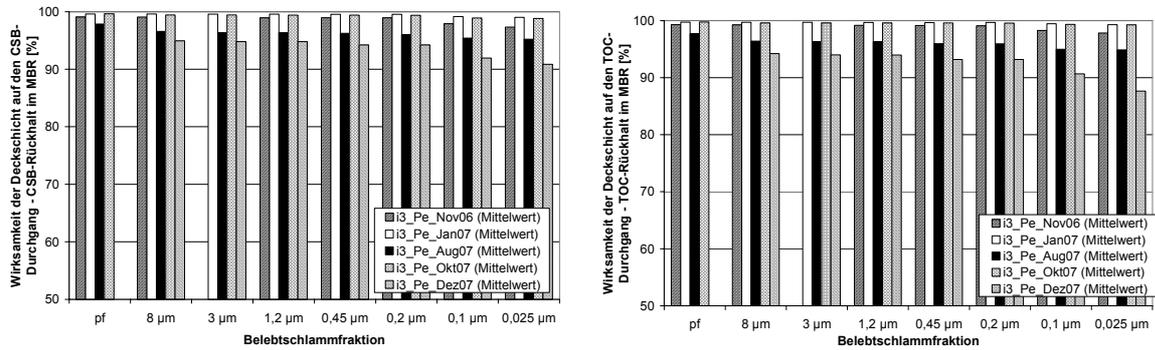
Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen wurde für die Belebtschlammfraktionen mit dem Mittelwert aus den unfiltrierten und filtrierten Permeatproben berechnet. Die Differenzen zwischen dem Permeatmittelwert und den Fraktionen sind deutlich (Abbildung 5.235). Inwieweit Anstieg und Abnahme der Anreicherung auf erfolgte Membranreinigungen oder ggf. den Abbau von temporär angereicherten Substanzen zurückzuführen ist, kann nicht beantwortet werden. Dafür wäre aufgrund der relativ häufigen Reinigungen ein kürzeres Probenahmeintervall erforderlich gewesen, was aber im Rahmen der Messkampagne nicht realisiert werden konnte.



**Abbildung 5.235: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der Anlage I3**

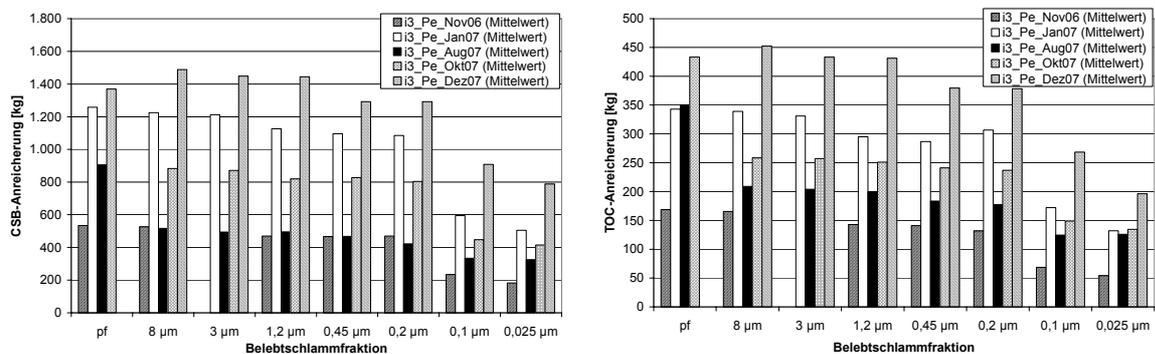
Unabhängig vom beobachteten Ausmaß der Anreicherung hochmolekularer organischer Stoffe in Anlage I3, bewirkt die sich im Betrieb ausbildende Deckschicht der Membran an allen Untersuchungstagen eine Verengung des Porendurchmessers der Anlage von 0,04 µm auf < 0,025 µm. Aus der Gegenüberstellung der Permeatkonzentrationen mit dem 0,025 µm-Durchgang kann abgeleitet werden, dass rd. 90 % des membranfiltrierten Belebtschlammes in der Anlage zurückgehalten werden (Abbildung 5.236). Es werden, neben der aufgrund der Porenweite

der Membran technisch bedingten partikulären Fraktion oberhalb  $0,04 \mu\text{m}$ , Substanzen angereichert, deren Partikelgröße mindestens bei  $0,025 \mu\text{m}$  liegt.

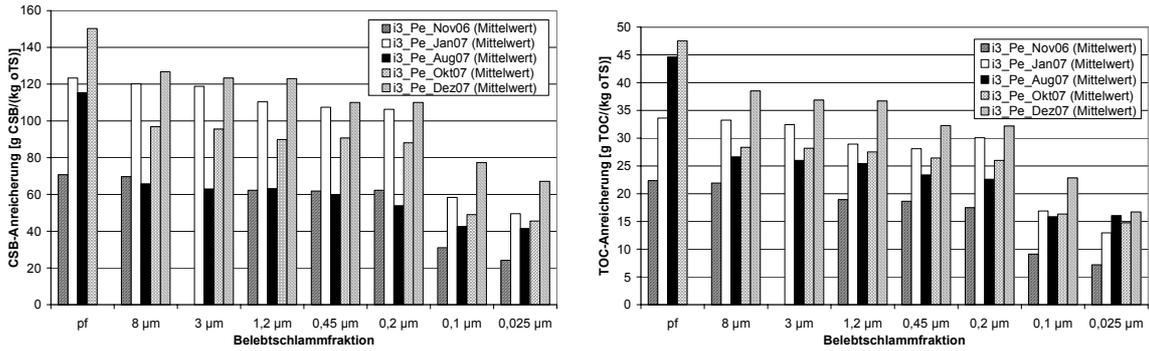


**Abbildung 5.236: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage I3**

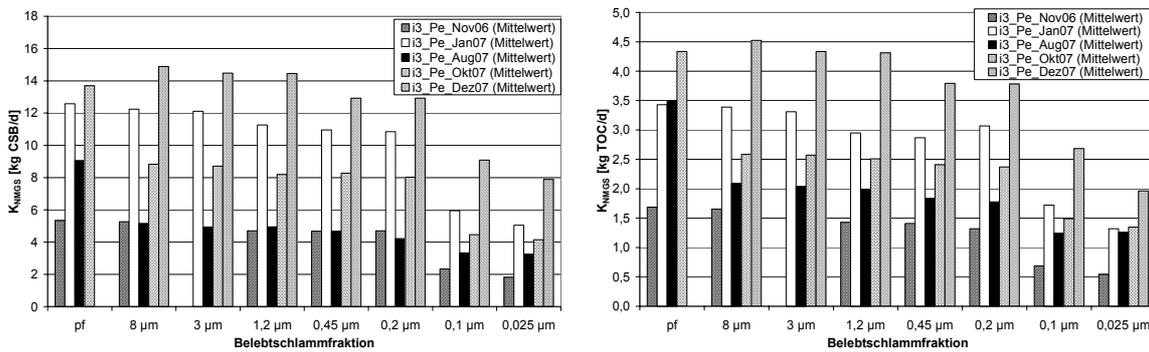
Eine Ausschleusung angereicherter Substanzen aus einer Membrananlage erfolgt durch Überschussschlammabzug. Ein Gleichgewicht zwischen Anreicherung und Ausschleusung ist nicht erkennbar (Abbildung 5.237, Abbildung 5.238), was einerseits am geringen ÜSS-Abzug liegt, andererseits durch die Betriebsunterbrechung beeinflusst wird. Im Verlauf der Messkampagne ist nach Wiederinbetriebnahme 08/07 eine Akkumulation der angereicherten Substanzen feststellbar. Die Angabe einer mittleren spezifischen Bildungsrate (Abbildung 5.239, Abbildung 5.240) ist daher nicht sinnvoll.



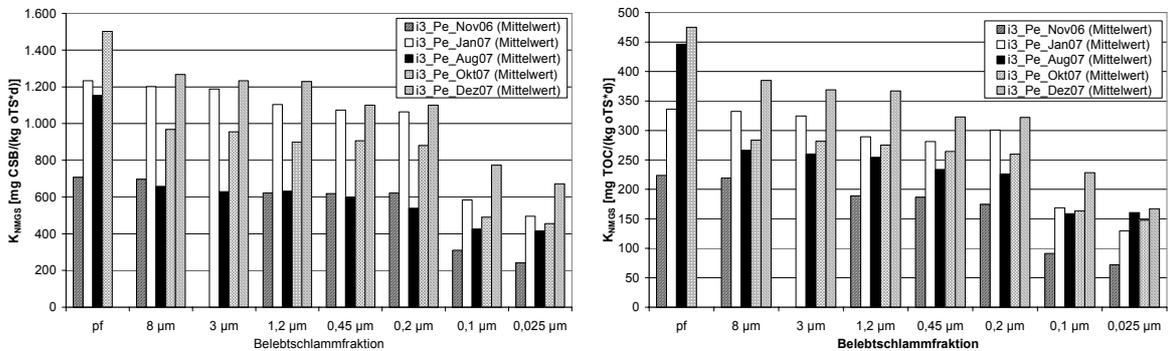
**Abbildung 5.237: Angereicherte Fracht in KA I3 am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.238: Spezifische Anreicherung in KA I3 in Abhängigkeit des oTS am Tag der Probenahme**



**Abbildung 5.239: Bildungsrate nicht membrängängiger Substanzen**

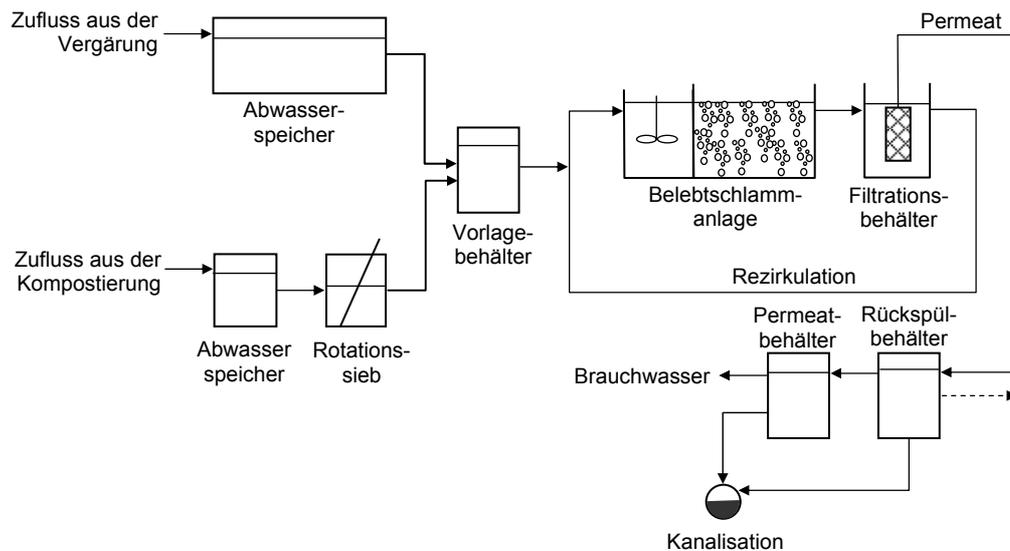


**Abbildung 5.240: Spezifische Bildungsrate nicht membrängängiger Substanzen**

## 5.2.4 Anlage I4 – Grün- und Bioabfallbehandlung

### 5.2.4.1 Anlagenbeschreibung

In Kläranlage I4 (Inbetriebnahme: 01/2000; Abbildung 5.241) wird das Abwasser eines Betriebs zur Grün- und Bioabfallbehandlung für die Indirekteinleitung in die Kanalisation aufbereitet. Die Verfahrensschritte umfassen im Wesentlichen eine mechanische Vorbehandlung (Zerkleinerung, Entfernung von Metallen und Störstoffen) und die sich daran anschließende biologische Abfallbehandlung aus Kompostierung und Vergärung (Biogasgewinnung). Der Gärrest wird mit Siebschneckenpressen und einer Zentrifuge entwässert, der Dickstoff der Kompostierung, das Zentrat der Abwasserbehandlungsanlage zugeführt. Das während der Kompostierung anfallende Sickerwasser gelangt ebenfalls in die Betriebskläranlage (Abbildung 5.242).



**Abbildung 5.241: Vereinfachte schematische Darstellung der Kläranlage I4**

Das abgeleitete Abwasser der Teilströme wird vor der Vermischung in einem Vorlagebehälter ( $0,5 \text{ m}^3$ ) in jeweils einem Behälter zwischengespeichert (Vergärung:  $50 \text{ m}^3$ , Kompostierung:  $4 \text{ m}^3$ ). Der Zufluss aus der Kompostierung wird nach der Zwischenspeicherung über ein Rotationssieb (Maschenweite:  $200 \mu\text{m}$ ) zur Abscheidung partikulärer Substanzen geführt. Das Siebgut wird anschließend kompostiert. Die biologische Behandlungsstufe besteht aus vorgeschalteter Denitrifikation ( $18 \text{ m}^3$ ), einem Nitrifikationsreaktor ( $361 \text{ m}^3$ ) und einem Filtrationsbehälter ( $5 \text{ m}^3$ ) (Abbildung 5.243, Abbildung 5.244). Die Prozessführung erfolgt automa-

tisch. Der ÜSS-Abzug wird werktags vorgenommen und richtet sich nach dem TS-Gehalt. Die Anlage wird im Bereich von 18...20 g TS/l betrieben. Die abgezogene ÜSS-Menge liegt bei etwa 5 m<sup>3</sup>/d und wird der Vergärung zugeführt. Das Schlammalter entspricht rd. 80 d.

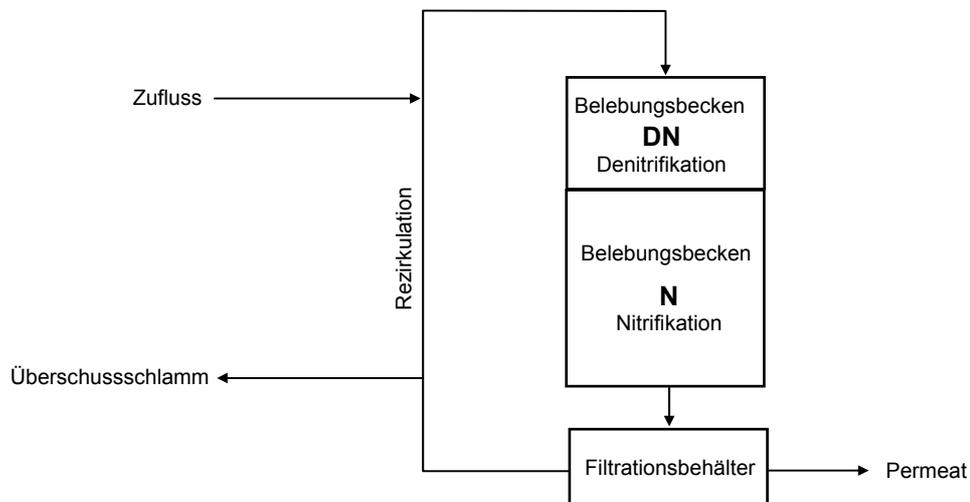


**Abbildung 5.242: Betriebskläranlage I4 – Biologische Behandlungsstufe (links, im Hintergrund), Container für Prozesstechnik und Filtration**

Im Verfahrenskonzept ist eine Nutzung des Permeats zur Anmischung des Bioabfalls vor der Vergärung vorgesehen; in der Praxis wird zur Anmischung das unbehandelte Abwasser genutzt. Die Anlage wird daher diskontinuierlich beschickt und wurde während der Messkampagne zum Teil nicht mit Abwasser beaufschlagt. Der Zufluss im Jahr 2006 lag bei rd. 4.410 m<sup>3</sup>/a (i. M. 12 m<sup>3</sup>/d) im Jahr 2007 bei rd. 2.540 m<sup>3</sup>/a (7 m<sup>3</sup>/d). Der Bemessungszufluss zur Anlage beträgt 1,7 m<sup>3</sup>/h bzw. 41 m<sup>3</sup>/d.

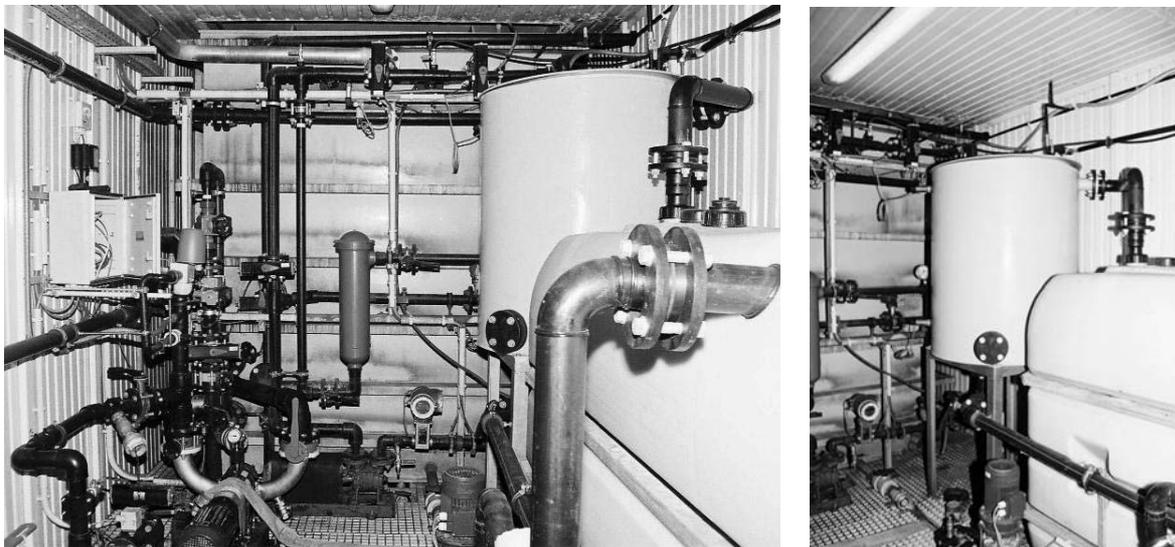
Im Filtrationsbecken sind vier Membranmodule (ZeeWeed 500 OKC) der Fa. Zenon mit einer Filtrationsfläche von 184 m<sup>2</sup> und einer Porengröße von 0,4 µm installiert. Der Betriebszyklus der Membranen besteht aus Filtration des Belebtschlammes (240 s), anschließender Entlüftung der Membranleitung (3 s) und Rück-

spülung der Membranen mit Permeat (3 s). Das Permeat gelangt über einen Rückspülbehälter (rd. 0,7 m<sup>3</sup>) in den Permeatbehälter (2,5 m<sup>3</sup>).



**Abbildung 5.243: Schematische Darstellung der biologischen Reinigungsstufe der KA I4**

Eine chemische Zwischenreinigung der Membranen wird alle 7 d mit Natriumhypochlorit durchgeführt. Zusätzlich wird eine jährliche Reinigung mit Natriumhypochlorit und Zitronensäure vorgenommen.



**Abbildung 5.244: Filtrationsbecken, Rückspülbehälter, Permeatbehälter der KA I4**

### 5.2.4.2 Probenahme

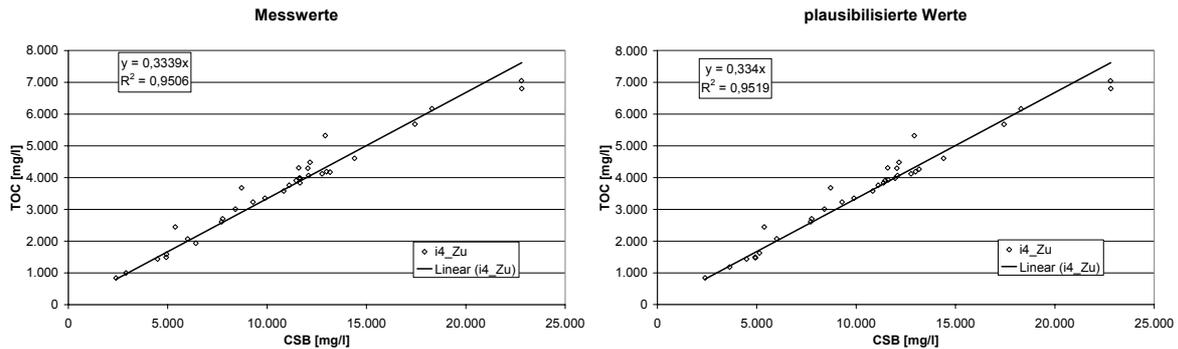
Die Anlage I4 wurde im Abstand von 2 Monaten 11/06, 01/07, 03/07, 05/07 und 07/07 beprobt. Die Zulaufproben wurden aus dem Gesamtzulauf nach der Vermischung der Teilströme aus dem Vorlagebehälter als Stichprobe entnommen, die Belebtschlammproben als Stichproben aus einer Probenahmestelle, die Permeatproben ebenfalls als Stichproben aus dem Rückspülbehälter.

### 5.2.4.3 Zuflussfraktionierung

Die CSB-Zulaufkonzentrationen waren relativ großen Schwankungen unterworfen (12,9...22,8 mg CSB/l). Das Abwasser ist z. T. maßgeblich durch einen hohen Anteil partikulärer Substanzen gekennzeichnet (0,4...15,3 g AFS<sub>mf</sub>/l). Das CSB/BSB<sub>5</sub>-Verhältnis (5...19) deutet auf die Anwesenheit schwer abbaubarer Verbindungen hin. Einige vor Ort bestimmte Abwasserkennwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die CSB-, BSB<sub>5</sub>- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 5.55 dargestellt. Die pH-Werte lagen im neutralen bis leicht alkalischen Bereich (6,9...8,1). Das TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,33 (CSB/TOC = 3,0) und wurde durch die Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) nur gering beeinflusst (CSB/TOC = 3,1, Abbildung 5.245).

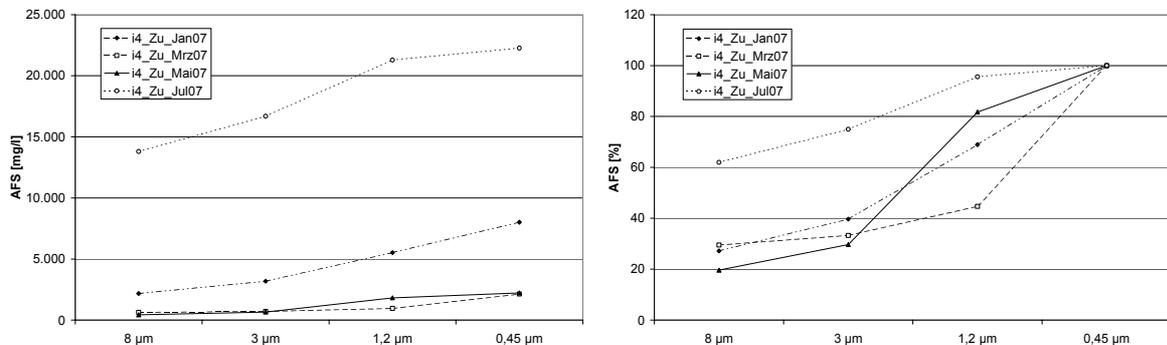
**Tabelle 5.55: Charakterisierung des Zuflusses zur KA I4**

Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unf.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	TKN	NH <sub>4</sub> -N	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mS/cm]	[-]	[°C]
11/06	2.840	12.924	5.379	760	nicht bestimmt	nicht bestimmt	15,0	7,9	25,0
01/07	3.507	17.438	6.006	8.100	nicht bestimmt	nicht bestimmt	14,1	7,6	16,2
03/07	1.395	18.290	2.902	5.100	nicht bestimmt	nicht bestimmt	10,1	8,1	15,5
05/07	1.650	14.400	11.610	396	1.455	1.100	11,6	6,9	29,5
07/07	1.178	22.798	7.764	15.300	2.365	496	16,2	7,5	35,2



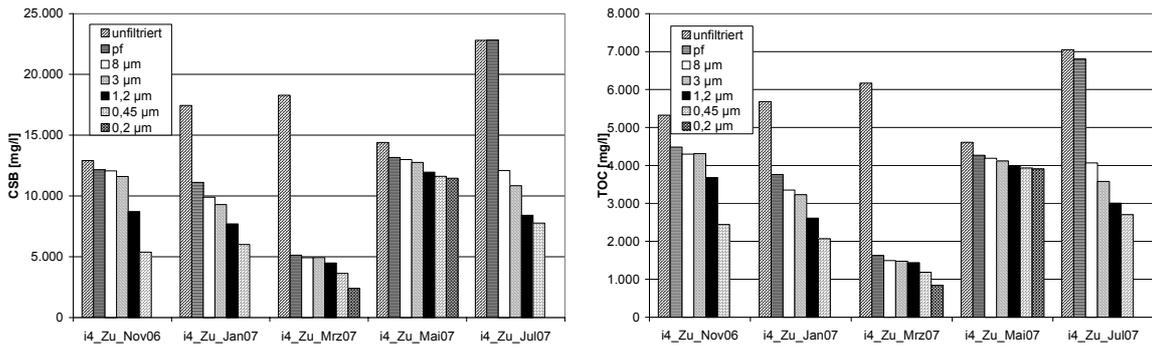
**Abbildung 5.245: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse der KA I4**

In Abbildung 5.246 ist die Änderung der abgeschiedenen partikulären Substanzen als AFS im Bereich  $8\ \mu\text{m}$  bis  $0,025\ \mu\text{m}$  dargestellt. Ein gemeinsamer Trend aller Werte ist nicht nachweisbar.

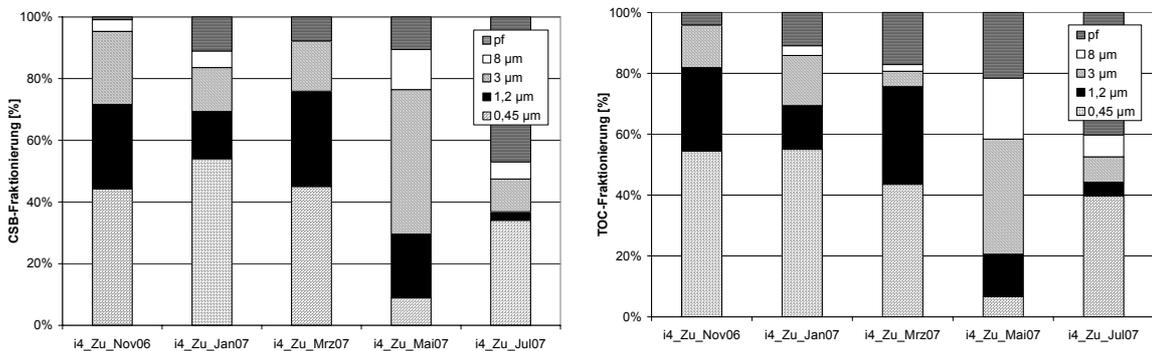


**Abbildung 5.246: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur  $8\ \mu\text{m}$ -Probe der Anlage I4**

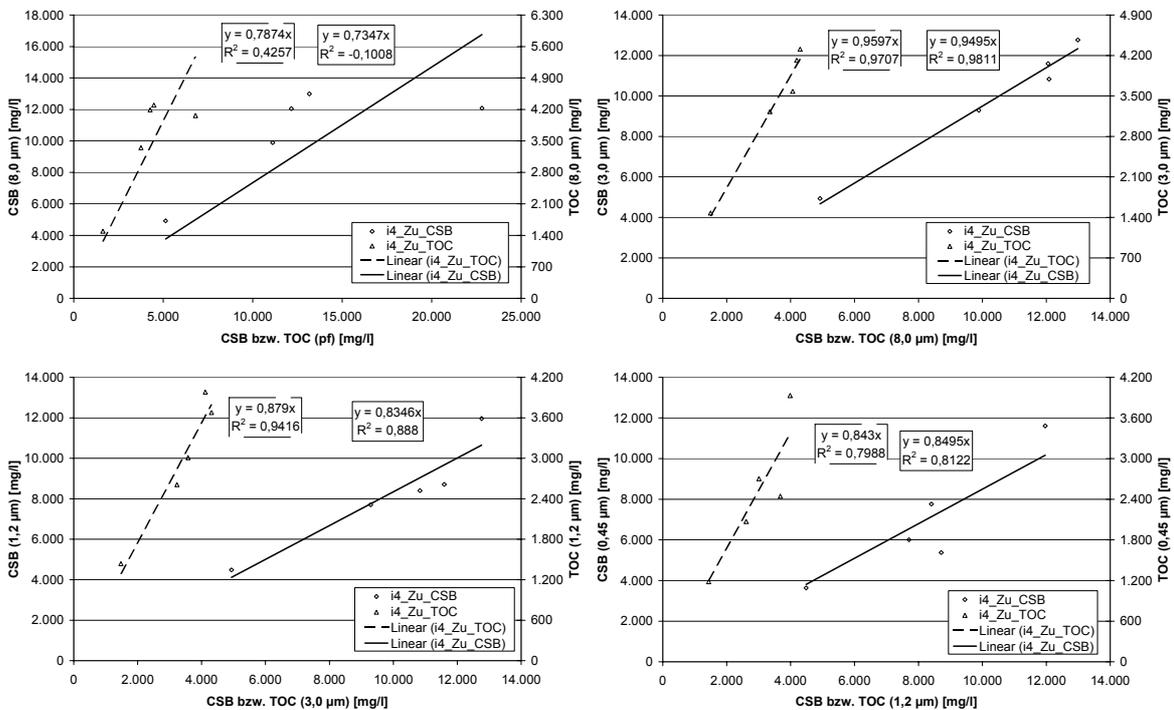
Die Zulauffraktionierung wurde aufgrund der schwierigen Probeaufbereitung im Regelfall nur bis  $0,45\ \mu\text{m}$  durchgeführt. Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 5.247). Die Verteilung der Fraktionen ist uneinheitlich (Abbildung 5.248), so dass eine verallgemeinerbare Aussage zur Beschaffenheit des Zulaufes nicht sinnvoll ist. In Verbindung mit dem Verlauf der AFS (Abbildung 5.246) deutet sich an, dass die Zuflussbeschaffenheit Schwankungen unterworfen ist, die auf das Mischungsverhältnis zwischen Kompostierungs- und Vergärungsabwasser sowie auf die Verfahrensbedingungen während Kompostierung und Vergärung zurückzuführen sind und ggf. auch substratbedingt, d. h. von der Herkunft des behandelten Grün- und Bioabfalls abhängig sind.



**Abbildung 5.247: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss an den Untersuchungstagen der Anlage I4**

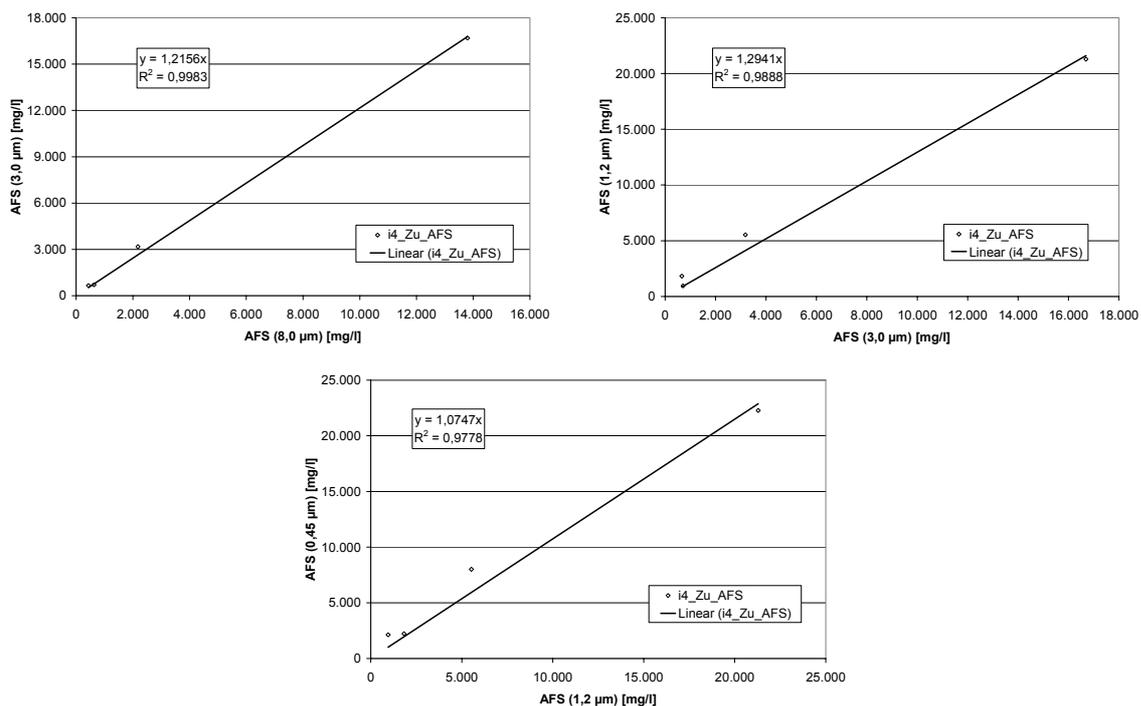


**Abbildung 5.248: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen der Anlage I4 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**



**Abbildung 5.249: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I4**

Beim Vergleich der relativen Änderungen zwischen den Fraktionen zeichnen sich Gemeinsamkeiten (Abbildung 5.249) ab, die allerdings durch weitere Messungen zu hinterfragen sind. Die AFS korrelieren miteinander (Abbildung 5.250), die partikulären organischen Bestandteile (Abbildung 5.251) ebenfalls, wobei infolge der hohen Konzentrationen ein Einfluss durch Probe 07/07 vorzuliegen scheint. Bei Überprüfung dieser Vermutung zeigt sich allerdings, dass Probe 11/06 von der Korrelation der übrigen Werte abweicht. Der Zusammenhang zwischen partikulärem CSB bzw. TOC und den AFS ist sowohl bei den Einzelproben (Abbildung 5.252) als auch bei der Zusammenfassung aller Werte signifikant (Abbildung 5.253). Die abfiltrierbaren Stoffe weisen demnach den gleichen organischen Anteil auf. Während der Fraktionierung von Probe 11/06 wurde keine AFS-Bestimmung durchgeführt. Infolgedessen ist nicht bekannt, ob diese Probe, ähnlich wie bei den partikulären organischen Substanzen, einen Einfluss auf den Zusammenhang der AFS ausübt.



**Abbildung 5.250: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen der Anlage I4**

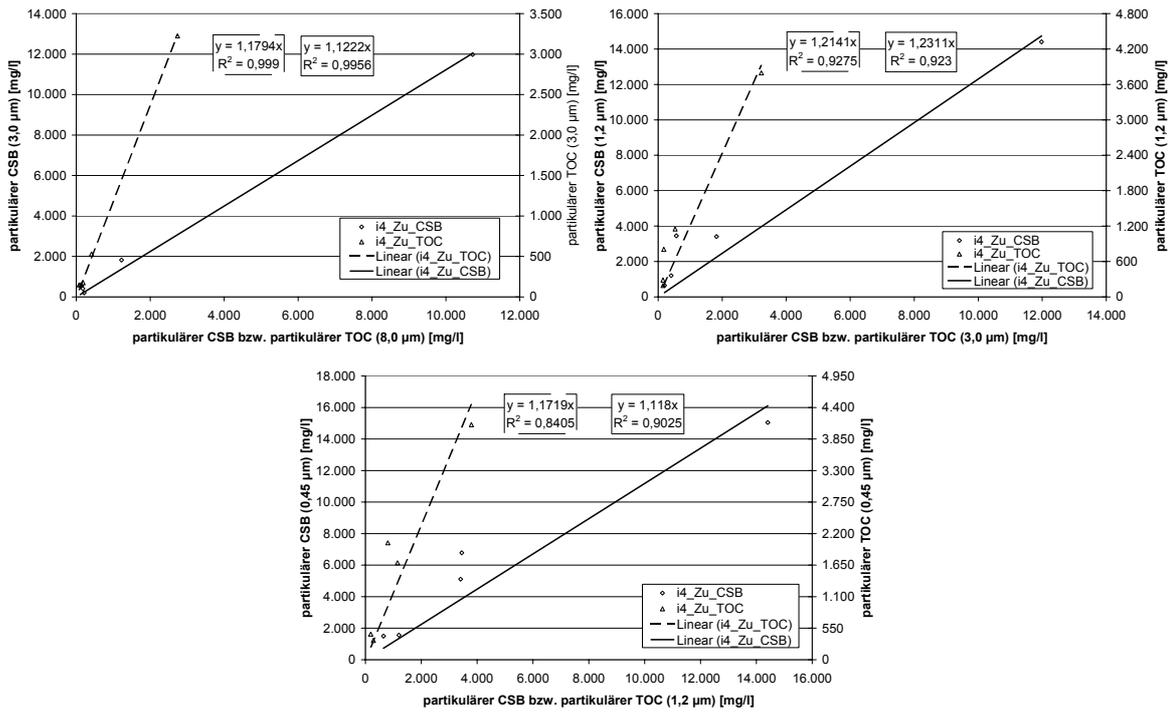


Abbildung 5.251: Änderung des partikulären CSB- und partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen der Anlage I4

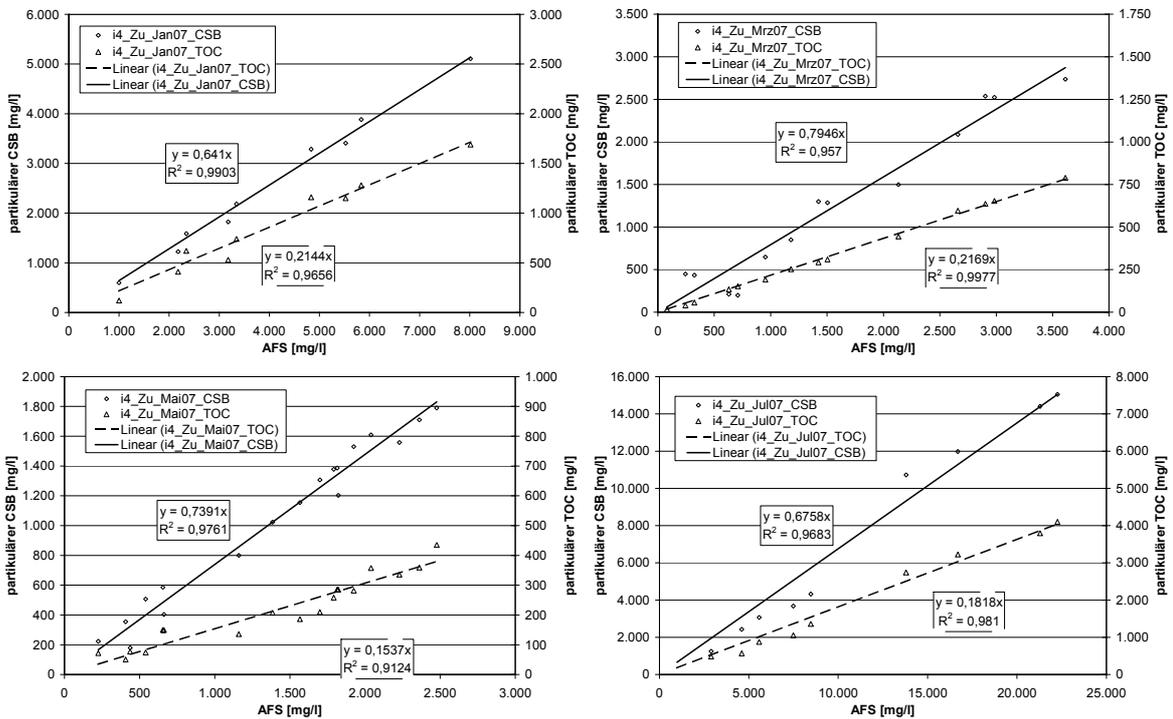
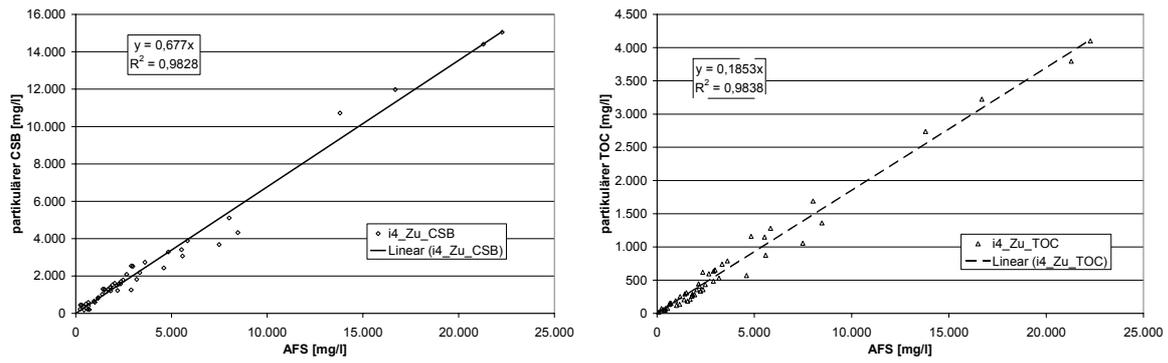


Abbildung 5.252: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC an den Untersuchungstagen der KA I4



**Abbildung 5.253: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC der KA I4 (alle Proben)**

#### 5.2.4.4 Fraktionierung des Belebtschlamm

Der TS-Gehalt des Belebtschlamm der untersuchten Proben lag im Bereich von 2,9...19,1 g TS/l, der oTS-Gehalt zwischen 62 % TS und 68 % TS (Tabelle 5.56). Der Rückgang des TS-Gehaltes ist auf die seit rd. zwei Wochen vor Probenahme 05/07 unterbrochene Beschickung zurückzuführen. In der beschickungsfreien Zeit wurde die Anlage 'normal' weiterbetrieben. Die temperaturnormierte Grundatmung ( $OVC_G + OVN_G$ ) lag im Bereich von 0,7...5,1 mg  $O_2$ /(g oTS·h) und damit im Regelfall im für stabilisierten Schlamm typischen Rahmen von weniger als 5 mg  $O_2$ /(g oTS·h). Die Leitfähigkeit war mit bis zu 9,47 mS/cm vergleichsweise hoch. Im Membranbelebungsbecken herrschten leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert = 7,7...8,7). Die im Filtrationsbecken ermittelten Werte stimmen größtenteils mit denen des Nitrifikationsbeckens überein (Tabelle 5.57).

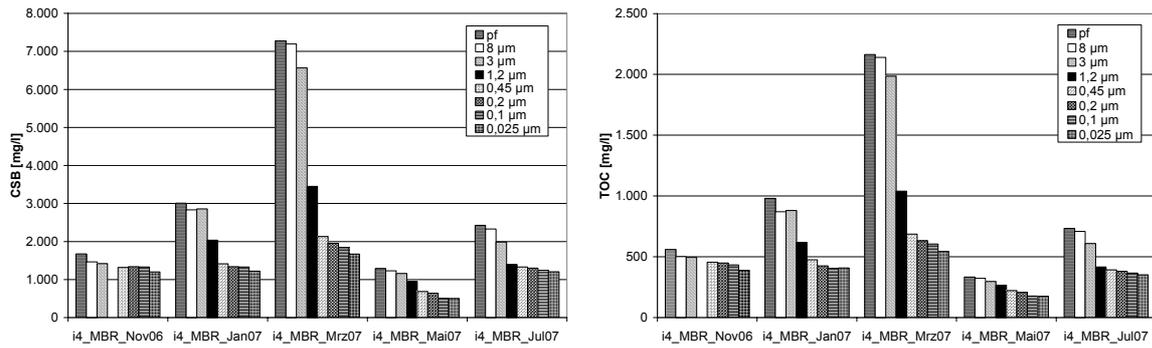
**Tabelle 5.56: Kennwerte des Filtrationsbeckens der KA I4**

Probe	TS	oTS	oTS	Atmung $OVC_G + OVN_G$	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg } O_2}{\text{g oTS} \cdot \text{h}}$	[-]	[°C]	[mS/cm]
11/06	12,3	7,9	64	5,1	8,0	28,5	7,17
01/07	19,1	13,0	68	0,7	8,2	23,0	7,70
03/07	17,4	10,8	62	1,0	8,7	14,9	8,00
05/07	2,8	1,9	66	13,2	7,7	21,1	2,72
07/07	8,9	5,5	62	3,3	8,7	35,0	9,47

**Tabelle 5.57: Kennwerte des Belebungsbeckens der KA I4**

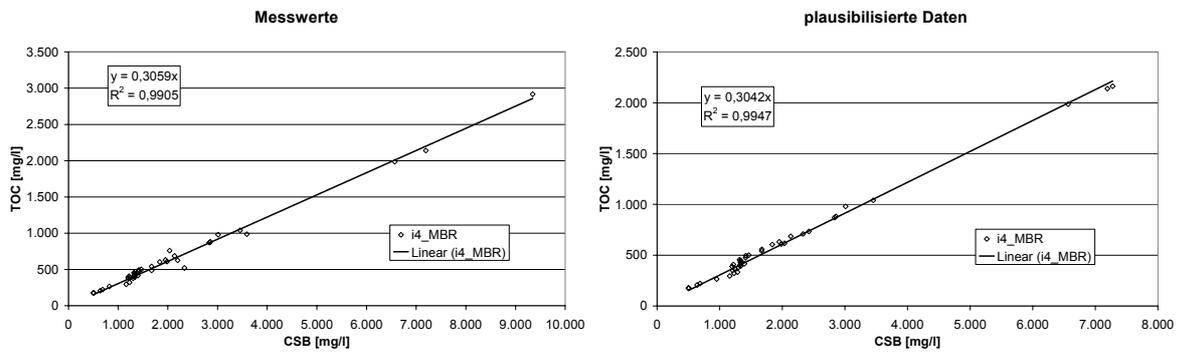
Probe	TS	oTS	oTS	Atmung $OVC_G + OVN_G$	pH-Wert	T	Leitfähigkeit
	[g/l]	[g/l]	[% TS]	$\frac{\text{mg } O_2}{\text{g oTS} \cdot \text{h}}$	[-]	[°C]	[mS/cm]
05/07	2,3	1,6	69	5,0	7,2	20,6	2,83
07/07	9,3	5,6	60	1,8	8,7	35,8	9,53

Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlamm des Membranbelebungsbeckens unterliegen einem messbaren Verlauf (Abbildung 5.254). Die Differenz zwischen dem 0,45 µm-Durchgang und dem 0,025 µm-Durchgang liegt bei rd. 117...462 mg CSB/l.

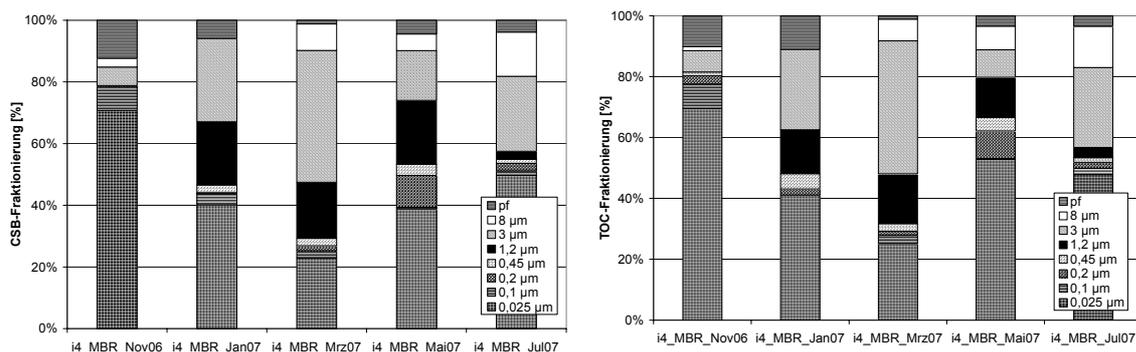


**Abbildung 5.254: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes aus dem Filtrationsbecken der KA I4**

Das TOC/CSB-Verhältnis aller dem Membranbecken entnommenen Proben liegt bei 0,31 bzw. CSB/TOC bei 3,3 und wird durch die Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) nur gering beeinflusst (CSB/TOC = 3,3, Abbildung 5.255).



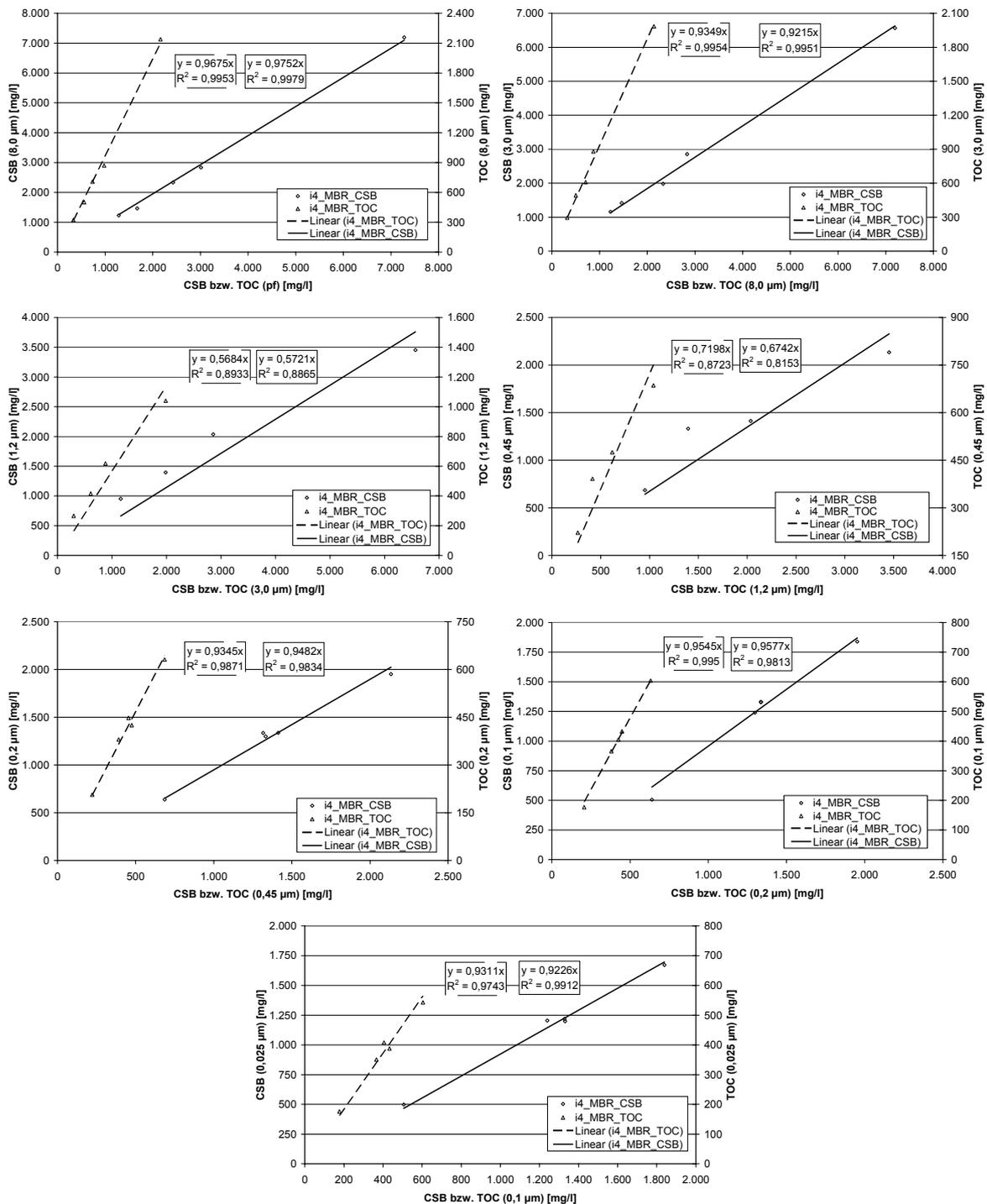
**Abbildung 5.255: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes aus dem Membranbelebungsbecken der KA I4**



**Abbildung 5.256: Relative Verteilung der CSB- u. TOC-Fractionen im Belebtschlamm der KA I4 (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

Die Zusammensetzung der filtrierten Belebtschlämme änderte sich während der Messkampagne. Probe 11/06 ist überwiegend durch gelöste Substanzen geprägt; 70 % des papierfiltrierten CSB und TOC wiesen eine Partikelgröße von weniger als 0,025 µm auf. Im Gegensatz dazu wird Probe 03/07 maßgeblich durch partiku-

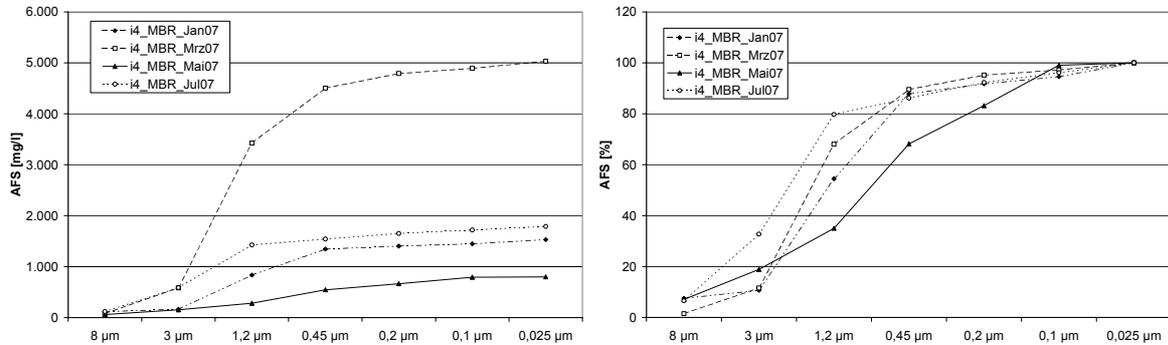
läre Substanzen > 0,45 µm (rd. 70 %) charakterisiert. Bei den Proben 01/07, 05/07, 07/07 entspricht der Anteil der partikulären Stoffe > 0,45 µm etwa dem der gelösten Stoffe (< 0,45 µm).



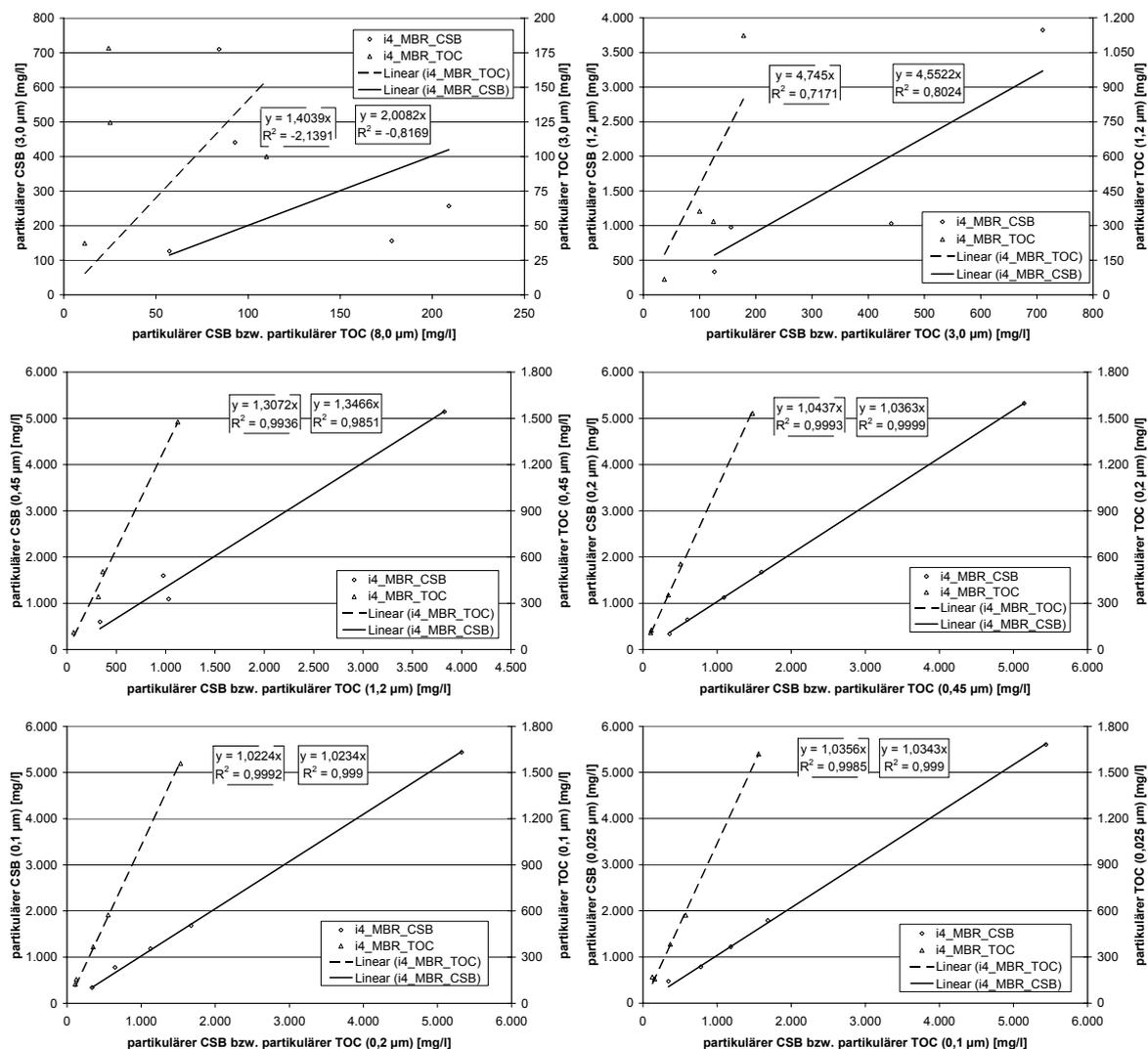
**Abbildung 5.257: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen des Belebtschlammes KA I4**

Es ist denkbar, dass eine Beeinflussung durch den Zulauf besteht (Abbildung 5.248) und partikuläre, aufgrund ihrer Struktur dem Abbau schwer zugängliche

Substanzen, im Belebtschlamm eingelagert und nur langsam abgebaut bzw. mit dem ÜSS abgereichert werden. Unabhängig davon besteht eine Korrelation der CSB- und TOC-Konzentrationen zwischen den Fraktionen, d. h. die relative Konzentrationsabnahme durch die Filtration ist gleich (Abbildung 5.257).

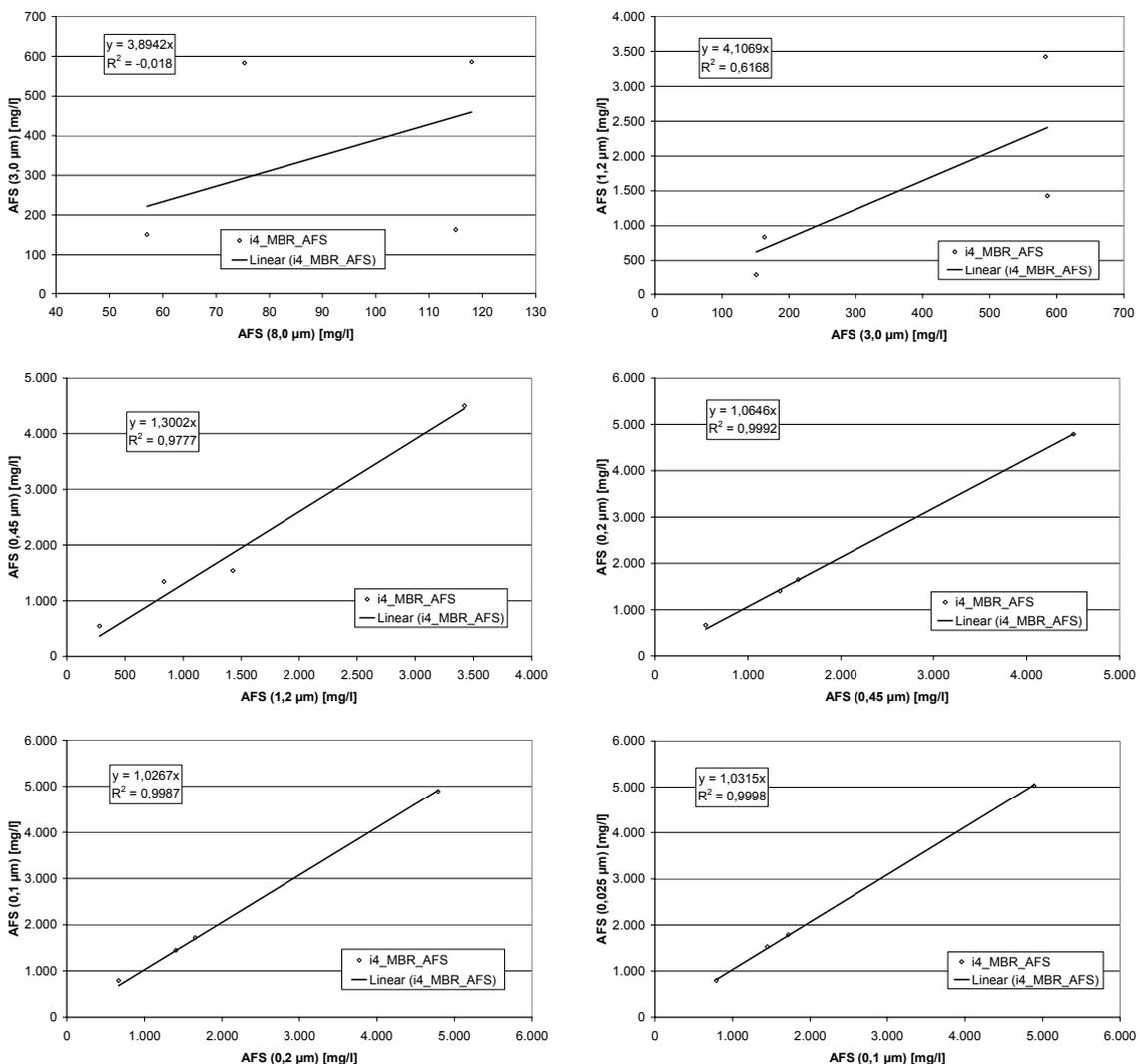


**Abbildung 5.258: AFS-Verteilung im filtrierten Belebtschlamm mit Bezug zur 8 µm-Probe der Anlage I4**



**Abbildung 5.259: Änderung des partikulären CSB- und TOC aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA I4**

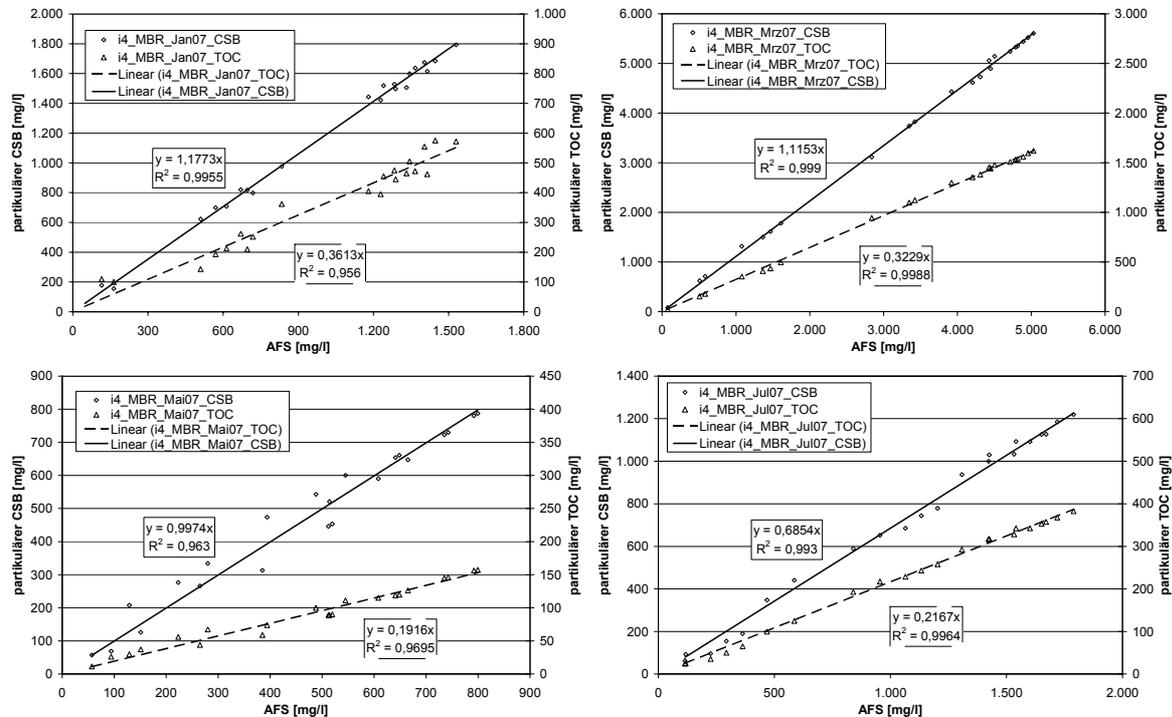
Die AFS im membranfiltrierten Belebtschlamm sind ungleich verteilt (Abbildung 5.258). In Probe 07/07 sind signifikant mehr AFS enthalten, als in den übrigen Proben. Anhand der relativen Verteilung ist erkennbar, dass sich nach der Wiederaufnahme der Beschickung ein anderer Kurvenverlauf einstellt. Die relative Änderung der partikulären organischen Substanzen und der AFS zwischen zwei Fraktionen (Abbildung 5.259, Abbildung 5.260) zeigt erst ab dem Wertepaar 1,2 µm/0,45 µm einen Zusammenhang. Möglicherweise tritt tatsächlich eine Einlagerung von partikulären Substanzen aus dem Zulauf ein oder es handelt sich um Auswirkungen des Betriebsregimes (Unterbrechung der Beschickung, diskontinuierlicher Zufluss).



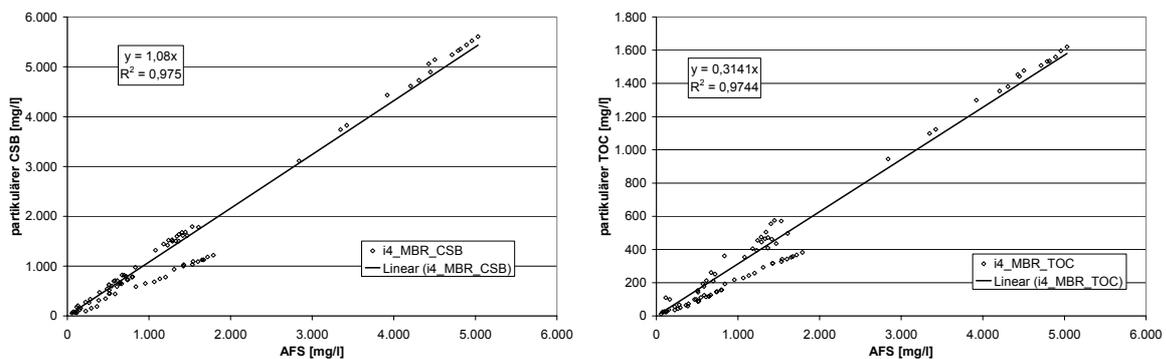
**Abbildung 5.260: Änderung der AFS aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen der KA I4**

Ein Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC konnte für die Einzelproben nachgewiesen werden (Abbildung 5.261). Der Zusam-

menhang aller Werte (Abbildung 5.262) wird durch die geringeren Verhältnisse der organischen Substanzen zu den AFS in Probe 07/07, ggf. infolge der zeitweiligen Aussetzung der Beschickung, beeinflusst.



**Abbildung 5.261: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB bzw. TOC im Belebtschlamm aus dem Filtrationsbecken der KA I4**



**Abbildung 5.262: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC aller Belebtschlammproben aus dem Filtrationsbecken der KA I4**

### 5.2.4.5 Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Die CSB-Ablaufkonzentrationen liegen zwischen 1.150 mg/l und 1.920 mg/l (Abbildung 5.263). Beim Vergleich der unfiltrierten mit den membranfiltrierten Konzentrationen dieser Proben fällt auf, dass eine Fraktionierung vorliegt. Zum Teil liegen die Unterschiede im Fehlerbereich. Allerdings zeigt sich bei Auswertung der Trübung, die bei den Proben 05/07 und 07/07 bestimmt wurde, dass die unfiltrierten Proben partikuläre Substanzen enthielten.

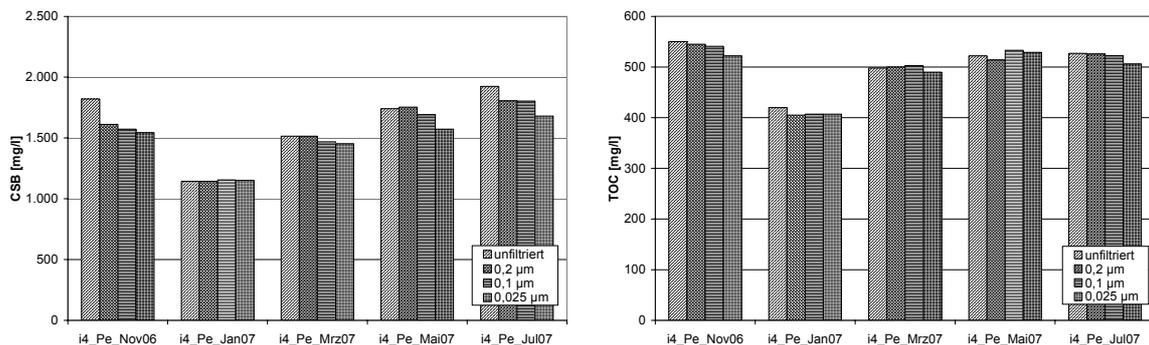


Abbildung 5.263: CSB- und TOC-Permeatkonzentrationen der Anlage I4

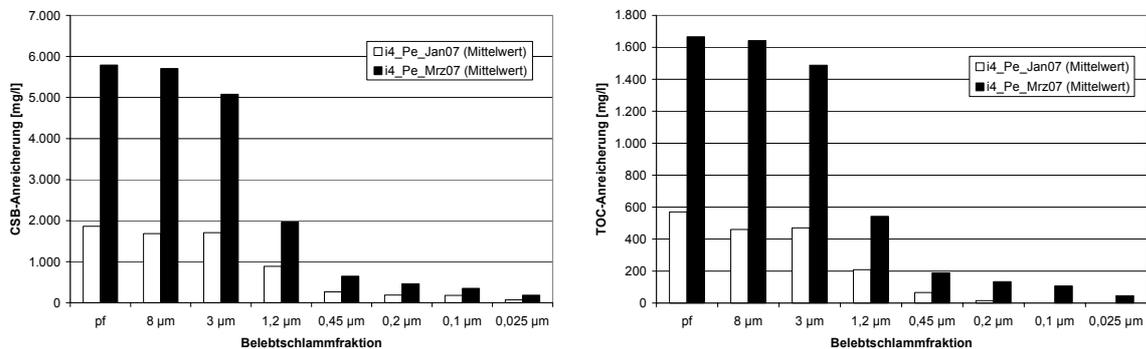
Tabelle 5.58: Permeatbeschaffenheit der Anlage I4

Probe	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	pH-Wert [-]	T [°C]	Leitfähigkeit [µs/cm]
11/06	88,3	8,8	25,0	9,45
01/07	10,9	8,3	22,6	7,84
03/07	47	8,7	15,3	8,39
05/07	30	8,9	25,8	7,02
07/07	22,1	8,3	28,6	6,45

Von den analysierten Permeatproben sind im Sinne der Aufgabenstellung nur die Proben 01/07 und 03/07 auswertbar. Probe 11/06 wurde zum Zeitpunkt einer Membranreinigung (vgl. Abschnitt 5.2.4.1) entnommen; die CSB- und TOC-Konzentrationen weisen höhere Werte als der filtrierte Belebtschlamm auf. Die Probenahmen 05/07 und 07/07 fanden statt, als die Anlage nicht beschickt wurde bzw. nach der Beschickungspause. Die Permeatkonzentrationen lagen über denen des filtrierte Belebtschlammes. Es ist anzunehmen, dass das Permeat über ein Potential zur Wiederverkeimung verfügt. Angesichts des nachweisbaren BSB<sub>5</sub> (Tabelle 5.58) ist davon auszugehen, dass leicht abbaubare Substanzen im Permeat ent-

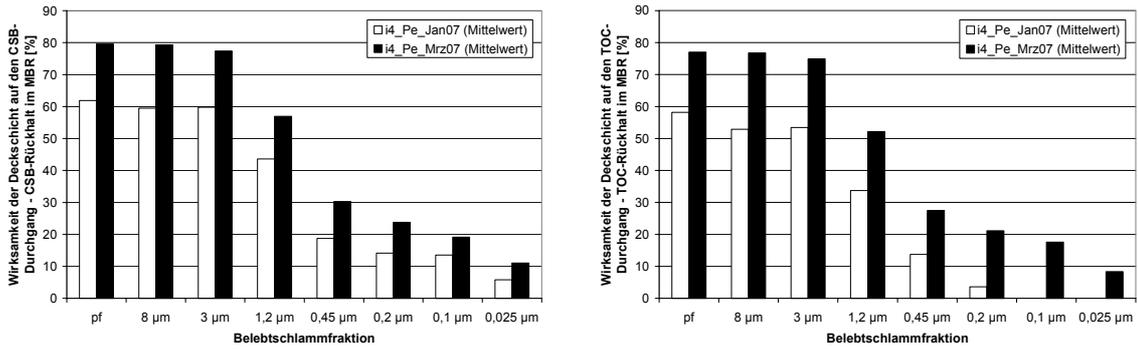
halten sind. Unabhängig davon sind die CSB-Konzentrationen des Belebtschlammes infolge der ausgesetzten Beschickung gesunken. Das Permeat im Permeatbehälter entsprach durch den fehlenden Volumenaustausch nicht dem zum Zeitpunkt der Probenahme potentiell anfallenden Permeat. Dies wird insbesondere beim Vergleich der Leitfähigkeit zwischen Permeat (Tabelle 5.58) und filtriertem Belebtschlamm (Tabelle 5.57) deutlich.

Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen wurde für die Belebtschlammfraktionen der Proben 01/07 und 03/07 mit dem Mittelwert aus den unfiltrierten und filtrierten Permeatproben berechnet. Die Differenzen zwischen dem Permeatmittelwert und den Fraktionen sind deutlich (Abbildung 5.264). Die Anreicherung oberhalb der 0,45 µm ist mit bis zu 5.800 mg CSB/l wesentlich höher als bei den Fraktionen unterhalb 0,45 µm (70...650 mg CSB/l), was ein Indiz für die angesprochene Einlagerung partikulärer Substanzen in den Belebtschlamm ist (vgl. Abschnitt 5.2.4.4). Die hohen CSB/BSB<sub>5</sub>-Verhältnisse der Zulaufproben (vgl. Abschnitt 5.2.4.3) stützen diese Erklärung.



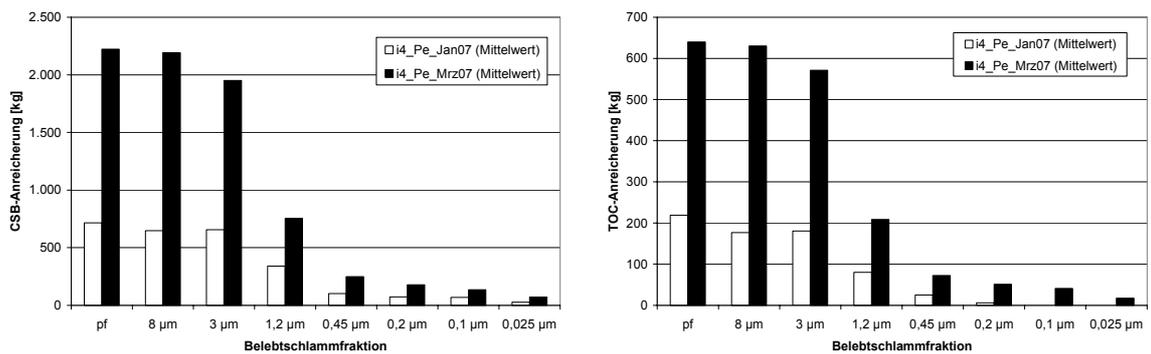
**Abbildung 5.264: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen im Vergleich zum Mittelwert der Permeatkonzentrationen in der Anlage I4**

In Probe 01/07 ist bei Betrachtung des TOC keine Anreicherung unterhalb 0,1 µm nachweisbar. In Anbetracht der Nachweismethoden für CSB und TOC, sollte der TOC mit einem geringeren Fehler behaftet sein, so dass anhand des TOC gefolgert werden kann, dass die Porenweite der Membran zum Zeitpunkt der Probenahme 01/07 zwischen 0,2 µm und 0,1 µm liegt. Unabhängig von der Deckschicht stellt die Membran eine Barriere für alle partikulären Substanzen oberhalb 0,4 µm dar, die bis zu 80 % des filtrierten Belebtschlammes ausmachen (Abbildung 5.265).

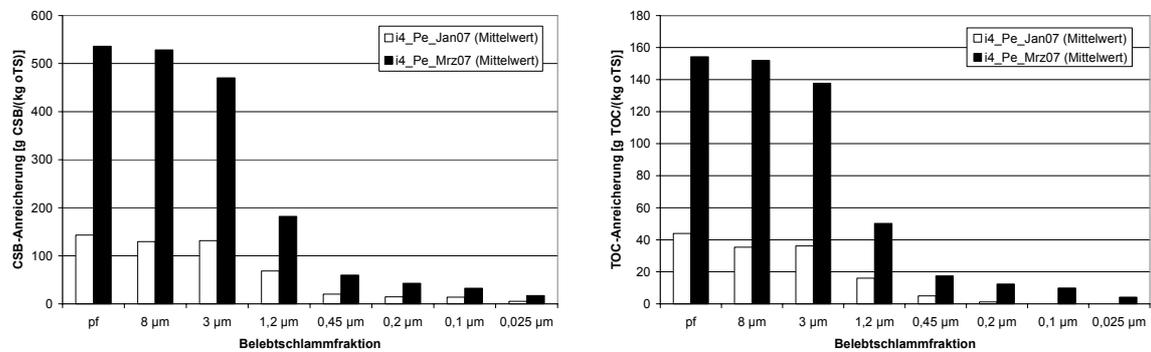


**Abbildung 5.265: Wirksamkeit der Deckschicht auf den Rückhalt von Belebtschlammfraktionen der Anlage I4**

Eine Ausschleusung angereicherter Substanzen aus einer Membrananlage erfolgt durch Überschussschlammabzug. Ein Gleichgewicht zwischen Anreicherung und Ausschleusung ist nicht erkennbar (Abbildung 5.266, Abbildung 5.267). Die Angabe einer spezifischen Anreicherungsrate ist nicht sinnvoll, da vergleichsweise wenige Proben zur Verfügung stehen.



**Abbildung 5.266: Angereicherte Fracht in der KA I4 am Tag der Probenahme**



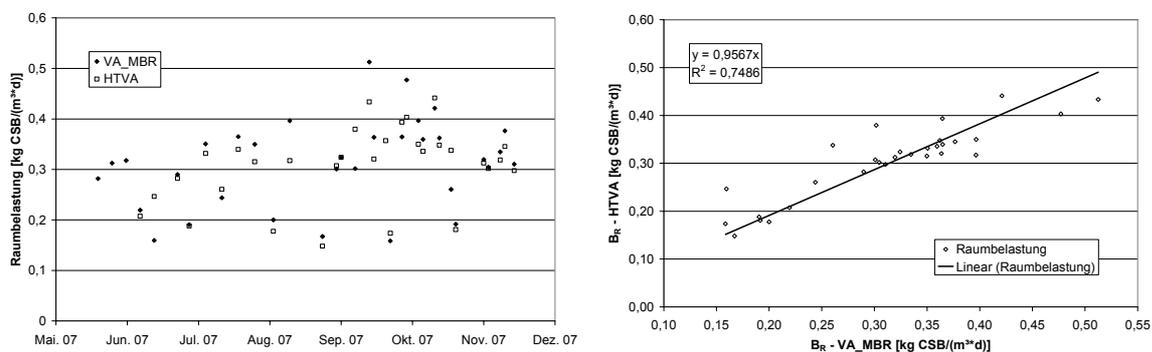
**Abbildung 5.267: Spezifische Anreicherung in der KA I4 in Abhängigkeit des oTS**

## 6 Halbtechnische Versuche

### 6.1 Betriebsdaten und Reinigungsleistung

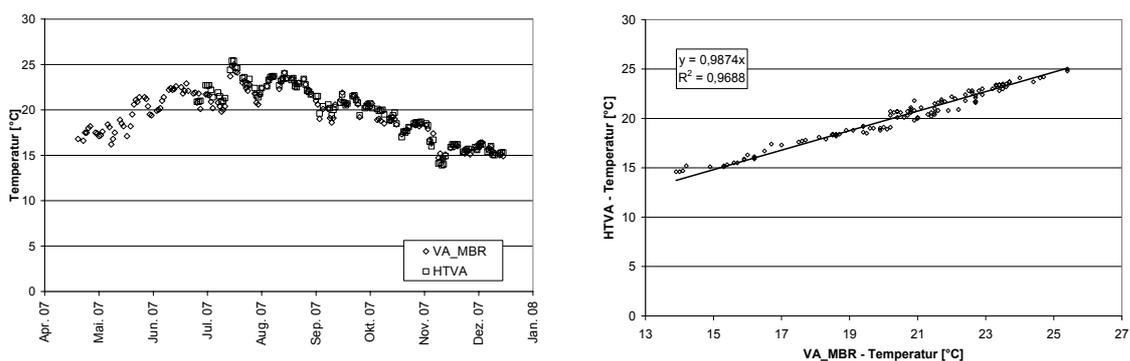
#### 6.1.1 Parallelversuche mit kommunalem Abwasser

Die zur Wahrung vergleichbarer Versuchsbedingungen erforderliche Gleichbeschickung der Versuchsanlagen war gewährleistet (Abbildung 6.1). Die Raumbelastung beider Anlagen lag in Abhängigkeit der Zuflussbedingungen (Mischwasser- u. Trockenwetterzufluss) im Bereich von 0,15...0,5 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d).



**Abbildung 6.1: Raumbelastung von HTVA und Membranbelebungsanlage im Vergleichszeitraum**

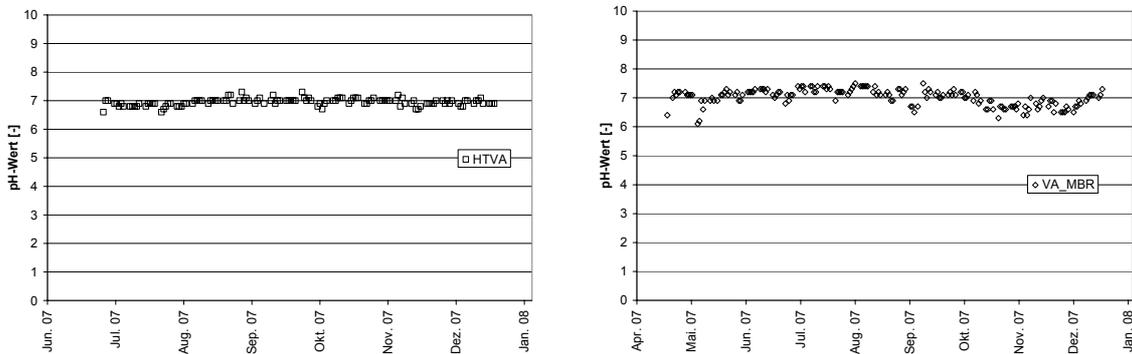
Die in den Belebungsbecken herrschende Temperatur weist einen jahreszeitlich bedingten Verlauf von 14...25 °C auf, wobei zwischen den Anlagen nur geringe, vernachlässigbare Unterschiede auftraten (Abbildung 6.2).



**Abbildung 6.2: Temperaturverlauf in den biologischen Behandlungsstufen**

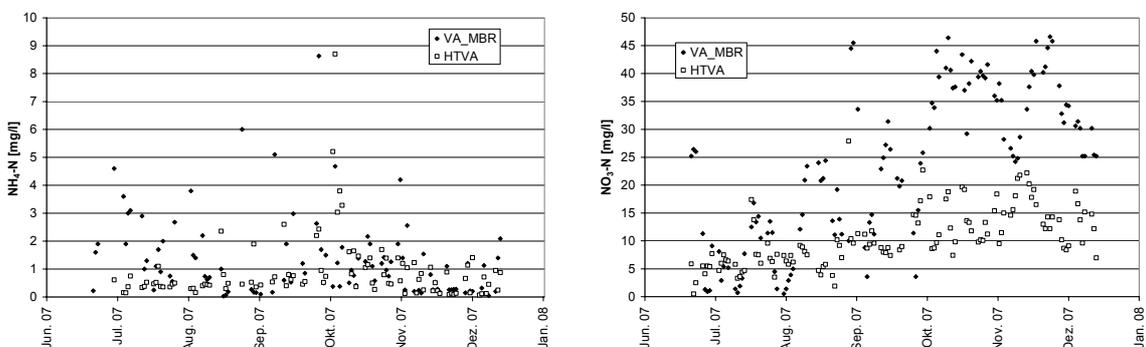
Der sich einstellende pH-Wert-Verlauf weist im Gegensatz zu den Temperaturen Unterschiede zwischen den Anlagen auf (Abbildung 6.3). Während in der HTVA ein gleichbleibender pH-Wert von rd. 7 vorliegt, ist der pH-Wert in der Membranbelebungsanlage Schwankungen von 6...7,6 unterworfen, die u. a. auf das Belüf-

tungsregime und die Betriebsweise mit intermittierender Denitrifikation zurückzuführen sind.



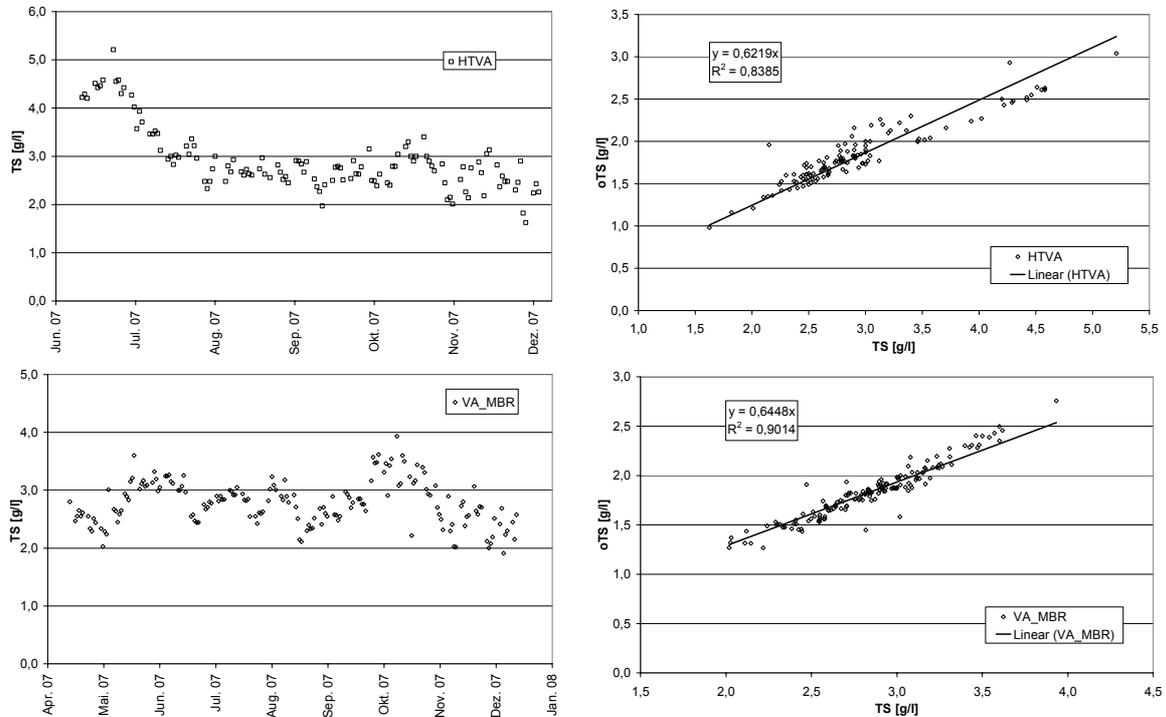
**Abbildung 6.3: pH-Wert-Verlauf in HTVA und Membranbelebungsanlage**

Der belüftete Beckenanteil entsprach dem der HTVA, allerdings führte die Cross-Flow-Belüftung und die relativ hohen Sauerstoffkonzentrationen in der Nitrifikationsphase zum Sauerstoffeintrag bzw. zur Sauerstoffverschleppung in die Denitrifikationsphasen, so dass eine Verminderung des für die Denitrifikation zur Verfügung stehenden Beckenvolumens stattfand. Während die Nitrifikation zur Verringerung der Säurekapazität führt, wird ein Teil durch Denitrifikation zurück gewonnen. In diesem Zusammenhang führt die verminderte Denitrifikation und die über ein Abschlagventil grob eingestellte Luftzufuhr zu stärkeren Ausschlägen im pH-Wert-Verlauf. Im Vergleich dazu verfügte die HTVA über eine  $O_2$ -Regelung für eine gleichbleibenden Sauerstoffkonzentration (Zielwert: 2 mg  $O_2/l$ ) und eine vorgeschaltete Denitrifikation. Während beide Anlagen den zugeführten Stickstoff, mit einigen betriebsbedingten Ausnahmen, nahezu vollständig nitrifizierten, sind die  $NO_3-N$ -Konzentrationen im Permeat wesentlich höher, als im Ablauf der konventionellen Belebungsanlage (Abbildung 6.4).



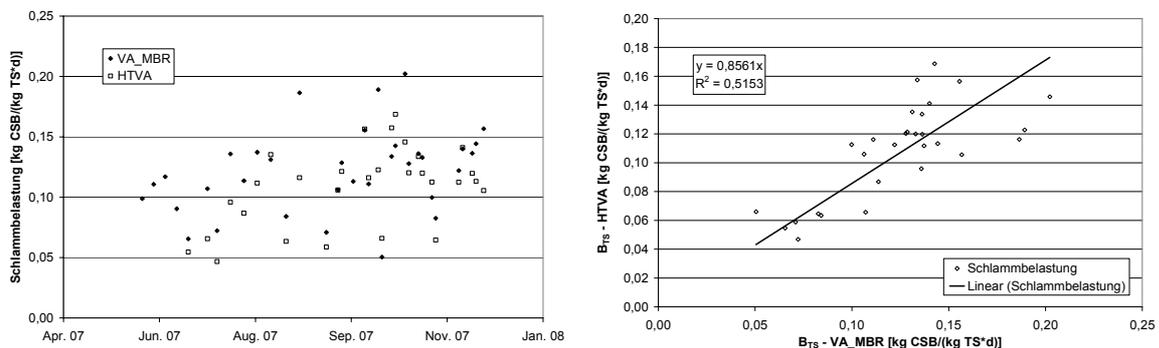
**Abbildung 6.4:  $NH_4-N$ - und  $NO_3-N$ -Ablaufkonzentrationen der Versuchsanlagen**

Der TS-Gehalt der konventionellen Anlage war mit 2...3 g TS/l stabiler als der TS-Gehalt der Membranbelebungsanlage mit 2...4 g TS/l. Unabhängig davon, war der oTS beider Anlagen mit 64 % TS (Membrananlage) und 62 % TS (konv. Belebtschlammanlage) in etwa gleich (Abbildung 6.5).



**Abbildung 6.5: TS-Gehalt und oTS-Anteil der Versuchsanlagen**

Infolge der verschiedenen TS-Gehalte unterscheidet sich die Schlammbelastung beider Anlagen; die der Membrananlage liegt rd. 14 % höher als die der HTVA.



**Abbildung 6.6: Schlammbelastung der Versuchsanlagen**

Der ISV beider Anlagen verläuft grundsätzlich verschieden. Bis 11/07 lag der ISV der Membranbelebungsanlage stets über dem der konventionellen Anlage; danach ist ein entgegengesetzter Verlauf zu beobachten (Abbildung 6.7). Ein für die

Gesamtdauer des Parallelbetriebes vorhandener Zusammenhang zwischen ISV und Temperatur war, im Gegensatz für einzelne Zeiträume, nicht nachweisbar. Sowohl bei Membranbelebungsanlage als auch konventioneller Anlage bestand zu Beginn der Untersuchungen kein Zusammenhang zwischen ISV und Temperatur; ggf. ist dies auf die noch nicht abgeschlossene Adaptierung des Belebtschlammes im Zuge der Erhöhung des Schlammalters zurückzuführen (vgl. Abschnitt 4.2.3.1). Während in der folgenden Zeit der ISV in der Membranbelebungsanlage mit steigender Temperatur zunimmt (Abbildung 6.7), steigt der ISV der HTVA mit fallender Temperatur, wobei dieser Zeitraum im Gegensatz zur Membrananlage nicht für die verbleibende Dauer der Versuche gilt, sondern in zwei Abschnitte fällt (Abbildung 6.8).

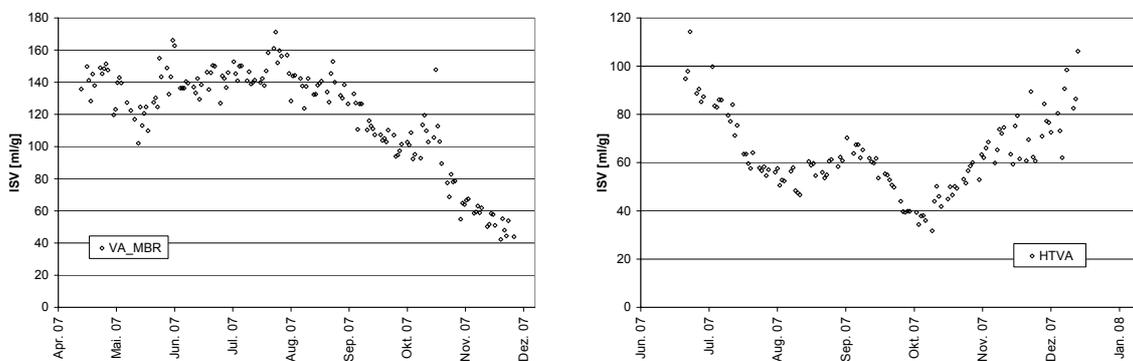


Abbildung 6.7: ISV-Verlauf in den Versuchsanlagen

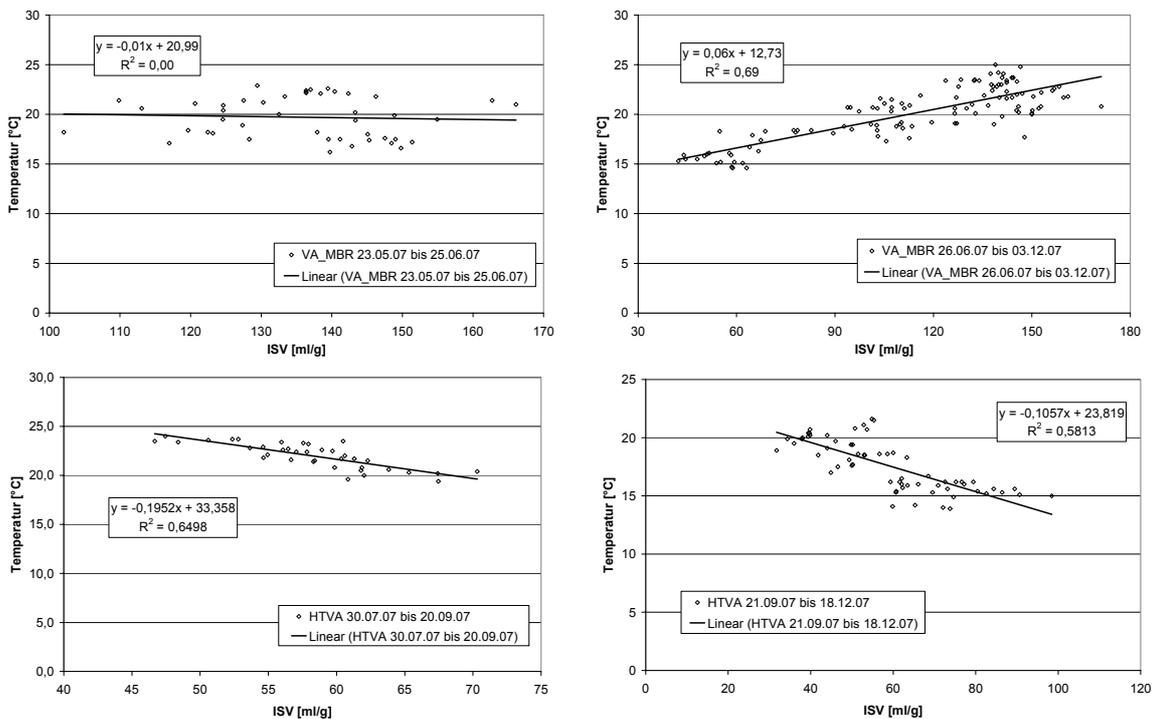


Abbildung 6.8: Zusammenhang zwischen ISV und Temperatur

Der gegensätzliche Verlauf des ISV ab 10/07 lässt auf mikrobiologische Unterschiede schließen. War die Artenvielfalt in der HTVA mit vielen mehrzelligen und einzelligen Mikroorganismen Anfang 10/07 höher als in der Membranbelebungsanlage, so war Ende 11/07 das Gegenteil der Fall. Gleichzeitig nahm die Fädigkeit des Schlammes in der HTVA im Gegensatz zum Schlamm der Membrananlage zu (Abbildung 6.9, Abbildung 6.10, Tabelle 6.1).

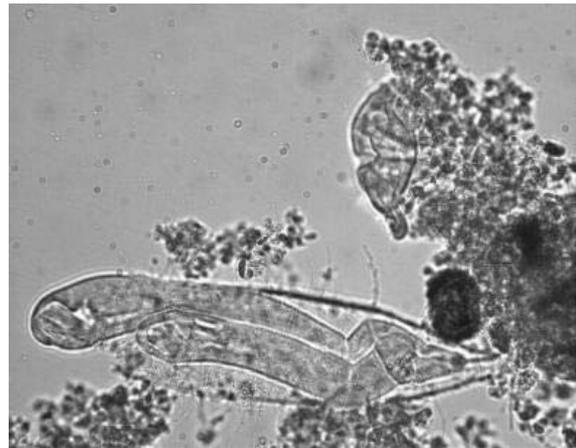
**Tabelle 6.1: Bewertung des mikroskopischen Bildes**

		Membrananlage			HTVA			
		Datum	7.10.	30.10.	26.11.	07.10.	30.10.	26.11.
Bakterien	Gesamtfädigkeit	[F]	1...2	1	0...1	0	1	1...2
	Spiroträten	[F V]						3
	Spirillen	[F V]			1			
festsitzende Einzeller	Ephistilles	[H]				3	3	2
	Vorticella convallaria	[H]		1		1	2	2
	Zoothamnium	[H]			1			
	Tokophyra	[H]				3		
Freischwimmende Einzeller	Aspidisca	[H V]	3	1	3	1	1	2
	Anisonema	[H V]			1		1	
	Choleps	[H V]		1	1			
	Metopus	[H V]			1	1		
	Trachelomonas	[H V]			3			1
	Zooflagelaten	[H V]		1	1			
	Peranema	[H V]		1	1			
	Nacktamöben	[H V]	1		1	1		
	Amphilleptiden	[H V]		3	1	1		
	Geißeltierchen	[H V]	1	2		1	1	
Mehrzeller	Chepatodella	[H]	1	2	1	1	1	1
	Colurella	[H]			1	2...3		
	Aeolosoma	[H]					3	
	Bauchhärlinge	[H]				1		1
	Nematoden	[H F]				1		

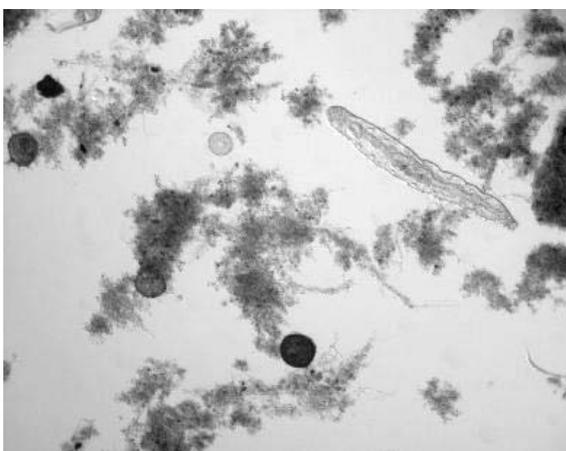
Häufigkeit [H]		Fädigkeit [F]		Vorkommen [V]	
1	1...5 Organismen	0	selten	1	einzelne
2	5...10 Organismen	1	gering	2	einige
3	>10 Organismen	2	mäßig	3	häufig
		3	stark	4	massenhaft
		4	sehr stark		



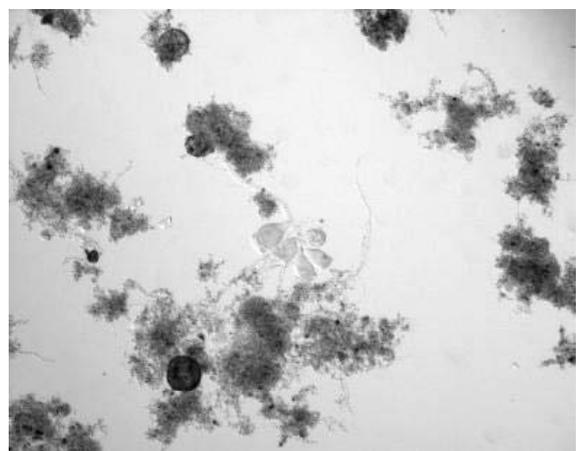
07.10.2007



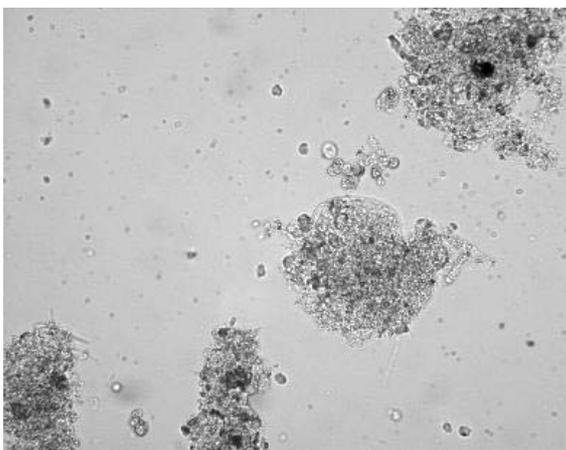
07.10.2007



30.10.2007



30.10.2007

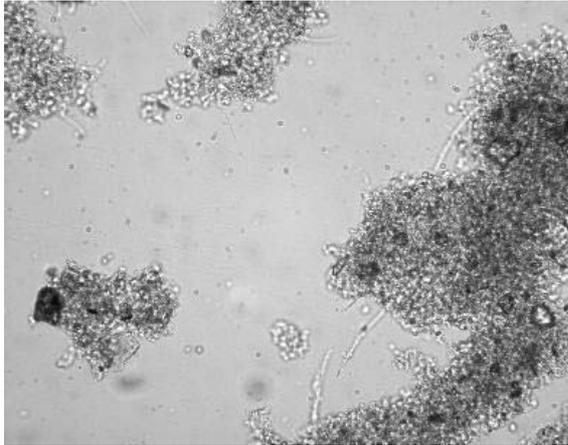


26.11.2007

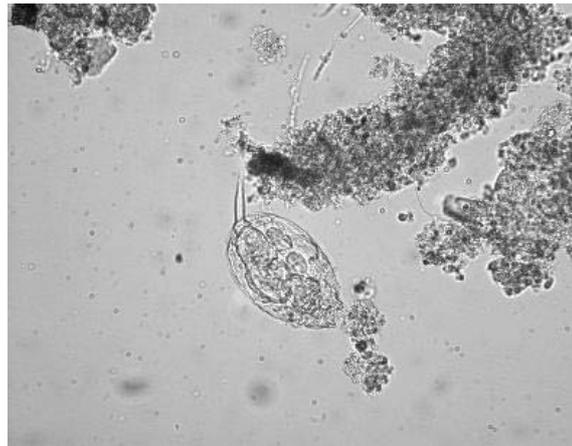


26.11.2007

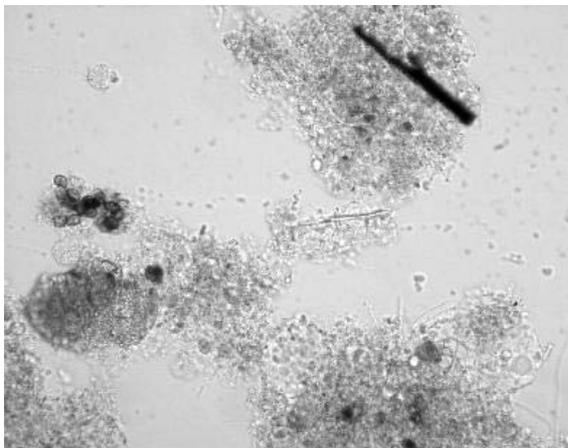
**Abbildung 6.9: Auszüge aus dem mikroskopischen Aufnahmen des Belebtschlammes der halbtechnischen konventionellen Versuchsanlage**



07.10.2007



07.10.2007



30.10.2007



30.10.2007



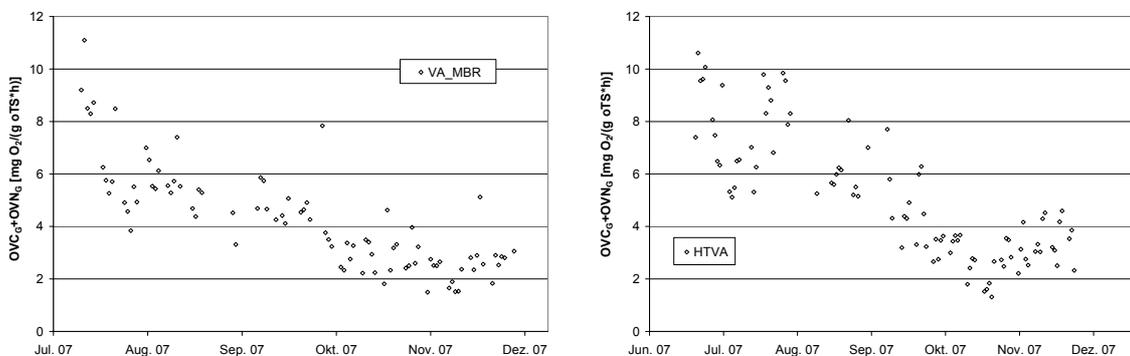
26.11.2007



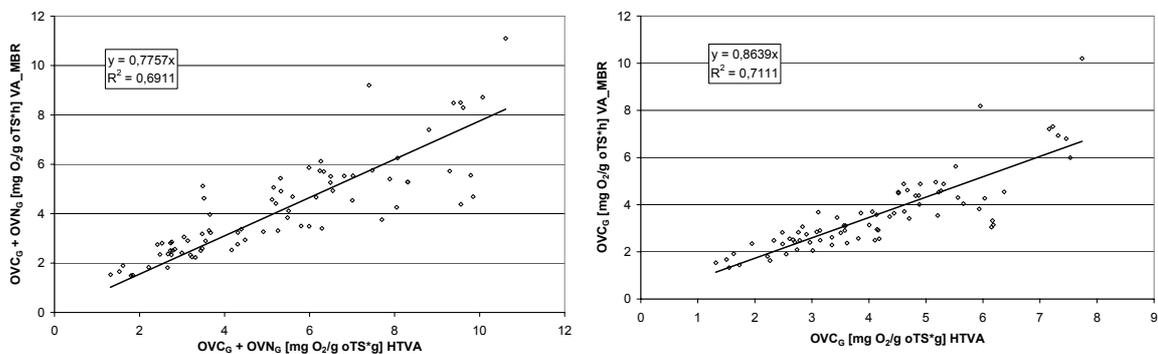
26.11.2007

**Abbildung 6.10:** Auszüge aus dem mikroskopischen Aufnahmen des Belebtschlammes der Membranbelebungsanlage

Unabhängig von der mikrobiologischen Zusammensetzung war die Atmungsaktivität im Belebtschlamm der Membranbelebungsanlage niedriger als im Belebtschlamm der konventionellen Anlage. In beiden Anlagen traten anfangs Werte deutlich oberhalb von  $5 \text{ mg O}_2/(\text{g oTS}\cdot\text{h})$  auf (Abbildung 6.11); außerhalb des für stabilisierte Schlämme typischen Bereiches. Die Grundatmung ( $\text{OVC}_G + \text{OVN}_G$ ) lag etwa 20 %, die Kohlenstoff-Grundatmung etwa 15 % unter den in der HTVA ermittelten Werten (Abbildung 6.12). Mögliche Ursachen dafür stellen die höhere Sauerstoffkonzentration in der Membrananlage dar sowie das Schlammalter, welches in der Membrananlage i. M. 31 d (30...32 d), in der HTVA infolge von Schlammabtrieb i. M. 27 d (24...30 d) erreichte.

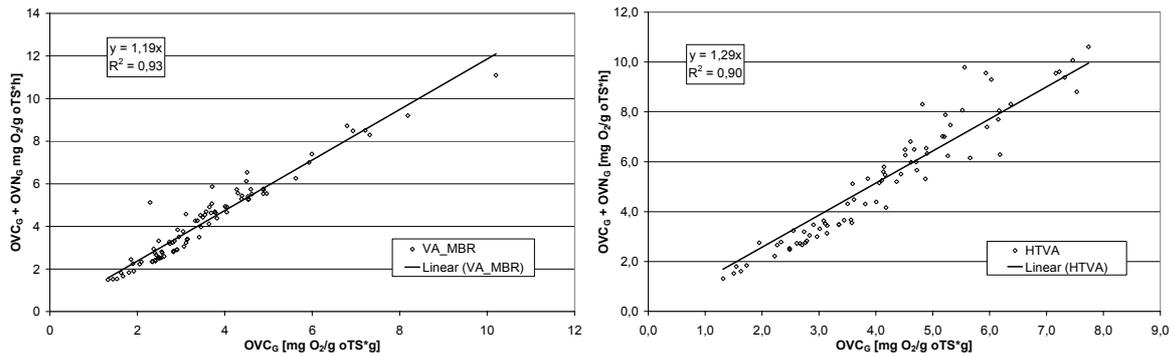


**Abbildung 6.11: Verlauf der Grundatmung in beiden Versuchsanlagen**



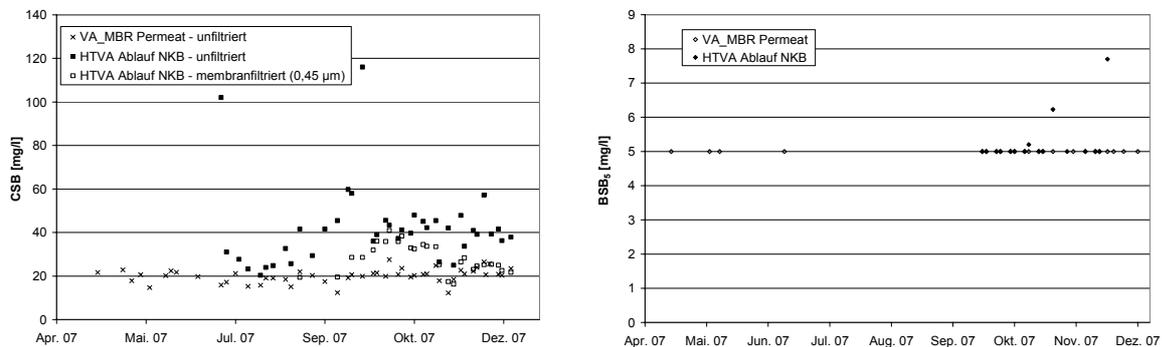
**Abbildung 6.12: Vergleich der Grundatmung beider Versuchsanlagen**

Der Anteil von  $\text{OVC}_G$  an  $\text{OVC}_G + \text{OVN}_G$  liegt für die Membrananlage bei rd. 80 % bei der HTVA bei rd. 70 % (Abbildung 6.13). Da trotz des höheren  $\text{O}_2$ -Gehaltes die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Permeat höher waren (i. M.  $2,4 \text{ mg/l}$ ) als im Ablauf der HTVA (i. M.  $1,4 \text{ mg/l}$ ), ist davon auszugehen, dass in der Membrananlage, infolge der für die Nitrifikation ungünstigen pH-Werte von teils  $< 6,5$ , weniger Nitrifikanten aktiv waren.



**Abbildung 6.13: Anteil von  $OVC_G$  an  $OVC_G+OVN_G$**

Die CSB-Permeatkonzentrationen erreichten i. M. 20 mg CSB/l (12...28 mg CSB/l) und waren ohne Ausnahme geringer als die unfiltrierten CSB-Werte im Ablauf des Nachklärbeckens (20...116 mg CSB/l, i. M. 42 mg CSB/l). Die membranfiltrierten (0,45  $\mu\text{m}$ ) CSB-Ablaufkonzentrationen (16...41 mg CSB/l, i. M. 29 mg CSB/l) waren z. T. identisch mit den Permeatkonzentrationen, lagen aber z. T. auch deutlich über denen des Permeats. Die  $BSB_5$ -Konzentrationen waren überwiegend mit  $< 5$  mg  $BSB_5$ /l nicht nachweisbar (Abbildung 6.14).

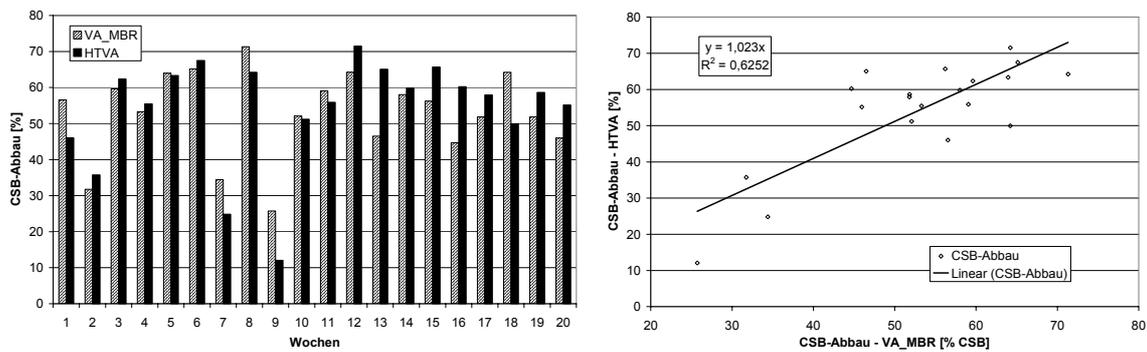


**Abbildung 6.14: CSB- und  $BSB_5$ -Ablaufkonzentrationen ( $BSB_5$ -Nachweisgrenze: 5 mg/l)**

Der CSB-Eliminationsgrad beider Anlagen ist mit  $> 90$  % hoch (HTVA: 91 %, Membrananlage 96%). Der höhere Eliminationsgrad der Membrananlage beruht auf dem vollständigen Rückhalt der partikulären Substanzen durch die Membran. Der Anteil des abgebauten CSB beträgt für beide Anlagen i. M. 53 %, die ÜSS-Produktion i. M. 0,39 g TS/g  $CSB_{zugeführt}$  (Tabelle 6.2, Abbildung 6.15).

**Tabelle 6.2: Mittlerer ÜSS-Anfall**

	ÜSS-Anfall tatsächlich		ÜSS-Anfall berechnet	
	[g TS/g CSB <sub>Zu</sub> ]	[g TS/g TS <sub>Zu</sub> ]	[g TS/g CSB <sub>Zu</sub> ]	[g TS/g TS <sub>Zu</sub> ]
Membrananlage	0,39	1,00	0,37	0,95
HTVA	0,39	0,95	0,36	0,90

**Abbildung 6.15: CSB-Abbaugrad**

Obwohl für beide Versuchsanlagen vergleichbare Bedingungen hinsichtlich Raumbelastung und Temperatur vorlagen, bildete sich ein unterschiedliches Betriebsverhalten heraus, dass in einigen Fällen zu gleichen Betriebsergebnissen führte (mittlerer ÜSS-Anfall, mittlerer CSB-Abbau, relativer oTS-Gehalt, BSB<sub>5</sub>-Elimination), im Wesentlichen allerdings durch Unterschiede gekennzeichnet ist (Nitrifikation, Denitrifikation, TS-Gehalt, pH-Wert-Verlauf, ISV-Verlauf, mikrobiologische Zusammensetzung). Zwei in Betracht zu ziehende technische Gründe dafür sind die verschiedenen Versuchsanordnungen mit intermittierender und vorgeschalteter Denitrifikation sowie die bei der Membrananlage fehlende, bei der HTVA vorhandene O<sub>2</sub>-Regelung.

## 6.1.2 Versuche zur Behandlung von Abwasser aus der Biodiesel-Produktion

### 6.1.2.1 Halbtechnische Versuche

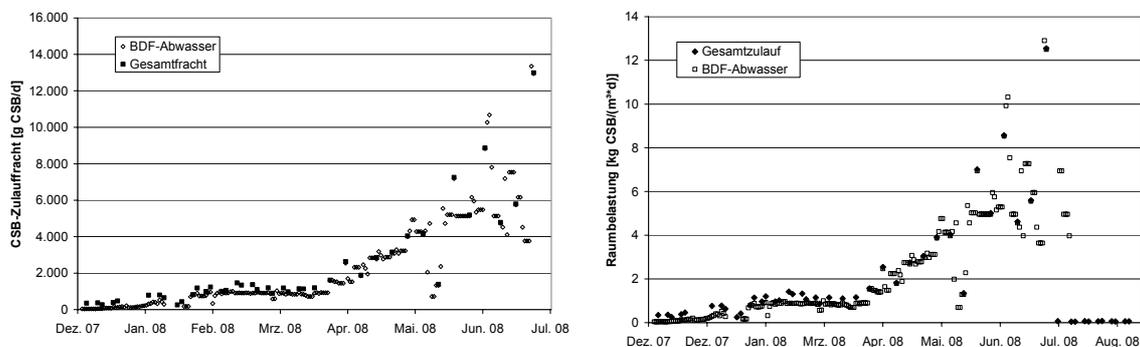
Das verwendete BDF-Abwasser stammt aus einem Produktionsbetrieb, in dem Rapsöl als Ausgangsstoff zur Biodieselgewinnung eingesetzt wird. Das Abwasser ist durch teilweise hohe CSB-Konzentrationen von bis zu 205 g CSB/l gekennzeichnet. Während der Versuche wurden verschiedene Chargen BDF-Abwasser behandelt (Tabelle 6.3). Das CSB/BSB<sub>5</sub>-Verhältnis lag bei 1,4...2,6, das Abwasser ist demzufolge leicht abbaubar. Produktionsbedingt liegt der pH-Wert im sauren Bereich bei 2...4. Schwankungen in den CSB-Konzentrationen sind u. a. auf die unterschiedlichen Mischungsverhältnisse der anfallenden Abwasserteilströme zurückzuführen (Teilstrom A: 35,7 g CSB/l, Teilstrom B: 322 g CSB/l, Schwankungsbereich der Konzentrationen: 20 %).

**Tabelle 6.3: Beschaffenheit des behandelten BDF-Abwassers**

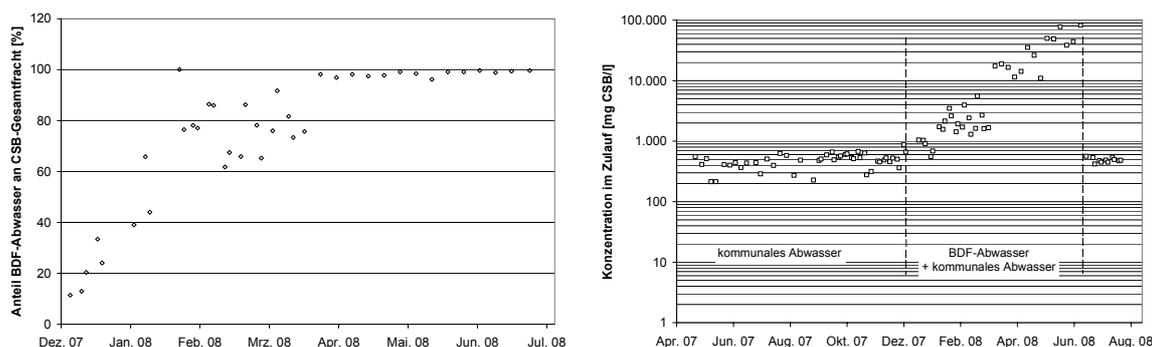
Datum	CSB	CSB <sub>mf</sub>	TOC	BSB <sub>5</sub>	TKN	NH <sub>4</sub> -N	P <sub>ges</sub>	AFS	pH-Wert
	[g/l]	[g/l]	[g/l]	[g/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[-]
03.12.07	10,5	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
14.12.07	12,1	n. b.	3,33	5,94	8,2	0,3	9,4	n. b.	4,2
24.12.07	13,7	n. b.	3,26	5,68	15,4	0,8	2,1	n. b.	4,3
07.01.08	11,5	n. b.	2,64	5,78	14,3	1,3	9,1	n. b.	4,6
19.01.08	23,8	n. b.	5,44	12,8	19,3	1,5	7,4	n. b.	3,8
26.01.08	44,5	n. b.	11,7	30,3	15,1	0,3	6,8	n. b.	3,0
02.02.08	79,1	78,8	19,0	41,1	13,6	3,6	4,7	n. b.	2,4
28.02.08	170	166	67,9	75,0	10	< 0,05	< 1,0	220	2,0
05.04.08	205	201	68,4	88,0	11	< 0,05	< 1,0	305	2,0

Die Dosierung mit BDF-Abwasser begann Anfang 12/07, dabei wurde die Tagesfracht mit einer Unterbrechung Mitte 01/08 täglich um 10 % gesteigert. Vom 22.01.08 bis 24.03.08 wurde eine BDF-Abwasser-Zuführung von 900 g CSB/d BDF-Abwasser konstant gehalten (Abbildung 6.16). Ende 03/08 wurde die Steigerung der Fracht fortgesetzt und ab Mitte 05/08 bei etwa 5.000 g CSB/d eingestellt. Im Weiteren wurde untersucht, wie sich Belastungsschwankungen auf den Betrieb und die Reinigungsleistung der Membrananlage auswirken. Zur Deckung des Ge-

halts an Spurenstoffen wurde kommunales Abwasser genutzt. Der Volumenstrom lag i. M. ab Ende 05/08 bei 123 l/d, der kommunale Anteil an der CSB-Gesamtfracht zwischen 0,3 % und 3,9 %, i. M. bei 1,6 % (Abbildung 6.17). Die sich ergebende CSB-Mischkonzentration im Zulauf lag ab Ende 03/08 bei 5.400...127.500 mg CSB/l, i. M. bei 33.000 mg CSB/l (Abbildung 6.17).



**Abbildung 6.16: CSB-Zulauf fracht, CSB-Raumbelastung**

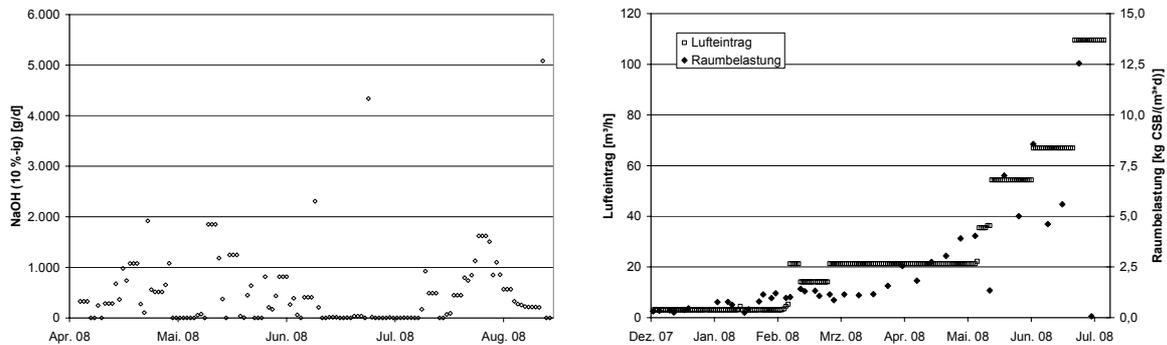


**Abbildung 6.17: Anteil der BDF-Abwasserfracht am Gesamt-CSB im Zulauf, CSB-Mischkonzentration**

Das für einen biologischen Abbau erforderliche CSB:N:P-Verhältnis von 200:5:1 konnte aufgrund der Beschaffenheit des BDF-Abwassers nicht ohne die Dosierung externer N- und P-Quellen eingestellt werden. Die im kommunalen Abwasser enthaltenen N- und P-Frachten reichten nicht aus, um den Nährstoffmangel zu kompensieren. Das CSB:N:P-Verhältnis lag infolge der Nährstoffdosierung bei mindestens 200:5:1; N wurde in Form von Harnstoff, P in Form von Natriumhydrogenphosphat-Dihydrat in den BDF-Abwasser-Vorlagebehälter dosiert.

Infolge der Steigerung der behandelten CSB-Fracht waren Änderungen am Versuchsaufbau erforderlich. Zum einen war die Installation einer NaOH-Dosierstation notwendig, zum anderen der Einbau zusätzlicher Belüfter bzw. der Anschluss leistungsstärkerer Belüftungsaggregate (Abbildung 6.18). Die Natronlauge wurde

als zehnpromzentige Lösung bedarfsgerecht im Bereich von 0...2.320 g/d dosiert (Abbildung 6.18). Ein sichtbarer Zusammenhang der dosierten Menge zu den erfassten Parametern war nicht nachweisbar. Die Dosierung von NaOH blieb auch nach Beendigung der BDF-Abwasserzufuhr, bei ausschließlicher Einleitung kommunalen Abwassers, erforderlich.



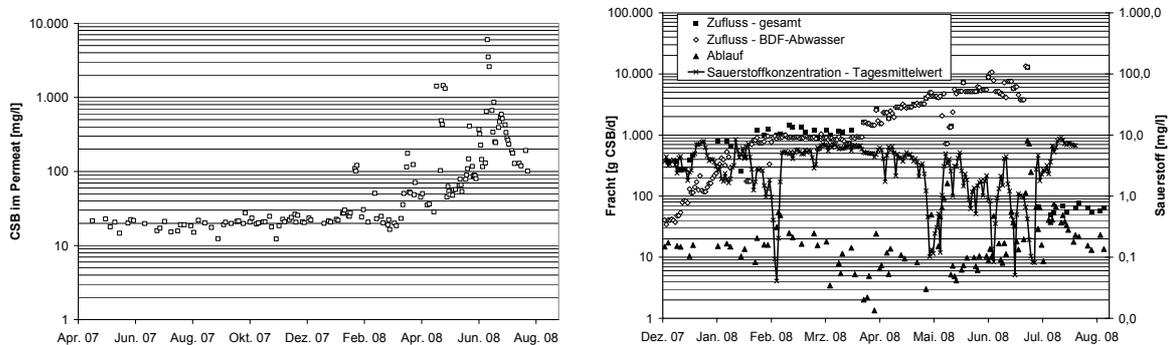
**Abbildung 6.18: Dosierte Natronlauge, Luftpfeintrag in die Anlage**

Die CSB-Ablaufkonzentrationen im Zeitraum der langsamen Frachtsteigerung bis Ende 03/08 lagen mit einigen technisch bedingten Ausnahmen (04.02.08 bis 08.02.2008, 26.02.08) zwischen 19 mg CSB/l und 30 mg CSB/l und unterschieden sich nicht von den Werten, die mehrere Monate lang bei der Behandlung ausschließlich kommunalen Abwassers gemessen wurden. Die maximale Raumbelastung erreichte 1,42 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d).

Im Folgenden war bis zu einer Raumbelastung von etwa 6 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d), abgesehen vom Zeitraum vom 01.05.2008 bis 12.05.2008 (technische Probleme bei der Sauerstoffversorgung), ein stabiler Betrieb der Membranbelebungsanlage möglich. Die Ablaufkonzentrationen lagen im Regelfall < 150 mg CSB/l. Die höchsten CSB-Ablaufkonzentrationen traten bei Sauerstoffkonzentrationen von < 1 mg O<sub>2</sub>/l nach Raumbelastungen von > 7 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d) auf (Abbildung 6.19).

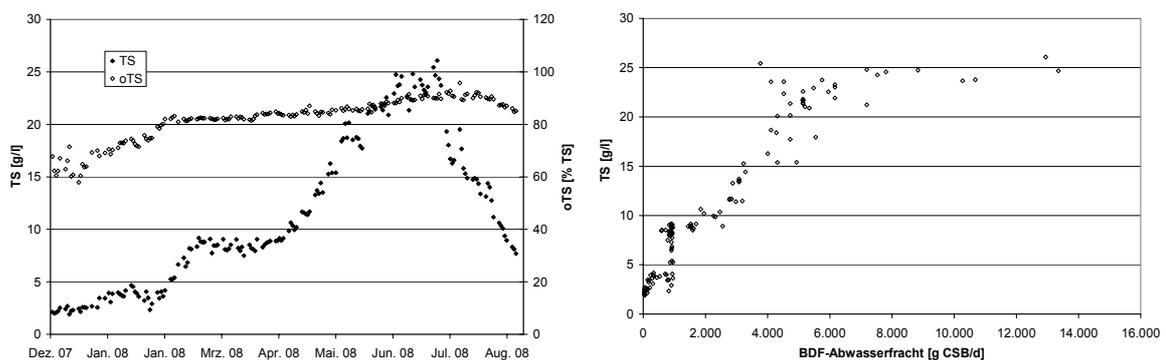
Mangelhafte Sauerstoffversorgung und Raumbelastungen > 6 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d) führten zum Ansteigen der Ablaufwerte, im Falle von Raumbelastungen von mehr als 10 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d) auf bis > 6.000 mg CSB/l. Durch ein einwöchiges Aussetzen der BDF-Abwasser-Zufuhr konnte ein Sinken der CSB-Konzentration auf 340 mg/l erreicht werden. Nach erfolgter Wiederaufnahme der Beschickung im Bereich von 4...7 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d) traten Ablaufwerte von 250...860 mg CSB/l auf, die auch nach Beendigung des Versuches bei ausschließlicher Beschickung mit kommunalem Abwasser erst zwei Wochen später unter 200 mg CSB/l fielen. Die in diesem Zeit-

raum mit dem Ablauf entlasteten Frachten lagen über den Werten, die während der Behandlung von BDF-Abwasser mit Raumbelastungen bis zu 6 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d) erzielt wurden.



**Abbildung 6.19: CSB-Konzentrationen im Ablauf; Gegenüberstellung von Sauerstoffkonzentration, Zulauf- und Ablauffracht**

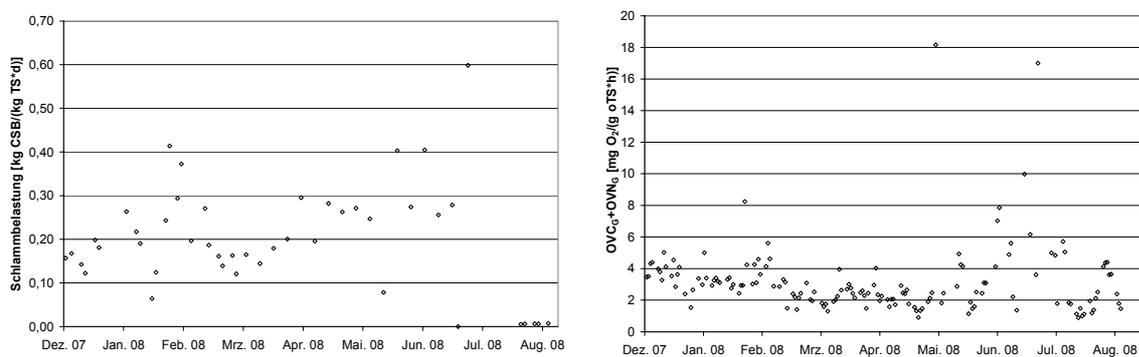
Der Feststoffgehalt im Belebungsbecken stieg mit Zunahme der dosierten CSB<sub>BDF</sub>-Abwasserfracht von etwa 2 g TS/l auf bis zu 11 g TS/l und stabilisierte sich im Zeitraum der konstanten BDF-Abwasser-Fracht-Zuführung von 900 g CSB/d bei 8...9 g TS/l. Der oTS-Gehalt stieg von etwa 60 % TS auf 82 % TS. Bei fortgesetzter Steigerung der BDF-Abwasserfracht stieg der Feststoffgehalt im Belebungsbecken auf bis zu 26,1 g TS/l. Der oTS-Gehalt nahm geringfügig zu und stieg auf rd. 90 % TS. Ein Anstieg des TS-Gehaltes mit Erhöhung der BDF-Abwasserfracht erfolgte linear bis etwa 6 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d), bei höheren Zulauffrachten bestand dieser Zusammenhang nicht mehr (Abbildung 6.20).



**Abbildung 6.20: Änderung des TS- und oTS-Gehaltes im Versuchszeitraum, Anstieg des TS-Gehaltes im Belebungsbecken im Vergleich zur behandelten BDF-Abwasserfracht**

Es ist naheliegend, den Einbruch der Reinigungsleistung u. a. auf die fehlende Anpassung der Biomasse an die Frachterhöhung durch Wachstum zurückzuführen.

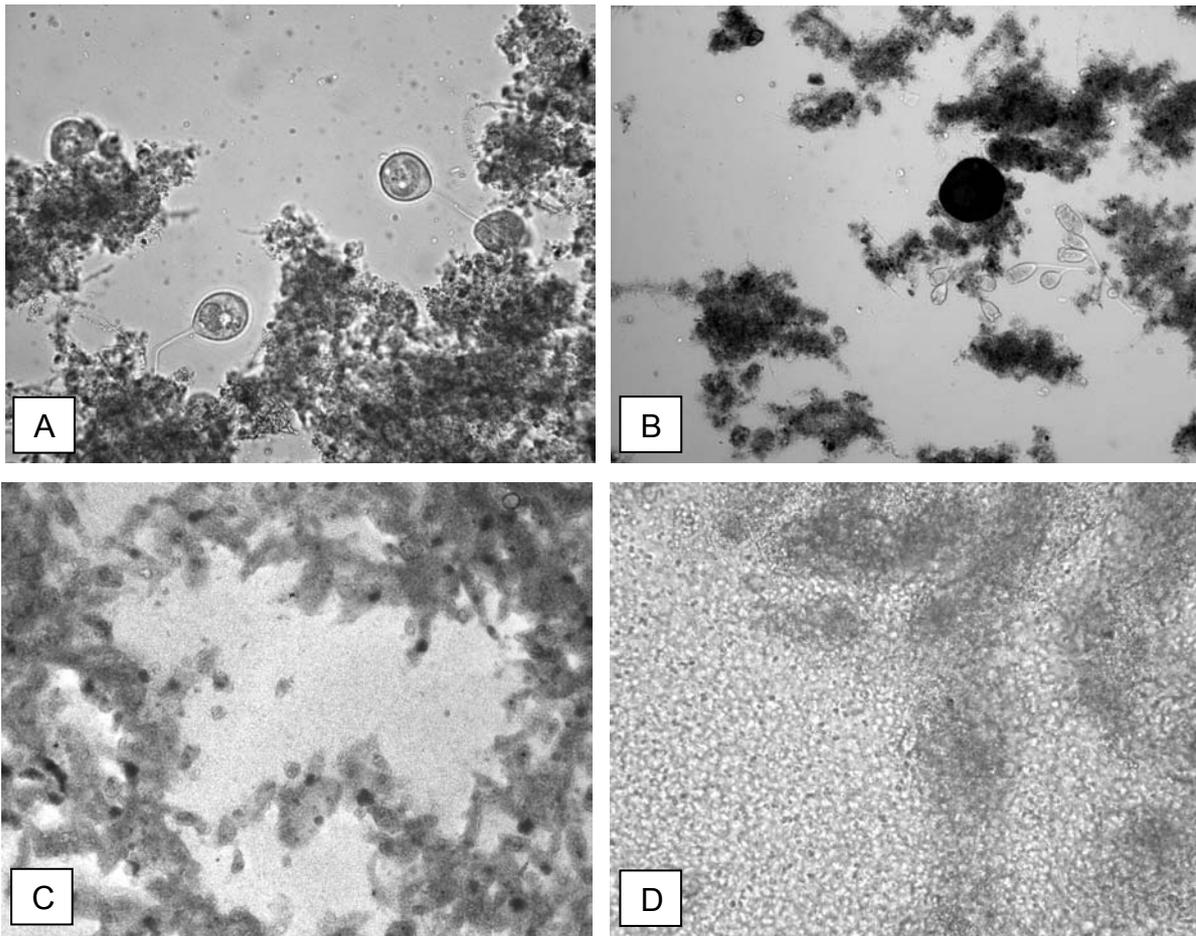
Eine Ursache für diesen Zustand liegt möglicherweise in der ungleichmäßigen Beschickung der Anlage, in deren Folge das Schlammwachstum der Erhöhung der BDF-Abwasserfracht nicht folgte. Die Schlammbelastung erreichte infolge des fehlenden Wachstums Werte von bis zu  $0,6 \text{ kg CSB}/(\text{kg TS}\cdot\text{d})$ . Als eine wesentliche Ursache gilt allerdings auch die mangelhafte Sauerstoffversorgung im letzten Versuchsabschnitt, die einerseits infolge technischer Probleme auftrat, andererseits durch die Entartung des Belebtschlammes beeinflusst wurde. Die Grundatmung des Belebtschlammes war in diesem Abschnitt entsprechend erhöht (Abbildung 6.21).



**Abbildung 6.21: Schlammbelastung und Grundatmung während der Versuche zum Abbau von BDF-Abwasser**

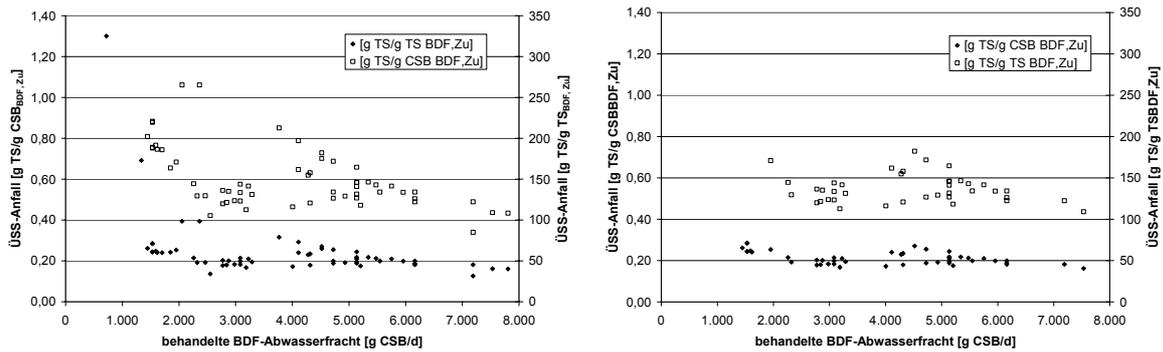
Der Belebtschlamm, der anfangs gut absetzbar war und dessen Überstand weitgehend feststofffrei war, verlor im Untersuchungszeitraum diese Eigenschaften. Am Ende der Versuche war keine sichtbare Sedimentation des Schlammes feststellbar. Die Sauerstoffkonzentration in der Anlage sank trotz Erhöhung der Luftzufuhr. Unabhängig davon traten wahrscheinlich substratbedingt, zahlreiche freie einzellige Bakterien auf, die keine Flocken bildeten und dadurch Sauerstofflösung und -übergang behinderten (Abbildung 6.22). Inwieweit die von der Steigerung der BDF-Abwasserfracht unabhängig gebliebene konstante Zuführung des kommunalen Abwassers bei der Versorgung der Mikroorganismen mit Spurenstoffen bei  $B_R > 6 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  eine Rolle spielt, kann aufgrund technischer Probleme beim Sauerstoffeintrag nicht beantwortet werden.

Phasenweise trat insbesondere nach Betriebsstörungen eine rötliche Verfärbung des Permeats auf. Die Membranplatten nahmen dadurch, ursprünglich weiß, einen orangeroten Farbton an, der im Zuge der chemischen Reinigung nicht vollständig eliminiert werden konnte.



**Abbildung 6.22: Mikroskopisches Bild des Belebtschlamm: A, B: vor der Behandlung von BDF-Abwasser (TS = 3,1 g TS/l, oTS = 68 % TS); C, D: während der BDF-Abwasser-Behandlung (TS = 24 g/l, oTS = 92 % TS)**

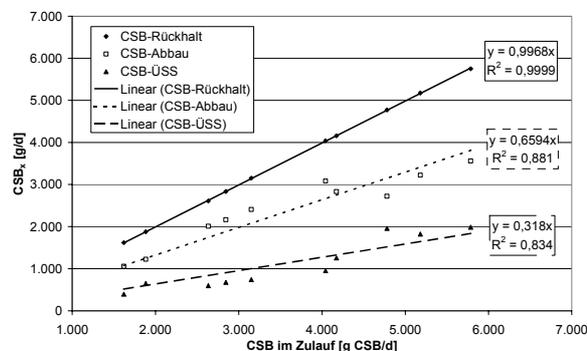
Der Überschussschlammfall wurde für den Zeitraum Ende 03/08 bis Ende 06/08 unter Vernachlässigung des ÜSS-Anfalls aus dem kommunalen Abwasser bestimmt. Bei einem mittleren kommunalen Zufluss von 123 l/d ergibt sich mit einer mittleren CSB-Zulaufkonzentration von 470 mg CSB/l eine Tagesfracht von rd. 60 g/d, die im Vergleich zur Fracht aus dem BDF-Abwasser (900...> 12.000 g CSB/d) eine untergeordnete Rolle spielt. Der spezifische kommunale ÜSS-Anfall wurde während des Betriebs der Anlage ohne BDF-Abwasserdosierung ermittelt (vgl. Abschnitt 6.1.1, Tabelle 6.2).



**Abbildung 6.23: Überschussschlammanfall unter Einbeziehung aller Werte (links); Bereinigter ÜSS-Anfall (rechts)**

Der spezifische ÜSS-Anfall liegt infolge der Beeinflussung durch kurzfristige Änderungen der Raumbelastung (Erhöhung oder Senkung der Raumbelastung um mehrere 100...1.000 g CSB/d) im Bereich von 0,09...1,3 TS/g CSB<sub>BDF,Zu</sub>, i. M. bei 0,23 TS/g CSB<sub>BDF,Zu</sub> (Abbildung 6.23). Unter ausschließlicher Berücksichtigung der Werte, die einen Tag nach geänderter Raumbelastung unter normalen Betriebsbedingungen ermittelt wurden, ergibt sich der ÜSS-Anfall zu 0,16 g TS/g CSB<sub>BDF,Zu</sub> bis 0,29 g TS/g CSB<sub>BDF,Zu</sub> (i. M. 0,21 g TS/g CSB<sub>BDF,Zu</sub>) (Abbildung 6.23).

Bei der Bestimmung des auf den zugeführten TS bezogenen ÜSS-Anfalls ist zu berücksichtigen, dass bis 04.04.2008 eine BDF-Abwasser-Charge behandelt wurde, die mit 220 mg AFS/l einen spezifisch höheren ÜSS-Anfall aufweist, als die mit 305 mg AFS/l ab 05.04.2008 behandelte Charge. Der bereinigte TS-bezogene ÜSS-Anfall liegt entsprechend dem bei der Ermittlung des CSB-bezogenen ÜSS-Anfalls dargelegten Vorgehens, bei 109...182 g TS/g TS<sub>BDF,Zu</sub> (i. M. 137 g TS/g TS<sub>BDF,Zu</sub>) (Abbildung 6.23).



**Abbildung 6.24: Verteilung des zugeführten CSB auf den abgebauten und abgeführten CSB**

Der CSB-Abbau beträgt unter Berücksichtigung des abgezogenen ÜSS und der mit dem gereinigten Abwasser entfernten CSB-Fracht i. M. 73 % (61...81 %). Eine gesonderte Betrachtung des kommunalen Anteils am gesamten Abbaugrad ist aufgrund des geringen Frachtanteils im Vergleich zur behandelten BDF-Abwasserfracht nicht sinnvoll. Die mit dem ÜSS entfernte CSB-Fracht beträgt etwa 30 % der Zulauffracht. Unabhängig vom CSB-Abbau war der CSB-Rückhalt der Membranbelebungsanlage mit 99 % (93,7...99,9 %) vergleichsweise hoch (Abbildung 6.24). Mit Ausnahme des gestörten Abbaus am 13.05.2008 und 25.06.2008 lag die mit dem Ablauf entlastete Fracht bei maximal rd. 1% der Zulauffracht.

### 6.1.2.2 Kleintechnische Versuche

vgl. *Kühn et al. (2008)*

Parallel zu den halbtechnischen Versuchen wurden Untersuchungen im Labormaßstab zur Aufbereitung des BDF-Abwassers in Indirekteinleiterqualität mit dem SBR-Verfahren durchgeführt. Als Reinigungsziel wurde eine CSB-Ablaufkonzentration von 2.000 mg CSB/l definiert. Die Versuche wurden an drei belüfteten Laborreaktoren mit einem Volumen von 8 l (SBR 1, HRT = 10 d) bzw. 3 l (SBR 2, SBR 3, HRT = 5 d) vorgenommen, die mit Überschussschlamm aus einer konventionellen Belebtschlammanlage angeimpft worden waren.

In Abhängigkeit der zugeführten CSB-Fracht wurden Stickstoff und Phosphat im Verhältnis CSB:N:P = 200:5:1, darüber hinaus Spurenstoffe (u. a. Co, Se, Ni) dosiert. Ohne N- und P-Dosierung stellte sich nach etwa 14 d eine massive Verschlechterung der Schlammeigenschaften ein, die durch eine Entartung der Biomasse gekennzeichnet war, in deren Folge der Sauerstoffeintrag stark vermindert wurde.

Die CSB-Konzentrationen im Ablauf waren von den CSB-Zulaufkonzentrationen (12,5...27,5 g CSB/l) abhängig. Während des Versuchszeitraumes lag der CSB im Ablauf des SBR 1 im Bereich von 5...10 g/l und damit über dem Zielwert von 2 g/l. Die mittlere CSB-Raumbelastung lag bei 2 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d), der erreichte CSB-Abbaugrad im Mittel bei 71 %. Die Reaktoren SBR 2 und SBR 3 wurden bei gleicher Verweilzeit (5 d) und Raumbelastung (5 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d)) betrieben. Die CSB-Zu- und Ablaufkonzentration sowie der CSB-Abbaugrad wiesen einen nahezu identischen Verlauf auf. Die CSB-Konzentrationen im Ablauf lagen im Bereich zwischen 6 g CSB/l und 15 g CSB/l bei Zulaufkonzentrationen von 20...27,5 g CSB/l und damit deutlich über dem geforderten Wert. Der erreichte CSB-Abbaugrad betrug im Mittel 61 %.

Unabhängig von der erreichten CSB-Umsatzleistung wies der Schlamm in allen Versuchsreaktoren sehr schlechte Absetzeigenschaften auf. Aus den bisherigen Versuchsergebnissen wird daher eingeschätzt, dass sich das konventionelle SBR-Verfahren nicht für die Erreichung angestrebten Reinigungsleistung für das Abwasser aus der Biodieselproduktion eignet. Im Vergleich dazu haben die Versuche mit dem halbtechnischen Membranbelebungsreaktor gezeigt, dass eine Einhal-

tung der geforderten Einleitbedingungen möglich ist. Es ist zu berücksichtigen, dass der in Anlage anfallende Überschussschlamm entsorgt werden muss.

Für alle Kläranlagen ab Größenklasse 4 ist eine Stickstoffentfernung erforderlich. Der dafür notwendige Bedarf an leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen kann nicht immer durch die im Abwasser enthaltene Kohlenstofffracht gedeckt werden, so dass externe Kohlenstoffquellen (Methanol, Ethanol) unter zum Teil hohen Betriebskosten dosiert werden müssen. Im Weiteren wurde an einer mit kommunalem Belebtschlamm ( $TS_0 = 4,2 \text{ g/l}$ ) betriebenen Laboranlage ( $V = 9 \text{ l}$ ) geprüft, inwieweit sich BDF-Abwasser als externe Kohlenstoffquelle für die Stickstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen eignet.

Über eine Dauer von 17 d wurden in den Belebtschlamm eine Nährlösung ( $10 \text{ g NO}_3\text{-N/l}$ ,  $1 \text{ g PO}_4\text{/l}$ ) sowie BDF-Abwasser ( $320 \text{ g CSB/l}$ , pH-Wert = 1) dosiert. Die Raumbelastung im Reaktor lag im Bereich von  $0,14 \dots 0,5 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ . Die auf die reduzierte Nitratfracht bezogene umgesetzte CSB-Fracht betrug im Mittel  $6,7 \text{ g CSB/g NO}_3\text{-N}$  ( $3 \dots 9 \text{ g CSB/g NO}_3\text{-N}$ ). Durch die Laborversuche wurde die Eignung des BDF-Abwassers für Denitrifikationsprozesse bestätigt. Unabhängig davon ist zu prüfen, inwieweit sich die Zugabe dieses Abwassers auf den gesamten Betrieb der Kläranlage auswirkt.

Im Zuge der Förderung alternativer Energiequellen wurden in den letzten Jahren zahlreiche Biogasanlagen errichtet. Der für diese Anlagen erforderliche Substratbedarf führte zu einem Mangel an verwertbaren Rohstoffen. Infolgedessen stiegen einerseits die Rohstoffpreise, andererseits die Nachfrage nach alternativen Rohstoffquellen. Auf Grundlage des CSB-Gehaltes des BDF-Abwassers wird dessen Biogaspotential abgeleitet und eine Bewertung hinsichtlich des Einsatzes als Substratquelle für Biogasanlagen vorgenommen.

Der CSB-Gehalt in den für eine anaerobe Behandlung geeigneten Abwasserteilströmen aus der Biodieselproduktion des untersuchten Betriebes liegt im Bereich von  $100 \dots 300 \text{ g CSB/l}$ , der Abwasseranfall bei etwa  $50 \text{ m}^3/\text{d}$ . Anhand der resultierenden Tagesfracht ( $5 \dots 17,5 \text{ t CSB/d}$ ) und der stöchiometrischen Gasproduktion von  $350 \text{ NI CH}_4/\text{kg CSB}_{\text{abgebaut}}$  werden unter Annahme eines Wirkungsgrades von  $70 \%$ ,  $3,5 \dots 12,3 \text{ t CSB/d}$  zu Biogas umgesetzt, entsprechend einer Methan-gasmenge von  $1.225 \dots 4.305 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{d}$ .

Versuche wurden mit zwei Faulreaktoren (jeweils 6 l) im mesophilen Temperaturbereich ( $T = 37\text{ °C}$ , pH-Wert = 7,2) und einer hydraulischen Verweilzeit von 20 d durchgeführt. Der Einfahrbetrieb (vier Wochen) erfolgte mit voreingedicktem Mischschlamm (statisch eingedickter Primär- und Überschussschlamm) der KA Dresden-Kaditz unter Dosierung von BDF-Abwasser ( $1,2\text{ kg CSB}_{\text{BDF}}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ,  $200\text{ g CSB/l}$ ) bis zu einer Raumbelastung von insgesamt  $2,9\text{ kg CSB}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ . Danach wurde anstelle des Mischschlammes unbehandelter Überschussschlamm aus der halbtechnischen Membranbelebungsanlage eingesetzt. Die Raumbelastung lag infolge des geringeren CSB-Gehaltes des ÜSS im Vergleich zum Mischschlamm bei  $1,7\text{ kg CSB}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ . Die Zuführung des BDF-Abwassers erreichte mit  $1,4\text{ kg CSB}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  etwa 80 % der CSB-Gesamtfracht und wurde im Folgenden auf  $1,5\text{ kg CSB}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  gesteigert. Die spezifische Gasproduktion lag i. M. bei  $325\text{ NI CH}_4/\text{kg CSB}_{\text{abgebaut}}$ , der erreichte Abbaugrad bei i. M. 66 % (53...77 %). Das Biogas bestand zu 72 % aus Methan, zu 28 % aus Kohlendioxid.

Anhand der Versuchsergebnisse ist es möglich, ein Konzept zur Behandlung der Rückstände aus der Biodieselproduktion zu erstellen, wobei im ersten Schritt eine anaerobe Vorbehandlung hochbelasteter Teilströme zur Biogasgewinnung vorzusehen ist. Dabei ist zunächst eine Optimierung der Anaerobbehandlung im Hinblick auf die Erhöhung der Raumbelastung vorzunehmen. Gering belastete Teilströme sind aerob, vorzugsweise mit dem Membranbelebungsverfahren, abbaubar. Überschussschlamm wird der Anaerobstufe zugeführt. Eine Rückführung des gereinigten Abwassers in den Prozess ist nach einer Umkehrosiose möglich, insofern abweichend von den durchgeführten Versuchen, die Versorgung mit Spurenstoffen nicht durch kommunales Abwasser erfolgt.

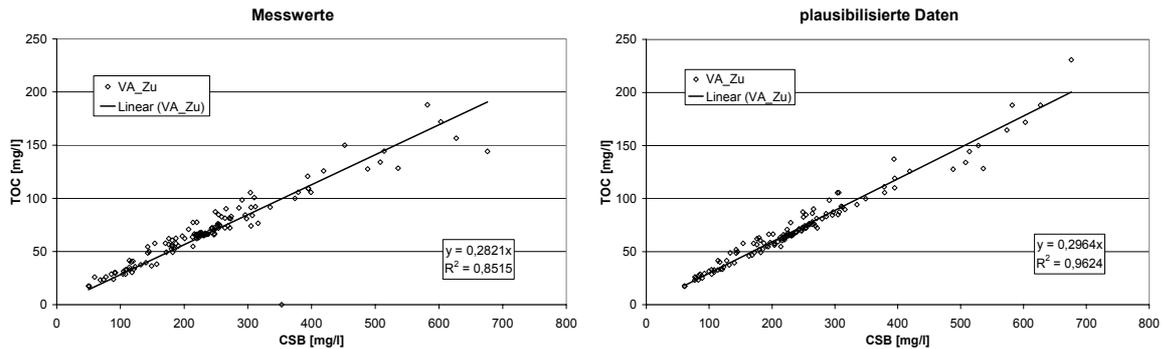
## 6.2 Zuflussfraktionierung

### 6.2.1 Fraktionierung des kommunalen Abwassers

Es wurden elf Trockenwetter- und drei Mischwasserzuflüsse bzw. Regennachläufe erfasst. Einige vor Ort bestimmte Abwasserkenwerte (Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert) sowie die CSB-, BSB<sub>5</sub>- und AFS-Konzentrationen der unfiltrierten Proben sind in Tabelle 6.4 dargestellt. Die pH-Werte lagen im für kommunales Abwasser typischen neutralen bis leicht basischen Bereich. Das TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse lag nach Auswertung der Laborwerte bei 0,28 (CSB/TOC = 3,5), nach der Plausibilisierung der Werte (vgl. Abschnitt 4.1.4) bei 0,30 (CSB/TOC = 3,4) (Abbildung 6.25).

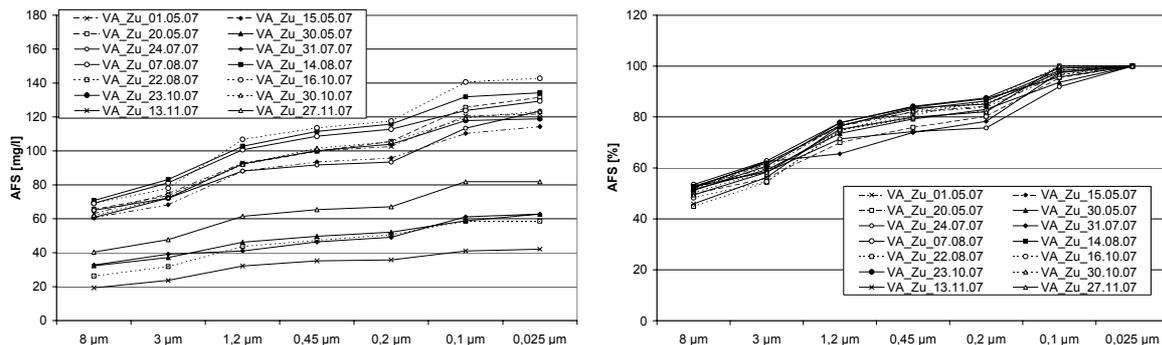
**Tabelle 6.4: Charakterisierung des Zuflusses zur Versuchsanlage**

Probe	BSB <sub>5</sub>	CSB <sub>unfiltr.</sub>	CSB <sub>mf</sub>	AFS <sub>mf</sub>	Leitfähigkeit	pH-Wert	Temperatur
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[μS/cm]	[-]	[°C]
01.05.07	-	-	233	-	1.258	8,1	16,1
15.05.07	196	452	220	90	985	7,9	14,0
20.05.07	-	514	227	166	1.210	8,0	16,9
30.05.07	81	214	85,6	80	875	7,6	18,8
24.07.07	175	508	176	186	1.379	7,6	19,9
31.07.07	150	399	145	150	1.540	7,7	19,5
07.08.07	260	627	248	238	1.699	7,9	20,4
14.08.07	267	582	264	228	1.740	8,0	20,3
22.08.07	96	272	272	118	321	7,5	18,5
16.10.07	238	603	250	232	1.576	8,0	17,6
23.10.07	222	536	222	212	1.773	8,1	17,3
30.10.07	268	676	248	292	1.706	8,2	17,3
13.11.07	121	316	135	142	769	7,7	12,2
27.11.07	221	488	231	160	1.312	7,9	14,5



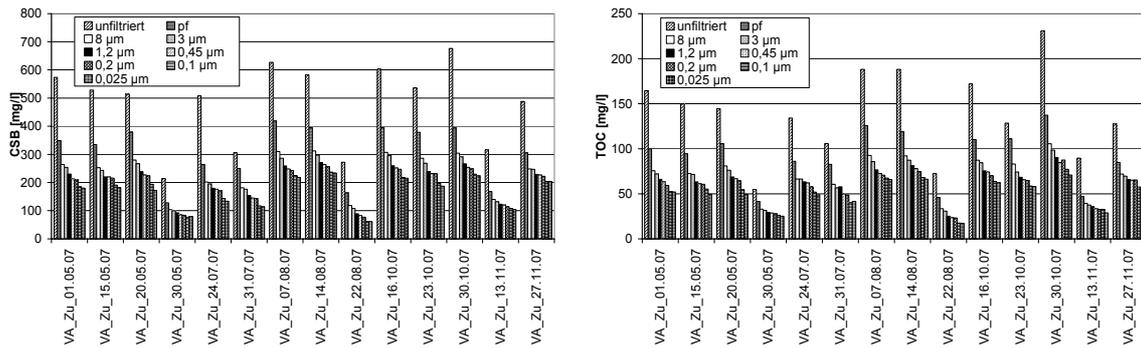
**Abbildung 6.25: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse**

In Abbildung 6.26 ist die Änderung der abgeschiedenen partikulären Substanzen als AFS im Bereich 8 µm bis 0,025 µm dargestellt. Die absoluten Werte zeigen kein einheitliches Bild, während sich beim Vergleich der relativen Werte der membranfiltrierten Proben, unabhängig von den Zuflussbedingungen mit Ausnahme der Proben vom 24.07.07 und 31.07.07, ein ähnlicher Verlauf einstellt.

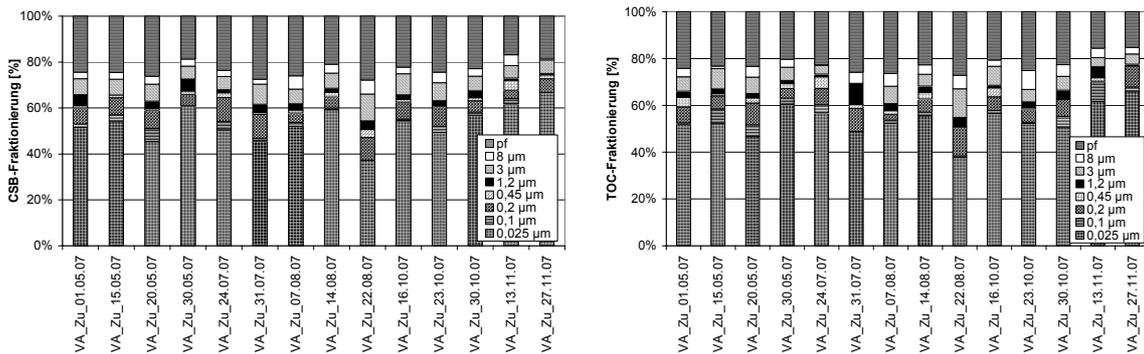


**Abbildung 6.26: AFS-Verteilung im Zufluss mit Bezug zur 8 µm-Probe**

Die CSB- und TOC-Konzentrationen zeigen insbesondere unter Trockenwetterbedingungen einen ausgeprägten Verlauf (Abbildung 6.27, Abbildung 6.28). Bei Mischwasserzuflüssen bzw. Regenwetternachläufen ist der Konzentrationsverlauf infolge des Verdünnungseffektes weniger deutlich. Die 8 µm-Fraktion liegt im Regelfall 20...25 % unterhalb der nach der Filtration über Papierfilter analysierten TOC- bzw. CSB-Konzentrationen. Der Unterschied zwischen der 8 µm- und 3 µm-Fraktion ist mit rd. 5 % relativ gering. Gleiches gilt für die 1,2 µm- und die 0,45 µm-Fraktion. Zusammenfassend beträgt die Summe aus 1,2 µm, 0,45 µm und 0,2 µm-Fraktion etwa im Regelfall 10...15 % der papierfiltrierten Konzentrationen.

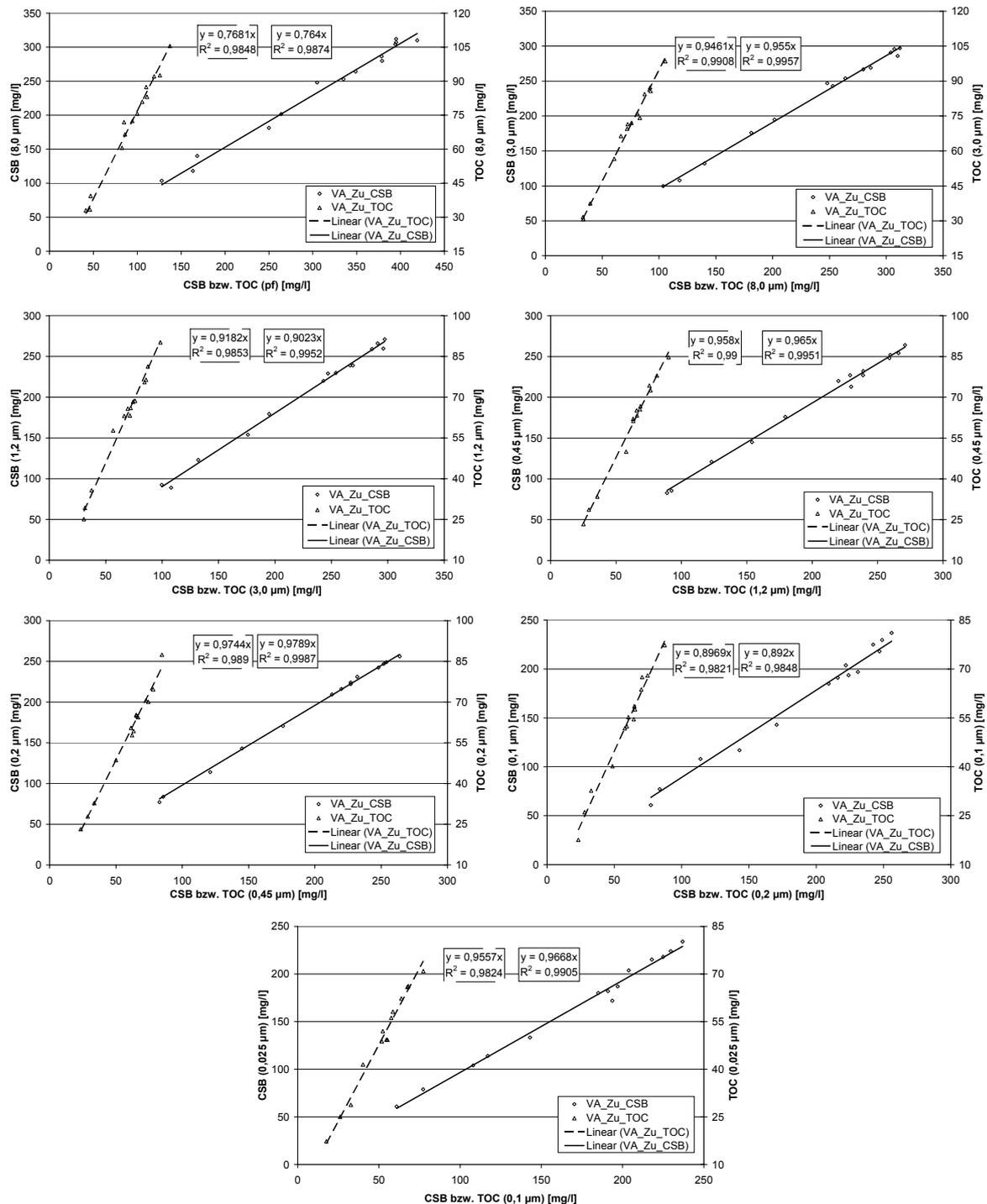


**Abbildung 6.27: Absolute CSB- und TOC-Konzentrationen im Zufluss**



**Abbildung 6.28: Relative Verteilung der Zuflussfraktionen (Bezug: papierfiltrierte Probe)**

In allen Proben betrug die Ausdehnung der 0,2 µm-Fraktion weniger als 7 % der papierfiltrierten Probe. Sowohl zwischen der 0,2 µm- und der 0,45 µm-Fraktion, als auch zwischen der 0,1 µm- und 0,025 µm-Fraktion sind nur geringe Unterschiede erkennbar, die ggf. auf Fehler bei der Analyse oder der Aufbereitung der Proben im Zuge der Fraktionierung zurückzuführen sind. Im Vergleich zur papierfiltrierten Probe zeigt sich, dass die 0,025 µm-Fraktion zwar einen großen Anteil einnimmt, aber auch eine relativ breite Streuung sowohl im CSB als auch im TOC von 40...70 % aufweist. Wird die in der Abwassertechnik gebräuchliche 0,45 µm-Fraktion als Bezugswert für membranfiltrierte Proben gewählt, so sind mindestens 75 % des 0,45-µm Durchgangs kleiner als 0,1 µm bzw. kleiner als 0,025 µm.



**Abbildung 6.29: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Zuflussfraktionen**

Die größten Änderungen der Konzentrationen treten zwischen der papierfiltrierten und der 8 µm-Fraktion (CSB: 14 %, TOC: 13 %), zwischen 3 µm- und 1,2 µm-Fraktion (CSB: 10 %, TOC: 8 %) und zwischen der 0,2 µm- und 0,1 µm-Fraktion (CSB: 11 %, TOC: 10 %) auf (Abbildung 6.28, Abbildung 6.29).

Die lineare Abhängigkeit aller Fraktionen ist ein Hinweis auf eine Abwasserbeschaffenheit, die nur durch die Verdünnung mit Fremdwasser, d. h. Niederschlagswasser beeinflusst wird.

Die Bestimmung von partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC und deren Korrelation mit den AFS führte bei allen untersuchten Proben zu einer linearen Abhängigkeit (Abbildung 6.31, Abbildung 6.31). Die Zusammenhänge variieren im Bereich von  $CSB_{part.} = 0,8 \cdot AFS$  bis  $CSB_{part.} = 2,2 \cdot AFS$ . Der überwiegende Teil liegt bei  $1,2 \dots 1,5 \cdot AFS$ , so dass ein Gesamtzusammenhang nachweisbar ist (Abbildung 6.32). Eine Beeinflussung des Anstiegs durch Trocken- oder Mischwasserbedingungen war nicht sichtbar. Eine Aussage über jahreszeitlich bedingte Änderungen lässt sich nicht ableiten, da im Zeitraum Dezember bis April keine Fraktionierung durchgeführt worden ist.

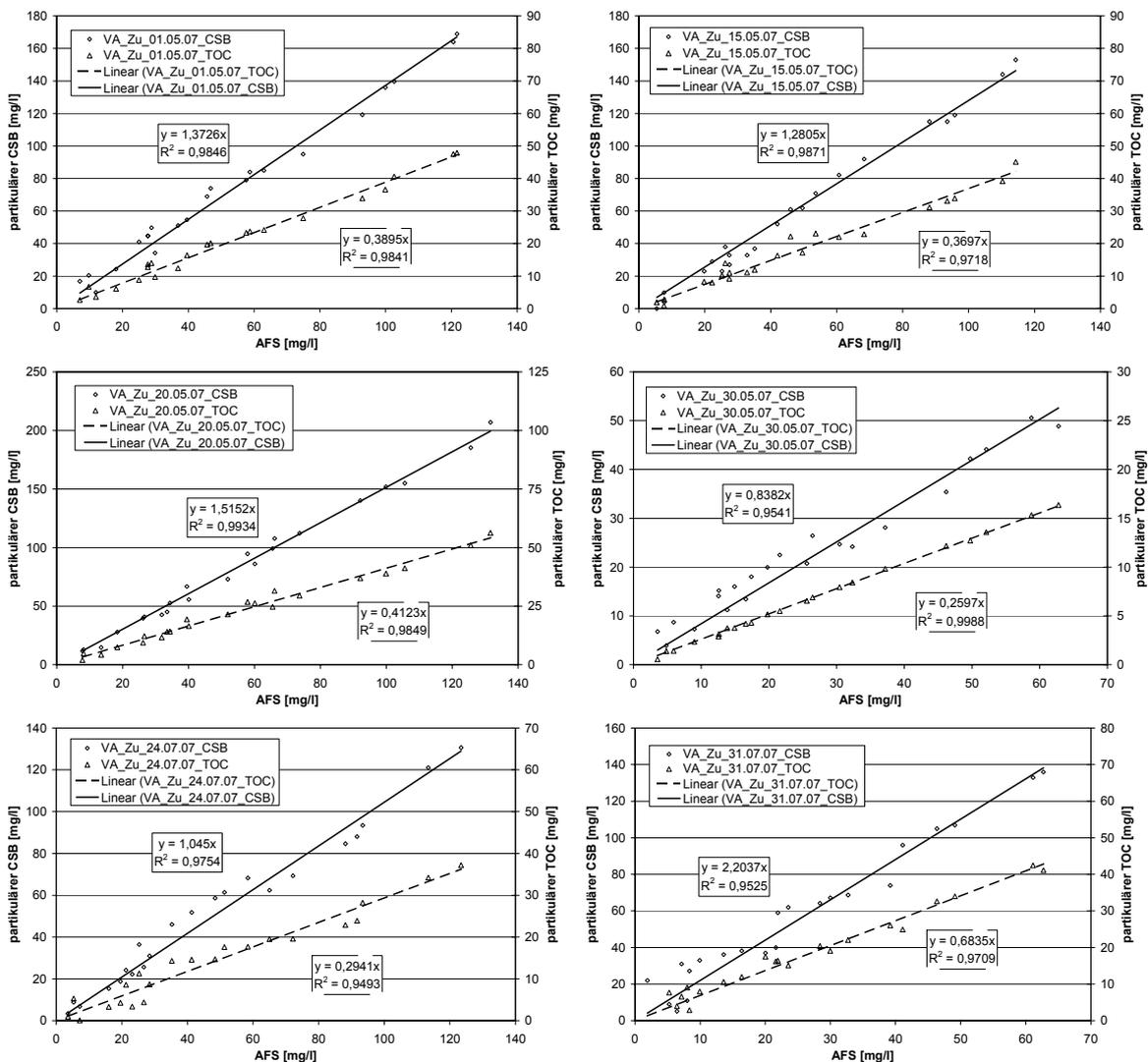
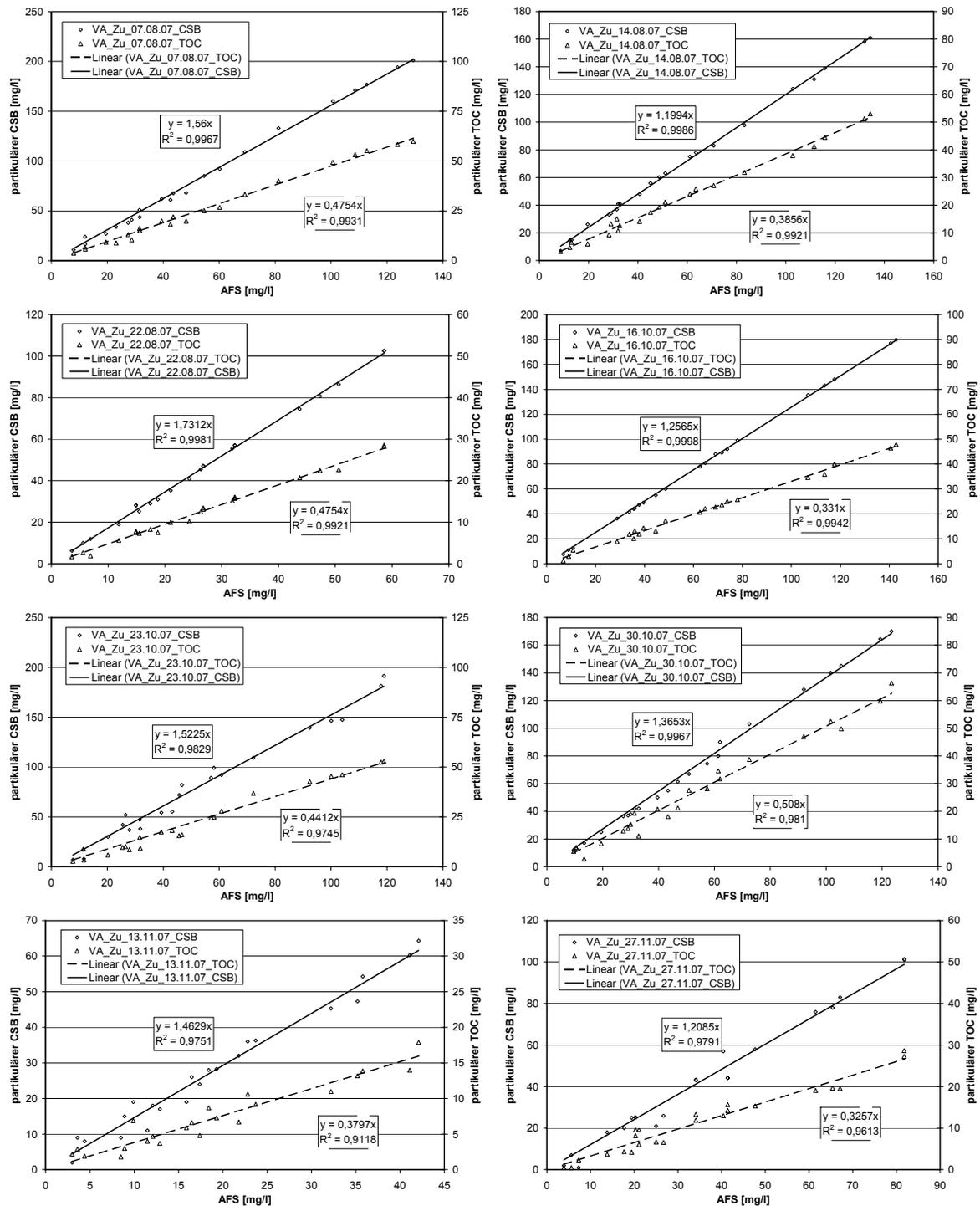
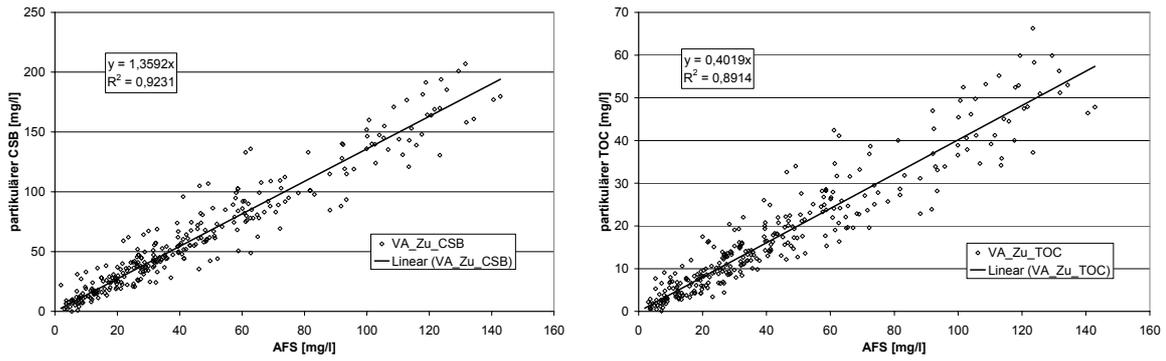


Abbildung 6.30: Zusammenhang zwischen AFS und part. CSB bzw. TOC

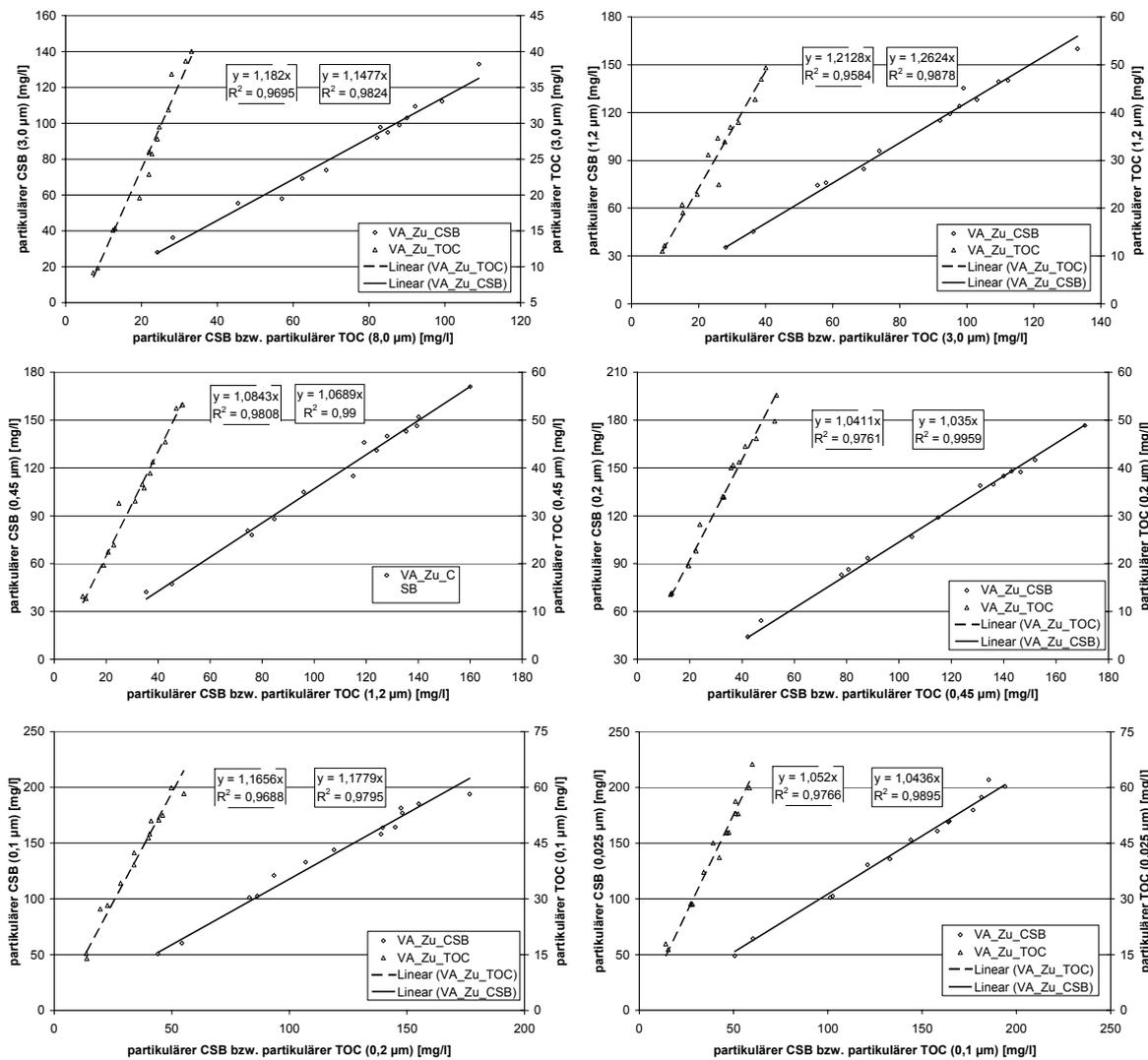


**Abbildung 6.31: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC (Fortsetzung)**

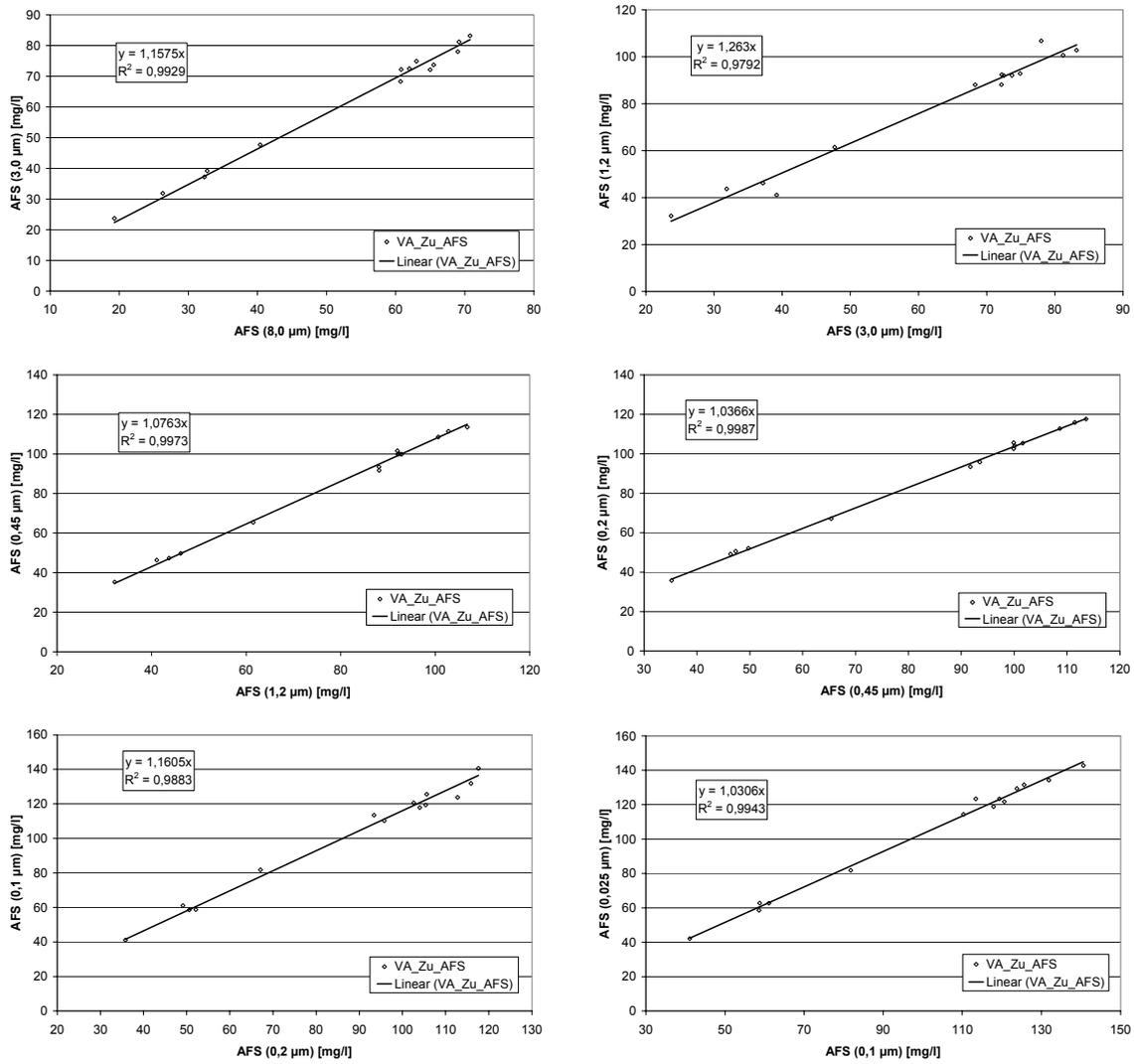
Der Vergleich der Änderung des partikulären CSB sowie des partikulären TOC aufeinander folgender Fraktionen mit den zu diesen Fraktionen gehörenden AFS zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der Anstiege aller drei Parameter (Abbildung 6.33, Abbildung 6.34).



**Abbildung 6.32: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC (Zusammenfassung alle Proben)**



**Abbildung 6.33: Änderung des part. CSB- bzw. TOC aufeinander folgender Fraktionen**



**Abbildung 6.34: Änderung der AFS aufeinander folgender Zuflussfraktionen**

## 6.2.2 Fraktionierung des BDF-Abwassers

Eine Probe des BDF-Abwasser aus der Charge vom 02.02.07 (vgl. Tabelle 6.3) wurde vollständig fraktioniert. Die Unterschiede zwischen den CSB-Konzentrationen innerhalb der Fraktionen liegen bei maximal 5 %, beim TOC bei weniger als 3 %, d. h. im Fehlerbereich der Analyseverfahren. Ein Zusammenhang des partikulären CSB bzw. TOC mit den abgeschiedenen AFS war aufgrund des geringen partikulären Anteils nicht nachweisbar. Es ist davon auszugehen, dass BDF-Abwasser im Wesentlichen aus gelösten Substanzen besteht. Dies wird durch eine Probe der Charge vom 05.04.08 bestätigt, bei der zwischen der unfiltrierten Probe (208,8 mg CSB/l) und der 0,025- $\mu$ m-membranfiltrierten Probe (207,7 g CSB/l) ein Unterschied von weniger als einem Prozent lag.

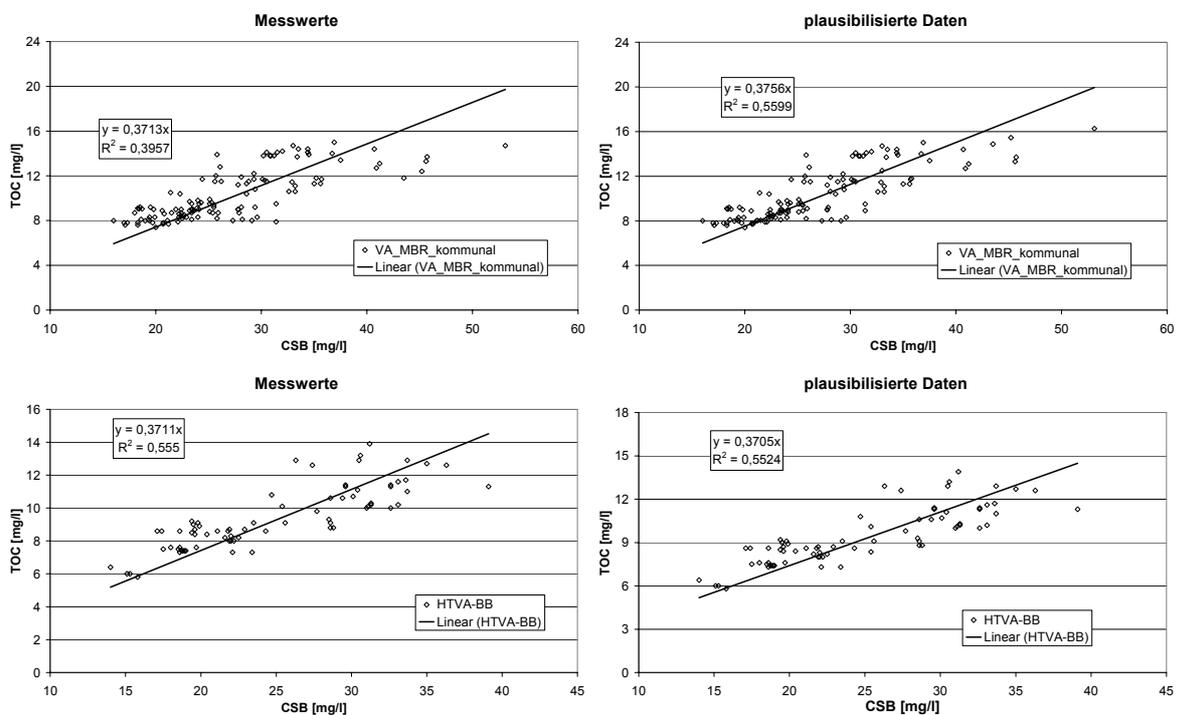
**Tabelle 6.5: Fraktionierung des BDF-Abwassers**

	CSB	TOC	AFS
Aufbereitungsstufe	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
unfiltriert	79.160	23.740	nicht bestimmt
papierfiltriert	80.520	23.930	nicht bestimmt
8,0 $\mu$ m	78.800	23.330	73,2
3,0 $\mu$ m	83.120	23.360	138
1,2 $\mu$ m	80.340	23.310	83,5
0,45 $\mu$ m	78.800	23.420	11,8
0,2 $\mu$ m	81.720	23.470	8,80
0,1 $\mu$ m	81.140	23.260	32,9
0,025 $\mu$ m	79.260	23.130	52,0

## 6.3 Belebtschlammfraktionierung

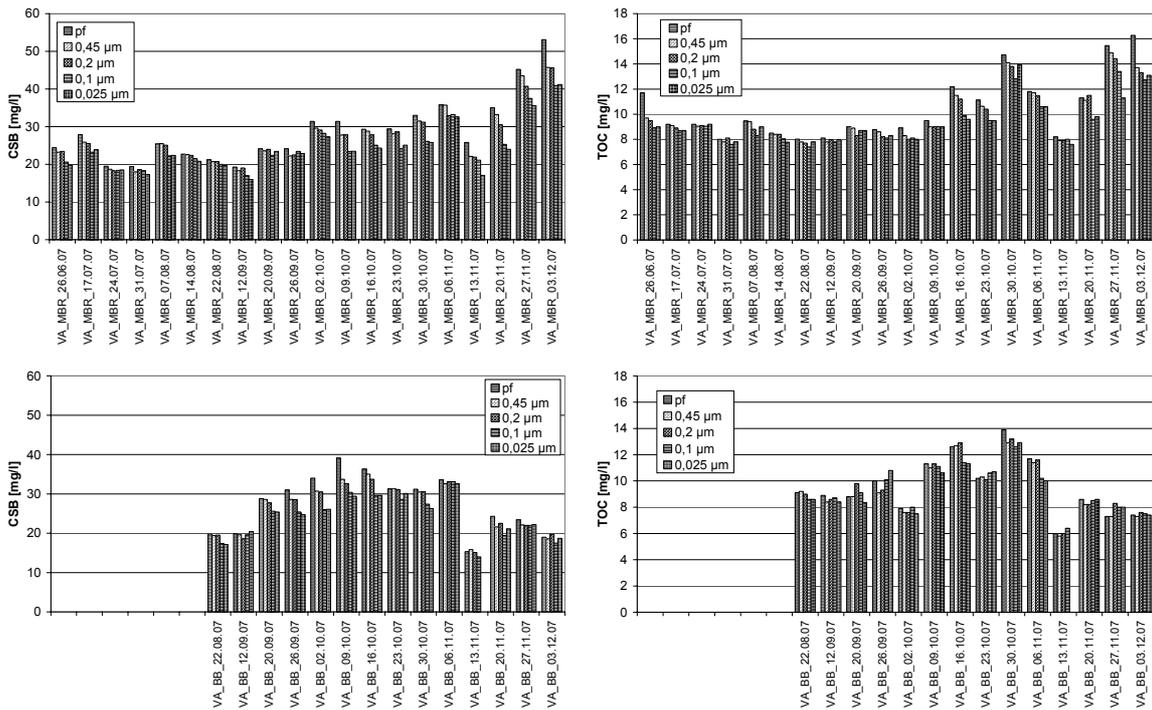
### 6.3.1 Fraktionierung des Belebtschlammes aus HTVA und Membranbelebungsanlage während des Parallelbetriebs mit kommunalem Abwasser

Zwischen den TOC/CSB-Verhältnissen der filtrierten Belebtschlämme aus HTVA und Membranbelebungsanlage bestehen geringe Unterschiede (Abbildung 6.35). Das TOC/CSB-Verhältnis im Schlamm der HTVA liegt bei 0,37 (CSB/TOC = 2,7), das der Membranbelebungsanlage bei 0,38 (CSB/TOC = 2,7).



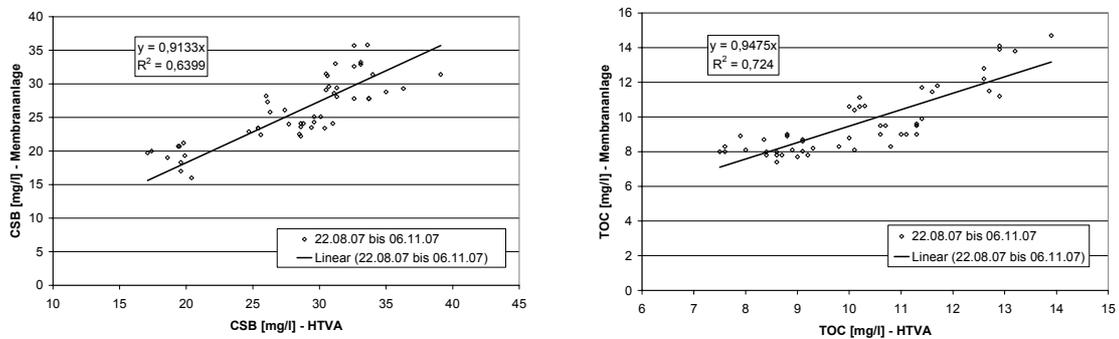
**Abbildung 6.35: CSB/TOC-Verhältnisse der filtrierten Belebtschlämme aus HTVA und Membranbelebungsanlage während des Parallelbetriebs**

Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlammes der Membranbelebungsanlage unterliegen einem gering ausgeprägten Verlauf, dessen Differenz beim Vergleich der 0,45  $\mu\text{m}$ - mit der 0,025  $\mu\text{m}$ -Fraktion im Regelfall weniger als 5 mg CSB/l bzw. < 1,5 mg TOC/l beträgt (Abbildung 6.36). Die Unterschiede zwischen den Fraktionen des filtrierten Belebtschlammes der HTVA fallen geringer aus, was dafür spricht, dass im Belebtschlamm der Membrananlage organische partikuläre Substanzen eingelagert werden, die zur Fraktionierung führen.



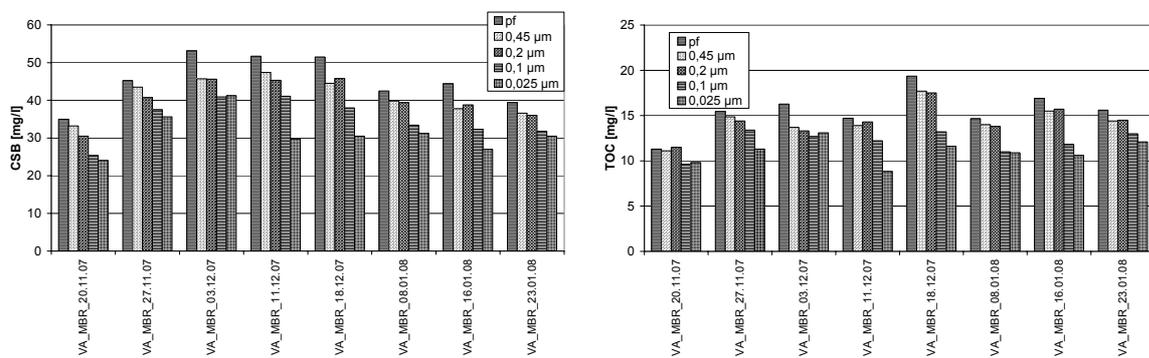
**Abbildung 6.36: CSB- und TOC-Konzentrationen der filtrierten Belebtschlämme**

Da diese Einlagerung an der HTVA nicht auftritt, ist anzunehmen, dass die dafür notwendigen partikulären Substanzen durch die Membran zurückgehalten werden, nicht aber im Nachklärbecken der HTVA absetzbar sind, d. h. mit dem gereinigten Abwasser ausgeschwemmt werden. Im Gegensatz zur HTVA waren die Konzentrationen des filtrierten Belebtschlammes in der Membranbelebungsanlage geringer (Abbildung 6.37), was ggf. im Zusammenhang mit der geringeren Grundatmung und dem höheren Stabilisierungsgrad der Membrananlage steht (vgl. Abschnitt 6.1.1).



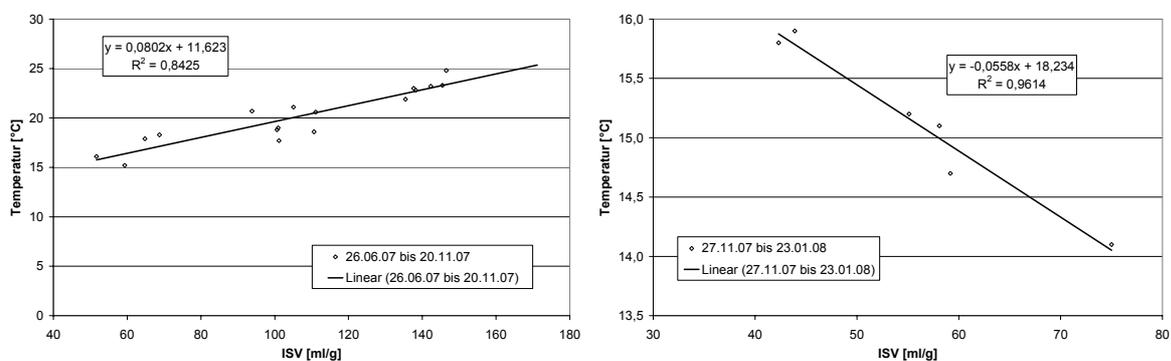
**Abbildung 6.37: Korrelation zwischen den CSB- und TOC-Konzentrationen der filtrierten Belebtschlämme aus Membranbelebungsanlage und HTVA**

Der Verlauf der Konzentrationen beider Schlämme ist bis 06.11.08 grundsätzlich ähnlich (Abbildung 6.36). Im Zeitraum danach ist ein Auseinanderdriften der Konzentrationen zu beobachten. Während in der HTVA ein sinkender Konzentrationsverlauf auftritt, steigen die Konzentrationen in der Membranbelebungsanlage an und fallen erst im Januar'08 (Abbildung 6.38). Das Ursprungsniveau wurde nicht erreicht, da ab 03.12.07 BDF-Abwasser mitbehandelt wurde, in dessen Folge der TS-Gehalt stieg. Die Ablaufkonzentrationen beider Anlagen blieben davon im Wesentlichen unbeeinflusst. Die mittlere Grundatmung war in beiden Anlagen in diesem Zeitraum gleich.

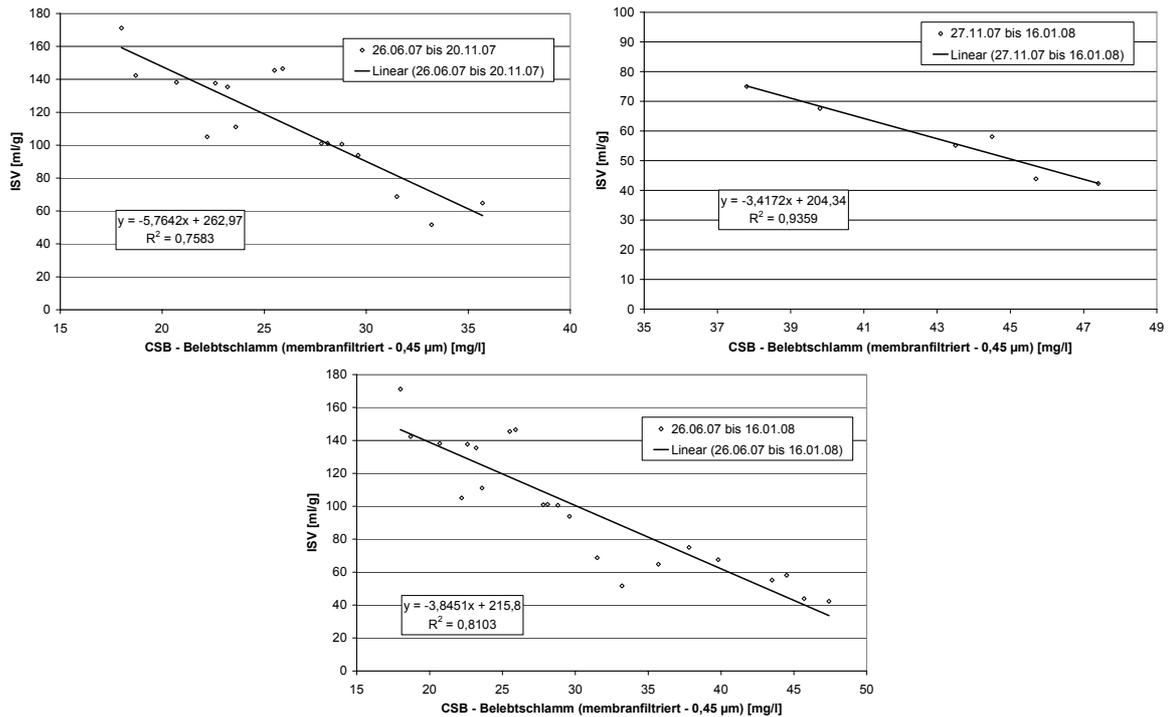


**Abbildung 6.38: CSB- und TOC-Fraktionierung im Zeitraum vom 20.11.07 bis 23.01.08**

Parallel zum Anstieg der CSB-Konzentrationen trat eine Veränderung im Zusammenhang zwischen ISV und Temperatur ein. Bis 20.11.07 steigt der ISV mit der Temperatur, danach ist das Verhalten umgekehrt (Abbildung 6.39). Der Trend, dass mit abnehmenden ISV die filtrierte Belebtschlammkonzentrationen zunehmen, bleibt zwar grundsätzlich erhalten, der Anstieg ändert sich allerdings (Abbildung 6.40).

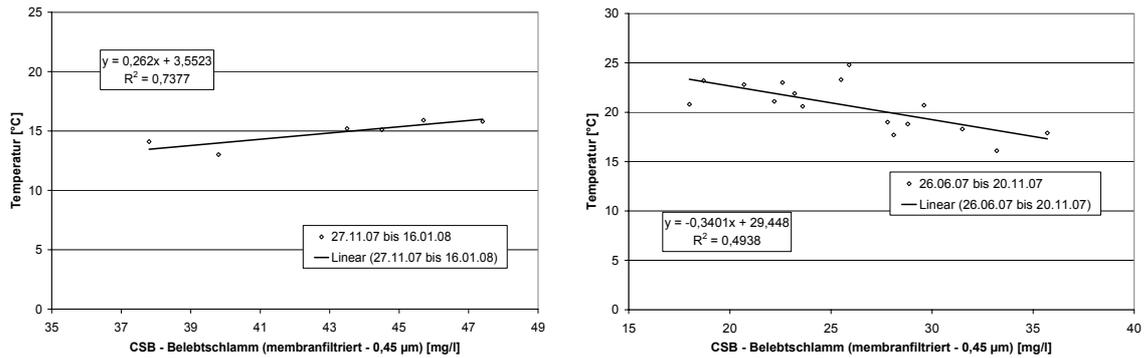


**Abbildung 6.39: Zusammenhang zwischen ISV und Temperatur im Belebtschlamm der Membranbelebungsanlage**

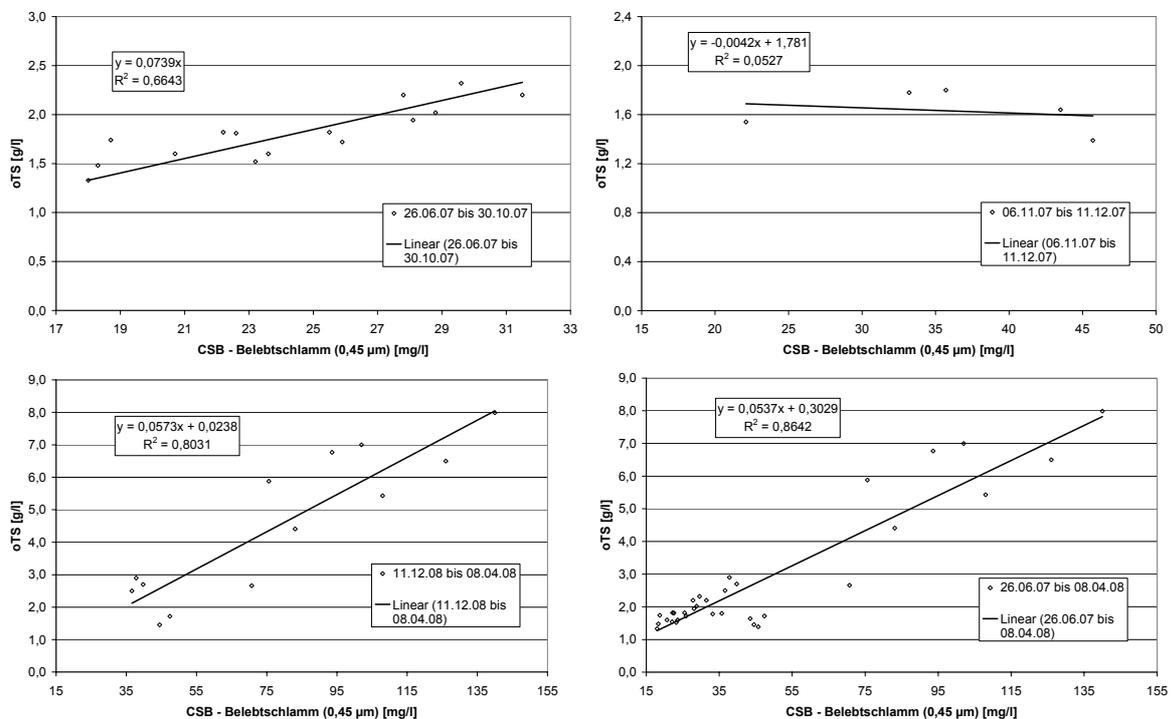


**Abbildung 6.40: Korrelation zwischen ISV und der 0,45 µm-Belebtschlammfraktion aus der Membranbelebungsanlage**

Es ist denkbar, dass die Änderung der mikrobiologischen Beschaffenheit des Schlamms, in Verbindung mit der Temperatur (vgl. Abschnitt 6.1.1, Tabelle 6.1), eine Änderung des Verhaltens des ISV bewirkt. Die Zunahme der filtrierte CSB-Belebtschlammkonzentrationen ist demnach das Ergebnis eines biologischen Prozesses, dessen Auswirkungen (Konzentrationsanstieg) reversibel sein können. Ein direkter Temperatureinfluss auf die Permeabilität der Membran ist im vorliegenden Fall nicht wahrscheinlich. Im Gegensatz dazu ist in den Untersuchungen ab 11/07 beobachtet worden, dass die Konzentrationen des filtrierte Belebtschlamm mit abnehmender Temperatur fallen (Abbildung 6.41). Bis 10/07 bestand ein schwacher Zusammenhang zwischen Temperatur und CSB, der aber nur als Indiz für den Temperatureinfluss gelten kann. Es ist anzunehmen, dass sich Temperaturänderungen auf die Beschaffenheit des Belebtschlamm und damit indirekt auf den ISV und die Fraktionierung auswirken. Es ist zu berücksichtigen, dass infolge der BDF-Abwasserdosierung ab Anfang 12/07 eine Beeinflussung der Schlammbeschaffenheit infolge der geänderten Abwasserzusammensetzung und Raumbelastung nicht ausgeschlossen ist.



**Abbildung 6.41: Auswirkungen von Temperaturänderungen auf die Konzentration des filtrierten Belebtschlammes der Membranbelebungsanlage**

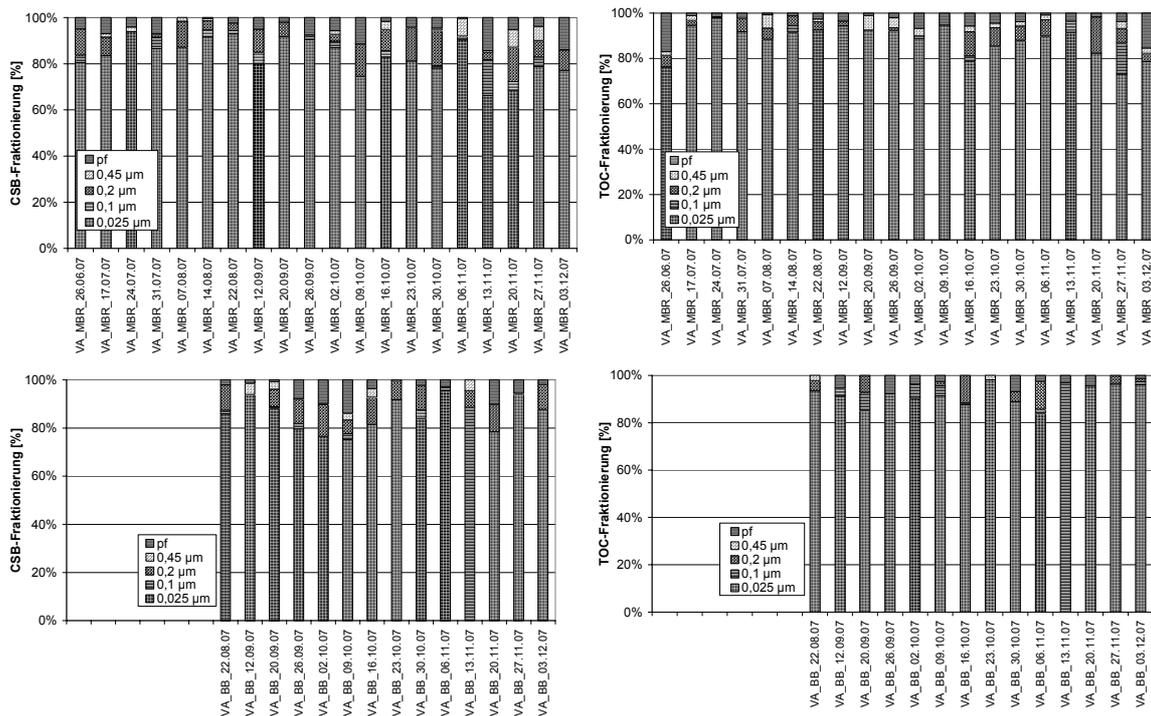


**Abbildung 6.42: Zusammenhang zwischen oTS-Gehalt und CSB-Konzentration des membranfiltrierten Belebtschlammes der Membranbelebungsanlage**

Unabhängig davon bestand bis Ende 10/07 ein direkter Zusammenhang zwischen oTS-Gehalt und den CSB-Konzentrationen im filtrierten Belebtschlamm. Mit steigendem oTS trat eine Zunahme der "gelösten" Bestandteile ein. Für die Proben aus dem Zeitraum 11/07 bis 12/07 ist dagegen kein Zusammenhang nachweisbar. Es gibt Indizien, die für einen entgegengesetzten Trend sprechen, für eine gesicherte Aussage sind allerdings zu wenig Werte vorhanden. Im Vergleich dazu ist für den gesamten Zeitraum der kommunalen Versuche, inklusive des genannten Zeitraumes und darüber hinaus bis zum Erreichen einer Raumbelastung von

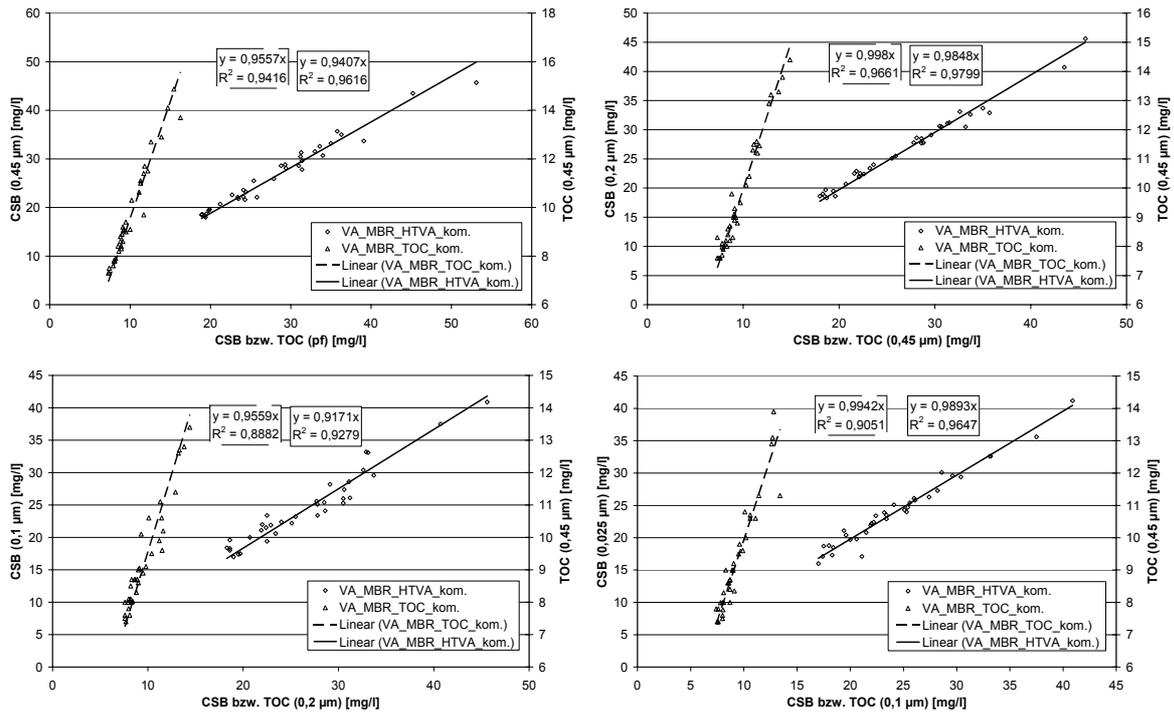
2 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d) infolge der Behandlung von BDF-Abwasser ein Ansteigen der CSB-Konzentrationen im Belebtschlamm mit dem oTS-Gehalt feststellbar (Abbildung 6.42).

Der überwiegende Teil der membranfiltrierten Belebtschlämme (0,45 µm) besteht zu mindestens 80 % aus Substanzen mit einer Größe von weniger als 0,025 µm (Abbildung 6.43). Die 0,45 µm-Fraktion ist weitgehend identisch mit der 0,2 µm-Fraktion, die 0,1 µm-Fraktion weitgehend mit der 0,025 µm-Fraktion. Die Unterschiede zwischen der Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen sind auf die verschiedenen Bestimmungsmethoden und deren spezifische Fehler zurückzuführen. Die CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Fraktionen aus Membranbelebungs- und konventioneller Belebungsanlage verhalten sich linear zueinander (Abbildung 6.44). Ein Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC konnte weder für die HTVA noch für die Membranbelebungsanlage nachgewiesen werden.

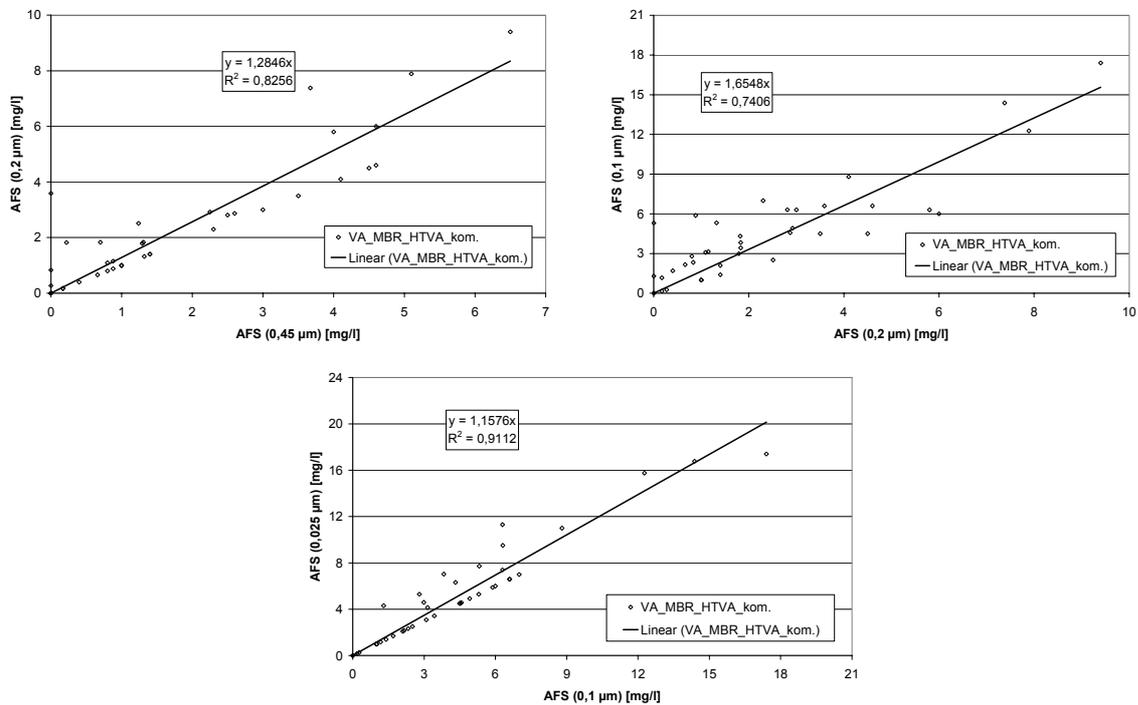


**Abbildung 6.43: Relative Verteilung der CSB- und TOC-Fractionen im Belebtschlamm**

Ein Zusammenhang zwischen den AFS aufeinander folgender Fraktionen ist nachweisbar (Abbildung 6.45); eine Korrelation zwischen den partikulären organischen Anteilen aufgrund der geringen Konzentrationsunterschiede dagegen nicht.



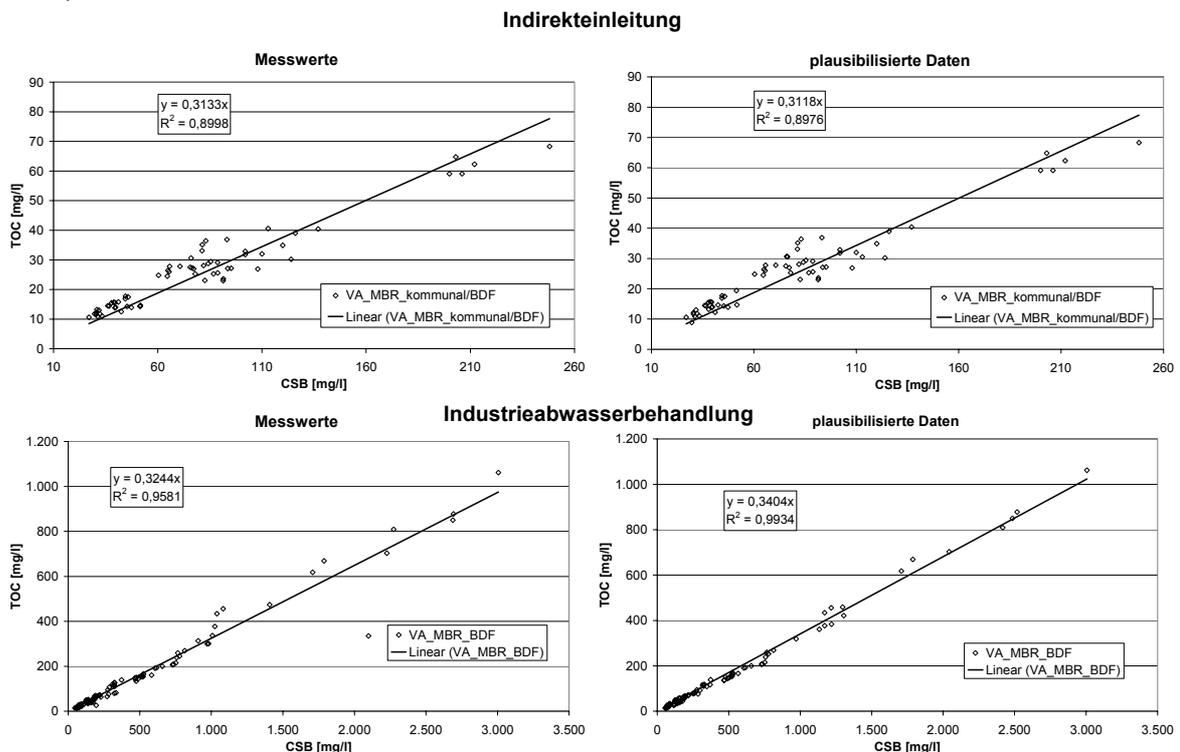
**Abbildung 6.44: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen (Membrananlage und HTVA)**



**Abbildung 6.45: Änderung der AFS-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen (Membrananlage und HTVA)**

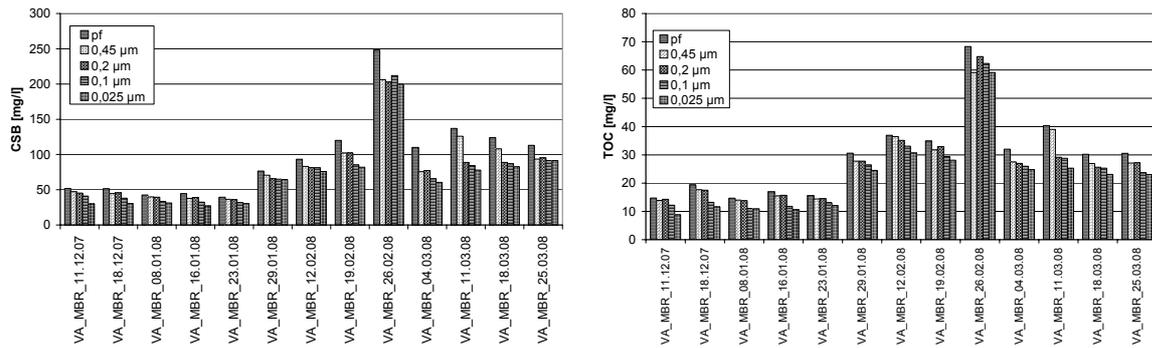
### 6.3.2 Fraktionierung des Belebtschlammes aus der Membranbelebungsanlage während der Behandlung von BDF-Abwasser

Das TOC/CSB-Verhältnis der Proben während der Untersuchung der Auswirkungen der Indirekteinleitung von BDF-Abwasser ( $B_{R,BDF} \leq 1 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ) auf eine kommunale Kläranlage liegt bei 0,31 ( $\text{CSB}/\text{TOC} = 3,2$ ). Im Vergleich dazu beträgt das TOC/CSB-Verhältnis des Belebtschlammes während der Industrieabwasserbehandlung 0,34 ( $\text{CSB}/\text{TOC} = 2,9$ ,  $B_{R,BDF} > 1 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ) (Abbildung 6.46).

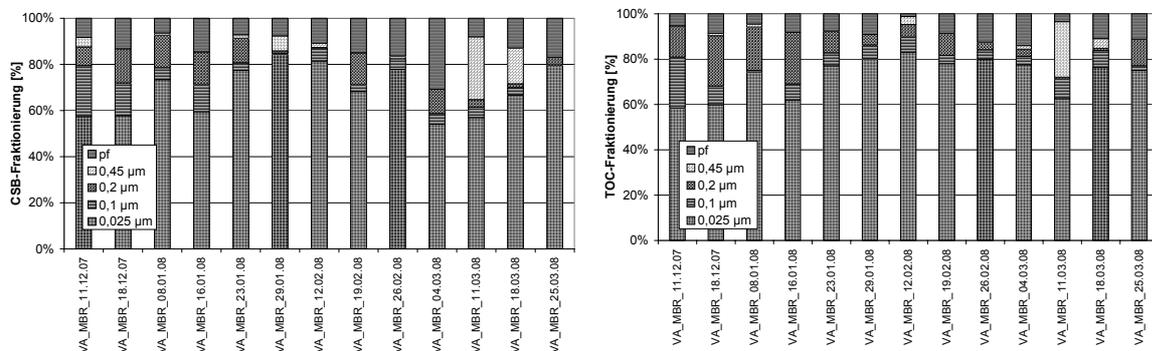


**Abbildung 6.46: TOC/CSB-Verhältnis des fraktionierten Belebtschlammes während der Behandlung von BDF-Abwasser**

Die CSB- und TOC-Fractionen des filtrierten Belebtschlammes während der Indirekteinleiterversuche unterliegen einem teils ausgeprägten Verlauf, dessen Differenz beim Vergleich der  $0,45 \mu\text{m}$ - mit der  $0,025 \mu\text{m}$ -Fraktion zwischen  $2 \text{ mg CSB/l}$  und  $48 \text{ mg CSB/l}$  liegt (Abbildung 6.47). Dies entspricht mit Ausnahme der Fraktionierungen 06/08 in etwa auch den Differenzen bei Raumbelastungen  $> 1,0 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ . Infolge des vergleichsweise großen Schwankungsbereiches ist die relative Zusammensetzung der Proben ungleich verteilt (Abbildung 6.48).



**Abbildung 6.47: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes während der Behandlung von BDF-Abwasser (Raumbelastung  $\leq 1,0$  kg CSB/(m<sup>3</sup>·d))**

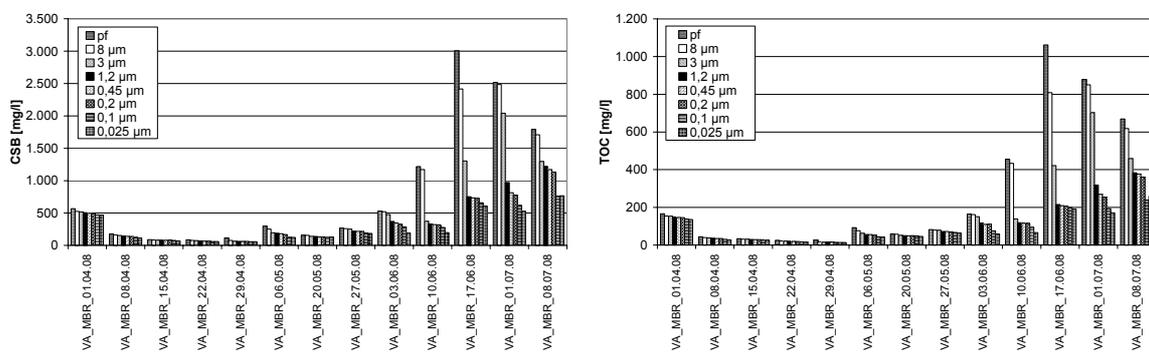


**Abbildung 6.48: Relative Zusammensetzung des Belebtschlammes während der Behandlung von BDF-Abwasser (Bezug: papierfiltrierte Probe,  $B_R \leq 1,0$  kg CSB/(m<sup>3</sup>·d))**

Die Raumbelastung lag bis 24.03.08 konstant bei rd. 1 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d). Die Konzentrationen im filtrierten Belebtschlamm nahmen infolge des steigenden oTS-Gehaltes zu und stabilisierten sich bei rd. 100 mg CSB/l (Abbildung 6.47). Der überproportionale Anstieg der Konzentrationen im Belebtschlamm am 26.02.08 beruht darauf, dass es infolge eines technischen Defektes zum Ausfall der Sauerstoffversorgung der Anlage für etwa 24 h kam. Eine Woche später lagen die Konzentrationen wieder auf dem Niveau der Wochen vor dem Ausfall. Die Permeatkonzentration verdoppelte sich am 26.20.08 auf 50 mg CSB/l, am 28.02.08 lag sie wieder bei < 25 mg CSB/l.

Vom 25.03.08 auf den 01.04.08 kam es zu einer Steigerung der Konzentrationen im filtrierten Belebtschlamm von 100 mg CSB/l auf 580 mg CSB/l (Abbildung 6.49). Die Sauerstoffversorgung war in diesem Zeitraum gewährleistet, allerdings wurde die Raumbelastung eine Woche zuvor auf 1,5 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d) erhöht. Daraufhin sank der pH-Wert auf bis zu 5,5. Durch Dosierung von Kalkmilch und Na-

triumhydrogencarbonat wurde der pH-Wert auf  $> 7$  angehoben, trotzdem kam es in der folgenden Woche zu pH-Wert-Schankungen von 6,4...7,0, die erst durch die Installation einer NaOH-Dosiereinrichtung behoben wurden. Infolge der z. T. geringen pH-Werte wurde die Flockenstruktur des Schlammes geschädigt; die Permeatkonzentrationen stiegen auf bis zu 180 mg CSB/l. Die Schädigung des Schlammes und die gleichzeitige Steigerung der Raumbelastung um 10 % wöchentlich führte dazu, dass die Eliminationsleistung der Anlage erst nach drei Wochen vollständig hergestellt war. Die Permeatkonzentrationen sanken sukzessive von 180 mg CSB/l über 70 mg CSB/l und 50 mg CSB/l auf 35 mg CSB/l.

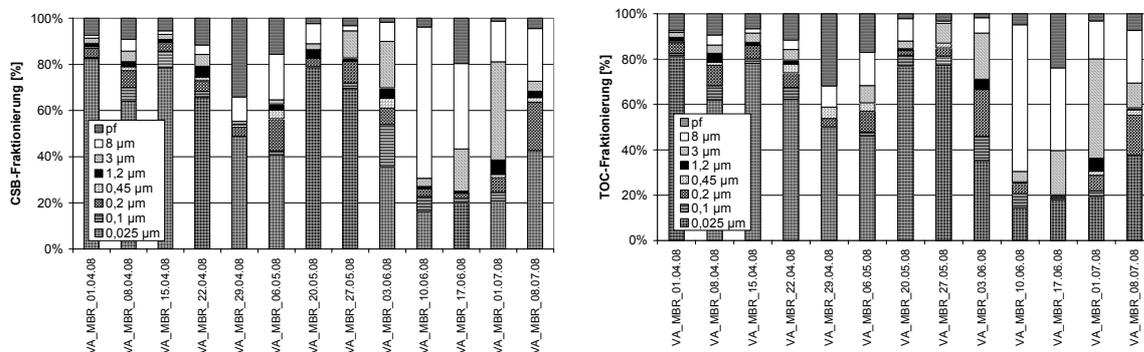


**Abbildung 6.49: CSB- und TOC-Fraktionierung des Belebtschlammes während der Behandlung von BDF-Abwasser (Raumbelastung  $> 1,0$  kg CSB/(m<sup>3</sup>·d))**

Die Fraktionierung der Proben im Juni'08 zeigt sehr hohe Konzentrationen, vor allem in den größeren Fraktionen bis 1,2 µm (Abbildung 6.49, Abbildung 6.50). Ab 06/08 konnte der zum Abbau erforderliche Sauerstoffbedarf nicht mehr gedeckt werden (vgl. Abschnitt 6.1.2). Trotz des Sauerstoffeintrages (Luftvolumenstrom: 100 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)) traten zeitweise anaerobe Bedingungen im Schlamm auf, die durch Ausstrippen von Schwefelwasserstoff gekennzeichnet waren. Die Beschickung mit BDF-Abwasser wurde am 25.06.08 unterbrochen und ab 02.07.08 für eine Woche wieder aufgenommen, nachdem der Sauerstoffgehalt in der Anlage über 2 mg O<sub>2</sub>/l gestiegen war. Unabhängig davon lagen die CSB- und TOC-Konzentrationen des filtrierten Belebtschlammes deutlich über den bis Anfang 06/08 gemessenen Werten. Es fällt auf, dass zunächst die Konzentrationen aller Fraktionen mit Ausnahme der papierfiltrierten steigen. In der letzten Probe sinken die Fraktionen  $> 1,2$  µm, während alle anderen wiederum steigen. Dies deutet einerseits darauf hin, dass es zum Abbau partikulärer Substanzen kommt, deren Abbauprodukte in

die kleineren Fraktionen verschoben werden, und andererseits, dass aufgrund des Konzentrationsanstiegs in den Fraktionen  $< 1,2 \mu\text{m}$  davon auszugehen ist, dass der Abbau nicht vollständig erfolgt.

Die Ursache für den Anstieg der partikulären Substanzen liegt primär im Flockenzerfall, der auch nach Erreichen von Sauerstoffkonzentrationen  $> 2 \text{ mg/l}$ , zu diesem Zeitpunkt allerdings aufgrund von Substratmangel, nicht gestoppt wurde. Im Permeat waren bis etwa einen Monat nach Ende der BDF-Abwasserzufuhr leicht abbaubare Substanzen enthalten ( $\text{BSB}_5$ ); der CSB fiel etwa 0,5 Monate später unter  $100 \text{ mg CSB/l}$ .



**Abbildung 6.50: Relative Zusammensetzung des Belebtschlamm während der Behandlung von BDF-Abwasser (Bezug: papierfiltrierte Probe,  $B_R > 1,0 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ )**

Mit dem Zerfall von Teilen des Belebtschlamm wurden Zellbestandteile freigesetzt, u. a. N- und P-Verbindungen. Während TKN- und  $P_{\text{ges}}$ -Gehalt des homogenisierten Belebtschlamm sanken, stieg die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration auf bis zu  $380 \text{ mg/l}$ , während die  $\text{oPO}_4\text{-P}$ -Konzentration auf hohem Niveau ( $110 \dots 120 \text{ mg/l}$ ) stagnierte. Mit Einsetzen der Nitrifikation, die im Rahmen der Atmungsmessung ab 10.07.08 nachgewiesen wurde, sank die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Permeat innerhalb von 2 Wochen auf  $< 2 \text{ mg/l}$ . Im Gegensatz dazu lagen die Orthophosphat-Konzentrationen bei rd.  $40 \text{ mg/l}$ , da der einzige Weg zu deren Reduzierung die Ausschleusung mit dem Permeat darstellte (Bio-P wurde durch eine kontinuierliche Belüftung unterbunden). Flockenzerfall betrifft insbesondere die Fraktionen oberhalb  $1,2 \mu\text{m}$  durch die Erhöhung der partikulären Anteile. Infolgedessen ist die Streuung in diesen Bereichen beim Vergleich der CSB-, TOC- und AFS-Konzentrationen größer, als in den Fraktionen  $< 1,2 \mu\text{m}$  (Abbildung 6.51, Abbildung 6.52).

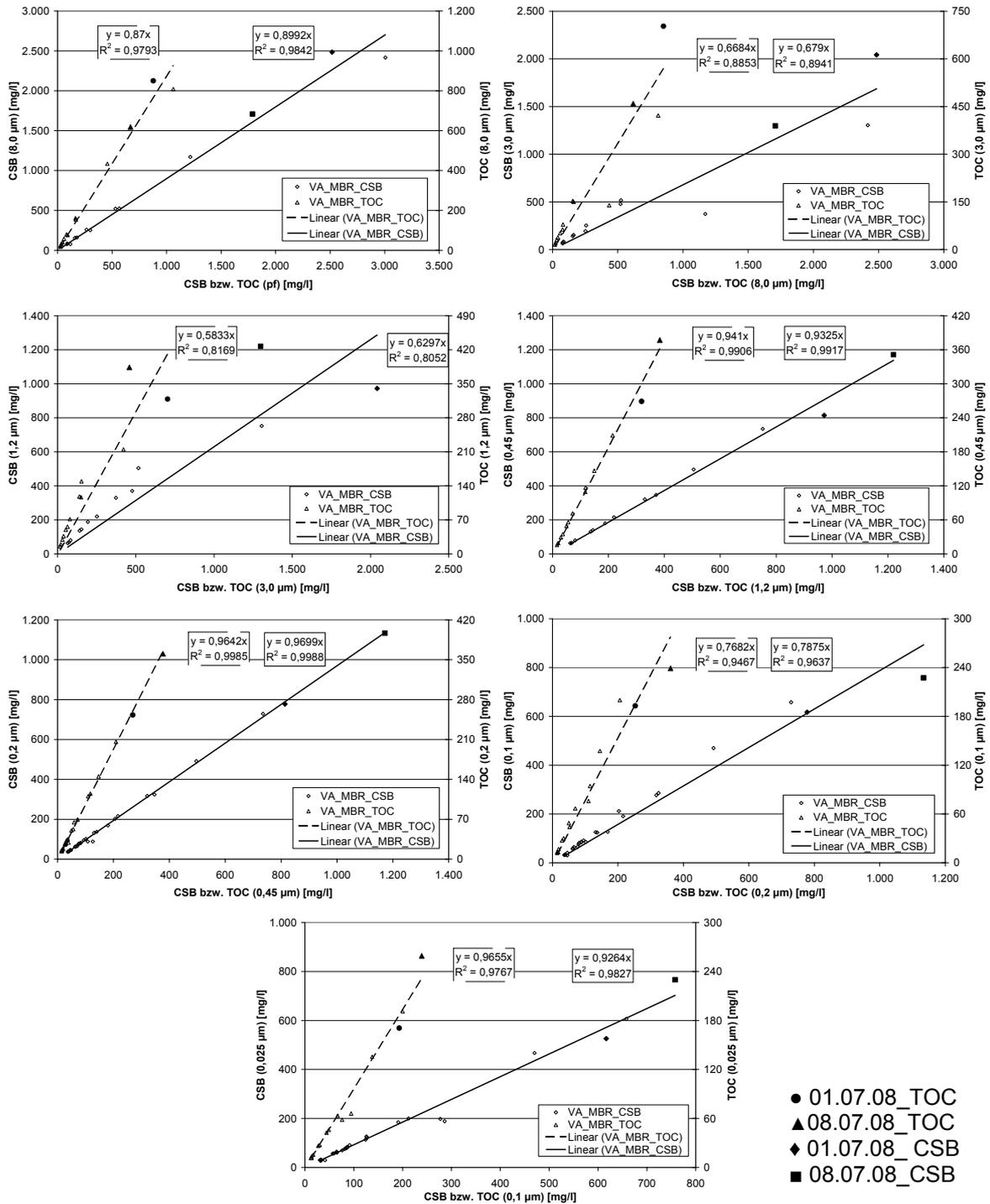
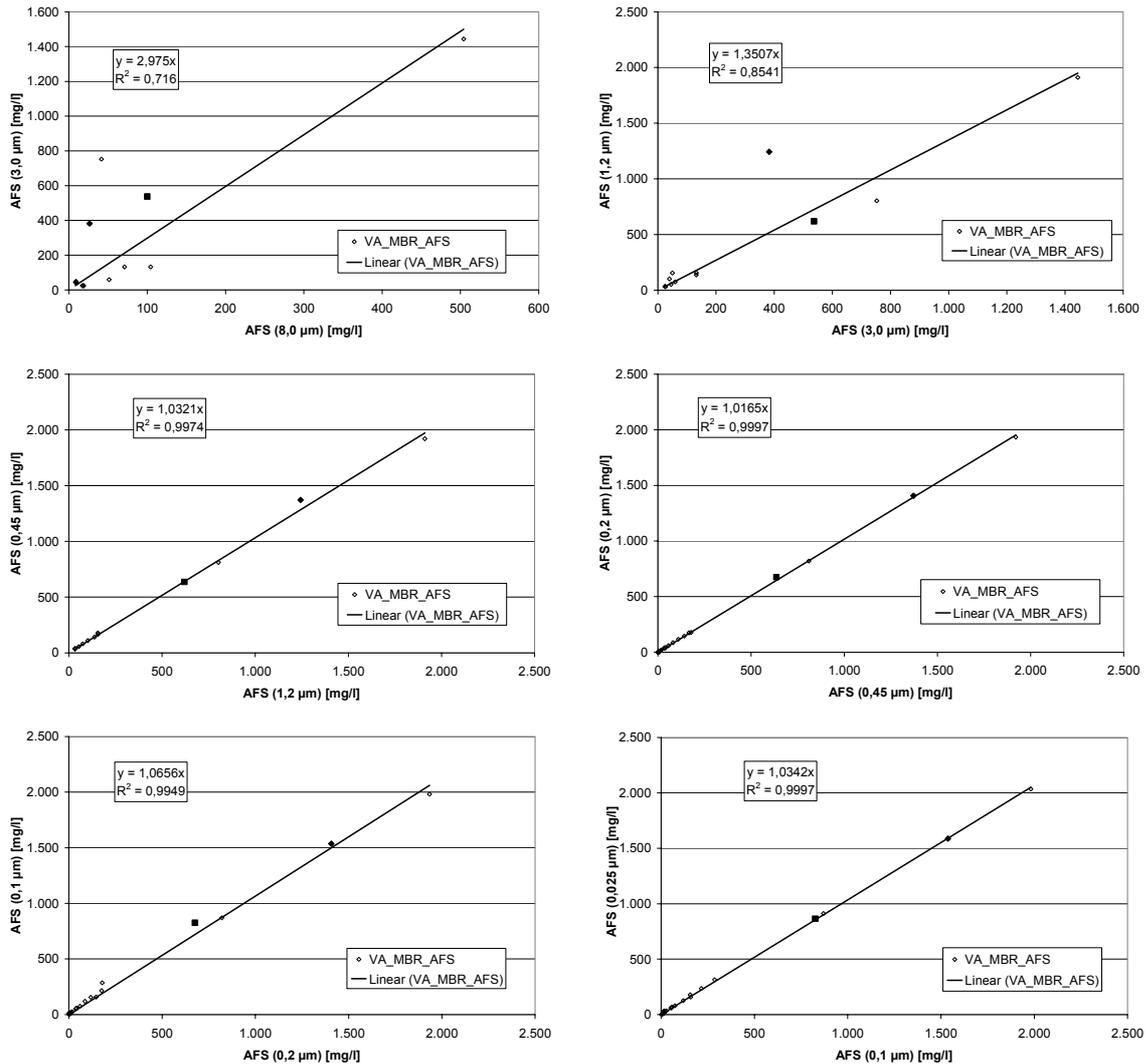
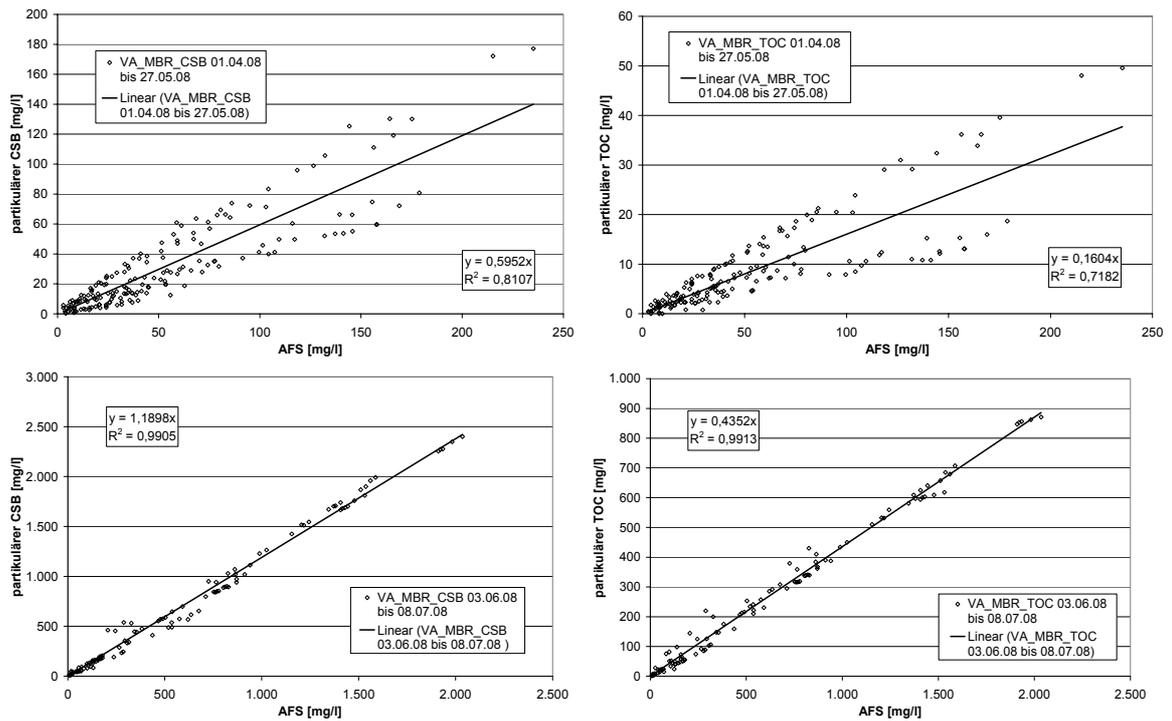


Abbildung 6.51: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen während der Behandlung von BDF-Abwasser (ab 04.12.07)



**Abbildung 6.52: Änderung der CSB- und TOC-Konzentrationen aufeinander folgender Belebtschlammfraktionen während der Behandlung von BDF-Abwasser (ab 04.12.07, ♦ 01.07.08, ■ 08.07.08)**

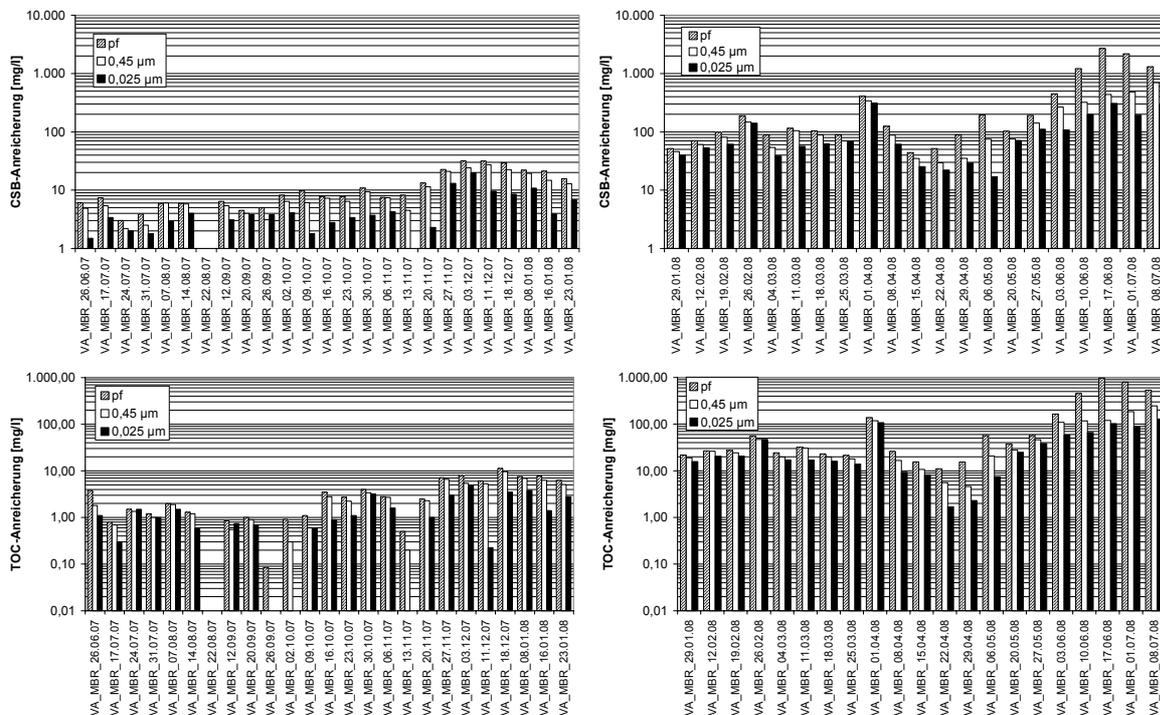
Ein Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC konnte für die Einzelproben nachgewiesen werden. Ein allgemeiner Trend ist mit Ausnahme für die fünf letzten Proben nicht ableitbar (Abbildung 6.53).



**Abbildung 6.53: Zusammenhang zwischen AFS und partikulärem CSB bzw. partikulärem TOC im Belebtschlamm während der Behandlung von BDF-Abwasser ( $B_R > 1,0 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ )**

## 6.4 Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen

Während der Versuche mit kommunalem Abwasser war die Anreicherung hochmolekularer Substanzen als Differenz zwischen dem CSB bzw. TOC der Belebtschlammfraktionen und denen des Permeats gering ausgeprägt. In Abhängigkeit der Belebtschlammfraktionen lag die mittlere Anreicherung im Zeitraum vom 26.06.07 bis 03.12.08 bei 4,5...9,3 mg CSB/l bzw. 1,5...2,5 mg TOC/l (Abbildung 6.54). Eine Differenz zwischen der 0,025 µm-Fraktion des Belebtschlammes und dem Permeat ist teilweise nicht nachweisbar, d. h. in diesen Fällen konnte die Deckschicht der Membran mit 0,025 µm bestimmt werden. Ein sichtbarer Einfluss der Membranreinigung auf den Verlauf der Anreicherung bestand nicht.

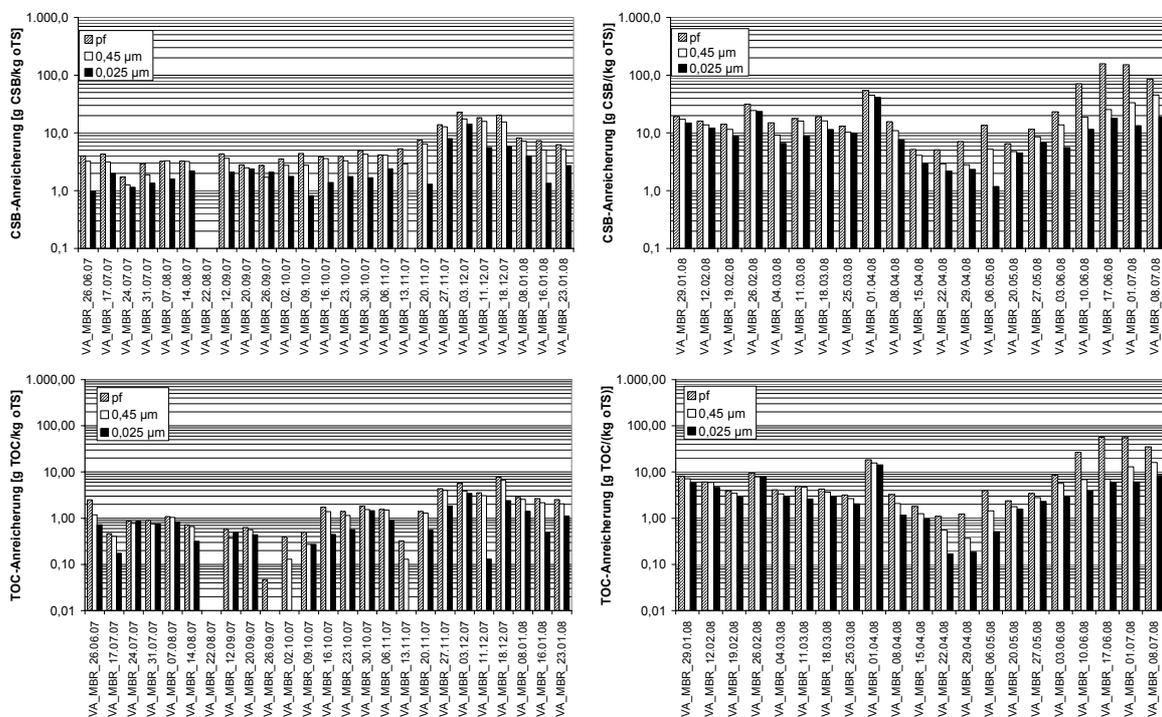


**Abbildung 6.54: CSB- und TOC-Anreicherung der Belebtschlammfraktionen**

Infolge des Anstiegs der Konzentrationen der Belebtschlammfraktionen Anfang 12/07 (vgl. Abschnitt 6.3.1) bei gleichbleibenden Permeatkonzentrationen trat ein Anstieg der Anreicherung auf 20...32 mg CSB/l ein, der in den folgenden Wochen bestehen blieb und sich erst im Januar rückläufig verhielt. Danach ist ein deutlicher Anstieg der absoluten Anreicherung (mg/l) im Zuge des oTS-Wachstums durch die gesteigerte Dosierung des BDF-Abwassers und infolge von Betriebsstörungen (vgl. Abschnitt 6.3.2) zu verzeichnen.

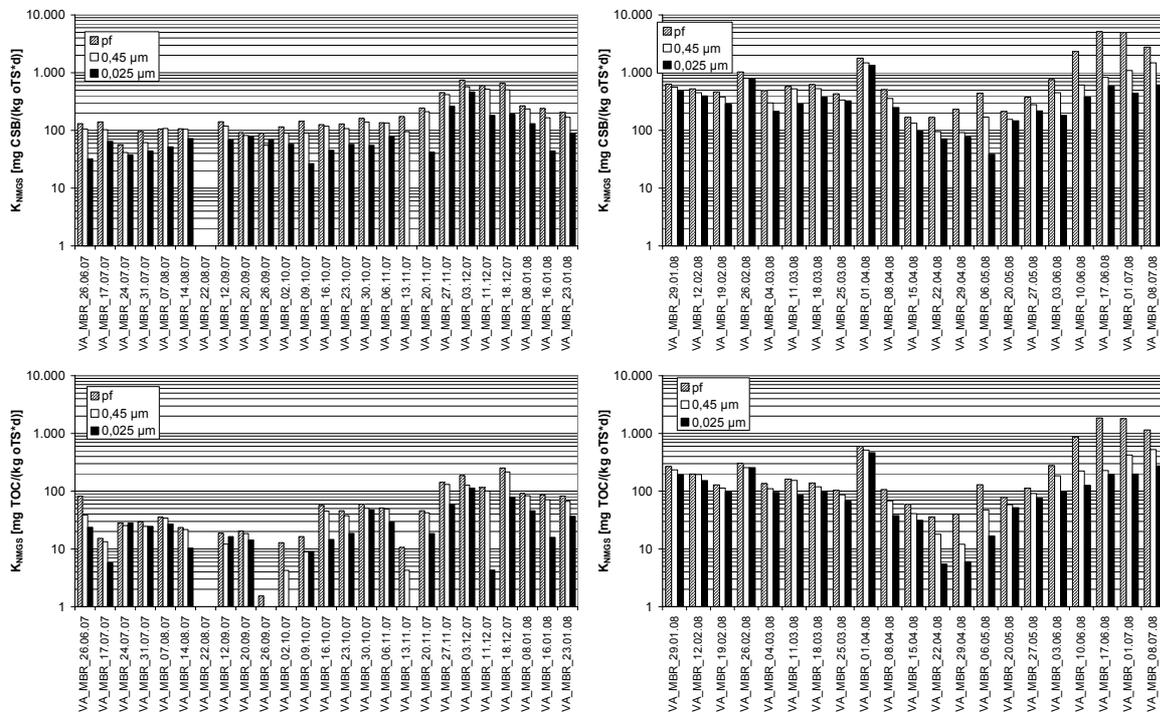
Beim Vergleich der oTS-spezifischen Anreicherung und der spezifischen Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen ( $K_{NMGS}$ ) (Abbildung 6.55, Abbildung 6.56) ist erkennbar, dass eine Grundanreicherung im Bereich von  $< 5$  g CSB/kg oTS, entsprechend einer spezifischen Bildungsrate von 100...200 mg CSB/(kg oTS·d) vorhanden ist, die infolge von Änderungen der Betriebsbedingungen (z. B. pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Raumbelastung) auf über das Zehnfache steigen kann. Die Grundanreicherung ist während der Beschickung mit kommunalem Abwasser (i. M. 2,8 g TS/l,  $B_R = 0,2...0,6$  kg CSB/( $m^3 \cdot d$ ),  $B_{TS} = 0,05...0,2$  kg CSB/(kg TS·d)) und während der Beschickung mit BDF-Abwasser vom 15.04.08...29.04.08 ( $TS = 10...20$  g/l,  $B_R = 2,0...4,0$  kg CSB/( $m^3 \cdot d$ ),  $B_{TS} = 0,2...0,3$  kg CSB/(kg TS·d)) nachweisbar. In diesen Zeiträumen herrschten einerseits optimale Betriebsbedingungen (Sauerstoffversorgung), andererseits war die Übergangsphase zur Adaptierung des Belebtschlammms an das BDF-Abwasser abgeschlossen.

Die Grundanreicherung wird offensichtlich vom Belebtschlamm hervorgerufen und ist permanent vorhanden. Eine betrieblich bedingte Anreicherung hochmolekularer Substanzen kann dagegen reversibel sein, allerdings sehr hohe Werte annehmen.

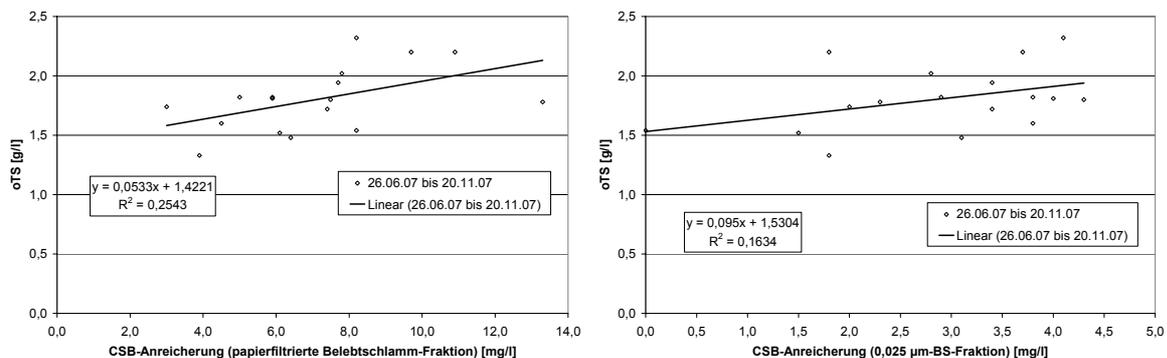


**Abbildung 6.55: Spezifische Anreicherung in Abhängigkeit des oTS-Gehaltes und den Belebtschlammfraktionen**

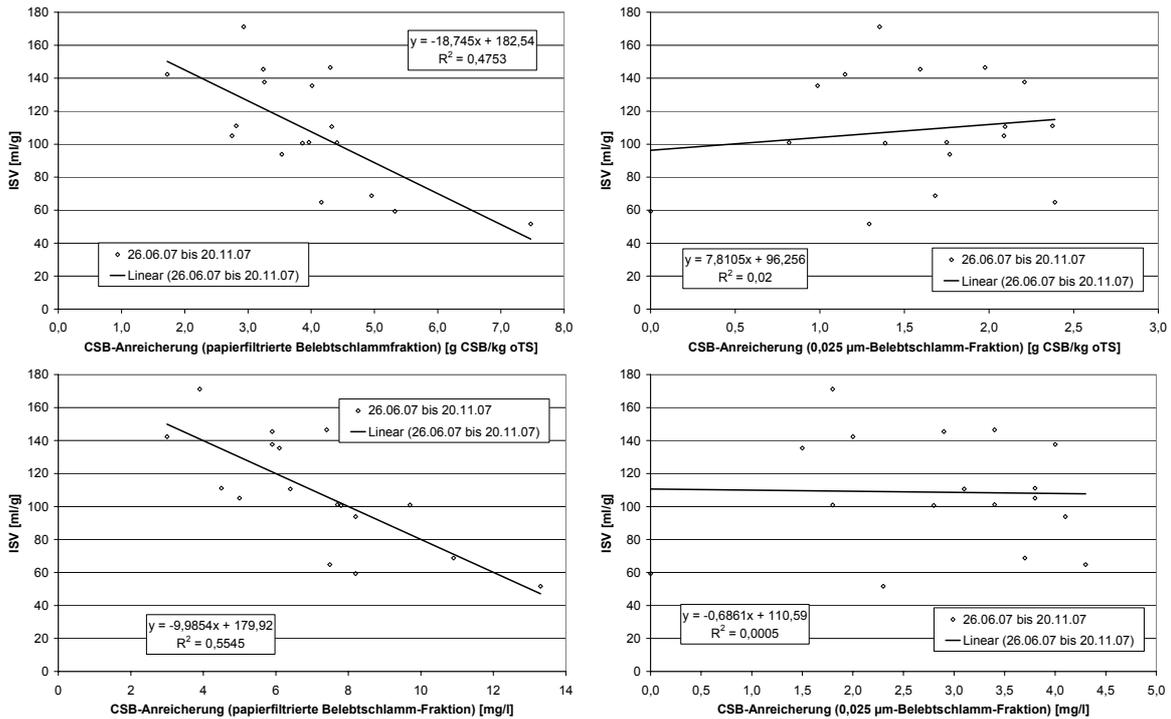
Für die Zeit der Versuche mit kommunalem Abwasser lag keine Korrelation zwischen Anreicherung und oTS-Gehalt vor (Abbildung 6.57), was darauf zurückzuführen ist, dass der TS- bzw. oTS-Gehalt vergleichsweise stabil war. Es gibt Hinweise, dass eine Korrelation mit dem ISV besteht (Abbildung 6.58). Der Zusammenhang ist schwächer als bei der Korrelation der Belebtschlammfraktionen mit dem ISV (vgl. Abschnitt 6.3.1) und ausschließlich für die Fraktionen oberhalb 0,2 µm feststellbar. Der maßgebende Grund besteht darin, dass die Anreicherung als Differenz zwischen Belebtschlammfraktion und Permeat ermittelt wird. Da die 0,1 µm- und 0,025 µm-Fraktion des Belebtschlamms in etwa den Permeatkonzentrationen entsprechen, ist eine Korrelation ausgeschlossen.



**Abbildung 6.56:** Spezifische Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in Abhängigkeit der Belebtschlammfraktionen

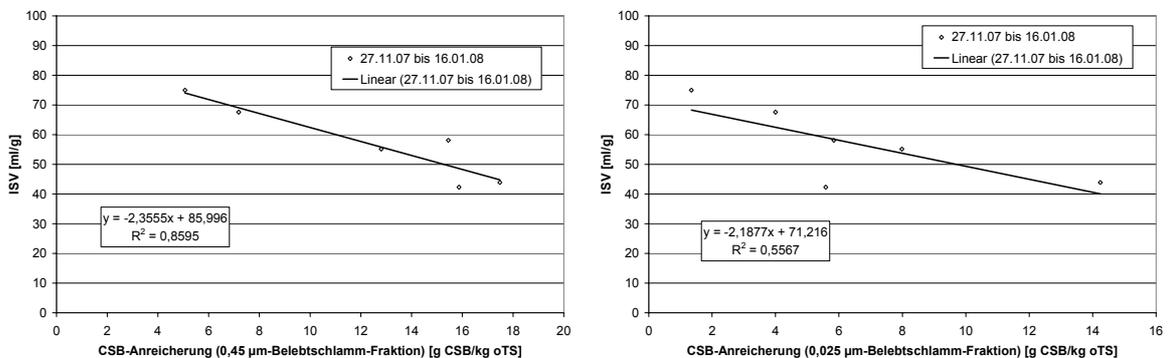


**Abbildung 6.57:** Korrelation zwischen oTS-Gehalt und angereichertem CSB während der Versuche mit kommunalem Abwasser

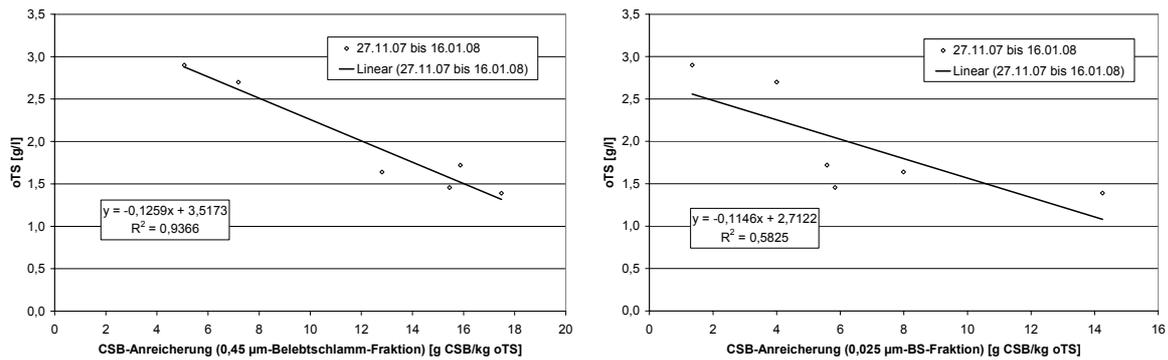


**Abbildung 6.58: Korrelation zwischen ISV und angereichertem CSB während der Versuche mit kommunalem Abwasser**

Im Zeitraum der über die Grundanreicherung hinausgehenden CSB- bzw. TOC-Anreicherung ab Ende 11/07 bis Mitte 01/08 besteht ein Zusammenhang einerseits mit dem ISV, andererseits mit dem oTS-Gehalt (Abbildung 6.59, Abbildung 6.60). Die gefundenen Korrelationen beschreiben in erster Linie den Rückgang der Anreicherung. Der Zusammenhang mit dem oTS-Gehalt zeigt zunächst eine zunehmende Anreicherung mit fallendem oTS. Da aber der TS-Gehalt real zunahm, kann gefolgert werden, dass die angereicherten Substanzen abgebaut wurden.

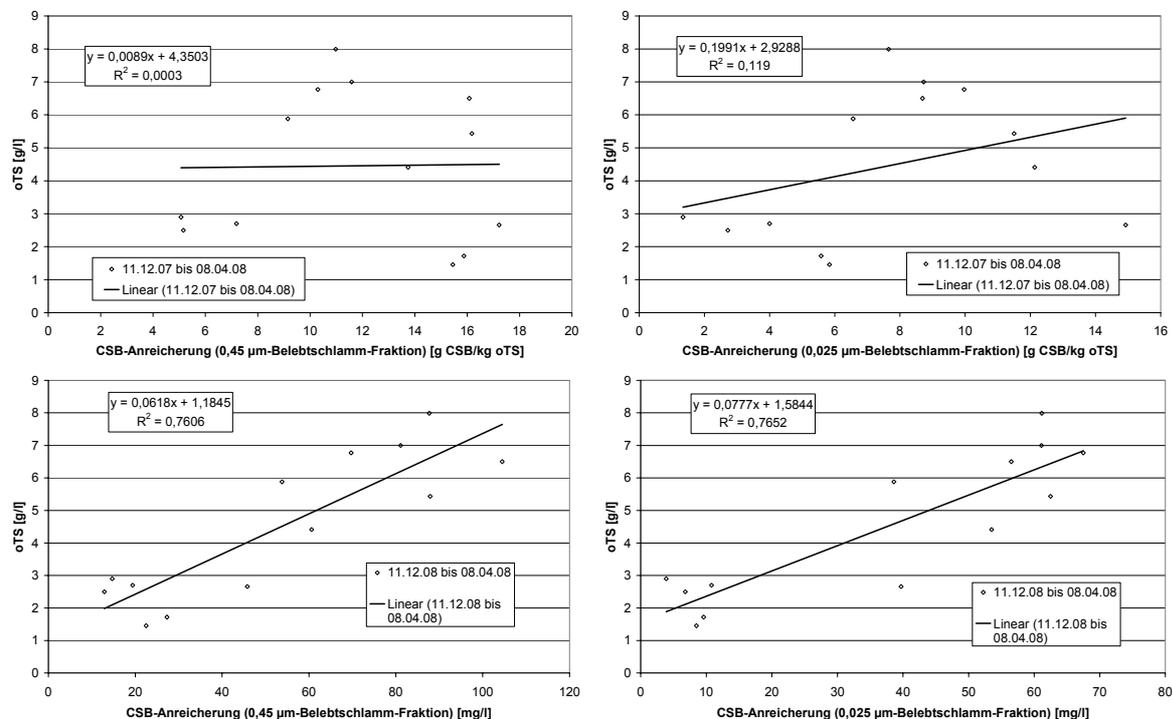


**Abbildung 6.59: Korrelation zwischen ISV und angereichertem CSB im Zeitraum 11/08 bis 01/08**



**Abbildung 6.60: Korrelation zwischen oTS-Gehalt und angereichertem CSB im Zeitraum 11/08 bis 01/08**

Für den Zeitraum der BDF-Abwasserbehandlung konnte nachgewiesen werden, dass mit zunehmenden oTS-Gehalt eine Zunahme der Konzentration der angereicherten organischen Substanzen eintritt (Abbildung 6.61). Eine Korrelation mit der spezifischen Anreicherung besteht dagegen nicht. Die spezifische Anreicherung ist damit unabhängig vom oTS-Gehalt. Die Korrelationen werden davon beeinflusst, dass Betriebsstörungen auftraten (vgl. Abschnitt 6.3.2) und, dass im Zeitraum 11/07 bis 01/08 eine reversible Anreicherung auftrat.



**Abbildung 6.61: Korrelation zwischen oTS-Gehalt und angereichertem CSB im Zeitraum der BDF-Abwasserbehandlung**

## 6.5 Einfluss der Dosierung von Fällmitteln auf die Anreicherung hochmolekularer Substanzen

Der Einfluss der Dosierung von Fällmitteln auf die Anreicherung von hochmolekularen Substanzen wurde in zwei Versuchsreihen untersucht. Die Versuchsreihe 1 (vgl. *Rentzsch, 2008*) wurde bei einer Raumbelastung von 1 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d) durchgeführt. Der TS-Gehalt der Belebtschlammprobe (24 h-Mischprobe) lag bei 8,8 g/l, der oTS-Gehalt bei 82 % TS (T = 17,2...17,4°C). Vor Beginn der Untersuchung wurden die optimalen Dosiermengen zur Flockung mit Eisen-III-Chloridsulfat-Lösung (4,1 %), Calciumhydroxidlösung (0,1 %) und einem Polymer (PK 99, 0,1 %) ermittelt. Die Flockungsmittel wurden in jeweils eine Belebtschlammprobe (1 l) dosiert und parallel zu einer unbehandelten Vergleichsprobe in einem Reihenrührwerk für 15 Sekunden bei 200 min<sup>-1</sup> eingemischt und für 45 s bei 60 min<sup>-1</sup> gerührt. Nach einer Sedimentationsphase von 30 min wurde jeweils eine Probe des Klarwassers (50 ml) entnommen.

Beim Vergleich der papierfiltrierten CSB-Konzentrationen der geflockten Proben mit der unbehandelten Probe zeigt sich nur bei der Flockung mit Eisen(III)-Chloridsulfat ein sichtbarer Rückgang der CSB-Konzentration im Überstand. Im Gegensatz dazu sind die membranfiltrierten (0,45 µm) CSB-Konzentrationen deutlich geringer als die der Vergleichsprobe.

**Tabelle 6.6: Einfluss von Flockungsmitteln auf den Nachweis der Anreicherung hochmolekularer Substanzen (Versuchsreihe 1)**

Parameter	Einheit	Flockungsmittel			Vergleichsprobe
		Eisen(III)-Chloridsulfat (4,1 %)	Calciumhydroxid (0,1 %)	PK 99 (Polymer) (0,1 %)	
Dosiermenge	[ml/l]	2,7	65	5	-
CSB <sub>papierfiltriert</sub>	[mg/l]	74	117	111	110
CSB <sub>mf, 0,45 µm</sub>	[mg/l]	65	51	53	81

Eine zweite Versuchsreihe wurde am Ende der Versuche zum Abbau von BDF-Abwasser vorgenommen (TS = 17,7 g/l, oTS = 90 % TS). Dabei wurde die Wirkung verschiedener Dosiermengen von Eisen(II)-chlorid (30 %) und einem Polymer (PK 99, 0,5 %) untersucht. Die Vorgehensweise erfolgte analog zur ersten

Versuchsreihe. Im mit Polymer behandelten Belebtschlamm bildeten sich große voluminöse Flocken ( $d = 5 \text{ mm}$ ), die sich allerdings nicht absetzten. Die Dosierung von Eisen(II)-chlorid führte zur Bildung von kleinen aufschwimmenden Flocken. Die unbehandelte Vergleichsprobe wies einen membranfiltrierten TOC ( $0,45 \text{ }\mu\text{m}$ ) von  $498 \text{ mg TOC/l}$  im Vergleich zur unfiltrierten Probe von  $2.230 \text{ mg TOC/l}$  auf. Infolge der Dosierung von PK 99 und Eisen(II)-chlorid kam es in Abhängigkeit der Dosiermenge zur Reduzierung des membranfiltrierten TOC-Konzentration um bis zu  $45 \%$  (Tabelle 6.7). Die Wirkung beider Fällmittel ist im Hinblick auf die membranfiltrierten Konzentrationen in etwa gleich, im Hinblick die unfiltrierten Werte zeigen sich deutliche Unterschiede.

**Tabelle 6.7: Einfluss von Flockungsmitteln auf den Nachweis der Anreicherung hochmolekularer Substanzen (Versuchsreihe 2)**

dosiertes Volumen	Eisen(II)-chlorid		PK 99	
	unfiltriertes Klarwasser	membranfiltriert ( $0,45 \text{ }\mu\text{m}$ )	unfiltriertes Klarwasser	membranfiltriert ( $0,45 \text{ }\mu\text{m}$ )
[ml/l]	[mg TOC/l]	[mg TOC/l]	[mg TOC/l]	[mg TOC/l]
20	1.449	397	2.530	470
40	1.077	434	2.288	452
60	979	386	2.312	436
80	787	364	1.250	351
100	464	272	555	270

Infolge der Dosierung von Flockungs- bzw. Fällmitteln werden im Klarwasser enthaltene Substanzen gebunden und ausgefällt bzw. ausgeflockt. Das Ausmaß der Anreicherung im filtrierten Belebtschlamm geht damit zurück. Unabhängig davon sind die angereicherten Substanzen immer noch Bestandteil des Belebtschlammes und damit in der Membranbelebungsanlage vorhanden. Die Überführung in eine sedimentierbare Form ändert nichts daran, dass die Ausschleusung mit dem Überschussschlamm erfolgt und eine Verlagerung auf andere Kläranlagen möglich ist (externe Schlammbehandlung). Fäll- und Flockungsmittel wirken sich in erster Linie auf den Nachweis hochmolekularer Substanzen aus, insofern sie einer Reaktion mit dem Einsatzstoff zugänglich sind.

Um Belebtschlämme verschiedener Kläranlagen miteinander vergleichen zu können, ist es sinnvoll, bestimmte Anforderungen an den Nachweis der Anreicherung

hochmolekularer Substanzen zu stellen. Eine wesentliche Forderung besteht in der Entnahme einer ungestörten Probe, d. h. ohne Einfluss von Fällungs- und Flockungsmitteln, was allerdings bei Kläranlagen aufgrund der erforderlichen längeren Unterbrechung der Dosierung einen erheblichen betrieblichen Eingriff darstellen würde, der in der Praxis nicht zu realisieren ist und sich somit auf Versuchsanlagen beschränkt.

## 7 Zusammenfassung

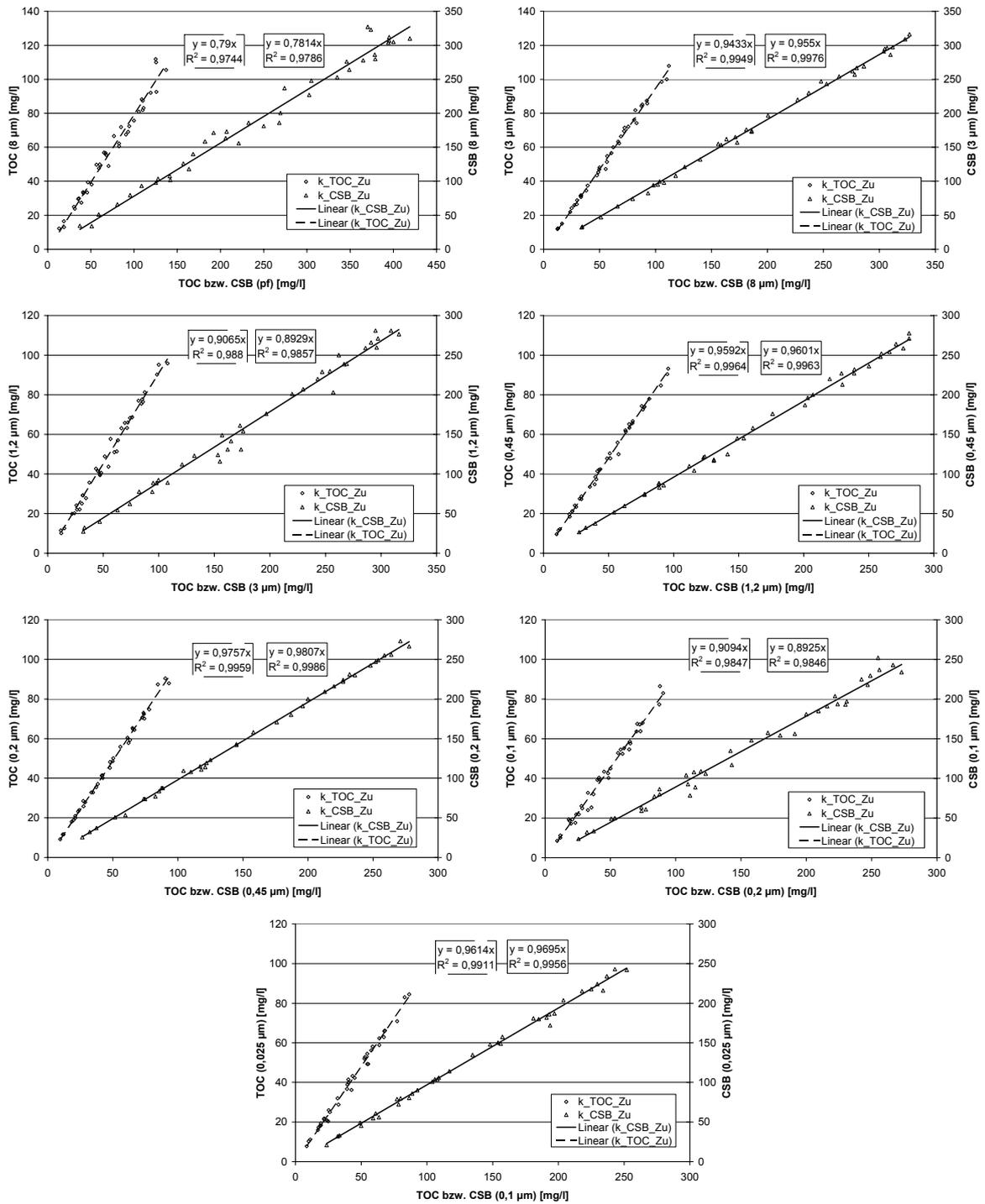
Ziel des Forschungsvorhabens war es, mit Hilfe eines Screenings an großtechnisch realisierten kommunalen und an mit gewerblichem bzw. industriellem Abwasser beschickten Kläranlagen festzustellen, ob die Anreicherung schwer abbaubarer hochmolekularer organischer Substanzen ein spezifisches Problem von Membranbelebungsanlagen darstellt, ob es an bestimmte Bedingungen geknüpft ist und, ob eine Verlagerung dieser Substanzen auf andere Kläranlagen stattfinden kann.

Das Screening erfolgte mit jeweils 5 Beprobungen in Abstand von zwei Monaten an fünf kommunalen Kläranlagen und vier Betriebskläranlagen verschiedener Konfiguration in Verfahrensführung und eingesetzter Membrantechnik (Plattenmembranen, Hohlfasermembranen, Porengröße: 0,04...0,4  $\mu\text{m}$ ). Parallel dazu wurden halbtechnische Versuche mit kommunalem Abwasser der KA Dresden-Kaditz und Industrieabwasser aus der Biodieselproduktion im Technikum des Instituts für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft der TU Dresden durchgeführt.

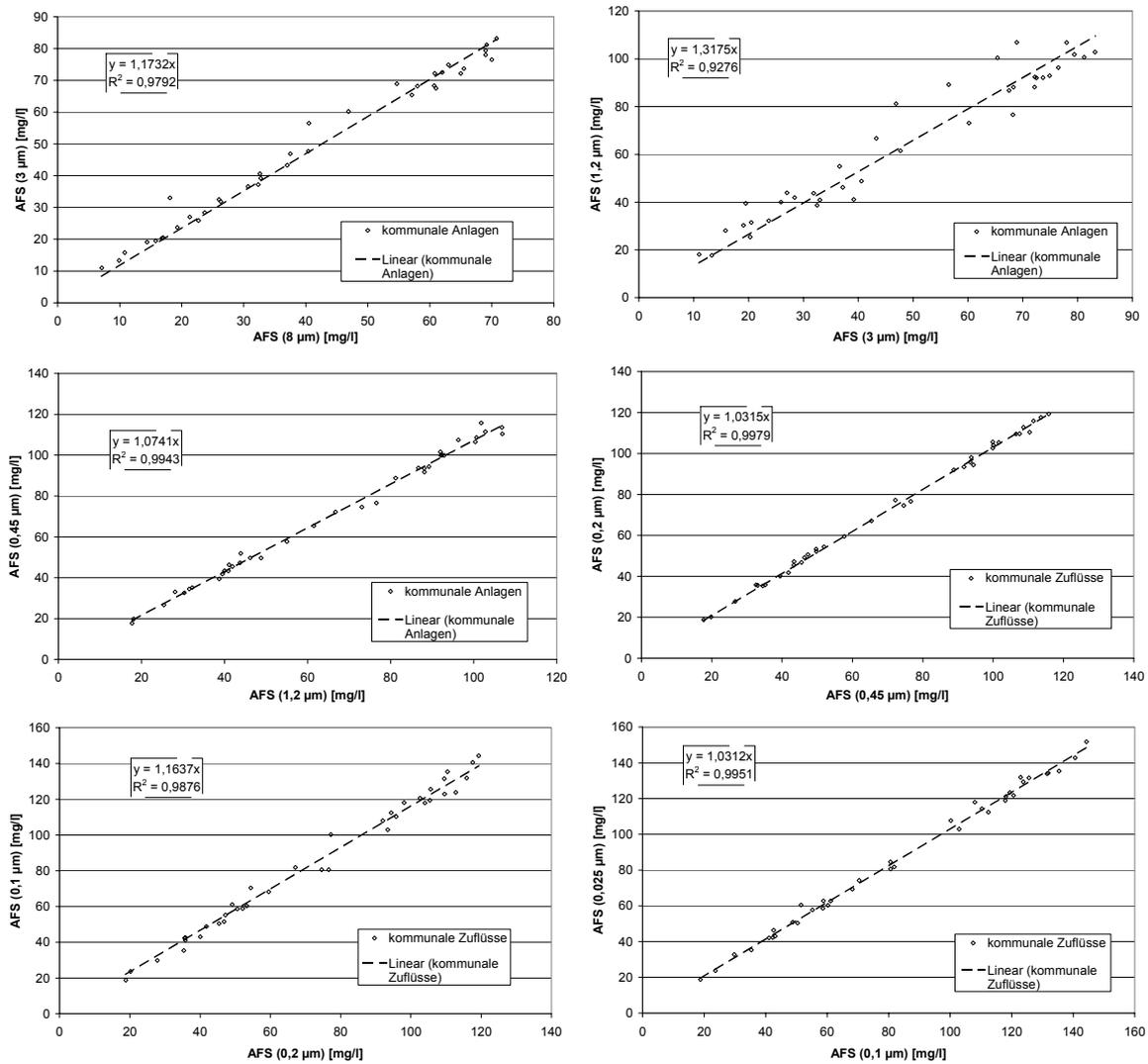
Zur Bestimmung der Anreicherung hochmolekularer Substanzen wurde die Partikelgröße der Belebtschlämme mit Hilfe verschiedener Membranfilter fraktioniert (im Regelfall: 0,45  $\mu\text{m}$ , 0,2  $\mu\text{m}$ , 0,1  $\mu\text{m}$ , 0,025  $\mu\text{m}$ ) und mit den Permeatkonzentrationen verglichen. Darüber hinaus wurde die Fraktionierung (8  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 1,2  $\mu\text{m}$ , 0,45  $\mu\text{m}$ , 0,2  $\mu\text{m}$ , 0,1  $\mu\text{m}$ , 0,025  $\mu\text{m}$ ) an den Zuflüssen zu den biologischen Stufen und an ggf. anfallendem Prozesswasser vorgenommen.

Es wurde festgestellt, dass die fraktionierten kommunalen Zuflüsse der untersuchten Kläranlagen sowie die Zuflüsse zur halbtechnischen Versuchsanlage in ihrer Beschaffenheit sowohl beim CSB bzw. TOC als auch bei den AFS übereinstimmende Eigenschaften aufweisen (Abbildung 7.1, Abbildung 7.2). Unabhängig von der Größe des entwässerten Gebietes und der Art der Kanalisation wurde nachgewiesen, dass die Fraktionierung kommunalen Abwassers von der Verdünnung mit Fremdwasser abhängt. Unterschiede ergaben sich beim organischen Anteil der AFS, der u. a. jahreszeitlich bedingten Schwankungen ausgesetzt ist (Abbildung 7.3). Das CSB/TOC-Verhältnis der kommunalen Zuflüsse lag in guter Übereinstimmung bei 3,3 (Abbildung 7.4), das der Industrieabwässer bei i. M. 3,0.

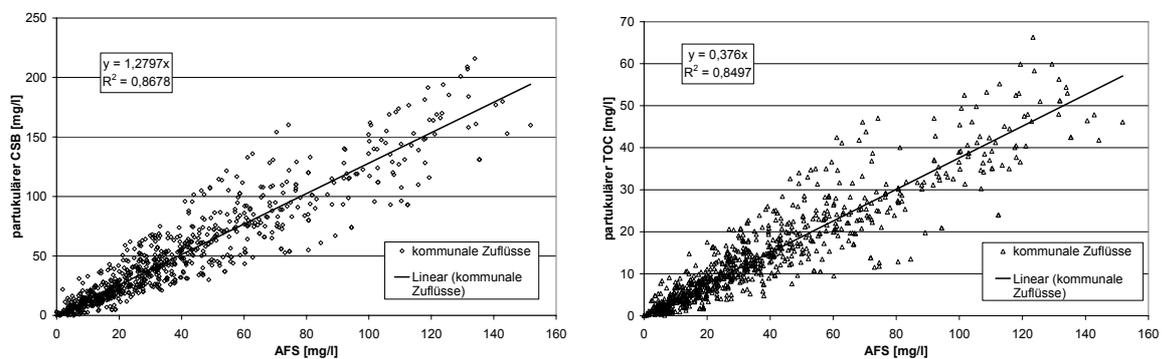
Für die Industriekläranlagen konnte keine verallgemeinerbare Fraktionierung bestimmt werden, da es sich einerseits um Betriebe verschiedener Industrie- und Gewerbebereiche handelt, andererseits die Abwasserbeschaffenheit in den einzelnen Betrieben produktionsbedingten Schwankungen unterworfen ist.



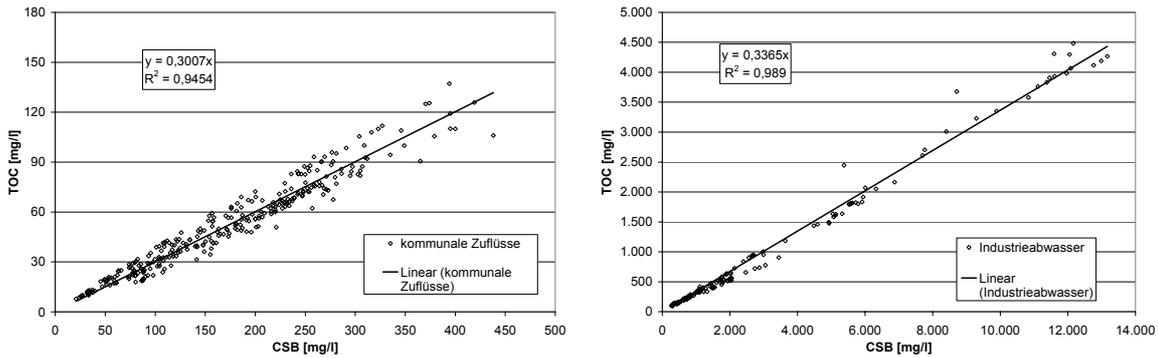
**Abbildung 7.1: Änderung von CSB und TOC zwischen zwei Fraktionen während der Fraktionierung der Zuflüsse von sechs kommunalen Kläranlagen**



**Abbildung 7.2:** Änderung der AFS zwischen zwei Fraktionen während der Fraktionierung der Zuflüsse von sechs kommunalen Kläranlagen

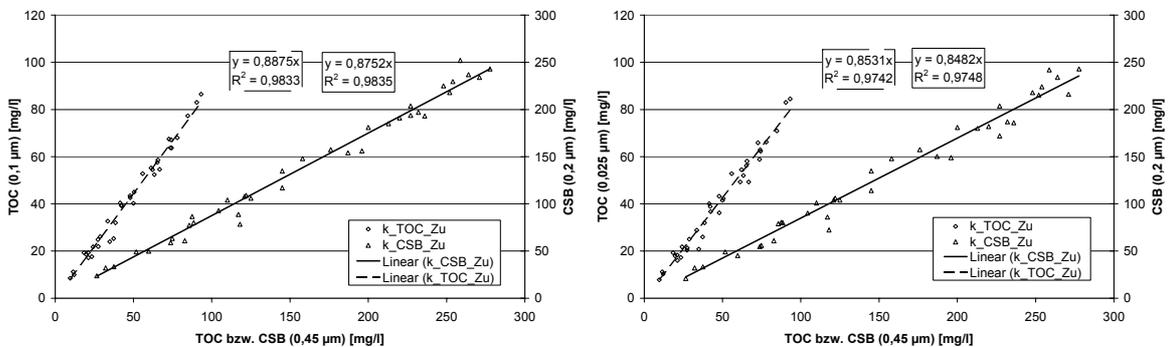


**Abbildung 7.3:** partikulärer CSB bzw. TOC als organischer Anteil der partikulären Substanzen der Zuflüsse von sechs kommunalen Kläranlagen



**Abbildung 7.4: TOC/CSB-Verhältnis der fraktionierten Zuflüsse von sechs kommunalen Kläranlagen und vier Industriekläranlagen**

Im Vergleich zu den nach der Filtration über 0,45 µm gemessenen CSB- und TOC-Konzentrationen wird durch die Filtration über 0,1 µm eine Reduzierung des CSB und TOC um 12 % bzw. 11 % erreicht, durch die Filtration über 0,025 µm eine Verringerung um 15 % (Abbildung 7.5), was durch Literaturangaben mit 10 % (0,1 µm) bestätigt wird [van Nieuwenhuijzen et al., 2004]. Es ist daher fraglich, ob nach der standardgemäßen Filtration über 0,45 µm tatsächlich der gelöste CSB vorliegt oder kolloidale Substanzen mit erfasst werden (vgl. van Nieuwenhuijzen et al., 2004).



**Abbildung 7.5: Verringerung von CSB und TOC zwischen 0,45 µm- und 0,1 µm- bzw. 0,025 µm-Fraktion**

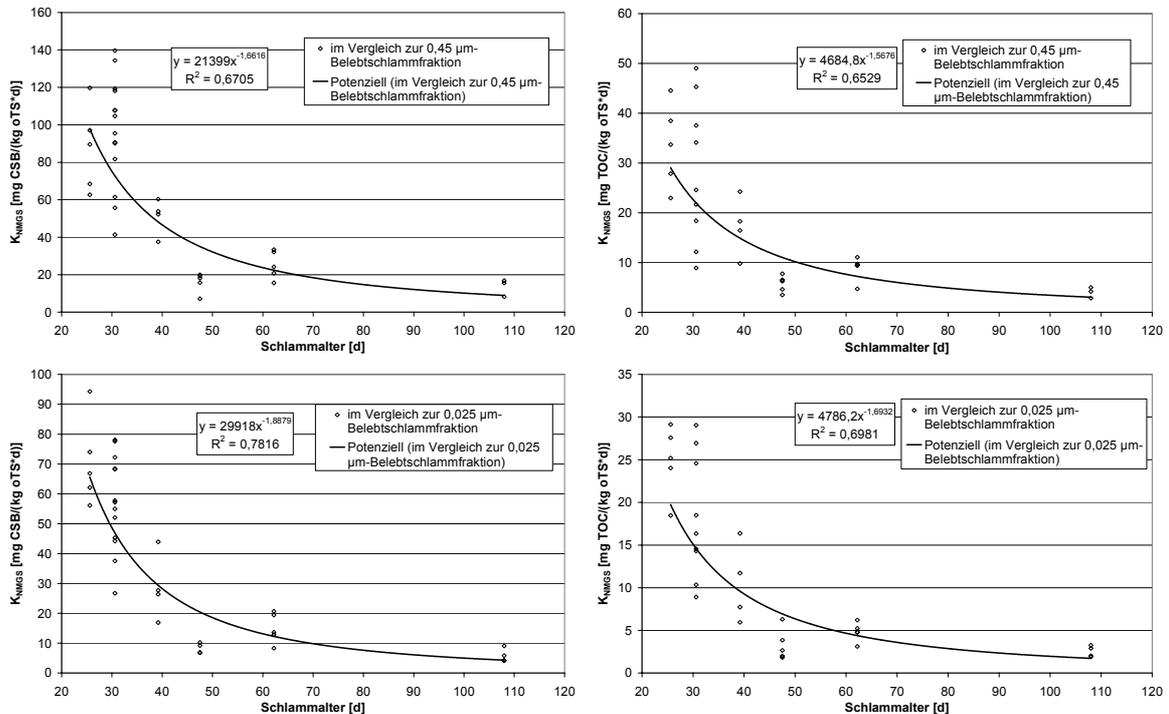
Mit Hilfe der Belebtschlammfraktionierung können Änderungen in der Schlammbeschaffenheit festgestellt werden. Insbesondere Betriebsstörungen (niedrige pH-Werte, Sauerstoffunterversorgung), aber auch Substratmangel führen dazu, dass sich Konzentrationen einzelner Fraktionen im Vergleich zum Regelfall verschieben und vom Gesamtzusammenhang abweichen. Um derartige Störungen identifizieren zu können, bedarf es einer mehrfachen Beprobung. Darüber hinaus kann sich der Einsatz von Flockungsmitteln auf den Nachweis der Anreicherung auswirken.

Während der Versuche an einer halbertechnischen Membranbelebungsanlage konnte eine permanent vorhandene Grundanreicherung identifiziert werden und eine darüber hinaus gehende reversible Anreicherung, die auf Änderungen in der Schlammbeschaffenheit zurückzuführen ist. Die betriebliche Anreicherung zeigt einen Zusammenhang mit dem ISV. Aufgrund des hohen Schlammvolumens von Membranbelebungsanlagen ist eine Prüfung der Korrelation an Praxisanlagen nur bedingt möglich.

Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen in kommunalen Kläranlagen ist im Regelfall gering ausgeprägt. Bei Gegenüberstellung der an den verschiedenen großtechnischen kommunalen Anlagen und der Versuchsanlage ermittelten Werten ist ein fallender Trend zwischen Schlammalter und der Bildungsrate der nicht membrangängigen Substanzen ( $K_{\text{NMGS}}$ ) zu erkennen (Abbildung 7.6), der auch in der Literatur beschrieben wird [Zhang und Yamamoto, 1996; Huang et al., 2000; Jinsong et al., 2006; Massé et al., 2006]. Obwohl mit Zunahme des Schlammalters weniger Überschussschlamm abgezogen wird, ist der Anteil der angereicherten Substanzen geringer als bei niedrigeren Schlammaltern. Es ist anzunehmen, dass ein Teil der angereicherten Substanzen bei höheren Schlammaltern abgebaut wird. Dabei ist bekannt, dass der CSB in Kläranlagenabläufen nicht dem tatsächlich inerten, aus dem zufließenden Abwasser stammenden CSB, entspricht, sondern auch Substanzen enthält, die biologisch langsam abbaubar sind und z. T. von den Mikroorganismen des Belebtschlammes gebildet wurden [Metcalf & Eddy, 1972; Grady et al., 1972; Gaudy und Blachly, 1985; Namkung und Rittmann, 1986; Barker und Stucky, Pribyl et al., 1997; 1999; Jarusutthirak und Amy, 2007]. Insofern stellt die Erhöhung des Schlammalters eine Möglichkeit zur Verringerung der angereicherten Substanzen dar. Eine Verallgemeinerung dieser Aussage ist derzeit nicht möglich, da in der Literatur auch über gegenteilige Beobachtungen berichtet wird [Pribyl et al., 1997; Hasar et al., 2004].

Bei der Darstellung in Abbildung 7.6 wurde mit dem mittleren Schlammalter der Anlagen gerechnet, Änderungen des Schlammalters zwischen den Probenahmen bleiben damit unberücksichtigt. Unabhängig davon ist auch bei einem relativ konstanten Schlammalter (Versuchsanlage,  $t_{\text{TS}} = 31$  d), unter Vernachlässigung der betrieblichen Anreicherung, eine breite Streuung der Werte zu erkennen, was in Übereinstimmung zu Ergebnissen aus einer Langzeituntersuchung an der KA

Nordkanal von *Lyko et al. (2007)* steht. Möglicherweise spielen in diesem Zusammenhang Veränderungen der Biomasse eine Rolle (vgl. Abschnitte 6.1.1, 6.3.1). Wechsel in der biologischen Beschaffenheit können ohne Beeinflussung der Reinigungsleistung jahreszeitlich bedingt auftreten [*Zhang und Yamamoto, 1996; Al-Halbouni et al., 2008*].



**Abbildung 7.6: Bildungsrate nicht membrangängiger Substanzen in kommunalen Kläranlagen in Abhängigkeit des Schlammalters als Vergleich zwischen 0,45 µm- bzw. 0,025 µm-Belebtschlammfraktion mit dem Permeat**

Literaturangaben zufolge (vgl. Abschnitt 2) werden die angereicherten Substanzen u. a. infolge der Aktivität des Belebtschlammes gebildet. Dies ist somit kein spezifisches Phänomen von Membranbelebungsanlagen, sondern trifft ebenso auf kommunale Belebtschlämme konventioneller Anlagen zu, bei denen allerdings keine Anreicherung aufgrund der fehlenden Barriere stattfindet. Insofern ist eine gesonderte Bewertung von kommunalen Membranbelebungsanlagen unter dem Aspekt der Anreicherung hochmolekularer Substanzen gegenwärtig nicht erforderlich, da die Zahl der konventionellen Anlagen, die der kommunalen Membrananlagen bei weitem überschreitet.

Die Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen führte, mit Ausnahme der Verringerung des Fluxes, zu keinen sichtbaren Auswirkungen im Anlagenbe-

trieb. Auswirkungen auf den Energiebedarf waren nicht nachvollziehbar, da die auf den Kläranlagen erfassten Daten den gemeinsamen Verbrauch verschiedener Aggregate enthielten.

Infolge der chemischen Membranreinigung wird einerseits die Permeabilität der Membran wieder hergestellt, andererseits kann die Ablaufqualität der Anlage durch das Ausschwemmen von angereicherten Substanzen durch die Verringerung der Deckschicht beeinträchtigt werden. Handelt es sich bei den angereicherten Substanzen um schwer abbaubare Stoffe, werden diese schwallartig an die Umwelt abgegeben. Unabhängig von der Art und Weise der Membranreinigungen lag die aktive Porenweite der Membranen an allen untersuchten Kläranlagen unterhalb von  $0,025 \mu\text{m}$ .

Da in den kommunalen Kläranlagen die Anreicherung nicht stetig steigt, ist davon auszugehen, dass im Regelfall ein Gleichgewicht zwischen Anreicherung im Belebungsbecken und Ausschleusung mit dem Überschussschlamm herrscht. Ein Teil wird mit dem Prozesswasser im Kreislauf geführt, der Rest mit dem entsorgten Überschussschlamm ausgeschleust. Der eingedickte ÜSS der kommunalen Kläranlagen K2, K3 und K5 wurde auf den umliegenden Kläranlagen behandelt, der aus den Anlagen K1 und K4 vor Ort. Die Menge des angereicherten und ausgeschleusten CSB der Anlagen K2, K3 und K5 lässt sich näherungsweise mit dem Mittelwert der spezifischen Anreicherung ( $\text{g CSB/kg oTS}$ ) und dem Mittelwert des oTS der betreffenden Anlage sowie dem entsorgten Überschussschlamm bestimmen. Der prozentuale Anteil am gelösten CSB der Zulauffracht ist mit weniger als 1 % vernachlässigbar. Die Gelöst-Zulauffracht wurde vereinfachend aus dem Mittelwert der gemessenen  $\text{CSB}_{\text{mf}}$ -Konzentrationen und dem Jahreszufluss berechnet.

**Tabelle 7.1: Verlagerung angereicherter hochmolekularer Substanzen aus kommunalen Kläranlagen der 0,45 µm- und der 0,025 µm-Fraktion mit dem entsorgten ÜSS auf andere Kläranlagen zur Schlammbehandlung**

Anlage	CSB <sub>mf</sub> -Zulauf	mit ÜSS ausgeschleuster CSB		Anteil des ausgeschleusten CSB am CSB <sub>ZB, mf</sub>	
	CSB <sub>ZB, mf</sub>	CSB <sub>AUS, 0,45 µm</sub>	CSB <sub>AUS, 0,025 µm</sub>	CSB <sub>AUS, 0,45 µm</sub>	CSB <sub>AUS, 0,025 µm</sub>
	[t/a]	[kg/a]	[kg/a]	[%]	[%]
K2	139	62	28	0,04	0,02
K3	85	96	57	0,11	0,07
K5	1,7	1,8	0,6	0,11	0,03

In Kläranlagen mit gewerblichem oder industriellem Zufluss kann die Anreicherung durch die Zuflussbeschaffenheit beeinflusst werden. Die Behandlung hoch partikulärer Abwässer (Anlagen I3 und I4) trat in Verbindung mit ebenso hoch partikulären Belebtschlämmen auf. Es ist anzunehmen, dass eingeleitete schwer abbaubare partikuläre Substanzen durch die Membran im Belebtschlamm physikalisch zurückgehalten werden. Die Anreicherung ist damit anlagenspezifisch und kann wesentlich höhere Werte als bei der Behandlung kommunaler Abwässer erreichen (Tabelle 7.2). Allerdings können sich hoch partikuläre Belebtschlämme auch infolge von Betriebsstörungen oder durch hohe organische Belastung bilden. Die Reinigung der Membranen kann wie bei kommunalen Kläranlagen zum Anstieg der Permeatkonzentrationen führen. Eine Permeatrückführung zur innerbetrieblichen Nutzung wurde, obwohl prinzipiell vorgesehen, nicht in allen Betrieben durchgeführt. Die Anforderungen an die Aufbereitung sind vom Nutzungszweck abhängig und reichen von direktem Permeateinsatz bis zur Behandlung durch Umkehrosmose.

**Tabelle 7.2: Anreicherung hochmolekularer organischer Substanzen in vier Industriekläranlagen**

Bez.	Branche	CSB-Anreicherung	
		min. [g CSB/kg oTS]	max. [g CSB/kg oTS]
Anlage I1	Großwäscherei	0,6	4,7
Anlage I2	Textilveredlung	4,7	20
Anlage I3	Kartoffelstärkeproduktion	24	150
Anlage I4	Bioabfallbehandlung	6	540

Eine Verlagerung angereicherter Substanzen auf andere Kläranlagen (Tabelle 7.3) ist bei den untersuchten Industrieanlagen nicht in jedem Fall möglich, da bei den Anlagen I3 und I4 die Belebtschlämme einer betriebsinternen Verwertung zugeführt werden. Der Schlamm der Anlage I2 wird durch einen Entsorgungsbetrieb abgefahren und nach Angaben des Betreibers zum Animpfen anderer Anlagen genutzt. Aus Anlage I1 ist seit Inbetriebnahme kein Schlamm entsorgt worden. Handelt es sich bei den angereicherten Substanzen um ökologisch bedenkliche Stoffe, was einer umfangreichen Einzelfallprüfung bedarf, und liegt keine innerbetriebliche Schlammverwertung vor, wäre nachzuweisen, dass die Entsorgung des Überschussschlammes zu keiner Beeinträchtigung der Umwelt führt.

**Tabelle 7.3: Verlagerung pzw. potentiell mögliche Verlagerung angereicherter hochmolekularer Substanzen aus Kläranlagen mit gewerblichem Zufluss der 0,45 µm- und der 0,025 µm-Fraktion mit dem entsorgten ÜSS auf andere Kläranlagen**

Anlage	CSB <sub>mf</sub> -Zulaufrecht	mit ÜSS ausgeschleuster CSB		Anteil des ausgeschleusten CSB am CSB <sub>ZB, mf</sub>	
	CSB <sub>ZB, mf</sub>	CSB <sub>AUS, 0,45 µm</sub>	CSB <sub>AUS, 0,025 µm</sub>	CSB <sub>AUS, 0,45 µm</sub>	CSB <sub>AUS, 0,025 µm</sub>
	[t/a]	[kg/a]	[kg/a]	[%]	[%]
I1	31,1	1,6	0,8	< 0,01	< 0,01
I2	32,2	6,3	3,5	0,02	0,01
I3*	118*	4.845*	2.568*	4,1*	2,2*

\*Anlage I3 ist ausschließlich zu Vergleichszwecken aufgeführt, da der ÜSS betriebsintern verwertet wird, so dass keine Ausschleusung aus dem Betrieb auf andere Kläranlagen erfolgt.

Die Behandlung von Abwasser aus der Biodieselproduktion in einer kommunalen Kläranlage ist bei vorhandener Kapazität unter Dosierung der erforderlichen Nährstoffe (N, P) ohne Beeinflussung der Ablaufwerte möglich. Die Abwasserbehandlung in einer Industriekläranlage erfordert zusätzlich die Zugabe von Spurenstoffen. In halbtechnischen Versuchen wurde eine technisch bedingte maximale Raumbelastung von 6 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d) erreicht. Die Permeatkonzentrationen lagen unter optimalen Betriebsbedingungen bei 40...80 mg CSB/l. Zur Sauerstoffversorgung ist die Nutzung von Reinsauerstoff vorteilhaft. Die Anreicherung hochmolekularer Substanzen war von den Betriebsbedingungen abhängig. Prinzipiell steigt absolut gesehen die Konzentration der angereicherten Substanzen mit steigendem oTS-Gehalt [vgl. auch Zhang und Yamamoto, 1996; Chipasa und Mędrzycka, 2004]. Bei Normierung der Konzentration auf den oTS-Gehalt ist bei optimalen

Betriebsbedingungen kein Unterschied zur an der Versuchsanlage im Zeitraum der kommunalen Versuche ermittelten Anreicherung erkennbar. Bei Störung des Reinigungsprozesses kann die Anreicherung, unabhängig von den Permeatkonzentrationen, vorübergehend das Zehnfache der unter Normalbedingungen auftretenden Werte erreichen.

## 8 Literatur

- Al-Halbouni D., Traber J., Lyko S., Wintgens T., Melin T., Tacke D., Janot A., Dott W., Hollender J. (2008). Correlation of EPS content in activated sludge at different sludge retention times with membrane fouling phenomena. *Water Research* **42** (6/7) 1475-1488.
- Barker D.J. und Stuckey D.C. (1999). A review of soluble microbial products in wastewater treatment systems. *Water Research* **33** (14) 3063-3082.
- Borchmann A. und Rosenwinkel K.H. (2008). Membraneinsatz bei der Reinigung industrieller Prozesswässer. Dresdner Kolloquium zur Industrierwasserwirtschaft, 09.10.2008. TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft. Dresdner Berichte, Band 30, 21-46.
- Britz T. und Janke H.D. (2004). Dezentrale Aufbereitung kommunaler Abwässer mittels Membranbelebungsanlagen. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Siedlungswasserwirtschaft. Schriftenreihe des ISWW, Band 118, 129-146.
- Buer T. (2004). Perspektiven für Membrantechnologie bei der Abwasserreinigung. RWTH Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft. GWA Gewässerschutz Wasser Abwasser, Band 195, 1/1-1/8.
- Chipasa K.B. und Mędrzycka K. (2004). Adaptive response of microbial communities to soluble microbial products. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* **31** (8) 384-390.
- Çiçek N., Franco J.P., Suidan M.T., Urbain V., Manem J. (1999). Characterization and comparison of a membrane bioreactor and a conventional activated-sludge system in the treatment of wastewater containing high-molecular-weight compounds. *Water Environment Research* **71** (1) 64-70.
- Çiçek N., Suidan M.T., Ginestet P., Audic J.-M. (2003). Impact of soluble organic compounds on permeate flux in an aerobic membrane bioreactor. *Environmental Technology* **24** (2) 249-256.
- Cornel P. (2002). Membranbelebungsverfahren zur Reinigung industrieller Abwässer. RWTH Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft. GWA Gewässerschutz Wasser Abwasser, Band 188/1, 34/1-34/11.

- Drews A., Mante J., Iversen V., Vocks M., Lesjean B., Kraume M. (2007). Impact of ambient conditions on SMP elimination and rejection in MBRs. *Water Research* **41** (17) 3850-3858.
- DWA (2005a). Membranbelevungsverfahren. 2. Arbeitsbericht, Fassung vom 19.01.2005. DWA-Fachausschuss KA-7. DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2005b). Aufbereitung von Industrieabwasser und Prozesswasser mit Membranverfahren und Membranbelevungsverfahren. DWA-Arbeitsbericht, Teil 4: aerobe Membranbelevungsverfahren. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Evenblij H. und van der Graf J.H.J.M. (2004). Occurrence of EPS in activated sludge from a membrane bioreactor treating municipal wastewater. *Water Science and Technology* **50** (12) 293-300.
- Flemming H.C. und Wingender J. (2001). Relevance of microbial extracellular polymeric substances (EPS) – Part I: Structural and ecological aspects. *Water Science and Technology* **43** (6) 1-8.
- Flemming H.C. und Wingender J. (2002). Was Biofilme zusammenhält. *Biologie in unserer Zeit* **36** (1) 30-42.
- Gaudy A.F. und Blachly T.R. (1985). A study of the biodegradability of residual COD. *Journal Water Pollution Control Federation* **57** (4) 332-338.
- Grady C.P.L., Harlow L.J., Riesing R.R. (1972). Effects of growth rate and influent substrate concentration on effluent quality from chemostats containing bacteria in pure and mixed culture. *Biotechnology and Bioengineering* **14** (3) 391-410.
- Greil K.H. (2003). Membranbelevungsverfahren – State-of-the-art. Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft. Wiener Mitteilungen, Band 183, 305-324.
- Hardt F.W., Young J.C., Clesceri L.S., Washington D.R. (1971). Ultrafiltration for the control of recycled solids in a biological system. *Environmental Science & Technology* **5** (4) 345-349.

- Hasar H., Kinaci C., Ünlü A. (2004). Production of non-biodegradable compounds based on biomass activity in a submerged ultrafiltration hollow fibre membrane bioreactor treating raw whey. *Process Biochemistry* **39** (11) 1631-1638.
- Holbrook R.D., Massie K.A., Novak J.T. (2005). A comparison of membrane bioreactor and conventional-activated-sludge mixed liquor and biosolids characteristics. *Water Environment Research* **77** (4) 323-330.
- Huang X., Liu R., Qian Y. (2000). Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor. *Process Biochemistry* **36** 401-406.
- Jarusutthirak C. und Amy G. (2007). Understanding soluble microbial products (SMP) as a component of effluent organic matter (EFOM). *Water Research* **41** (12) 2787-2793.
- Jinsong Z., Chuan C.H., Jiti Z., Fane A. G. (2006). Effect of sludge retention time on membrane bio-fouling intensity in a submerged membrane bioreactor. *Separation Science & Technology* **41** (7) 1313-1329.
- Kühn V., Tietze M., Schalk T., Krebs P. (2008). Labortechnische Untersuchungen zum aeroben Abbau von Abwasser aus der Biodieselproduktion. Abschlussbericht (unveröffentlicht). TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft.
- Laabs C., Amy G., Jekel M. (2004). Organic colloids and their influence on low-pressure membrane filtration. *Water Science & Technology* **50** (12) 311-316.
- Liang S., Liu C., Song L.F. (2007). Soluble microbial products in membrane bioreactor operation: Behaviors, characteristics, and fouling potential. *Water Research* **41** (1) 95-101.
- Lützner K., Ahnert M., Barth M., Dorschner K., Kühn V., Tietze M. (2002). Wissenschaftliche Begleitung des Betriebes der biologischen Abwasserreinigungsanlage einer TBA. Abschlussbericht zum Forschungsthema. TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft.
- Lyko S., Al-Halbouni D., Wintgens T., Janot A., Hollender J., Dott W., Melin T. (2007). Polymeric compounds in activated sludge supernatant – Characterisation and retention mechanisms at a full-scale municipal membrane bioreactor. *Water Research* **41** (17) 3894-3902.

- Massé A., Spérandio M., Cabassud C. (2006). Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time. *Water Research* **40** (12) 2405-2415.
- Metcalf & Eddy (1972). Wastewater engineering. Collection, treatment, disposal. Metcalf & Eddy, Inc. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Nagaoka H., Ueda S., Miya A. (1996). Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process. *Water Science & Technology* **34** (9) 165-172.
- Namkung E. und Rittmann B.E. (1986). Soluble microbial products (SMP) formation kinetics by biofilms. *Water Research* **20** (6) 795-806.
- Ng H.Y. und Hermanowicz S.W. (2005). Specific resistance to filtration of biomass from membrane bioreactor reactor and activated sludge: effects of exocellular polymeric substances and dispersed microorganisms. *Water Environment Research* **77** (2) 187-192.
- Pinnekamp J., Itokawa H., Thiemig C. (2006). Erfahrungen aus der Anwendung der Membrantechnologie in Europa. 20. Karlsruher Flockungstage. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung. Schriftenreihe SWW, Band 123, 75-87.
- Pribyl M., Tucek F., Wilderer P.A., Wanner J. (1997). Amount and nature of soluble refractory organics produced by activated sludge microorganisms in sequencing batch and continuous flow reactors. *Water Science and Technology* **35** (1) 27-34.
- Rentzsch P. (2008). Untersuchung der Anreicherung organischer Substanzen in einer mit kommunalem Abwasser betriebenen Membranbelebungsanlage unter Einfluss der Einleitung von Abwasser aus der Biodiesel-Produktion. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft.
- Rosenberger S., Laabs C., Lesjean B., Gnirss R., Amy G., Jekel M., Schrotter J.C. (2006). Impact of colloidal and soluble organic material on membrane performance in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment. *Water Research* **40** (4) 710-720.

- Shin H.S. und Kang S.T. (2003). Characteristics and fates of soluble microbial products in ceramic membrane bioreactor at various sludge retention times. *Water Research* **37** (1) 121-127.
- Song L.F., Liang S.A., Yuan L.Y. (2007). Retarded transport and accumulation of soluble microbial products in a membrane bioreactor. *Journal of Environmental Engineering* **133** (1) 36-43.
- van Nieuwenhuijzen A.F., van der Graaf J.H.J.M., Kampschreur M.J., Mels A.R. (2004). Particle related fractionation and characterisation of municipal wastewater. *Water Science and Technology* **50** (12) 125-132.
- Yamamoto K., Hiasa M., Mahmood T., Matsuo T. (1989). Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank. *Water Science & Technology* **21** (4/5) 43-54.
- Zhang B. und Yamamoto K. (1996). Seasonal change of microbial population and activities in a building wastewater reuse system using a membrane separation activated sludge process. *Water Science and Technology* **34** (5/6) 295-302.