



Verfahrenskombination der Membran-Bio-Reaktor-Technologie mit der anaeroben Schlammstabilisierung

**- Begleitendes Messprogramm während der Umrüstungsphase
des Gruppenklärwerks GWK Nordkanal -**

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft



Erftverband, Bergheim

Projektleitung:

V. Prof. Dr.-Ing. Jörg Felmeden

Projektbearbeitung:

Dr.-Ing. Wernfried Schier

März 2020

Kurzzusammenfassung

Der Erftverband, Bergheim hat für das Gruppenklärwerk (GKW) Nordkanal, das für 80.000 EW nach der MBR-Technologie betrieben wird, die bauliche Erweiterung und verfahrenstechnische Umstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung 2019 in Betrieb genommen. Das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft (FG SWW) der Universität Kassel war mit einem begleitenden Mess- und Untersuchungsprogramm zu den Aspekten

- ➔ Mechanische Vorreinigungsstufe
- ➔ Betrachtungen der biologischen Reinigungsleistung der MBR-Anlage
- ➔ Gasertragsevaluation
- ➔ CO₂-Bilanzierung

Am Ende der Untersuchungen kann folgendes konstatiert werden.

Eine Mengenabschätzung von bis zu 200 kg/d zurückgehaltener, membrankritischer Feststoffen belegt eindeutig das Erfordernis einer Feinsiebstufe (empfohlene zweidimensionale Sieböffnungsweite: 1,5 mm) hinter einer Vorklärstufe, um Verzapfungen oder Verschlämungen an und in den Membranfiltrationsmodulen der biologischen Stufe zu vermeiden. Damit einher geht jedoch eine mindestens zeitweise kritische CSB-Gesamtreduktion von Vorklärung und Siebung, weswegen eine Einrichtung zur Dosierung leicht abbaubarer organischer Stoffe ebenfalls erforderlich erscheint. Optional sind weitere Verkürzungen der Aufenthaltszeit in der Vorklärstufe hin zu einer Grobentschlammung betrieblich zu prüfen.

Untersuchungen zur stationären Nach- bzw. Neubemessung anhand von Tagesdaten für das Jahr 2016 sowie auf Grundlage des Arbeitsblattes-A 131 (DWA 2016) ergaben eine mittlere Volumendifferenz von ca. 34 %, um welche die Belebungsstufe unterbemessen wäre. Anlagenspezifisch für das GKW Nordkanal mit einem steuerungsbedingt variablen Belegungsvolumen entspricht dies einem Beckenvolumen von ca. 1.000 m³ unter Trockenwetterverhältnissen und somit rund 11 % des gesamten Belegungsvolumens. Dieses Ergebnis wird als bestätigender Hinweis für das vermutete Auftreten zusätzlicher Reinigungseffekte (fixierte Biomasse, bessere Sauerstoffaufnahme bewertet).

Die anaerobe Schlammstabilisierung wurde Ende Januar 2019 in Betrieb genommen, die messtechnische Anbindung der Faulgasmengenmessung erfolgte jedoch erst im April 2019, so dass vollständige Daten ab Mai 2019 vorlagen. Die Faulgasmenge variiert seit der vollständigen Inbetriebnahme der Faulung im April 2019 zwischen monatlich 33.000 m³ und 40.000 m³, die spezifische Gasproduktion zwischen 310 L/kg_{oTR_{zu}} und 407 L/kg_{oTR_{zu}}. Diese Leistungsdaten lassen sich sehr gut in zahlreich publizierte Leistungsspektren vergleichbarer Kläranlagen und vergleichbarer Verfahrensführung einordnen. Da sich stabile und effiziente Betriebsverhältnisse erfahrungsgemäß erst nach längerer Betriebszeit einstellen, kann für die nähere Zukunft noch mit weiteren Leistungssteigerungen gerechnet werden.

Die jährliche CO₂-Gesamtemission reduziert sich durch die Verfahrensumstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung um ca. 38 % auf aktuell ca. 1.000 tCO₂/a. Die einwohner-spezifische CO₂-Emission reduziert sich entsprechend 15 kg/(EW*a). Maßgeblicher Faktor dieser CO₂-Emissionsreduktion ist die Eigenstromerzeugung aus dem aufgrund der veränderten Verfahrenstechnik anfallenden Faulgas. Der Stromverbrauch hat mit weiterhin über 96 % den bestimmenden Anteil an den CO₂-Emissionen.

Insofern kann resümiert werden, dass sich die Verfahrensumstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung in mehrfacher Hinsicht positiv auswirkt, nämlich zum einen kosten-senkend wegen des geringeren Fremdstrombezugs und wegen der reduzierten abzutransportierenden Menge an entwässertem Klärschlamm sowie gleichzeitig wegen der mit beiden Aspekten verbundenen Reduktion an CO₂-Emissionen.

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	1
2	Untersuchungen zur mechanischen Vorreinigung	2
2.1	Einführende Anmerkungen	2
2.2	Material und Methoden	3
2.2.1	Konzeption	3
2.2.2	Probenahme	4
2.2.2.1	Probenahmezeiten	4
2.2.2.2	Probenahme zur Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe.....	5
2.2.2.3	Probenahme zur Bestimmung der Parameter CSB, TN _b und S _{NH4}	6
2.2.3	Analytische Bestimmungsmethoden.....	6
2.2.4	Untersuchungsstandorte	7
2.2.4.1	Gruppenklärwerk (GKW) Glehn	7
2.2.4.2	Kläranlage (KA) Grevenbroich	9
2.2.4.3	Gruppenklärwerk (GKW) Nordkanal.....	10
2.3	Ergebnisse.....	12
2.3.1	Messphase 1 auf dem GKW Glehn	12
2.3.1.1	Messprogramm	12
2.3.1.2	Zulaufwassermenge und Aufenthaltszeit in der Vorklärung	15
2.3.1.3	Zulaufbelastung – Literaturvergleich (Trockenwettertage)	16
2.3.1.4	Längsprofile der stofflichen Leistungsfähigkeit (nur Vorklärung)	17
2.3.2	Messphase 2 auf dem GKW Glehn	27
2.3.2.1	Änderung der Probenahmesystematik der Sackfiltration.....	27
2.3.2.2	Messprogramm	30
2.3.2.3	Zulaufwassermenge und Aufenthaltszeit in der Vorklärung	31
2.3.2.4	Längsprofile der stofflichen Leistungsfähigkeit (alle Tage).....	31
2.3.3	Messphase 3 auf der KA Grevenbroich.....	35
2.3.3.1	Einführender Hinweis	35
2.3.3.2	Messprogramm	35
2.3.3.3	Zulaufwassermenge und Aufenthaltszeit in der Vorklärung	36
2.3.3.4	Längsprofile der stofflichen Leistungsfähigkeit (alle Tage).....	36
2.3.4	Verifizierende Messphase 4 auf dem GKW Nordkanal.....	42
2.3.4.1	Einführender Hinweis	42
2.3.4.2	Messprogramm	43
2.3.4.3	Zulaufwassermenge und Aufenthaltszeit in der Vorklärung	46
2.3.4.4	Zulaufbelastung – Literaturvergleich (Trockenwettertage)	47
2.3.4.5	Längsprofile der stofflichen Leistungsfähigkeit.....	48
2.3.4.5.1	Hinweis.....	48

2.3.4.5.2	alle Tage	48
2.3.4.5.3	Trockenwettertag	52
2.3.4.5.4	Regenwettertage	55
2.3.4.5.5	Fazit	59
2.4	Zusammenfassung zu den Untersuchungen der mechanischen Vorreinigung	59
3	Betrachtungen der MBR-Anlage nach aktuellen Bemessungsansätzen	65
3.1	Einführende Anmerkungen	65
3.2	Material und Methoden	66
3.3	„Klärtechnische Berechnung“ zur Ausführungsplanung des GWK Nordkanal ..	67
3.4	Betriebsdaten des Jahres 2016 des GWK Nordkanal.....	69
3.4.1	Wassermengen	69
3.4.2	Schmutzfrachten.....	70
3.4.3	Steuerungsregime der Belebungsstraßen	73
3.4.4	Ablaufsituation 2016	75
3.4.5	Belebungsstufe.....	80
3.5	Stationäre Neu-Bemessung.....	83
3.6	Dynamische Simulation	94
3.6.1	Einführung	94
3.6.2	Modellierung als einstraßige Belebung (Variante 1)	96
3.6.3	Modellierung als vierstraßige Belebung (Variante 2).....	99
3.7	Zusammenfassung zu den Bemessungsbetrachtungen	101
4	Verifizierende Gasertragsmessungen.....	104
5	CO₂-Bilanzierung	106
5.1	Einführende Anmerkungen	106
5.2	Verfahrenstechnik vor der Verfahrensumstellung	106
5.3	CO ₂ -Bilanzierung vor der Verfahrensumstellung	107
5.3.1	CO ₂ -Emission aus Stromverbrauch.....	107
5.3.2	CO ₂ -Emission aus Wärmebedarf.....	110
5.3.3	CO ₂ -Emission aus Schlammtransport	110
5.3.4	CO ₂ -Emission aus Transport von Fäll- und Flockungshilfsmittel	110
5.3.5	CO ₂ -Emission aus Transport von membranspezifischen Reinigungschemikalien.....	111
5.3.6	CO ₂ -Bilanzierung.....	111
5.4	Verfahrenstechnik nach der Verfahrensumstellung	111
5.5	CO ₂ -Bilanzierung nach der Verfahrensumstellung	112
5.5.1	CO ₂ -Emission aus Stromverbrauch.....	112
5.5.2	CO ₂ -Emission aus Wärmebedarf.....	115

5.5.3	CO ₂ -Emission aus Schlammtransport	116
5.5.4	CO ₂ -Emission aus Transport von Fäll- und Flockungshilfsmittel	116
5.5.5	CO ₂ -Emission aus Transport von membranspezifischen Reinigungschemikalien.....	116
5.5.6	CO ₂ -Emission aus Transport von Essigsäure.....	117
5.5.7	CO ₂ -Bilanzierung.....	117
5.6	Fazit.....	117
6	Zusammenfassung	118
	Literatur	122
	Anhang	124
Anhang 1	Auswertungen zur Leistungsfähigkeit des pilottechnischen Siebes (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm) in Messphase 1.....	124
Anhang 2	Auswertungen zur Leistungsfähigkeit des pilottechnischen Siebes (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm) in Messphase 1.....	128

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1:	Art der Probenahme.....	5
Abbildung 2:	Vorklärbecken (GWK Glehn).....	8
Abbildung 3:	Siebaggregat – Muldensieb der Fa. Contec.....	8
Abbildung 4:	Filterbandrechen (KA Grevenbroich).....	9
Abbildung 5:	Vorklärbecken (KA Grevenbroich).....	10
Abbildung 6:	Blick auf die neue mechanische Abwasserreinigungsstufe.....	10
Abbildung 7:	oben: Gesamtansicht, unten: Ablaufsituation	11
Abbildung 8:	oben: Siebhalle unten: links: Muldensieb, rechts: Siebgutabwurf über Bogensieb	12
Abbildung 9:	Probenahmestellen MP1 (GWK Glehn)	13
Abbildung 10:	Beschickung des Muldensiebes	14
Abbildung 11:	Zulaufwassermengen GWK Glehn November 2015	15
Abbildung 12:	VK-Zulaufbelastung GWK Glehn – Vergleich mit Regelwerkswerten in [g/(E*d)].....	16
Abbildung 13:	TW - Längsprofile AFS und CSB (Vorklärung)	17
Abbildung 14:	TW - Längsprofile Stickstoff (Vorklärung).....	18
Abbildung 15:	TW - Box-Whisker-Diagramme (Vorklärung).....	19
Abbildung 16:	TW - Eliminationsraten (Vorklärung)	20
Abbildung 17:	VK-Ablaufbelastung GWK Glehn – Vergleich mit Regelwerkswerten in [g/(E*d)].....	21
Abbildung 18:	RW - Längsprofile AFS und CSB (Vorklärung).....	22

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

Abbildung 19:	RW - Längsprofile Stickstoff (Vorklärung)	22
Abbildung 20:	RW - Box-Whisker-Diagramme (Vorklärung)	23
Abbildung 21:	RW - Eliminationsraten (Vorklärung)	24
Abbildung 22:	Nachtzulauf - Längsprofile AFS und CSB (Vorklärung).....	25
Abbildung 23:	Nachtzulauf - Längsprofile Stickstoff (Vorklärung)	25
Abbildung 24:	Nachtzulauf - Box-Whisker-Diagramme (Vorklärung)	26
Abbildung 25:	Nachtzulauf - Eliminationsraten (Vorklärung).....	27
Abbildung 26:	Filtrationssack mit 1,0 mm Maschengeometrie	28
Abbildung 27:	kontinuierlicher Probenahmebetrieb mit Filtrationssack.....	29
Abbildung 28:	Probenahmestellen MP2 (GKW Glehn)	30
Abbildung 29:	Zulaufwassermengen GWK Glehn April 2016.....	31
Abbildung 30:	Längsprofile AFS _{GES} , AFS _{>1,0} , AFS _{<1,0} , AFS _{org} , AFS _{anorg} und CSB (MP2 Glehn)	32
Abbildung 31:	Box-Whisker-Diagramme (MP2 Glehn).....	33
Abbildung 32:	Eliminationsraten (MP2 Glehn)	34
Abbildung 33:	Zulaufwassermengen KA Grevenbroich Juni 2016	36
Abbildung 34:	Längsprofile AFS _{GES} , AFS _{>1,0} , AFS _{<1,0} , AFS _{org} , AFS _{anorg} und CSB (MP3 Grevenbroich)	37
Abbildung 35:	Box-Whisker-Diagramme (MP3 Grevenbroich)	38
Abbildung 36:	Eliminationsraten (MP3 Grevenbroich)	39
Abbildung 37:	Absetztests Ablauf Vorklärung (Standzylinder)	40
Abbildung 38:	Absetztests Ablauf Vorklärung (Standzylinder)	41
Abbildung 39:	Vergleich der fraktionierten AFS-Konzentrationen im Zulauf zur Vorklärung (GWK Glehn – KA Grevenbroich)	42
Abbildung 40:	Probenahmestellen MP4 (GWK Nordkanal).....	43
Abbildung 41:	Probenahmestellen PN1 (oben), PN2 (mitte), PN3 (unten).....	45
Abbildung 42:	Zulaufwassermengen GWK Nordkanal Dezember 2019.....	46
Abbildung 43:	VK-Zulaufbelastung GWK Nordkanal in [g/(E*d)] – Vergleich mit Regelwerkswerten.....	47
Abbildung 44:	Längsprofile AFS _{GES} , AFS _{>1,0} , AFS _{<1,0} , und CSB (MP4 Nordkanal)	48
Abbildung 45:	Längsprofile TN _b und S _{NH4} (MP4 Nordkanal)	49
Abbildung 46:	Box-Whisker-Diagramme (MP4 Nordkanal)	50
Abbildung 47:	Eliminationsraten für AFS _{GES} , AFS _{>1,0} , AFS _{<1,0} , CSB, TN _b und S _{NH4} (MP4 Nordkanal).....	51
Abbildung 48:	Längsprofile AFS _{GES} , AFS _{>1,0} , AFS _{<1,0} , und CSB bei Trockenwetter (MP4 Nordkanal).....	52
Abbildung 49:	Längsprofile TN _b und S _{NH4} bei Trockenwetter (MP4 Nordkanal)	53
Abbildung 50:	Eliminationsraten für AFS _{GES} , AFS _{>1,0} , AFS _{<1,0} , CSB, TN _b und S _{NH4} bei Trockenwetter (MP4 Nordkanal)	53
Abbildung 51:	spezifische Belastung CSB, AFS _{GES} und TKN/TN _b im Vergleich mit Regelwerkswerten in [g/(E*d)] bei Trockenwetter (MP4 Nordkanal)	54

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

Abbildung 52:	Längsprofile AFS_{GES} , $AFS_{>1,0}$, $AFS_{<1,0}$, und CSB bei Regenwetter (MP4 Nordkanal).....	55
Abbildung 53:	Eliminationsraten für AFS_{GES} , $AFS_{>1,0}$, $AFS_{<1,0}$, und CSB bei Regenwetter (MP4 Nordkanal).....	56
Abbildung 54:	spezifische Belastung CSB, AFS_{GES} und TKN/TN _b im Vergleich mit Regelwerkswerten in $[g/(E \cdot d)]$ bei Regenwetter (MP4 Nordkanal).....	57
Abbildung 55:	Siebgut bei Regenwetterbedingungen	58
Abbildung 56:	Vergleich der fraktionierten AFS-Konzentrationen im Zulauf zur Vorklärung (GWK Glehn - KA Grevenbroich - GWK Nordkanal).....	62
Abbildung 57:	Vergleich der fraktionierten AFS-Konzentrationen im Ablauf aus der Vorklärung (GWK Glehn - KA Grevenbroich - GWK Nordkanal).....	63
Abbildung 58:	Zulaufwassermengen.....	69
Abbildung 59:	CSB-Zulaufnachfrucht.....	70
Abbildung 60:	NH ₄ -N-Zulaufnachfrucht.....	71
Abbildung 61:	P _{GES} -Zulaufnachfrucht.....	71
Abbildung 62:	Unterschreitungshäufigkeiten der maßgeblichen Tagesschmutznachfrachten.....	72
Abbildung 63:	mittleres tägliches, in Betrieb befindliches Belebungsbeckenvolumen... ..	74
Abbildung 64:	mittleres tägliches, in Betrieb befindliches Belebungsbeckenvolumen bei Trockenwetterzulauf.....	75
Abbildung 65:	CSB-Ablaufkonzentrationen.....	76
Abbildung 66:	NH ₄ -N-Ablaufkonzentrationen.....	77
Abbildung 67:	N _{GES,anorg.} -Ablaufkonzentrationen	77
Abbildung 68:	P _{GES} -Ablaufkonzentrationen.....	78
Abbildung 69:	Unterschreitungshäufigkeiten der Ablaufkonzentrationen in der 2-Std.-Mischprobe bezogen auf die aktuellen Überwachungswerte	78
Abbildung 70:	Unterschreitungshäufigkeiten der Ablaufkonzentrationen in der 2-Std.-Mischprobe bezogen auf die früheren Überwachungswerte	80
Abbildung 71:	Abwassertemperaturen in der Belebungsstufe.....	81
Abbildung 72:	Feststoffgehalt und Schlammalter in der Belebungsstufe	81
Abbildung 73:	Feststoffgehalt und CSB-Schlammbelastung in der Belebungsstufe	82
Abbildung 74:	Abhängigkeit zwischen Feststoffgehalt und CSB-Schlammbelastung ..	83
Abbildung 75:	Bemessungsvergleich: Variante $t_{TS} \geq 25$ d.....	85
Abbildung 76:	Bemessungsvergleich: Variante $t_{TS} \geq 10$ d.....	87
Abbildung 77:	Bemessungsvergleich: Variante $t_{TS} \geq 12$ d, V_D iterativ ermittelt.....	88
Abbildung 78:	Einfluss des Ablauf-Steuerungsregimes auf das täglich erforderliche Beckenvolumen bei Trockenwetterzulauf.....	89
Abbildung 79:	Bemessungsvergleich: Variante $t_{TS} \geq 12$ d, V_D iterativ ermittelt, ohne Ablauf-Steuerungsregime	90
Abbildung 80:	Bemessungsvergleich: Variante $t_{TS} \geq 12$ d, V_D iterativ ermittelt, ohne Ablauf-Steuerungsregime, max TW = 10.000 m ³ /d.....	91
Abbildung 81:	Box-Whisker-Darstellung der durchgeführten Bemessungsvergleiche ..	92

Abbildung 82:	Unterschreitungshäufigkeit der in der Bemessungsiteration ermittelten Denitrifikationsvolumenanteile.....	93
Abbildung 83:	Box-Whisker-Darstellung der durchgeführten Bemessungsvergleiche, dargestellt als Belebungsvolumen [m ³]	94
Abbildung 84:	Belebtschlammmodell ASM3h	95
Abbildung 85:	Simulation1_BB, Gesamtansicht der Kläranlage.....	97
Abbildung 86:	Simulation1_BB, biologische Reinigungsstufe	97
Abbildung 87:	Simulation 1_BB, Anpassung des Feststoffgehaltes in der Belebungsstufe	98
Abbildung 88:	Simulation 1_BB, Anpassung der CSB-Konzentration im KA-Ablauf	98
Abbildung 89:	Simulation 1_BB, Anpassung der NH ₄ -Konzentration im KA-Ablauf	98
Abbildung 90:	Simulation 1_BB, Anpassung der NO ₃ -Konzentration im KA-Ablauf	98
Abbildung 91:	Simulation 2_BB, Gesamtansicht der Kläranlage.....	100
Abbildung 92:	Simulation 2_BB, biologische Reinigungsstufe	100
Abbildung 93:	organische Schlammmassen und Faulgasproduktion.....	104
Abbildung 94:	Verfahrensschema GWK Nordkanal vor der Erweiterung	107
Abbildung 95:	spezifischer Stromverbrauch vor der Verfahrensumstellung (GWK Nordkanal).....	109
Abbildung 96:	Verfahrensschema GWK Nordkanal nach der Verfahrensumstellung..	112
Abbildung 97:	Einordnung des spezifischen Faulgasanfalls (GWK Nordkanal) gemäß DWA-A 216	114
Abbildung 98:	Einordnung des Eigenversorgungsgrades (GWK Nordkanal) gemäß DWA-A 216	114
Abbildung 99:	spezifischer Stromverbrauch vor der Verfahrensumstellung (GWK Nordkanal).....	115
Abbildung 100:	TW-Längsprofile AFS und CSB (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm)	124
Abbildung 101:	TW-Längsprofile Stickstoff (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm).....	125
Abbildung 102:	TW-Eliminationsraten (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm)	125
Abbildung 103:	RW-Längsprofile AFS und CSB (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm).....	126
Abbildung 104:	RW-Längsprofile Stickstoff (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm)	127
Abbildung 105:	RW-Eliminationsraten (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm)	127
Abbildung 106:	TW-Längsprofile AFS und CSB (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm)	128
Abbildung 107:	TW-Längsprofile Stickstoff (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm).....	129
Abbildung 108:	TW-Eliminationsraten (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm)	129
Abbildung 109:	RW-Längsprofile AFS und CSB (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm).....	130
Abbildung 110:	RW-Längsprofile Stickstoff (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm)	131
Abbildung 111:	RW-Eliminationsraten (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm)	131

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Bezeichnung der Fraktionen der abfiltrierbaren Stoffe	6
Tabelle 2:	Liste der Parameter und Analysemethoden	7
Tabelle 3:	Messprogramm Messphase 1	13
Tabelle 4:	Messprogramm Messphase 2	30
Tabelle 5:	Messprogramm Messphase 3	35
Tabelle 6:	Messprogramm Messphase 4	43
Tabelle 7:	Bemessungsdaten GWK Nordkanal (Ausführungsplanung 2002).....	68
Tabelle 8:	Belebungsbeckenvolumina GWK Nordkanal (Ausführungsplanung 2002)	68
Tabelle 9:	Reinigungsanforderungen GWK Nordkanal (2004).....	69
Tabelle 10:	Datenabgleich Ausführungsplanung 2002 und Betriebsjahr 2016	72
Tabelle 11:	Befüllstrategie der vier Belebungsbeckenstraßen	73
Tabelle 12:	niedrig erklärte Reinigungsanforderungen GWK Nordkanal (2016)	76
Tabelle 13:	Schlammanfall und Faulgasproduktion - GWK Nordkanal	105
Tabelle 14:	CO ₂ -Emissionsfaktoren Strommix in [g/kWh] (UBA 2019)	108
Tabelle 15:	CO ₂ -Emissionen aus Strombezug bis 2018 - GWK Nordkanal	108
Tabelle 16:	CO ₂ -Emissionen aus Strombezug 2019 - GWK Nordkanal.....	113

1 Veranlassung

Der Erftverband, Bergheim plant für das Gruppenklärwerk (GKW) Nordkanal, das für 80.000 EW nach der MBR-Technologie betrieben wird, die bauliche Erweiterung und verfahrenstechnische Umstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung, was in diesem Verfahrensbereich Neuland darstellt. Ende Mai 2015 wurde bei der Bezirksregierung Düsseldorf ein Genehmigungsentwurf zur Genehmigung vorgelegt. Im September 2015 wurde das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft (FG SWW) der Universität Kassel mit einem begleitenden Mess- und Untersuchungsprogramm beauftragt. Ursprünglich geplantes Projektende war der 31.12.2017. Durch diverse Verzögerungen im Genehmigungs-, Bau- und Inbetriebnahmeablauf verschob sich dieses Projektende auf den 31.03.2020.

Inhaltliche Schwerpunkte dieses Untersuchungsprogramms sind:

- Umgestaltung der mechanischen Vorreinigungsstufe im Hinblick auf eine anaerobe Schlammstabilisierung
- Vergleichende Betrachtungen der tatsächlichen Reinigungsleistung der Membran-Bioreaktor-Anlage nach dem aktuellen theoretischen Bemessungsansatz; diese Untersuchungen sind zu ergänzen
 - durch Betrachtungen zur Aktivität der Biomasse in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration im Membran-Bioreaktor
 - sowie durch Simulationen der biologischen Stufe des GKW Nordkanal mit den gängigen ASM-Modellen sowie der zum Zeitpunkt der Befassung aktuellen Version des Anwenderprogramms SIMBA im Hinblick auf eine angepasste Regel- und Steuertechnik
- Verifizierende Gasertragsmessungen aus dem insgesamt zur anaeroben Schlammstabilisierung anstehenden Klärschlamm (Primärschlamm, Siebgut und Überschusschlamm) des GKW Nordkanal nach Inbetriebnahme aller neuen Anlagen- und Verfahrenskomponenten
- Erstellung einer CO₂-Bilanzierung auf der Basis der erneuerten Prozesskonfiguration.

Der Abschlussbericht wird hiermit vorgelegt.

2 Untersuchungen zur mechanischen Vorreinigung

2.1 Einführende Anmerkungen

Die Konzeption einer anaeroben Schlammstabilisierung, beschickt mit Primärschlamm und Überschussschlamm, bedingt Kenntnisse über das Faulgasertragspotenzials des vorhandenen Überschussschlammes (aus einer zurzeit noch simultan aeroben Schlammstabilisierungsstufe in einem Membran-Bio-Reaktor) sowie des noch nicht vorhandenen Primärschlammes.

Erste orientierende Versuche zur Ermittlung des Faulgasertragspotenzials aus Überschussschlamm der Membran-Bioreaktor-Anlage (MBR) GWK Nordkanal fanden bereits im Jahr 2013 statt, weitere Untersuchungen folgten im Jahr 2014, jeweils durchgeführt durch das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft (FG SWW) der Universität Kassel. Die zugehörigen Abschlussberichte wurden im September 2013 und im September 2014 vorgelegt.

In den Untersuchungen des Jahres 2014 wurde u.a. eine Versuchsanlage in der Form eines pilotmassstäblichen Absetzbeckens als Vorklärbecken im Ablauf des vorhandenen Sand- und Fettfangs betrieben, um den dadurch gewonnenen Primärschlamm hinsichtlich seines Gasertrages zu untersuchen. Der in diesen Versuchsreihen untersuchte Primärschlamm lag mit im Mittel 595 L/kg_{TR} am oberen Ende recherchierter Literaturwerte. Abschließend wurde festgestellt: „Die zweite Versuchsreihe hat erwartungsgemäß bestätigt, dass sowohl das bereits anfallende Gemisch aus Siebgut und Überschussschlamm als auch der zu generierende Primärschlamm aus einer Grobentschlammung positive Auswirkungen auf eine anaerobe Stabilisierung mit sich bringen können. Nachdem in der ersten Versuchsreihe (FG SWW 2013) festgestellt wurde, dass eine anaerobe Stabilisierung von reinem Überschussschlamm des GWK Nordkanal effizient möglich ist, wurde mit dieser Versuchsreihe unter Beweis gestellt, dass insbesondere durch die Beimischung von Primärschlamm deutliche Steigerungen des erreichbaren Gasertrages möglich sind.“

Auf dieser Grundlage wurde für die geplante anaerobe Schlammstabilisierung bereits ein Genehmigungsentwurf erstellt und Ende Mai 2015 bei der Bezirksregierung Düsseldorf zur Genehmigung vorgelegt. Für die geplante Erweiterung der Vorreinigungsstufe zur Entnahme von partikulären Stoffen wurden die Vorklärung jedoch mit einer Aufenthaltszeit von 20 Minuten bei der maximalen Wassermenge – und damit unter Trockenwetterbedingungen deutlich länger als 30 Minuten - sowie eine neue Siebanlage geplant.

Die Funktion der Vorklärung ist auf die Entnahme der sedimentierenden, partikulären Stoffe aus dem Abwasserstrom nach dem Schwerkraftprinzip beschränkt. Die geplante Siebanlage soll dagegen unabhängig von der Dichte (flotierende/sedimentierende Stoffe) die nicht gravimetrisch abgeschiedenen Störstoffe zurückhalten. Hier sind als Trenngrenze die Öffnungsweite und die Öffnungsgeometrie des Siebes bedeutsam. Es kann also nicht

ausgeschlossen werden, dass sich im Ablauf einer Vorklärung nach wie vor Störstoffe befinden, die den Membranfiltrationsprozess beeinträchtigen. Im Rahmen der bisher durchgeführten Untersuchungen wurde die optimale Trenngrenze einer Siebanlage nicht betrachtet. Die Auslegung eines zweidimensionalen Siebsystems soll den Schutz der Membranen sicherstellen und die Abbauprozesse durch eine zu weitgehende Abscheideleistung nicht beeinträchtigen. Der notwendige organische Kohlenstoff im Abwasser für die Denitrifikationsprozesse darf nicht durch die Vorreinigung limitiert werden.

Bei der Erstellung der Genehmigungsplanung wurde von den Genehmigungsbehörden ein Nachweis gefordert, dass keine Verschlechterung der Ablaufwerte für die Parameter Nitrat und Ammonium eintritt.

Aus diesen Gründen es ist zwingend notwendig, vor der Ausführungsphase der Maßnahme die Untersuchungsinhalte in Bezug auf die notwendige Leistungsfähigkeit der Vorreinigungsstufe und die daraus resultierende Auswirkung auf die biologischen Reinigungsprozesse anzupassen.

Es ist zu untersuchen,

- ➔ inwieweit im Ablauf einer Vorklärstufe noch Stoffe vorhanden sind, die sich störend oder leistungsmindernd auf den Membranfiltrationsprozess auswirken und mit einer Siebung zurückgehalten werden können bzw. müssen,
- ➔ mit welcher zweidimensionalen Sieböffnungsweite die Auslegung der nachgeschalteten Siebstufe zu erfolgen hat
- ➔ und welche Entnahmeleistung an organischen Stoffen mit einer entsprechenden Siebstufe im Hinblick auf eine ungestörte biologische Stickstoffelimination in der nachfolgenden Prozessstufe zu erwarten ist.

2.2 Material und Methoden

2.2.1 Konzeption

Ursprünglich vorgesehen waren drei Messphasen, in denen die Sieböffnungsweite - entsprechend den Erfahrungswerten sowie bereits im Jahr 2009 durchgeführter Untersuchungen [1] - zwischen 0,6 mm und 1,5 mm variiert werden sollten. Die Untersuchungen der mechanischen Vorreinigung sollten auf dem benachbarten, konventionellen Gruppenklärwerk (GWK) Glehn durchgeführt werden. Dies erschien insbesondere deswegen sinnvoll, weil Anfang des Jahres 2015 ein Muldensieb des Fabrikates CONTEC im Teilstrom aus dem Ablauf der Vorklärung in Betrieb genommen worden war. Außerdem entspricht die Dimensionierung der Vorklärung in Glehn in etwa den Aufenthaltszeiten der geplanten Grobentschlammung auf dem GWK Nordkanal (ca. 20 min. bei maximaler Zulaufwasser-

menge). Darauf basierend wird jeweils die Entnahmeleistungsfähigkeit der Verfahrenskombination Vorklärung/Siebung bei folgenden drei hydraulischen Belastungszuständen ermittelt:

- maximale hydraulische Belastung,
- Trockenwetterspitzenzufluss,
- Nachtzulauf.

Im Zuge der Messphasen wurde von dieser Planung abgewichen. Die dritte Messphase konnte entgegen der Planung wegen dringender Revisionsarbeiten am Vorklärbeckenräumer nicht auf dem GWK Glehn stattfinden, sondern stattdessen auf der KA Grevenbroich. Der Ausfall des Vorklärbeckenräumers des GWK Glehn machte einen kontinuierlichen und störungsfreien Untersuchungsbetrieb unmöglich und ließ deutliche Einbußen bei der Qualität der erzielten Ergebnisse erwarten. Letztlich erwies sich die Verlegung des Untersuchungsstandortes nach Grevenbroich sogar noch in anderer Hinsicht als der Untersuchungskontinuität als vorteilhaft. Hintergrund ist die dortige Ausführung der Rechenanlage, die nämlich ungewöhnlicher Weise als zweidimensionale Entnahmestufe mit einer 8 mm - Lochgeometrie ausgeführt ist. Bei der Darstellung der zugehörigen Messergebnisse wird auf diesen Sachverhalt noch eingegangen werden.

Die zusätzliche vierte und letzte Messphase auf dem umgerüsteten GWK Nordkanal diente der Verifizierung der zuvor gewonnenen Erkenntnisse.

Es ist notwendig, die Eliminationsleistung der Verfahrenskombination Vorklärung und Siebung in Bezug auf die Parameter abfiltrierbare Stoffe (AFS), CSB, TN_b und S_{NH_4} zu untersuchen. Diese Untersuchungen von Vorklärung/Siebung hinsichtlich der abfiltrierbaren Stoffe werden mit Hilfe einer bereits vielfach erprobten, manuellen Probenahme an den Stellen „Zulauf Vorklärung“, „Ablauf Vorklärung (entspricht Zulauf Siebung)“ und „Ablauf Siebung“ nach der Sackfiltrations-Methode des FG SWW durchgeführt. Die Methode ermöglicht die Beprobung großer Abwasservolumina je Probenahmestelle und führt somit zu einer höheren Repräsentativität und entsprechend zu einer deutlich erhöhten Aussagekraft der gewonnenen Daten und Auswertungen.

2.2.2 Probenahme

2.2.2.1 **Probenahmezeiten**

Die manuelle Beprobung der Probenahmestellen erfolgte im 2-Std.-Intervall von tagsüber 08 Uhr bis 16 Uhr (täglich vier 2-Std.-Mischproben je Probenahmestelle). Zusätzlich wurden an ausgesuchten Tagen Probenahmen über 24 Std. durchgeführt, um auch die nächtlichen Betriebsdaten aufnehmen und auswerten zu können.

2.2.2.2 Probenahme zur Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe

Zur Bestimmung des Parameters „abfiltrierbare Stoffe“ werden Filtrationssäcke eingesetzt, um größere Probevolumina (200 L/8h bis 240 L/8h) untersuchen und damit eine höhere Repräsentativität gewährleisten zu können (Abbildung 1).

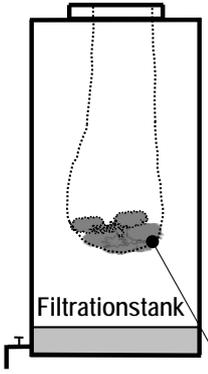
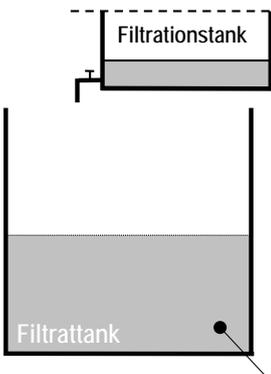
Parameter	AFS		CSB, TN _b , S _{NH4}
durchflussproportionale Probenahme	 <p>AFS (> 190 µm)</p>	 <p>AFS (0,45 µm bis 190 µm)</p>	separate Probe
Probevolumen	200 bis 240 [L/8h]		3,2 [L/8h]

Abbildung 1: Art der Probenahme

Die abfiltrierbaren Stoffe werden dabei zu Beginn der Untersuchungen fraktioniert nach Korngröße, differenziert in "< 0,2 mm" und "> 0,2 mm", sowie der organischen Trockensubstanz und der anorganischen Trockensubstanz, um eine Vergleichbarkeit zu früheren Untersuchungen herstellen zu können. Zur AFS-Bestimmung werden die Säcke vor und nach erfolgter täglicher Probenahme im Trockenschrank bei 105°C getrocknet und anschließend gewogen. Das bei der Sackfiltration entstehende Filtrat wird ebenfalls beprobt und auf den Parameter „abfiltrierbare Stoffe“ (0,45 µm) hin untersucht.

Die Feststoff-Analytik wurde vom Personal des FG SWW vor Ort auf dem GWK Glehn und später auf der Kläranlage Grevenbroich durchgeführt.

Im Weiteren werden, abweichend von der Nomenklatur des ATV-DVWK-A 198 (2003), folgende Abkürzungen für die abfiltrierbaren Stoffe und die in den Untersuchungen verwendeten Fraktionen verwendet (Tabelle 1):

Tabelle 1: Bezeichnung der Fraktionen der abfiltrierbaren Stoffe

Parameter	Abkürzung
gesamte abfiltrierbare Stoffe	AFS _{GES}
organische Fraktion	AFS _{org}
anorganische Fraktion	AFS _{anorg}
Fraktion > 0,2 mm	AFS _{>0,2}
Fraktion < 0,2 mm	AFS _{<0,2}
Fraktion > 1,0 mm	AFS _{>1,0}
Fraktion < 1,0 mm	AFS _{<1,0}

Hinweis:

Auf eine dezidierte Auswertung der größenfraktionierten Feststofffrachten nach der Korngröße 0,2 mm wird im Weiteren verzichtet, da sie für die Einschätzung der Entnahmekapazität eines Siebes mit Öffnungsweiten von 1,0 mm oder 1,5 mm irrelevant ist.

Im weiteren Verlauf wird noch darauf eingegangen werden, dass es hinsichtlich der dabei verwendeten Filtrationssäcke zur Änderung der Durchgangswerte von 190 µm auf 1,0 mm kam (Kap. 2.3.2.1). Hierbei wurde dann eine dezidierte Auswertung der größenfraktionierten Feststofffrachten nach der Korngröße 1,0 mm für die Einschätzung der Entnahmekapazität eines Siebes mit Öffnungsweiten von 1,5 mm sehr wohl relevant und sie sind entsprechend in den Kapiteln 2.3.2 und 2.3.3 enthalten.

2.2.2.3 Probenahme zur Bestimmung der Parameter CSB, TN_b und S_{NH4}

Parallel zur zuvor beschriebenen AFS-Bestimmung werden manuell separate 2-Std.-Mischproben gezogen, um die Parameter CSB, TN_b und S_{NH4} zu bestimmen. Das Probenahmevolumen dieser separaten 2-Std.-Mischproben ergibt sich bei 100 ml alle 15 Minuten zu 0,8 L/2h bzw. 3,2 L/8h.

2.2.3 Analytische Bestimmungsmethoden

Die Analyse der Proben erfolgte i.d.R. nach den Deutschen Einheitsverfahren für Wasser-, Abwasser und Schlammproben [DEV]. Darüber hinaus wurden die abfiltrierbaren Feststoffe durch eine sequentielle Filtration in zwei Größenklassen eingeteilt (siehe Kap. 2.2.2.2). Tabelle 2 zeigt die Liste der Parameter und Analysemethoden.

Tabelle 2: Liste der Parameter und Analysemethoden

Parameter	Abkürzung	Methode
Abfiltrierbare Stoffe (alle Fraktionen gem. Tab.1)	AFS	DIN 38409 H2
Ammonium-Stickstoff	NH ₄ -N	Küvettestest Hach Lange
Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB	DIN 38409 H41-1
Gesamt-Stickstoff gebunden (in Abwasser)	TN _b	DIN EN 12260 (H34)
Organische Trockensubstanz	oTS	DIN 38409 H2
Organischer Trockenrückstand	oTR	DIN EN 12879 (S3a)
Trockenrückstand	TR	DIN EN 12880 (S2a)
Trockensubstanz	TS	DIN 38414 S10

2.2.4 Untersuchungsstandorte

2.2.4.1 Gruppenklärwerk (GKW) Glehn

Das GKW Glehn liegt im Stadtgebiet von Korschenbroich im nördlichen Verbandsgebiet des Erftverbandes im Kreis Neuss. Das Einzugsgebiet umfasst die Gemeinde Jüchen und Stadtteile von Korschenbroich. Das gereinigte Abwasser des GKW Glehn wird in den Jüchener Bach eingeleitet.

Gemäß Aussage des Erftverbandes beträgt der Anschlussgrad zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen 28.600 EW. Der maximale Trockenwetterzufluss beträgt 409 m³/h, der Mischwasserzufluss beträgt 756 m³/h (Bemessungswerte der KA).

Die biologische Abwasserreinigung erfolgt in einer aus drei Straßen bestehenden Kaskadendenitrifikation. Die vorgelagerte mechanische Abwasserreinigung besteht aus einem Rechen, einem Sand- und Fettfang sowie einer Vorklärung.

Die Vorklärung ist als Rechteckbecken mit einem Volumen von 252 m³ mit Schwimmschlammammelrinne und 2 trichterförmigen Schlamm Sümpfen ausgeführt (siehe Abbildung 2). Die bemessungstechnische Aufenthaltszeit beträgt bei Mischwasserzufluss 20 Minuten, bei maximalem Trockenwetterzufluss 37 Minuten.



Abbildung 2: Vorklärbecken (GWK Glehn)

Für Testzwecke war im Ablaufbereich des Vorklärbeckens ein kleinmaßstäbliches Muldensieb der Fa. Contec aufgestellt. Die im Inneren befindliche Halbschale weist eine Öffnungsweite von 1,5 mm Lochgeometrie auf (siehe Abbildung 3), wurde im Verlaufe der Messphase 1 auch noch umgebaut auf eine Öffnungsweite von 1,0 mm Lochgeometrie.



Abbildung 3: Siebaggat – Muldensieb der Fa. Contec

Siebe dieser Bauart finden sich auf einigen großtechnischen MBR-Anlagen in Europa und in Deutschland. Beispielsweise wurde ein solches Muldensieb im Rahmen eines Forschungsprojektes des FG SWW im Jahre 2006 auf der holländischen Kläranlage Varsseveld untersucht.

2.2.4.2 Kläranlage (KA) Grevenbroich

Der Erftverband betreibt im Stadtgebiet Grevenbroichs die Kläranlage Grevenbroich-Noithausen. Das gereinigte Abwasser wird in den Wevelinghovener Entwässerungsgraben eingeleitet.

Gemäß Aussage des Erftverbandes beträgt der Anschlussgrad zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen 56.000 EW. Der maximale Trockenwetterzufluss beträgt 997 m³/h, der Mischwasserzufluss beträgt 1.640 m³/h (Bemessungswerte der KA).

Die biologische Abwasserreinigung erfolgt hier ebenfalls in einer aus drei Straßen bestehenden Kaskadendenitrifikation. Die vorgelagerte mechanische Abwasserreinigung besteht aus einem Rechen, einem Sand- und Fettfang sowie einer Vorklärung.

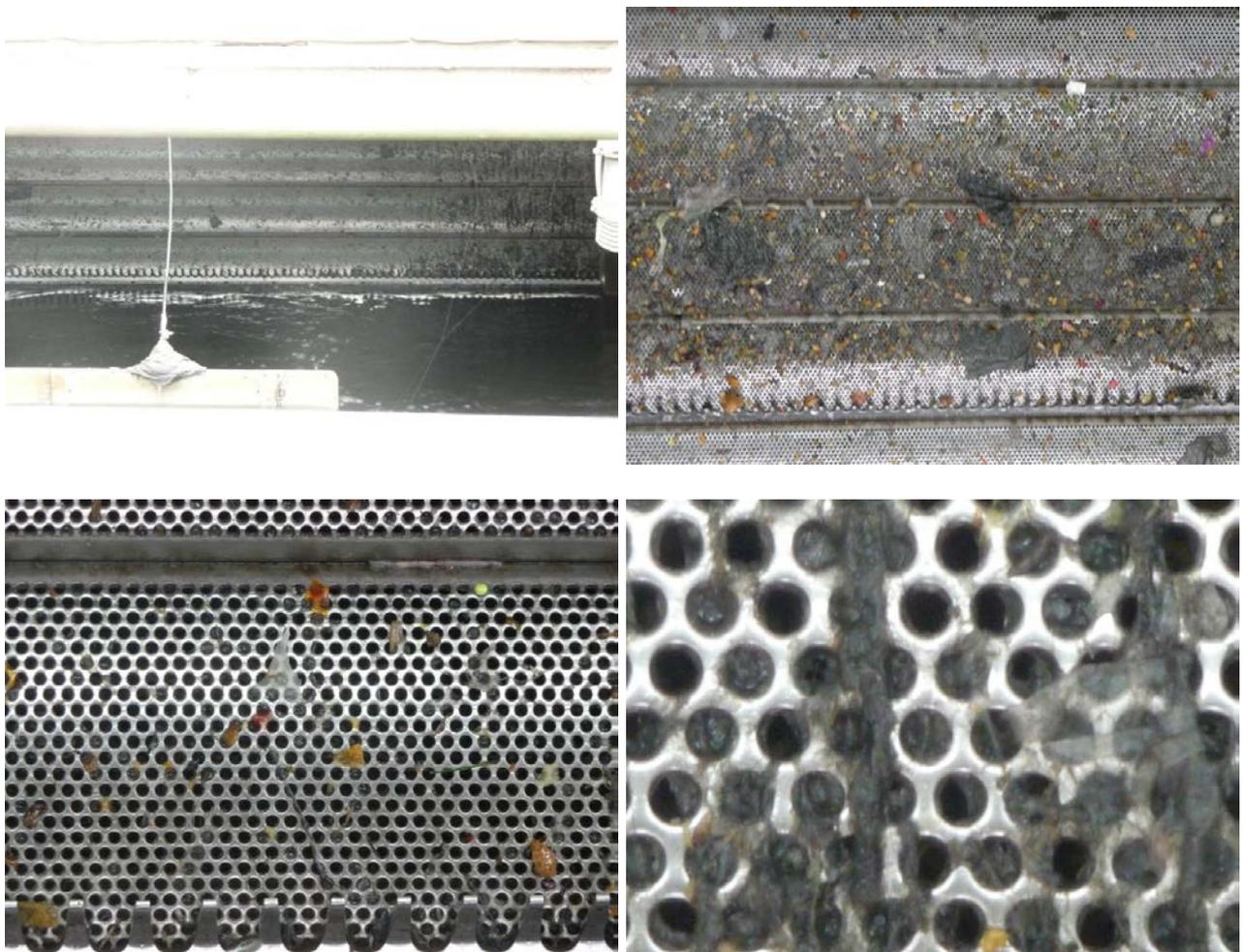


Abbildung 4: Filterbandrechen (KA Grevenbroich)

Eine Besonderheit stellt in Grevenbroich die Ausführung des Rechens dar. Entgegen des üblichen Einsatzes von Filterstufenrechen, die eine eindimensionale Spaltgeometrie aufweisen, ist in Grevenbroich seit 2015 ein Filterbandrechen mit einer 8 mm – Lochgeometrie, also einer zweidimensionalen Öffnungsgeometrie in Betrieb (siehe Abbildung 8).

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

Die Vorklärung ist als Rechteckbecken mit einem Volumen von 1.208 m³ ausgeführt (siehe Abbildung 2). Die Aufenthaltszeit beträgt bei Mischwasserzufluss 44 Minuten, bei maximalem Trockenwetterzufluss 73 Minuten.



Abbildung 5: Vorklärbecken (KA Grevenbroich)

2.2.4.3 Gruppenklärwerk (GKW) Nordkanal

Der Umbau des GKW Nordkanal beinhaltet im Bereich der mechanischen Abwasserreinigung den Rückbau der vorhandenen Feinsiebanlage sowie den Neubau eines Vorklärbeckens sowie den Neubau eines Siebgebäudes (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Blick auf die neue mechanische Abwasserreinigungsstufe

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

Die Vorklärung ist als längs durchströmtes, zweistraßiges Rechteckbecken mit einem Volumen von insgesamt 670 m³ ausgeführt (siehe Abbildung 8). Die Aufenthaltszeit beträgt bei Mischwasserzufluss 20 Minuten, bei maximalem Trockenwetterzufluss ca. 40 Minuten.



Abbildung 7: oben: Gesamtansicht, unten: Ablaufsituation

Das neue Siebgebäude ist mit 10 Muldensieben (Öffnungsgeometrie: Loch, Öffnungsweite: 1,5 mm) und zwei zusätzlichen Nachröstplätzen ausgestattet (siehe Abbildung 8).

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

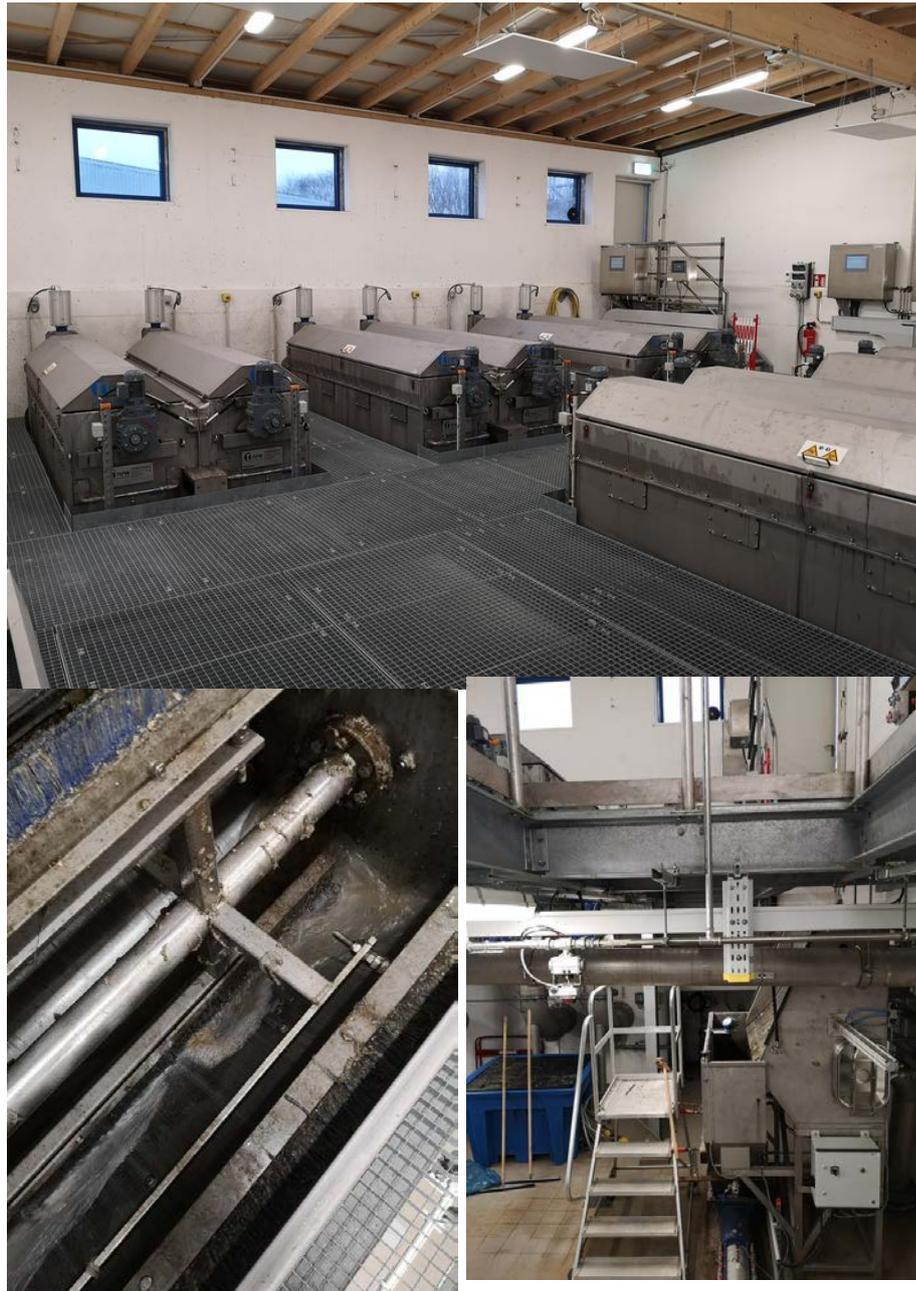


Abbildung 8: oben: Siebhalle
 unten: links: Muldensieb, rechts: Siebgutabwurf über Bogensieb

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Messphase 1 auf dem GWK Glehn

2.3.1.1 Messprogramm

Tabelle 3 zeigt das Messprogramm für die Untersuchungen, die vom 10. bis 27. November 2015 auf dem GWK Glehn durchgeführt wurden. Die nachstehende Abbildung 9 zeigt den untersuchten Teil des Anlagenschemas und die drei Probenahmestellen.

Tabelle 3: Messprogramm Messphase 1

Ort der Probenahme	AFS _{GES} , AFS _{>0,2} , AFS _{<0,2} , AFS _{org} , AFS _{anorg} (Sack/Filtrat)	CSB (Sack/Filtrat)	TN _b	S _{NH4} (zeitweise)
Zulauf Vorklärung PN1	2-Std.-Mischproben (V: 80 L)		2-Std.-Mischproben (V: 0,8 L)	
Ablauf Vorklärung PN2				
Ablauf Sieb PN3				

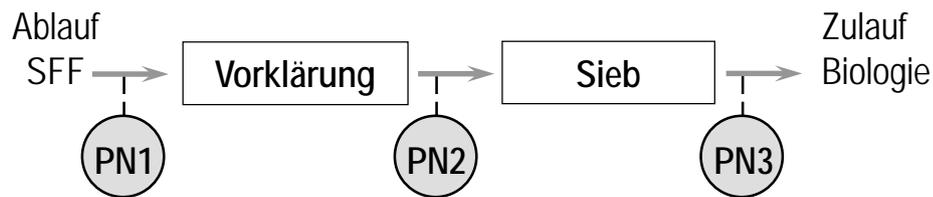


Abbildung 9: Probenahmestellen MP1 (GKW Glehn)

Folgender Hinweis sei an dieser Stelle zum Untersuchungsbetrieb des kleinmaßstäblichen Muldensiebes vorangestellt:

- ➔ Aus der Größe des Muldensiebes ergab sich zwingend, dass das Sieb lediglich mit einer Teilmenge der aus dem Vorklärbecken ablaufenden Wassermenge beschickt werden konnte. Von den Mitarbeitern des GWK Glehn war daher am Ende des Vorklärbeckens ein Bereich abgesteckt worden, aus dem heraus eine, bezogen sowohl auf die suspendierten als auch auf die flotierte Abwasserinhaltsstoffe, repräsentative Wassermenge abgepumpt und mit welcher das Muldensieb beschickt werden sollte wie Abbildung 10 zeigt.

Im Untersuchungsbetrieb hat es sich aufgrund verschiedener technischer Unzulänglichkeiten, die v.a. aus der Maßstabsdifferenz zwischen großtechnischer Vorklärung und kleintechnischem Sieb herrührten als äußerst schwierig herausgestellt, das Sieb kontinuierlich mit einem auf die Baugröße des Muldensiebes angepassten Volumenstrom zu beschicken und in der Folge das Aggregat repräsentativ zu beproben, um die Entnahmeleistung zu ermitteln.



Abbildung 10: Beschickung des Muldensiebes

Während der ersten Hälfte der Messphase 1 wurden auf dem Siebkörper nahezu keine Feststoffe zurückgehalten. Daher wurde im Verlaufe der Messphase 1 am 25.11. vor dem 2-Std.-Probenahmeintervall von 08:00 bis 10:00 Uhr die Siebschale ausgetauscht und dabei der Lochdurchmesser von 1,5 mm auf 1,0 mm reduziert. Dies hatte auf die Betriebsstabilität und auf die festgestellte Entnahmeleistung keinerlei positiven Einfluss.

Im Ergebnis der darauf folgenden Beratungen zwischen dem Ertverband und dem FG SWW wurde für die folgenden Messphasen 2 und 3 beschlossen, auf die Untersuchung und Beprobung eines separaten, kleinmaßstäblichen Siebes zu verzichten

und statt dessen die Probenahmetechnik, insbesondere die Beschaffenheit der Filtrationssäcke auf den Untersuchungsfokus hin anzupassen. Nähere Ausführungen hierzu folgen in Kap. 2.3.2.

Im Weiteren wird daher an dieser Stelle auf die Auswertung der Daten zur Leistungsfähigkeit des Siebes verzichtet. Die um das Sieb herum erhobenen Messwerte sind zur Vollständigkeit in den Anhängen 1 und 2 dargestellt.

2.3.1.2 Zulaufwassermenge und Aufenthaltszeit in der Vorklärung

In Abbildung 11 sind die Tageszulaufwassermengen für das GWK Glehn im zeitlichen Umfeld der Messphase dargestellt. Von den hervorgehobenen 8 Messtagen herrschten an 6 Tagen Trockenwetterbedingungen, während es sich bei den verbleibenden 2 Tagen um Misch- und Regenwetterbedingungen handelte.

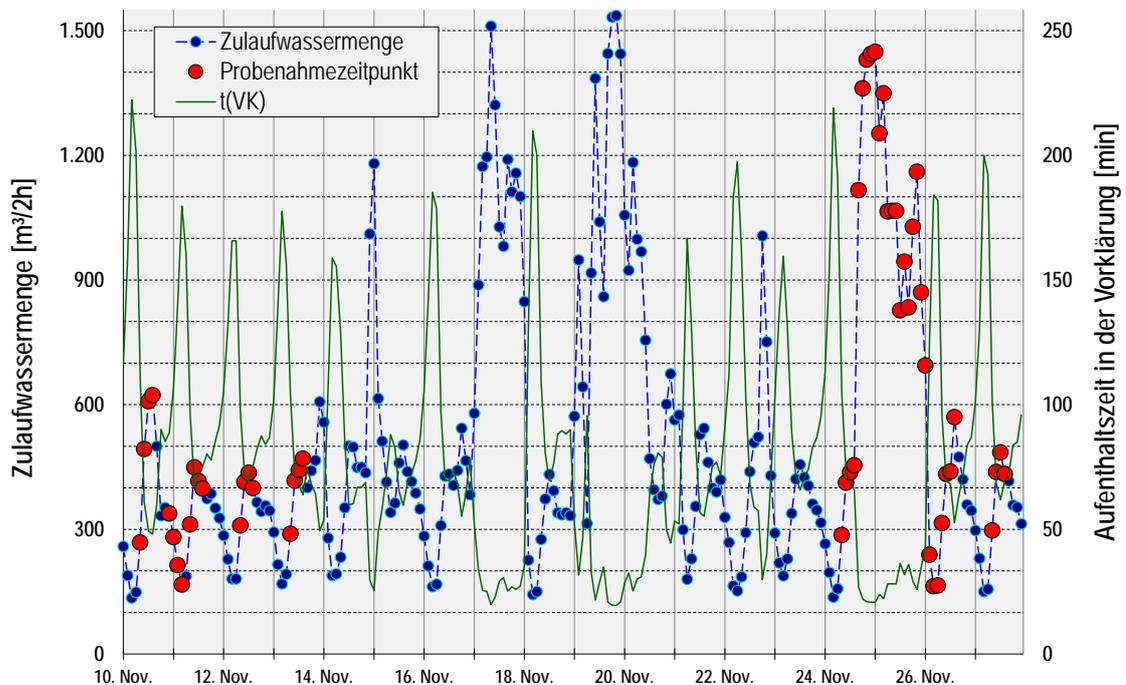


Abbildung 11: Zulaufwassermengen GWK Glehn November 2015

Außerdem enthält die Abbildung 11 die mit den Zulaufwassermengen korrespondierenden Aufenthaltszeiten t_{VK} in der Vorklärung. So lag t_{VK} zu den Probenahmezeitpunkten an den Trockenwettertagen zwischen 48 und 184 Minuten (0,8 bis 3,0 Stunden). Zu den Probenahmezeitpunkten an den Regenwettertagen lag t_{VK} zwischen 20 und 43 Minuten (0,3 bis 0,7 Stunden).

2.3.1.3 Zulaufbelastung – Literaturvergleich (Trockenwettertage)

Zur Einordnung und Beurteilung der einwohnerspezifischen Zulaufbelastung des GWK Glehn wurden die Daten aller Trockenwettertage verwendet. Es wurden die 85 %-Fraktile ermittelt, analog zu den herangezogenen Vergleichsdaten des ATV-DVWK-A A 198. Die Verwendung der ermittelten 85 %-Fraktile würde jedoch die aktuellen Frachten insoweit überschätzen, als der untersuchte Zeitraum von 8 Uhr morgens bis 16 Uhr nachmittags erfahrungsgemäß einen relevant größeren Anteil an den täglichen Schmutzfrachten aufweist als lediglich 33,3 %. Da aus dem in Glehn aufgenommenen Datenmaterial keine abgesicherte zuverlässige Relation zwischen der Tagesteilfracht zwischen 8 Uhr und 16 Uhr gegenüber der Tagesgesamfracht ermittelt werden konnte, wurde an dieser Stelle auf eine Auswertung zurückgegriffen, die bei früheren Untersuchungen auf dem GWK Nordkanal des Ertverbandes ermittelt worden war (FG SWW 2010). Danach ergab sich derjenige Faktor, der den erhöhten Anteil der Tagesteilfracht zwischen 8 Uhr und 16 Uhr gegenüber der Tagesgesamfracht beschreibt, mit 1,25. Danach ergibt sich der in Abbildung 12 dargestellte Vergleich.

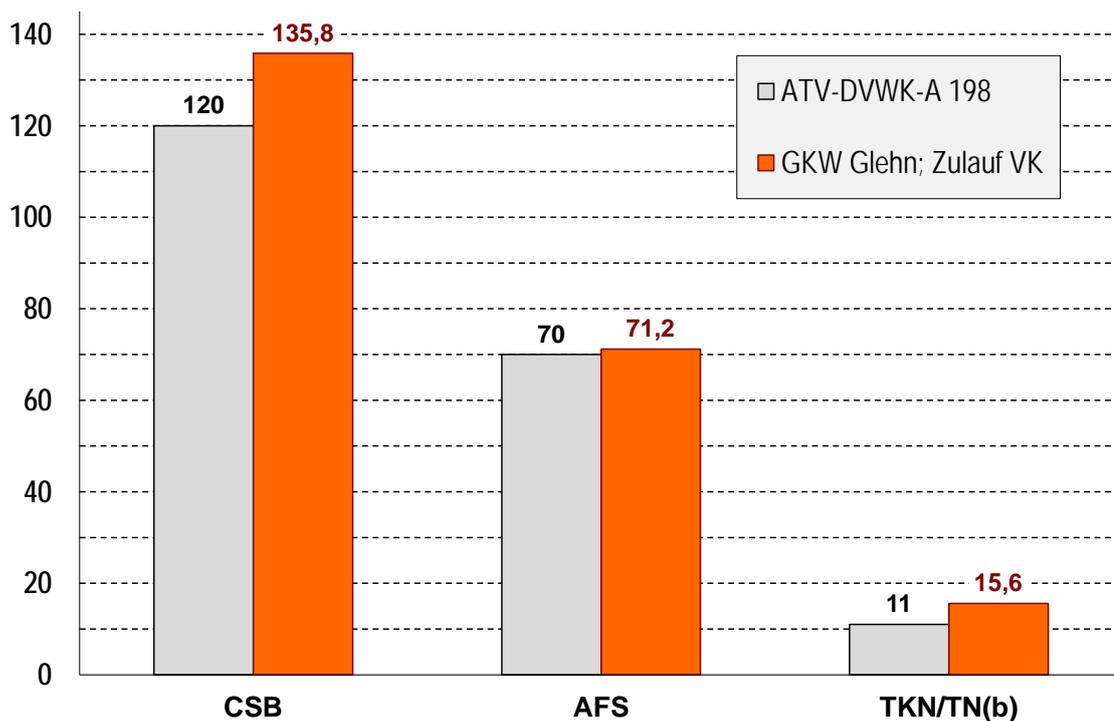


Abbildung 12: VK-Zulaufbelastung GWK Glehn – Vergleich mit Regelwerkswerten in $[g/(E \cdot d)]$

Fazit: Für die untersuchten Parameter liegen die einwohnerspezifischen Belastungen teilweise deutlich oberhalb der Literaturdaten (CSB, TN_b), teilweise auf einem vergleichbaren Niveau (AFS).

Zu den Parametern TKN und TN_b sei jedoch angemerkt, dass einerseits in Tabelle 1 des ATV-DVWK-A 198 Bezug genommen wird auf den Parameter TKN, dass andererseits jedoch in den hier durchgeführten Messreihen der Parameter TN_b gemessen wurde. TN_b enthält gegenüber TKN zusätzliche die anorganischen Stickstoffverbindungen Nitrat (NO_3-N) und Nitrit (NO_2-N), die im Zulauf zur Vorklärung schätzungsweise mindestens mit 1,5 mg/l bis 2,0 mg/l angesetzt werden können.

Hinzu kommt der zeitweilige Einfluss der Trübwassereinleitungen aus den Voreindickern, aus den Nacheindickern und aus der maschinellen Schlammwässerung in den Zulauf des Sandfanges.

2.3.1.4 Längsprofile der stofflichen Leistungsfähigkeit (nur Vorklärung)

Trockenwetterverhältnisse:

In der Abbildung 13 und der Abbildung 14 sind für die Parameter AFS_{GES} , AFS_{org} , AFS_{anorg} , CSB, TN_b und S_{NH_4} die gemessenen 2-Std.-Frachten dargestellt. Es handelt sich dabei um den Mittelwert aller insgesamt 35 Messintervalle. Zuflussschwache Nachtzuflüsse sind dabei nicht berücksichtigt. Die zugehörigen statistischen Daten sind den Box-Whisker-Diagrammen in Abbildung 15 zu entnehmen. In Abbildung 16 folgen die zugehörigen Eliminationsraten der einzelnen MAV-Stufen Vorklärung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

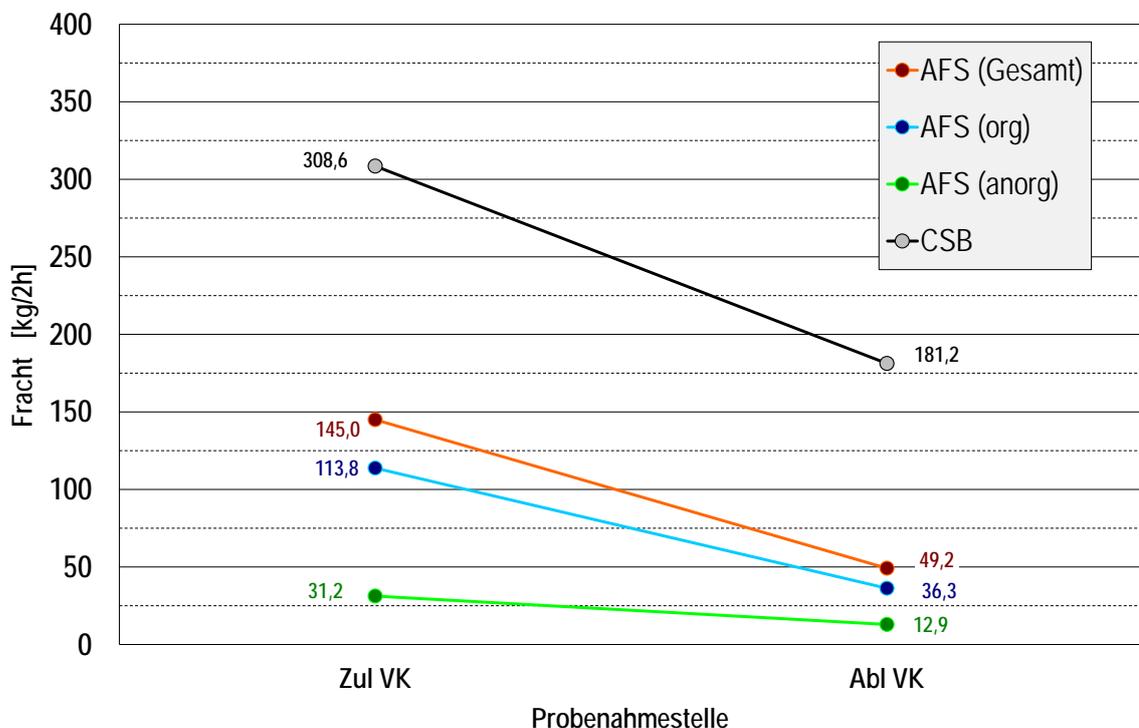


Abbildung 13: TW - Längsprofile AFS und CSB (Vorklärung)

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

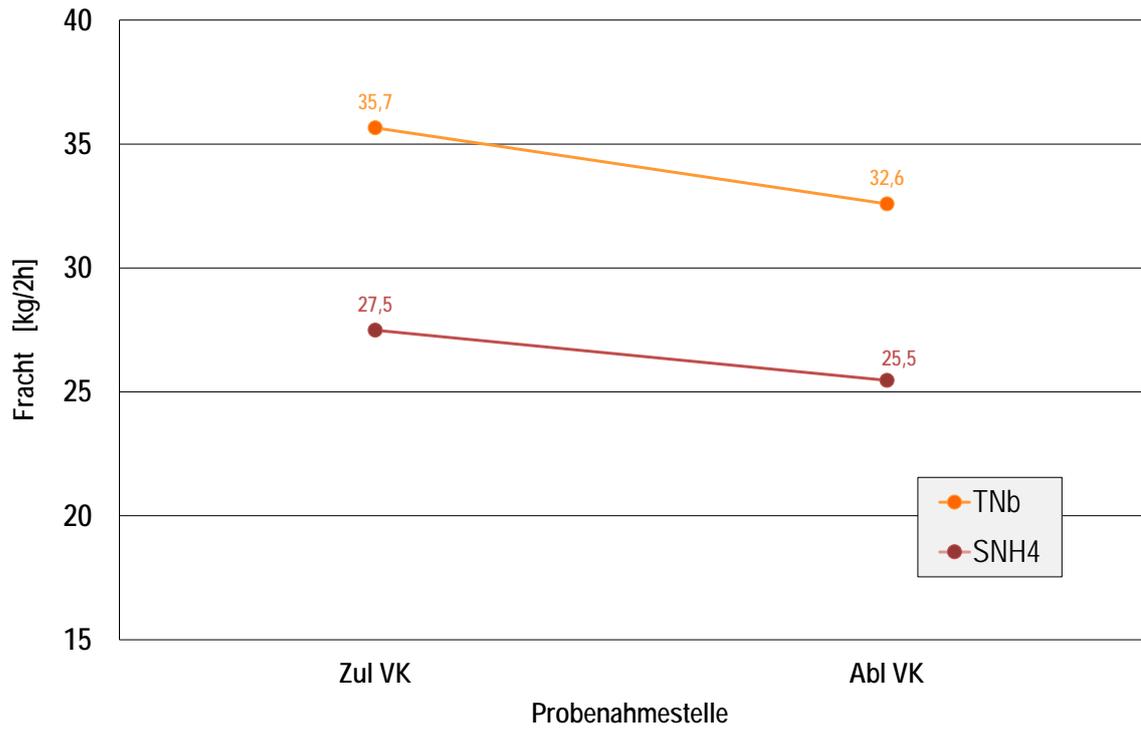


Abbildung 14: TW - Längsprofile Stickstoff (Vorklärung)

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

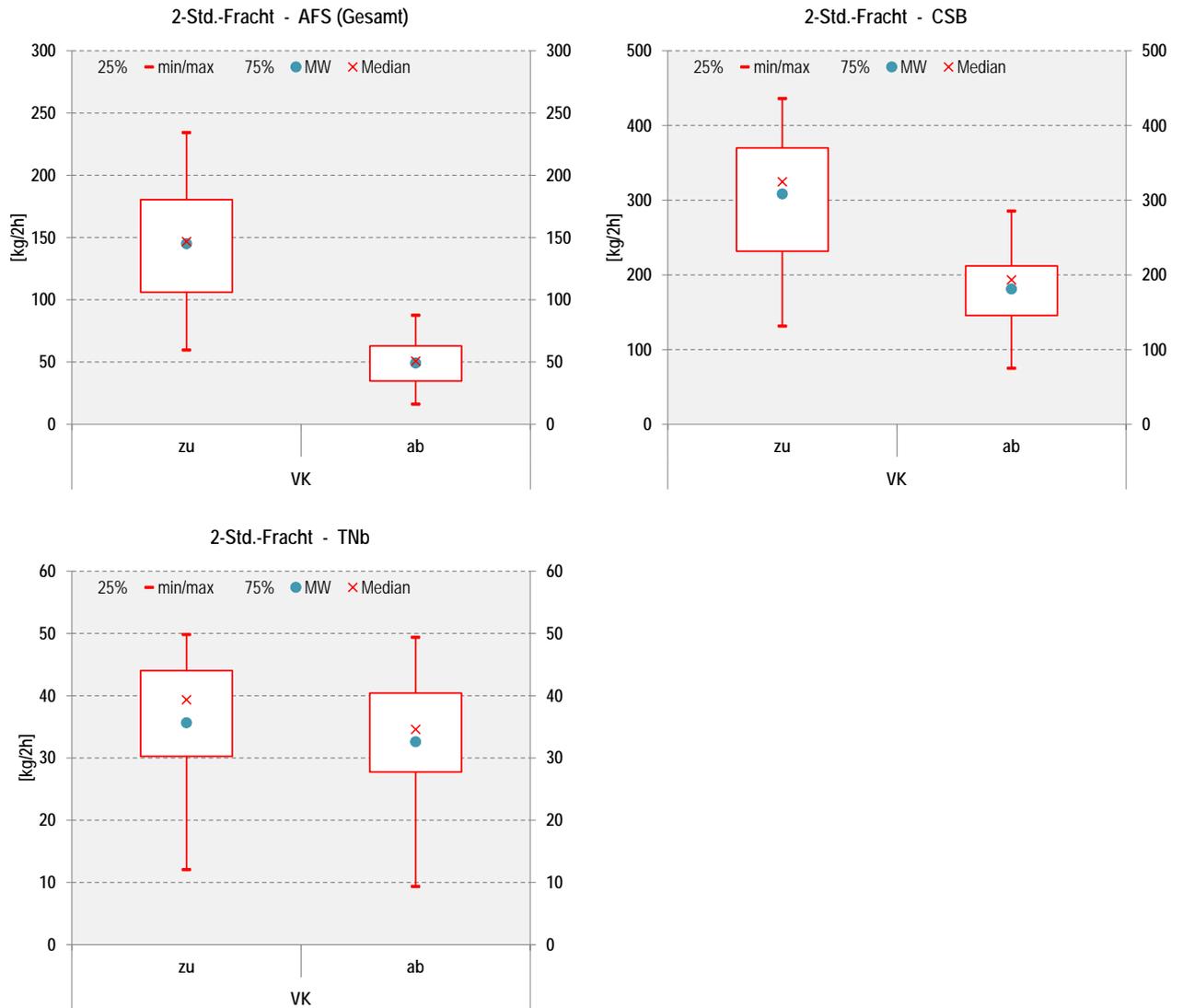


Abbildung 15: TW - Box-Whisker-Diagramme (Vorklärung)

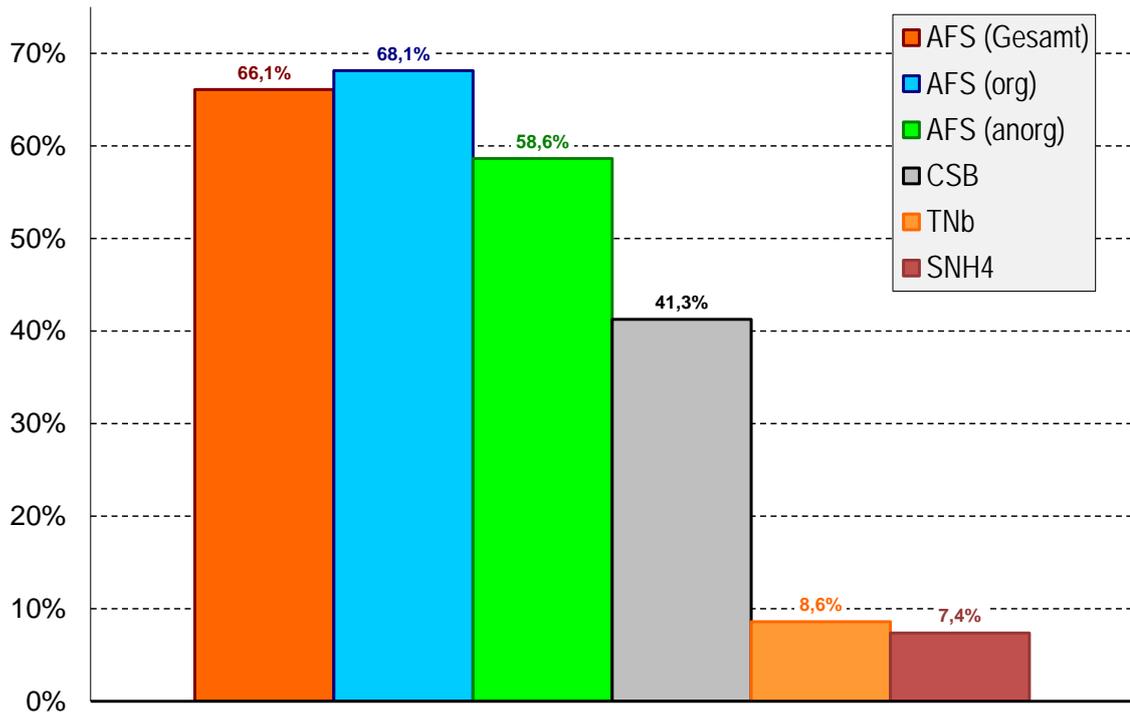


Abbildung 16: TW - Eliminationsraten (Vorklä rung)

Fazit:

Im Vergleich zu den Standard-Eliminationsraten aus dem DWA-Regelwerk ATV-DVWK-A A 198 (2003) sind die erzielten Frachtreduktionen auf dem GWK Glehn unter Ansatz einer mittleren Aufenthaltszeit im Vorklä rbecken von 1,5 Stunden hinsichtlich der Parameter AFS (66 % gegenüber 60 %) und CSB (41 % gegenüber 35 %) leicht erhöht. Für den Parameter TN_b liegt sie auf einem nahezu identischen Niveau (8,6 % gegenüber 10 %). Der organische Feststoffanteil wird durch die Vorklä rung von 79 % auf 74 % reduziert.

Trotz der gegenüber dem Technischen Regelwerk erhöhten CSB-Reduktion ergibt sich aus diesen Messungen kein Hinweis auf eine unzureichende Versorgung der nachfolgenden biologischen Stufe mit organischem Substrat. Vergleicht man, analog zu Abbildung 12, die einwohnerspezifische Ablaufbelastung hinter der Vorklä rstufe des GWK Glehn, ergibt sich das in Abbildung 17 dargestellte Bild. Hinsichtlich der Parameter TKN und TN_b gelten obige Anmerkungen entsprechend.

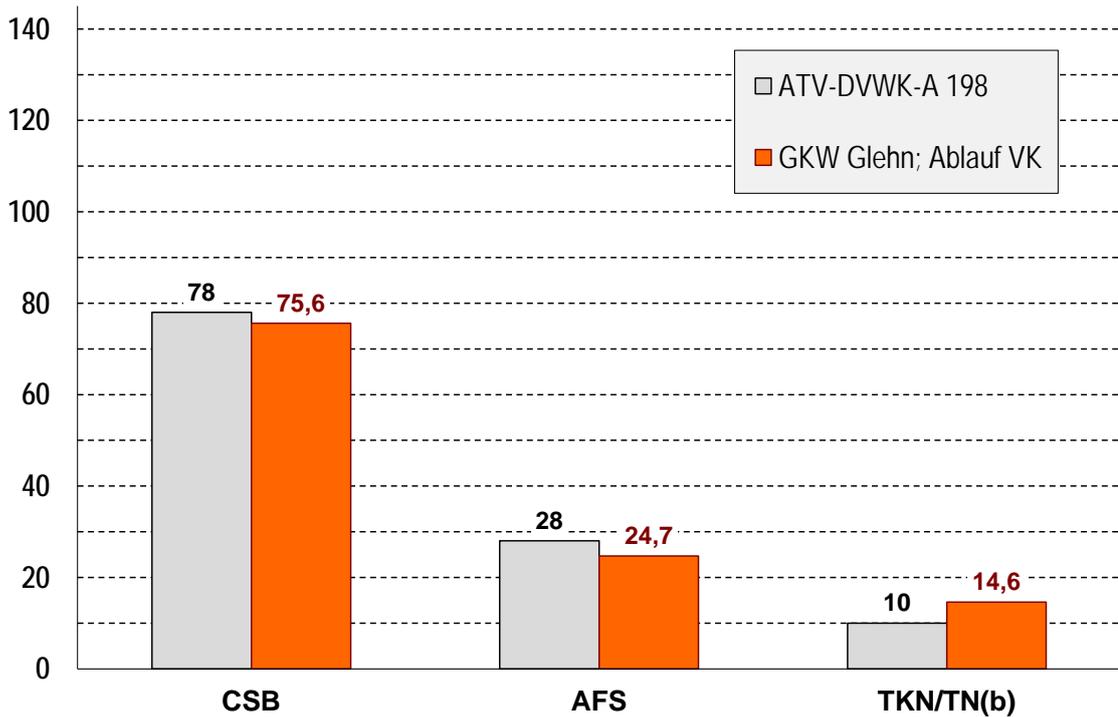


Abbildung 17: VK-Ablaufbelastung GWK Glehn – Vergleich mit Regelwerkswerten in $[g/(E \cdot d)]$

Regenwetterverhältnisse:

In der Abbildung 18 und der Abbildung 19 sind für die Parameter AFS_{GES} , AFS_{org} , AFS_{anorg} , CSB, TN_b und S_{NH4} die gemessenen 2-Std.-Frachten dargestellt. Es handelt sich dabei um den Mittelwert aller insgesamt 17 Messintervalle. Die zugehörigen statistischen Daten sind den Box-Whisker-Diagrammen in Abbildung 20 zu entnehmen. In Abbildung 21 folgen die zugehörigen Eliminationsraten der einzelnen MAV-Stufen Vorklämung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

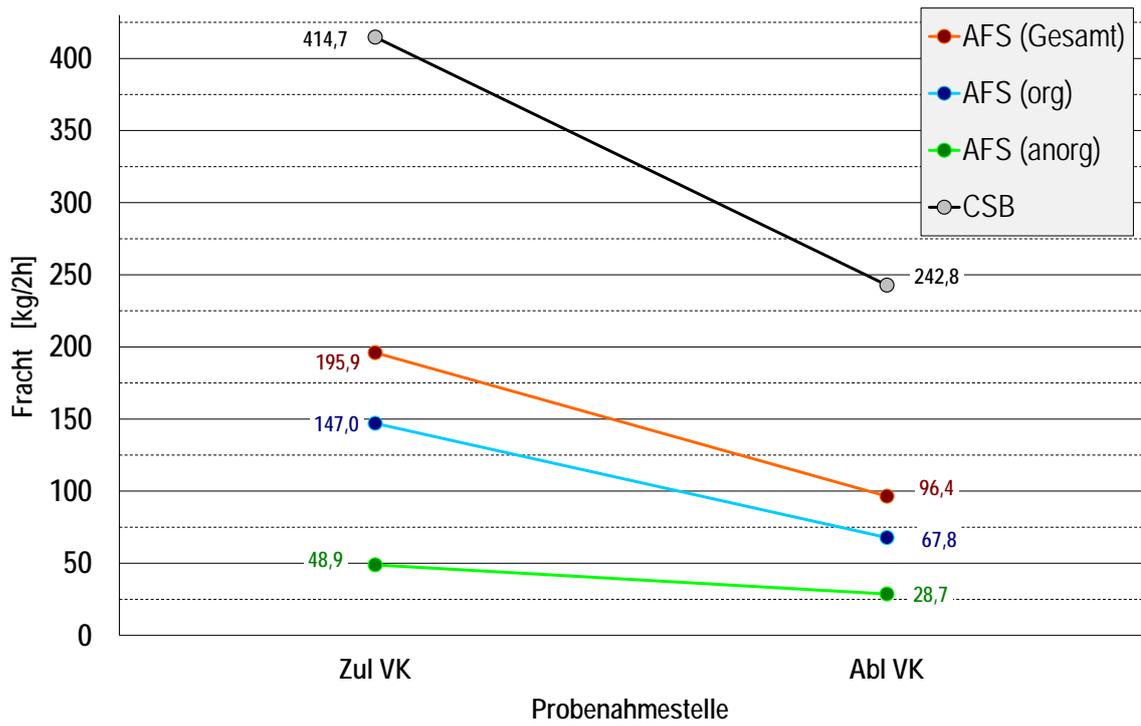


Abbildung 18: RW - Längsprofile AFS und CSB (Vorklärung)

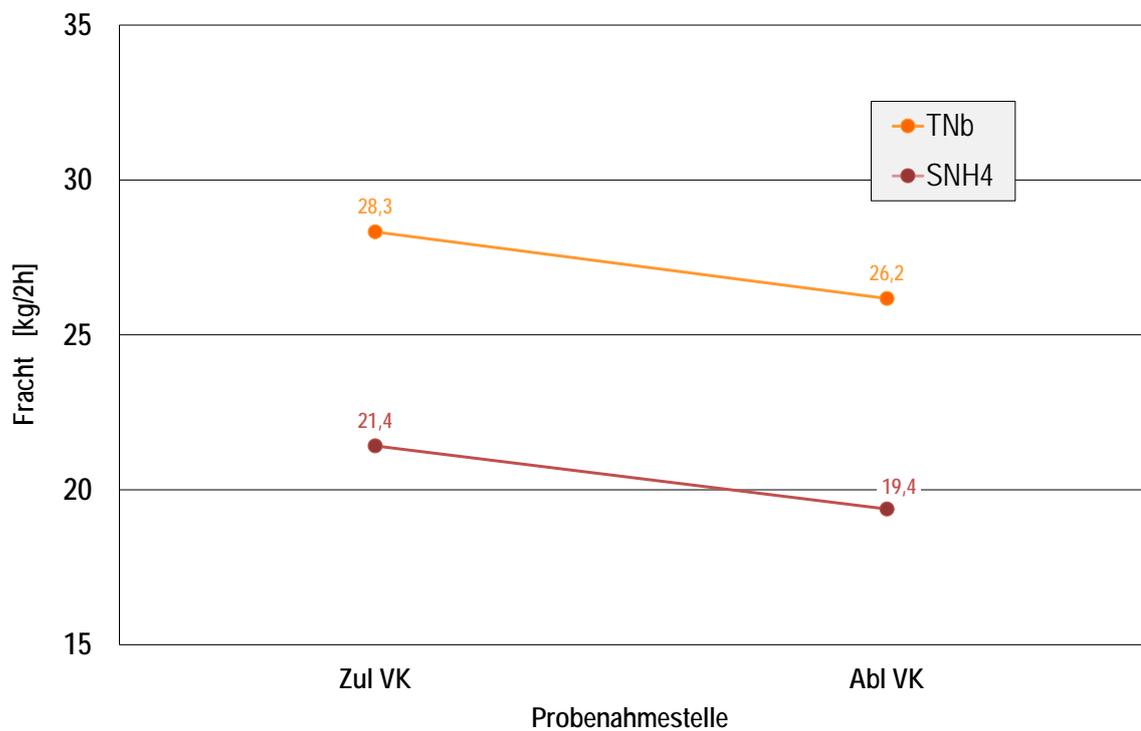


Abbildung 19: RW - Längsprofile Stickstoff (Vorklärung)

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

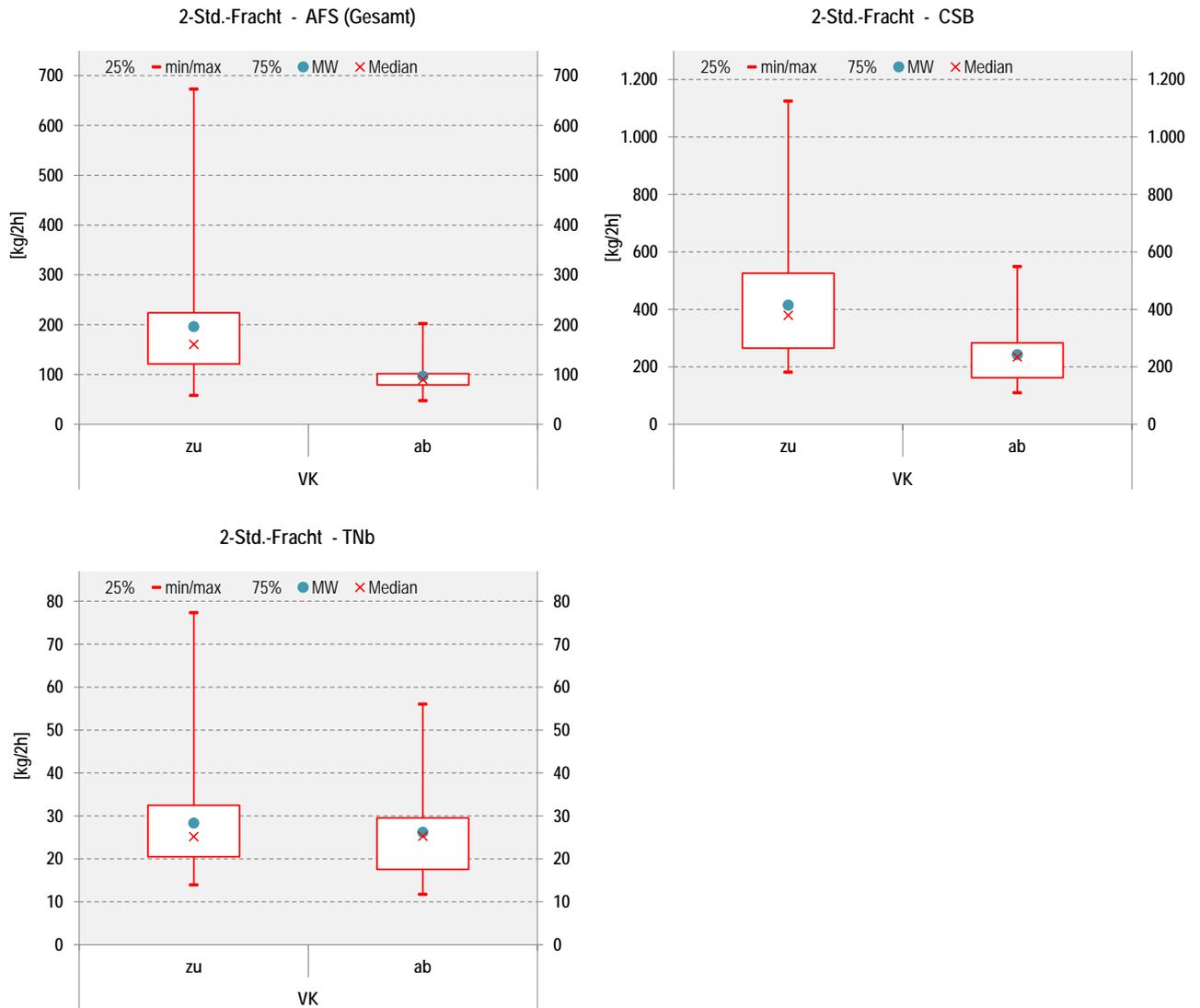


Abbildung 20: RW - Box-Whisker-Diagramme (Vorklärung)

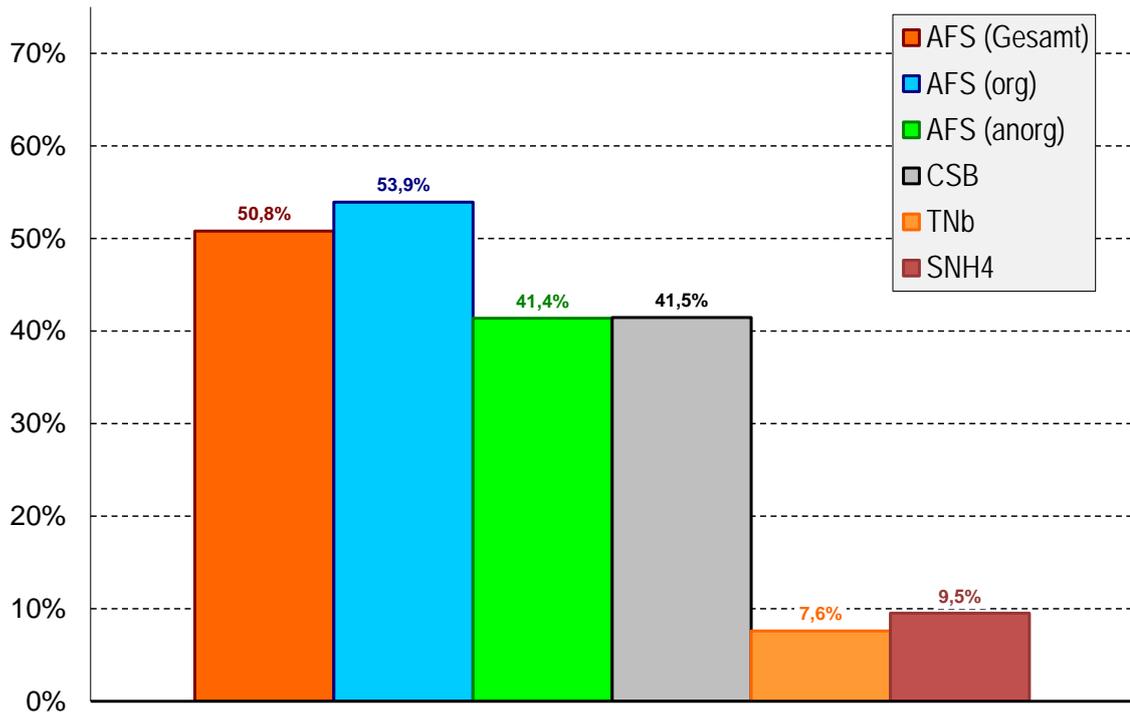


Abbildung 21: RW - Eliminationsraten (Vorklämung)

Fazit:

Im Vergleich zu den Eliminationsraten unter Trockenwetterbedingungen sinkt die erzielte AFS-Frachtreduktion auf dem GWK Glehn unter Ansatz einer mittleren Aufenthaltszeit im Vorklärbecken von 0,5 Stunden erwartungsgemäß sehr deutlich ab (51 % gegenüber 66 %). Für die Parameter CSB (41,5 % gegenüber 41,3 %) und TN_b liegt sie auf einem nahezu identischen Niveau (7,6 % gegenüber 8,6 %). Der organische Feststoffanteil wird durch die Vorklämung von 75 % auf 70 % reduziert.

Nachtzulauf:

Da bei einer hydraulischen Differenzierung der Nachtzulauf die niedrigste hydraulische Belastung der Kläranlage darstellt, wurden für die folgende Auswertung lediglich die 6 Messintervalle unter Trockenwetterbedingungen herangezogen. Die korrespondierenden Aufenthaltszeiten t_{VK} in der Vorklämung lagen zu den Probenahmezeitpunkten zwischen 163 und 338 Minuten (2,7 bis 5,6 Stunden).

In der Abbildung 22 und der Abbildung 23 sind für die Parameter AFS_{GES}, AFS_{org}, AFS_{anorg}, CSB, TN_b und SNH₄ die gemessenen 2-Std.-Frachten dargestellt. Es handelt sich dabei um den Mittelwert aller Messintervalle. Die zugehörigen statistischen Daten sind den Box-Whisker-Diagrammen in Abbildung 24 zu entnehmen. In Abbildung 25 folgen die zugehörigen Eliminationsraten der einzelnen MAV-Stufen Vorklämung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

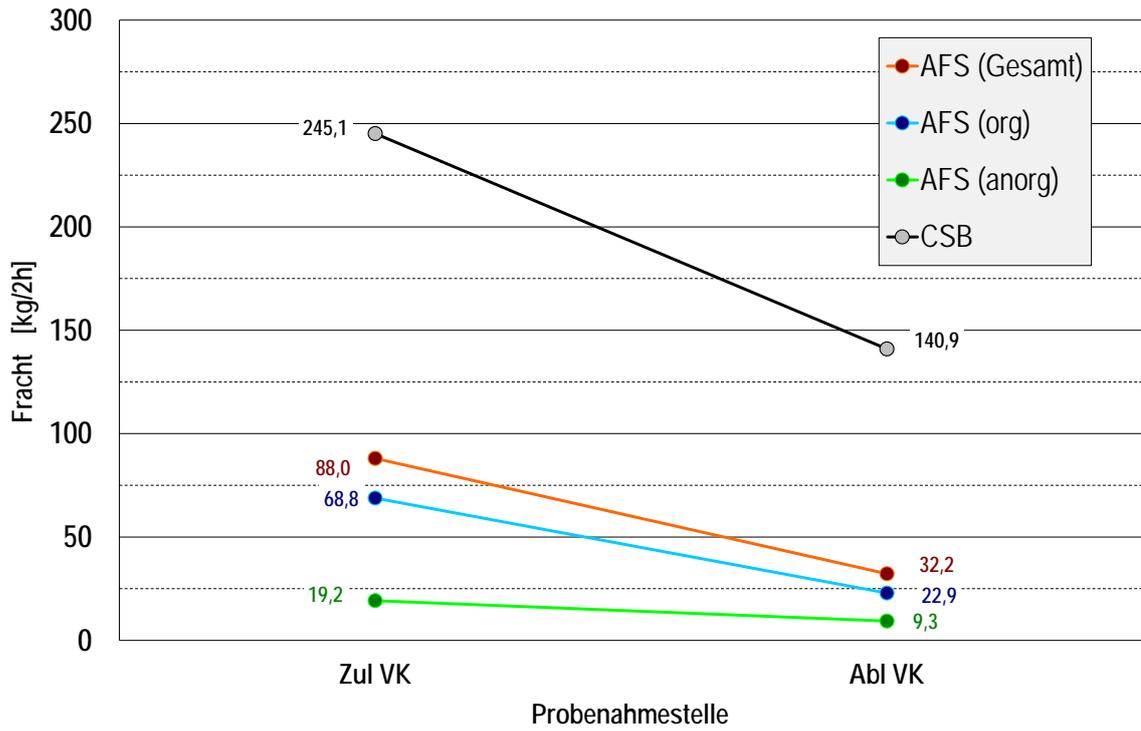


Abbildung 22: Nachtzulauf - Längsprofile AFS und CSB (Vorklärung)

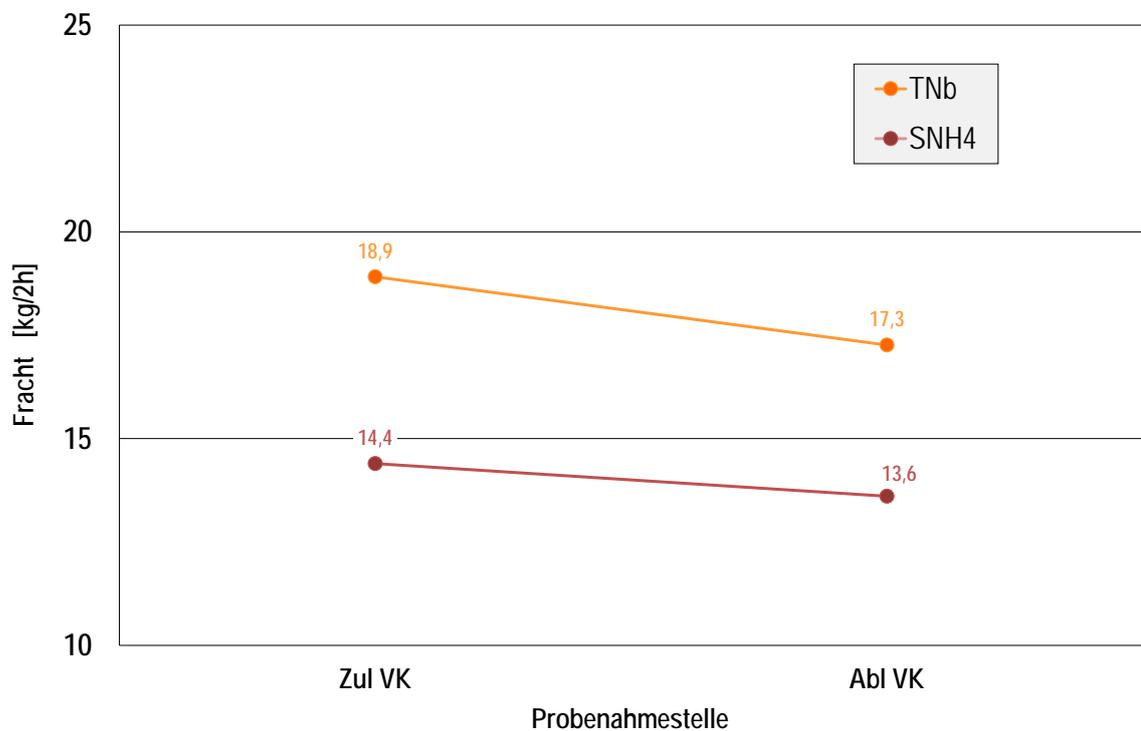


Abbildung 23: Nachtzulauf - Längsprofile Stickstoff (Vorklärung)

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

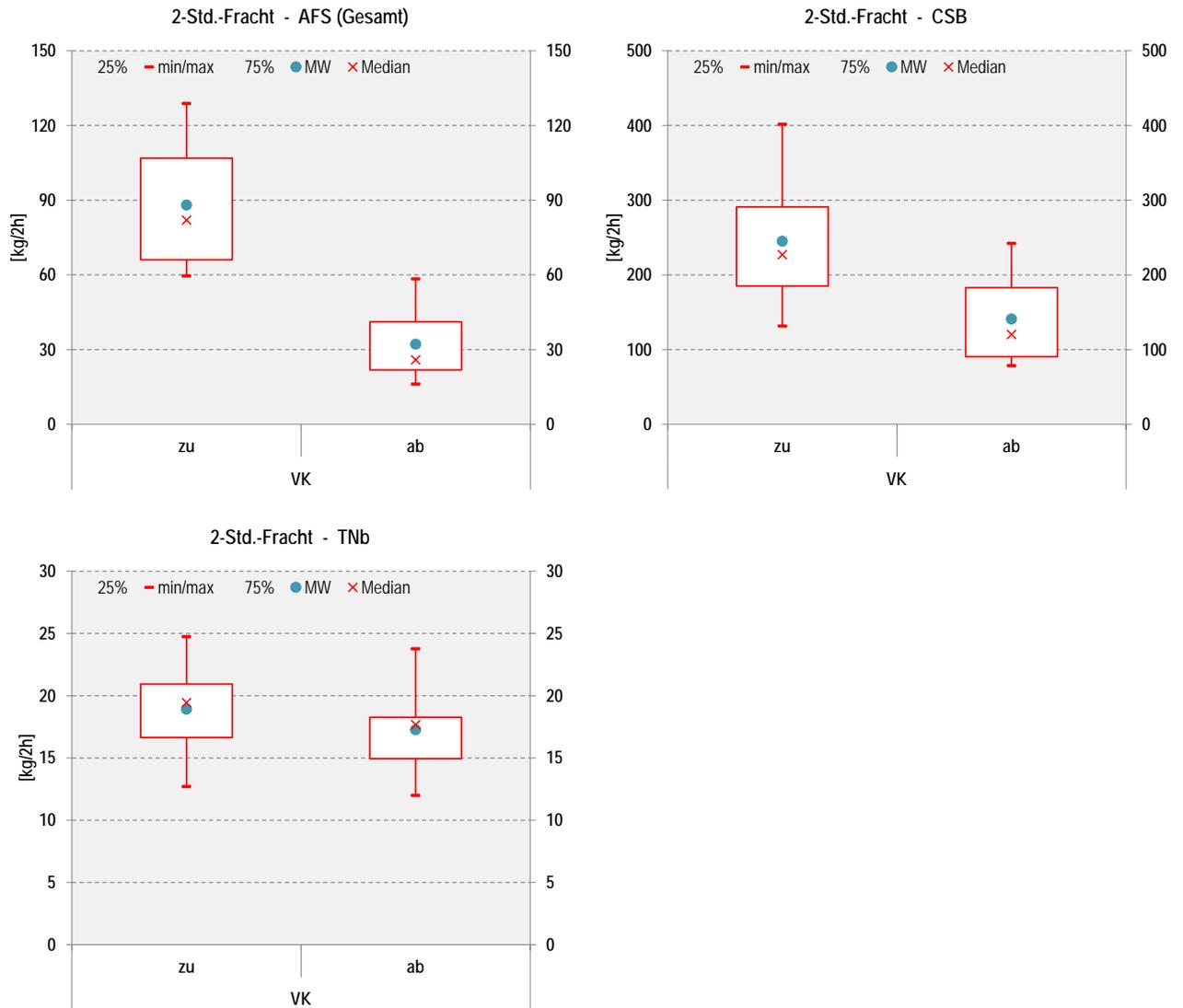


Abbildung 24: Nachtzulauf - Box-Whisker-Diagramme (Vorklärung)

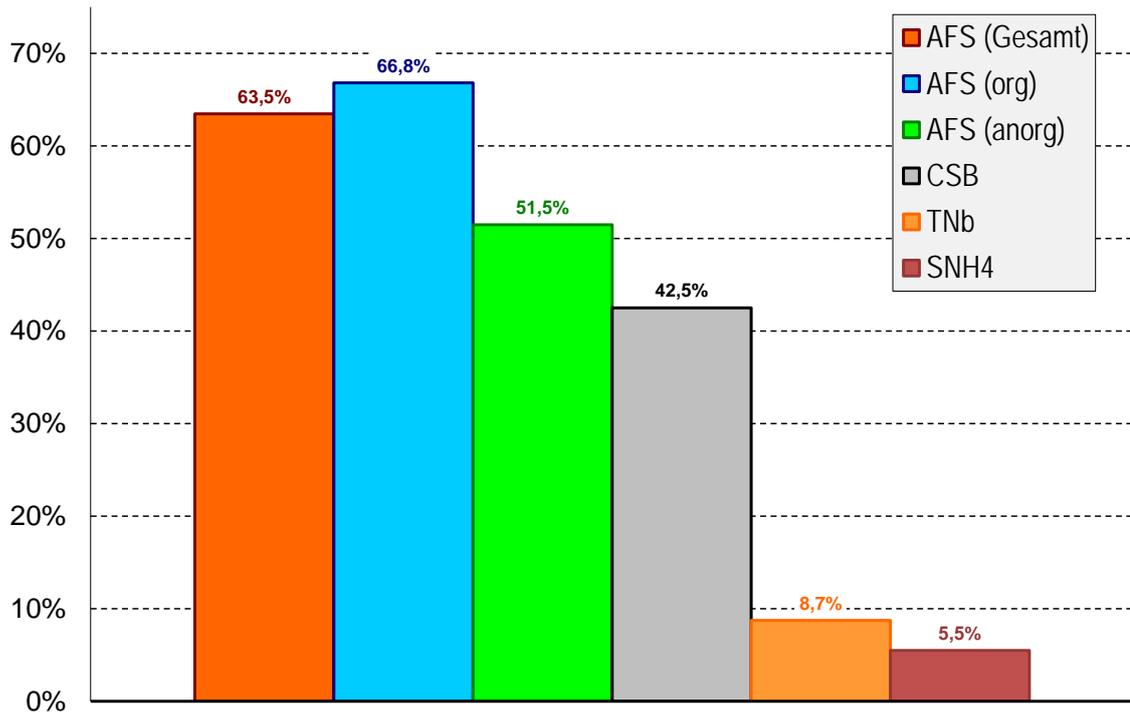


Abbildung 25: Nachtzulauf - Eliminationsraten (Vorklämung)

Fazit:

Im Vergleich zu den Eliminationsraten unter Trockenwetterbedingungen ändert sich die erzielte AFS-Frachtreduktion auf dem GWK Glehn unter Ansatz einer mittleren Aufenthaltszeit im Vorklärbecken von ca. 4 Stunden kaum (64 % gegenüber 66 %). Für die Parameter CSB (42,5 % gegenüber 41,3 %) und TN_b liegt sie auf einem identischen Niveau (8,7 % gegenüber 8,6 %). Der organische Feststoffanteil wird durch die Vorklämung von 78 % auf 71 % reduziert.

Als Gesamtfazit der Messphase 1 wurde in Abstimmung mit dem Erftverband entschieden, die Probenahmesystematik der Sackfiltration im Hinblick auf die bereits geplante Sieböffnungsweite auf dem GWK Nordkanal von 1,5 mm Lochgeometrie anzupassen und in den nachfolgenden Messphasen auf den separaten Untersuchungsbetrieb eines kleinmaßstäblichen Siebes zu verzichten. Nähere Erläuterungen folgen im folgenden Kap. 2.3.2.

2.3.2 Messphase 2 auf dem GWK Glehn**2.3.2.1 Änderung der Probenahmesystematik der Sackfiltration**

Zur Bestimmung des Parameters AFS wurden in der Messphase 1 Filtersäcke eingesetzt, um größere Probevolumina (ca. 80 L/2h) untersuchen und damit eine höhere Repräsentativität gewährleisten zu können. Die Filtrationssäcke hatten dafür eine Öffnungsweite von 190 µm (ca. 0,2 mm), die historisch bedingt aus früheren Untersuchungen auf dem GWK Nordkanal übernommen worden war.

Nach den Erkenntnissen der Messphase 1 wurde im Anschluss an eine Materialrecherche beschlossen, die Beschaffenheit der für die Sackfiltration verwendeten Filtrationssäcke zu verändern und Filtrationssäcke mit einer Öffnungsweite von 1,0 mm Maschengemetrie zu verwenden. Die Wahl einer 1,0 mm Maschengemetrie erfolgte im Hinblick auf die geplante Sieböffnungsweite auf dem GWK Nordkanal von 1,5 mm Lochgeometrie. Maschenöffnungen von 1,0 mm Kantenlänge weisen in ihren Diagonalen ein Maß von ca. 1,4 mm auf. Abbildung 26 zeigt den verwendeten Filtrationssack.



Abbildung 26: Filtrationssack mit 1,0 mm Maschengemetrie

Zur AFS-Bestimmung werden die Säcke vor und nach erfolgter täglicher Probenahme im Trockenschrank bei 105°C getrocknet und anschließend gewogen. Das bei der Sackfiltration entstehende Filtrat wird ebenfalls beprobt und auf den Parameter AFS (0,45 µm) hin untersucht.

Eine zusätzliche Anpassung bestand darin, die Filtrationssäcke in den 2-Std.-Probenahmeintervallen kontinuierlich mit Hilfe einer Kreiselpumpe zu beschicken und somit von der diskontinuierlichen, manuellen Probenahme abzuweichen. Dies erfolgte in der Absicht, die Probenahmeholumina abermals zu steigern und die Repräsentativität der Ergebnisse zu erhöhen. Auf diese Art und Weise konnten im Zulaufbereich der Vorklärung zwischen 1 m³ und 3 m³ Abwasser in den 2-Std.-Probenahmeintervallen filtriert werden. Die unterschiedlichen Volumina ergaben sich aus den unterschiedlichen Feststoffkonzentrationen im Abwasser, abhängig von Trocken- oder Regenwetterbedingungen und damit einhergehend mit der veränderlichen Durchlässigkeit der Filtrationssäcke. Im Ablaufbereich der Vorklärung konnten deutlich höhere Abwassermengen von 6 m³ bis 7 m³ filtriert werden. Diese

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

Mengen orientierten sich ausschließlich an der maximalen Förderleistung der eingesetzten Kreiselpumpen.

Abbildung 27 zeigt diesen Probenahmebetrieb.



Abbildung 27: kontinuierlicher Probenahmebetrieb mit Filtrations sack

2.3.2.2 Messprogramm

Tabelle 4 zeigt das Messprogramm für die Untersuchungen, die vom 25. bis 29. April 2016 auf dem GWK Glehn durchgeführt wurden. Dabei wird jetzt zusätzlich relevant die Fraktionierung nach der Größe der entnommenen Feststoffe $AFS_{>1,0}$, $AFS_{<1,0}$. Im Unterschied zur Messphase 1 wurde auf jegliche Stickstoffanalytik verzichtet.

Die nachstehende Abbildung 28 zeigt den untersuchten Teil des Anlagenschemas mit den zwei verbleibenden Probenahmestellen.

Tabelle 4: Messprogramm Messphase 2

Ort der Probenahme	AFS_{GES} , $AFS_{>1,0}$, $AFS_{<1,0}$, AFS_{org} , AFS_{anorg} (Sack/Filtrat)	CSB (Sack/Filtrat)
Zulauf Vorklärung PN1	2-Std.-Mischproben (V: ca. 1 m ³ bis 3 m ³)	
Ablauf Vorklärung PN2	2-Std.-Mischproben (V: ca. 6 m ³ bis 7 m ³)	

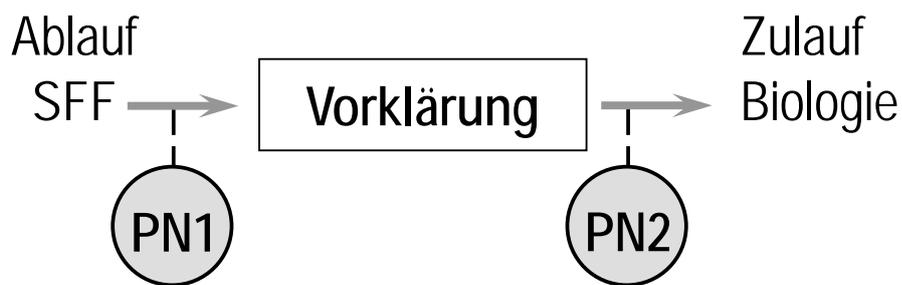


Abbildung 28: Probenahmestellen MP2 (GWK Glehn)

Stufen Vorklärung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

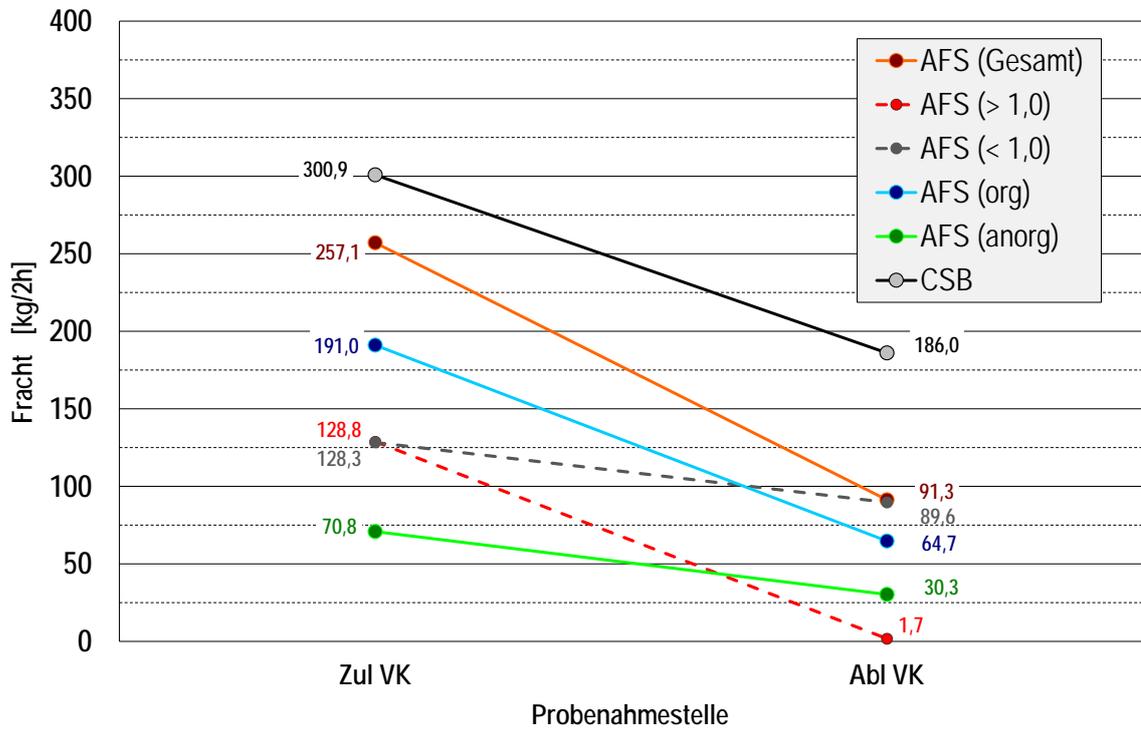


Abbildung 30: Längsprofile AFS_{GES}, AFS_{>1,0}, AFS_{<1,0}, AFS_{org}, AFS_{anorg} und CSB (MP2 Glehn)

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

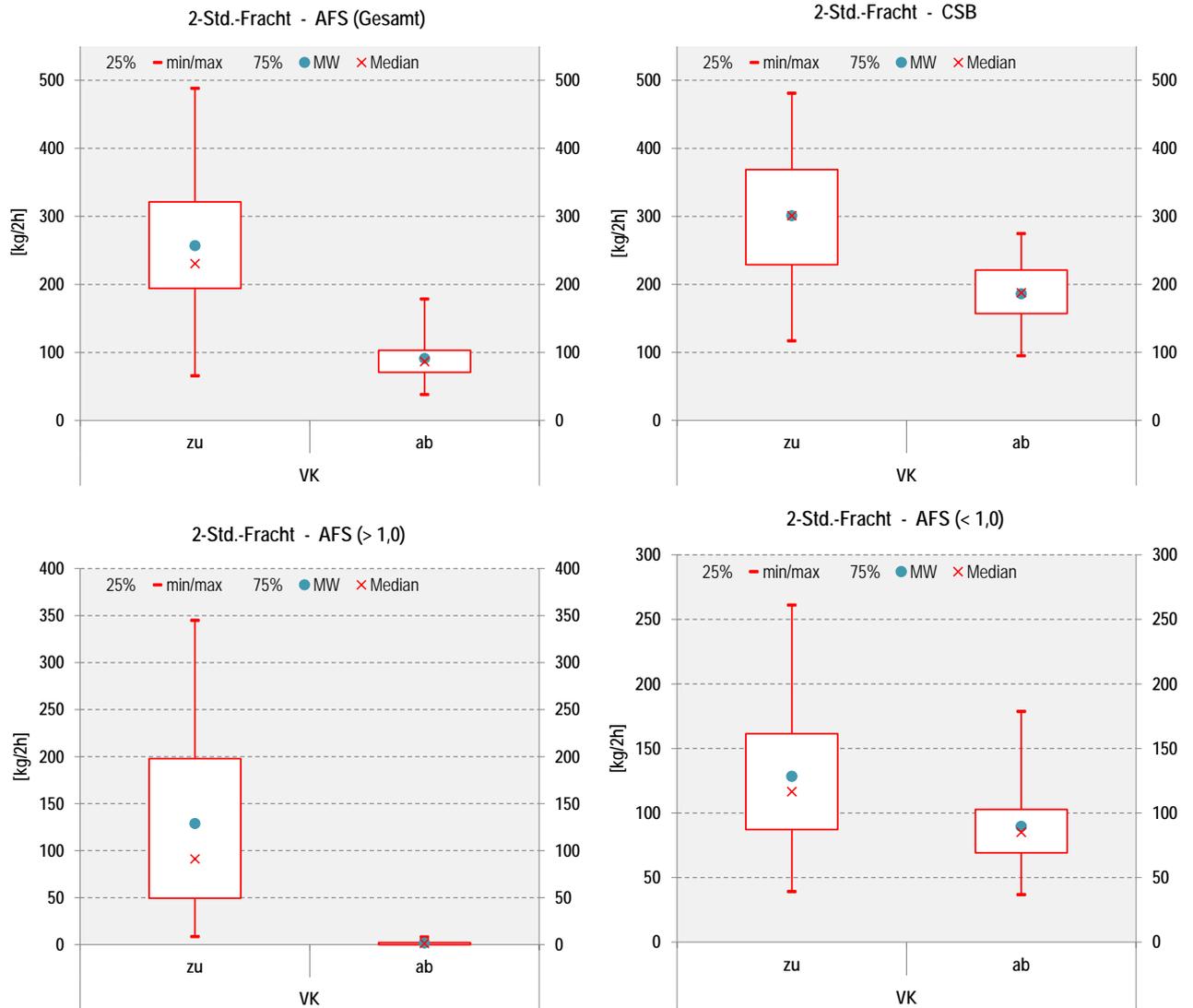


Abbildung 31: Box-Whisker-Diagramme (MP2 Glehn)

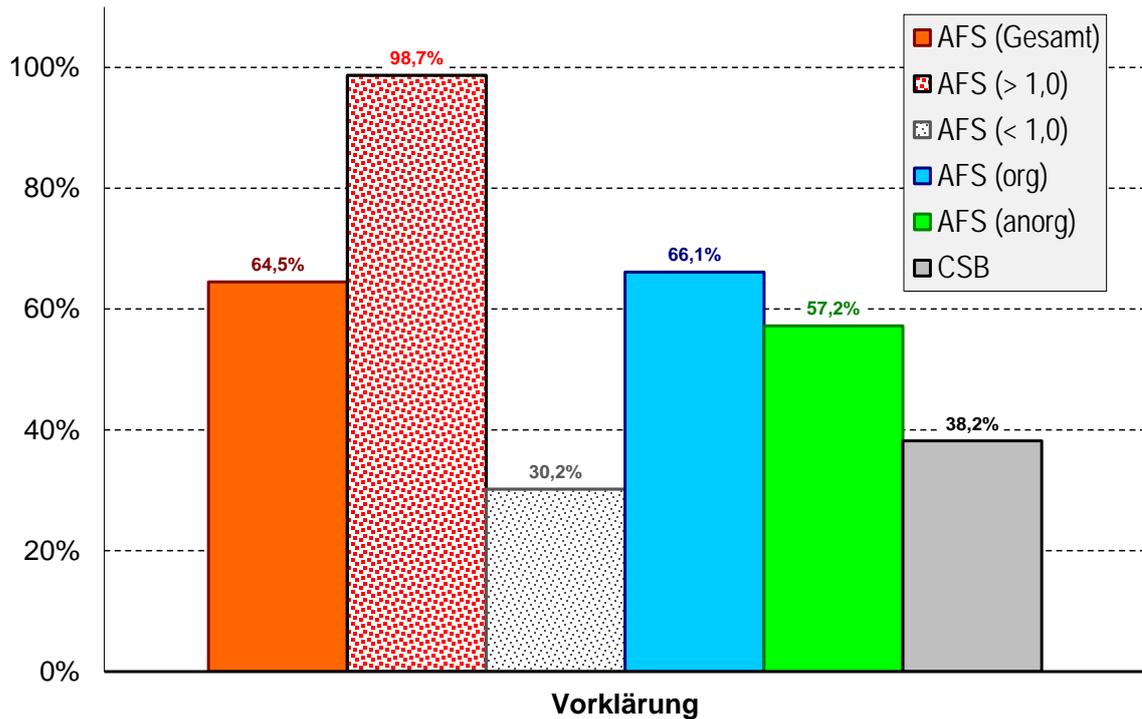


Abbildung 32: Eliminationsraten (MP2 Glehn)

Fazit:

Im Vergleich zu den Standard-Eliminationsraten aus dem DWA-Regelwerk ATV-DVWK-A A 198 (2003) sind die erzielten Frachtreduktionen auf dem GWK Glehn unter Ansatz einer mittleren Aufenthaltszeit im Vorkläerbecken von < 1,0 Stunden hinsichtlich der Parameter AFS_{GES} (64 % gegenüber 50 %) und CSB (38 % gegenüber 30 %) zum Teil deutlich erhöht. Mit Blick auf das Erfordernis organischen Substrates in der nachfolgenden biologischen Stufe ist jedoch zu konstatieren, dass in dieser Messphase 2 die CSB-Reduktion aufgrund der kürzeren Aufenthaltszeit in der Vorklärstufe geringer ausfiel als in Messphase 1 (38 % gegenüber 41 %). Der organische Feststoffanteil wurde während dieser Messphase durch die Vorklärung nicht verändert (ca. 70 %).

Hinsichtlich der durchgeführten AFS-Größenfraktionierung ist zu konstatieren, dass im Ablauf der Vorklärung nur noch eine sehr geringe messbare Konzentration $AFS_{>1,0}$ festgestellt werden konnte. Sie wurde im Rahmen dieser 5-tägigen, mehrheitlich regenwettergeprägten Messphase zu 98% in der Vorklärung entnommen.

Übertragen auf eine MBR-Anlage ergäbe sich daraus die Schlussfolgerung, dass der zusätzliche Betrieb eines Siebes hinter der Vorklärung zum Schutz der Membranmodule in der MBR-Stufe nicht zwingend notwendig erscheint. Jedoch wird empfohlen, eine solche Entscheidung durch eine zusätzliche Kontrolluntersuchung auf dem GWK Glehn zu verifizieren.

2.3.3 Messphase 3 auf der KA Grevenbroich

2.3.3.1 Einführender Hinweis

Die Messphase 3 wurde entgegen der Planung wegen dringender Revisionsarbeiten am Vorklärbeckenräumer nicht auf dem GWK Glehn, sondern stattdessen auf der KA Grevenbroich durchgeführt. Der Ausfall des Vorklärbeckenräumers des GWK Glehn machte einen kontinuierlichen und störungsfreien Untersuchungsbetrieb unmöglich und ließ deutliche Einbußen bei der Qualität der erzielten Ergebnisse erwarten. Letztlich erwies sich die Verlegung des Untersuchungsstandortes nach Grevenbroich sogar noch in anderer Hinsicht als der Untersuchungskontinuität als vorteilhaft. Hintergrund ist die dortige Ausführung der Rechenanlage.

Entgegen des üblichen Einsatzes von Filterstufenrechen, die eine eindimensionale Spaltgeometrie aufweisen, ist in Grevenbroich seit 2015 ein Filterbandrechen mit einer 8 mm – Lochgeometrie, also einer zweidimensionalen Öffnungsgeometrie in Betrieb (siehe Abbildung 8). Daraus resultierte die Annahme, dass bei Betrieb einer zweidimensionalen Rechengeometrie und einer nachfolgenden Vorklärung (nach einem Sandfang) kein weiteres Erfordernis einer Siebeinrichtung zum Schutze einer Membranfiltrationsstufe im biologischen Teil einer Kläranlage bestehen würde. Diese Theorie zu stützen war die Motivation für die Verlegung der Messphase 3 nach Grevenbroich.

2.3.3.2 Messprogramm

Tabelle 4 zeigt das Messprogramm für die Untersuchungen, die vom 09. bis 15. Juni 2016 auf der KA Grevenbroich durchgeführt wurden. Wie in Messphase 2 wurde auf jegliche Stickstoffanalytik verzichtet. Der untersuchte Teil des Anlagenschemas mit den beiden Probenahmestellen vor und hinter der Vorklärung ist identisch wie bereits aus Abbildung 28 ersichtlich.

Tabelle 5: Messprogramm Messphase 3

Ort der Probenahme	AFS _{GES} , AFS _{>1,0} , AFS _{<1,0} , AF-S _{org} , AFS _{anorg} (Sack/Filtrat)	CSB (Sack/Filtrat)
Zulauf Vorklärung PN1	2-Std.-Mischproben (V: ca. 1 m ³ bis 3 m ³)	
Ablauf Vorklärung PN2	2-Std.-Mischproben (V: ca. 6 m ³ bis 8 m ³)	

2.3.3.3 Zulaufwassermenge und Aufenthaltszeit in der Vorklärung

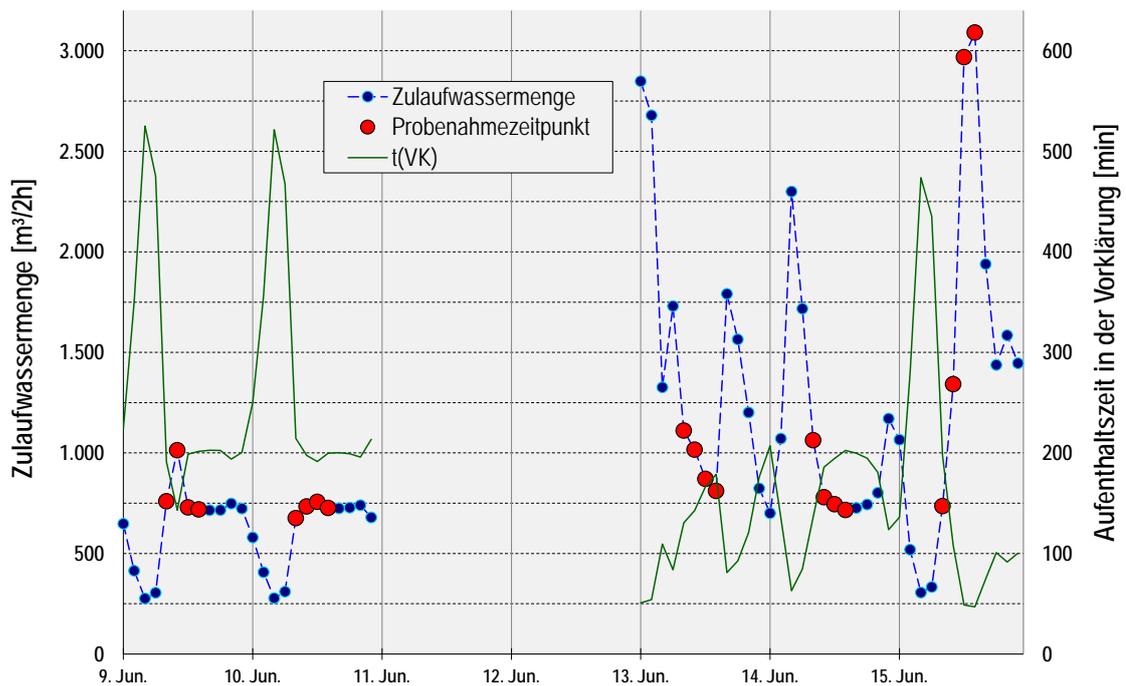


Abbildung 33: Zulaufwassermengen KA Grevenbroich Juni 2016

In Abbildung 33 sind die Tageszulaufwassermengen für die KA Grevenbroich im zeitlichen Umfeld der Messphase dargestellt. Von den 5 Messtagen herrschten an 4 Tagen durchgehend Trockenwetterbedingungen, während es sich bei dem verbleibenden 5.Tag um Misch- und Regenwetterbedingungen handelte.

Außerdem enthält die Abbildung 33 die mit den Zulaufwassermengen korrespondierenden Aufenthaltszeiten t_{VK} in der Vorklärung. So lag t_{VK} zu den Probenahmezeitpunkten an den Trockenwettertagen zwischen 130 und 215 Minuten (2,2 bis 3,6 Stunden). Zu den Probenahmezeitpunkten mit Misch- und Regenwetterkonditionen lag t_{VK} zwischen 47 und 108 Minuten (0,8 bis 1,8 Stunden). An dieser Stelle wird bereits deutlich, dass das Vorklärbecken auf der KA Grevenbroich für die aktuellen Zulaufwassermengen (bzw. die diesen Wassermengen zu Grunde liegenden EW-Belastungen) drastisch überdimensioniert ist.

2.3.3.4 Längsprofile der stofflichen Leistungsfähigkeit (alle Tage)

In der Abbildung 34 sind für die Parameter AFS_{GES} und CSB die gemessenen 2-Std.-Frachten dargestellt. Dabei ist der Parameter AFS_{GES} zusätzlich fraktioniert nach den Anteilen AFS_{org} und AFS_{anorg} sowie insbesondere nach den Größenfraktionen $AFS_{>1,0}$ und $AFS_{<1,0}$. Es handelt sich dabei um den Mittelwert aller insgesamt 20 Messintervalle. Die zugehörigen statistischen Daten sind den Box-Whisker-Diagrammen in Abbildung 35 zu

entnehmen. In Abbildung 36 folgen die zugehörigen Eliminationsraten der einzelnen MAV-Stufen Vorklärung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

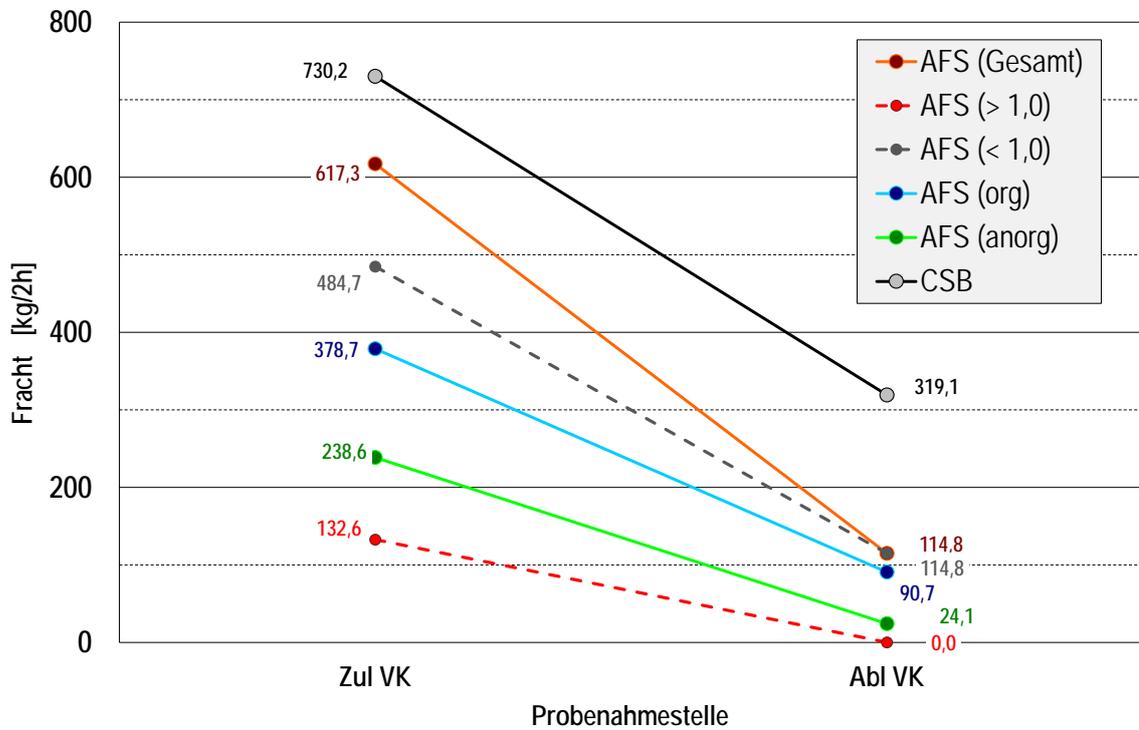


Abbildung 34: Längsprofile AFS_{GES} , $AFS_{>1,0}$, $AFS_{<1,0}$, AFS_{org} , AFS_{anorg} und CSB (MP3 Grevenbroich)

Umrüstung GKW Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

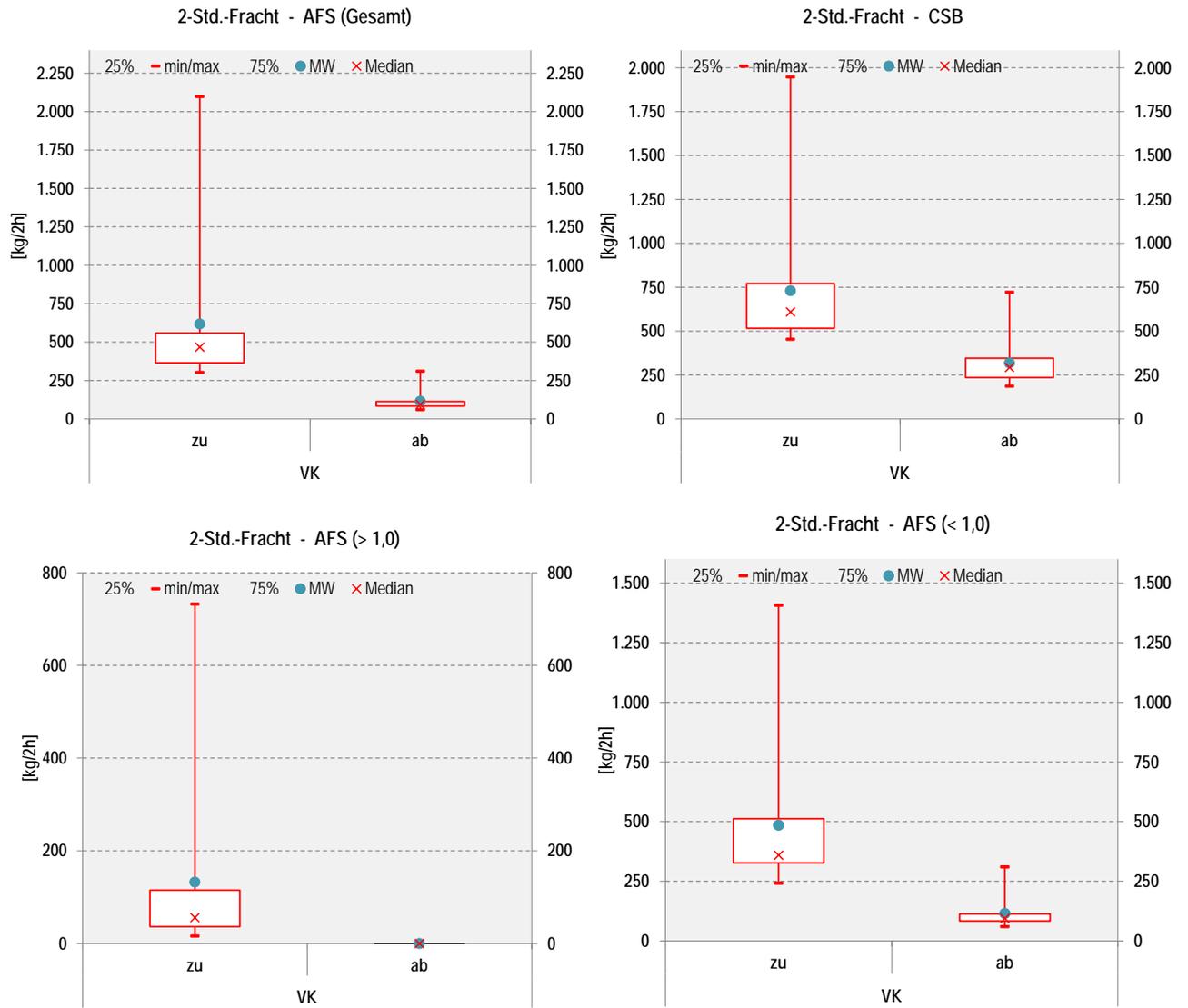


Abbildung 35: Box-Whisker-Diagramme (MP3 Grevenbroich)

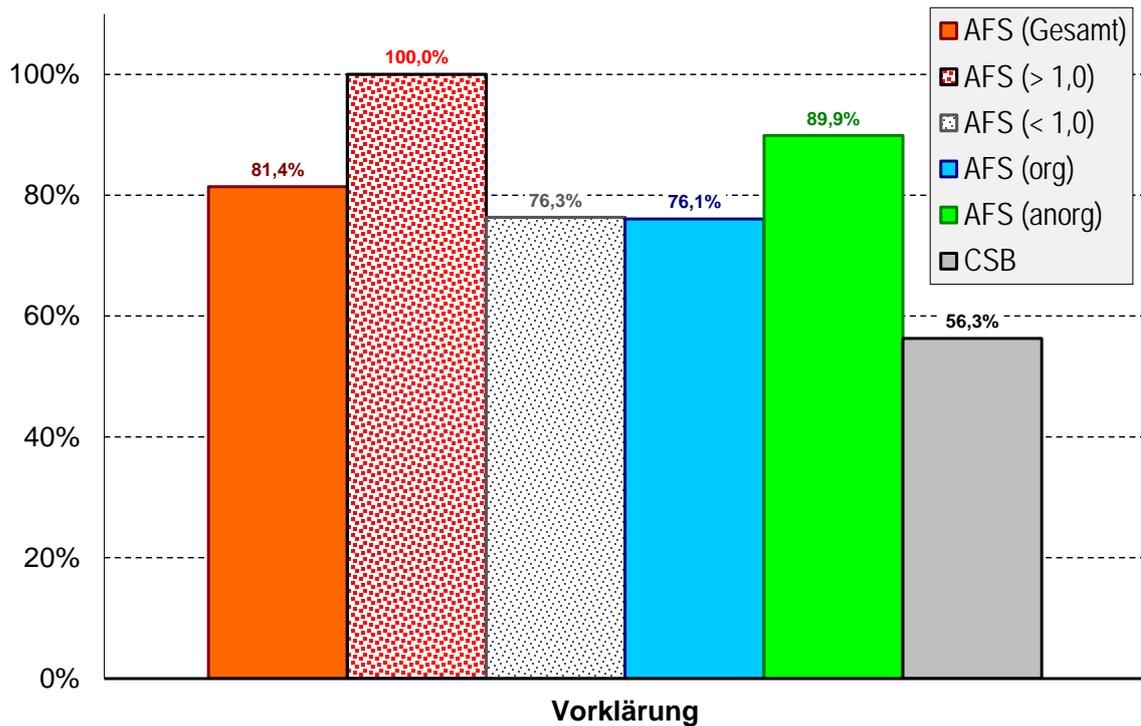


Abbildung 36: Eliminationsraten (MP3 Grevenbroich)

Fazit:

Im Vergleich zu den Standard-Eliminationsraten aus dem DWA-Regelwerk (ATV-DVWK-A A 198 (2003)) sind die erzielten Frachtreduktionen auf der KA Grevenbroich unter Ansatz einer mittleren Aufenthaltszeit im Vorklärbecken von > 2,5 Stunden und bis zu 3,6 Stunden hinsichtlich der Parameter AFS_{GES} (81 % gegenüber 65 %) und CSB (56 % gegenüber 40 %) erwartungsgemäß hoch. Auffällig ist in Grevenbroich der hohe Entnahmegrad an anorganischem Feststoff, der dazu führt, dass sich der organische Feststoffanteil während dieser Messphase sehr deutlich erhöht (80 % gegenüber vorher 65 %).

Hinsichtlich der durchgeführten AFS-Größenfraktionierung ist zu konstatieren, dass im Ablauf der Vorklämung keine messbare Konzentration $AFS_{>1,0}$ festgestellt werden konnte. Sie wird im Durchlauf durch die mechanische Reinigungsstufe komplett entnommen. Übertragen auf eine MBR-Anlage ergäbe sich daraus die Schlussfolgerung, dass der zusätzliche Betrieb eines Siebes hinter der Vorklämung zum Schutz der Membranmodule in der MBR-Stufe nicht notwendig erscheint.

Zur Kontrolle und Verifizierung wurden zusätzlich begleitende Absetztests sowohl in Standzylindern als auch in Imhoff-Trichtern (absetzbare Stoffe) durchgeführt. Diese Tests erhärteten die vorherigen Ergebnisse und ließen auch bei visueller Kontrolle keine Feststoffpartikel, Haare oder faserige Stoffe im Absetzraum oder auf der Wasseroberfläche erkennen, die eine nachfolgende Membranstufe beeinträchtigen könnten, siehe Abbildung 37 und Abbildung 38.

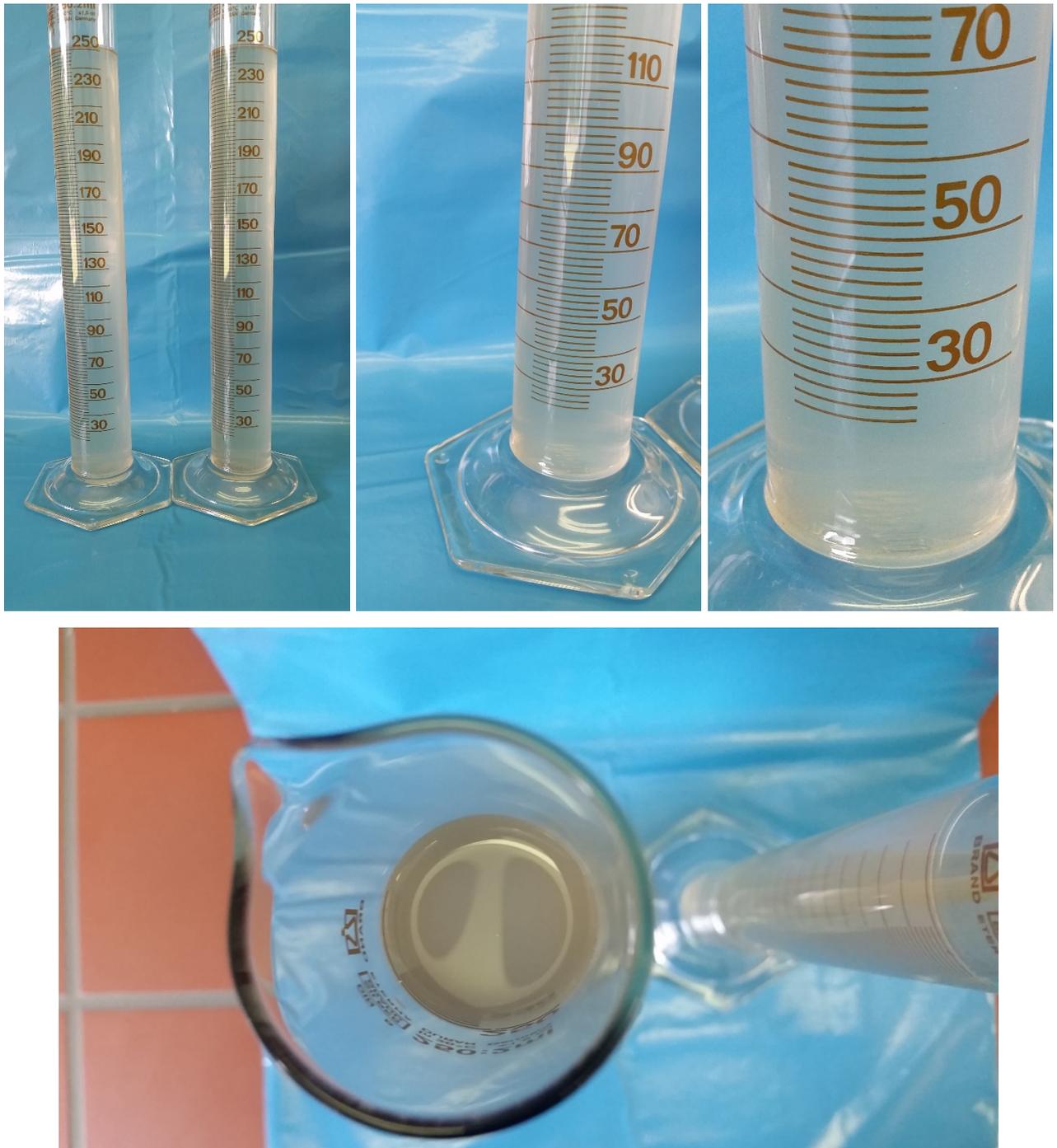


Abbildung 37: Absetztests Ablauf Vorklärung (Standzylinder)



Abbildung 38: Absetztests Ablauf Vorklärung (Standzylinder)

In welchem Maße diese ermittelte AFS- Entnahmeleistung dem eingangs dieses Kapitels geschilderten Rechenbetrieb oder aber der Vorklärung mit ihrer extrem langen Aufenthaltszeit zugeordnet werden kann, lässt sich jedoch nicht eindeutig aussagen, weil die Zulaufbelastung und die Feststoff-Fraktionierung vor der Rechenstufe nicht bekannt sind.

Aus diesem Grund wird in der nachfolgenden Abbildung 39 ein Vergleich der AFS-Konzentrationen der Parameter AFS_{GES} , $AFS_{>1,0}$ und $AFS_{<1,0}$ im Zulauf zu den jeweiligen Vorklärstufen auf dem GWK Glehn (aus der Messphase 2) und der KA Grevenbroich (aus

der Messphase 3) vorgenommen. Dabei ist natürlich zu konstatieren, dass die Einzugsgebiete der beiden Kläranlagen unterschiedlich strukturiert sind, sich Abwasserzulaufbeschaffenheiten nicht ohne detaillierte Differenzierung vergleichen lassen und die Betrachtung daher bestenfalls als Indiz gewertet werden kann.

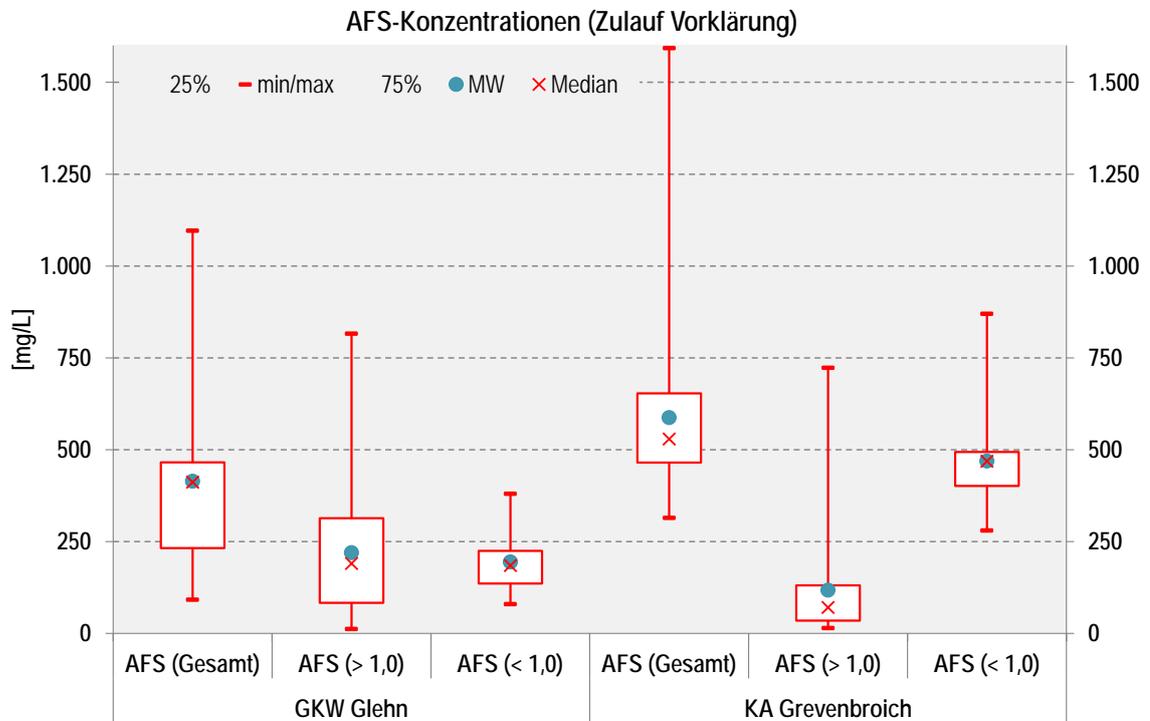


Abbildung 39: Vergleich der fraktionierten AFS-Konzentrationen im Zulauf zur Vorklämung (GWK Glehn – KA Grevenbroich)

Dies vorangestellt legt eine Betrachtung der AFS-Konzentrationen, insbesondere der jeweils enthaltenen Fraktion $AFS_{>1,0}$, die Vermutung nahe, dass eine zweidimensionale Rechengeometrie wie auf der KA Grevenbroich eine erkennbar höhere Entnahmeleistung, bezogen auf $AFS_{>1,0}$, zeigt als eine eindimensionale Rechengeometrie wie auf dem GWK Glehn. Das der Vorklämung zulaufende Abwasser auf der KA Grevenbroich enthält einen sehr deutlich geringeren $AFS_{>1,0}$ -Anteil trotz höherer AFS_{GES} -Konzentrationen im Vergleich zum GWK Glehn.

2.3.4 Verifizierende Messphase 4 auf dem GWK Nordkanal

2.3.4.1 Einführender Hinweis

Die Messphase 4 wurde als verifizierende Messphase nach Inbetriebnahme der im Bereich der mechanischen Vorreinigungsstufe und der Schlammbehandlung erneuerten Verfahrenstechnik des GWK Nordkanal im Dezember 2019 durchgeführt.

2.3.4.2 Messprogramm

Tabelle 6 zeigt das Messprogramm für die Untersuchungen, die vom 9. bis 13. Dezember 2019 auf dem GWK Nordkanal durchgeführt wurden. Die nachstehende Abbildung 40 zeigt den untersuchten Teil des Anlagenschemas und die drei Probenahmestellen.

Tabelle 6: Messprogramm Messphase 4

Ort der Probenahme	AFS _{GES} , AFS _{>1,0} , AFS _{<1,0} , AFS _{org} , AFS _{anorg} (Sack/Filtrat)	CSB	TN _b	S _{NH4}
Zulauf Vorklärung PN1	2-Std.-MP; V: 160 L		2-Std.-MP; V: 12 L	
Ablauf Vorklärung PN2	2-Std.-MP; V: 1,1-3,1 m ³			
Ablauf Sieb PN3	2-Std.-MP; V: 1,6-3,6 m ³			

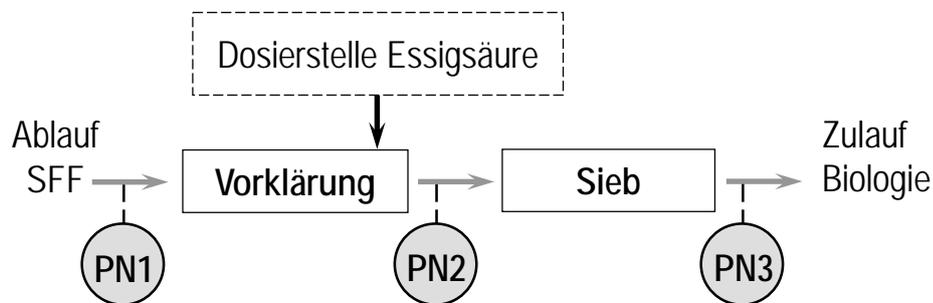


Abbildung 40: Probenahmestellen MP4 (GWK Nordkanal)

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die seinerzeitige Wahl einer 1,0 mm Maschengeometrie bei der Unterscheidung der AFS-Größenfraktionen im Rahmen der Sackfiltration im Hinblick auf die favorisierte Sieböffnungsweite auf dem GWK Nordkanal von 1,5 mm Lochgeometrie erfolgte. Maschenöffnungen von 1,0 mm Kantenlänge weisen in ihren Diagonalen ein Maß von ca. 1,4 mm auf. Auf diese Weise ist es möglich, den Parameter AFS direkt nach der gewählten Sieböffnungsgröße zu fraktionieren und Aussagen über die Menge aus der Vorklärstufe ablaufender, partikulärer Störstoffe zu treffen.

Wie aus Abbildung 40 ersichtlich, wird vor der Ablaufstelle aus der Vorklärung Essigsäure dosiert (kontinuierlich 25 L/h), um die nachfolgende Denitrifikation zu unterstützen. Diese Dosierstelle liegt vor den Probenahmestellen PN2 und PN3, an denen die CSB-Analytik durch die Essigsäuredosierung in dem Sinne verfälscht ist, dass die CSB-Reduktion durch das Vorklärbecken unterschätzt wird.

Zur Korrektur der CSB-Analytik an den Probenahmestellen PN2 und PN3 wurde anhand des Sicherheitsdatenblattes des Dosierstoffes nachvollzogen, dass die verwendete 60%ige Essigsäure eine Konzentration von 637,8 g/L Essigsäure aufweist bei einem gleichzeitigen CSB-Gehalt von 1,067 g CSB/g Essigsäure. Daraus errechnet sich eine CSB-

Konzentration von 680,5 g CSB/L sowie CSB-Fracht bezüglich der zweistündigen Probenahmezeiträume von $2\text{h} * 25\text{ L/h} * 0,6805\text{ g CSB/L} = 34\text{ kg CSB/2h}$. Dieser Wert wurde an den Probenahmestellen PN2 und PN3 bei der Ermittlung der 2h-Frachten nachträglich in Abzug gebracht.

Die Abbildung 41 zeigt das Erscheinungsbild der drei Probenahmestellen. Die Probenahmestelle PN3 war im Verteilerbauwerk zur vierstraßigen biologischen Stufe des GWK positioniert (Abbildung 41, unten rechts).

Umrüstung GKW Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung



Abbildung 41: Probenahmestellen PN1 (oben), PN2 (mitte), PN3 (unten)

2.3.4.4 Zulaufbelastung – Literaturvergleich (Trockenwettertage)

Zur Einordnung und Beurteilung der einwohnerspezifischen Zulaufbelastung des GWK Nordkanal wurden die Daten des einen Trockenwettertages verwendet, woraus sich eine sehr eingeschränkte Aussagekraft ableitet. Es wurden die 85 %-Fraktile ermittelt, analog zu den herangezogenen Vergleichsdaten des ATV-DVWK-A A 198 (2003). Die Verwendung der ermittelten 85 %-Fraktile würde jedoch die aktuellen Frachten insoweit überschätzen, als der untersuchte Zeitraum von 8 Uhr morgens bis 16 Uhr nachmittags erfahrungsgemäß einen relevant größeren Anteil an den täglichen Schmutzfrachten aufweist als lediglich 33,3 %. Daher wurde an dieser Stelle auf eine Auswertung zurückgegriffen, die bei früheren Untersuchungen auf dem GWK Nordkanal des Ertverbandes ermittelt worden war (FG SWW 2010). ergab sich derjenige Faktor, der den erhöhten Anteil der Tagesteilfracht zwischen 8 Uhr und 16 Uhr gegenüber der Tagesgesamtfracht beschreibt, mit 1,25 und es ergibt sich der in Abbildung 43 dargestellte Vergleich.

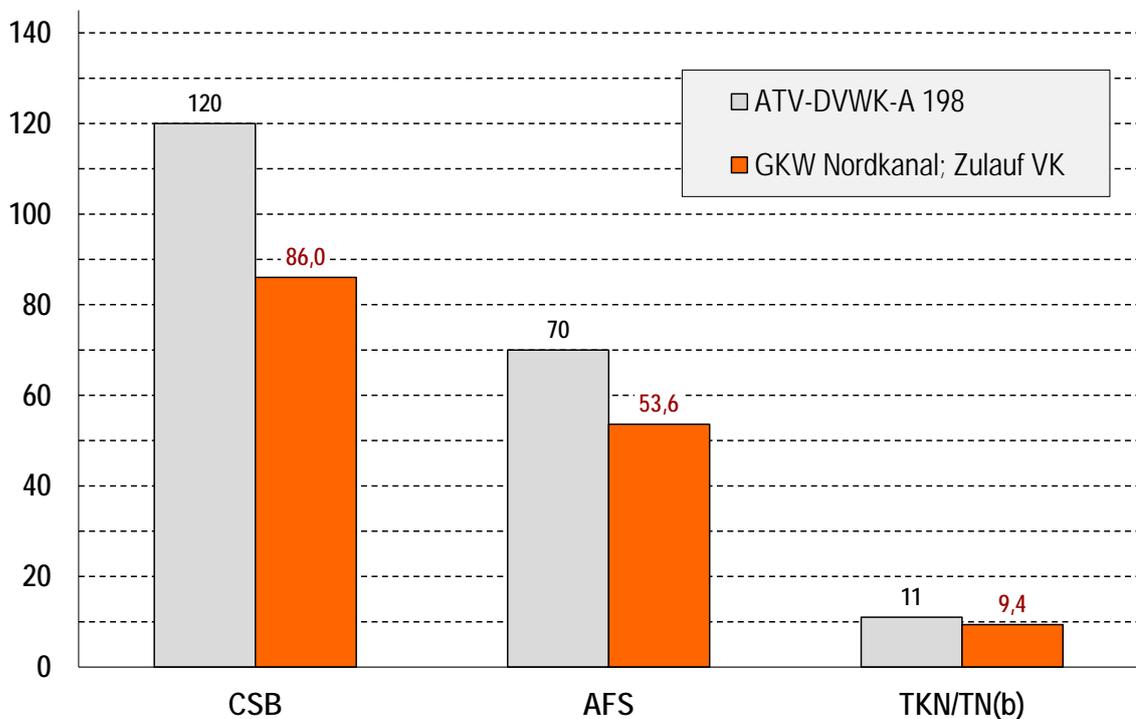


Abbildung 43: VK-Zulaufbelastung GWK Nordkanal in $[g/(E \cdot d)]$ – Vergleich mit Regelwerkswerten

Fazit: Für alle untersuchten Parameter liegen die einwohnerspezifischen Belastungen an diesem einen Untersuchungstag deutlich unterhalb der Literaturdaten.

2.3.4.5 Längsprofile der stofflichen Leistungsfähigkeit

2.3.4.5.1 Hinweis

Da die Messphase überwiegend unter Regenwetterbedingungen stattfand, wird in der weiteren Auswertung eine Betrachtung aller 5 Messtage sowie zusätzlich eine unterscheidende Betrachtung des einen Trockenwettertages sowie der vier Regenwettertage vorgenommen. Daher ist die Aussagekraft der gewonnenen Erkenntnisse sicherlich eingeschränkt. Bezogen auf die Kernfrage dieser verifizierenden Untersuchungen, ob nämlich bei einer MBR-Verfahrenstechnik mit anaerober Schlammstabilisierung und dem damit obligatorisch verbundenen Betrieb einer Vorklärung im Rahmen der mechanischen Vorreinigungsstufe zusätzlich der Betrieb einer Siebstufe zum Schutz der Membranen anzuraten ist, lassen die Ergebnisse allerdings belastbare Schlussfolgerungen zu.

2.3.4.5.2 alle Tage

In Abbildung 44 und Abbildung 45 sind für die Parameter AFS_{GES} , CSB, TN_b und S_{NH4} die gemessenen 2-Std.-Frachten dargestellt. Dabei ist der Parameter AFS_{GES} zusätzlich fraktioniert nach den Größenfraktionen $AFS_{>1,0}$ und $AFS_{<1,0}$. Es handelt sich dabei um den Mittelwert aller insgesamt 18 Messintervalle. Die zugehörigen statistischen Daten sind den Box-Whisker-Diagrammen in Abbildung 46 zu entnehmen. In Abbildung 47 folgen die zugehörigen Eliminationsraten der einzelnen MAV-Stufen Vorklärung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

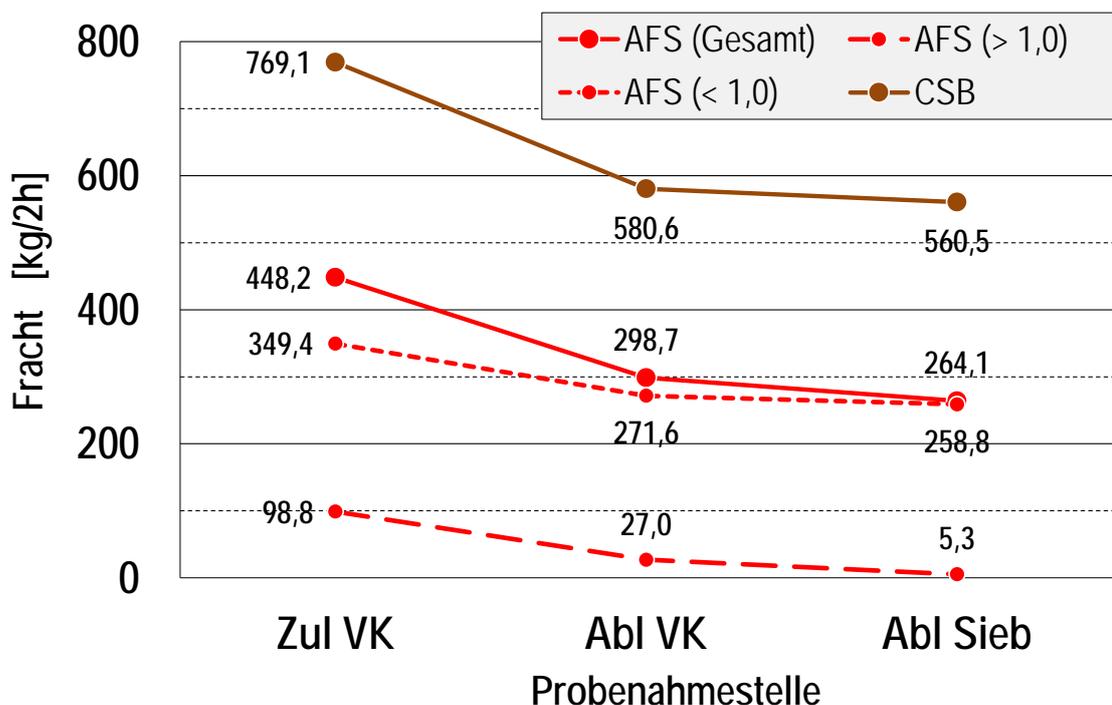


Abbildung 44: Längsprofile AFS_{GES} , $AFS_{>1,0}$, $AFS_{<1,0}$, und CSB (MP4 Nordkanal)

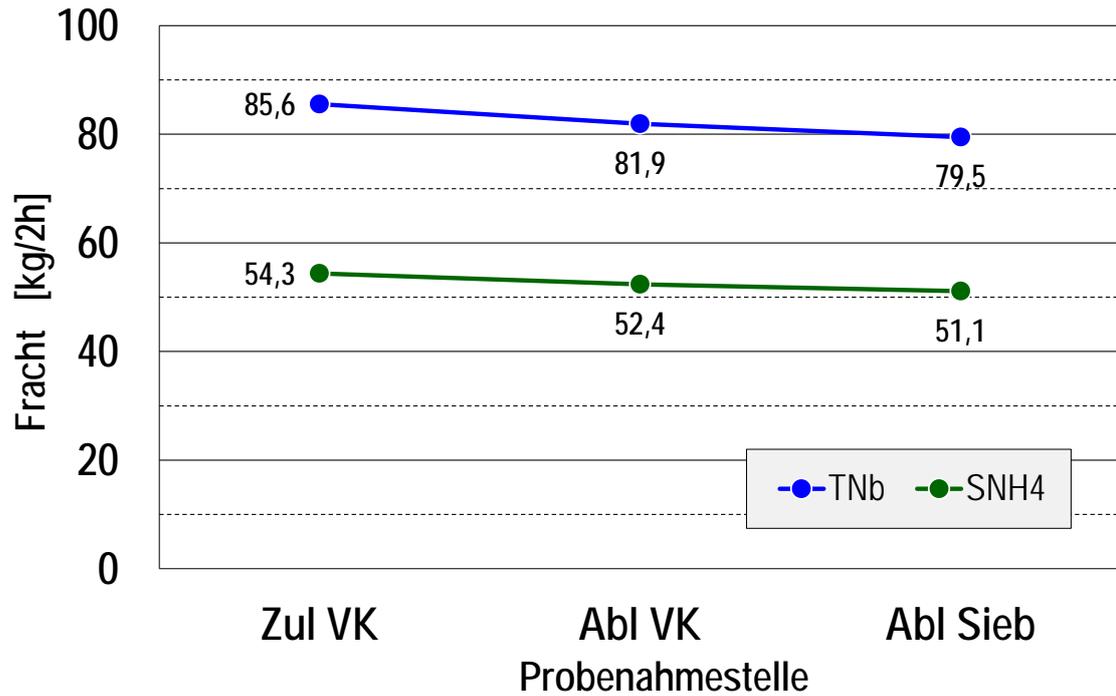


Abbildung 45: Längsprofile TN_b und SNH₄ (MP4 Nordkanal)

Umrüstung GKW Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

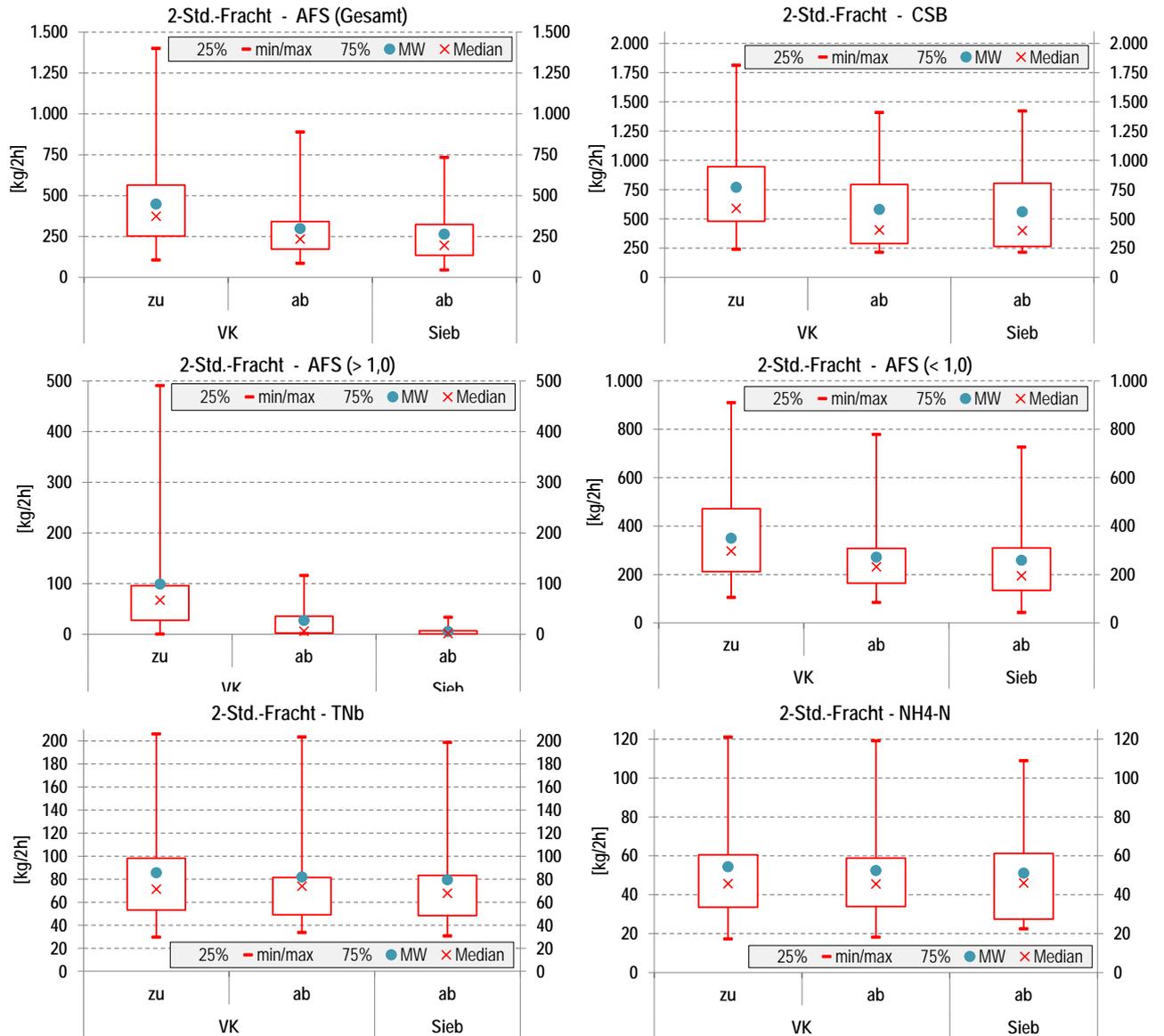


Abbildung 46: Box-Whisker-Diagramme (MP4 Nordkanal)

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

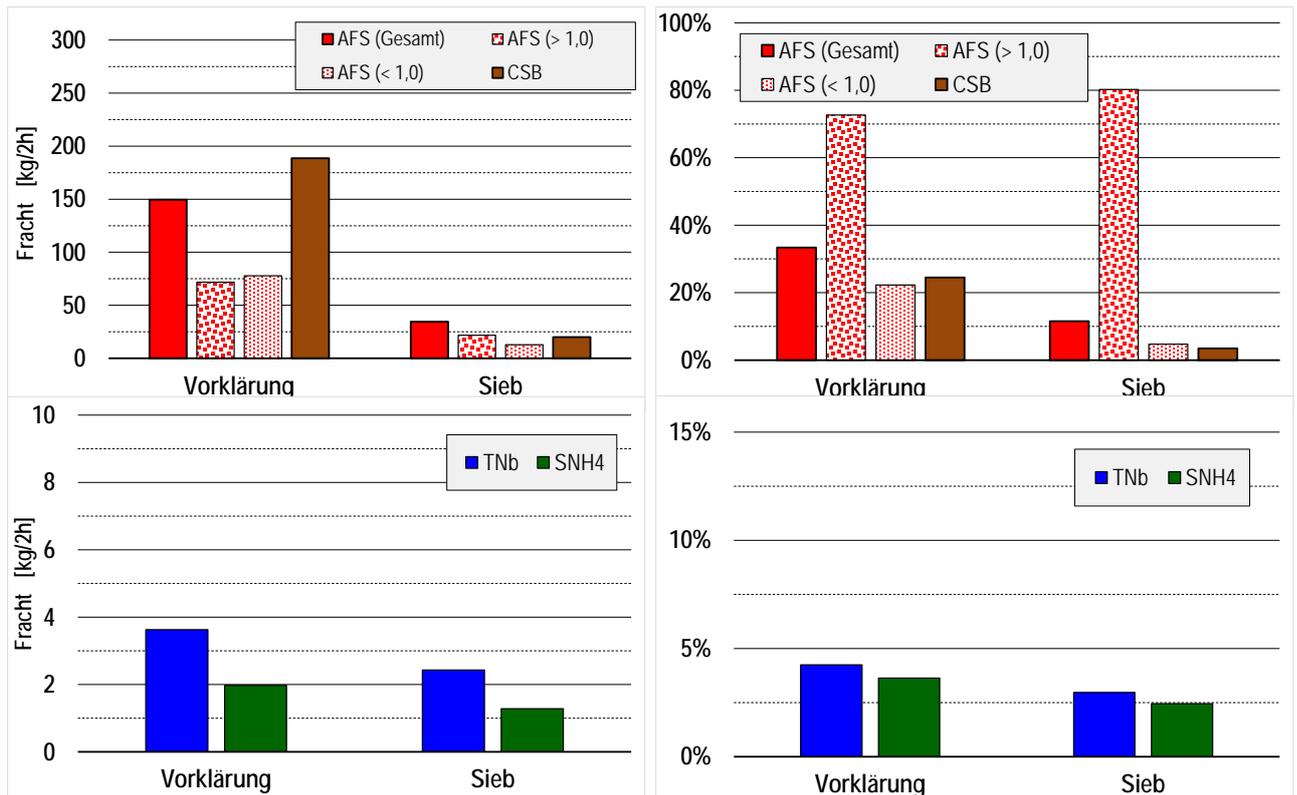


Abbildung 47: Eliminationsraten für AFS_{GES}, AFS_{>1,0}, AFS_{<1,0}, CSB, TN_b und SNH₄ (MP4 Nordkanal)

Gemäß dem vorangestellten Hinweis aus Kap. 2.3.4.5.1 lassen die Eliminationsraten erkennen, dass der zusätzliche Betrieb einer Siebstufe zum Schutz der Membranen auch nach einer Vorklärunq anzuraten ist.

Für die Vorklärunq wurden Eliminationsraten von 30 % (150 kg AFS_{GES}/2h) und 20 % (190 kg CSB/2h) im Durchschnitt aller Tage ermittelt. Zusätzlich entnimmt die neue Siebanlage nochmals 35 kg AFS_{GES}/2h, wovon etwa 22 kg/2h der Fraktion AFS_{>1,0} (Abbildung 44), die als die für die Membranmodul-Elemente kritische Fraktion anzunehmen ist, zuzurechnen sind. Dies repräsentiert eine etwa 80%ge Entnahme (Abbildung 47 oben rechts) der dem Sieb zufließenden groben AFS-Fraktion. Die dadurch reduzierte, kritische AFS-Menge, vor der die Membranfiltrationsstufe somit geschützt wird, kann pro Tag mit etwa 200 kg abgeschätzt werden.

Die Entnahmeraten für TN_b und NH₄-N sind mit 3 % bis 4 % für die Vorklärunq sowie weiteren 2 % bis 3 % für die Siebung eher niedrig, aber unauffällig, zumal vorwiegend Regenwetterbedingungen vorherrschten.

Im Folgenden wird der Trockenwettertag vom 10.12.2019 separat dargestellt.

2.3.4.5.3 Trockenwettertag

In Abbildung 48 und Abbildung 49 sind für die Parameter AFS_{GES} , CSB, TN_b und S_{NH4} die gemessenen 2-Std.-Frachten dargestellt. Dabei ist der Parameter AFS_{GES} zusätzlich fraktioniert nach den Größenfraktionen $AFS_{>1,0}$ und $AFS_{<1,0}$. Es handelt sich dabei um den Mittelwert der 4 Messintervalle des Trockenwettertages. Auf die Darstellung statistischer Daten wird verzichtet. In Abbildung 50 folgen die zugehörigen Eliminationsraten der einzelnen MAV-Stufen Vorklärung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

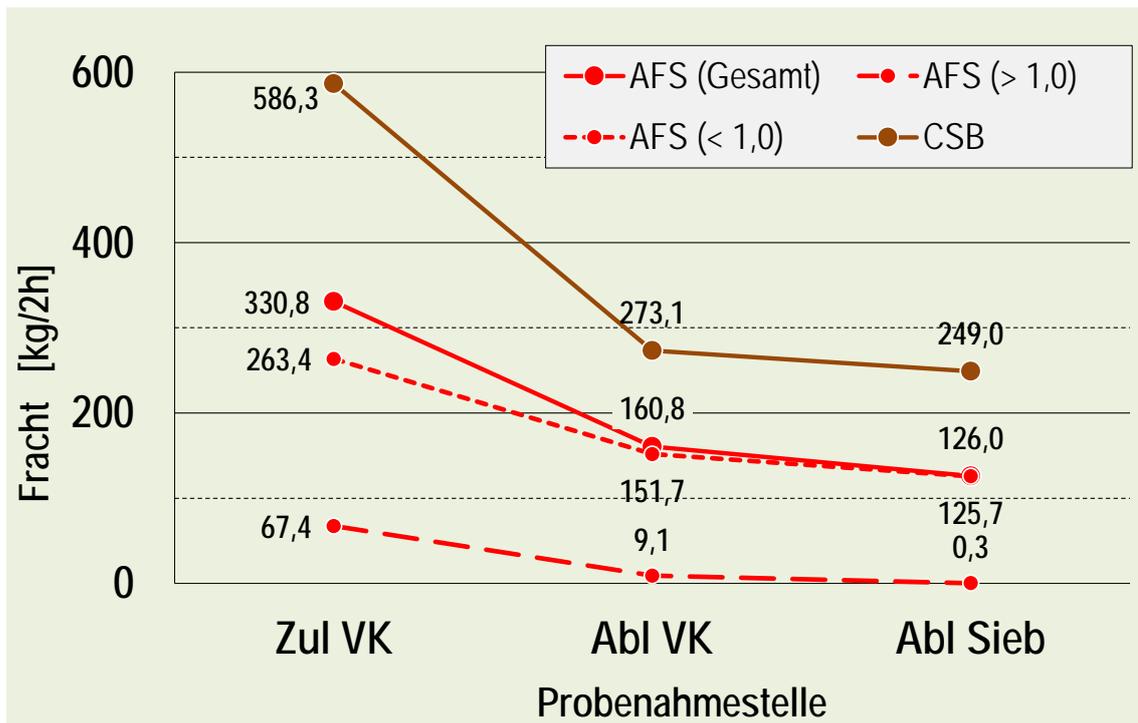


Abbildung 48: Längsprofile AFS_{GES} , $AFS_{>1,0}$, $AFS_{<1,0}$, und CSB bei Trockenwetter (MP4 Nordkanal)

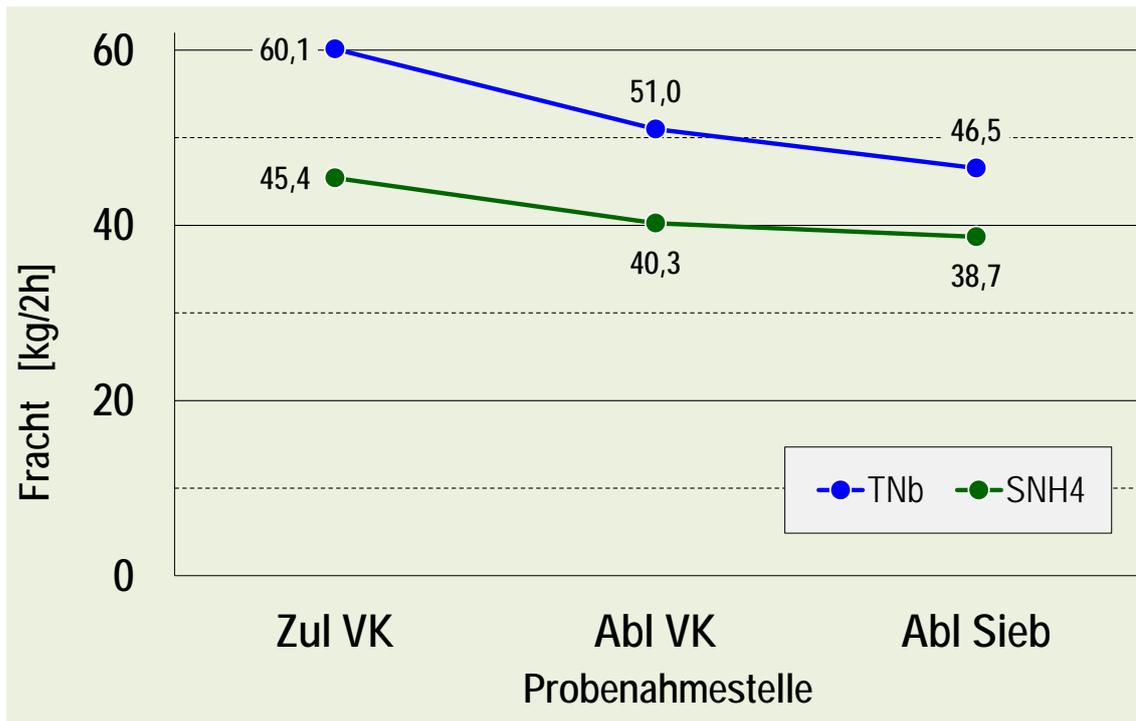


Abbildung 49: Längsprofile TN_b und SNH₄ bei Trockenwetter (MP4 Nordkanal)

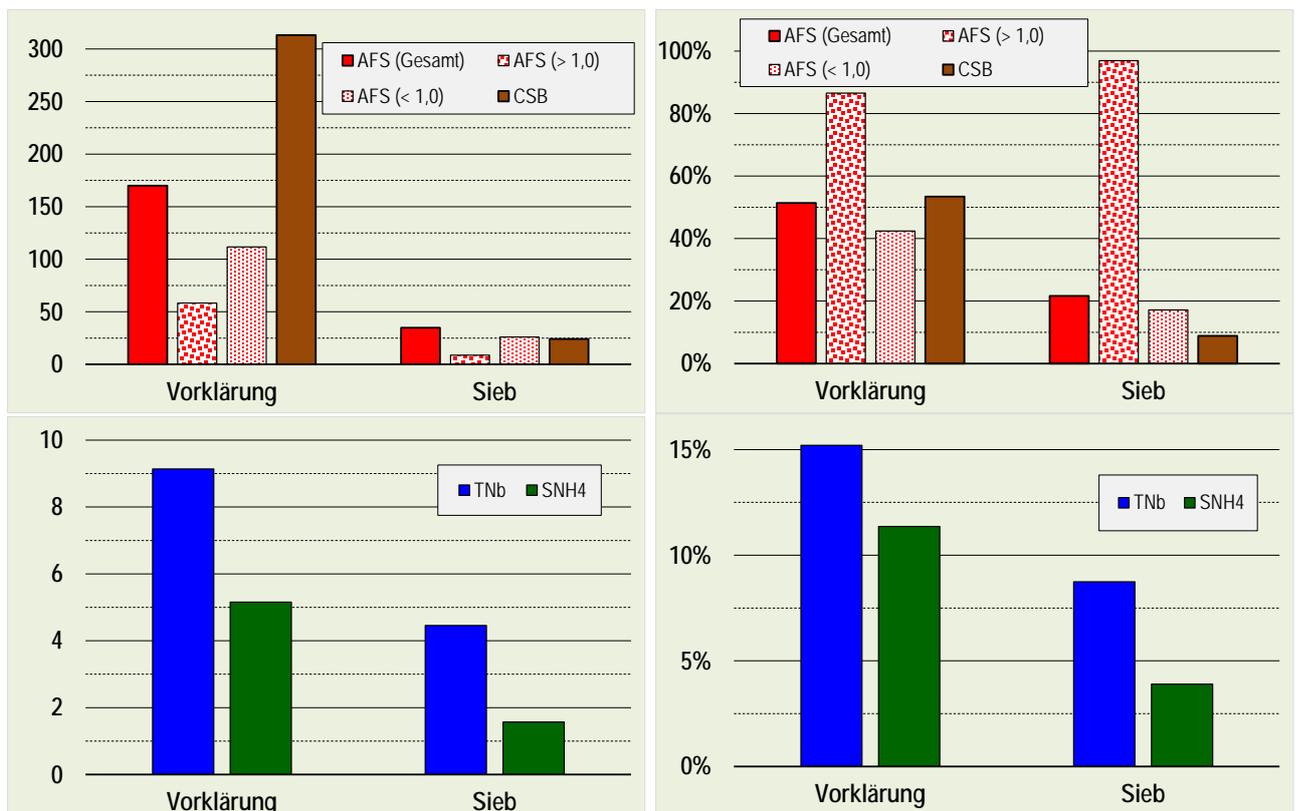


Abbildung 50: Eliminationsraten für AFS_{GES}, AFS_{>1,0}, AFS_{<1,0}, CSB, TN_b und SNH₄ bei Trockenwetter (MP4 Nordkanal)

Für die Vorklärung wurden infolge der verlängerten Aufenthaltszeit in Vorklärung von bis zu 1,8 h deutlich erhöhte Eliminationsraten von 50 % (170 kg AFS_{GES}/2h) und von fast

60 % (310 kg CSB/2h) im Tagesdurchschnitt ermittelt. Zusätzlich entnimmt die neue Siebanlage nochmals 35 kg AFS_{GES}/2h, wobei die aus der Vorklärung abfließende Restfracht der Fraktion AFS_{>1,0} (Abbildung 48) nahezu vollständig entnommen wird. Dies repräsentiert eine etwa 97%ge Entnahme (Abbildung 50 oben rechts) der dem Sieb zufließenden groben AFS-Fraktion. Die dadurch reduzierte, kritische AFS-Menge, vor der die Membranfiltrationsstufe somit geschützt wird, kann pro Trockenwettertag mit etwa 100 kg abgeschätzt werden.

Auch die Entnahmeraten für TN_b und NH₄-N sind mit 15 % und 10 % für die Vorklärung sowie weiteren 8 % und 4 % für die Siebung deutlich erhöht, liegen aber für Trockenwetterbedingungen auf einem gewöhnlichen und daher unauffälligen Niveau.

Abbildung 51 zeigt die einwohnerspezifische Belastung für die Parameter AFS_{GES}, CSB, und TN_b im Längsprofil durch die untersuchten Verfahrensstufen im Vergleich zu den Regelwerksdaten des ATV-DVWK-A A 198 (2003) für eine verlängerte Vorklärzeit von 1 bis 2 Stunden. Analog zu Abbildung 43 werden die ermittelten 85 %-Fraktilen mit dem Faktor 1,25 zur Berücksichtigung eines Tagesteil-Frachtausgleiches verrechnet.

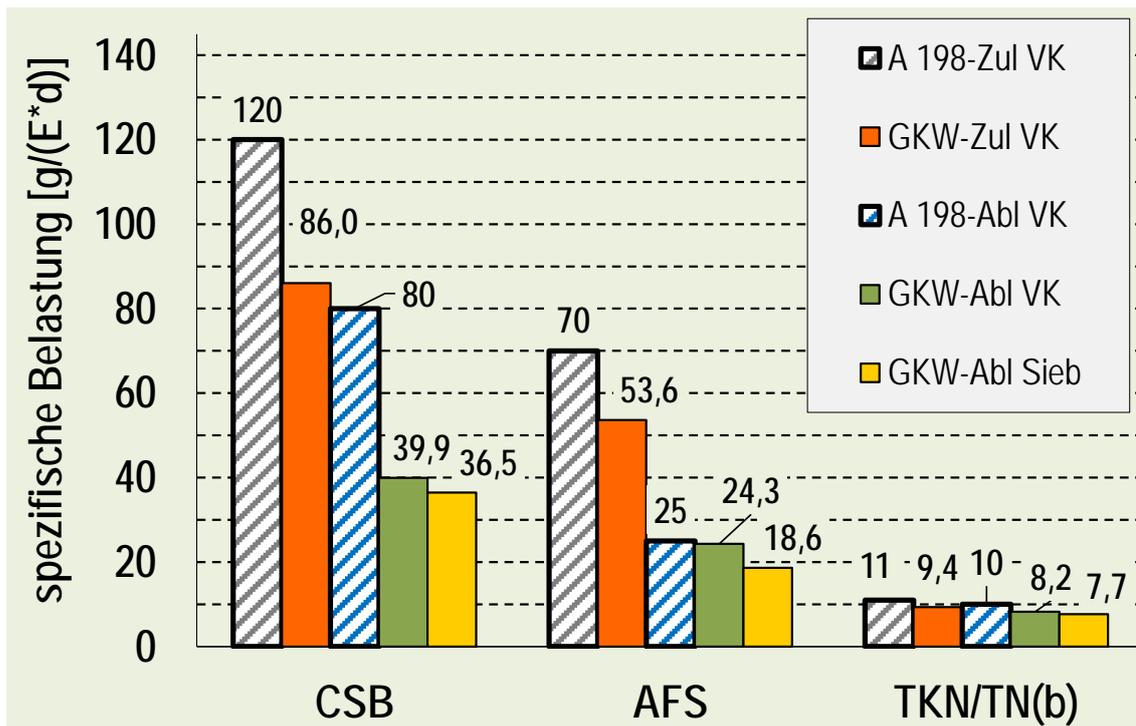


Abbildung 51: spezifische Belastung CSB, AFS_{GES} und TKN/TN_b im Vergleich mit Regelwerkswerten in [g/(E*d)] bei Trockenwetter (MP4 Nordkanal)

Alle Belastungsdaten des GWK Nordkanal sind an diesem einen Trockenwettertag gegenüber den Literaturwerten nach ATV-DVWK-A A 198 (2003) deutlich reduziert.

Die Eliminationsraten sind im Vergleich für den Parameter CSB deutlich erhöht, für den Parameter AFS_{GES} demgegenüber reduziert.

Ein Vergleich der Eliminationsraten der neuen Siebanlage mit früheren Untersuchungen wird durch den Umstand erschwert, dass in diesen Untersuchungen erstmals eine Siebung nach einer Vorklärung (und sowieso nach einem Sand-/Fettfang und einem Rechen) beprobt wurde.

In früheren Untersuchungen (FG SWW 2010) haben entsprechende Analysen der früher betriebenen Siebaggregate auf dem GWK Nordkanal stattgefunden. Ein Vergleich dieser früheren Ergebnisse zeigt die heutigen Siebe mit einer geringeren CSB-Eliminationsrate (10 % gegenüber früher 20 %) sowie einer nahezu identischen AFS_{GES}-Eliminationsrate von 20 % bis 25 %.

2.3.4.5.4 Regenwettertage

Um die vorher getroffenen Aussagen insbesondere auch für Regenwetterbedingungen zu bestätigen, werden in der nachstehenden Abbildung 52 die Längsprofile AFS_{GES}, AFS_{>1,0}, AFS_{<1,0}, und CSB bei Regenwetter (MP4 Nordkanal) dargestellt. Auch hier zeigt sich der positive Effekt einer der Vorklärung nachgeschalteten Siebstufe. Die neue Siebanlage entnimmt 35 kg AFS_{GES}/2h, wovon sogar 25 kg/2h der Fraktion AFS_{>1,0} (Abbildung 52) zuzu-rechnen sind. Dies entspricht einer etwa 80%gen Entnahme (Abbildung 53) der dem Sieb zufließenden groben AFS-Fraktion.

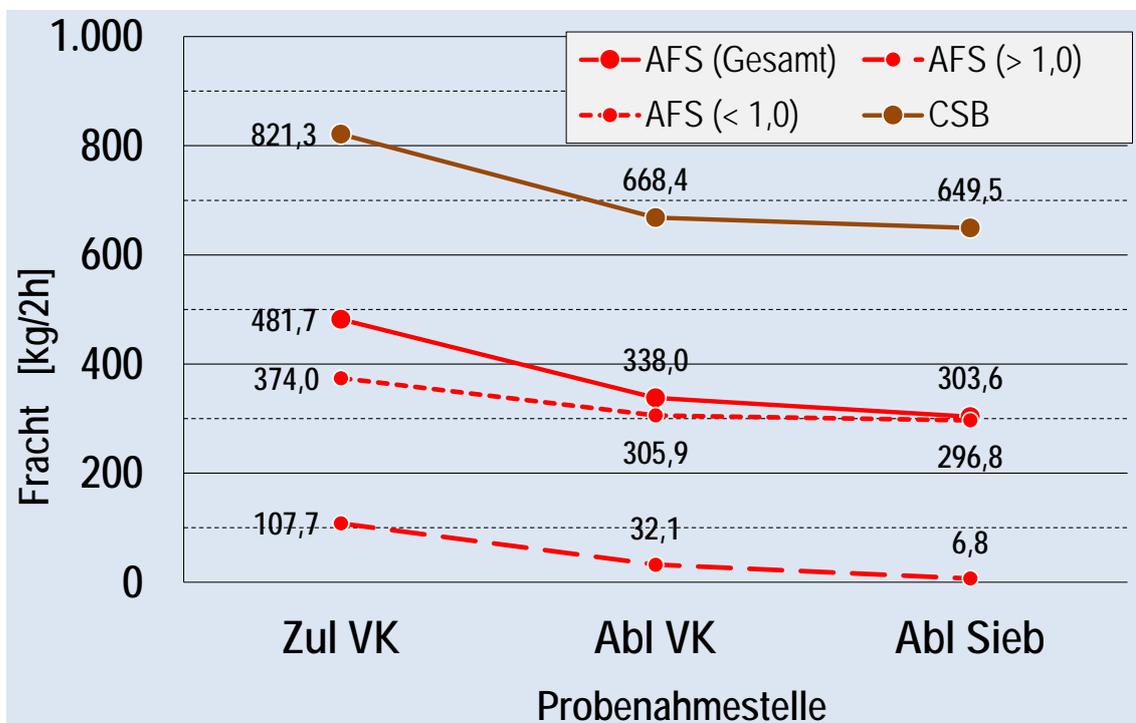


Abbildung 52: Längsprofile AFS_{GES}, AFS_{>1,0}, AFS_{<1,0}, und CSB bei Regenwetter (MP4 Nordkanal)

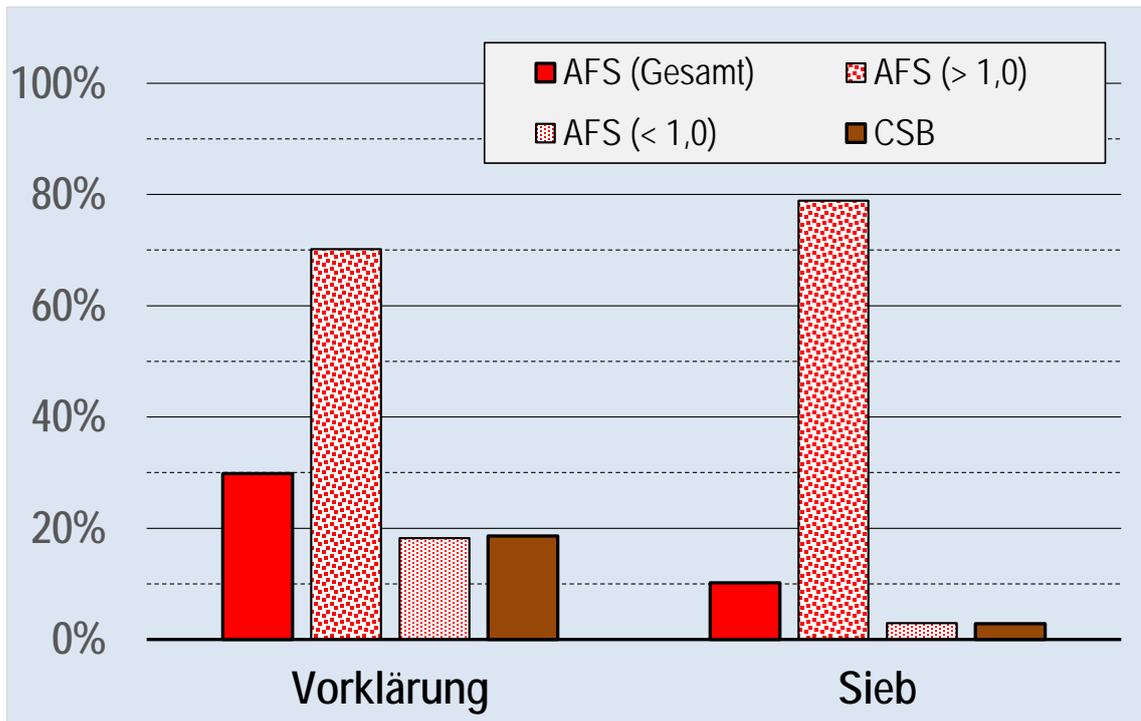


Abbildung 53: Eliminationsraten für AFS_{GES} , $AFS_{>1,0}$, $AFS_{<1,0}$, und CSB bei Regenwetter (MP4 Nordkanal)

Der Vollständigkeit halber sind in Abbildung 54 die einwohnerspezifischen Belastungen für die Parameter AFS_{GES} , CSB, und TN_b im Längsprofil durch die untersuchten Verfahrensstufen im Vergleich zu den Regelwerksdaten des ATV-DVWK-A A 198 (2003) für eine bei Regenwetter verkürzte Vorklärzeit von maximal 1 Stunde dargestellt. Im Unterschied zu Abbildung 43 wird in dieser Darstellung auf die Mittelwerte Bezug genommen und auf einen Tagesteil-Frachtausgleich verzichtet. Bereits bei Betrachtung der Mittelwerte für AFS_{GES} und CSB ist zu erkennen, dass die spezifischen Belastungen durchgehend um 15 % bis 20 % stark erhöht sind, was auf zwei Spülstoßereignisse im Verlaufe der Regenwettertage in der Messwoche verursacht wurde. Die jedoch über dieses Niveau hinausgehende erhöhte TN_b -Belastung von 50 % muss auf einen erhöhten organischen Stickstoffanteil zurückzuführen sein. Zur Plausibilisierung dessen wurden in Abbildung 54 die NH_4-N -Belastungsdaten mit aufgenommen, die sich wiederum auf einem üblichen Niveau bewegen.

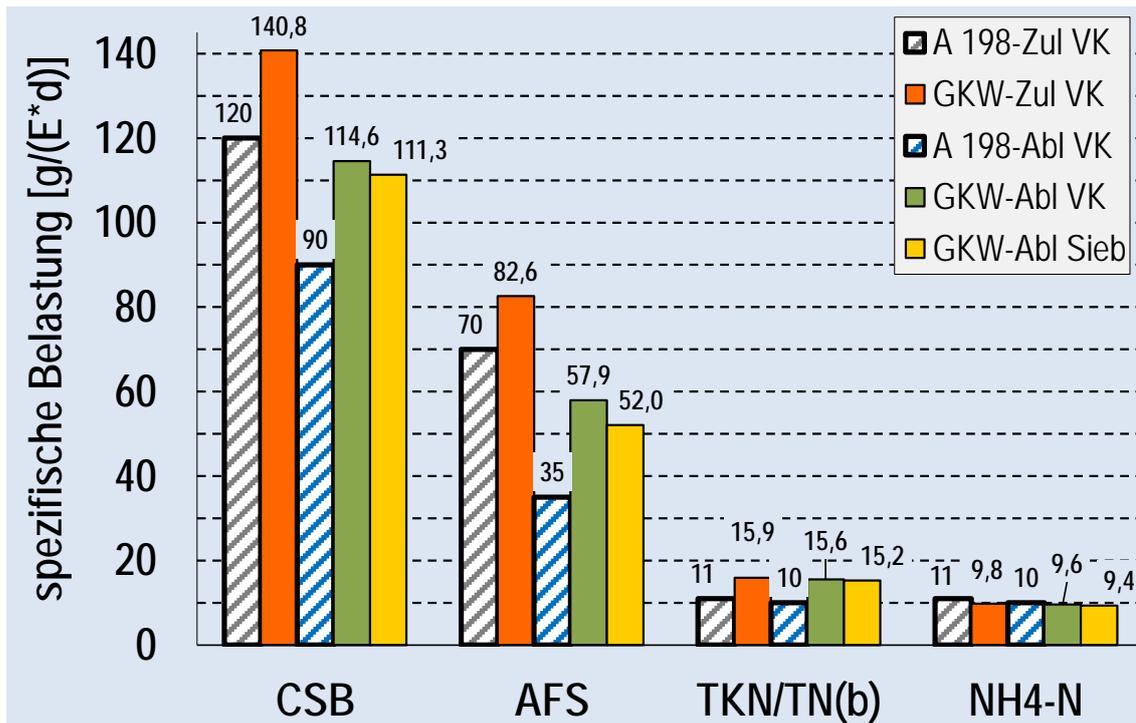


Abbildung 54: spezifische Belastung CSB, AFS_{GES} und TKN/TN_b im Vergleich mit Regelwerkswerten in [g/(E*d)] bei Regenwetter (MP4 Nordkanal)

Ungeachtet der erhöhten spezifischen Belastungen bewegen sich alle Eliminationsraten in der Vorklärung für die dargestellten Parameter auf einem völlig üblichen und unauffälligen Niveau. Das Erfordernis der Siebung ist vor allem an der Feststoffreduktion zu erkennen.

Um abschließend einen Eindruck von der Beschaffenheit des zurückgehaltenen Siebgutes im betrachteten Regenwetterzeitraum zu bekommen, sind nachstehend einige Fotos vom Bogensieb im Bereich der nachgeschalteten Siebgutwäsche zusammengestellt. Dabei lässt die Aufnahme unten links aufgrund der Struktur der zurückgehaltenen Feststoffe erkennen, dass hier auch haarige und fädige Anteile enthalten sind, die für die Membranmodul-Elemente wegen des hohen Verzopfungs- und Verschlammungspotenzials als besonders kritisch bewertet werden.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

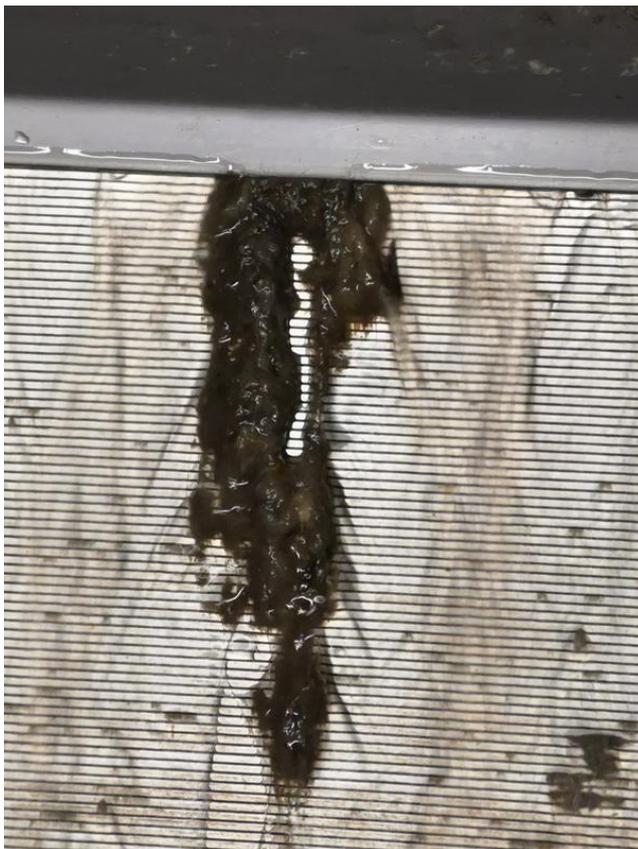


Abbildung 55: Siebgut bei Regenwetterbedingungen

2.3.4.5.5 Fazit

Die Messphase über 5 Tage auf dem GWK Nordkanal fand weitgehend unter Regenwetterbedingungen statt. Zu verzeichnen war lediglich ein Trockenwettertag mit mittlerer Belastung und entsprechend verlängerter Aufenthaltszeit in der Vorklärung von maximal 1,8 Stunden während des Probenahmezeitraumes wie Abbildung 43 zeigt. Obwohl unter diesen Betriebsbedingungen deutlich erhöhte Eliminationsraten von 50 % für AFS_{GES} und fast 60 % für CSB ermittelt wurden, entnimmt die nachfolgende Siebung nochmals gut 20 % der verbliebenen Feststoffe, wobei die aus der Vorklärung abfließende Restfracht der Fraktion $AFS_{>1,0}$ nahezu vollständig entnommen wird. Die dadurch reduzierte, kritische AFS-Menge, vor der die Membranfiltrationsstufe somit geschützt wird, kann pro Trockenwettertag mit etwa 100 kg abgeschätzt werden.

Erweitert man diese Betrachtung für die gesamte Messphase inkl. der Regenwettertage, erhöht sich diese Menge auf etwa 200 kg/d. Deutlich wird dabei das Erfordernis einer Siebung hinter einer Vorklärung gerade auch zu Regenwetterzeiten, die zusätzlich in der Messphase von zwei ausgeprägten Spülstoßereignissen geprägt waren. Relativierend sei an dieser Stelle der Hinweis hinzugefügt, dass diese Spülstoßereignisse sicherlich auch die Belastungsdaten im Probenahmezeitraum ungewöhnlich erhöht haben, was sich entsprechend nicht auf jede Regenwetterphase übertragen lässt.

Projiziert man die in der Siebung zurückgehaltenen kritischen $AFS_{>1,0}$ -Mengen unter Ansatz einer Aufteilung von 50 % Trockenwettertagen und 50 % Regenwettertagen, lässt sich eine $AFS_{>1,0}$ -Jahresmenge von ca. 50 Mg/a abschätzen.

2.4 Zusammenfassung zu den Untersuchungen der mechanischen Vorreinigung

Der Erttverband, Bergheim plant für das Gruppenklärwerk Nordkanal (MBR-Anlage) die bauliche Erweiterung und verfahrenstechnische Umstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung. Für die damit verbundene Erweiterung der Vorreinigungsstufe zur Entnahme von partikulären Stoffen wurden die Vorklärung mit einer Aufenthaltszeit von 20 Minuten bei der maximalen Wassermenge - und damit unter Trockenwetterbedingungen deutlich länger als 30 Minuten - sowie eine neue Siebanlage geplant, da im Vorhinein nicht auszuschließen war, dass sich im Ablauf einer Vorklärung nach wie vor Störstoffe befinden, die den Membranfiltrationsprozess beeinträchtigen. Die Auslegung eines zweidimensionalen Siebsystems soll den Schutz der Membranen sicherstellen und die nachfolgenden biologischen Abbauprozesse durch eine zu weitgehende Abscheideleistung nicht beeinträchtigen.

Aus diesen Gründen war es notwendig, vor der Ausführungsphase der Maßnahme die Untersuchungsinhalte in Bezug auf die notwendige Leistungsfähigkeit der Vorreinigungsstufe

und die daraus resultierende Auswirkung auf die biologischen Reinigungsprozesse anzupassen. Es war zu untersuchen,

- ➔ inwieweit im Ablauf einer Vorklärstufe noch Stoffe vorhanden sind, die sich störend oder leistungsmindernd auf den Membranfiltrationsprozess auswirken und mit einer Siebung zurückgehalten werden können bzw. müssen,
- ➔ mit welcher zweidimensionalen Sieböffnungsweite die Auslegung der nachgeschalteten Siebstufe zu erfolgen hat
- ➔ und welche Entnahmeleistung an organischen Stoffen mit einer entsprechenden Siebstufe im Hinblick auf eine ungestörte biologische Stickstoffelimination in der nachfolgenden Prozessstufe zu erwarten ist.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden zwei Messphasen auf dem Gruppenklärwerk (GKW) Glehn sowie eine Messphase auf der Kläranlage Grevenbroich durchgeführt. Diese Messphase 3 konnte entgegen der Planung wegen dringender Revisionsarbeiten am Vorklärbeckenräumer nicht auf dem GKW Glehn durchgeführt werden. Der Ausfall des Vorklärbeckenräumers des GKW Glehn machte einen kontinuierlichen und störungsfreien Untersuchungsbetrieb unmöglich und ließ deutliche Einbußen bei der Qualität der erzielten Ergebnisse erwarten.

Beide Kläranlagen verfügen in der mechanischen Reinigungsstufe über eine Rechenstufe, einen belüfteten Sandfang sowie eine Vorklärung. Die Anlagen unterscheiden sich deutlich in ihrer Rechenkonstruktion (Glehn: eindimensionaler Filterstufenrechen, Grevenbroich: zweidimensionaler Filterbandrechen) sowie in den Aufenthaltszeiten ihrer Vorklärstufen (Glehn: 37 Minuten, Grevenbroich: 73 Minuten; jeweils bei maximalem Trockenwetterzufluss). Die verfahrenstechnische Konzeption auf dem GKW Glehn entspricht weitgehend der geplanten Konzeption auf dem GKW Nordkanal (zzgl. einer Siebstufe).

Im Verlaufe der Messphasen 1 und 2 wurde beschlossen, die Beschaffenheit der für die Sackfiltration verwendeten Filtrationssäcke zu verändern und Filtrationssäcke mit einer Öffnungsweite von 1,0 mm Maschengeometrie zu verwenden. Die Wahl einer 1,0 mm Maschengeometrie erfolgte im Hinblick auf die favorisierte Sieböffnungsweite auf dem GKW Nordkanal von 1,5 mm Lochgeometrie. Maschenöffnungen von 1,0 mm Kantenlänge weisen in ihren Diagonalen ein Maß von ca. 1,4 mm auf. Auf diese Weise war es möglich, den Parameter AFS direkt nach der gewählten Sieböffnungsgröße zu fraktionieren und Aussagen über die Menge aus der Vorklärstufe ablaufender, partikulärer Störstoffe zu treffen.

Im Ergebnis der Messphasen 1 und 2 konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- ➔ Hinsichtlich der durchgeführten AFS-Größenfraktionierung war zu konstatieren, dass im Ablauf der Vorklärung nur noch eine sehr geringe messbare Konzentration

AFS_{>1,0} festgestellt werden konnte. Sie wurde zu über 98% in der Vorklärung entnommen. Diese Entnahmeleistung wurde unabhängig vom hydraulischen Zulauf (Regenwetterzulauf, Trockenwetterzulauf, Nachtzulauf) erreicht. Übertragen auf eine MBR-Anlage ergab sich daraus die Schlussfolgerung, dass der zusätzliche Betrieb eines Siebes hinter der Vorklärung zum Schutz der Membranmodule in der MBR-Stufe in verfahrenstechnischer Hinsicht nicht zwingend notwendig erschien. Jedoch wurde empfohlen, eine solche Entscheidung durch eine zusätzliche, längerfristige Kontrolluntersuchung auf dem GWK Glehn zu verifizieren.

- ➔ Sofern der zusätzliche Betrieb eines Siebes hinter einer Vorklärung zum Schutz der Membranmodule in der MBR-Stufe beschlossen wird, erschien aufgrund der erzielten Ergebnisse eine zweidimensionale Sieböffnungsweite von 1,5 mm völlig ausreichend.
- ➔ Die Entnahmeleistung an organischen Stoffen (betrachtet wurde der Parameter CSB) in der Vorklärstufe zeigte sich in den Untersuchungen mit 38 % bis 42 % gegenüber dem aktuellen Technischen Regelwerk ATV-DVWK-A 198 und DWA-A 131 leicht erhöht, wobei das dem GWK Glehn zulaufende Abwasser auch eine erhöhte spezifische CSB-Belastung aufwies. Eine Aussage über den zusätzlichen Einfluss eines großtechnischen Siebbetriebes konnte nicht getroffen werden. Jedoch konnte vor dem Hintergrund, dass der zusätzliche Betrieb eines Siebes hinter der Vorklärung in verfahrenstechnischer Hinsicht nicht zwingend notwendig erschien, vermutet werden, dass kein maßgeblich störender Einfluss hinsichtlich des zusätzlichen CSB-Rückhaltes einer Siebstufe hinter der Vorklärstufe zu erwarten sei.

Die Messphase 3 auf der KA Grevenbroich diente der Untersuchung der Annahme, dass nach einer zweidimensionalen Rechenstufe und einer Vorklärstufe keinerlei Störstoffe für eine nachfolgende MBR-Anlage im Ablauf der Vorklärung zu finden seien. Die Untersuchungsergebnisse der Messphase 3 haben diese Annahme bestätigt, wobei einschränkend hinzuzufügen ist, dass zum Zeitpunkt der Untersuchungen extrem lange Aufenthaltszeiten in der Vorklärstufe von > 2,5 Stunden bis zu 3,6 Stunden zu verzeichnen waren. Zur Verifizierung der Annahme wurde empfohlen, entsprechende Untersuchungen mit einer deutlich verkürzten Aufenthaltszeit in der Vorklärstufe zu wiederholen.

Dazu kam es allerdings aufgrund des Projektfortschrittes bei der Ausführungsphase der Umrüstungsmaßnahme des GWK Nordkanals nicht mehr, da durch die zwischenzeitlich vorgenommene Ausschreibung und Auftragsvergabe seitens des Erftverbandes entschieden war, hinter der Vorklärung eine Siebung mit 10 Muldensieben (Öffnungsgeometrie: Loch, Öffnungsweite: 1,5 mm) und zwei zusätzlichen Nachrüstplätzen zu realisieren.

Insofern verblieb für die Messphase 4 der Charakter einer verifizierenden Messung nach Fertigstellung, Inbetriebnahme und erfolgreicher Einfahrphase der umgerüsteten Anlage.

Abbildung 56 und Abbildung 57 zeigen nachfolgend den Vergleich der AFS-Konzentrationen der Parameter AFS_{GES} , $AFS_{>1,0}$ und $AFS_{<1,0}$ im Zu- und Ablauf der jeweiligen Vorklärstufen aus den Messphasen 2 bis 4 ohne TW-/RW-Unterscheidung.

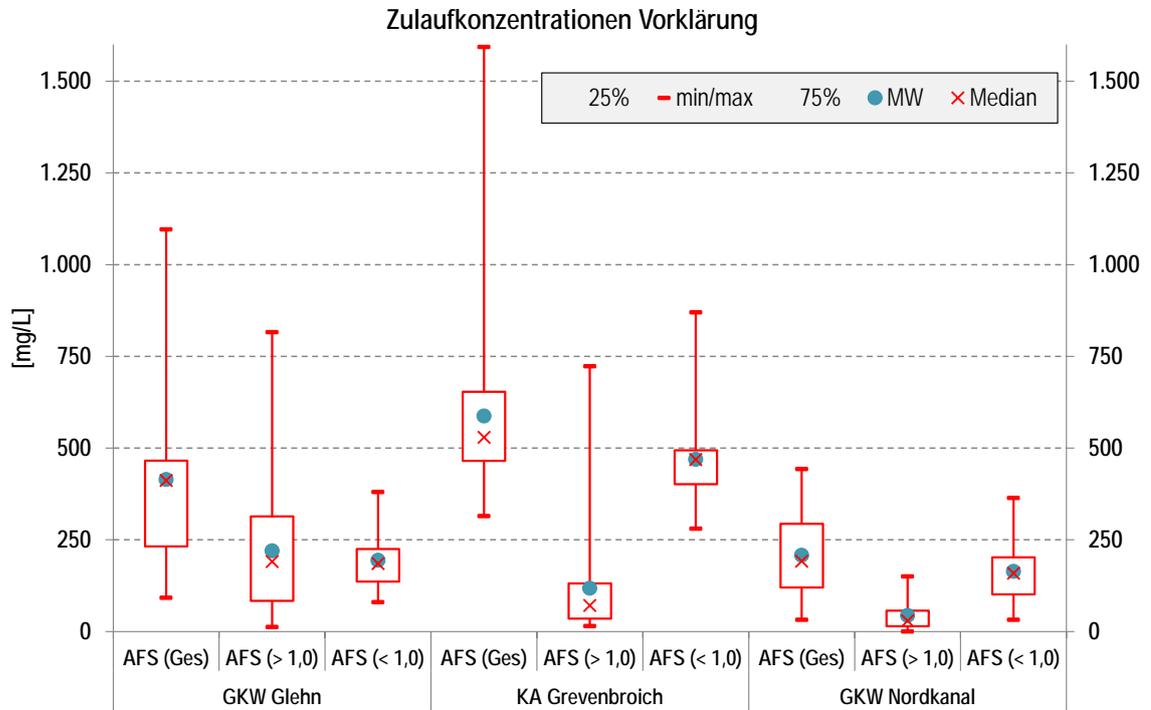


Abbildung 56: Vergleich der fraktionierten AFS-Konzentrationen im Zulauf zur Vorklämung (GWK Glehn - KA Grevenbroich - GWK Nordkanal)

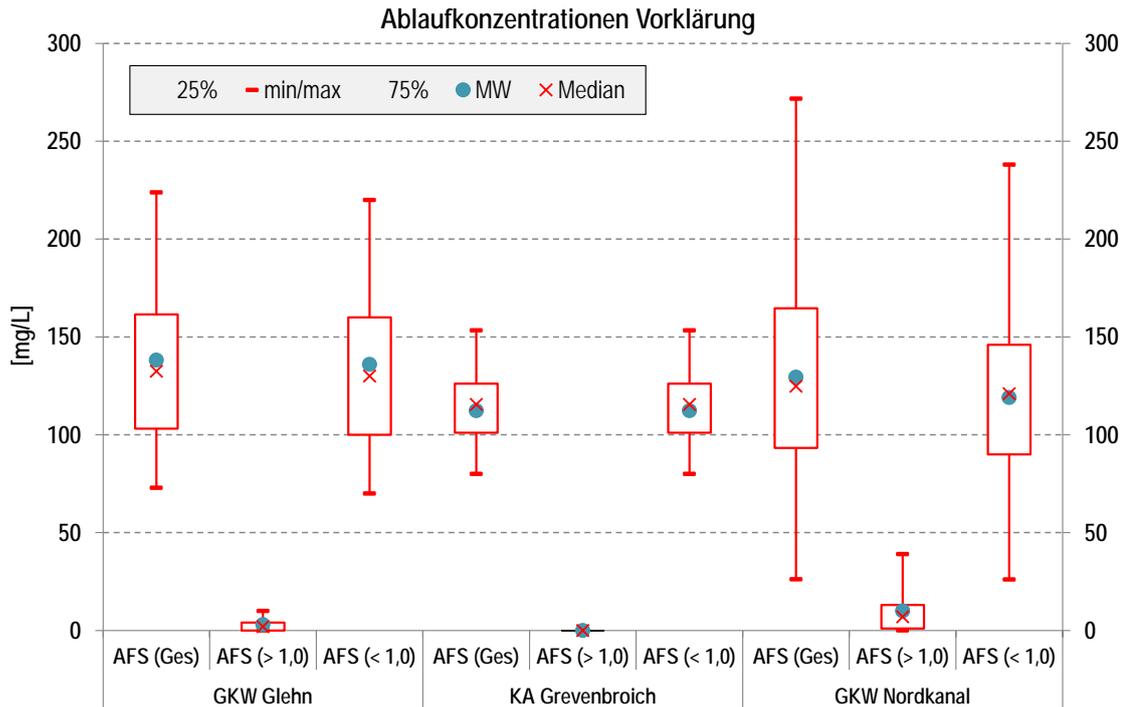


Abbildung 57: Vergleich der fraktionierten AFS-Konzentrationen im Ablauf aus der Vorklärung (GWK Glehn - KA Grevenbroich - GWK Nordkanal)

Dabei ist natürlich zu konstatieren, dass die Einzugsgebiete der drei Kläranlagen unterschiedlich strukturiert sind, sich Abwassercharakteristika im Zulauf nicht ohne detaillierte Differenzierung vergleichen lassen und die Betrachtung daher bestenfalls als Indiz gewertet werden kann.

Weiterhin muss festgehalten werden, dass zu keinem Zeitpunkt der vier Messphasen die jeweiligen Vorklärstufen im Modus einer sog. Grobentschlammung, d.h. einer Vorklärung mit einer kurzen Aufenthaltszeit von ca. 30 Minuten unter Trockenwetterbedingungen, betrieben werden konnten. Die kürzesten Aufenthaltszeiten unter Trockenwetterbedingungen lagen auf dem GWK Glehn bei 70 Minuten, auf der KA Grevenbroich bei 130 Minuten und auf dem GWK Nordkanal bei 62 Minuten.

Dies vorangestellt legt eine Betrachtung der AFS-Konzentrationen, insbesondere der jeweils enthaltenen Fraktion $AFS_{>1,0}$, die Vermutung nahe, dass eine zweidimensionale Rechengeometrie wie auf der KA Grevenbroich eine erkennbar höhere Entnahmeleistung, bezogen auf die Fraktion $AFS_{>1,0}$, zeigt als eine eindimensionale Rechengeometrie. Die AFS_{GES} -Belastung ist auf der KA Grevenbroich am höchsten, die anteilige $AFS_{>1,0}$ -Fraktion prozentual demgegenüber am geringsten im Vergleich der drei betrachteten Kläranlagen, was einen entsprechend Rückhalt in den vorgelagerten Verfahrensstufen andeutet. Zur exakten Bewertung fehlen jedoch die Zulaufdaten zu den Rechenbauwerken. Auf der KA Grevenbroich entnimmt die sehr große Vorklärung in der Folge diese $AFS_{>1,0}$ -Fraktion

komplett. Auf dem GWK Glehn wie auch auf dem GWK Nordkanal waren jedoch entsprechende Restfrachten im Ablauf der Vorklärung festzustellen, auf dem GWK Nordkanal sogar auf höherem Niveau als auf dem GWK Glehn.

Aus der verifizierenden Messphase 4 ergeben sich zwei wesentliche Erkenntnisse:

- ➔ Die darin erfolgte Mengenabschätzung der täglich (100 kg/d bis 200 kg/d) bzw. projiziert auch jährlich (50 Mg/a) zurückgehaltenen Masse an membrankritischen Feststoffen (AFS_{>1,0}-Fraktion) ist eindeutiger Beleg für das Erfordernis, auch eine MBR-Verfahrenstechnik mit anaerober Schlammstabilisierung und damit verbundener Vorklärstufe im Rahmen der mechanischen Abwasserreinigung, mit einer nachgeschalteten Siebung auszurüsten. Dadurch wird langfristig vermieden, dass größere Feststoffpartikel zu Verzopfungen oder Verschlammungen an und in den Membranfiltrationsmodulen der nachfolgenden biologischen Stufe führen.
- ➔ Im Hinblick auf die vorgeschaltete Denitrifikationszone der nachfolgenden biologischen Stufe ist die CSB-Gesamtreaktion von Vorklärung und Siebung von ca. 30 % im Mittel der gesamten Messphase und sogar annähernd 60 % unter Trockenwetterverhältnissen (Aussagekraft aufgrund der Datenlage eingeschränkt) kritisch zu bewerten. Zum Zeitpunkt der Messphase wurde diesem Umstand bereits durch eine Essigsäuredosierung vor dem Ablauf der Vorklärung Rechnung getragen. Zusätzlich ist der Betrieb von nur einer Vorklärstraße denkbar, wie es nach Auskunft des GWK-Personals auch bereits gelegentlich vorgenommen wird. Unter diesen Betriebsverhältnissen, die dann auch eine Grobentschlammung repräsentieren würden, würde eine zusätzliche Messphase aktuellere Daten zu einem optimierten und abgestimmten Betrieb von Vorklärung und Siebung liefern können.

3 Betrachtungen der MBR-Anlage nach aktuellen Bemessungsansätzen

3.1 Einführende Anmerkungen

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt betrifft die Belebungsstufe der MBR-Anlage. Diesbezüglich war während der letzten Betriebsjahre angesichts sehr guter Ablaufkonzentrationen die Vermutung entstanden, neben der biologischen Abwasserreinigung mittels suspendierter Biomasse könnten zusätzliche, in der Bemessung nicht berücksichtigte Reinigungseffekte auftreten. Diese Reinigungseffekte könnten hervorgerufen werden durch

- ➔ auf den Membranmoduloberflächen fixierte Biomasse, einen sogenannten Festbett-effekt und/oder
- ➔ die beim MBR-Verfahren bekanntermaßen kleinere Flockengröße, die Auswirkungen auf die Sauerstoffversorgung der Bakterien im Flockeninneren und somit auch auf die Nitrifikationsleistung hat (Manser et al., 2005)
- ➔ beginnende Granulierungsprozesse der suspendierten Biomasse; der zeitweise sehr niedrige ISV von 50 ml/g, das zeitweise sehr kompakte mikroskopische Flockenbild sowie die Auswirkungen des Steuerungsregimes (Kap. 3.4.3), welches kontinuierliche Wechsel von Hochlast- und Niedriglastphasen in den einzelnen Belebungsstraßen zur Folge hat und als eine von mehreren betrieblichen Maßnahmen zur verstärkten Bildung granularer Biomasse bekannt ist (de Kreuk, van Loosdrecht 2004), lassen sich als Hinweise hierauf interpretieren.

Vor diesem Hintergrund sollten vergleichende Betrachtungen der tatsächlichen Reinigungsleistung der Membran-Bioreaktor-Anlage nach dem aktuellen theoretischen Bemessungsansatz, der von der DWA mit der Herausgabe der Neufassung des Arbeitsblattes A 131 im Jahr 2016 aktualisiert wurde, in Bezug auf die Zulauf- und Betriebsverhältnisse (Zulauffrachten, Abwassertemperatur, Raumbelastung, Schlammbelastung, Schlammalter) durchgeführt werden, ergänzt durch Betrachtungen mittels dynamischer Simulation der biologischen Stufe des GWK Nordkanal mit Hilfe der gängigen ASM-Modellen sowie der zum Zeitpunkt der Befassung aktuellen Version des Anwenderprogramms SIMBA im Hinblick auf eine angepasste Regel- und Steuertechnik.

Diese Untersuchungen sind zu ergänzen durch Betrachtungen zur Aktivität der Biomasse in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration im Membran-Bioreaktor.

3.2 Material und Methoden

Aufgrund während der letzten Betriebsjahre verzeichneter sehr guter (heißt: niedriger) Ablaufkonzentrationen hinsichtlich der organischen Ablaufbelastungen und der Stickstoffbelastungen war die Vermutung entstanden, neben der biologischen Abwasserreinigung mittels suspendierter Biomasse könnten zusätzliche Reinigungseffekte auftreten.

Vor diesem Hintergrund wurden vergleichende Betrachtungen der tatsächlichen Reinigungsleistung der Membranbelebungen nach dem aktuellen theoretischen Bemessungsansatz in Bezug auf die Zulauf- und Betriebsverhältnisse (Zulauffrachten, Abwassertemperatur, Raumbelastung, Schlammbelastung, Schlammalter) durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, Hinweise und Erkenntnisse zu sammeln, die diese Vermutung bestätigen und möglicherweise eine Quantifizierung dieser Effekte erlauben.

Für die weitere Befassung wurden vom Erftverband folgende Unterlagen zur Verfügung gestellt:

- ➔ die der Ausführungsplanung der MBR GWK Nordkanal zugrunde liegende „Klärtechnische Berechnung“ vom 24. Juli 2002
- ➔ die Betriebsdaten des Jahres 2016 der MBR GWK Nordkanal

Diese beiden Unterlagen werden in den Kapiteln 3.3 und 3.4 ausführlich erläutert.

Die angesprochenen vergleichenden Betrachtungen wurden auf zweierlei Weise durchgeführt.

- ➔ Zum einen wurde die MBR GWK Nordkanal stationär nachbemessen bzw. nachgerechnet. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass sich im Jahre 2016 das Technische Regelwerk bezüglich der stationären Bemessung einstufiger Belebungsanlagen erneuert hat. Veröffentlicht wurde im Juni 2016 die Neufassung des DWA-Arbeitsblattes-A 131, die das 16 Jahre alte ATV-DVWK-Arbeitsblatt-A 131 außer Kraft setzte. Wesentlichste Änderung ist hierbei der Wechsel des Bemessungsansatzes vom BSB_5 auf den CSB.

Die Berechnungen wurden u.a. durchgeführt mit Hilfe der von der DWA angebotenen Software „Belebungs-Expert Kombi 3.0“.

- ➔ Zum zweiten wurde versucht, die MBR-Anlage GWK Nordkanal in einer dynamischen Simulation abzubilden.

Ausgangspunkt für die Entwicklung des Werkzeuges „Dynamische Simulation“ war die Erkenntnis, im Rahmen stationärer Bemessungsgänge die Einflüsse aus Tagesschwankungen, denen ein Kläranlagenzufluss sowohl hinsichtlich der zulaufenden Schmutzfrachten als auch der hydraulischen Belastung naturgemäß unterliegt, nur

unzureichend über empirische Stoßfaktoren und Sicherheitsfaktoren zu berücksichtigen. Es fehlt bei einer stationären Bemessung die Dimension der Zeit. Grundlage für das Werkzeug „Dynamische Simulation“ ist wiederum ein Modell, das die internen Abläufe hinreichend beschreibt. Das Modell entspricht nicht der Realität sondern einer Annäherung an die Realität. Das reale, biologische System wird abstrahiert. Unter der Simulation versteht man die Durchführung eines Experimentes mit dem abstrahierten System, dem Modell. Die Vorzüge gegenüber der alternativen Verfahrensweise, dem Experiment mit dem realen System sind v.a. der verminderte Zeit- und Kostenaufwand, die Betrachtung von Risikofällen und die verfahrenstechnische und steuerungstechnische Optimierung der Kläranlage. Das Modell besteht aus mathematischen Modellgleichungen zur Beschreibung von Transport- und biochemischen Stoffwechselprozessen. Diese Art der Modellbildung basiert auf der Anwendung naturwissenschaftlicher Gesetzmäßigkeiten, die zu Bilanzgleichungen für Stoffe, Massen, Energien, usw. führen (ATV 1997). Aufgrund der Komplexität der Modelle kann die Anwendung nur computergestützt erfolgen.

Das lange Zeit am meisten verwendete Simulationsmodell ist das Activated Sludge Model No.1 der IAWQ (HENZE et al. 1987), kurz genannt ASM 1. Das ASM 1 beinhaltet keine Modellierung der vermehrten biologischen Phosphorelimination. Mittlerweile hat sich nach mehreren Entwicklungsschritten das Modell ASM3 nach den Vorgaben der Hochschulgruppe (HSG) „Simulation“ in der computergestützten Anwendung durchgesetzt bzw. bewährt.

Entsprechende Programme wurden von verschiedenen Institutionen entwickelt, z.B. A-111 der Fa. Aqua System/Schweiz, SIMBA der Fa. ifak/Magdeburg, DENISIM des ISAH/Universität Hannover, um nur eine Auswahl zu nennen. Im vorliegenden Projekt wird die aktuelle SIMBA-Version, Produktname „SIMBA#2.0“, verwendet.

3.3 „Klärtechnische Berechnung“ zur Ausführungsplanung des GWK Nordkanal

Mit Datum vom 24. Juli 2002 wurde im Rahmen der Ausführungsplanung des GWK Nordkanal eine „Klärtechnische Berechnung“ vorgelegt, deren Belastungsdaten in Tabelle 7 zusammengefasst werden.

Die Bemessungstemperatur wurde mit 10 °C angesetzt. Als Behandlungsverfahren wurde eine vorgeschaltete Denitrifikation mit einem Schlammalter von $t_d = 25$ d (simultan aerobe Schlammstabilisierung) gewählt.

Tabelle 7: Bemessungsdaten GWK Nordkanal (Ausführungsplanung 2002)

	Einheit	Wert
Ausbaugröße	[EW]	80.000
Bemessungswassermengen		
Trockenwetterzufluss	[m³/d]	16.000
	[m³/2h]	2.048
	[m³/h]	1.024
Regenwetterzufluss	[m³/d]	45.000
	[m³/2h]	3.762
	[m³/h]	1.881
Nachtzufluss	[m³/2h]	334
	[m³/h]	167
Schmutzfrachten im Zulauf zur Belebungsstufe		
CSB	[kg/d]	10.080
BSB ₅	[kg/d]	5.512,5
AFS	[kg/d]	5.600
TKN	[kg/d]	941
NH ₄ -N	[kg/d]	659
org. N	[kg/d]	282
P _{GES}	[kg/d]	128,6

Im Ergebnis der stationären Bemessung der Belebungsbecken, die auf der Basis der Entwurfsfassung des seinerzeit kurz vor der Veröffentlichung stehenden neuen ATV-DVWK-Arbeitsblattes-A 131 (2003) durchgeführt wurde, wurden für das GWK Nordkanal folgende Volumina ermittelt.

Tabelle 8: Belebungsbeckenvolumina GWK Nordkanal (Ausführungsplanung 2002)

Volumen	Einheit	Wert
Denitrifikation	[m³]	2.609
Nitrifikation	[m³]	5.775
Variozone	[m³]	930

Diese Volumina wurden in vier parallelen Belebungsbeckenstraßen realisiert. Jede Belebungsbeckenstraße weist ein Volumen von 2.329 m³ auf.

Die Reinigungsanforderungen entsprachen den seinerzeitigen Mindestanforderungen für Abwasserbehandlungsanlagen der Größenklasse 4 bei einer Überwachungstemperatur von 12°C gemäß Abwasserverordnung.

Tabelle 9: Reinigungsanforderungen GWK Nordkanal (2004)

	Einheit	Wert
CSB	[mg/L]	90
BSB ₅	[mg/L]	20
NH ₄ -N	[mg/L]	10
N _{GES,anorg.}	[mg/L]	18
P _{GES}	[mg/L]	2

3.4 Betriebsdaten des Jahres 2016 des GWK Nordkanal

3.4.1 Wassermengen

In Abbildung 58 sind die Zulaufwassermengen für die GWK Nordkanal im 2-Std.- und im Tagesintervall dargestellt.

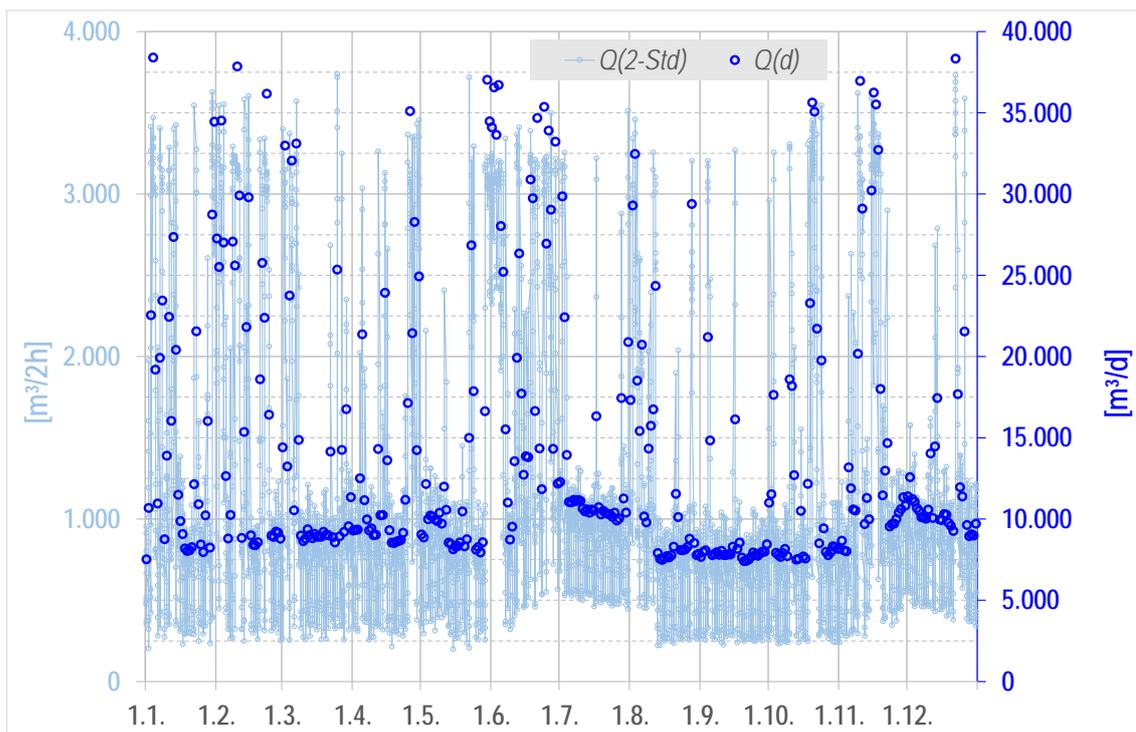


Abbildung 58: Zulaufwassermengen

Der Abbildung 58 ist zu entnehmen, dass sich die hydraulische Belastung des GWK Nordkanal in das zuvor dargestellte Bemessungsspektrum einordnet und es zu keinen Überschreitungen kommt.

3.4.2 Schmutzfrachten

Es folgen in Abbildung 59 bis Abbildung 61 die Jahresverläufe der maßgeblichen Schmutzfrachten CSB, NH₄-N und P_{GES}. Zur Orientierung sind die täglichen Zulaufwassermengen mit integriert.

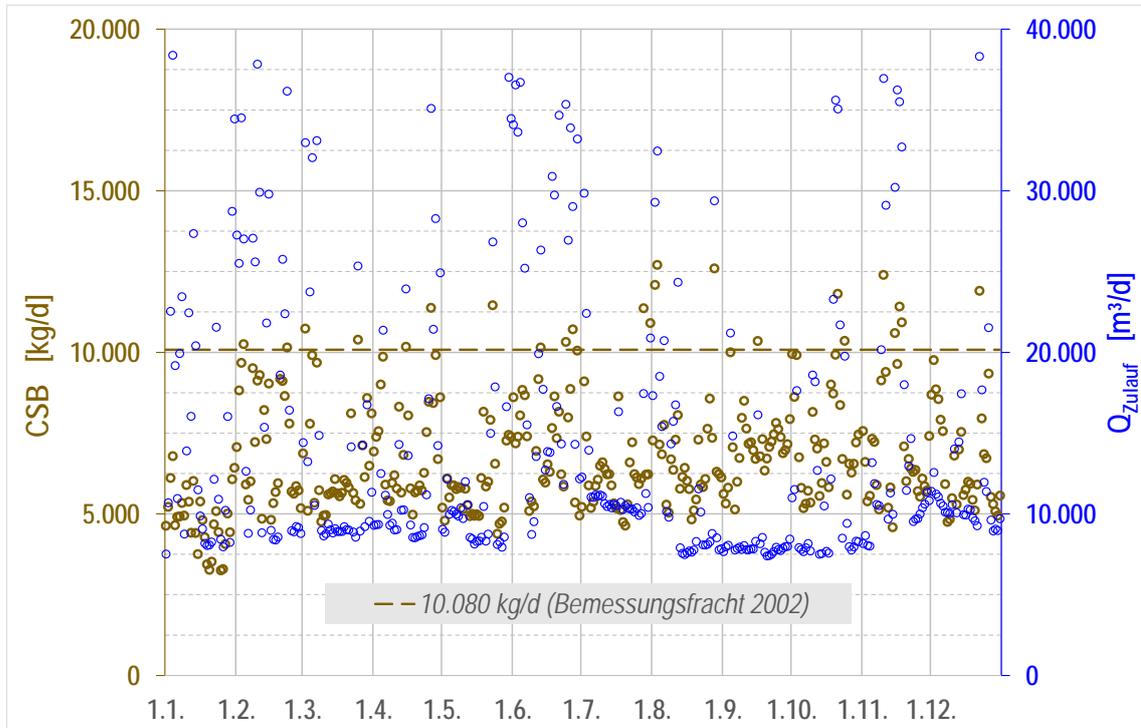


Abbildung 59: CSB-Zulauf

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

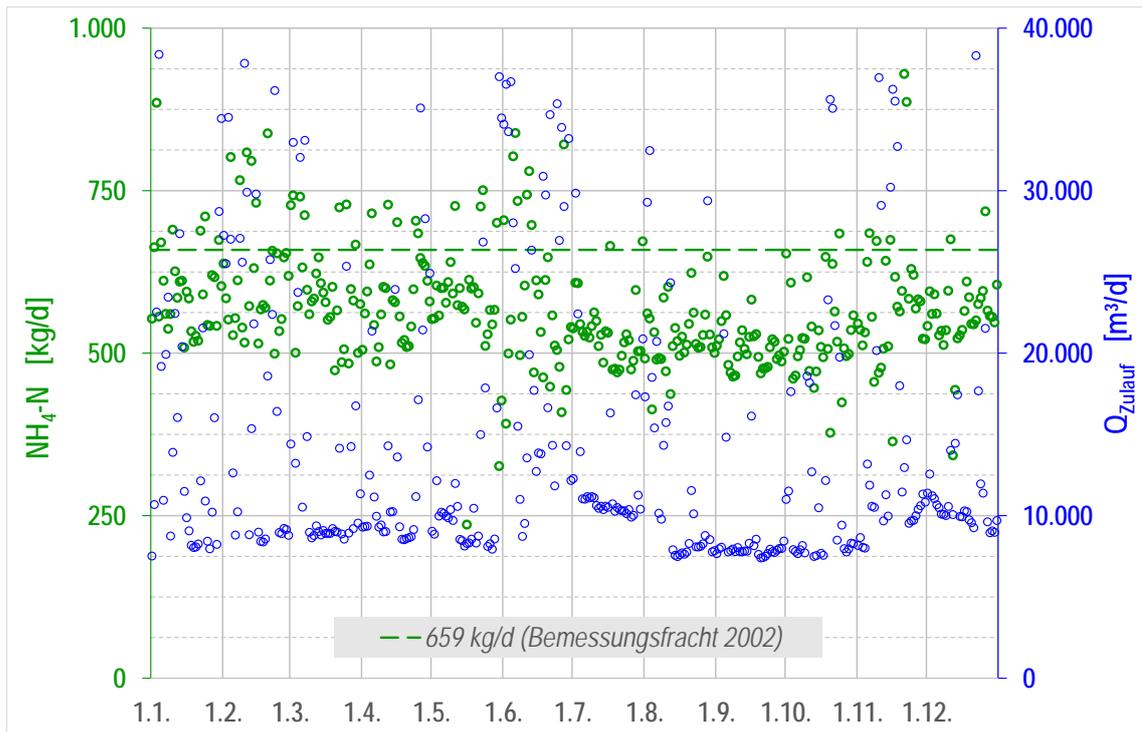


Abbildung 60: NH₄-N-Zulauffracht

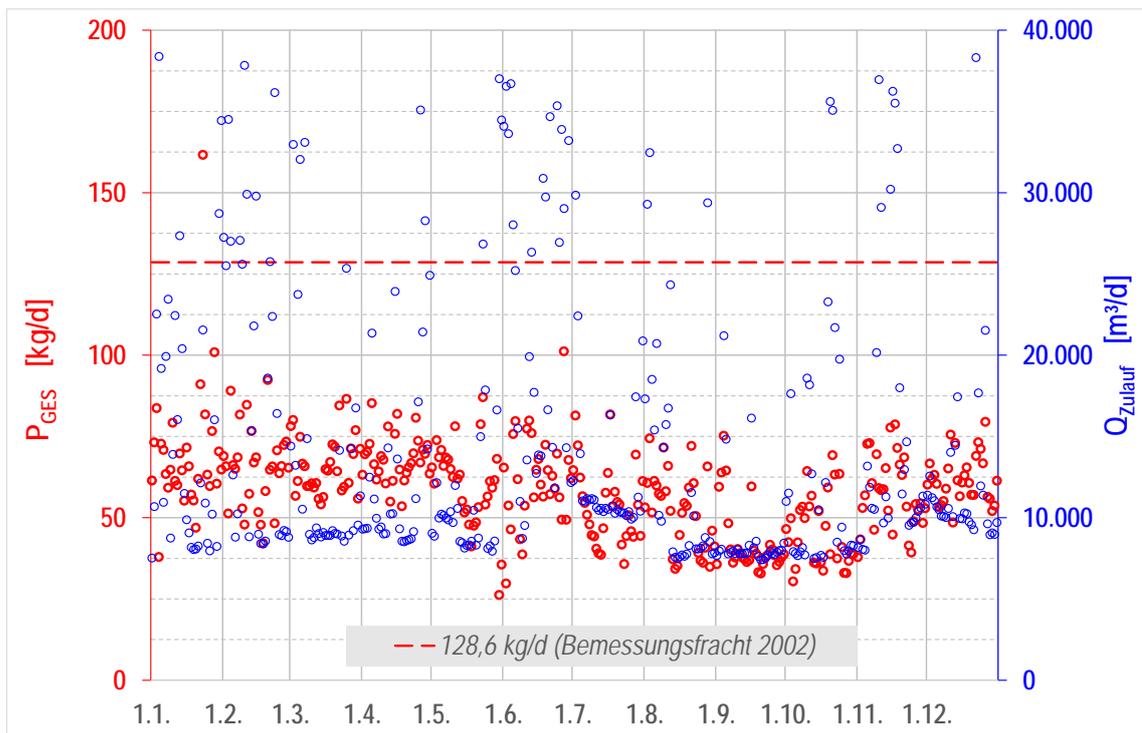


Abbildung 61: P_{GES}-Zulauffracht

Um einen Bezug zu den Bemessungsfrachten aus dem Jahre 2002 zu bekommen, werden in Abbildung 62 die Unterschreitungshäufigkeiten der drei Schmutzparameter dargestellt. Dazu folgende Hinweise:

- Zur besseren Anschaulichkeit der in einem Diagramm gemeinsam dargestellten Parameter ist der Parameter NH_4-N mit dem Faktor 10 und der Parameter P_{GES} mit dem Faktor 100 belegt worden.
- Zusätzlich enthalten sind die zugehörigen 85 % - Fraktilewerte der drei Parameterverläufe sowie zum Vergleich die Bemessungsfrachten aus dem Jahre 2002. Die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 10.

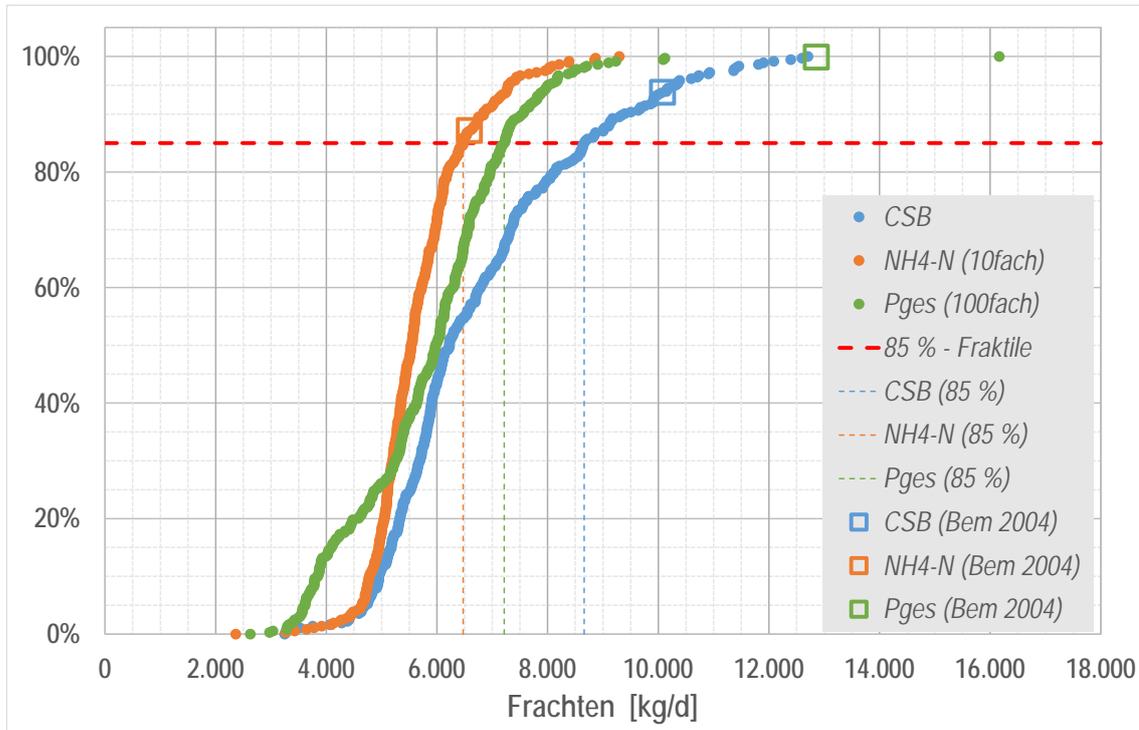


Abbildung 62: Unterschreitungshäufigkeiten der maßgeblichen Tagesschmutzfrachten

Tabelle 10: Datenabgleich Ausführungsplanung 2002 und Betriebsjahr 2016

	Einheit	2002: Bemessung	2016: 85 % - Fraktile	Diff.
CSB	[kg/d]	10.080	8.672	14,0 %
NH_4-N	[kg/d]	659	647	1,8 %
P_{GES}	[kg/d]	128,6	72,2	43,9 %

Es ist ersichtlich, dass sich im Jahre 2016 die Belastung des Abwasserzulaufes zum GWK Nordkanal bei Ansatz der jeweiligen 85 % - Fraktilewerte unterhalb der Bemessungsfrachten aus dem Jahre 2002 bewegt. Bezogen auf den Parameter NH_4-N wird der Bemessungswert nahezu exakt erreicht, bezogen auf den Parameter P_{GES} wird der Bemessungswert sehr deutlich unterboten.

3.4.3 Steuerungsregime der Belebungsstraßen

Das mechanisch vorgereinigte Abwasser wird in einem Verteilerbauwerk auf die vier Belebungsbecken aufgeteilt. Aufgrund der stark schwankenden Zulaufmengen der kommunalen Abwässer ist eine intelligente Befüllstrategie für die vier Beckenstraßen notwendig, um einen unwirtschaftlichen Teillastbetrieb zu verhindern. Diese Strategie anhand von Über- oder Unterschreitungen von Frachten und Konzentrationen (insgesamt sechs Abfragen) ist in Tabelle 11 dargestellt. Die Steuerung erfolgt anhand der Parameter Abwasserzulaufmenge, Zulaufmengen (CSB, NH₄-N und P_{GES}) sowie Ablaufkonzentration (NH₄-N und P_{GES}).

Tabelle 11: Befüllstrategie der vier Belebungsbeckenstraßen

Parameter			Bedingung	Anzahl Becken in Betrieb
Zulaufwasser- menge	Q _{ZUL}	[m ³ /h]	> 1.275	4
			> 850	3
			> 425	2
Zulauf- fracht	CSB	[kg/h]	> 1.050	4
			> 700	3
			> 350	2
	NH ₄ -N		> 79	4
			> 49	3
			> 29	2
	P _{GES}		> 10,2	4
			> 6,8	3
			> 3,4	2
Ablauf- konzent- ration	NH ₄ -N	[mg/L]	> 2,0	4
			> 1,5	3
			> 1,0	2
	P _{GES}		> 0,7	4
			> 0,6	3
			> 0,5	2

Alle sechs Abfragen werden stündlich durchgeführt und die sich daraus ergebende größte Beckenanzahl in Betrieb gesetzt. Ist nur ein Belebungsbecken in Betrieb, werden 2.329 m³ genutzt; sind alle vier Belebungsbecken in Betrieb, werden 9.314 m³ genutzt. Aus den Betriebsdatenaufzeichnungen des Jahres 2016 lässt sich resümieren, wie viel Belebungsbecken-
volumen im Mittel täglich in Betrieb war.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

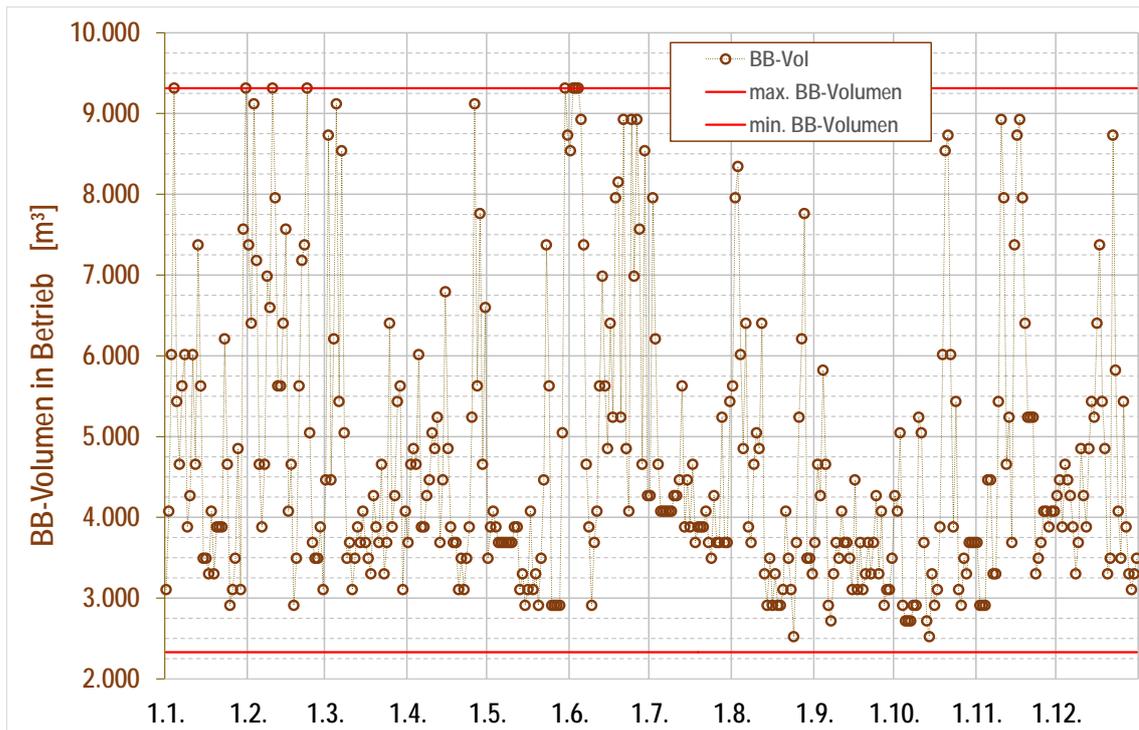


Abbildung 63: mittleres tägliches, in Betrieb befindliches Belebungsbeckenvolumen

Das minimal in Betrieb befindliche tägliche Belebungsbeckenvolumen betrug demnach an zwei Tagen 2.523 m³, das maximal in Betrieb befindliche tägliche Belebungsbeckenvolumen betrug an acht Tagen im Jahr 9.314 m³ (alle vier Beckenstraßen ganztägig in Betrieb). Es lässt sich resümieren, dass im Jahresmittel 4.716 m³ Belebungsbeckenvolumen in Betrieb waren. Das entspricht nahezu exakt der Hälfte des verfügbaren Belebungsbeckenvolumens auf dem GWK Nordkanal.

Da im weiteren Bericht noch detailliert die Trockenwettersituation bemessungstechnisch beleuchtet wird, zeigt die folgende Abbildung 64 die in Betrieb befindlichen Belebungsbeckenvolumina bei Trockenwetter.

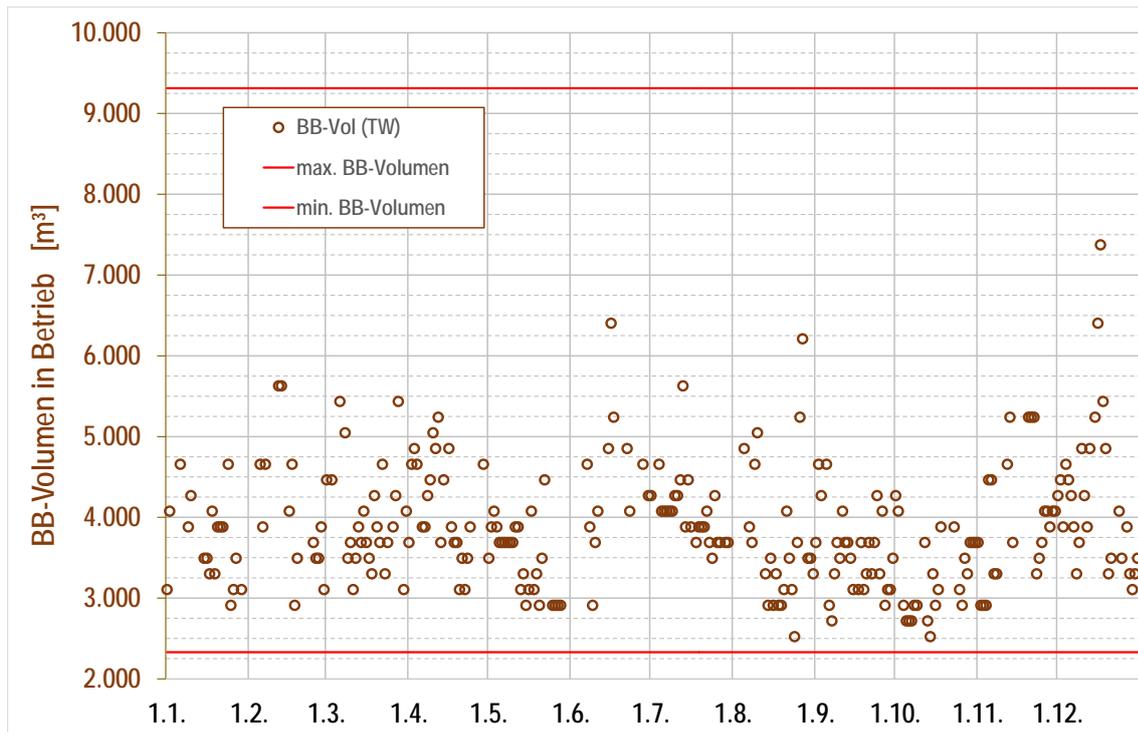


Abbildung 64: mittleres tägliches, in Betrieb befindliches Belebungsbeckenvolumen bei Trockenwetterzulauf

Das minimal in Betrieb befindliche tägliche Belebungsbeckenvolumen betrug demnach an 2.523 m^3 , das maximal in Betrieb befindliche tägliche Belebungsbeckenvolumen betrug an 7.374 m^3 . Im Mittel der 266 Trockenwettertage waren 3.869 m^3 Belebungsbeckenvolumen in Betrieb.

3.4.4 Ablaufsituation 2016

Die Reinigungsanforderungen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme des GWK Nordkanal im Jahre 2004, siehe Tabelle 9, wurden zwischenzeitlich durch den Erftverband gegenüber der Überwachungsbehörde niedrig erklärt. Sie entsprechen gegenwärtig folgenden Konzentrationen:

Tabelle 12: niedrig erklärte Reinigungsanforderungen GWK Nordkanal (2016)

	Einheit	Wert
CSB	[mg/L]	30
BSB ₅	[mg/L]	6
NH ₄ -N	[mg/L]	nicht definiert
N _{GES,anorg.}	[mg/L]	10
P _{GES}	[mg/L]	0,8

Es folgen in der Abbildung 65 bis Abbildung 68 die Verläufe der Ablaufkonzentrationen des GWK Nordkanal im Jahre 2016 für die Überwachungsparameter CSB, NH₄-N, N_{GES,anorg.} und P_{GES}.

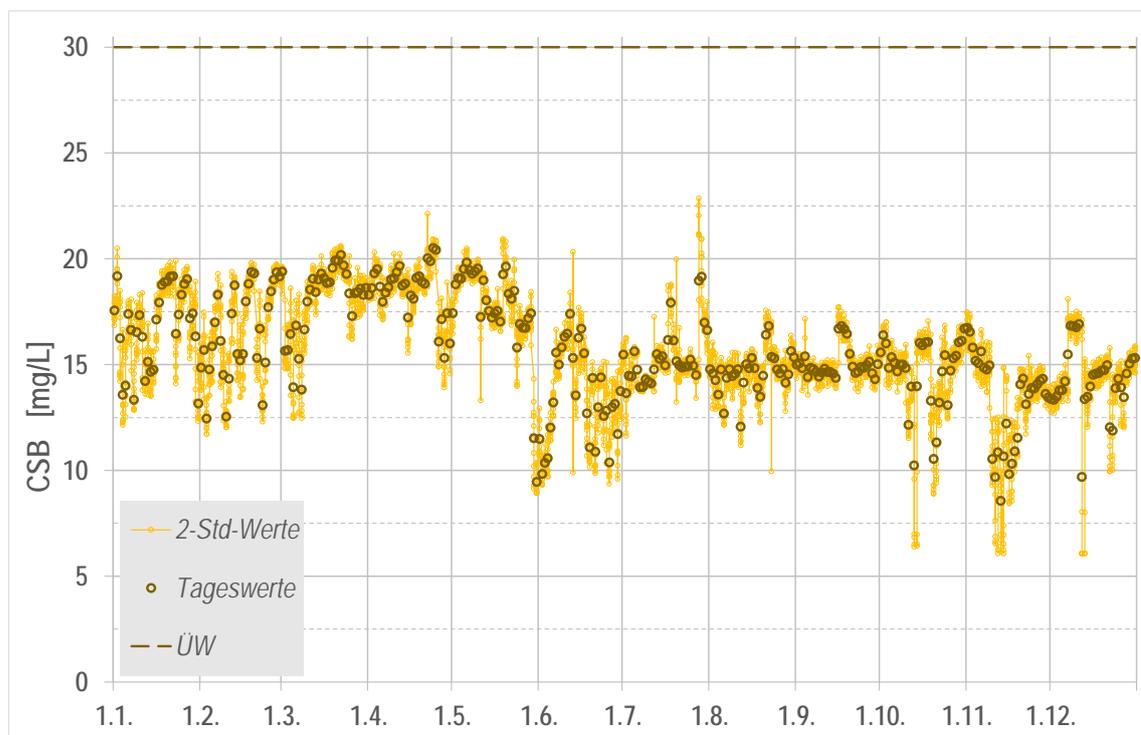


Abbildung 65: CSB-Ablaufkonzentrationen

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

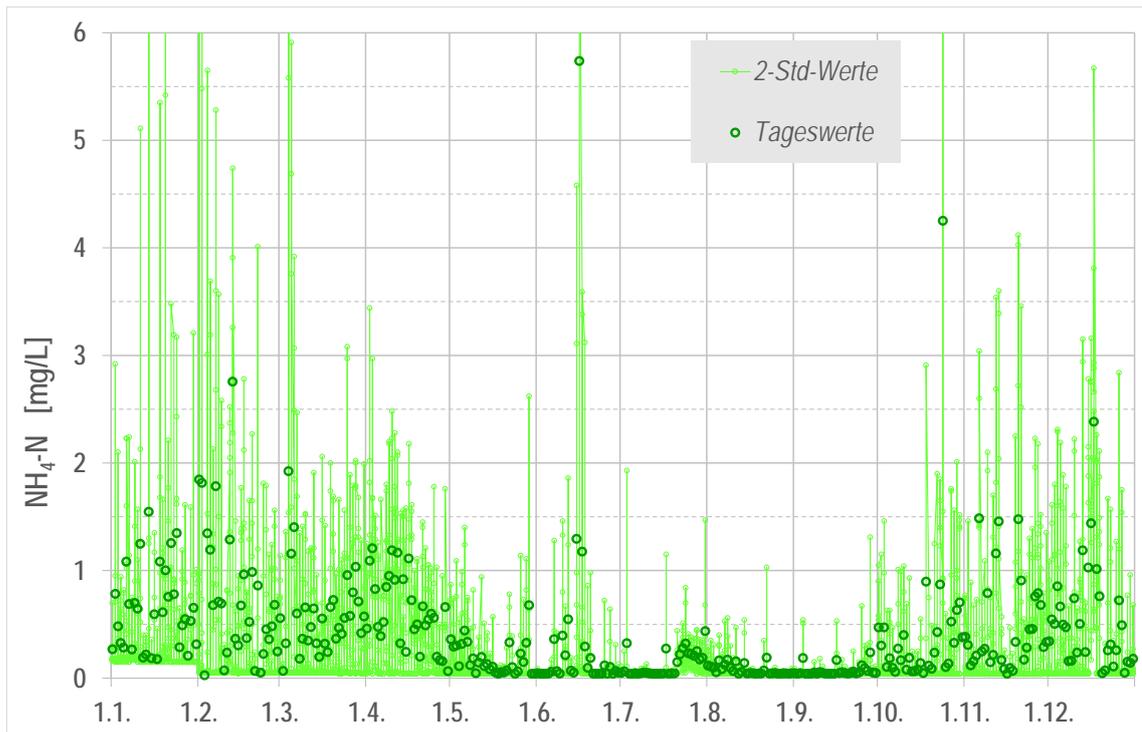


Abbildung 66: NH₄-N-Ablaufkonzentrationen

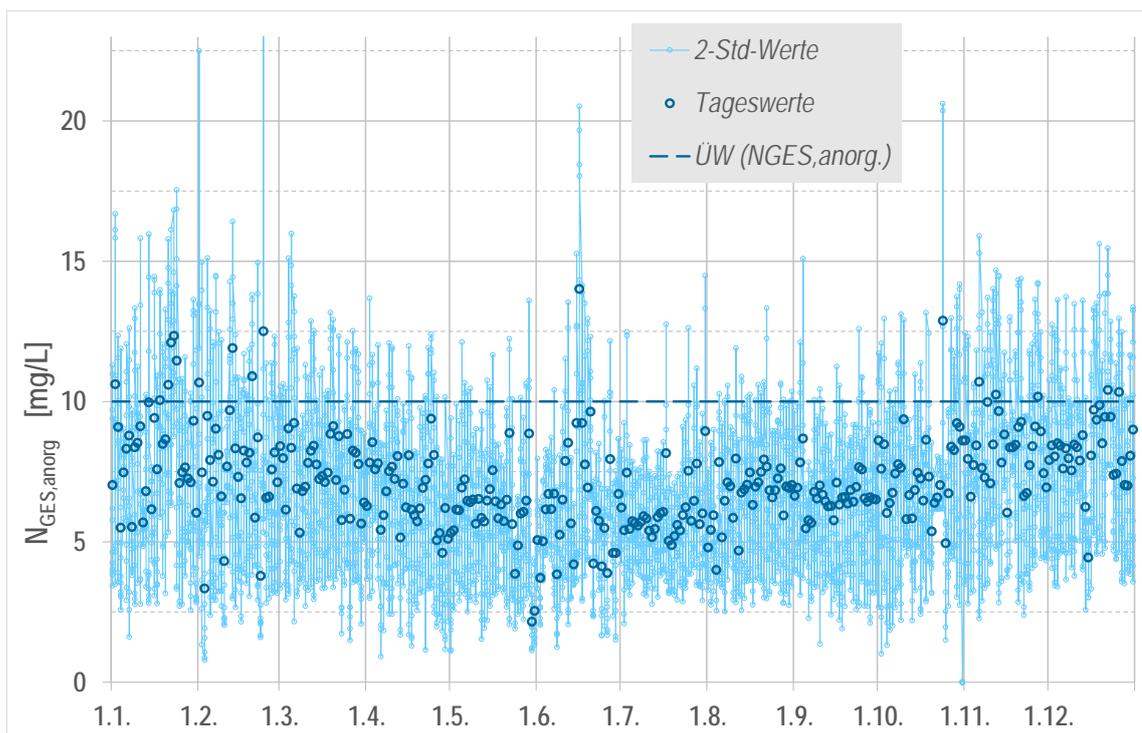


Abbildung 67: N_{GES,anorg.}-Ablaufkonzentrationen

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

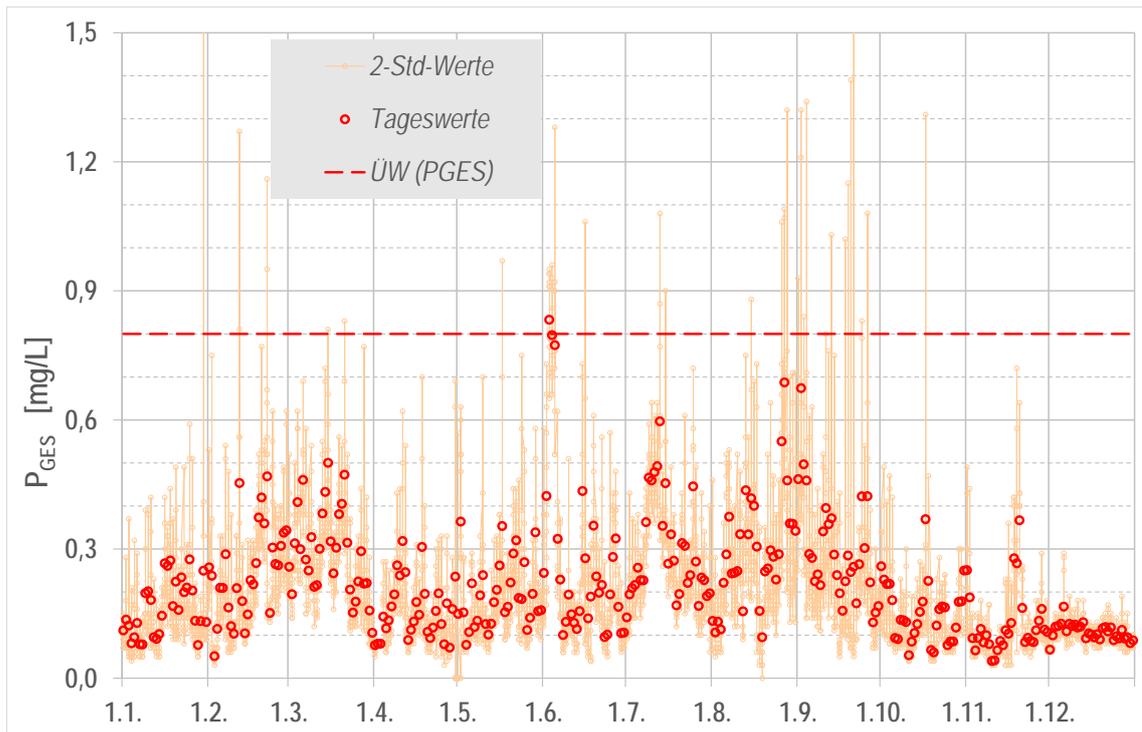


Abbildung 68: P_{GES}-Ablaufkonzentrationen

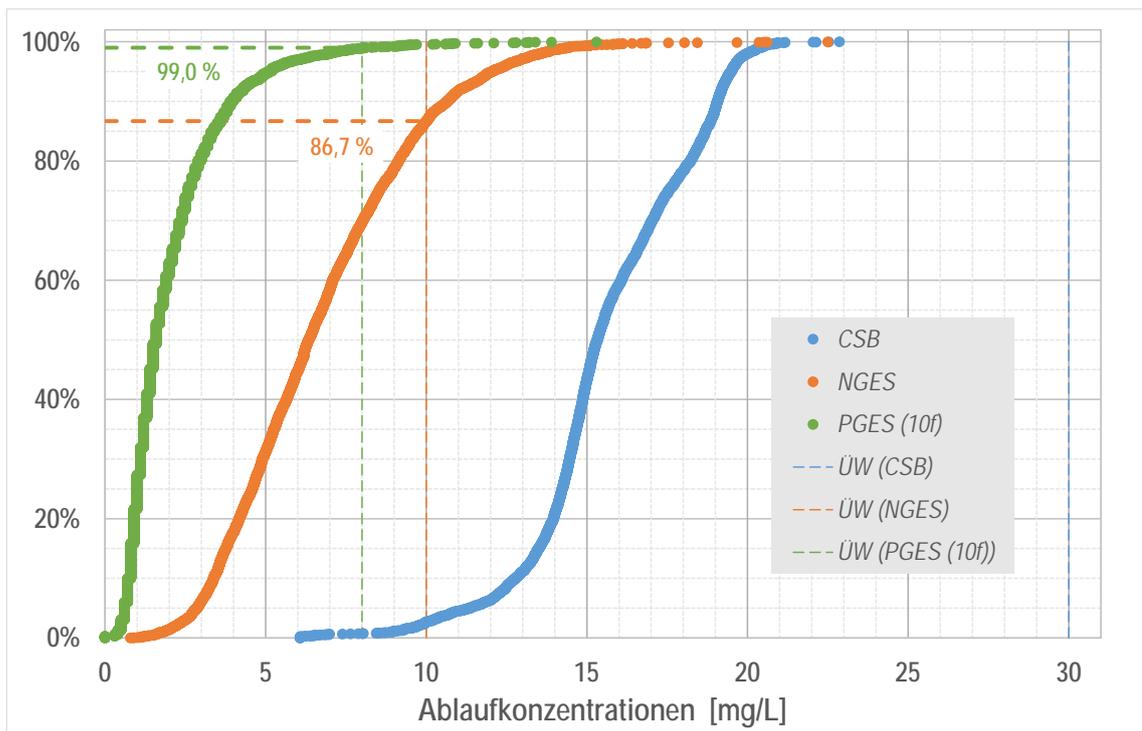


Abbildung 69: Unterschreitungshäufigkeiten der Ablaufkonzentrationen in der 2-Std.-Mischprobe bezogen auf die aktuellen Überwachungswerte

Bezüglich der Häufigkeit der Überschreitungen von Überwachungswerten korrespondiert Abbildung 69 sehr gut mit der Einordnung der Bemessungsfrachten in die Belastungssituation des Jahres 2016 in Abbildung 62 bezogen auf die Parameter Stickstoff und Phosphor.

Im Falle Stickstoff wird die ursprünglich angesetzte Bemessungsfracht an ca. 13 % der Tage im Jahr überschritten. Dies entspricht exakt der Prozentzahl an 2-Std.-Ablaufmischproben, die den Überwachungswert von 10 mg $N_{GES,anorg.}/L$ überschreiten.

Beim Parameter Phosphor wird die ursprünglich angesetzte Bemessungsfracht an ca. 1 % der Tage im Jahr überschritten. Auch hier entspricht dies der Prozentzahl an 2-Std.-Ablaufmischproben, die den Überwachungswert von 0,8 mg P_{GES}/L überschreiten.

Für die organische Verschmutzung stellt sich die Situation hingegen derart dar, dass die höchste, im Jahre 2016 gemessene CSB-Ablaufkonzentration von 22,9 mg CSB/L den Überwachungswert von 30 mg CSB/L weit unterschreitet. Die CSB-Zulaufkonzentration jedoch überschreitet die seinerzeit angesetzte Bemessungsfracht an ca. 6 % der Tage im Jahr.

Diese Betrachtungen lassen bislang außer Acht, dass die ursprünglich angesetzten Überwachungswerte (Tabelle 9), die auch der seinerzeitigen Bemessung im Jahre 2002 zugrunde lagen, zwischenzeitlich vom Erftverband niedrig erklärt wurden (Tabelle 12). Bezogen auf die früheren Überwachungswerte ergibt sich das Bild in Abbildung 70.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

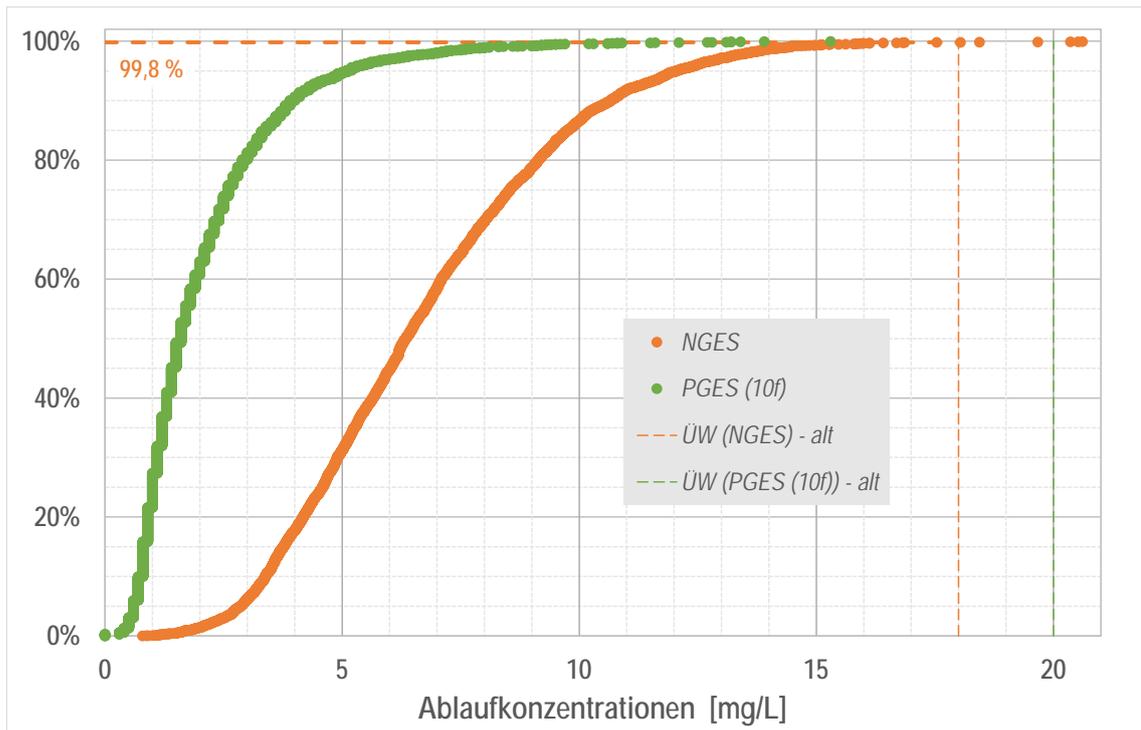


Abbildung 70: Unterschreitungshäufigkeiten der Ablaufkonzentrationen in der 2-Std.-Mischprobe bezogen auf die früheren Überwachungswerte

Danach ergäben sich für die organische Verschmutzung und für Phosphor keine Überschreitungen im Kläranlagenablauf im Jahre 2016.

Im Falle Stickstoff würde der frühere Überwachungswert von 18 mg $N_{GES,anorg.}/L$ durch lediglich 0,2 % der 2-Std.-Ablaufmischproben überschritten sein und dies, obwohl, wie bereits erwähnt, an ca. 13 % der Tage im Jahr die ursprünglich angesetzte Bemessungsfraucht überschritten wurde. Hieraus lässt sich bereits die Vermutung ableiten, dass die Anlage verfahrenstechnisch über Reserven verfügt, die bemessungstechnisch nicht erfasst sind.

3.4.5 Belebungsstufe

Nachstehend ist der Temperaturverlauf in der Belebungsstufe über das Jahr 2016 dargestellt.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung



Abbildung 71: Abwassertemperaturen in der Belebungsstufe

Es folgen der Verlauf des Feststoffgehaltes, des Schlammalters sowie und der CSB-Schlammbelastung in der Belebungsstufe. Für die Ermittlung der CSB-Schlammbelastung wurden die Belebungsvolumina gemäß Abbildung 64 angesetzt.

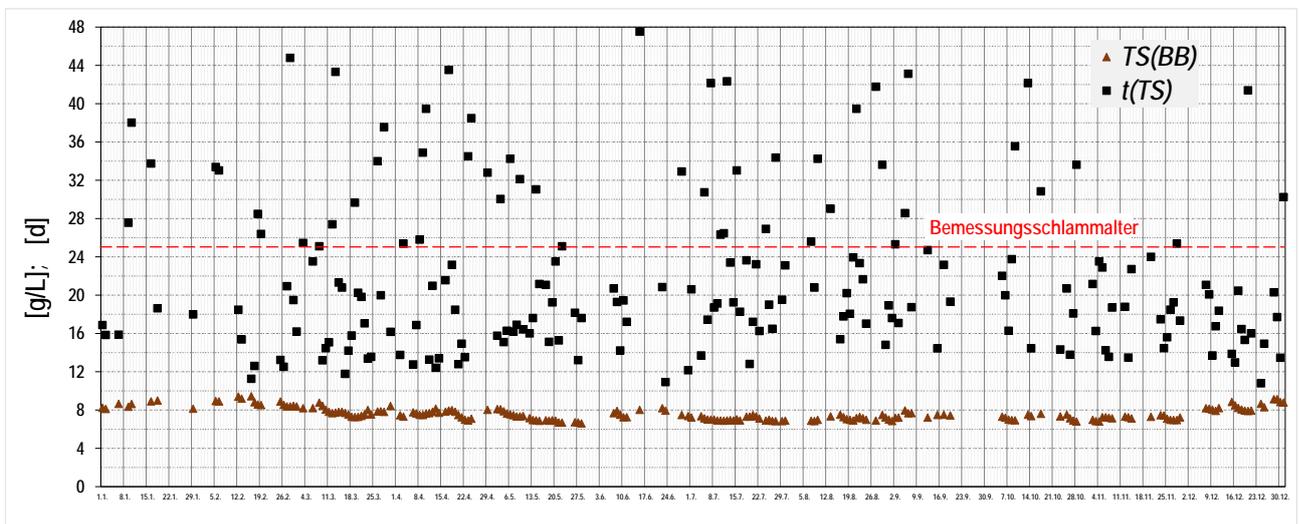


Abbildung 72: Feststoffgehalt und Schlammalter in der Belebungsstufe

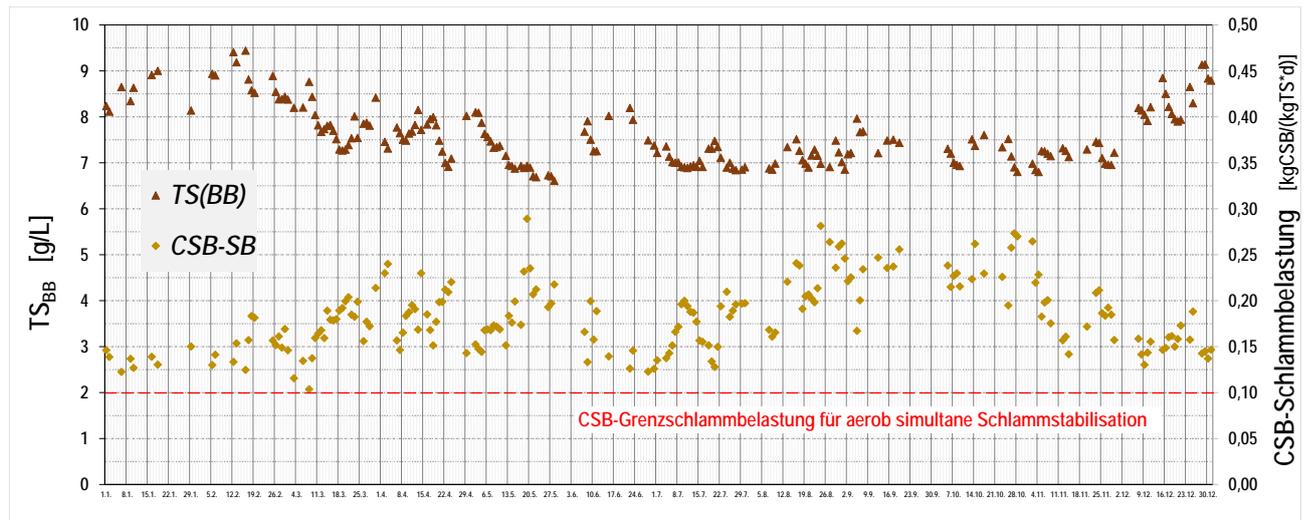


Abbildung 73: Feststoffgehalt und CSB-Schlammbelastung in der Belebungsstufe

Den beiden vorherigen Abbildungen ist zu entnehmen, dass die Belebungsstufe im Jahre 2016, gemessen an den üblichen Bemessungsparametern Schlammalter und organische Schlammbelastung, mehrheitlich nicht im Bereich einer aeroben simultanen Schlammstabilisierung betrieben wurde. Es wurden sowohl ein Schlammalter von 25 Tagen mehrheitlich unterschritten als auch eine CSB-Schlammbelastung von 0,10 [kgCSB/(kgTS*d)] durchgehend überschritten.

Die Verläufe des Feststoffgehaltes und der CSB-Schlammbelastung sind bei konstanter CSB-Zulaufbelastung bekanntermaßen entgegengesetzt. Nimmt der Feststoffgehalt in der Belebung ab, steigt die dortige CSB-Schlammbelastung. Naturgemäß ändert sich die CSB-Zulaufbelastung zwar permanent, trotzdem ist dieser grundsätzliche Zusammenhang in Abbildung 73 zu erkennen. Die folgende Abbildung 74 zeigt die direkte Beziehung zwischen Feststoffgehalt und CSB-Schlammbelastung.

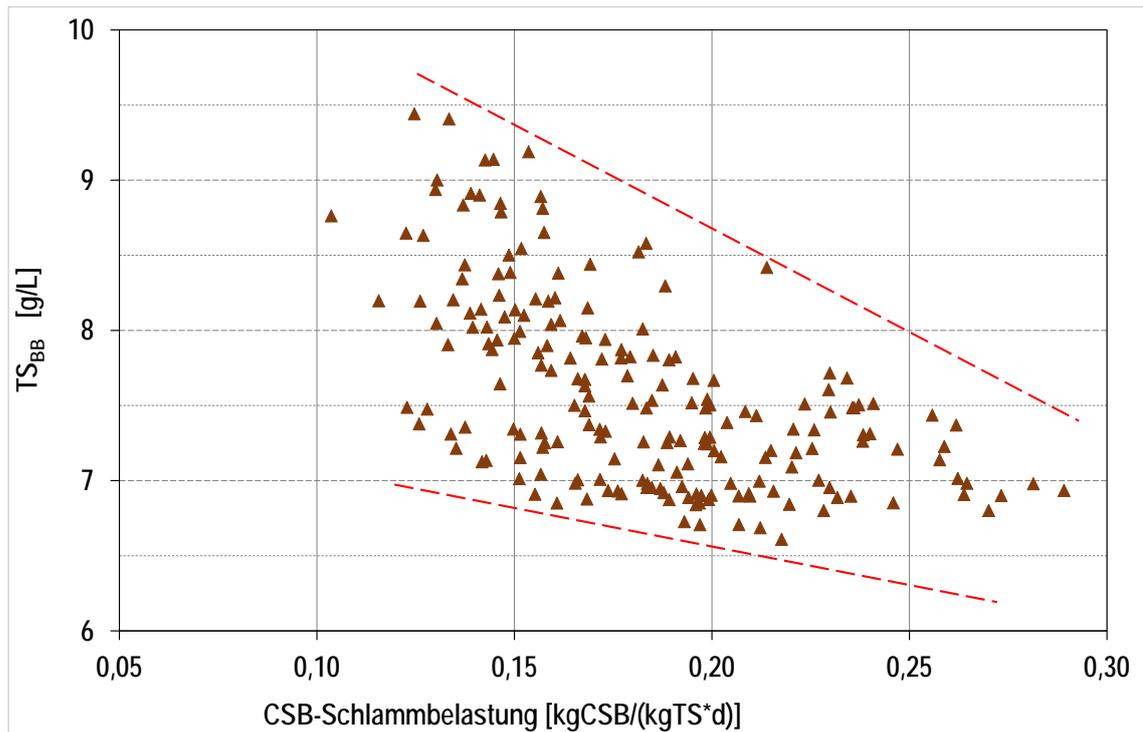


Abbildung 74: Abhängigkeit zwischen Feststoffgehalt und CSB-Schlammbelastung

3.5 Stationäre Neu-Bemessung

Grundlage der stationären Neubetrachtung sind die Betriebsdaten des GWK Nordkanal aus dem Jahr 2016. Ziel ist es, die in Betrieb befindlichen Beckengrößen mit denen zu vergleichen, welche bei den verschiedenen täglichen Belastungssituationen im Jahre 2016 bemessungstechnisch erforderlich gewesen wären. Es ist zu untersuchen, ob sich Hinweise finden lassen, die die eingangs formulierte Vermutung des Auftretens zusätzlicher Reinigungseffekte im Belebungsbecken des GWK Nordkanal (Festbettwirkung der Membranoberflächen, positiver Einfluss kleinerer Flockenstruktur) erkennen lassen. Grundsätzlich wäre ein Indiz dafür, dass die stationären Neubetrachtungen mehrheitlich ein größeres erforderliches Belebungsbeckenvolumen ermitteln, als es faktisch an den betreffenden Bemessungstagen in Betrieb gewesen ist. Die Ermittlung der täglich in Betrieb befindlichen Volumina ergibt sich aus den Betriebsdaten und kann anhand des Steuerungsregimes (Kap. 3.4.3, siehe Abbildung 63 und Abbildung 64) vorgenommen werden. Anschließend wurden die erforderlichen Belebungsbeckenvolumina für die täglich unterschiedlichen Zulaufsituationen im Jahr 2016 nach den Vorgaben des zwischenzeitlich in Kraft getretenen DWA-A 131 (2016) berechnet und mit dem tatsächlich zu diesem Zeitpunkt aktiven Belebungsbeckenvolumen verglichen.

Für die durchzuführenden Berechnungen waren die vorhandenen Zulaufdaten (aus dem Zulaufbereich der Kläranlage) auf den eigentlichen Bemessungsort, nämlich die biologi-

sche Stufe des GWK Nordkanal, anzupassen. Dazu wurde auf Werte und Regressionsbeziehungen zurückgegriffen, die in einem Vorläuferprojekt auf dieser Kläranlage ermittelt worden waren (FG SWW 2010). Dies betraf

- die Reduktion des CSB im Durchlauf durch die mechanische Reinigungsstufe (Rechen, Sandfang, Sieb), die mit 16,5 % angesetzt wurde, sowie
- die lineare Regressionsbeziehung zwischen CSB und AFS hinter der Siebstufe (für Trockenwetersituationen ergab sich: $AFS = 0,6 * CSB - 24,4$ mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,91$).

Da das neue DWA-A 131 (2016) 16 Jahre nach der Vorgängerversion in mancher Hinsicht eine Zäsur darstellt, soll an dieser Stelle kurz auf die markantesten Aspekte der neuen Bemessungsrichtlinie eingegangen werden.

- Das A 131 beruht nicht mehr auf dem biologischen Sauerstoffbedarf (BSB_5) als Summenparameter der organischen Belastung, sondern auf dem chemischen Sauerstoffbedarf (CSB).
- Der CSB wird fraktioniert mit dem Ziel, den für die Berechnung des Sauerstoffverbrauchs und für die Berechnung der Schlammproduktion aus dem Kohlenstoffabbau erforderlichen abbaubaren Anteil des CSB, der auch einen zu quantifizierenden leicht abbaubaren Anteil enthält, zu ermitteln.
- Der erforderliche Denitrifikationsvolumenanteil wird iterativ ermittelt. Dabei wird der Denitrifikationsvolumenanteil solange verändert, bis Nitratangebot und Sauerstoffzehrung übereinstimmen.
- Der frühere Sicherheitsfaktor SF wird nun als Prozessfaktor PF bezeichnet, wobei dieser Prozessfaktor nun erstmals einen Bezug zum NH_4 -N-Überwachungswert von entweder 5 mg/l NH_4 -N oder 10 mg/l NH_4 -N aufweist.

In einem ersten Berechnungsdurchlauf (Abbildung 75) wurde, entsprechend der Bemessungsgrundlage von 2002, von einer simultan aerob stabilisierenden Belebungsanlage ausgegangen, also von einem Schlammalter von 25 Tagen bei einer Bemessungstemperatur von 10 °C. Zusätzlich wurden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Berücksichtigung aller Tage mit einem Abwasserzulauf $< 16.000 \text{ m}^3/\text{d}$ (vorgegebener maximaler Trockenwetterzulauf). Daraus resultiert $n = 256$ Tage.
- Ansatz des auf der Kläranlage realisierten Denitrifikationsvolumenanteils am gesamten Belebungsvolumen von konstant 0,38, weswegen demnach bei dieser Betrachtung keine Iteration, wie zuvor beschrieben, durchgeführt wurde. Folglich stimmen in diesen Rechenläufen Nitratangebot und Sauerstoffzehrung nicht überein.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

- ➡ Der Prozessfaktor PF wird mit Bezugnahme auf einen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Überwachungswert von 5 mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$ ermittelt.
- ➡ Ansatz der auf der Basis des vorhandenen Steuerungsregimes betriebenen Belebungsvolumina bei Trockenwetterzulauf gemäß Abbildung 64.

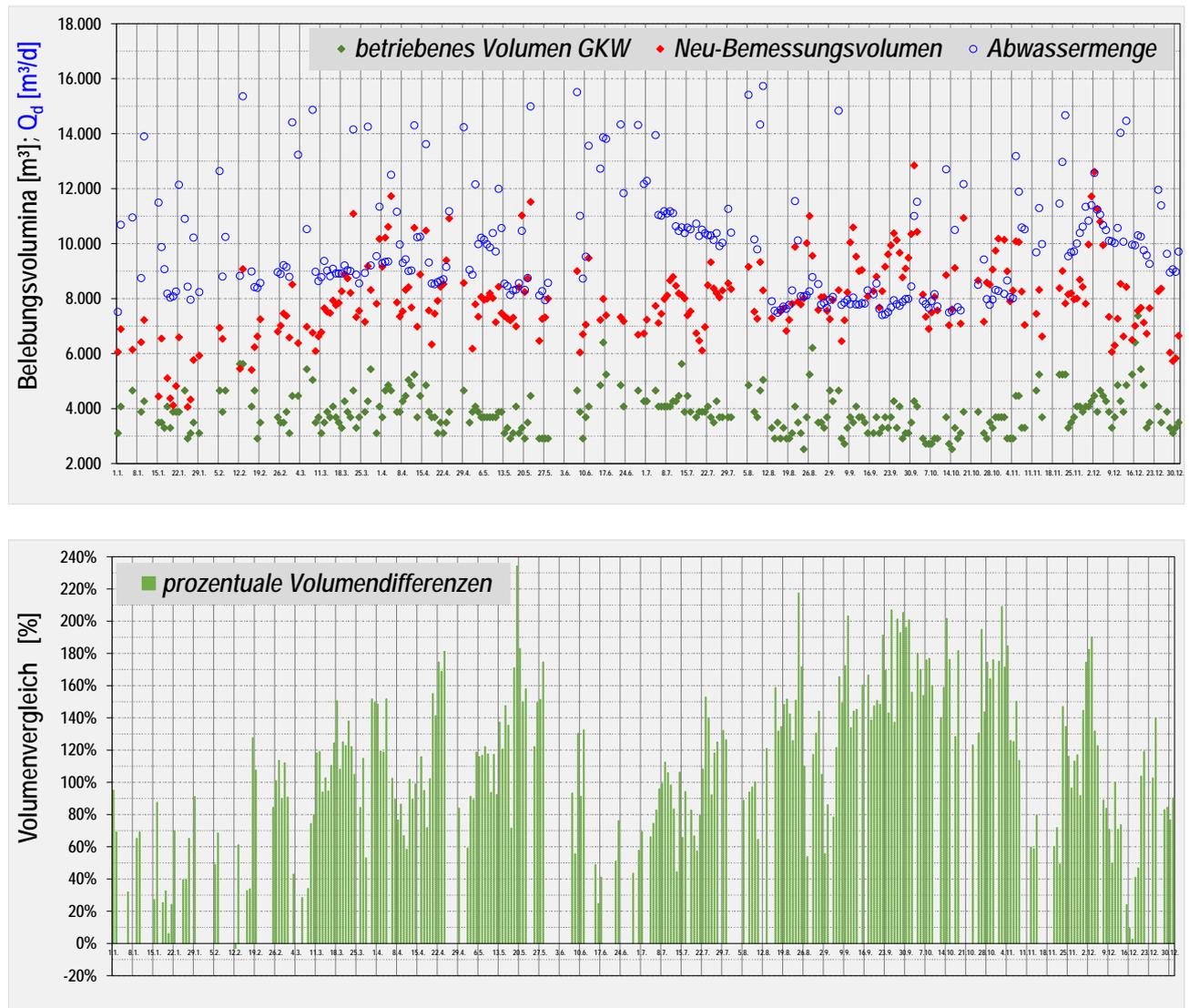


Abbildung 75: Bemessungsvergleich: Variante $t_{TS} \geq 25$ d

Im oberen Teil der Abbildung 75 sind, zusammen mit der zulaufenden täglichen Abwassermenge, die zu vergleichenden Belebungsvolumina dargestellt, die sich erkennbar nahezu durchgehend auf einem unterschiedlichen Niveau bewegen. Die Differenzen zwischen Neu-Bemessungsvolumen und dem in realiter betriebenem Belebungsvolumen zeigt der untere Abbildungsteil. Das hohe Differenzniveau ergibt sich sowohl daraus, dass das GWK Nordkanal nur sehr selten mit einem Schlammalter von 25 Tagen betrieben wurde als auch aus dem Ansatz einer konstanten (und somit unrealistischen) Bemessungstem-

peratur von 10 °C im Rahmen der Neubemessung. Medianwert und Mittelwert der Volumendifferenzen zwischen $V_{\text{NEU-BEMESSUNG}}$ und V_{BETRIEB} liegen nahezu identisch bei ca. 110 %.

Da das GWK Nordkanal gegenwärtig für eine anaerobe Schlammstabilisierung umgerüstet wird und somit der Bemessungsansatz von 25 Tagen grundsätzlich unrealistisch geworden ist, war für einen zweiten Neu-Bemessungsdurchlauf ein Schlammalter zur Absicherung einer weitgehenden Stickstoffelimination (Nitrifikation und Denitrifikation) zu wählen. Folgende Änderungen wurden daher vorgenommen:

- ➔ Schlammalterermittlung gemäß DWA-A 131 (2016), Mindestschlammalter: 10 Tage
- ➔ Berücksichtigung des tatsächlichen täglichen Temperaturverlaufs zwischen 8 °C und 22 °C (siehe Abbildung 71)

Das Ergebnis zeigt Abbildung 76.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

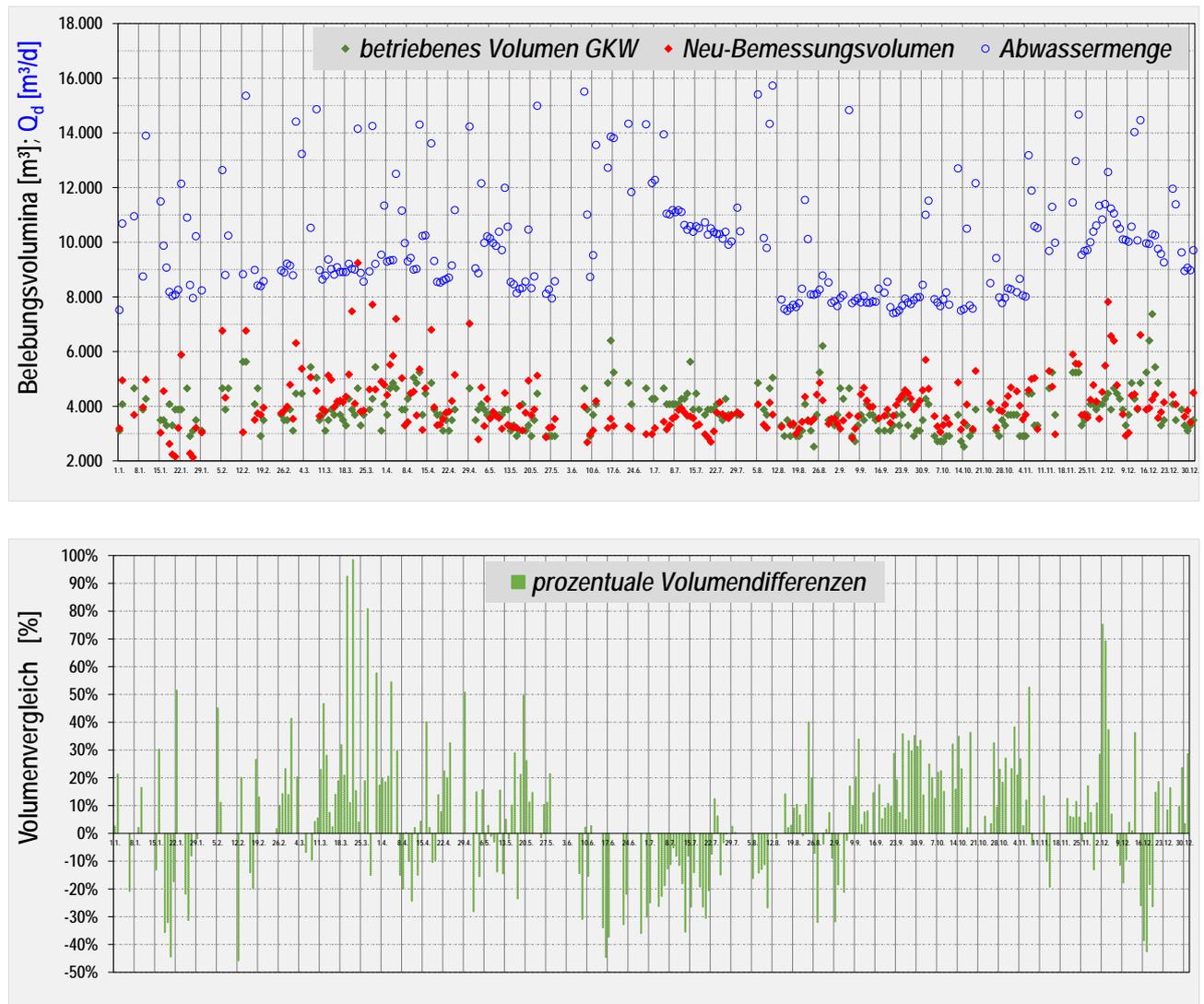


Abbildung 76: Bemessungsvergleich: Variante $t_{TS} \geq 10$ d

Unter den veränderten Randbedingungen liegen die zu vergleichenden Volumina nun auf einem sehr ähnlichen Niveau. Medianwert und Mittelwert der Volumendifferenzen zwischen $V_{NEU-BEMESSUNG}$ und $V_{BETRIEB}$ liegen identisch bei ca. 6 %. Bei einer Erhöhung des Mindestschlammalters auf 12 d (auf die zugehörige Abbildung wird an dieser Stelle verzichtet) erhöhen sich diese Werte auf knapp 17 %. Auf eine weitere Interpretation wird an dieser Stelle noch verzichtet, da der Ansatz des auf der Kläranlage realisierten Denitrifikationsvolumenanteils am gesamten Belebungsvolumen von konstant 0,38 dazu führt, dass in der Neu-Bemessung das Nitratangebot und die Sauerstoffzehrung nicht übereinstimmen.

Daher wird nun in der nachfolgenden Berechnung (Abbildung 77) diesem Umstand Rechnung getragen und nicht mehr der konstante und vor Ort vorhandene Denitrifikationsvolumenanteil am gesamten Belebungsvolumen von 0,38 berücksichtigt, sondern gemäß den Vorgaben des DWA-A 131 (2016) der Denitrifikationsvolumenanteil im Spektrum zwischen

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

20 % und 60 % iterativ verändert, bis Nitratangebot und Sauerstoffzehrung übereinstimmen. Des entspricht auch insofern eher realer Bemessungspraxis, da üblicherweise zum Zeitpunkt einer Anlagenneubemessung keine Volumenverhältnisse zu berücksichtigen sind. Für die nachfolgende Ergebnisdarstellung wurden nur die Bemessungs-Trockenwettertage berücksichtigt, an denen der Iterationsvorgang einen Quotienten von 1,0 ($\pm 2\%$) ergab. Dadurch reduzierte sich die Anzahl der betrachteten Trockenwettertage auf 199.

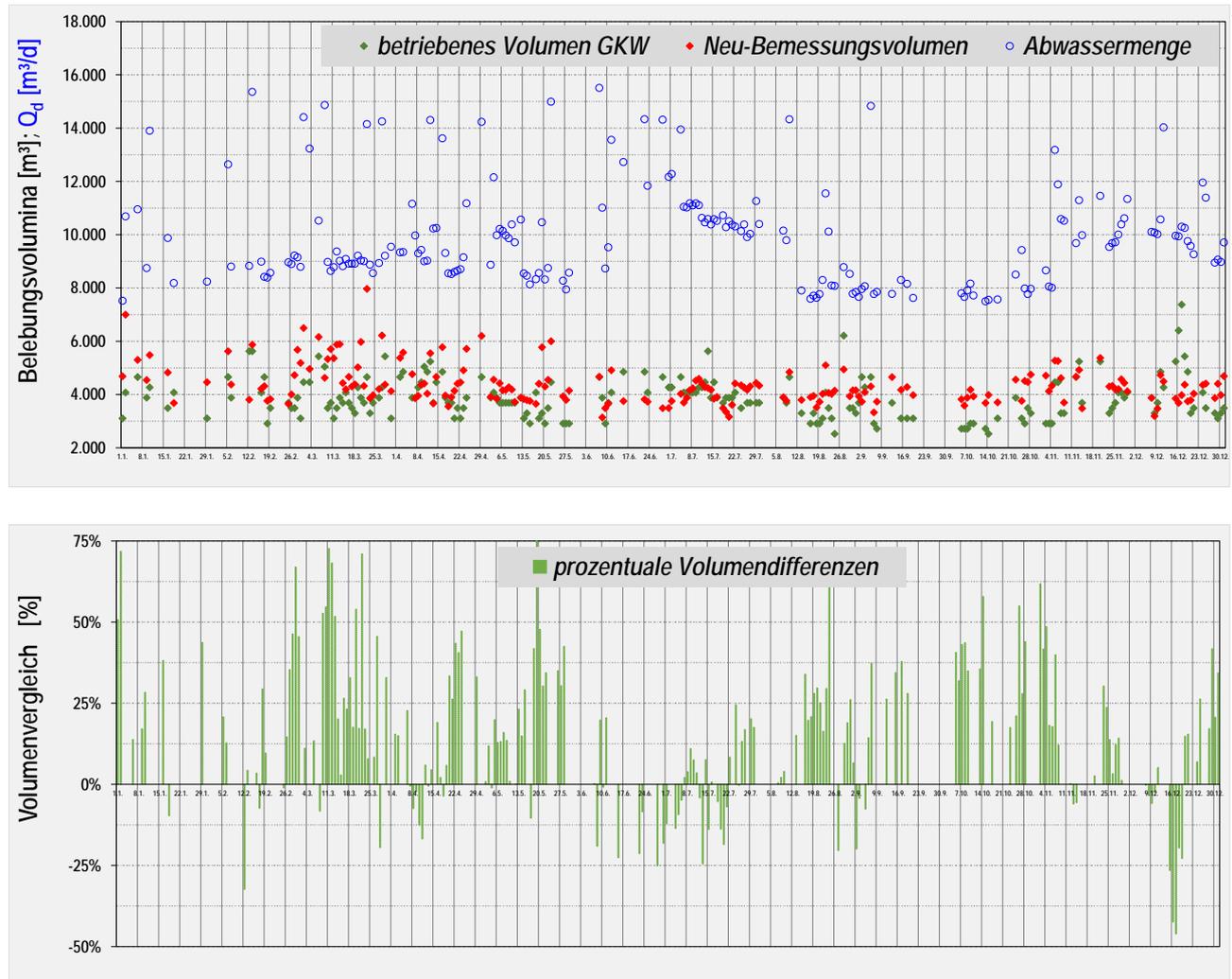


Abbildung 77: Bemessungsvergleich: Variante $t_{TS} \geq 12$ d, V_D iterativ ermittelt

Medianwert und Mittelwert der Volumendifferenzen zwischen $V_{NEU-BEMESSUNG}$ und $V_{BETRIEB}$ liegen bei etwa 15 % bis 16 %. Außerdem ist festzustellen, dass die Spanne der ermittelten Volumendifferenzen geringer ist als bei den vorherigen Berechnungen.

Ein weiterer, in dieser Bemessungsbetrachtung bislang noch nicht berücksichtigter Aspekt betrifft das Steuerungsregime des GWK Nordkanal, das in Tabelle 11 dargestellt ist und zu den täglichen Belebungsvolumina in Abbildung 63 führte. In diesem Steuerungsregime sind zwei Bedingungen enthalten, die die Ablaufkonzentration von NH_4-N und P_{GES} betreffen. Demnach werden alle vier Beckenstraßen bei einer NH_4-N -Ablaufkonzentration

> 2 mg/L oder einer P_{GES} -Ablaufkonzentration > 0,7 mg/L in Betrieb genommen zuzüglich weiterer Abstufungen.

Den stationären Neubetrachtungen gemäß DWA-A 131 (2016) liegt ein NH_4-N -Überwachungswert von 5 mg/l NH_4-N zu Grunde, der in den Prozessfaktor PF eingeht. Eine weitergehende Berücksichtigung der Ablaufsituation ist nicht vorgesehen. Deswegen wurde im Anschluss die Bestimmung des täglichen Belebungsvolumens (siehe Abbildung 64) wiederholt, diesmal unter Außerachtlassung der zwei Ablaufbedingungen im Steuerungsregime. Daraus ergibt sich das nachfolgende Bild.

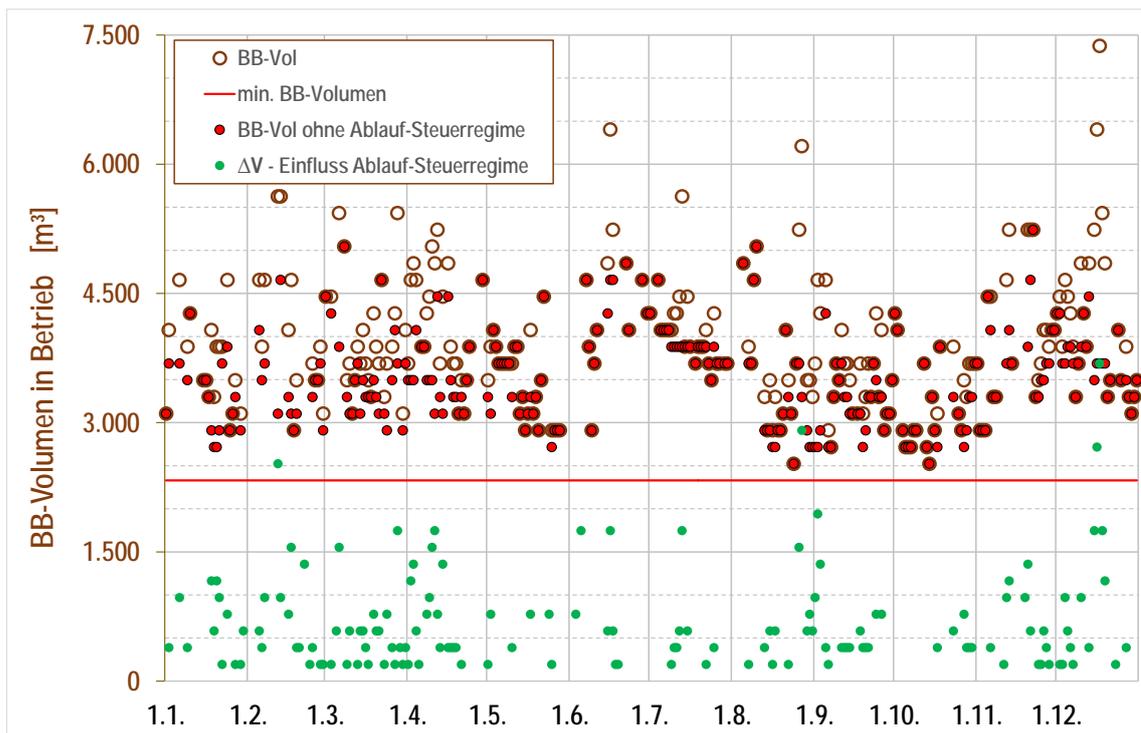


Abbildung 78: Einfluss des Ablauf-Steuerungsregimes auf das täglich erforderliche Belebungsbecken­volumen bei Trockenwetterzulauf

An 129 der 256 und somit ca. der Hälfte der Trockenwettertage wäre ein kleineres Belebungsbecken­volumen erforderlich gewesen. Das minimal in Betrieb befindliche tägliche Belebungsbecken­volumen beträgt demnach 2.523 m³, das maximal im Betrieb erforderliche tägliche Belebungsbecken­volumen beträgt 5.239 m³. Es lässt sich resümieren, dass im Mittel der 256 Trockenwettertage 3.527 m³ Belebungsbecken­volumen im Betrieb erforderlich gewesen wären.

Das minimal in Betrieb befindliche tägliche Belebungsbecken­volumen betrug demnach an 2.523 m³, das maximal in Betrieb befindliche tägliche Belebungsbecken­volumen betrug 7.374 m³. Es lässt sich resümieren, dass im Mittel der 256 Trockenwettertage 3.869 m³ Belebungsbecken­volumen in Betrieb waren.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

Dieser Sachverhalt wird nun in die Bemessungsberechnungen integriert und führt zu dem in der nachfolgenden Abbildung 79 dargestellten Ergebnis.

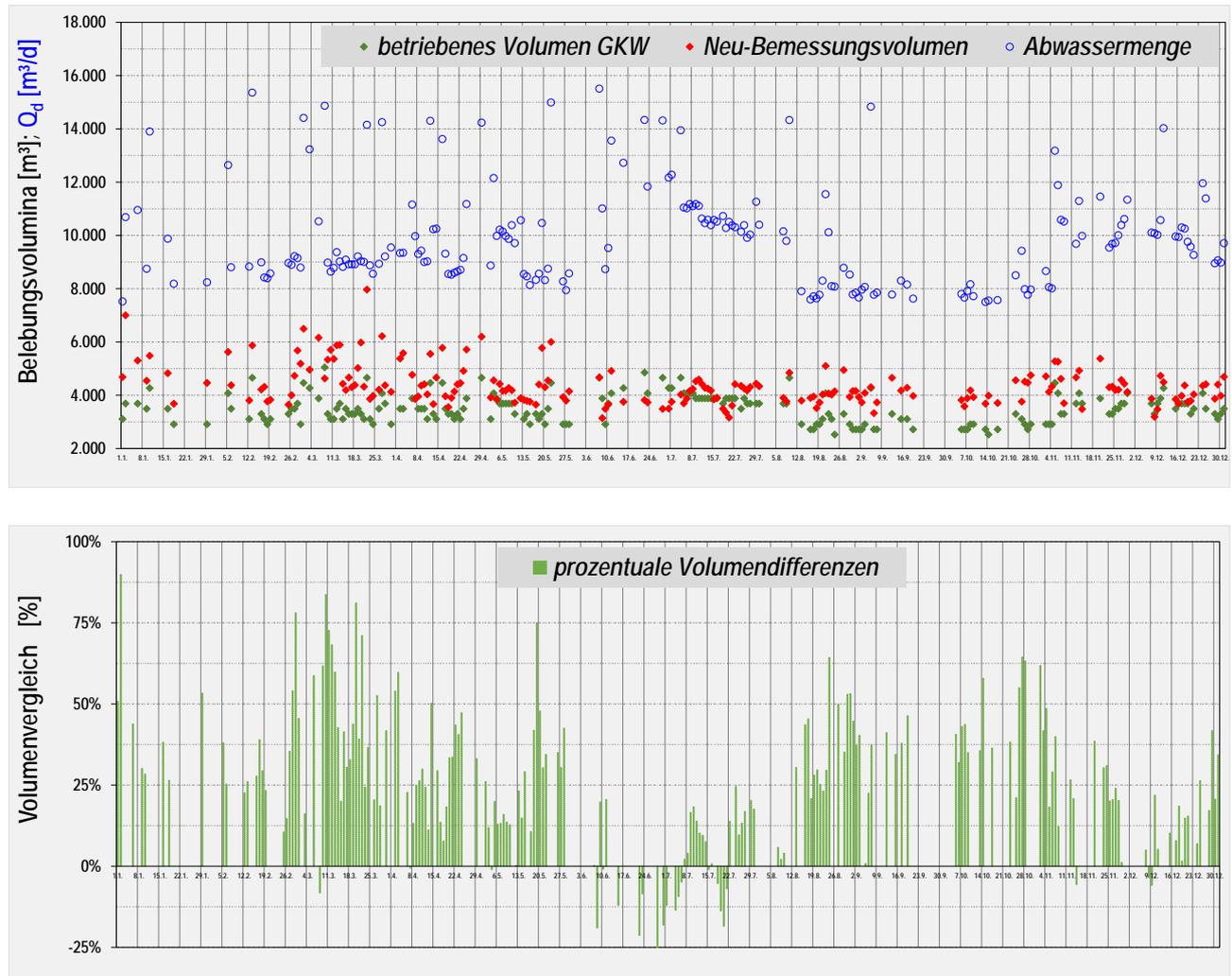


Abbildung 79: Bemessungsvergleich: Variante $t_{TS} \geq 12$ d, V_D iterativ ermittelt, ohne Ablauf-Steuerungsregime

Medianwert und Mittelwert der Volumendifferenzen zwischen $V_{NEU-BEMESSUNG}$ und $V_{BETRIEB}$ liegen bei ca. 25 % bis 26 %. Außerdem ist eine Ergebnisverschiebung dahingehend festzustellen, dass sich der Anteil negativer Volumendifferenzen (d.h. $V_{BETRIEB} > V_{NEU-BEMESSUNG}$) mehr als halbiert hat und nun bei ca. 12 % gegenüber vorher 25 % liegt.

Als letzte Anpassung an reale und praxisorientierte Verhältnisse auf dem GWK Nordkanal wurde die Erkenntnis des Betriebspersonals berücksichtigt, dass die maximale hydraulische Trockenwettermenge mit 16.000 m^3/d zu hoch angesetzt ist und bei eindeutigem Trockenwetter erfahrungsgemäß eine Zulaufmenge von 10.000 m^3/d nicht überschritten wird. Dieser Umstand wurde nun im letzten Bemessungsgang in Abbildung 80 berücksichtigt, der nunmehr den realen Verhältnissen am nächsten kommt. Dadurch reduzierte sich die Anzahl der betrachteten Trockenwettertage auf 118.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

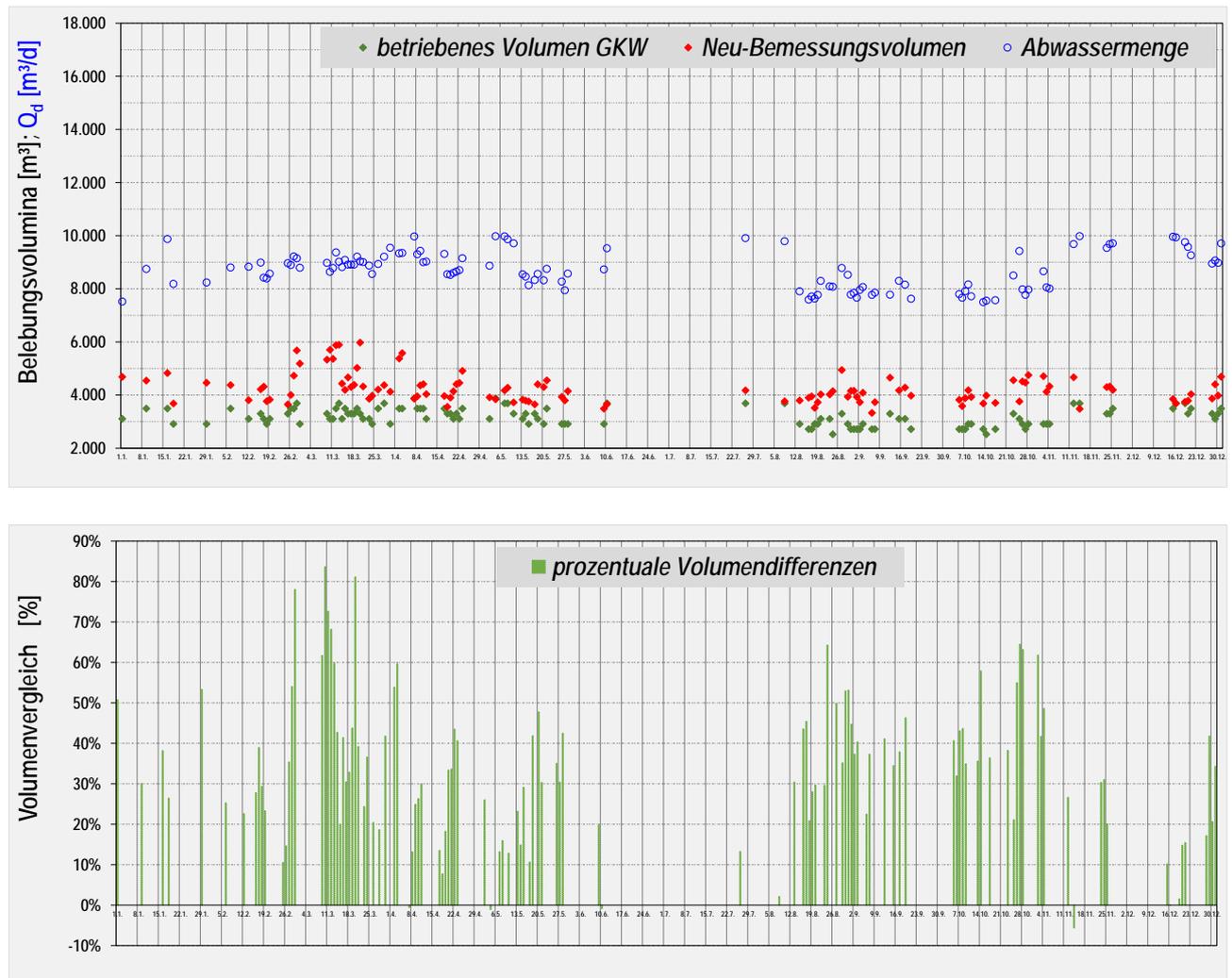


Abbildung 80: Bemessungsvergleich: Variante $t_{rs} \geq 12$ d, V_D iterativ ermittelt, ohne Ablauf-Steuerungsregime, max TW = 10.000 m³/d

Medianwert und Mittelwert der Volumendifferenzen zwischen $V_{NEU-BEMESSUNG}$ und $V_{BETRIEB}$ liegen identisch bei ca. 34 %. Die Spanne der ermittelten Volumendifferenzen (-6 % bis 84 %) ist nunmehr nochmals deutlich geringer als bei den vorherigen Berechnungen. Auch hier ist erneut festzustellen, dass sich der Anteil negativer Volumendifferenzen (d.h. $V_{BETRIEB} > V_{NEU-BEMESSUNG}$) auf nunmehr 4 % reduziert.

Alle Ergebnisse der vorgestellten Berechnungsvarianten sind statistisch in der folgenden Abbildung 81 zusammengefasst.

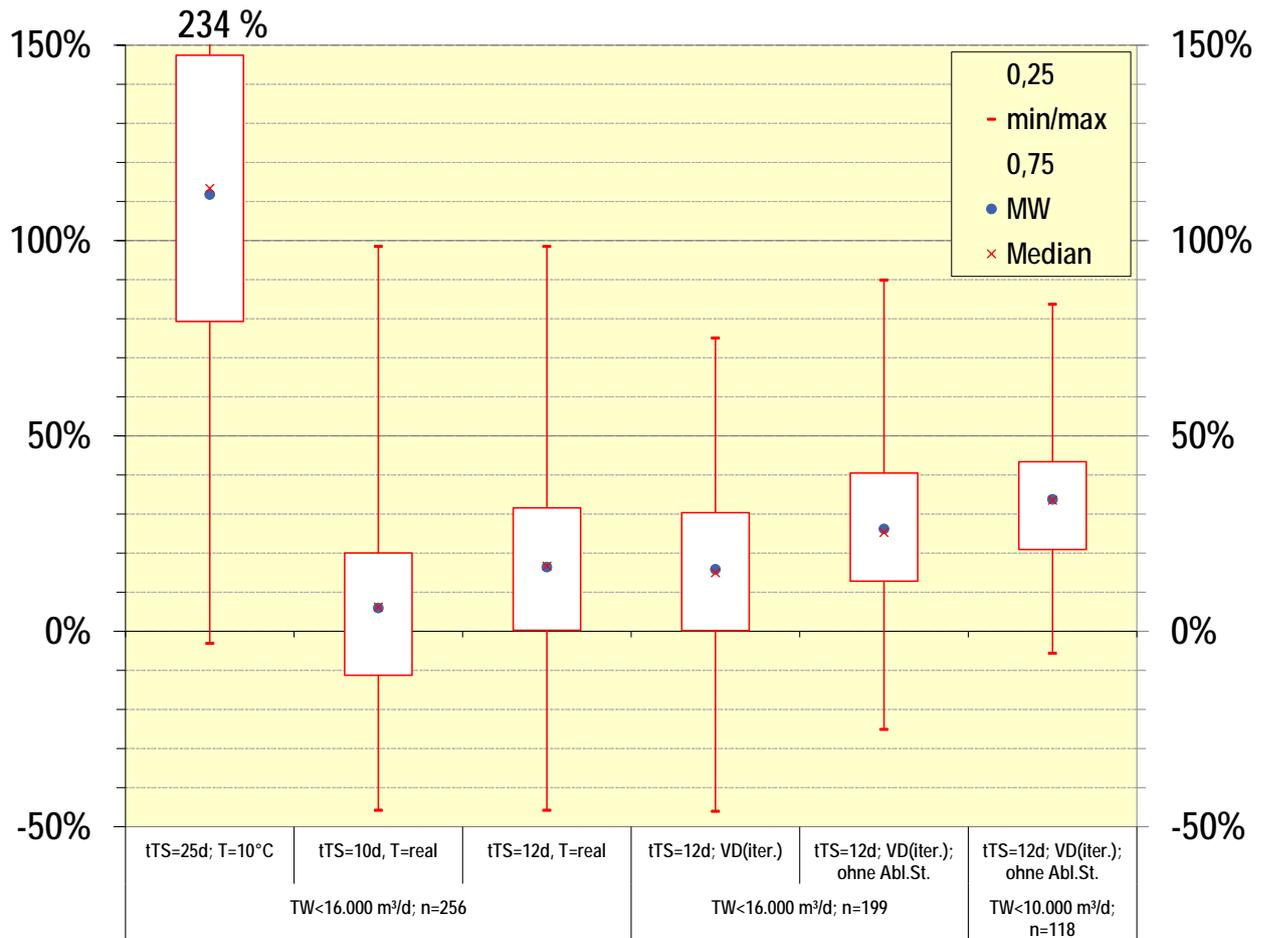


Abbildung 81: Box-Whisker-Darstellung der durchgeführten Bemessungsvergleiche

Der Vergleich zeigt die Entwicklung der Statistikdaten entlang der durchgeführten Bemessungsvergleiche. Sowohl die Spanne der Extremwerte als auch die Spanne der Box-Werte wird zunehmend kleiner und verschieben sich dabei deutlich in den positiven Prozentbereich, so dass im letzten (rechten) Bemessungsvergleich nur noch 5 von 118 Volumenvergleichswerten eine negative Differenz ergaben.

Für diese letzte Bemessungsvariante sind in der nachfolgenden Abbildung 82 die iterierten Denitrifikationsvolumenanteile als Unterschreitungshäufigkeit dargestellt.

Dabei zeigt sich, dass an etwa einem Drittel der 118 Bemessungstage ein größerer Denitrifikationsvolumenanteil als die gegenwärtig vorhandenen 38 % bemessungstechnisch erforderlich wäre.

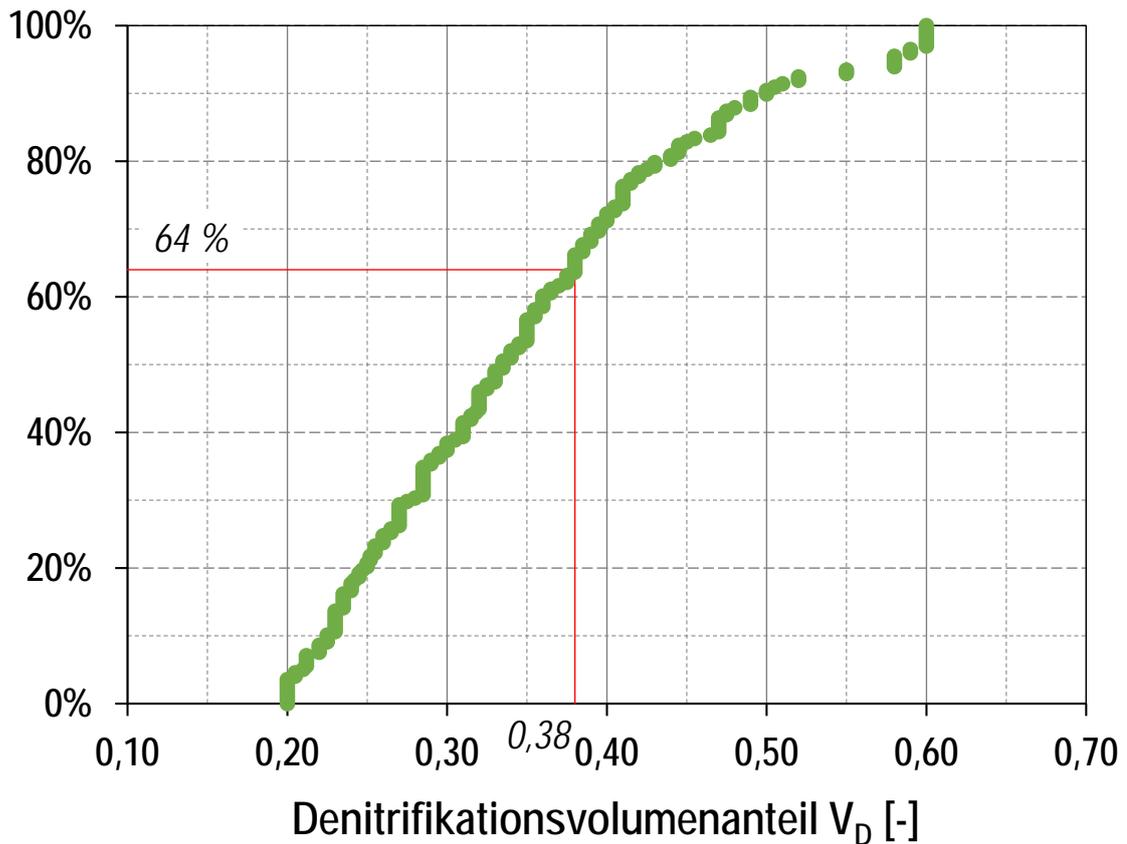


Abbildung 82: Unterschreitungshäufigkeit der in der Bemessungsiteration ermittelten Denitrifikationsvolumenanteile

Im nachfolgenden Box-Whisker-Diagramm sind für die drei Bemessungsvergleiche, bei denen der Denitrifikationsvolumenanteil DWA-gemäß iterativ ermittelt wurde die entsprechenden statistischen Werte als Belebungsvolumen in $[m^3]$ dargestellt (Abbildung 83).

Für den letzten durchgeführten Bemessungsvergleich, der als realistischste und fachlich sinnvollste Variante angesehen wird, ergaben sich dabei anlagenspezifisch für das GWK Nordkanal nahezu übereinstimmende Median- und Mittelwerte von ca. $1.000 m^3$ bei einer Box-Spanne zwischen $700 m^3$ und $1.300 m^3$.

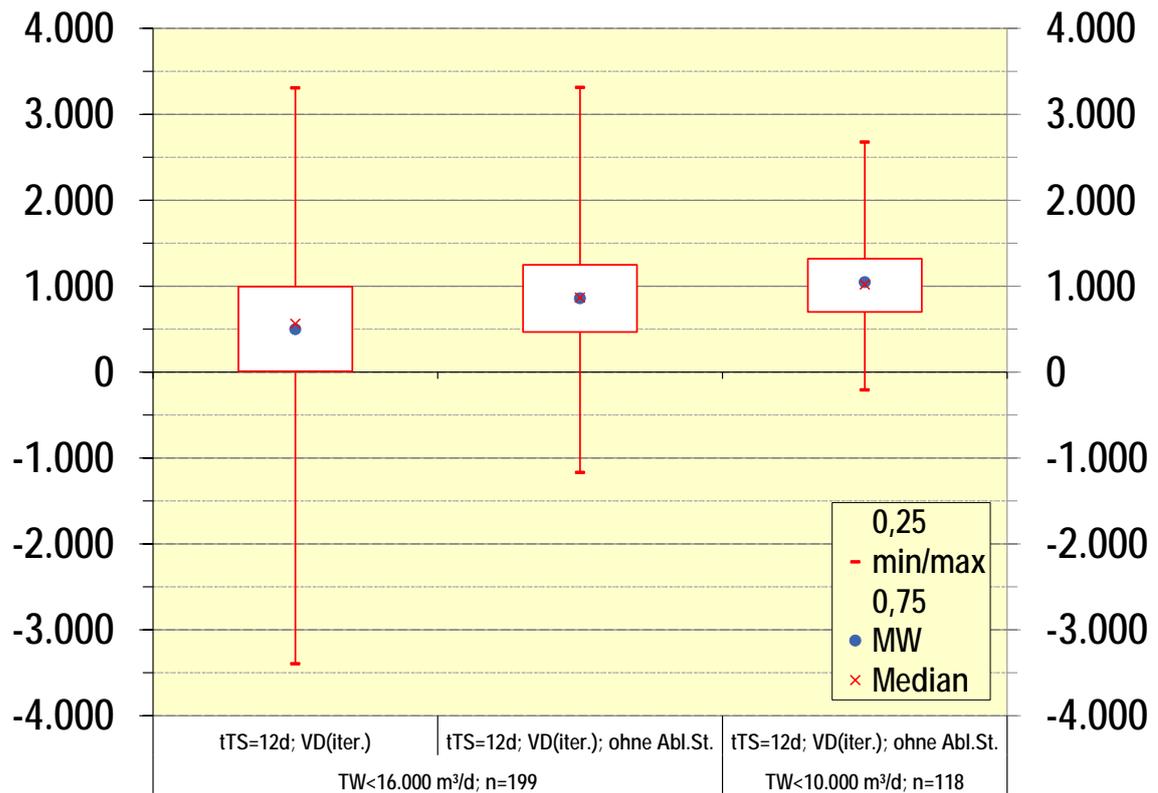


Abbildung 83: Box-Whisker-Darstellung der durchgeführten Bemessungsvergleiche, dargestellt als Belebungsvolumen [m³]

Diese Zahlen beziffern dasjenige Belebungsvolumen, um welches unter Trockenwetterbedingungen die in Nordkanal vorhandene Belebungsstufe im Vergleich zum aktuellen Technischen Regelwerk (DWA-A 131; 2016), eigentlich zu klein ist, es sei denn, es gäbe Hinweise auf zusätzliche Reinigungseffekte im Belebungsstiel des GWK Nordkanal (Festbettwirkung der Membranoberflächen, positiver Einfluss kleinerer Flockenstruktur, Granularschlamm-Bildung).

Als ein solcher Hinweis wird das Ergebnis dieses Bemessungsvergleiches angesehen. Es entspricht rund 11 % des gesamten vorhandenen Belebungsvolumens.

Dabei ist einschränkend hinzuzufügen, dass eine vergleichbare Untersuchung an einer ähnlichen klassifizierten Kläranlage mit konventionellem Belebungsverfahren noch nicht durchgeführt wurde.

3.6 Dynamische Simulation

3.6.1 Einführung

Das lange Zeit am meisten verwendete Simulationsmodell zur Modellierung biologischer Prozesse in Belebungsanlagen ist das Activated Sludge Model No.1 der IAWQ (HENZE et

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

al. 1987), kurz genannt ASM1. Das ASM1 beinhaltet keine Modellierung der vermehrten biologischen Phosphorelimination. Es folgten die Modelle ASM 2d (inkl. vermehrter biologischer Phosphorelimination) und ASM 3 (ohne vermehrte biologische Phosphorelimination). Mittlerweile hat sich nach weiteren, kleineren Optimierungsschritten das Modell ASM3h nach den Vorgaben der Hochschulgruppe (HSG) „Simulation“ in der computergestützten Anwendung bewährt und durchgesetzt. Auch das ASM3h beinhaltet keine Modellierung der vermehrten biologischen Phosphorelimination. Das vollständige Modell ist Abbildung 84 zu entnehmen.

	SO	SS	SNH	SNO	SN2	SALK	SI	XI	XS	XH	XSTO	XA	XMI	Rate
p1	0	1 - fSI	c1n	0	0	c1a	fSI	0	-1	0	0	0	0	$Kh20 \beta_{04} \frac{XS}{XH} \frac{1}{KX + \frac{XS}{XH}} XH$
p2	$Y_{STO_{aer}} - 1$	-1	c2n	0	0	c2a	0	0	0	0	$Y_{STO_{aer}}$	0	0	$k_{sto} \frac{SO}{KHO2 + SO} \frac{SS}{KHSS + SS} XH$
p3	0	-1	c3n	c3no	-1	c3a	0	0	0	0	$Y_{STO_{max}}$	0	0	$k_{sto} \frac{etaHNO3}{KHO2 + SO} \frac{SS}{KHSS + SS} \frac{SNO}{KHNO3 + SNO} XH$
p4	$1 - \frac{1}{YH_{aer}}$	0	c4n	0	0	c4a	0	0	0	1	$\frac{-1}{YH_{aer}}$	0	0	$\mu_{uH} \frac{SO}{KHO2 + SO} \frac{SNH}{KHNH4 + SNH} \frac{SALK}{KHALK + SALK} \frac{XSTO}{XH} \frac{1}{KHSTO + \frac{XSTO}{XH}} XH$
p5	0	0	c5n	c5no	-1	c5a	0	0	0	1	$\frac{-1}{YH_{max}}$	0	0	$\mu_{uH} \frac{etaHNO3}{KHO2 + SO} \frac{SNH}{KHNH4 + SNH} \frac{SALK}{KHALK + SALK} \frac{XSTO}{XH} \frac{1}{KHSTO + \frac{XSTO}{XH}} \frac{SNO}{KHNO3 + SNO} XH$
r6	-1 (1 - fXI)	0	c6n	0	0	c6a	0	fXI	0	-1	0	0	0	$bH \frac{SO}{KHO2 + SO} XH$
r7	0	0	c7n	c7no	-1	c7a	0	fXI	0	-1	0	0	0	$bH \frac{etaHend}{KHO2 + SO} \frac{SNO}{KHNO3 + SNO} XH$
r8	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	$bH \frac{SO}{KHO2 + SO} XSTO$
r9	0	0	0	c9no	-1	c9a	0	0	0	0	-1	0	0	$bH \frac{etaHend}{KHO2 + SO} \frac{SNO}{KHNO3 + SNO} XSTO$
r10	$\frac{-64}{14} \frac{1}{YA} + 1$	0	c10n	c10no	0	c10a	0	0	0	0	0	1	0	$\mu_{aUT} \frac{SO}{KNO2 + SO} \frac{SNH}{KNNH4 + SNH} \frac{SALK}{KNALK + SALK} XA$
r11	-1 (1 - fXI)	0	c11n	0	0	c11a	0	fXI	0	0	0	-1	0	$bAUT \frac{SO}{KHO2 + SO} XA$
r12	0	0	c12n	c12no	-1	c12a	0	fXI	0	0	0	-1	0	$bAUT \frac{etaNend}{KHO2 + SO} \frac{SNO}{KHNO3 + SNO} XA$
r13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$fTs \frac{akla20}{(SO_{sat} - SO)}$
ThOD	-1	1	0	$\frac{-64}{14}$	$\frac{-24}{14}$	0	1	1	1	1	1	1	0	Theoretical oxygen demand
COD	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	total COD
N	0	iNSS	1	1	1	0	iNSI	iNXI	iNXS	iNBM	0	iNBM	0	total N content
N diss	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	total dissolved N
TKN	0	iNSS	1	0	0	0	iNSI	iNXI	iNXS	iNBM	0	iNBM	0	TKN content
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	total P content
TSS	0	0	0	0	0	0	0	iTSSXI	iTSSXS	iTSSBM	iTSSSTO	iTSSBM	1	TSS content
Buffer	0	0	$\frac{-1}{14}$	$\frac{1}{14}$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	ionic charge
SX	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	
aTS	0	0	0	0	0	0	0	0.75	0.75	0.9	0.6	0.9	1	
Default	0.1	100	16	0	0	5	30	25	35	250	1	50	50	

Abbildung 84: Belebtschlammmodell ASM3h

Entsprechende Programme wurden von verschiedenen Institutionen entwickelt, z.B. A-111 der Fa. Aqua System/Schweiz, SIMBA des Institutes für Automation und Kommunikation (ifak), Magdeburg, DENISIM des ISAH/Universität Hannover, um nur eine Auswahl zu nennen. Im vorliegenden Projekt wird die aktuelle SIMBA-Version, Produktname „SIMBA#2.0“, des ifak verwendet.

Die dynamische Simulation des GWK Nordkanal sollte in folgenden Schritten erfolgen:

- Variante 1
 - Modellierung als Belebungsverfahren: einstraßige Belebung (Simulation 1_BB):
 - ein Denitrifikations- und ein Nitrifikationsbecken
 - die Membranmodule werden als eine ideale Nachklärung, also ohne Feststoffabtrieb aus der Nachklärung in das Vorflutgewässer, abgebildet
 - das Steuerungsregime (Kap. 3.2.3) der Anlage wird vernachlässigt

- Variante 2
 - Modellierung als Belebungsverfahren; vierstraßige Belebung (Simulation 2_BB):
 - vier Denitrifikations- und vier Nitrifikationsbecken
 - die Membranmodule werden als eine ideale Nachklärung abgebildet
 - das Steuerungsregime (Kap. 3.2.3) der Anlage wird berücksichtigt
- Variante 3
 - Modellierung als MBR-Verfahren; vierstraßige MBR-Anlage (Simulation 3_MBR):
 - mit Hilfe in SIMBA#2.0 integrierter MBR-Modellblöcke
 - das Steuerungsregime (Kap. 3.2.3) der Anlage wird berücksichtigt

Im Anschluss an die jeweilige Modellierung sollen anhand der Betriebsdaten des GWK Nordkanal aus dem Jahr 2016 die Modelle bestmöglich kalibriert und miteinander verglichen werden. Als Eingangsdaten in die Simulation werden jeweils verwendet:

- Zulaufwassermenge,
- Zulaufkonzentrationen der Abwasserparameter (CSB, TKN),
- Temperatur in der Belebungsstufe,
- der Feststoffgehalt in der Belebungsstufe,
- die tägliche Überschussschlammmenge.

Bezüglich der Wirkungsweise der mechanischen Reinigungsstufe, die keinerlei biologische Prozesse enthält, wurde für die Reduktion spezieller Zulauffraktionen auf Daten zurückgegriffen, die in früheren Projekten des Erftverbandes ermittelt worden waren. Im Einzelnen wurden folgende Reduktionen angenommen:

- X_i, X_{mi} : 33%
- X_h, X_{sto} : 25%
- S_{NH} : 5%
- S_i, S_s, X_s : unverändert

3.6.2 Modellierung als einstraßige Belebung (Variante 1)

Nachstehend sind die Modelle für einen einstraßigen (Abbildung 85 und Abbildung 86) der MBR GWK Nordkanal gezeigt.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

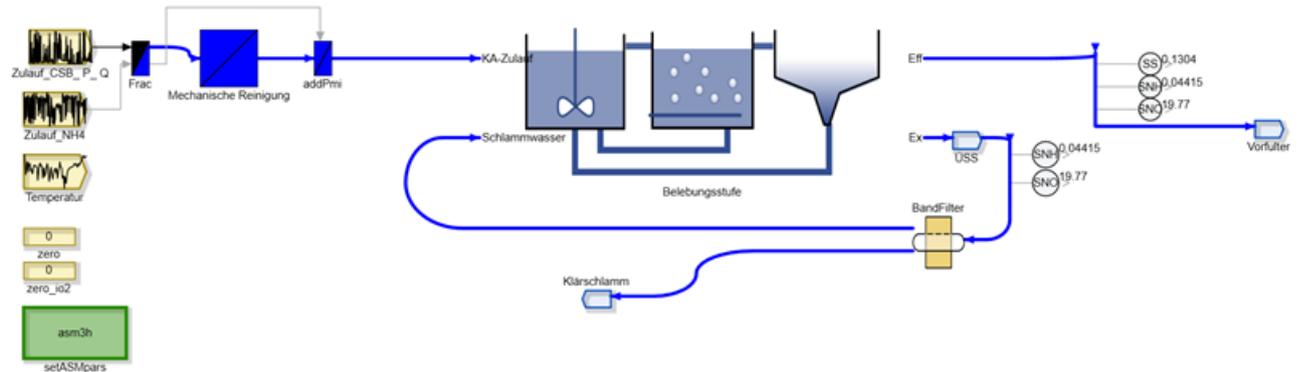


Abbildung 85: Simulation1_BB, Gesamtansicht der Kläranlage

Im Zentrum des Modells ist die einstraßige Belebungsstufe, hydraulisch betrachtet als sog. „volldurchmischter Reaktor“, zu erkennen, die für das Modell gemäß ihrer Längsgeometrie in vier Kaskadenabschnitte, sowohl für die unbelüftete als auch für die belüftete Beckenzone, unterteilt wurde (siehe Detaillierung in Abbildung 86). Dadurch wird im Ansatz auch der Effekt eines hydraulischen Rohrreaktors dargestellt.

Ergänzend sei bemerkt, dass der Sauerstoffgehalt in der belüfteten Belebungsstufe im Mittel mit 0,5 mg/L bis 1,0 mg/L eingestellt wurde.

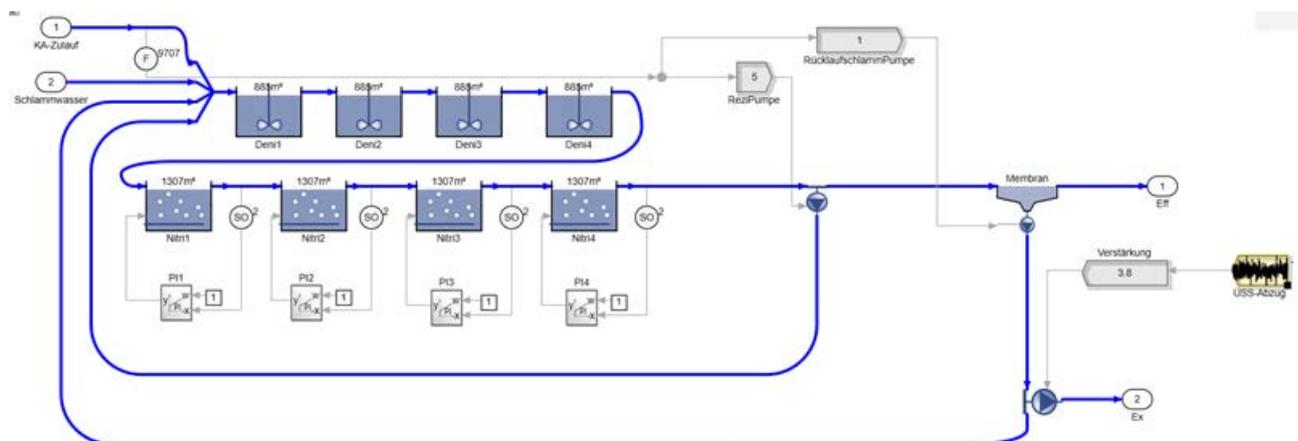


Abbildung 86: Simulation1_BB, biologische Reinigungsstufe

Die Kalibrierung der Modelle erfolgt anhand des Vergleiches der simulierten Modellwerte mit den realen Betriebsdaten der 2-Std.-Mischproben. Hierfür werden folgende Parameter herangezogen:

- ➡ Ablaufkonzentrationen der Abwasserparameter (CSB, NH₄-N, NO₃-N und N_{GES,anorg.}),
- ➡ der Feststoffgehalt in der Belebungsstufe.

Die Ergebnisse der Kalibrierung des Modells Simulation 1_BB können den nachfolgenden Diagrammen entnommen werden (siehe Abbildung 87 bis Abbildung 90).

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

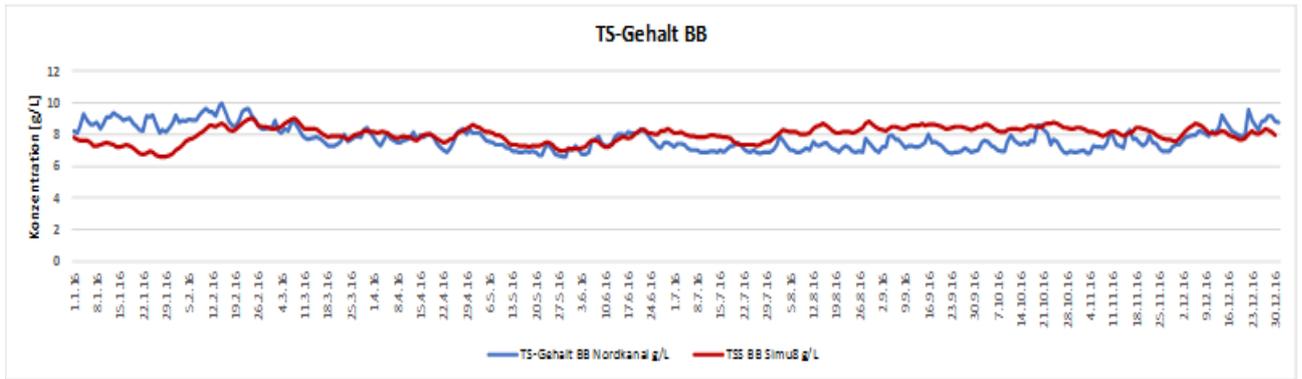


Abbildung 87: Simulation 1_BB, Anpassung des Feststoffgehaltes in der Belebungsstufe

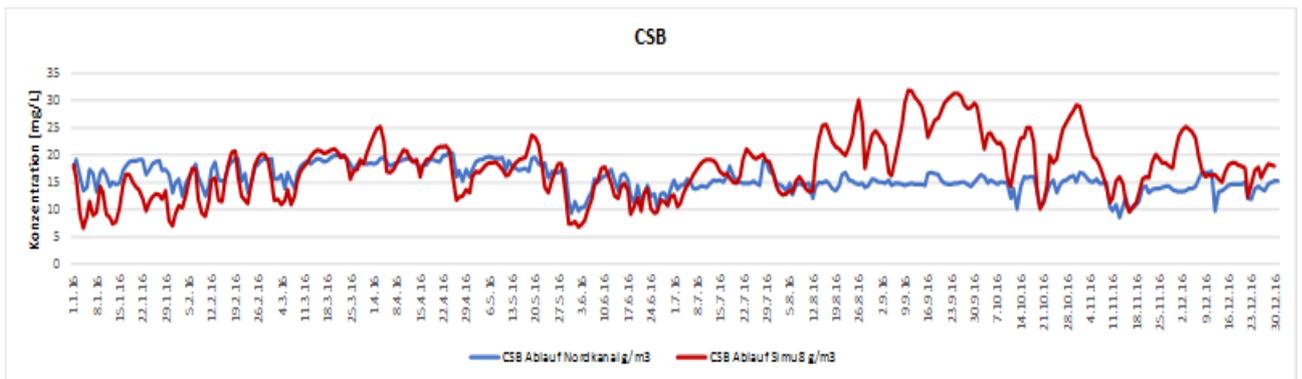


Abbildung 88: Simulation 1_BB, Anpassung der CSB-Konzentration im KA-Ablauf

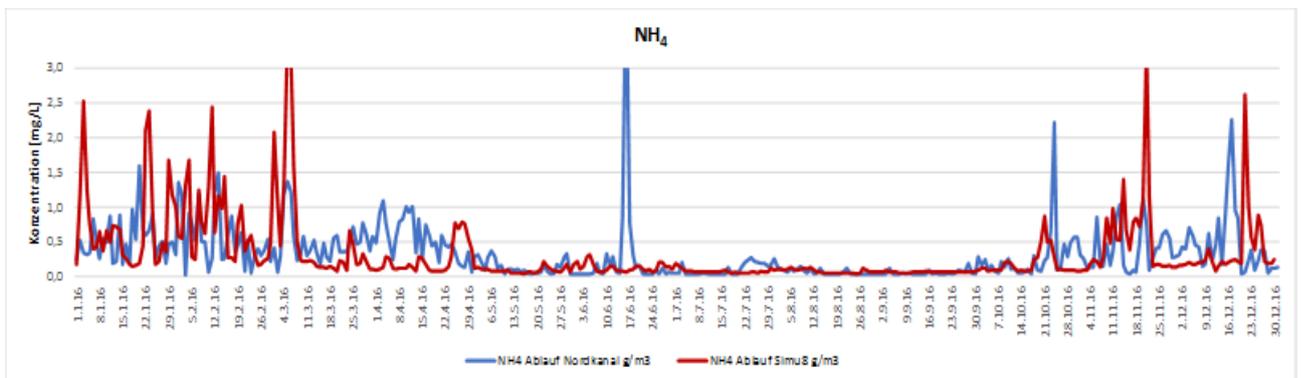


Abbildung 89: Simulation 1_BB, Anpassung der NH4-Konzentration im KA-Ablauf

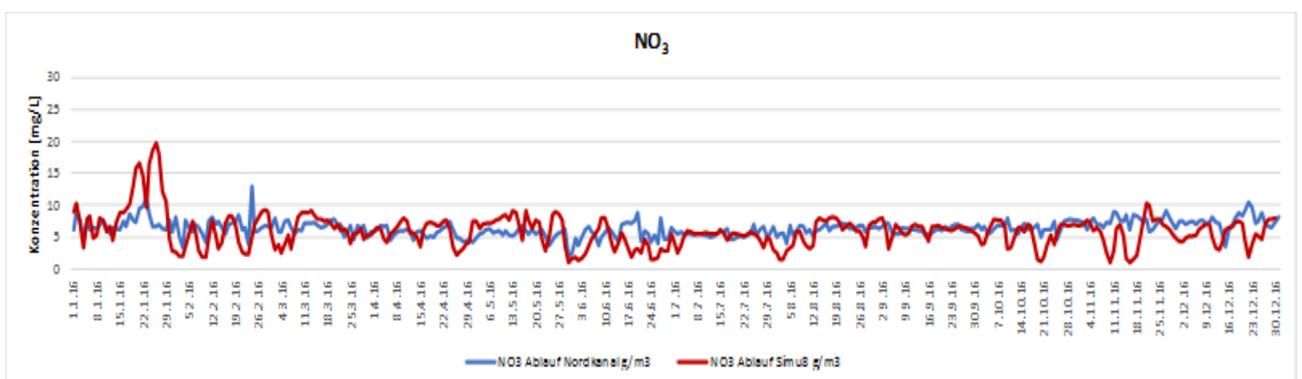


Abbildung 90: Simulation 1_BB, Anpassung der NO3-Konzentration im KA-Ablauf

Die Abbildungen lassen zwar in weiten Teilen eine gute Übereinstimmung zwischen realen und simulierten Werten erkennen, jedoch muss konstatiert werden, dass die reale und die simulierte Überschussschlammabzugsmenge nicht übereinstimmen, sondern sich deutlich voneinander unterscheiden. Die simulierten Werte sind um den Faktor 3,5 zu groß. Dies kann insofern nicht überraschen, da das Modell der Variante 1 permanent von einem maximalen Belebungsbeckenvolumen von 9.314m^3 ausgeht. Gemäß Betriebsdatenauswertung ergibt sich jedoch ein mittleres jährliches Belebungsbeckenvolumen von 4.716m^3 , was nahezu exakt der Hälfte des verfügbaren Belebungsbeckenvolumens auf dem GWK Nordkanal entspricht.

Ungeachtet der deutlichen Abweichung der Überschussschlammabzugsmengen ist folgendes zu der sonst guten Übereinstimmung zwischen realen und simulierten Werten anzumerken: sie gilt für das generelle numerische Niveau der simulierten Parameter, als auch für den Verlauf der Extrema in vielen Passagen der Jahresverläufe. Für die beiden dargestellten Stickstoffparameter trifft dies im gesamten Jahresverlauf zu. Für die CSB-Ablaufkonzentration und den Feststoffgehalt in der Belebung trifft dies jedoch nur in der ersten Jahreshälfte zu. In der zweiten Jahreshälfte kommt es hier zu deutlichen Abweichungen (simulierter CSB-Gehalt und simulierter Feststoffgehalt sind jeweils zu hoch). Als Grund dafür wird die seit Jahresmitte begonnene Dosierung pulverisierter Aktivkohle (PAK) in die Belebungsstufe vermutet. Daraus resultiert eine zusätzliche adsorptive (nicht biologische) Entfernung des CSB. Dies wird in der Simulation nicht „erkannt“ und aus der ohnehin im Zeitraum Juli bis November 2016 erhöhten Zulaufkraft (Abbildung 59) resultiert dann wiederum ein erhöhter Feststoffgehalt. Auf diesen Sachverhalt wird auch in den weiteren Simulationsvarianten zu achten sein.

3.6.3 Modellierung als vierstraßige Belebung (Variante 2)

Nachstehend sind die Modelle für einen vierstraßigen (Abbildung 91 und Abbildung 92) Aufbau der Kläranlage gezeigt. Zu erkennen ist in Abbildung 91 im Unterschied zu Abbildung 85 ein Steuerungsbaustein, um die Steuerungsregime für die Befüllung auf die vier Belebungsbecken (Kap. 3.2.3) zu berücksichtigen.

Umrüstung GKW Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

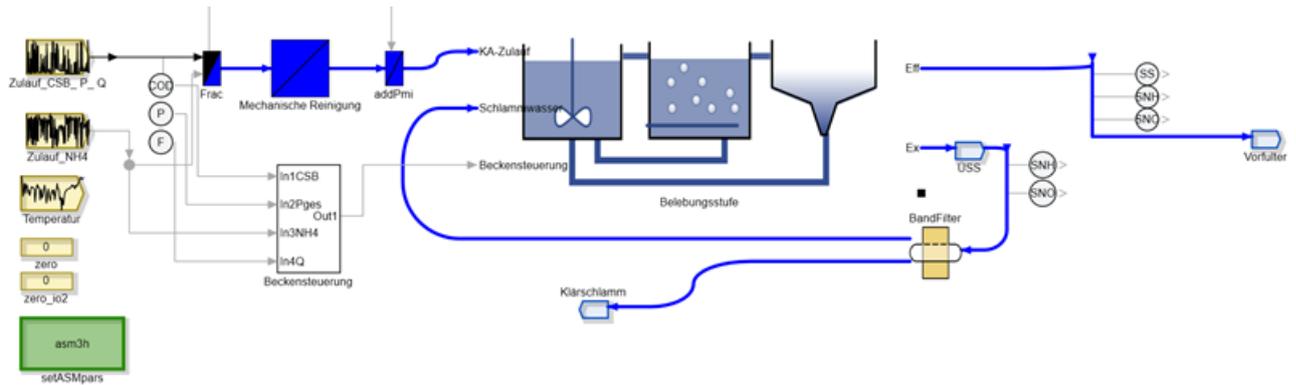


Abbildung 91: Simulation 2_BB, Gesamtansicht der Kläranlage

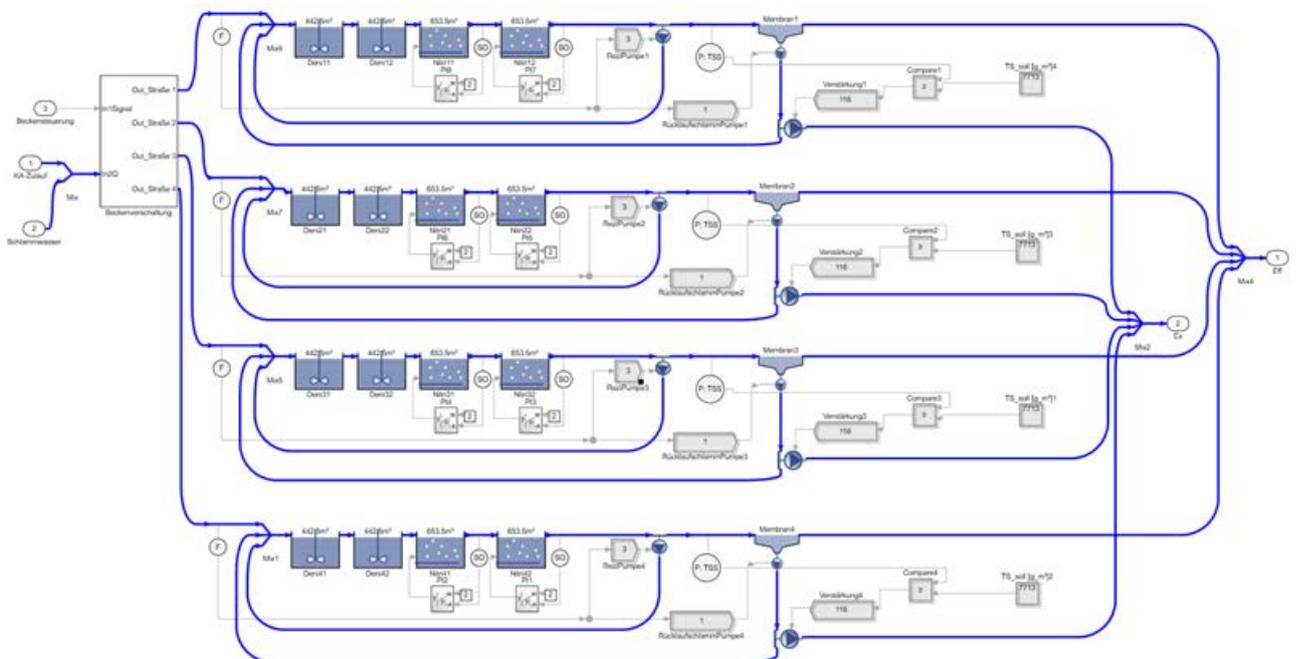


Abbildung 92: Simulation 2_BB, biologische Reinigungsstufe

Im Weiteren sollte die Kalibrierung des Modells Simulation 2_BB erfolgen. Hier wurde aufgrund der im Allgemeinen besseren Modelldarstellung der realen Kläranlage eine bessere Anpassung der simulierten Ablaufwerte auf die realen Ablaufkonzentrationen erwartet. Außerdem war davon ausgegangen worden, aufgrund der Aufteilung in vier Straßen den Betrieb der Kläranlage und somit auch weitere Betriebsparameter wie z.B. die Überschussschlammmenge besser abbilden zu können.

Diese Arbeiten führten bedauerlicherweise zu keinem verwertbaren Ergebnis. Grund dafür war, das komplexe Steuerungsregime der GKW Nordkanal in der exakten zeitlichen Abfolge der Inbetriebnahme und der Außerbetriebnahme einzelner Beckenstrassen für den betrachteten Zeitraum nicht nachvollziehen zu können. Zum einen erfolgt die planmäßige

Abfrage und die sich in der Folge daraus ergebende Beckenumschaltung durch das Steuerungsregime stündlich und damit häufiger als die Parameteranalytik, die auf der Datengrundlage von 2-Stunden-Analysen im Betriebstagebuch hinterlegt ist. Daher lassen sich die Betriebsstunden einzelner Beckenstrassen nicht korrekt nachvollziehen. Zum anderen konnte bei diversen Vor-Ort-Besuchen beobachtet werden, dass außerplanmäßig auch häufigere (als stündliche) Eingriffe des Steuerungsregimes stattfanden, ein Umstand, der jedoch anhand des Betriebstagebuches bzw. des digitalen Datenmaterials auch nicht nachvollzogen werden kann.

Daher wurden in Abstimmung mit dem Erftverband die Arbeiten mit der dynamischen Simulation an dem geschilderten Stand beendet.

3.7 Zusammenfassung zu den Bemessungsbetrachtungen

Während der letzten Betriebsjahre konnten sehr niedrige Ablaufkonzentrationen hinsichtlich der organischen Ablaufbelastungen und der Stickstoffbelastungen auf der MBR GWK Nordkanal verzeichnet werden. Aufgrund dessen entstand die Vermutung, dass neben der biologischen Abwasserreinigung mittels suspendierter Biomasse weitere zusätzliche Reinigungseffekte auftreten, die im Rahmen der Bemessung keine Berücksichtigung finden.

Vor diesem Hintergrund werden vergleichende Betrachtungen der tatsächlichen Reinigungsleistung der Membranbelebungen nach dem aktuellen theoretischen Bemessungsansatz in Bezug auf die Zulauf- und Betriebsverhältnisse (Zulauffrachten, Abwassertemperatur, Raumbelastung, Schlammbelastung, Schlammalter) durchgeführt. Ziel der Untersuchungen ist es, Hinweise und Erkenntnisse zu sammeln, die diese Vermutung bestätigen und möglicherweise eine Quantifizierung dieser Effekte erlauben.

Die vergleichenden Betrachtungen werden auf zweierlei Weise durchgeführt. Zum einen wird das GWK Nordkanal stationär auf der Grundlage des Arbeitsblattes-A 131 (DWA 2016) nachbemessen. Zum zweiten wurde versucht, die MBR GWK Nordkanal in einer dynamischen Simulation in verschiedenen Varianten abzubilden.

Im Vorfeld dieser vergleichenden Betrachtungen wurde eine ausführliche Auswertung der zur Verfügung gestellten Betriebsdaten des Jahres 2016 durchgeführt. Wesentliche Erkenntnisse hieraus sind:

- ➔ Die Schmutzstoffbelastung des Abwasserzulaufes zum MBR GWK Nordkanal im Jahre 2016 lag bei Ansatz der jeweiligen 85 % - Fraktile unterhalb der Bemessungsfrachten aus dem Jahre 2002. Bezogen auf den Parameter CSB wird der Bemessungswert um ca. 15 % unterschritten, bezogen auf den Parameter $\text{NH}_4\text{-N}$ wird der Bemessungswert exakt erreicht, bezogen auf den Parameter P_{GES} wird der Bemessungswert mit ca. 45 % sehr deutlich unterboten. Bezogen auf den Parameter

NH₄-N ist zu sagen, dass sich die Belastung der Anlage permanent, verglichen mit der Bemessungsfracht, auf einem sehr hohen Niveau befindet.

- ➔ Eine Auswertung der Belebungs volumina auf der Basis des installierten Steuerungsregimes ergibt ein minimal in Betrieb befindliches tägliches Belebungsbeckenvolumen von 2.523 m³ und andererseits ein maximal in Betrieb befindliches tägliches Belebungsbeckenvolumen von 9.314 m³ (Gesamtvolumen der Belebungsstufe). Im Jahresmittel waren 4.716 m³ Belebungsbeckenvolumen in Betrieb. Das entspricht nahezu exakt 50 % des verfügbaren Belebungsbeckenvolumens auf dem MBR GWK Nordkanal.
- ➔ Erkennbar wird bei Betrachtung des Verlaufes der CSB-Ablaufkonzentrationen der Einfluss der seit Mitte 2016 begonnenen PAK-Dosierung. Die CSB-Ablaufkonzentrationen verringern sich in der zweiten Jahreshälfte um einen mittleren Betrag von ca. 4 mg/L bis 5 mg/L.

Aus den Untersuchungen zur stationären Neu-Bemessung des MBR GWK Nordkanal kann folgendes resümiert werden:

Es wurden für alle Trockenwettertage des gesamten Jahres 2016 insgesamt sechs Bemessungsdurchläufe und Ergebnisvergleiche mit den real betriebenen Belebungs volumina durchgeführt. Dabei wurden neben der Variation von Schlammalter und Abwassertemperatur insbesondere die iterative Ermittlung des Denitrifikationsvolumenanteils, das Steuerungsregime sowie die maximale Trockenwetterwassermenge berücksichtigt. Letztlich ergab eine Neu-Bemessung mit den Ansätzen

- ➔ Mindestschlammalter: 12 Tage
- ➔ Ansatz des realen Temperaturverlaufes
- ➔ iterative Ermittlung des Denitrifikationsvolumenanteils
- ➔ Steuerungsregime ohne Berücksichtigung von Ablaufanforderungen
- ➔ maximale Trockenwetterwassermenge: 10.000 m³/d

eine mittlere Volumendifferenz von ca. 34 %, um die die vorhandene Belebungsstufe unterbemessen wäre.

Anlagenspezifisch für das GWK Nordkanal mit ihrem steuerungsbedingt variablen Belebungs volumen entspricht dies einem mittleren Belebungs volumen von ca. 1.000 m³ unter Trockenwetterverhältnissen. Dies wiederum entspricht rund 11 % des gesamten vorhandenen Belebungs volumens.

Es war eingangs als Hinweis für das vermutete Auftreten zusätzlicher Reinigungseffekte formuliert worden, dass die stationären Neubetrachtungen mehrheitlich ein größeres erforderliches Belebungsbeckenvolumen ermitteln, als es faktisch an den betreffenden Bemessungstagen in Betrieb gewesen ist. Dieser Hinweis wurde nun durch die erläuterte bemessungstechnische Untersuchung gegeben, wobei einschränkend hinzuzufügen ist, dass eine vergleichbare Untersuchung unter Verwendung des DWA-A 131 (2016) an einer ähnlich klassifizierten Kläranlage mit konventionellem Belebungsverfahren bislang nicht durchgeführt wurde. Die Ergebnisse einer solchen Untersuchung könnten die grundsätzliche Vorgehensweise bestätigen und die Interpretation der Ergebnisse erleichtern.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle zusätzlich darauf hingewiesen, dass das Steuerungsregime vor der geplanten Inbetriebnahme des erweiterten GWK Nordkanal an den dann vorhandenen Betrieb einer zusätzlichen Vorklärstufe anzupassen ist.

Bezüglich der dynamischen Simulation des MBR GWK Nordkanal wurden Untersuchungen nach der Variante „Modellierung als einstraßige Belebungsanlage“ durchgeführt. Eine exakte Kalibrierung konnte anhand der Betriebsdaten 2016 dabei nicht erzielt werden. Die maßgebliche Abweichung war hier bei der Überschussschlammabzugsmenge zu verzeichnen.

Von einer weiteren Befassung mit der dynamischen Simulation wurde in Abstimmung mit dem Erftverband abgesehen, da ein Nachvollziehen der zahlreichen Beckenumschaltungen und in der Folge eine Modellierung dieses komplexen Steuerungsregimes nicht mit vertretbarem Aufwand möglich waren.

4 Verifizierende Gasertragsmessungen

Da labortechnische Untersuchungen nur einen ungefähren Anhalt über das Gasertragspotenzial ergeben, weil betriebliche Einflüsse nicht berücksichtigt werden können, wurde in Abstimmung mit dem Erftverband entschieden, auf derartige Untersuchungen zu verzichten, sondern statt dessen die Betriebsdaten aus dem Jahr der Inbetriebnahme auszuwerten und mit allgemein anerkannten Leistungsdaten aus der Literatur zu vergleichen.

Die anaerobe Schlammstabilisierung mit einem Faulraumvolumen von 2.600 m³ wurde Ende Januar 2019 in Betrieb genommen, die messtechnische Anbindung der Faulgas-mengenmessung erfolgte jedoch erst im April 2019, weswegen auch erst seit diesem Monat entsprechend auswertbare Daten zur Verfügung stehen, vollständige Daten dann ab Mai 2019.

Die folgende Abbildung 93 zeigt die in den Monaten des Jahres 2019 seit Mai angefallenen organischen Primär- und Überschuss-Schlamm-massen sowie die erzeugte Faulgasmenge und die sich daraus ableitende spezifische Faulgasproduktion.

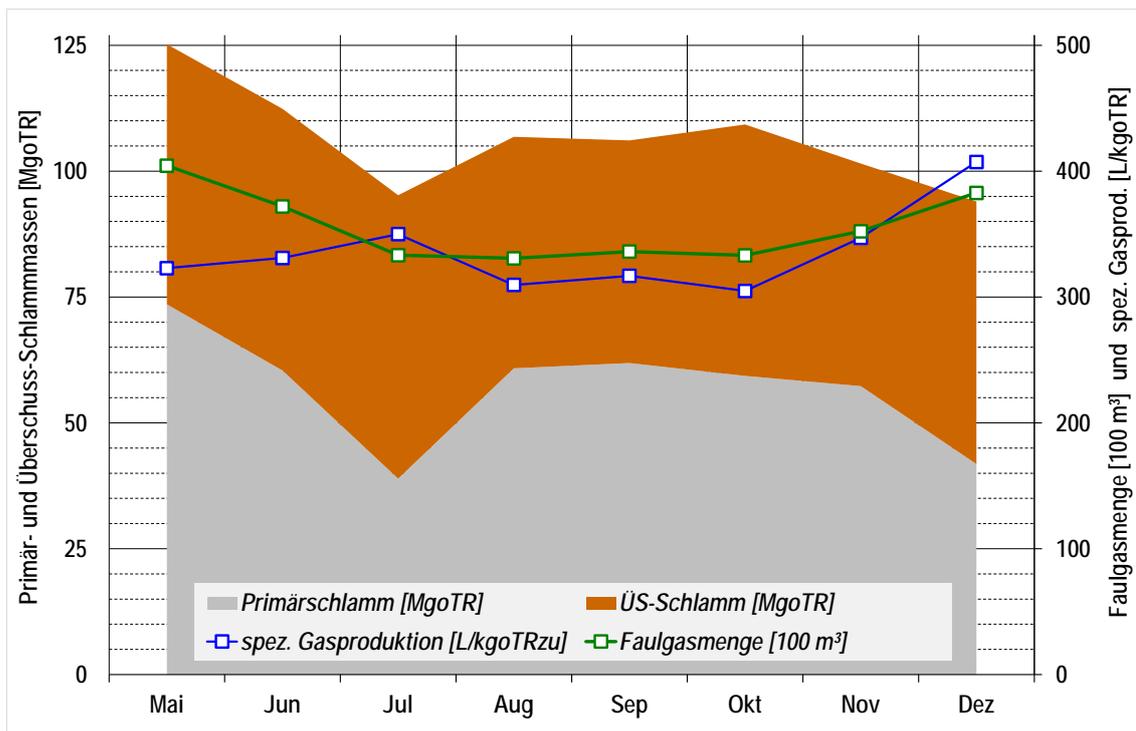


Abbildung 93: organische Schlamm-massen und Faulgasproduktion

Die organischen Rohschlamm-massen im Zulauf zum Faulbehälter bewegen sich in einem Spektrum von 90 MgoTR bis 125 MgoTR. Die Anteile sind dabei nahezu hälftig auf Primärschlamm und Überschussschlamm verteilt (im Mittel 52,6 % Primärschlamm; min/max: 41 %/59 %).

Die Faulgasmenge variiert zwischen monatlich 33.000 m³ und 40.000 m³. Auffallend ist der Mengenanstieg zum Jahresende bei gleichzeitig sinkendem organischem Rohschlammfall. Dies gilt in der Folge ebenfalls für die spezifische Gasproduktion, die zwischen 310 L/kg_{oTR_{zu}} und 407 L/kg_{oTR_{zu}} variiert und diesen deutlichen Maximalwert seit Inbetriebnahme der Faulung im Dezember erreichte. Dies überrascht insofern nicht, als nach allgemeiner betrieblicher Praxiserfahrung davon ausgegangen werden kann, dass sich stabile und effiziente Betriebsverhältnisse erst nach mehreren Monaten einstellen. Hier ist auch für das Jahr 2020 noch mit weiteren Leistungssteigerungen zu rechnen. Die detaillierte Entwicklung zum Jahresende ist in der nachfolgenden Tabelle 13 auf der Grundlage der Monate November und Dezember 2019 dargestellt.

Tabelle 13: Schlammfall und Faulgasproduktion - GWK Nordkanal

		Primär- schlamm	Überschuss- schlamm	Rohschlamm	Faulschlamm
November 2019	[m ³]	2.122	1.128	3.250	3.250
	[kgTR/m ³]	36	70	47,8	27
	[oTR]	75,0%	56,0%	68,4%	55,5%
	[MgoTR _{zu}]	57,29	44,22	101,51	48,70
	Faulgasmenge [m ³]				35.223
	spez. Gasprod. [L/kg _{oTR_{zu}}]				347
Dezember 2019	[m ³]	1.685	1.330	3.015	3.015
	[kgTR/m ³]	34	70	49,9	28
	[oTR]	73,0%	56,0%	65,5%	56,3%
	[MgoTR _{zu}]	41,82	52,14	93,96	47,53
	Faulgasmenge [m ³]				38.270
	spez. Gasprod. [L/kg _{oTR_{zu}}]				407

In der Literatur finden sich Angaben für die Faulung von Primärschlamm, von Primärschlamm und Überschussschlamm (auch aus MBR-Anlagen) sowie Idealwerte und Richtwerte für die Faulung im Allgemeinen. Als Wertespektrum für Faulungsanlagen mit Primärschlamm und Überschussschlamm werden gemäß ATV (1996) Faulgaserträge zwischen 275 L/kg_{oTR_{zu}} und 480 L/kg_{oTR_{zu}} genannt. MUNLV (1999) gibt als Richtwert einen Gasertrag von 450 L/kg_{oTR_{zu}} und als Idealwert einen Ertrag von 475 L/kg_{oTR_{zu}} an. Winter (2003) nennt diesbezüglich Werte zwischen 370 L/kg_{oTR_{zu}} und 410 L/kg_{oTR_{zu}}.

In diese Spektren lassen sich die Gaserträge auf dem GWK Nordkanal bereits jetzt gut einordnen, zumal eine weitere Steigerung für die nächsten Monate erwartbar ist.

5 CO₂-Bilanzierung

5.1 Einführende Anmerkungen

Kläranlagen sind mit durchschnittlich 20 % Anteil in der Regel die größten Stromverbraucher im kommunalen Bereich. Der Gesamtstromverbrauch der ca. 9.500 Kläranlagen in Deutschland liegt in der Größenordnung von 4.400 Gigawattstunden (GWh) pro Jahr. Das entspricht etwa einer CO₂-Emission von 3 Millionen Mg/a. Die Belüftung der Belebungsbecken erfordert in der Regel den mit Abstand größten Energieaufwand von allen Verfahrensschritten einer kommunalen Kläranlage. In Anlagen mit anaerober Schlammstabilisierung, d.h. mit nachgeschalteter Klärschlammfaulung und Biogasgewinnung (betrifft etwa 76 % aller Einwohnerwerte) liegt der Stromverbrauch für die Belüftung im Durchschnitt bei etwa 50 % des gesamten Strombedarfs. Bei kleineren Anlagen mit aerober Schlammstabilisierung erfordert die Belüftung zwischen 60 und 80 % des Gesamtstrombedarfs der Kläranlage. Zusätzlich erhöhten Energiebedarf erfordern erhöhte Ablaufanforderungen, für deren Einhaltung zusätzliche (Filtration, UV-Desinfektion, u.a.m.) oder energieaufwendige Verfahrenstechniken (Membranfiltration) eingesetzt werden.

Das im Abwasser vorhandene Energiepotenzial (organische Substanzen als Energieträger, Ammonium als Düngemittelbestandteil, Abwasserwärme, Lageenergie) ist bekanntermaßen deutlich größer als der mittlere Energieverbrauch der Kläranlagen der GK 4 und GK 5 mit ca. 32 bis 33 kWh/(EW*a). Daher liegt es nahe, Kläranlagen von Energieverbrauchern zu Energieproduzenten zu machen.

Wesentliche Energieeinsparpotenziale bestehen neben der biologischen Reinigung insbesondere bei der Klärschlammbehandlung und bei der Klärschlammverwertung. Zentraler Schritt ist dabei eine Erneuerung der Verfahrenstechnik zur Klärschlammstabilisierung. Anaerobe Verfahren mit einer Umsetzung der organischen Abwasserinhaltsstoffe zu Faulgas eignen sich grundsätzlich besser zur Nutzung des im Abwasser enthaltenen chemischen Potenzials und können den Eigenversorgungsgrad von Kläranlagen deutlich verbessern. Daraus ergibt sich, aufgrund der erneuerten Verfahrenstechnik bei der Klärschlammstabilisierung auf dem GWK Nordkanal, im Rahmen einer vergleichenden CO₂-Bilanz den mutmaßlich positiven Effekt dieser Verfahrensumstellung aufzuzeigen.

5.2 Verfahrenstechnik vor der Verfahrensumstellung

Die zweistraßige mechanische Stufe umfasste eine Feinrechenanlage (5 mm), gefolgt von einem belüfteten Sand- und Fettfang sowie einer Feinsiebanlage (Öffnungsgeometrie: Masche, Öffnungsweite: 1,5 mm). Über ein Verteilerbauwerk wird das mechanisch gereinigte Abwasser auf einen vierstraßigen Membran-Bio-Reaktor mit integrierter Membranfiltration aufgeteilt. Als für ein MBR-Verfahren übliche Verfahrensstrategie wurden die Beckenvolumina für eine simultane aerobe Schlammstabilisierung dimensioniert.

Die biologische Behandlungsstufe besteht aus der einer vorgeschalteten anoxischen Denitrifikationszone, einer nachfolgenden Variozone (wahlweise anoxisch oder aerob; mehrheitlich anoxisch) sowie der aeroben Nitrifikation. In jedem Membran-Bio-Reaktor sind an den Längswänden je 24 Hohlfasermembranmodule der Firma Suez (insgesamt 192 Module mit ca. 88.000 m² Membranfläche) installiert. Zusätzlich zur feinblasigen Druckbelüftung für die Nitrifikation ist ein grobblasiges Belüftungssystem für die Membranen erforderlich.

Der Überschussschlamm wird in drei Schlammstapelbehältern zwischengespeichert, weil die Zentrifuge (Schlammwässerung) nur werktags im Ein-Schicht-Betrieb betrieben wird. Prozess- und Trübwasser werden vor der Rechenanlage in den Kläranlagenzulauf eingeleitet; der entwässerte Schlamm wird andernorts thermisch verwertet.

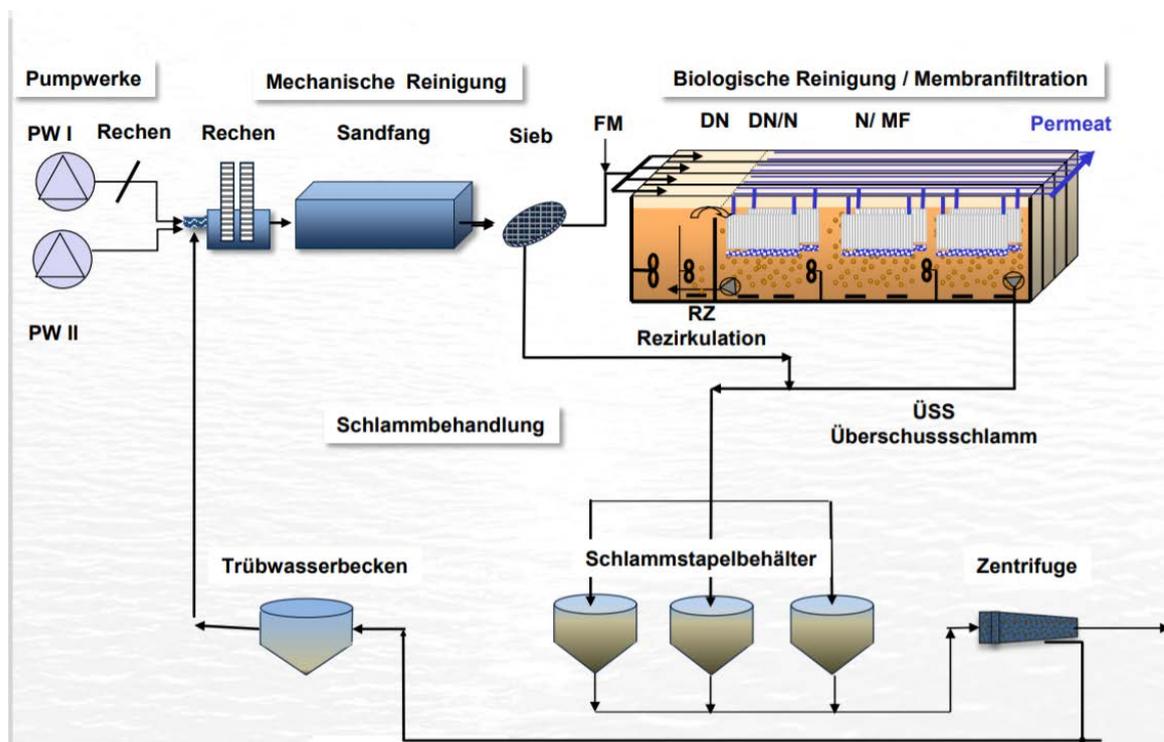


Abbildung 94: Verfahrensschema GWK Nordkanal vor der Erweiterung

5.3 CO₂-Bilanzierung vor der Verfahrensumstellung

5.3.1 CO₂-Emission aus Stromverbrauch

Für das GWK Nordkanal stehen die Stromverbräuche im Zeitraum 2011 bis 2018 zur Verfügung. Das anfallende Kohlendioxid lässt sich durch einen Emissionsfaktor für „Strommix“ in Deutschland berechnen. Die Emissionsfaktoren für den Zeitraum 2011 bis 2018 sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Tabelle 14: CO₂-Emissionsfaktoren Strommix in [g/kWh] (UBA 2019)

Jahr	Faktor
2011	568
2012	573
2013	572
2014	557
2015	527
2016	523
2017	486
2018	474

Auf der GWK Nordkanal wird erneuerbare Energie durch Photovoltaikanlagen (PV) gewonnen und für die Eigennutzung eingespeist. Die PV-Anlage wurde im Jahr 2011 gebaut und 2012 im Betrieb genommen. Der erzeugte Strom emittiert bspw. gegenüber der Stromerzeugung in Kohlekraftwerken kein CO₂. Daher wird für die CO₂-Bilanzierung der Stromanteil aus PV von dem Gesamtverbrauch abgezogen. Es lagen keine vollständigen Daten zur Stromproduktion im Jahr 2015 vor; deswegen wird der PV-Stromanteil für 2015 abgeschätzt. Auch die Daten für die Stromproduktion im Zeitraum 2016 bis 2018 waren nicht verfügbar und werden aus dem Jahr 2015 übernommen.

Tabelle 15: CO₂-Emissionen aus Strombezug bis 2018 - GWK Nordkanal

Jahr	Stromverbrauch [kWh/a]	Ablaufmenge [m ³]	spez. Verbrauch [kWh/m ³]	Stromproduktion aus PV [kWh/a]	Strombezug [kWh/a]	CO ₂ -Emission [t/a]
2011	5.497.007	5.999.103	0,92	0	5.497.007	3.122
2012	4.695.567	5.139.658	0,91	207.216	4.488.351	2.572
2013	4.044.552	4.849.980	0,83	189.387	3.855.165	2.205
2014	3.499.415	5.152.420	0,68	194.507	3.304.908	1.841
2015	3.238.746	5.102.790	0,63	165.350	3.073.396	1.620
2016	3.504.021	5.344.172	0,66	165.350	3.338.671	1.746
2017	3.869.177	5.253.256	0,74	165.350	3.703.827	1.800
2018	3.533.139	4.552.660	0,78	165.350	3.367.789	1.596
Durchschnitt (2014 bis 2018)	3.528.900	5.081.060	0,70	171.181	3.357.718	1.721

Im Zeitraum von 2011 bis 2015 ist ein Rückgang des elektrischen Energieverbrauchs von 2.258.261 kWh/a ohne Berücksichtigung der PV-Einspeisung zu erkennen. Mit der PV-

Einspeisung lag die Verminderung des Stromverbrauchs bei 2.294.424 kWh/a. Die CO₂-Emission im Jahr 2015 war um 1.502 t/a geringer als 2011, entsprechend einem Rückgang von 48 % demnach nahezu halbiert. In der Folgezeit 2016 und 2017 stieg der Stromverbrauch wieder an. Die CO₂-Emission im Jahr 2017 betrug 180 t/a mehr als 2015 (entsprechend 11 % Steigerung) und sank im Folgejahr 2018 um einen vergleichbaren Anteil wieder ab.

Die CO₂-Emission durch Stromverbrauch im Durchschnitt der Jahre 2014 bis 2018 wird für die weitere Betrachtung als jährliche CO₂-Emission vor der Erweiterung angenommen. Sie entspricht einem spezifischen Wert von 21,5 kg CO₂/(EW*a).

Der einwohnerspezifische Gesamtstromverbrauch betrug in dem betrachteten Zeitraum 44,1 kWh/(EW*a). Der spezifische Stromverbrauch wird in 74 % der betrachteten Kläranlagen unterschritten, wenn man diesen Wert in den entsprechenden DWA-Leistungsvergleich aus dem Jahr 2015 einordnet (veröffentlicht im Jahr 2016). Danach wies das GWK Nordkanal einen vergleichsweise mittleren Strombedarf auf, was aber durch das Erfordernis einer zusätzlichen grobblasigen Membranbelüftung zu der ohnehin erforderlichen feinblasigen Belüftung der aeroben Beckenzonen erklärbar ist. Zusätzlich ist im Folgenden auch das Jahr 2015 separat dargestellt, in dem umfangreiche energieoptimierende Maßnahmen zu einem zwischenzeitlich deutlichen Rückgang des Stromverbrauches, spezifisch auf 40,5 kWh/(EW*a), führten (siehe auch Tabelle 15).

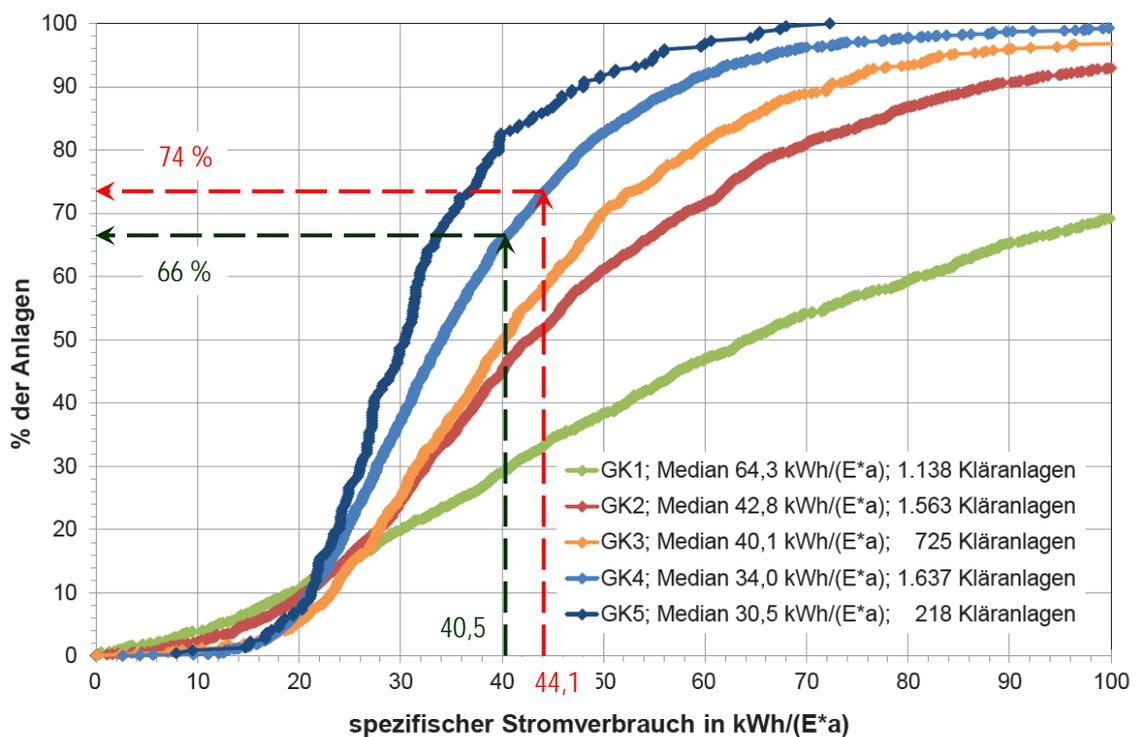


Abbildung 95: spezifischer Stromverbrauch vor der Verfahrensumstellung (GWK Nordkanal)

5.3.2 CO₂-Emission aus Wärmebedarf

Da auf dem GWK Nordkanal eine aerobe simultane Schlammstabilisierung betrieben wurde, stand zur Bereitstellung der benötigten thermischen Energie kein Faulgas zur Verfügung. Der Wärmebedarf wurde komplett über Heizöl und Elektroheizungen gedeckt.

Das Betriebsgebäude wurde über eine Zentralölheizung geheizt. Das Rechengebäude, die Polymeransatzstation sowie die Zentrifugenhalle wurden mit Heizregistern beheizt.

Es lagen keine aktuellen Daten für die Wärmenutzung vor der Anlagenerweiterung vor. Daher wird für die gesamte Wärmenutzung das Jahr 2007 als Bezugsjahr genommen. Laut der Zusammenstellung der Heizölrechnung wurden 6.020 Liter Öl bezogen. Bei einem Heizwert von 9,96 kWh/l ergibt sich ein Wärmebedarf von 59.959 kWh/a bzw. 60 MWh/a.

Gemäß UBA (2019) beträgt der CO₂-Emissionsfaktor für leichtes Heizöl 74.020 kgCO₂/TJ bzw. 74 tCO₂/TJ.

Daraus lässt sich ableiten:

$$1 \text{ TJ} = 1.000.000 \text{ MJ} = 1.000.000 \text{ MWs} = 1.000 \text{ MWs} / 3.600 \text{ s/h} = 278 \text{ MWh}$$

$$74 \text{ tCO}_2/\text{TJ} = 74 \text{ tCO}_2/278 \text{ MWh} = 0,266 \text{ t/MWh}$$

Bei einem Heizbedarf von 60 MWh/a lässt sich die CO₂-Emission durch Nutzung von leichtem Heizöl zu 60 MWh/a * 0,266 t/MWh = 15,95 t/a = **16 t/a** berechnen.

5.3.3 CO₂-Emission aus Schlammtransport

Im Bezugsjahr 2017 wurden 4.853 Tonnen Schlamm zur Verbrennung transportiert. Die Transportstrecke beträgt 58 km. Der spezifische Emissionswert für LKW wird mit 0,103 kg/(t*km) (UBA 2018) angesetzt. Daraus ergibt sich eine CO₂-Emission von 28.992 kgCO₂/a = **29 t/a**.

5.3.4 CO₂-Emission aus Transport von Fäll- und Flockungshilfsmittel

Im Bezugsjahr 2017 wurden 363.800 Liter Fällmittel FeCl₃ verbraucht. Mit einer Dichte von 1,43 kg/l lässt sich die Masse des Fällmittels berechnen zu:

$$1,43 \text{ kg/l} * 363.800 \text{ l/a} = 520.234 \text{ kg/a}$$

Der Flockungshilfsmittel (FHM) - Bedarf im Jahr 2017 betrug 27.638 l/a. Die Dichte des Flockungshilfsmittels wird mit 1 kg/l angesetzt, woraus eine Masse der Flockungshilfsmittel von 27.638 kg/a resultieren.

Die erforderliche Transportstrecke wird mit etwa 200 km angenommen.

Insgesamt lässt sich die CO₂-Emission aus dem Transport von Fäll- und Flockungshilfsmitteln wie folgt berechnen:

$$(520.234 \text{ kg/a} + 27.638 \text{ kg/a}) * 200 \text{ km} * 0,103 \text{ kg/(t*km)} / 1.000 = 11.286 \text{ kgCO}_2/\text{a} = \mathbf{12 \text{ t/a}}$$

5.3.5 CO₂-Emission aus Transport von membranspezifischen Reinigungschemikalien

Im Bezugsjahr 2018 wurden 129.000 Liter Reinigungschemikalien (Salzsäure, Zitronensäure, Natronlauge, Natriumhypochlorid) verbraucht. Mit einer angesetzten Dichte von 1 kg/l ergibt sich eine Masse an Reinigungschemikalien von 129.000 kg.

Die erforderliche Transportstrecke wird mit etwa 200 km angenommen.

Insgesamt lässt sich die CO₂-Emission aus dem Transport von membranspezifischen Reinigungschemikalien wie folgt berechnen:

$$129.000 \text{ kg/a} * 200 \text{ km} * 0,103 \text{ kg/(t*km)} / 1.000 = 2.657 \text{ kgCO}_2/\text{a} = \mathbf{3 \text{ t/a}}$$

5.3.6 CO₂-Bilanzierung

Die jährliche CO₂-Gesamtemission vor der Erweiterung betrug somit:

$$1.600 \text{ t/a} + 16 \text{ t/a} + 29 \text{ t/a} + 12 \text{ t/a} + 3 \text{ t/a} = 1.660 \text{ t/a}$$

96,4 % der CO₂-Emission stammen somit aus dem Stromverbrauch. Die einwohnerspezifische CO₂-Emission liegt bei 20,8 kg/(EW*a).

5.4 Verfahrenstechnik nach der Verfahrensumstellung

Kern der verfahrenstechnischen Umstellung ist die Klärschlammstabilisierung. Die aerobe simultane Schlammstabilisierung wurde aufgegeben, stattdessen wurden die erforderlichen Gewerke für eine anaerobe Schlammstabilisierung (Voreindicker, Faulbehälter, Nacheindicker, Gasspeicher, BHKW) realisiert. Beschickt wird der Faulbehälter (V = 2.600 m³) mit maschinell voreingedicktem biologischem Überschussschlamm und

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

voreingedicktem Primärschlamm. Dazu wurde die mechanische Vorreinigungsstufe hinter dem belüfteten Sand- und Fettfang um eine Vorklärung ergänzt.

Die Siebanlage wurde vollständig ausgetauscht (Halbmuldensiebe mit 1,5 mm Loch-Öffnungsgeometrie) und neu hinter der Vorklärung positioniert.

Für die anfallenden Trüb- und Prozesswässer wurde eine Deammonifikationsstufe in einem bereits vorhandenen Speicherbecken konzipiert.

Das gesamte Verfahrensbild ist Abbildung 96 zu entnehmen.

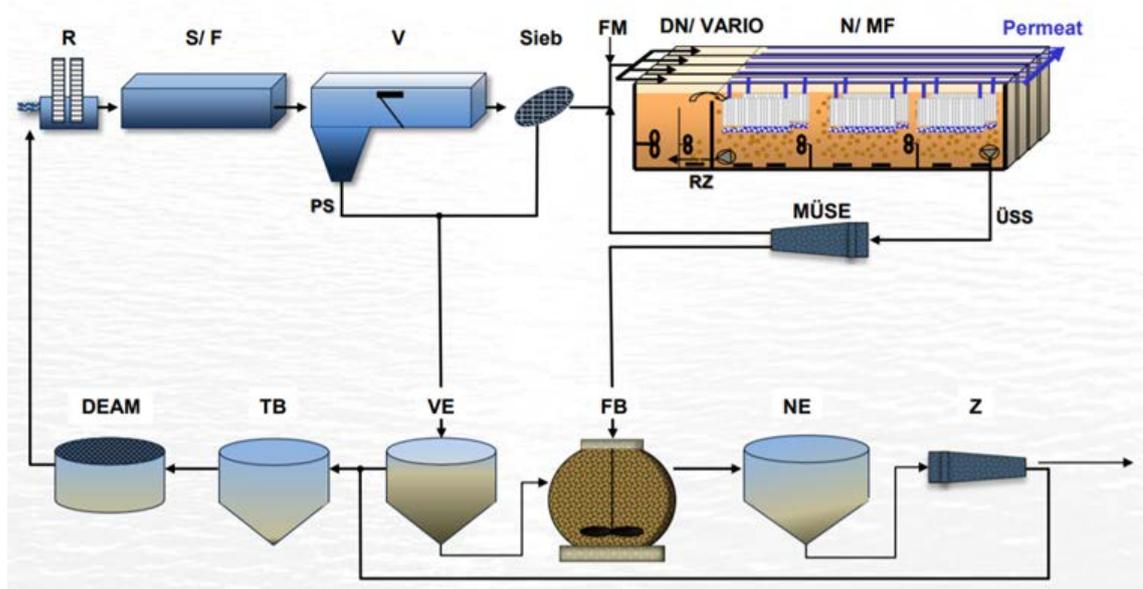


Abbildung 96: Verfahrensschema GWK Nordkanal nach der Verfahrensumstellung

5.5 CO₂-Bilanzierung nach der Verfahrensumstellung

5.5.1 CO₂-Emission aus Stromverbrauch

Im Jahr 2019 wurden 3.173.081 kWh verbraucht. Der Faulgasanfall betrug 322.617 m³. Die im BHKW aus dem Faulgas produzierte Strommenge lag bei 862.642 kWh.

Daraus ergibt sich ein Strombezug im Jahr 2019 von
 $3.173.081 \text{ kWh/a} - 862.642 \text{ kWh/a} - 206.994 \text{ kWh/a} = 2.103.445 \text{ kWh/a}$
 und unter Ansatz des CO₂-Emissionsfaktors aus dem Jahr 2018 in Höhe von 474 g/kWh ein Emissionswert von 997 tCO₂/a.

Tabelle 16: CO₂-Emissionen aus Strombezug 2019 - GWK Nordkanal

Jahr	Stromverbrauch [kWh/a]	Ablaufmenge [m ³]	spez. Verbrauch [kWh/m ³]	Stromproduktion aus PV [kWh/a]	Strombezug [kWh/a]	CO ₂ -Emission [t/a]
2019	3.173.081	5.055.221	0,63	206.994	2.103.445	997

Der spezifische Faulgasanfall beträgt 4,0 m³/(EW*a) bzw. 11,1 l/(EW*d). Gemäß DWA-Arbeitsblatt-A 216 (DWA 2015) wird der spezifische Faulgasanfall des GWK Nordkanal in ca. 95 % der betrachteten Kläranlagen überschritten.

Der Eigenversorgungsgrad durch Stromerzeugung in BHKW (und PV) beträgt 33,3 %. Gemäß DWA-A 216 (DWA 2015) wird der Eigenversorgungsgrad des GWK Nordkanal in ca. 70 % der betrachteten Kläranlagen überschritten.

Es wird im Folgenden berücksichtigt, dass die anaerobe Schlammstabilisierung und das BHKW erst 2019 in Betrieb gegangen sind und sich stabile und effiziente Betriebsverhältnisse erst nach mehreren Monaten einstellen. Hier ist auch für das Jahr 2020 noch mit weiteren Leistungssteigerungen zu rechnen. Um die Effizienz dieser verfahrenstechnischen Gewerke zum jetzigen Zeitpunkt nicht zu sehr zu unterschätzen, wird die Betrachtung auf der Grundlage der Monate November und Dezember 2019, deren Leistungsdaten dann auf das gesamte Jahr hochgerechnet werden, wiederholt. Danach ergeben sich:

- ➔ ein Faulgasanfall von 440.958 m³
- ➔ zur Stromerzeugung wird mit einem Heizwert von 6,5 kWh/m³ gerechnet, so dass das produzierte Faulgas eine Strommenge ergibt von 2.866.227 kWh
- ➔ Der elektrische Wirkungsgrad beträgt ca. 38 % und die im BHKW erzeugte Strommenge liegt bei 1.089.166 kWh_{el}
- ➔ 3.173.081 kWh - 1.089.166 kWh - 206.994 kWh 1.876.921 kWh
- ➔ die CO₂-Emission verringert sich auf 890 t/a
- ➔ spezifische Faulgasanfall beträgt 5,5 m³/(EW*a) bzw. 15,1 l/(EW*d)
(gemäß DWA-A 216 (2015) wird der spezifische Faulgasanfall in ca. 83 % der betrachteten Kläranlagen überschritten)
- ➔ der Eigenversorgungsgrad beträgt 40,8 %
(gemäß DWA-A 216 (2015) wird der Eigenversorgungsgrad in ca. 55 % der betrachteten Kläranlagen überschritten)

Abbildung 97 und Abbildung 98 ordnen die Ergebnisse beider Betrachtungen in das bestehende DWA-Regelwerk ein.

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

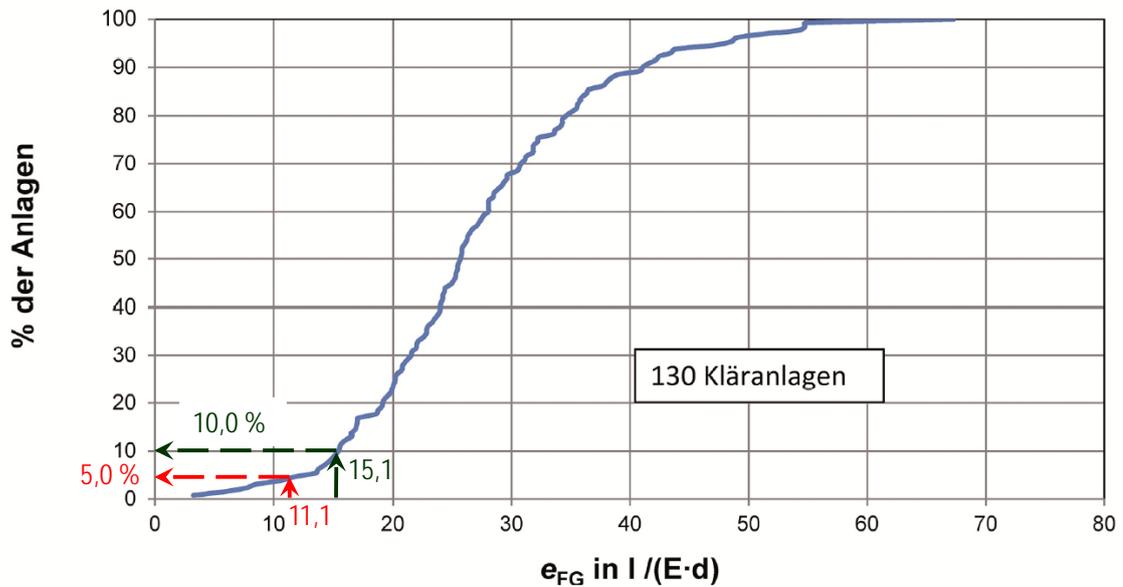


Abbildung 97: Einordnung des spezifischen Faulgasanfalls (GWK Nordkanal) gemäß DWA-A 216

Es wird davon ausgegangen, dass sich unter optimierten Betriebsverhältnissen diese aktuelle Einordnung im untersten Quartil noch deutlich verbessern wird.

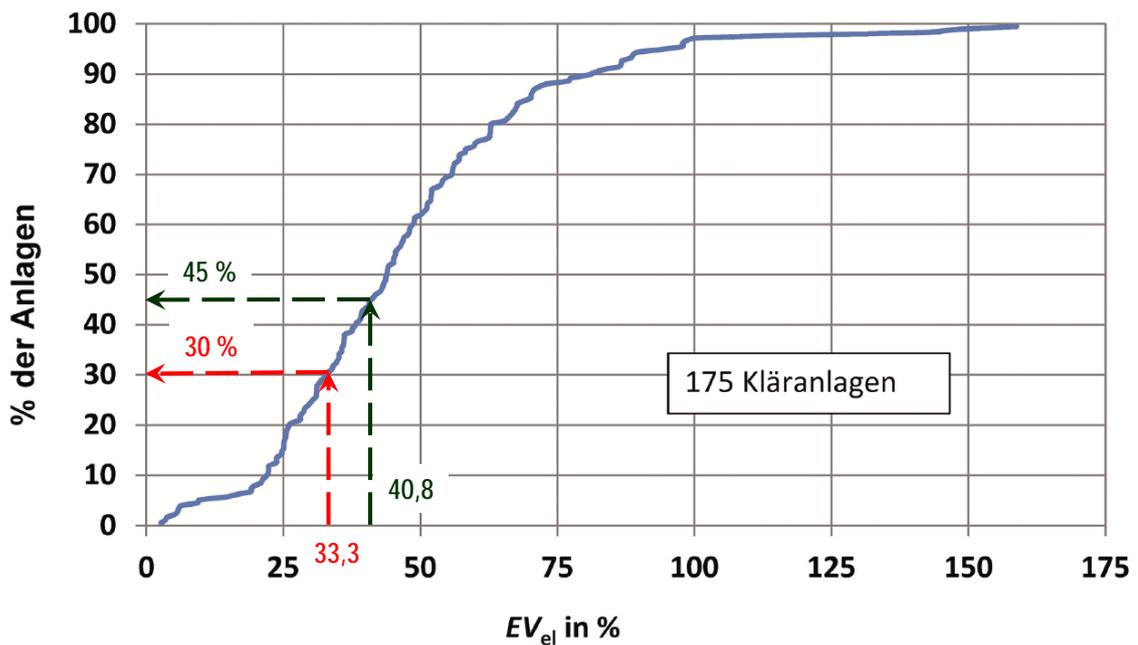


Abbildung 98: Einordnung des Eigenversorgungsgrades (GWK Nordkanal) gemäß DWA-A 216

MBR-Anlagen weisen verfahrensbedingt einen erhöhten Energiebedarf auf. Gemäß DWA-M 227 (2014) liegt der spezifische Energiebedarf einer mehrstraßigen MBR-Anlage, bezogen auf den durchschnittlichen Zufluss und die gesamte Anlage, für größere Anlagen mit Mischwassereinfluss in der Größenordnung von 0,7 kWh/m³ bis 1,0 kWh/m³. Anlagen mit

vergleichbaren Reinigungszielen und konventioneller, energieoptimierter Technologie liegen häufig im Bereich von 0,4 kWh/m³ bis 0,7 kWh/m³. Vor diesem Hintergrund ist der aktuelle Eigenversorgungsgrad bereits als befriedigend anzusehen, auch davon ausgehend, dass sich der Faulgasertrag in der kommenden Betriebszeit noch steigern lässt.

Zusätzlich sei in Anbetracht der Entwicklung der spezifischen Stromverbrauchszahlen aus Tabelle 15 und Tabelle 16 darauf hingewiesen, dass das GWK Nordkanal als MBR-Anlage bereits heute in einem energieoptimierten Bereich betrieben wird, der das angegebene Bedarfsspektrum des DWA-M 227 mit einem aktuellen Wert von 0,63 kWh/m³ nochmals unterschreitet.

Darüber hinaus zeigt auch ein vergleichender Blick auf den einwohnerspezifischen Gesamtstromverbrauch die positive betriebliche und energiespezifische Entwicklung im Jahr 2019. Dieser Verbrauch sank auf 39,7 kWh/(EW*a). Der spezifische Stromverbrauch wird demnach im Vergleich zum Betrachtungszeitraum vor der Verfahrensumstellung (siehe Abbildung 95) nur noch in 65 % der betrachteten Kläranlagen unterschritten.

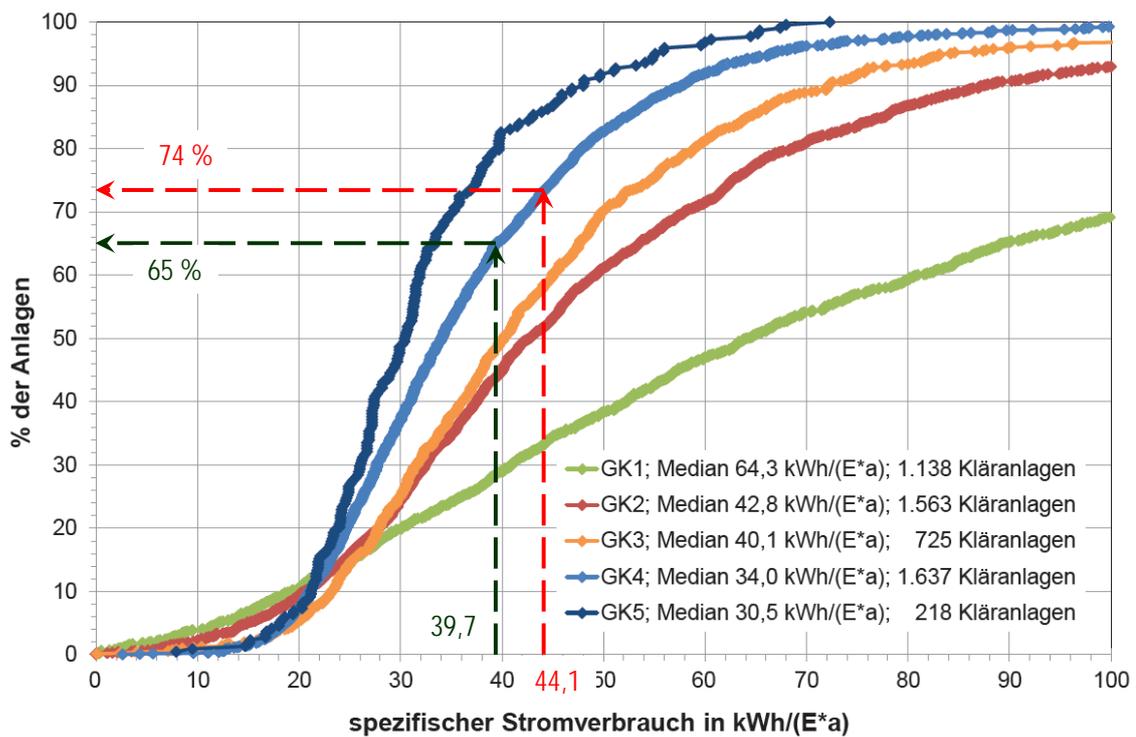


Abbildung 99: spezifischer Stromverbrauch vor der Verfahrensumstellung (GWK Nordkanal)

5.5.2 CO₂-Emission aus Wärmebedarf

...wird nicht berücksichtigt, da hierzu keine Daten verfügbar waren.

5.5.3 CO₂-Emission aus Schlammtransport

Im Jahr 2019 wurden 3.184 t Schlamm zur Verbrennung transportiert. Die Transportstrecke beträgt nach wie vor 58 km. Der spezifische Emissionswert für LKW wird mit 0,103 kg/(t*km) (UBA 2018) angesetzt. Daraus ergibt sich für eine extrapolierte Schlammmasse von 3.440 t/a eine CO₂-Emission von

$$3.184 \text{ t/a} * 58 \text{ km} * 0,103 \text{ kgCO}_2/(\text{t*km}) = 19.021 \text{ kg/a bzw. } \underline{\underline{19 \text{ t/a}}}$$

Im Vergleich zu der CO₂-Emission aus dem Schlammtransport vor der Verfahrensumstellung zeigt sich eine um ca. 8 t/a niedrigere CO₂-Emission, was auf die Verfahrensumstellung bei der Schlammstabilisierung und den damit verbundenen erhöhten Schlammwässerungsgrad von 22 % auf aktuell 30 % bei der Zentrifugation des ausgefaulten Schlammes zurückzuführen ist.

5.5.4 CO₂-Emission aus Transport von Fäll- und Flockungshilfsmittel

Bis zum 01.08.2019 wurden 232.670 Liter Fällmittel FeCl₃ verbraucht, was sich auf einen Jahresbedarf von 400.000 Liter Fällmittel FeCl₃ hochrechnen lässt. Mit einer Dichte von 1,43 kg/l lässt sich die Masse des Fällmittels berechnen zu:

$$1,43 \text{ kg/l} * 400.000 \text{ l/a} = 572.000 \text{ kg/a}$$

Der Flockungshilfsmittel (FHM) - Bedarf bis zum 01.08.2019 betrug 18.310 l. Dies ergibt für das gesamte Jahr 31.388 l und bei einer angesetzten Dichte von 1 kg/l eine Masse der Flockungshilfsmittel von 31.388 kg/a resultieren.

Die erforderliche Transportstrecke wird wieder mit etwa 200 km angenommen.

Insgesamt lässt sich die CO₂-Emission aus dem Transport von Fäll- und Flockungshilfsmitteln wie folgt berechnen:

$$(572.000 \text{ kg/a} + 31.388 \text{ kg/a}) * 200 \text{ km} * 0,103 \text{ kg}/(\text{t*km}) / 1.000 = 12.430 \text{ kgCO}_2/\text{a} = \underline{\underline{13 \text{ t/a}}}$$

5.5.5 CO₂-Emission aus Transport von membranspezifischen Reinigungschemikalien

Für das Bezugsjahr 2019 werden die identischen Mengen an Reinigungschemikalien (Salzsäure, Zitronensäure, Natronlauge, Natriumhypochlorid) angesetzt wie im Jahr 2018, so dass sich auch hier eine Masse an Reinigungschemikalien von 129.000 kg ergibt.

Die erforderliche Transportstrecke wird entsprechend mit etwa 200 km angenommen.

Insgesamt errechnet sich die CO₂-Emission aus dem Transport von membranspezifischen Reinigungschemikalien zu:

$$129.000 \text{ kg/a} * 200 \text{ km} * 0,103 \text{ kg/(t*km)} / 1.000 = 2.657 \text{ kgCO}_2/\text{a} = \mathbf{3 \text{ t/a}}$$

5.5.6 CO₂-Emission aus Transport von Essigsäure

Für das Bezugsjahr 2019 ist zusätzlich der Einsatz und Transport von Essigsäure als Dosiermittel vor der biologischen Stufe zu berücksichtigen. Im Betrachtungsjahr wurden 80.000 Liter Essigsäure eingesetzt. Mit einer Dichte von 1,064 kg/l laut zugehörigem Sicherheitsdatenblatt lässt sich die Masse des Dosiermittels berechnen zu

$$1,064 \text{ kg/l} * 80.000 \text{ l/a} = 85.120 \text{ kg/a}$$

Die erforderliche Transportstrecke wird mit etwa 200 km angenommen.

Insgesamt errechnet sich die CO₂-Emission aus dem Transport von Essigsäure zu:

$$85.120 \text{ kg/a} * 200 \text{ km} * 0,103 \text{ kg/(t*km)} / 1.000 = 1.754 \text{ kgCO}_2/\text{a} = \mathbf{2 \text{ t/a}}$$

5.5.7 CO₂-Bilanzierung

Die jährliche CO₂-Gesamtemission nach der Verfahrensumstellung ergibt sich somit zu:

$$997 \text{ t/a} + 0 \text{ t/a} + 19 \text{ t/a} + 13 \text{ t/a} + 3 \text{ t/a} + 2 \text{ t/a} = 1.034 \text{ t/a}$$

Davon stammen 96,4 % der CO₂-Emission aus dem Stromverbrauch. Die einwohnerspezifische CO₂-Emission liegt bei 12,9 kg/(EW*a).

5.6 Fazit

Die jährliche CO₂-Gesamtemission reduziert sich durch die Verfahrensumstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung um ca. 38 % von 1.660 tCO₂/a auf aktuell nur noch 1.034 tCO₂/a. Die einwohnerspezifische CO₂-Emission reduziert sich entsprechend von 20,8 kg/(EW*a) auf 12,9 kg/(EW*a). Maßgeblicher Faktor dieser CO₂-Emissionsreduktion ist die Eigenstromerzeugung aus dem aufgrund der veränderten Verfahrenstechnik anfallenden Faulgas.

Nicht berücksichtigt ist in der Bilanzierung die CO₂-Emission aus dem aktuellen Wärmebedarf, die jedoch nur zu einer sehr geringfügigen Veränderung der Emissionswerte führt und prinzipiell keinen Einfluss auf die positive Entwicklung der CO₂-Bilanz hat.

6 Zusammenfassung

Der Erftverband, Bergheim hat für das Gruppenklärwerk (GWK) Nordkanal, das für 80.000 EW nach der MBR-Technologie betrieben wird, die bauliche Erweiterung und verfahrenstechnische Umstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung seit 2014 geplant, realisiert und 2019 in Betrieb genommen. Im September 2015 wurde das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft (FG SWW) der Universität Kassel mit einem begleitenden Mess- und Untersuchungsprogramm zu folgenden inhaltlichen Schwerpunkten beauftragt.

- Umgestaltung der mechanischen Vorreinigungsstufe im Hinblick auf eine anaerobe Schlammstabilisierung
- Betrachtungen der Reinigungsleistung der Membran-Bioreaktor-Anlage nach dem aktuellen theoretischen Bemessungsansatz
- Gasertragsevaluation des GWK Nordkanal nach Inbetriebnahme aller neuen Anlagen- und Verfahrenskomponenten
- CO₂-Bilanzierung auf der Basis der erneuerten Prozesskonfiguration.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Mechanische Vorreinigungsstufe:

Aus der verifizierenden Messphase auf dem GWK Nordkanal nach Inbetriebnahme der neuen zusätzlichen Vorklärstufe sowie der neuen Feinsiebanlage ergaben sich zwei wesentliche Erkenntnisse:

- Die auf der Grundlage der Messdaten vorgenommene Mengenabschätzung der täglich (100 kg/d bis 200 kg/d) zurückgehaltenen Masse an membrankritischen Feststoffen ist eindeutiger Beleg für das Erfordernis, auch eine MBR-Verfahrenstechnik mit anaerober Schlammstabilisierung und damit verbundener Vorklärstufe im Rahmen der mechanischen Abwasserreinigung mit einer nachgeschalteten Siebung auszurüsten, um größere Feststoffpartikel, die zu Verzapfungen oder Verschlammungen an und in den Membranfiltrationsmodulen der nachfolgenden biologischen Stufe führen können, langfristig zu vermeiden.
- Im Hinblick auf die vorgeschaltete Denitrifikationszone der nachfolgenden biologischen Stufe ist die CSB-Gesamtreaktion von Vorklärung und Siebung kritisch zu bewerten. Zum Zeitpunkt der Messphase wurde diesem Umstand bereits durch eine Essigsäuredosierung vor dem Ablauf der Vorklärung Rechnung getragen. Zusätzlich ist der Betrieb von nur einer Vorklärstraße denkbar, eine Verfahrensweise, die dann auch dem Betrieb einer Grobentschlammung d.h. einer Vorklärung mit einer kurzen Aufenthaltszeit von ca. 30 Minuten unter Trockenwetterbedingungen, entsprechen würde.

Die vorherigen Messphasen auf dem GWK Glehn und der KA Grevenbroich ergaben unterstützende Erkenntnisse hinsichtlich

- einer zu empfehlenden zweidimensionalen Sieböffnungsweite von 1,5 mm, die als völlig ausreichend bei einem Siebbetrieb hinter einer Vorklärstufe eingeschätzt wurde,
- einer möglicherweise kritischen Entnahmeleistung an organischen Stoffen (CSB) in der Vorklärstufe sowie einer zusätzlichen Siebstufe,
- den grundsätzlich positiven Auswirkungen einer vorgelagerten, zweidimensionalen Rechenstufe für den Rückhalt membrankritischer Feststoffe in der Verfahrensabfolge Rechen – Vorklärstufe, die möglicherweise den nachgeschalteten Betrieb einer Siebstufe entbehrlich erscheinen lassen.

Reinigungsleistung der Membran-Bioreaktor-Anlage und Bemessungsansatz:

Die vergleichende Betrachtung wurde für das GWK Nordkanal anhand einer mit Tagesdaten für das 2016 durchgeführten stationären Nachbemessung auf der Grundlage des Arbeitsblattes-A 131 (DWA 2016) durchgeführt.

Wesentliche Erkenntnisse einer im Vorfeld durchgeführten Auswertung der Betriebsdaten des Jahres 2016 waren dabei:

- Die Schmutzstoffbelastung des Abwasserzulaufes lag bei Ansatz der jeweiligen 85 % - Fraktilwerte unterhalb der Bemessungsfrachten aus dem Jahre 2002. Bezogen auf CSB wird der Bemessungswert um ca. 15 % unterschritten, bezogen auf den Parameter P_{GES} um ca. 45 % dies sogar sehr deutlich. Bezogen auf den Parameter NH_4-N wird der Bemessungswert exakt erreicht, wobei sich der Belastungszustand permanent auf einem sehr hohen Niveau befindet.
- Eine Auswertung der Belebungsolumina auf der Basis des installierten Steuerungsregimes ergibt ein minimal in Betrieb befindliches tägliches Belebungsbeckenvolumen von 2.523 m³ und andererseits ein maximal in Betrieb befindliches tägliches Belebungsbeckenvolumen von 9.314 m³ (Gesamtvolumen der Belebungsstufe). Im Jahresmittel waren 4.716 m³ Belebungsbeckenvolumen in Betrieb. Das entspricht nahezu exakt 50 % des verfügbaren Belebungsbeckenvolumens auf dem MBR GWK Nordkanal.
- Erkennbar wird bei Betrachtung des Verlaufes der CSB-Ablaufkonzentrationen der Einfluss der seit Mitte 2016 begonnenen PAK-Dosierung. Die CSB-Ablaufkonzentrationen verringern sich in der zweiten Jahreshälfte um einen mittleren Betrag von ca. 4 mg/L bis 5 mg/L.

Aus den Untersuchungen zur stationären Neu-Bemessung ergab sich mit den Ansätzen

- ➔ Mindestschlammalter: 12 Tage
- ➔ Ansatz des realen Temperaturverlaufes
- ➔ iterative Ermittlung des Denitrifikationsvolumenanteils
- ➔ Steuerungsregime ohne Berücksichtigung von Ablaufanforderungen
- ➔ maximale Trockenwetterwassermenge: 10.000 m³/d

eine mittlere Volumendifferenz von ca. 34 %, um die die vorhandene Belebungsstufe unterbemessen wäre.

Anlagenspezifisch für das GWK Nordkanal mit ihrem steuerungsbedingt variablen Belebungsvolumen entspricht dies einem mittleren Belebungsvolumen von ca. 1.000 m³ unter Trockenwetterverhältnissen. Dies wiederum entspricht rund 11 % des gesamten vorhandenen Belebungsvolumens.

Es war eingangs als Hinweis für das vermutete Auftreten zusätzlicher Reinigungseffekte formuliert worden, dass die stationären Neubetrachtungen mehrheitlich ein größeres erforderliches Belebungsbeckenvolumen ermitteln, als es faktisch an den betreffenden Bemessungstagen in Betrieb gewesen ist. Dieser Hinweis wurde nun durch die erläuterte bemessungstechnische Untersuchung gegeben, wobei einschränkend hinzuzufügen ist, dass eine vergleichbare Untersuchung unter Verwendung des DWA-A 131 (2016) an einer ähnlich klassifizierten Kläranlage mit konventionellem Belebungsverfahren bislang nicht durchgeführt wurde. Die Ergebnisse einer solchen Untersuchung könnten die grundsätzliche Vorgehensweise bestätigen und die Interpretation der Ergebnisse bestätigen.

Gasertragsevaluation:

Die anaerobe Schlammstabilisierung wurde Ende Januar 2019 in Betrieb genommen, die messtechnische Anbindung der Faulgasmengenmessung erfolgte jedoch erst im April 2019, so dass vollständige Daten ab Mai 2019 vorlagen.

Die Faulgasmenge variiert zwischen monatlich 33.000 m³ und 40.000 m³, die spezifische Gasproduktion zwischen 310 L/kg_{oTR_{zu}} und 407 L/kg_{oTR_{zu}}. Diese Leistungsdaten lassen sich sehr gut in zahlreich publizierte Leistungsspektren vergleichbarer Kläranlagen und vergleichbarer Verfahrensführung einordnen. Da sich stabile und effiziente Betriebsverhältnisse erfahrungsgemäß erst nach mehreren Monaten einstellen, kann an dieser Stelle auch für das Jahr 2020 noch mit weiteren Leistungssteigerungen gerechnet werden.

CO₂-Bilanzierung auf der Basis der erneuerten Prozesskonfiguration.

Die jährliche CO₂-Gesamtemission reduziert sich durch die Verfahrensumstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung um ca. 38 % von 1.660 tCO₂/a auf aktuell 1.034 tCO₂/a. Die einwohnerspezifische CO₂-Emission reduziert sich entsprechend von 20,8 kg/(EW*a) auf 12,9 kg/(EW*a). Maßgeblicher Faktor dieser CO₂-Emissionsreduktion ist die Eigenstromerzeugung aus dem aufgrund der veränderten Verfahrenstechnik anfallenden Faulgas. Der Stromverbrauch hat mit weiterhin über 96 % den bestimmenden Anteil an den CO₂-Emissionen.

Insofern kann resümiert werden, dass sich die Verfahrensumstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung in mehrfacher Hinsicht positiv auswirkt, nämlich zum einen kostensenkend wegen des geringeren Fremdstrombezugs und wegen der reduzierten abzutransportierenden Menge an entwässertem Klärschlamm sowie gleichzeitig wegen der mit beiden Aspekten verbundenen Reduktion an CO₂-Emissionen.

Kassel, 06.03.2020

V.-Prof. Dr.-Ing. J. Felmeden

Dr.-Ing. W. Schier

Literatur

- ATV-DVWK - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2003). Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198 „Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen, Hennef, April 2003
- de Kreuk, M.; van Loosdrecht, M. (2004). Selection of Slow Growing Organisms as a Means for Aerobic Granular Sludge Stability, *Water Science & Technology* 49(11-12), 9-17 (DOI: 10.2166/wst.2004.0792)
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2014). Merkblatt DWA-M 227 „Membran-Bioreaktor-Verfahren (MBR-Verfahren)“, Hennef, Oktober 2014
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2015). Arbeitsblatt DWA-A 216 „Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen“, Hennef, Dezember 2015
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2016). Arbeitsblatt DWA-A 131 „Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“, Hennef, Juni 2016
- DWA-Leistungsvergleich 2015 (2016). 28. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- FG SWW (2010). Untersuchungsvorhaben des MUNLV: GWK Nordkanal – Optimierung der mechanischen Vorreinigungsstufe kommunaler Abwasserbehandlungsanlagen (Abschlussbericht), Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kassel, Dezember 2010
- FG SWW (2013). Untersuchungsvorhaben: „GWK Nordkanal – Planung einer anaeroben Stabilisierung“ - 1. Testreihe zum Gasertragspotenzial (Abschlussbericht), Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kassel, 2013
- FG SWW (2014). Untersuchungsvorhaben: „GWK Nordkanal – Planung einer anaeroben Stabilisierung“ - 2. Testreihe zum Gasertragspotenzial (Primärschlamm, Siebgut/Überschussschlamm) (Abschlussbericht), Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kassel, 2014
- Gujer, W., Henze, M., Mino, T. and van Loosdrecht, M.C.M. (1999). Activated Sludge Model No. 3. *Water Sci. Technol.* 39 (1), 183–193.
- Langergraber, G., Rieger, L., Winkler, S., Alex, J., Wiese, J., Owerdieck, C., Ahnert, M., Simon, J., Maurer, M., (2004). A guideline for simulation studies of wastewater treatment plants. *Water Sci. Technol.* 50 (7), 131–138
- Manser R., Gujer W., Siegrist H. (2005): Consequences of mass transfer on the kinetics of nitrifiers. *Water Research* 39, 4633 - 4642.
- MUNLV NRW, (1999). Handbuch Energie in Kläranlagen, Hrsg. Ministerium für Umweltschutz, Raumordnung und Landwirtschaft NRW, Düsseldorf 1999

- Rosenwinkel, K.-H.; Zwafink, R. (2017): Die Bedeutung des neuen DWA-Arbeitsblattes A 131 für die zukünftige Bemessung von Kläranlagen; Band 245 der Schriftenreihe Gewässerschutz - Wasser - Abwasser, 50. Essener Tagung, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., ISBN 978-3-938996-51-5
- UBA - Umweltbundesamt (2018). Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Güterverkehr – Bezugsjahr 2017, publiziert am 13.03.2018, umweltbundesamt.de
- UBA - Umweltbundesamt (2019). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, Climate Change 10/2019, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, April 2019

Anhang

Anhang 1 Auswertungen zur Leistungsfähigkeit des pilottechnischen Siebes (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm) in Messphase 1

Längsprofile der stofflichen Leistungsfähigkeit

Im Folgenden werden die Ergebnisse unter Berücksichtigung des hinter der Vorklärung betriebenen Muldensiebes sowie getrennt für Trockenwetter- und Regenwetterverhältnisse dargestellt.

Trockenwetterverhältnisse:

In der Abbildung 100 und der Abbildung 101 sind für die Parameter AFS, oTS, mTS, CSB, TN_b und S_{NH4} die gemessenen 2-Std.-Frachten dargestellt. Es handelt sich dabei um den Mittelwert aller insgesamt 24 Messintervalle. In Abbildung 102 folgen die zugehörigen Eliminationsraten der einzelnen MAV-Stufen Vorklärung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

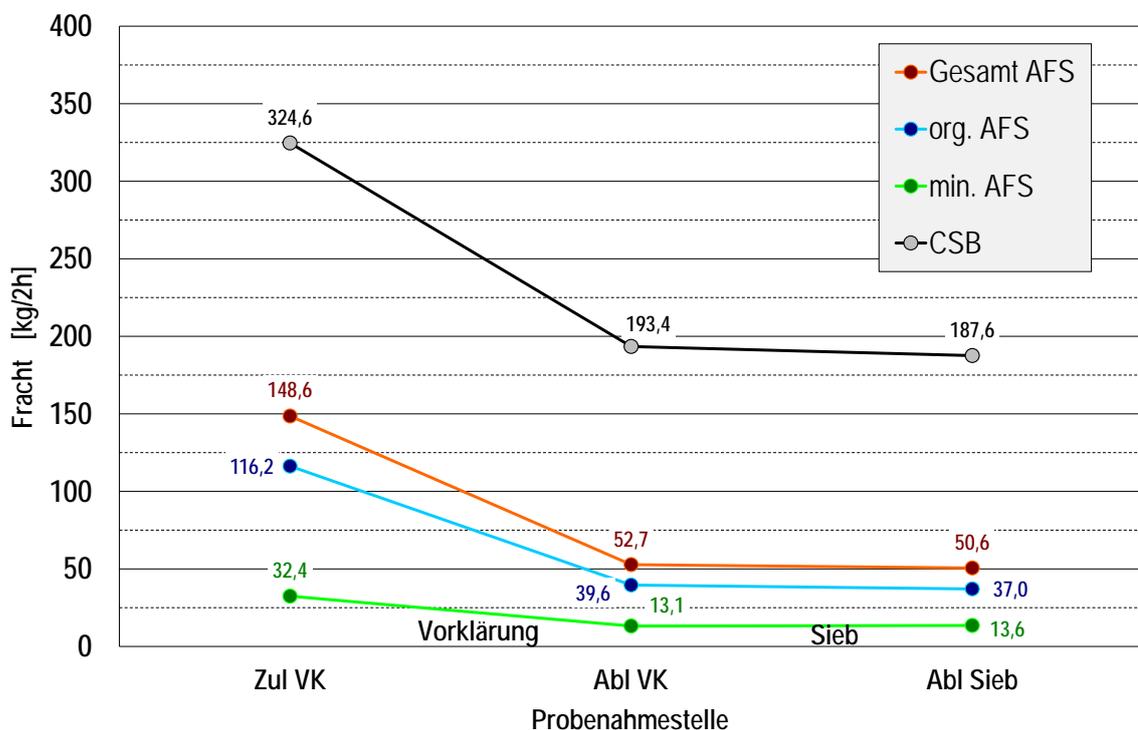


Abbildung 100: TW-Längsprofile AFS und CSB (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm)

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

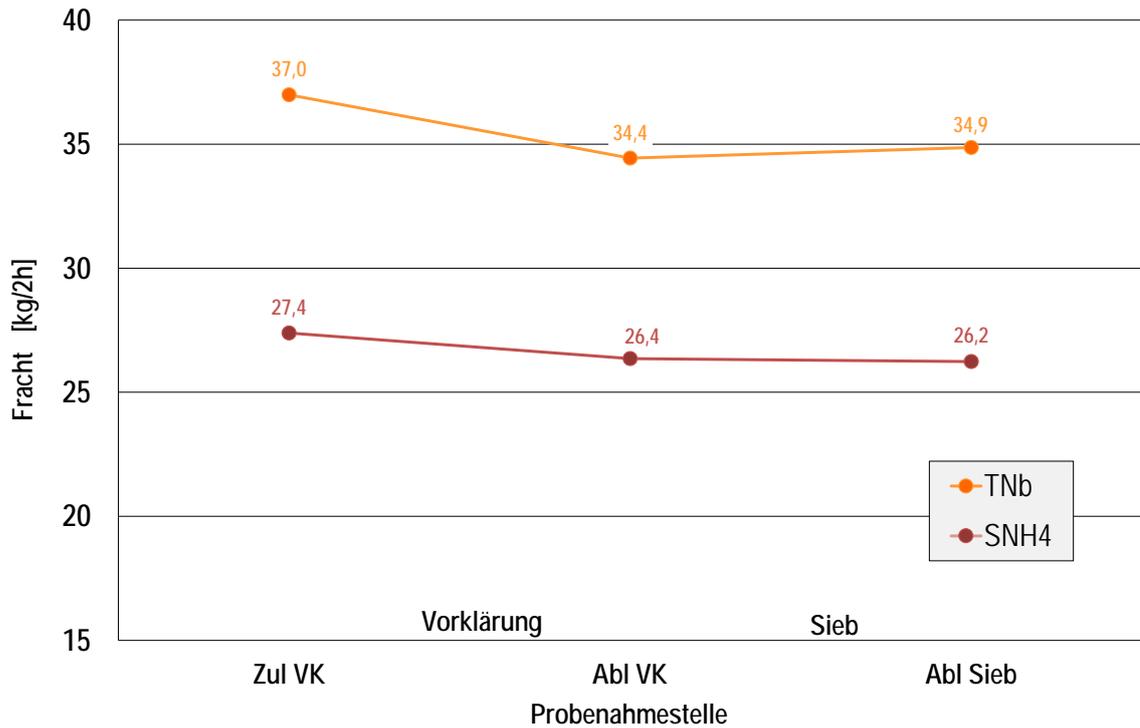


Abbildung 101: TW-Längsprofile Stickstoff (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm)

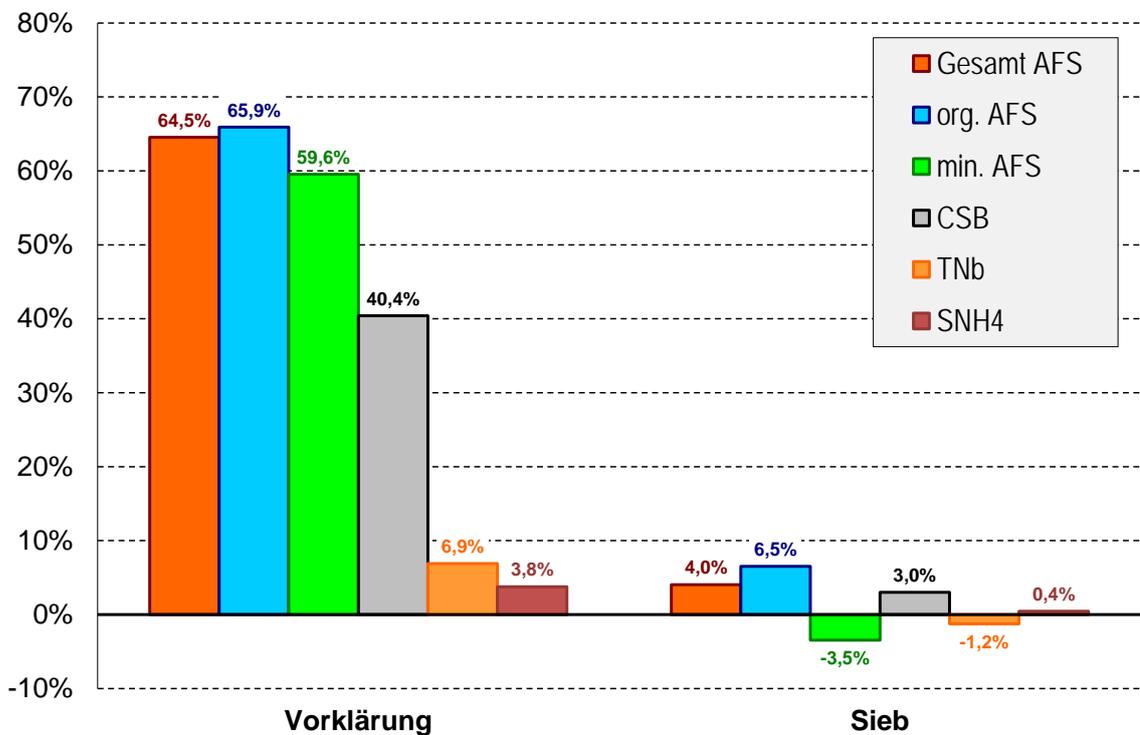


Abbildung 102: TW-Eliminationsraten (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm)

Regenwetterverhältnisse:

In der Abbildung 103 und der Abbildung 104 sind für die Parameter AFS, oTS, mTS, CSB, TN_b und S_{NH4} die gemessenen 2-Std.-Frachten dargestellt. Es handelt sich dabei um den Mittelwert aller insgesamt 8 Messintervalle. In Abbildung 105 folgen die zugehörigen Eliminationsraten der einzelnen MAV-Stufen Vorklärung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

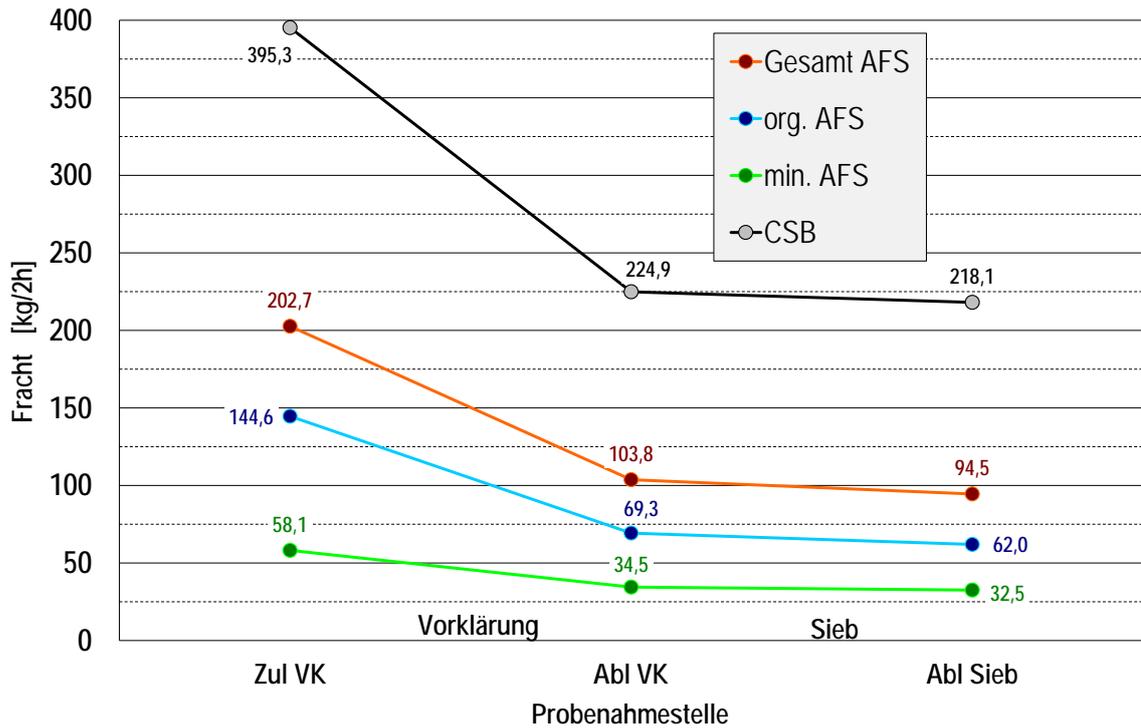


Abbildung 103: RW-Längsprofile AFS und CSB (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm)

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

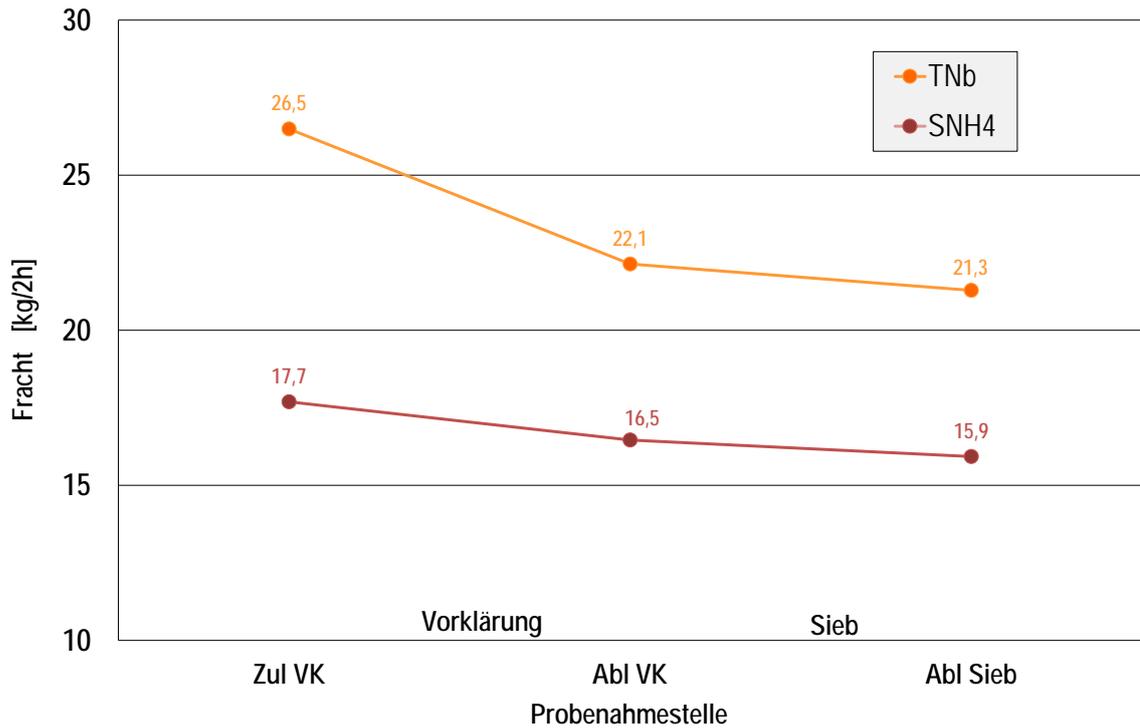


Abbildung 104: RW-Längsprofile Stickstoff (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm)

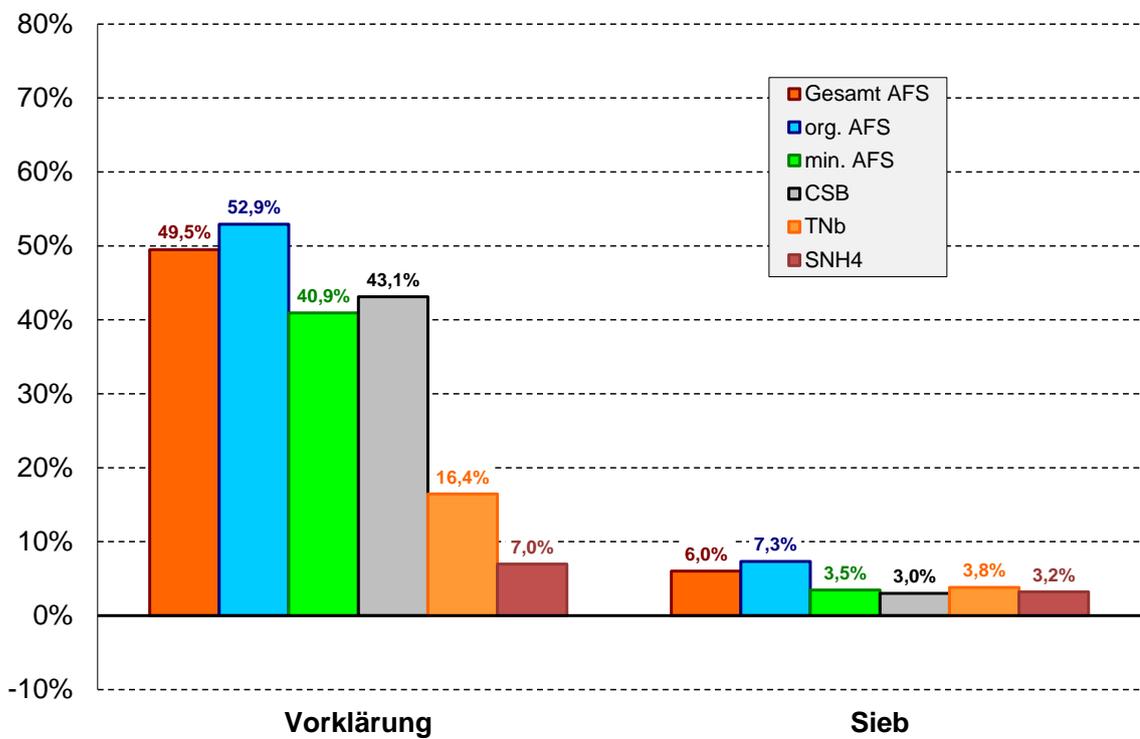


Abbildung 105: RW-Eliminationsraten (Sieb-Öffnungsweite 1,5 mm)

Anhang 2 Auswertungen zur Leistungsfähigkeit des pilottechnischen Siebes (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm) in Messphase 1

Längsprofile der stofflichen Leistungsfähigkeit

Im Folgenden werden die Ergebnisse getrennt für Trockenwetter- und Regenwetterverhältnisse dargestellt.

Trockenwetterverhältnisse:

In der Abbildung 106 und der Abbildung 107 sind für die Parameter AFS, oTS, mTS, CSB, TN_b und S_{NH4} die gemessenen 2-Std.-Frachten dargestellt. Es handelt sich dabei um den Mittelwert aller insgesamt 11 Messintervalle. In Abbildung 108 folgen die zugehörigen Eliminationsraten der einzelnen MAV-Stufen Vorklärung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

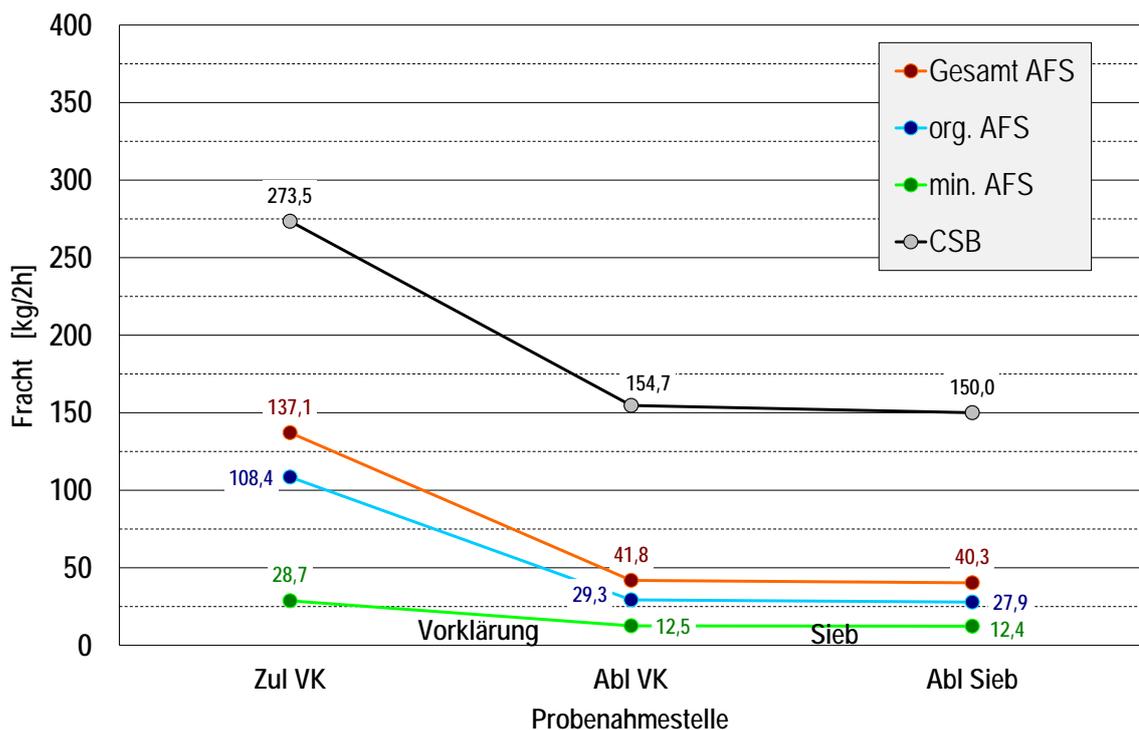


Abbildung 106: TW-Längsprofile AFS und CSB (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm)

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

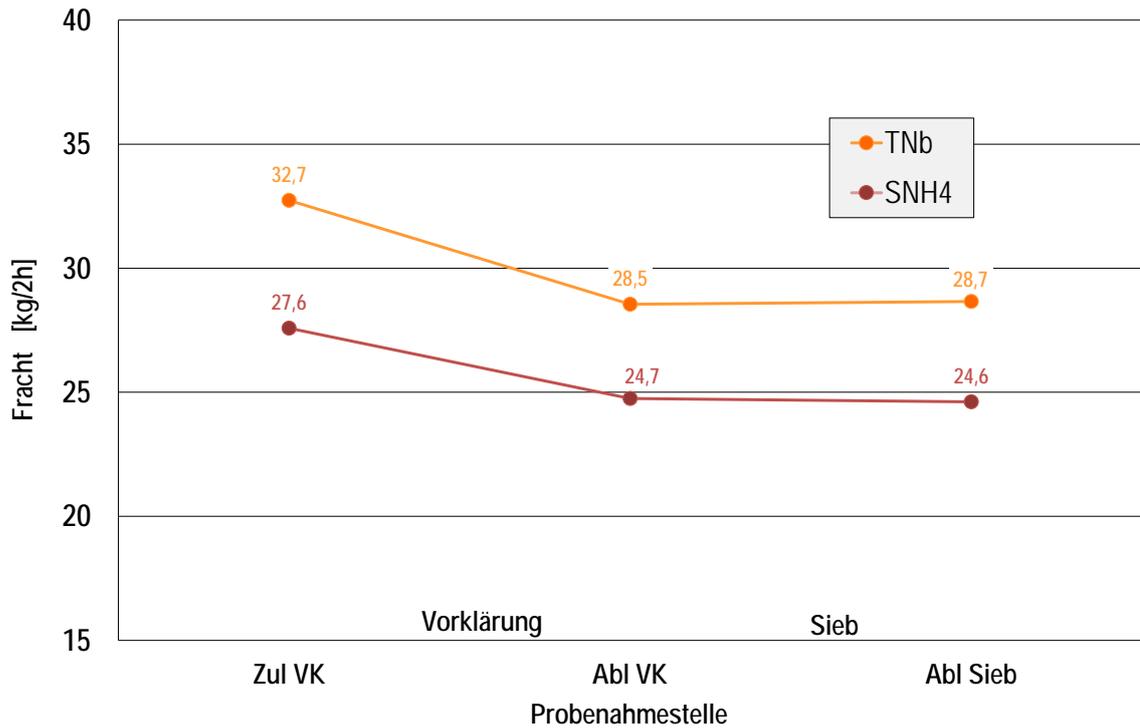


Abbildung 107: TW-Längsprofile Stickstoff (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm)

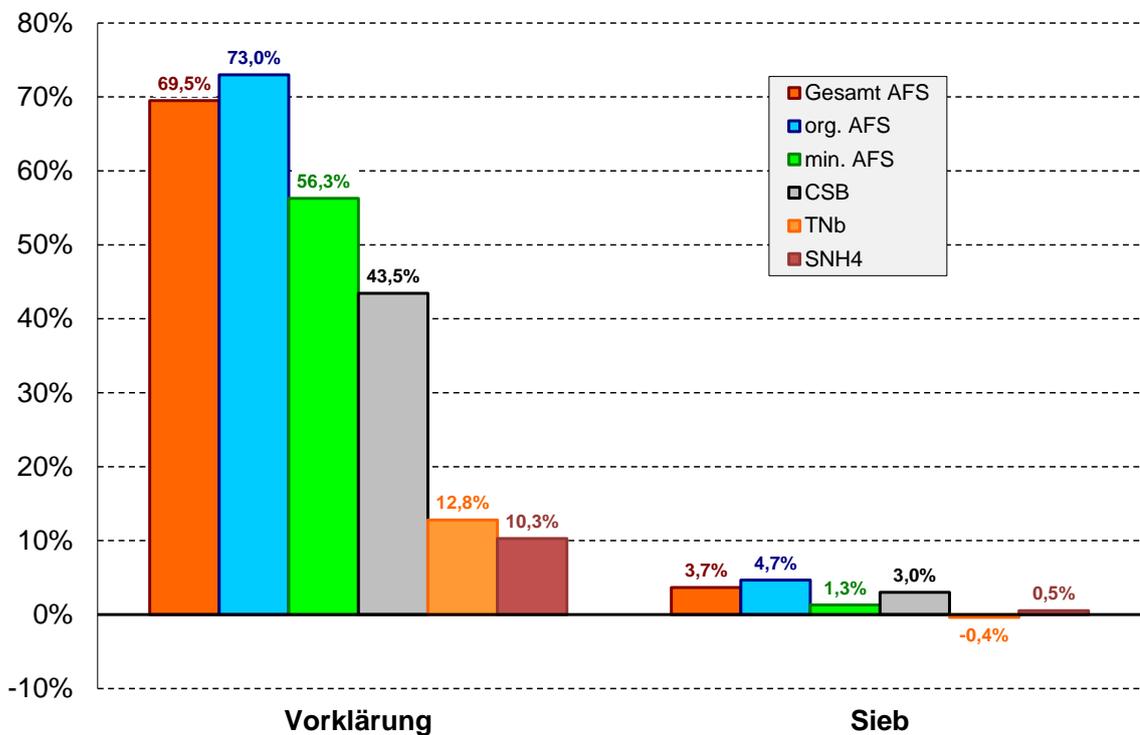


Abbildung 108: TW-Eliminationsraten (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm)

Regenwetterverhältnisse:

In der Abbildung 109 und der Abbildung 110 sind für die Parameter AFS, oTS, mTS, CSB, TN_b und S_{NH4} die gemessenen 2-Std.-Frachten dargestellt. Es handelt sich dabei um den Mittelwert aller insgesamt 9 Messintervalle. In Abbildung 111 folgen die zugehörigen Eliminationsraten der einzelnen MAV-Stufen Vorklärung und Sieb. Die Eliminationsraten basieren auf den Frachtmittelwerten der Messintervalle.

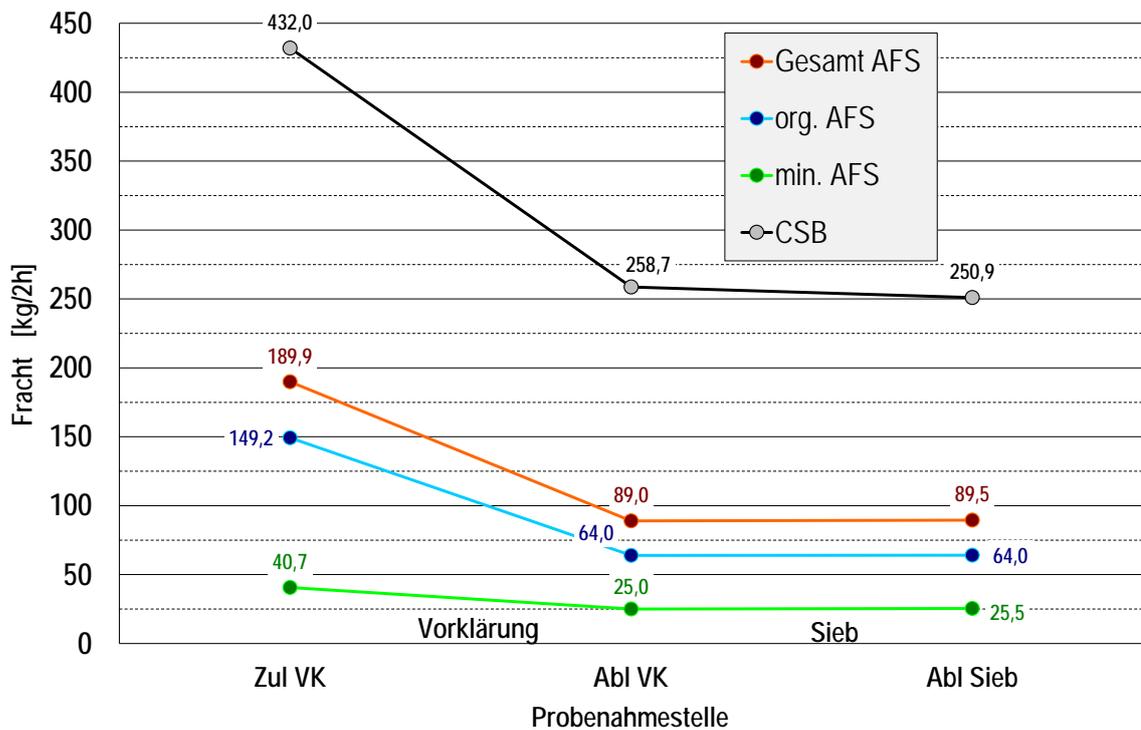


Abbildung 109: RW-Längsprofile AFS und CSB (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm)

Umrüstung GWK Nordkanal: Kombination MBR – anaerobe Schlammstabilisierung

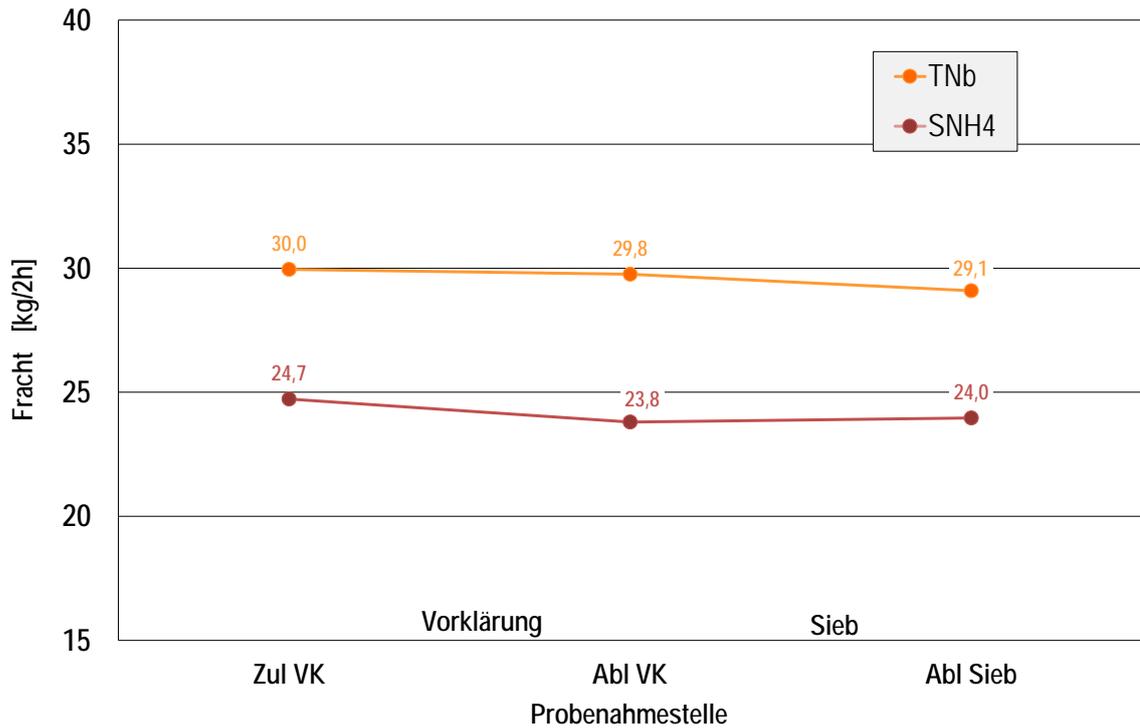


Abbildung 110: RW-Längsprofile Stickstoff (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm)

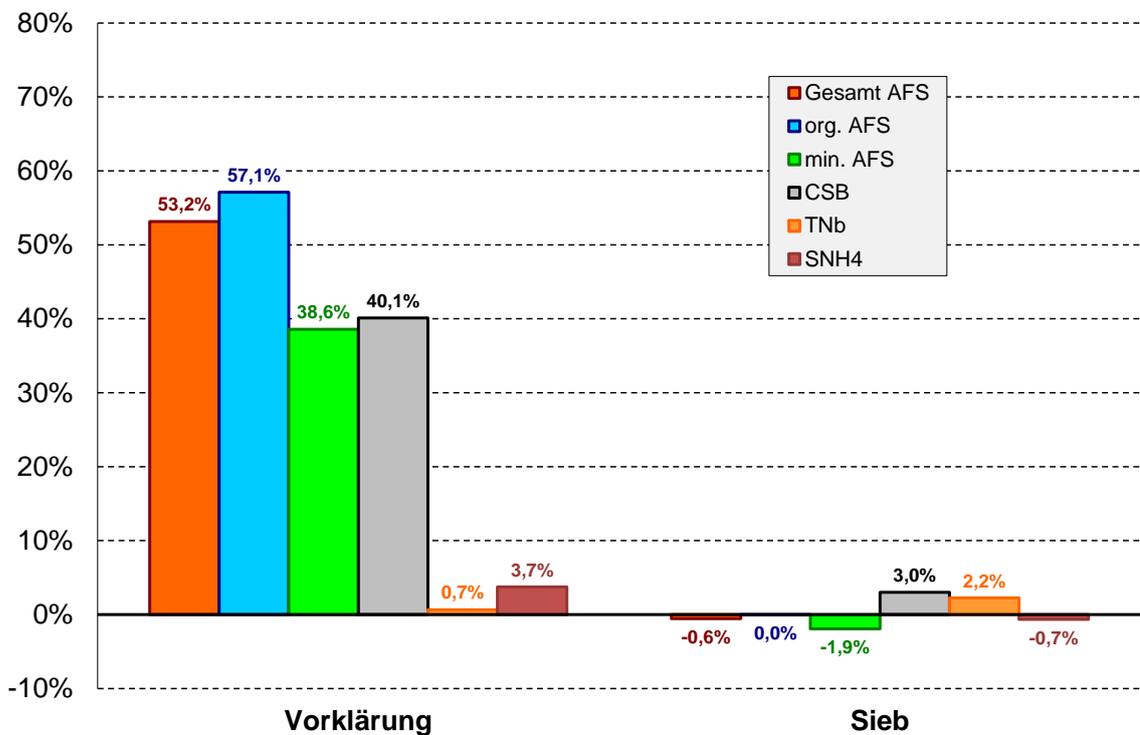


Abbildung 111: RW-Eliminationsraten (Sieb-Öffnungsweite 1,0 mm)