
**Abschlussbericht
zum F + E-Vorhaben**

**Analyse einer möglichst weitestgehenden Phosphorelimi-
nation bei kommunalen Kläranlagen**

**Auftraggeber:
Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)**

von

Prof. Dr. Brigitte Helmreich, Dr. Maximilian Huber und Meriam Muntau,
Technische Universität München

und

Dr. Konstantinos Athanasiadis und Dr. Eberhard Steinle,
Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH

30. Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung des Projektes	15
2	Zeitplan	17
3	Literaturstudie	18
3.1	Phosphorverbindungen im kommunalen Abwasser	18
3.2	Standardverfahren zur Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen	19
3.2.1	Chemisch-physikalische Phosphatfällung.....	19
3.2.2	Biologische Phosphorelimination.....	21
3.3	Herausforderung für eine weitestgehende Phosphorelimination	24
3.4	Verfahren und Maßnahmen für eine erhöhte Phosphorelimination.....	25
3.4.1	Chemisch-physikalische Verfahren	26
3.4.1.1	Zwei-Punkt-Fällung.....	26
3.4.1.2	Nachfällung.....	26
3.4.1.3	Flockungsfiltration.....	27
3.4.2	Physikalisches Verfahren: Membranbelebungsverfahren	30
3.4.3	Weitere chemisch-physikalische Verfahren	32
3.4.3.1	Elektrokoagulation und Elektroflotation	32
3.4.3.2	Elektrophosphatfällner-Verfahren	34
3.4.3.3	Adsorption	36
3.4.3.4	Ionenaustausch	38
3.4.3.5	Kristallisation	38
3.4.3.6	Fällungsverfahren zur Phosphorrückgewinnung (Präzipitation).....	40
4	Kenndaten und Bilanzierung der Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen.....	42
4.1	Betrachtung des Ist-Zustandes auf bayerischen Kläranlagen.....	42
4.1.1	Allgemeine Betrachtungen	42
4.1.2	Datenqualität	46

4.1.3	Phosphorzulauffrachten.....	47
4.1.4	Wirkungsgrade der Phosphorelimination	49
4.1.5	Ablaufkonzentrationen für Gesamtphosphor.....	51
4.1.6	Verfahrenstechniken zur Phosphorelimination.....	51
4.2	Bilanzierung der Phosphorelimination auf zehn Kläranlagen in Deutschland	63
4.2.1	Allgemeine Informationen.....	63
4.2.2	Musterdorf 1	66
4.2.3	Musterdorf 2.....	70
4.2.4	Musterdorf 3.....	76
4.2.5	Musterdorf 4.....	80
4.2.6	Musterdorf 5.....	82
4.2.7	Musterstadt 1	86
4.2.8	Musterstadt 2	90
4.2.9	Musterstadt 3	93
4.2.10	Musterstadt 4	99
4.2.11	Musterstadt 5	104
4.2.12	Zusammenfassung.....	111
4.3	Bestandsaufnahme von anderen Kläranlagen in der Schweiz und Deutschland	112
4.4	Besonderheiten bei verschiedenen Systemen	114
4.5	Probenahme und Datenauswertung.....	119
4.6	Schlussfolgerungen	120
5	Abschätzung der potenziellen Frachtreduktion durch erhöhte Anforderungen an den Gesamtphosphor im Kläranlagenablauf.....	121
5.1	Annahmen und Vorbemerkungen	121
5.2	Szenario 0: Keine Maßnahmen auf den kommunalen Kläranlagen.....	122
5.3	Szenario 1: Erhöhung der Anforderungen für Anlagen der GK 2-5 (Theoretisches Phosphorreduktionspotential von ca. 35 %).	122

5.4	Szenario 2: Starke Erhöhung der Anforderungen für Anlagen der GK 2-5 (Theoretisches Phosphorreduktionspotential von ca. 53 %)	124
5.5	Schlussfolgerungen	125
6	Spezifische Investitions- und Betriebskosten für die weitestgehende Phosphorelimination	126
6.1	Kosten der Simultanfällung bei kleinen und mittleren Anlagen	126
6.1.1	Grundsätzliche Überlegungen	126
6.1.2	Betriebskosten	127
6.1.3	Investitionskosten	128
6.1.4	Kostenabschätzung für Anlagen von 1.000 EW bis 25.000 EW	132
6.1.5	Auswirkungen im Hinblick auf die Abwasserabgabe	134
6.1.6	Schlussfolgerungen	136
6.2	Kosten weitergehender Maßnahmen (Flockungsfiltration)	137
6.2.1	Grundsätzliche Überlegungen	137
6.2.2	Investitionskosten	138
6.2.3	Betriebskosten	141
6.2.4	Kostenabschätzung für Anlagen von 10.000 EW bis 100.000 EW	143
6.2.5	Schlussfolgerung	144
7	Zusammenfassung	146
8	Fazit	154
	Danksagung	156
	Literaturverzeichnis	157
	Anhang	163
A.1	Hinweise zur statistischen Auswertung	163
A.2	Fragebogen	163
A.3	Annahmen zur Berechnung des Fällmittelbedarfs	171
A.4	Berechnungsgrundlagen Sandfiltration	183

A.5	Berechnungsgrundlagen für Abschätzung Einfluss AbwAG	186
A.6	Hinweise zu den ausgewählten Kläranlagen.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Verzeichnis der Bilder

Bild 1: Phosphorfraktionen im Abwasser vor und nach der biologischen Behandlung in kommunalen Kläranlagen (in Anlehnung an Voigt et al., 2013).....	18
Bild 2: Dosierstelle Fällmittel bei Vorfällung (in Anlehnung an DWA-A 202, 2011)	19
Bild 3: Dosierstelle Fällmittel bei Simultanfällung (in Anlehnung an DWA-A 202, 2011)	20
Bild 4: Biologische Phosphorelimination aus dem Abwasser (geändert nach eawag, 2008).....	22
Bild 5: Fließbilder von Verfahren zur erhöhten biologischen Phosphorelimination. A) Johannesburg (JHB)-Verfahren; B) UCT-Verfahren (University of Cape Town); C) AAO-Verfahren (<i>anaerobic anoxic oxic</i>) (geändert nach Pinnekamp, 2007)	23
Bild 6: Dosierstelle Fällmittel bei Nachfällung (in Anlehnung an DWA-A 202, 2011).....	26
Bild 7: Dosierstelle Fällmittel bei Flockungsfiltration (in Anlehnung an DWA-A 202, 2011).....	27
Bild 8: Anordnungsmöglichkeiten von Membranstufen bei kommunalen Kläranlagen. A) interne Anordnung (getauchtes System); B) externe Anordnung	31
Bild 9: Vergleich der Verfahrensstufen einer konventionellen chemischen Phosphorelimination (oben) zum Kristallisationsverfahren (unten) (in Anlehnung an Piekema & Giesen, 2001)	39
Bild 10: Anteile an den Phosphorfrachten im Ablauf bayerischer Kläranlagen (≥ 50 EW) für das Jahr 2015, aufgeschlüsselt nach Größenklassen (links) sowie nach Anlagensystemen (rechts)	46
Bild 11: Häufigkeitsverteilung der einwohnerspezifischen Phosphorfrachten im Zulauf der bayerischen kommunalen Kläranlagen für das Jahr 2015 ($n=1.592$), teilweise mit hohem Industrieinfluss; Datenquelle: LfU/DABay 2015.....	48
Bild 12: Wirkungsgrade in Bezug auf die Gesamtposphorelimination (Mittelwerte pro Kläranlage) aller bayerischen Kläranlagen (GK 1-5, $n=1.770$), kategorisiert nach Größenklassen ($n=560/648/209/317/36$); Datenquelle: LfU/DABay 2015 bzw. DWA (2016).....	50
Bild 13: Differenzen der Zulauf- und Ablaufkonzentrationen (ΔP) des Parameters P_{ges} (Mittelwerte pro Kläranlage) aller bayerischen Kläranlagen (GK 1-5, $n=1.626$), kategorisiert nach Größenklassen ($n=532/586/189/287/32$); Datenquelle: LfU/DABay 2015.....	52
Bild 14: Ablaufkonzentrationen des Parameters P_{ges} (Mittelwerte pro Kläranlage) aller bayerischen Kläranlagen (GK 1-5, $n=2.454$), kategorisiert nach Größenklassen ($n=1.135/741/220/322/36$); Datenquelle: LfU/DABay 2015	53
Bild 15: Gesamtposphorablaufkonzentrationen (P_{ges} , Mittelwerte pro Kläranlage) und dazugehörige Anforderungen bayerischer Kläranlagen, die im Jahr 2015 ein Bio-P-Becken und/oder chemische Phosphatfällung betrieben haben (alle Anlagensysteme, $n=737$), kategorisiert nach Größenklassen	

(n=41/183/155/322/36); Datenquelle: LfU/DABay 2015 bzw. DWA (2016) oder persönliche Auskünfte	55
Bild 16: Gesamtposphorablaufkonzentrationen (P_{ges} , Mittelwerte pro Kläranlage), dazugehörige Anforderungen und Wirkungsgrade bayerischer Kläranlagen, die eine chemische Phosphatfällung betrieben haben (GK 1-5, n=639), kategorisiert nach zusammengefassten Anlagensystemen (n=27/508/36/17/51); Datenquelle: LfU/DABay 2015 bzw. DWA (2016) oder persönliche Auskünfte	57
Bild 17: AFS-Ablaufkonzentrationen (Mittelwerte pro Kläranlage) und dazugehörige Anforderungen bayerischer Kläranlagen (GK 4-5, n=143), kategorisiert nach Anlagensystemen (n=14/119/20/4); Anlagen der Kategorie „Anlage mit Abwasserfilter“ sind doppelt berücksichtigt; Datenquelle: LfU/DABay 2015	58
Bild 18: Berechnete partikuläre Phosphorablaufkonzentrationen (AFS-Messwerte multipliziert mit 0,03 für den Phosphoranteil für Anlagen mit reiner chemischer Fällung bzw. 0,06 für Anlagen mit zusätzlichem Bio-P-Becken) sowie die daraus berechneten partikulären Anteile am Gesamtposphor im Ablauf für bayerische Kläranlagen der GK 4 (n=122) und GK 5 (n=17) für das Jahr 2015; Datenquelle: LfU/DABay 2015	60
Bild 19: Fließschema Musterdorf 1 (5.000 EW); FM* wird nur bei Regenwetter (ab 25 L/s) zudosiert.....	67
Bild 20: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Musterdorf 1 für den Zeitraum 2013-2016; Überwachungswert 2,0 mg P_{ges} /L.....	68
Bild 21: Fließschema Musterdorf 2 (12.000 EW).....	71
Bild 22: Fällmitteldosierstelle der Kläranlage Musterdorf 2 mit zwei Pumpen (regelbar in Bezug auf die ortho-Phosphatkonzentrationen im Ablauf der Biologie) und einem MID zur Durchflussmessung.....	71
Bild 23: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf (Linien) sowie die pro Monat im Mittel berechneten Frachten (Balken; Q1, Q3) der Kläranlage Musterdorf 2 für das Jahr 2016; Überwachungswert 1,6 mg P_{ges} /L.....	72
Bild 24: Phosphorkonzentrationen (P_{ges} und ortho-Phosphat) im Ablauf der Kläranlage Musterdorf 2 für das Jahr 2016; Überwachungswert 1,6 mg P_{ges} /L.....	73
Bild 25: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf der Kläranlage Musterdorf 2 für den Zeitraum 2014-2016, getrennt nach Dauer der Probenahme.....	75
Bild 26: Fließschema Musterdorf 3 (9.700 EW).....	76
Bild 27: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf (Linien) sowie die pro Monat im Mittel berechneten Frachten (Balken) der Kläranlage Musterdorf 3 für das Jahr 2016; erklärter Überwachungswert 0,5 mg P_{ges} /L	77
Bild 28: Bilanzierung der Kläranlage Musterdorf 3 für den Zeitraum 2014-2016; schwarze Zahlen stammen aus den Betriebstagebüchern und rote Zahlen wurden berechnet.....	78

Bild 29: Detaillierte Zusammensetzung der pro Monat im Mittel berechneten Phosphoranteile der Zulaufkonzentrationen der Kläranlage Musterdorf 3 für das Jahr 2016	79
Bild 30: Fließschema Musterdorf 4 (3.100 EW)	81
Bild 31: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Musterdorf 4 für das Jahr 2016; Überwachungswert 1,0 mg P _{ges} /L	82
Bild 32: Fließschema Musterdorf 5 (3.000 EW)	83
Bild 33: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Musterdorf 5 für das Jahr 2016; Überwachungswert 1,0 mg P _{ges} /L	85
Bild 34: Fließschema Musterstadt 1 (35.000 EW)	87
Bild 35: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Musterstadt 1 für den Zeitraum 2014-2016; erklärter Überwachungswert 1,4 mg P _{ges} /L	89
Bild 36: Fließschema Musterstadt 2 (87.500 EW)	90
Bild 37: Fällmittelmengen getrennt nach Dosierstellen und Tagesdurchflüsse der Kläranlage Musterstadt 2 als Monatsmittelwerte für den Zeitraum 2014-2016	92
Bild 38: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf der Kläranlage, im Zulauf zum Filter (gleich Ablauf Nachklärbecken) und im Ablauf der Kläranlage Musterstadt 2 als Monatsmittelwerte für den Zeitraum 2014-2016; Überwachungswert 0,3 mg P _{ges} /L	93
Bild 39: Fließschema Musterstadt 3 (290.000 EW)	94
Bild 40: An vier Messstationen (Q1-Q4) berechnete Phosphorfrachten (Balken) und Fällmittelmengen (FM, Linien) getrennt nach den beiden Dosierstellen der Kläranlage Musterstadt 3 für 2016	96
Bild 41: CSB-Konzentrationen (Linien) im Zulauf und Ablauf sowie die berechneten CSB-Frachten (Balken) an vier Messstationen (Q1-Q4) der Kläranlage Musterstadt 3 für 2016	97
Bild 42: Summenkurven der Frachten im Zulauf zur Kläranlage im Jahr 2016 (n=357)	98
Bild 43: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf der Kläranlage, im Zulauf zum Filter (gleich Ablauf Nachklärbecken) und im Ablauf der Kläranlage Musterstadt 3 als Monatsmittelwerte für den Zeitraum 2014-2016; erklärter Überwachungswert 0,4 mg P _{ges} /L	99
Bild 44: Fließschema Musterstadt 4 (210.000 EW); FM* erst seit Ende 2015 in Betrieb (nur eine Straße für die Belegung dargestellt)	100
Bild 45: Detaillierte Zusammensetzung der pro Monat im Mittel berechneten Phosphoranteile der Zulauffrachten der Kläranlage Musterstadt 4 für die Jahre 2014 und 2016	103
Bild 46: Fließschema Musterstadt 5 (100.000 EW)	105

Bild 47: Regelung der Dosiermengen der Vorfällung in Abhängigkeit der Online-Messwerte (Phosphatkonzentrationen) im Belebungsbecken im Zeitraum 2014-2016; jeder Punkt gibt ein aufgezeichnetes 1 Min-Wertepaar wieder	106
Bild 48: Regelung der Dosiermengen der Simultanfällung in Abhängigkeit der Online-Messwerte (Phosphatkonzentrationen) im Ablauf der Nachklärung im Zeitraum 2014-2016; jeder Punkt gibt ein aufgezeichnetes 1 Min-Wertepaar wieder.....	107
Bild 49: Gesamtposphorkonzentrationen im Ablauf der Vorklärung und Ablauf der Kläranlage Musterstadt 5 für den Zeitraum 2014-2016; Überwachungswert 0,5 mg P_{ges}/L	109
Bild 50: Gesamtposphorkonzentrationen (Linien) im Ablauf der Vorklärung und im Ablauf der Kläranlage sowie die pro Monat im Mittel berechneten Frachten (Balken) der Kläranlage Musterstadt 5 für das Jahr 2016; Ablauffrachten Vorklärung (VK) berechnet aus Mittelwerten der pro Tag berechneten Frachten aus gemessenen Konzentrationen (sofern verfügbar) und den dazugehörigen Tagesdurchflüssen (gleiche Anzahl an Messwerten pro Monat); Überwachungswert 0,5 mg P_{ges}/L	110
Bild 51: Gesamtposphorkonzentrationen (Linien) im Ablauf der Vorklärung und im Ablauf der Kläranlage sowie die pro Monat im Mittel berechneten Frachten (Balken) der Kläranlage Musterstadt 5 für das Jahr 2016; Ablauffrachten Vorklärung (VK) berechnet aus Monatsmittelwerten der gemessenen Konzentrationen und dem mittleren Tagesdurchfluss pro Monat (unterschiedliche Anzahl an Messwerten pro Monat); Überwachungswert 0,5 mg P_{ges}/L	111
Bild 52: Bilanzbeispiel für einen belüfteten Abwasserteich	118
Bild 53: Fällmittelkosten (Basis Fe^{3+}) in Abhängigkeit der Liefermenge (Theilen (2015) und eigene Erfahrungswerte)	127
Bild 54: Fällmitteltankkosten (mit Dosierschrank) in Abhängigkeit des Tankvolumens (Richtpreisangebote, Erfahrungswerte, brutto mit Baunebenkosten)	129
Bild 55: Wahl des optimalen Fällmitteltankvolumens (Fällmittel- und Tankkosten)	130
Bild 56: Spezifische Kosten einer Online-ortho-Phosphatmessung in Abhängigkeit von der Anlagengröße (ohne Personalkosten)	132
Bild 57: Abgeschätzte Gesamtkosten für Phosphatfällung in Abhängigkeit der angeschlossenen Einwohnerwerte	133
Bild 58: Einfluss des Gesamtposphorablaufwertes auf die Kosten der Phosphatfällung.....	134
Bild 59: Bautechnikkosten in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage (Richtpreisangebote, Erfahrungswerte, netto mit Baunebenkosten) am Beispiel des DynaSand-Filters	139
Bild 60: Maschinen- und EMSR-Technikkosten in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage (Richtpreisangebote, Erfahrungswerte, netto mit Baunebenkosten).....	141
Bild 61: Spezifische Wartungskosten in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage am Beispiel des DynaSand-Filters	142

Bild 62: Spezifische Personalkosten in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage	142
Bild 63: Spezifische Energiekosten in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage	143
Bild 64: Abgeschätzte Gesamtkosten einer Flockungsfiltrationsanlage zur Phosphatfällung in Abhängigkeit der angeschlossenen Einwohnerwerte	144
Bild 65: Investitionsanforderungen einer Flockungsfiltrationsanlage zur Phosphatfällung in Abhängigkeit des eliminierten Phosphors	144

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Zeitplan des Forschungsvorhabens.....	17
Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Vorfällung (eawag, 2008; DWA-A 202, 2011).....	20
Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Simultanfällung (eawag, 2008; DWA-A 202, 2011).....	21
Tabelle 4: Vor- und Nachteile des Bio-P-Verfahrens gegenüber der Phosphatfällung (eawag, 2008).....	24
Tabelle 5: Vor- und Nachteile der Nachfällung (eawag, 2008, Barjenbruch & Geyer, 2016).....	27
Tabelle 6: Vor- und Nachteile der Flockungsfiltration (eawag, 2008, Barjenbruch & Geyer, 2016).....	30
Tabelle 7: Vor- und Nachteile des Membranbelebungsverfahrens (Pinnekamp & Friedrich, 2003).....	32
Tabelle 8: Phosphorelimination mittels Elektrokoagulation und -flotation	34
Tabelle 9: Vor- und Nachteile des EPH-Verfahrens	36
Tabelle 10: Phosphorelimination mittels Adsorption	37
Tabelle 11: Vor- und Nachteile des Phosclean Verfahrens	37
Tabelle 12: Vor- und Nachteile der Phosphorelimination mittels Kristallisation.....	39
Tabelle 13: Kristallisation zur Phosphorelimination	40
Tabelle 14: Zusammenfassung der in DABay erfassten Daten zu der Anzahl der kommunalen Kläranlagen in Bayern (≥ 50 EW) mit Angaben zum Phosphoraufkommen für die Jahre 2010-2015.....	43
Tabelle 15: Zusammenfassung der in DABay erfassten Daten zu der Anzahl der kommunalen Kläranlagen in Bayern (≥ 50 EW) mit Angaben zum Anlagensystem für die Jahre 2011, 2013 und 2015.....	45
Tabelle 16: In DABay erfasste Daten kommunaler Kläranlagen in Bayern (≥ 50 EW) bezüglich der Anzahl an Gesamtposphormesswerten (Flüssigproben) pro Kläranlage für das Jahr 2015.....	47
Tabelle 17: Zusammenfassung der in DABay, DWA (2016) und eigenen Recherchen erfassten Daten kommunaler Kläranlagen (≥ 50 EW) mit Angaben zum Anlagensystem für das Jahr 2015	54
Tabelle 18: Charakteristika von 29 derzeit in Bayern betriebenen Abwasserfiltern.....	62
Tabelle 19: Abkürzungen, die in Kapitel 4.2 v. a. bei den Fließschemata verwendet werden	64
Tabelle 20: Mittelwerte des K_P -Wertes in Abhängigkeit vom Anlagentyp und von vier verschiedenen Einflussfaktoren (ATV-DVWK-Arbeitsbericht, 2003).....	65
Tabelle 21: Zusammenfassung der für die Phosphorbilanzierung vorliegenden Daten (Jahr 2016).....	69

Tabelle 22: Mittlere Ablaufkonzentrationen der Kläranlage Musterdorf 2 während des erweiterten Monitorings zur weitestgehenden Phosphorelimination	74
Tabelle 23: Gesamtphosphorkonzentrationen (mg P_{ges} /L) im Filtrat der Schneckenpresse	89
Tabelle 24: Zusammenfassung der im Zuge des Projektes erhobenen Daten von zehn kommunalen Kläranlagen mit weitestgehender Phosphorelimination.....	112
Tabelle 25: Ergebnisse der Bestandsaufnahme für schweizerische (CH) und deutsche (D) Kläranlagen	113
Tabelle 26: Betrachtung der Überschussschlammproduktion (ÜS) für Abwasserteiche bei Verwendung eines Al^{3+} -Salzes	117
Tabelle 27: Betrachtung der Überschussschlammproduktion (ÜS) für Abwasserteiche bei Verwendung eines Fe^{3+} -Salzes	117
Tabelle 28: Reduzierung der Frachten bei erhöhten Anforderungen für Kläranlagen der GK 2-5 (Szenario 1 A, n=1.325), die prozentuale Reduktion bezieht sich auf die Gesamtjahresfracht von 1.378 t; Datenquelle: LfU/DABay 2015.....	123
Tabelle 29: Reduzierung der Frachten bei erhöhten Anforderungen für Kläranlagen der GK 2-5 (Szenario 1 B, n=1.325), die prozentuale Reduktion bezieht sich auf die Gesamtjahresfracht von 1.378 t; Datenquelle: LfU/DABay 2015.....	123
Tabelle 30: Reduzierung der Frachten bei stark erhöhten Anforderungen für Kläranlagen der GK 2-5 (Szenario 2, n=1.325), die prozentuale Reduktion bezieht sich auf die Gesamtjahresfracht von 1.378 t; Datenquelle: LfU/DABay 2015.....	124
Tabelle 31: Ansatz für Personalkosten zur Betreuung der Phosphatfällung	127
Tabelle 32: Ermittlung von Investitionen in laufende jährliche Kosten	129
Tabelle 33: Auswirkung der Abwasserabgabe auf die Kosten der Phosphatfällung am Beispiel der GK 2.....	136

1 Zielsetzung des Projektes

Als essentieller Nährstoff bestimmt Phosphor das Pflanzenwachstum in den meisten aquatischen Ökosystemen und kann schon in niedrigen Konzentrationen im Mikrogrammbereich eutrophierend wirken. Das Eutrophierungspotential von stehenden Gewässern beginnt bereits bei einer Gesamtposphorkonzentration (P_{ges}) von $5 \mu\text{g } P_{\text{ges}}/\text{L}$ bis $10 \mu\text{g } P_{\text{ges}}/\text{L}$ (Barjenbruch & Exner, 2016). Daher ist die zulässige Phosphorkonzentration im kommunalen Kläranlagenablauf, abhängig von der Größenklasse, in der Abwasserverordnung begrenzt (AbwV, 2004). Die AbwV definiert den gesetzlich geforderten Stand der Technik und gibt für die Größenklasse (GK) 4 eine Mindestanforderung von $2 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ und für die GK 5 eine Mindestanforderung von $1 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ vor. Für die GK 1-3 sind keine Anforderungen gestellt. Das in § 27 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG, 2009) auf Grundlage der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000) geforderte Umweltziel eines guten ökologischen und chemischen Zustandes der Gewässer erfordert vermehrt eine immissionsorientierte Betrachtung. Gemäß der neuen Oberflächengewässerverordnung (OGewV, 2016) liegen die Orientierungswerte für den „guten ökologischen Zustand“ für Fließgewässer bei $0,1 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$, für (sehr) oligotrophe Seen sogar im Bereich von $0,009\text{-}0,012 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$. Dies ist nur durch eine weitere Reduktion der Phosphoremissionen zu realisieren. Eine Bilanzierung der Belastung deutscher Gewässer für die Jahre 2005 bis 2011 ergab einen mittleren Phosphoreintrag von 25.000 t/a (Barjenbruch und Exner, 2016). Der Anteil der Kläranlagen betrug dabei im Bundesdurchschnitt 28 %. Zum Vergleich wurden von bayerischen Kläranlagen im Jahre 2013 rund 1.789 t Phosphor in die Gewässer eingeleitet (Statistisches Bundesamt Wiesbaden, 2015). Ein Großteil des Phosphors stammt aus diffusen Eintragsquellen, beispielsweise aus der Landwirtschaft. Um einen guten ökologischen Zustand der Gewässer sicherzustellen, ist aber auch eine Reduktion der punktuellen Phosphoremissionen aus Kläranlagen sinnvoll. Daher ist in landesweiten Maßnahmenprogrammen und Bewirtschaftungsplänen eine Verminderung der Phosphoremissionen in Oberflächengewässer durch kommunale Kläranlagen vorgesehen. Für Kläranlagen der GK 5 werden deutschlandweit zunehmend Überwachungswerte von $0,5 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ gefordert. Zusätzlich sind häufig schärfere Zielwerte, insbesondere in Seeneinzugsgebieten, von $0,2\text{-}0,3 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ definiert (Voigt et al., 2013). Dies stellt die derzeit eingesetzten Eliminationsverfahren vor eine Herausforderung. Derart niedrige Phosphorablaufkonzentrationen können grundsätzlich nur durch die Optimierung bereits bestehender Verfahren sowie durch die Entwicklung und Implementierung neuer und effektiverer Maßnahmen und Technologien zur weitestgehenden Phosphorelimination erreicht werden.

Gegenstand des vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) in Auftrag gegebenen Forschungsvorhabens ist eine Bestandsaufnahme bereits bestehender Maßnahmen und Umsetzungen zur weitestgehenden Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen und eine Zusammenstellung und

Analyse der Handlungsmöglichkeiten. Als weitestgehende Phosphorelimination wird hierbei die Anwendung von Verfahren verstanden, die über die bisherigen Ansätze der technischen Regeln und des Stands der Technik hinausgehen und mit denen Phosphorverbindungen mit vertretbarem technischen und wirtschaftlichen Aufwand so effektiv wie möglich entfernt werden können.

2 Zeitplan

Das auf elfeinhalb Monate ausgelegte Forschungsvorhaben war entsprechend des Angebots vom 12. Mai 2016 in acht Arbeitspakete (AP 1-8) gegliedert (Tabelle 1). Ein Zwischenbericht (AP 3) erfolgte nach vier Monaten am 15. Oktober 2016 und umfasste erste Ergebnisse der AP 1 und AP 2.

Das AP 1 beinhaltet die Zusammenstellung von Verfahren und technischen Möglichkeiten zur weitestgehenden Phosphorelimination sowie die Auswertung der entsprechenden Zulaufkonzentrationen und erreichten Ablaufkonzentrationen auf Grundlage einer Literaturrecherche.

In AP 2 erfolgte eine Bestandsaufnahme bereits bestehender Umsetzungen zur weitestgehenden Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen im deutschsprachigen Raum hinsichtlich Verfahrenstechnik, erfolgter Bemessung, behördlicher Überwachung, wasserwirtschaftlicher Rahmenbedingungen und Betriebsparameter.

Aufbauend auf den Zwischenbericht wurde der vorliegende Abschlussbericht (AP 7) erstellt. Dieser beinhaltet zusätzlich die Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen AP 4 (Bilanzierung von zehn ausgewählten Kläranlagen), AP 5 (Überprüfung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere kommunale Kläranlagen) und AP 6 (Abschätzung der spezifischen Investitions- und Betriebskosten).

Im Projektzeitraum fanden drei Besprechungen mit dem LfU statt (AP 8), an denen der Auftragnehmer und der Kooperationspartner teilnahmen.

Tabelle 1: Zeitplan des Forschungsvorhabens

Jahr	2016						2017					
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
AP 1	■	■	■									
AP 2		■	■	■								
AP 3			■	■								
AP 4				■	■	■	■	■	■	■		
AP 5						■	■	■	■	■		
AP 6									■	■		
AP 7									■	■	■	
AP 8	■				■							■

3 Literaturstudie

3.1 Phosphorverbindungen im kommunalen Abwasser

Der einwohnerspezifische Phosphoranfall in Deutschland liegt derzeit bei rund 1,8 g/(E·d) (DWA-A 202, 2011). Je nach Abwasseranfall und Fremdwasseranteil ergeben sich Phosphorkonzentrationen im Kläranlagenzulauf gemessen als P_{ges} von 5 mg P_{ges}/L bis 20 mg P_{ges}/L . Der größere Teil des Phosphors liegt dabei in anorganischer, gelöster Form vor und besteht im Wesentlichen aus ortho-Phosphat ($o-PO_4$) und kondensierten Phosphaten. Diese werden bereits im Kanalnetz und während der Abwasserreinigungsprozesse weitgehend in ortho-Phosphat umgewandelt (DWA-A 202, 2011). Dabei wird einzig die ortho-Phosphatfraktion als reaktiver Phosphor bezeichnet (Barjenbruch & Geyer 2016).). Daneben liegt ein geringer Teil des Phosphors organisch gelöst vor. Dazu gehören Phosphonate, Phosphite sowie andere, schwer abbaubare organische Phosphorverbindungen. Zusätzlich gibt es nicht gelöste, partikuläre Phosphorverbindungen. In Bild 1 ist die charakteristische Zusammensetzung der Phosphorfraktionen im Abwasser vor und nach der biologischen Behandlungsstufe dargestellt.

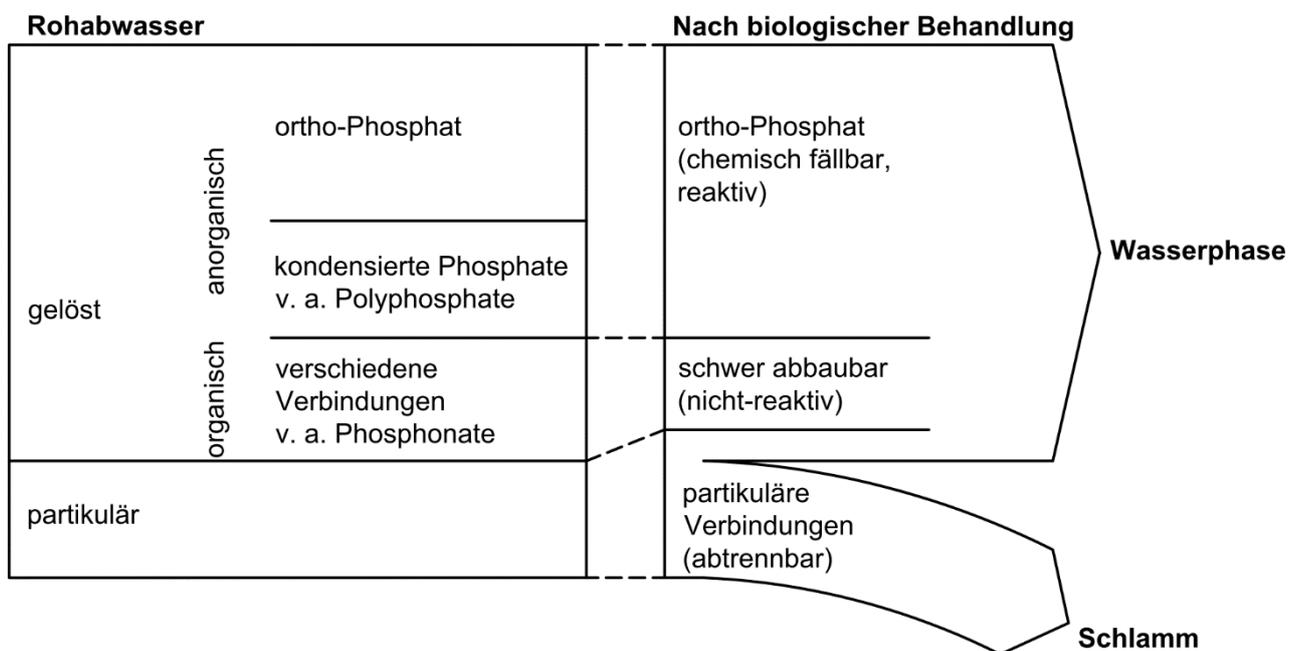


Bild 1: Phosphorfraktionen im Abwasser vor und nach der biologischen Behandlung in kommunalen Kläranlagen (in Anlehnung an Voigt et al., 2013)

3.2 Standardverfahren zur Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen

3.2.1 Chemisch-physikalische Phosphatfällung

Für die chemische Phosphorelimination sind die allgemein anerkannten Regeln der Technik im Arbeitsblatt DWA-A 202 (2011) dargelegt. Es wird ortho-Phosphat mit Hilfe eines Fällmittels in eine unlösliche Form überführt, ausgefällt und abgetrennt. Als Fällmittel werden Fe^{3+} -, Al^{3+} -, Fe^{2+} - und Ca^{2+} -Metallsalze eingesetzt (DWA-A 202, 2011). Fe^{2+} muss hierfür mit sauerstoffhaltigem Wasser zunächst zu Fe^{3+} oxidiert werden. Die Phosphatentfernung selbst besteht aus hintereinander ablaufenden Vorgängen, wobei chemische und physikalische Mechanismen von großer Bedeutung sind:

- Dosierung und vollständiges Einmischen eines Fällmittels in den Abwasserstrom,
- Entstabilisierung, meist gleichzeitig mit der Einmischung und im gleichen Anlagenteil ablaufend,
- Bildung partikulärer Verbindungen von Fällmittelkationen (Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+}) und Phosphatanionen (PO_4^{3-}) sowie anderen Anionen (Fällungsreaktion),
- Aggregationen zu Mikroflocken und Makroflocken (Schwebstoffe und Kolloide, einschließlich des organisch gebundenen Phosphors können in die Flocken mit eingeschlossen werden) (Mitfällung und -flockung) und
- Abscheidung der Makroflocken aus dem Abwasser (durch Sedimentation, Flotation, Filtration oder Kombination dieser Verfahren).

Die erforderliche zu dosierende Fällmittelmenge wird dabei über den sogenannten β -Wert abgeschätzt (DWA-A 202, 2011). Üblicherweise wird bei der chemisch-physikalischen Phosphatelimination die Vorfällung (Bild 2) oder die Simultanfällung (Bild 3) eingesetzt.

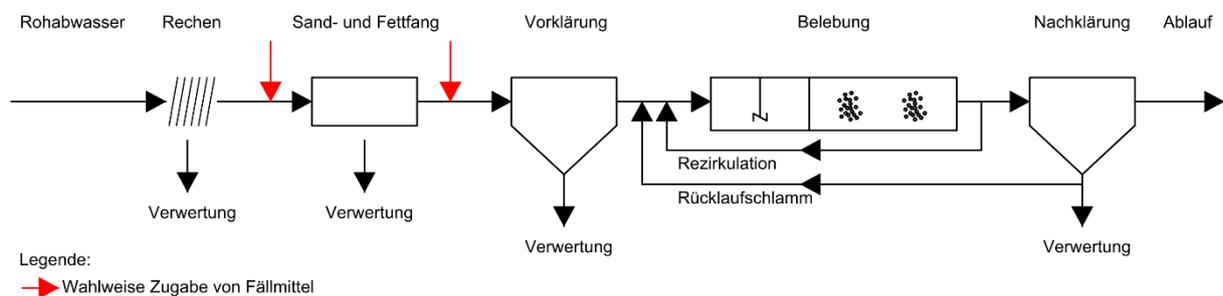


Bild 2: Dosierstelle Fällmittel bei Vorfällung (in Anlehnung an DWA-A 202, 2011)

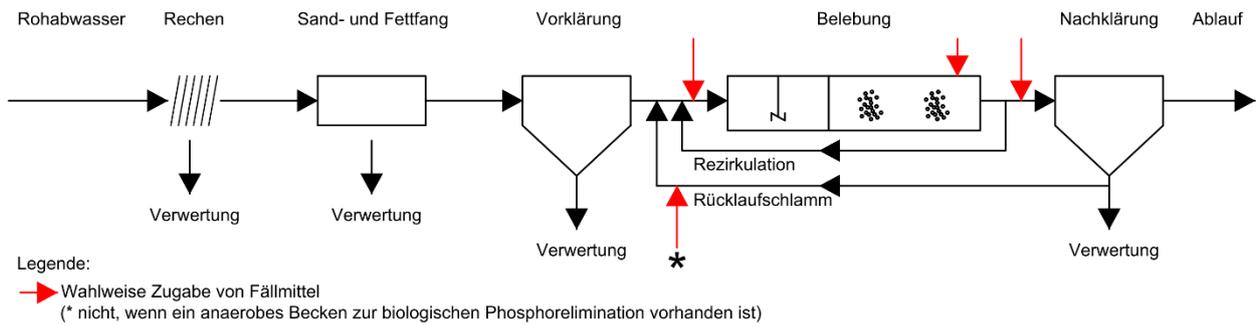


Bild 3: Dosierstelle Fällmittel bei Simultanfällung (in Anlehnung an DWA-A 202, 2011)

Die chemische Phosphatfällung ist stets mit negativen Auswirkungen wie beispielsweise einem vermehrten Schlammanfall sowie einer erhöhten Metallfracht im Klärschlamm verbunden.

Dem gegenüber steht, dass der Einsatz von Fe^{3+} - oder Al^{3+} -Salzen zu verbesserten Absetzeigenschaften des Schlammes führen kann, wodurch eine Reduktion des Feststoffabtriebs in der Nachklärung bewirkt wird. Der Einsatz von Metallsalzen kann die Verschiebung des pH-Wertes ins Saure (für Nitrifikation von Nachteil) sowie höhere Salzfrachten im behandelten Abwasser zur Folge haben (eawag, 2008). Die Vor- und Nachteile der Vorfällung und Simultanfällung sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Vorfällung (eawag, 2008; DWA-A 202, 2011)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Eliminationseffekt der Vorklärung (auch kolloidale Stoffe neben ortho-Phosphat entfernt) • 30-50 % höhere Feststoff- und BSB-Elimination → günstig bei überbelasteten Kläranlagen • Besserer Schutz der Biologie vor toxischen Stößen (Schwermetallelimination) • Sofort einsetzbar bei Überbelastung, Dämpfung saisonaler Belastungsschwankungen • Geringere Investitionskosten • Bei Fällung mit Kalk bessere Schlammwässerung • Höhere Biogasproduktion bei Ausfällung des Primärschlammes • Geringeres Belebungsbeckenvolumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Fällmitteldosierung, da auch gute Flockung bewirkt werden muss (oft werden Polyelektrolyte am Ende des belüfteten Sandfangs zugegeben) • Höherer Primärschlammfall (30-40 %) und schlechter absetzbarer Belebtschlamm • pH-Probleme bei nachfolgender Nitrifikation bei Wasser mit schlechtem Säurebindungsvermögen • Evtl. Phosphorlimitierung der Biologie (insbesondere der Denitrifikation) • Evtl. Limitierung der Denitrifikation wegen Reduzierung des CSB/N-Verhältnisses. • Bei Kalkeinsatz: erhöhter DOC (<i>dissolved organic carbon</i>) durch Hydrolyse der partikulären Stoffe, Kalkausfällung in Leitung, große Schlammproduktion • Verschlechterter Schlammindex

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Simultanfällung (eawag, 2008; DWA-A 202, 2011)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Investitions- und Betriebskosten • Geringerer Fällmittelbedarf als bei Vorfällung (Rezirkulation) • Bioflockung und Turbulenz im Belebungsbecken unterstützen Flockung • Verminderung von Blähschlamm, verbesserte Absetzeigenschaften (Beschwerung des Schlammes mit Metallionen) • Sofortmaßnahme zur Phosphorelimination • Zusätzliche Elimination von DOC 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Biofilmverfahren (Festbett, Tropfkörper, Tauchkörper) nur bedingt anwendbar • Wirkungsgrad durch Biologie und Dosierstelle beeinflusst • Erhöhter Belebtschlammanfall in biologischer Stufe (höherer anorganischer Anteil am Belebtschlamm) → verringertes Schlammalter • Hemmung der Nitrifikation durch Fe²⁺ möglich • Größeres Belebungsbeckenvolumen

3.2.2 Biologische Phosphorelimination

Die erhöhte biologische Phosphorelimination (Bio-P) basiert auf der verstärkten Aufnahme von ortho-Phosphat durch bestimmte Bakterien unter aeroben Bedingungen. Diese obligat anaeroben phosphorakkumulierenden Bakterien (z. B. *Acinetobacter*) unterscheiden sich von anderen Belebtschlammorganismen durch die Fähigkeit, Phosphor über das normale wachstumsbedingte Maß hinaus aufzunehmen und zu speichern.

Unter anaeroben Bedingungen sind einige fakultative Anaerobier in der Lage organische Abwasserinhaltsstoffe zu kurzkettigen Fettsäuren umzusetzen. Jedoch kann dieses leicht verfügbare Substrat von aeroben und vielen der fakultativ anaeroben Bakterien aufgrund des fehlenden gelösten Sauerstoffs und Nitrats nicht veratmet werden. PAOs (*phosphate accumulating organisms*) besitzen unter diesen anaeroben Bedingungen die Fähigkeit, die Fettsäuren in die Zelle zu inkorporieren und als Reservestoffe einzulagern (Substratspeicher). Sobald sich aerobe Verhältnisse einstellen, steht ihnen das eingelagerte Substrat schnell als Kohlenstoffquelle für Zellwachstum und Vermehrung zur Verfügung, was ihnen gegenüber anderen Bakterien einen Selektionsvorteil verschafft. Die Energie, die zur Aufnahme organischer Verbindungen benötigt wird, gewinnen die PAOs durch den Abbau von gespeicherten Polyphosphaten zu ortho-Phosphat, welches in das umgebende Medium abgegeben wird.

Durch den oxidativen Abbau der Reservestoffe und des zusätzlichen exogenen Substrats unter aeroben Bedingungen übersteigt die freiwerdende Energie das für das Zellwachstum und die Vermehrung benötigte Maß. Der Energieüberschuss wird von den PAOs zur Aufnahme von ortho-Phosphat und zur Polyphosphatsynthese genutzt. Durch das Auffüllen des Polyphosphatspeichers (Energiespeicher) und die vermehrte Zellzahl kommt es zu einer erhöhten biologischen Phosphat-elimination

(Netto-Phosphorelimination) unter aeroben Bedingungen. Dabei übersteigt die inkorporierte Phosphatmenge die unter anaeroben Bedingungen freigesetzte Phosphatfracht (Bild 4). Somit kann durch die Entnahme des Überschussschlamms im Anschluss an die belüftete Zone eine Netto-Phosphorelimination von bis zu 80-90 % der Zulaufkonzentration erreicht werden (Sabelfeld & Geißen, 2011).

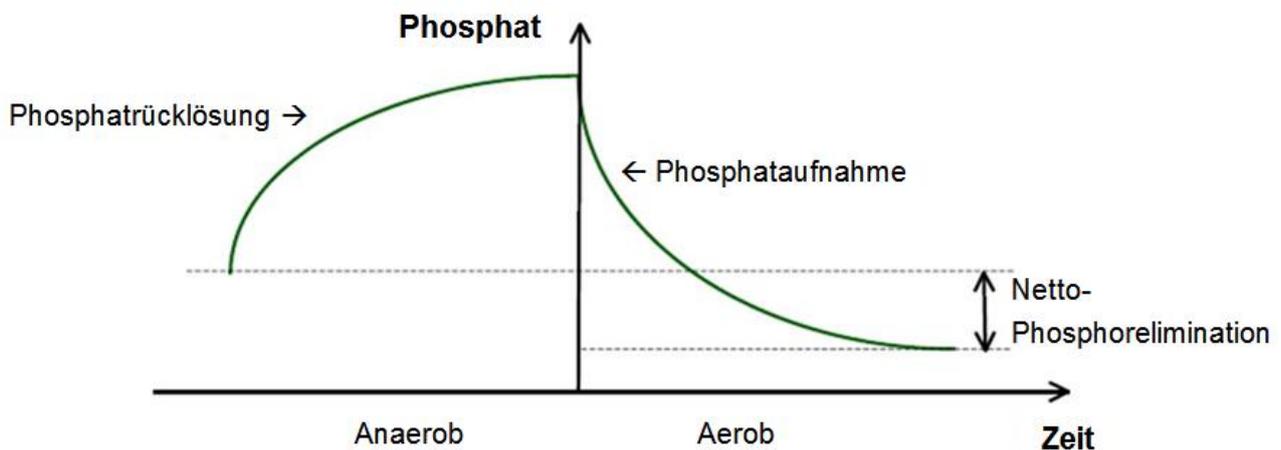


Bild 4: Biologische Phosphorelimination aus dem Abwasser (geändert nach eawag, 2008)

Durch den Wechsel aerober und anaerober Milieubedingungen können PAOs gezielt selektiert und angereichert werden. Der unter herkömmlicher Betriebsweise erreichte Gesamtschlagphosphorgehalt von 1-2 % bezogen auf die Schlamm-trockenmasse kann somit durch eine geeignete Verfahrensführung auf 2,5-5,0 % (Pinnekamp, 2007) gesteigert werden. Zur Förderung der Bio-P stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die je nach Lage des Anaerobbeckens in Haupt- und Nebenstromverfahren unterschieden werden. Beim Hauptstromverfahren ist die anaerobe Zone der Denitrifikation und Nitrifikation vorgeschaltet, wohingegen beim Nebenstromverfahren nur ein Teil des Abwasserstroms in ein Becken zur Phosphorinkorporation geleitet und anschließend dem Hauptstrom wieder zugeführt wird. Für eine effektive biologische Phosphorelimination ist es wichtig, dass den Organismen in der anaeroben Zone möglichst kein Nitrat oder Nitrit für eine anaerobe Atmung zur Verfügung steht. Daher wird bei nitrifizierenden Anlagen eine Anoxzone zur Denitrifikation benötigt, um die Nitratkonzentration im Rücklaufschlamm möglichst gering zu halten. Je nach Bio-P-Verfahren unterscheidet sich die Anordnung der Becken. Die Fließbilder einiger gängiger Verfahrensführungen sind in Bild 5 dargestellt.

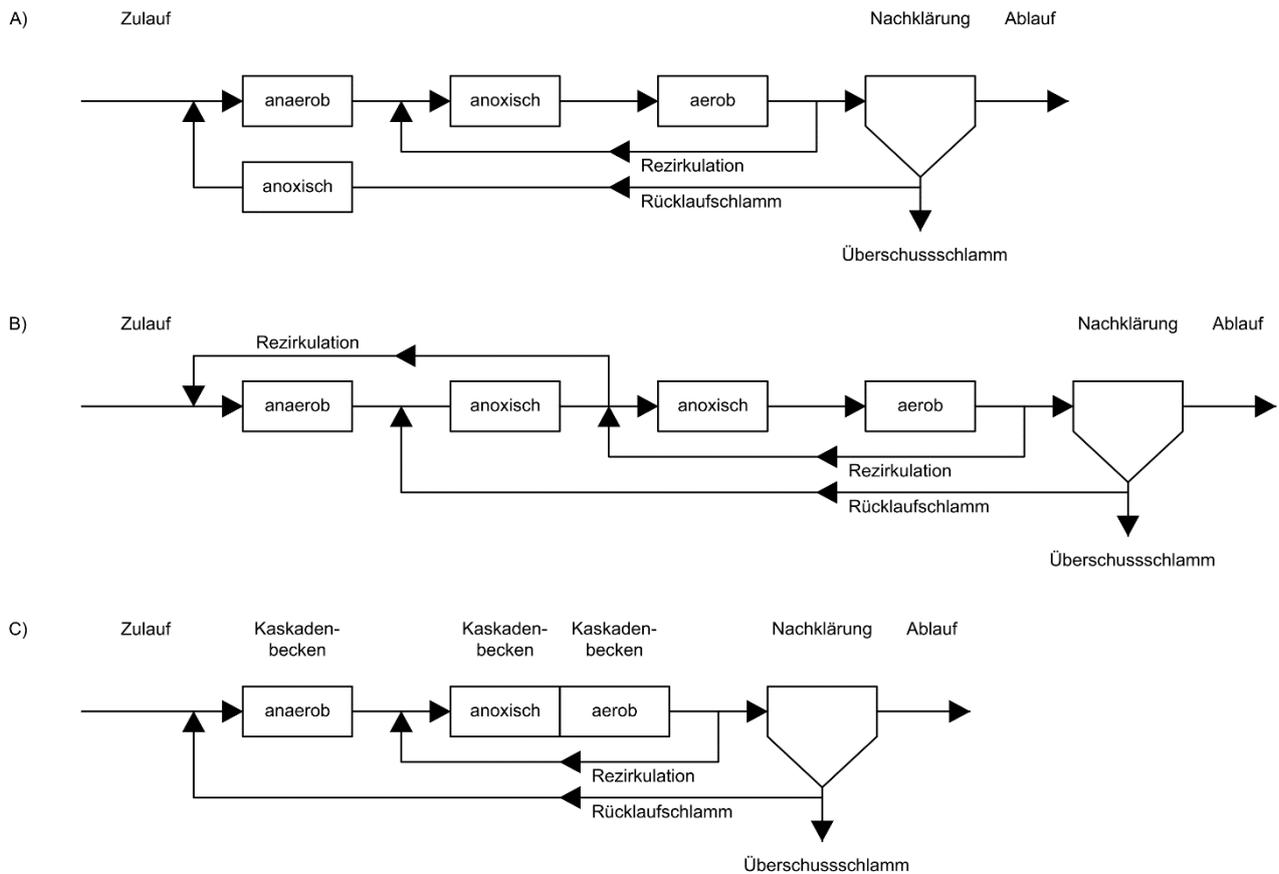


Bild 5: Fließbilder von Verfahren zur erhöhten biologischen Phosphorelimination. A) Johannesburg (JHB)-Verfahren; B) UCT-Verfahren (University of Cape Town); C) AAO-Verfahren (*anaerobic anoxic oxic*) (geändert nach Pinnekamp, 2007)

Es sind verschiedene Einflussparameter bekannt, die eine biologische Phosphorelimination begünstigen:

- Geringer Eintrag von Nitrat und gelöstem Sauerstoff in das Anaerobbecken
- Hoher Gehalt an leicht abbaubaren organischen Verbindungen
- Geringes Schlammalter

In der Regel ist die Bio-P als alleiniges Verfahren zur Phosphorelimination nicht ausreichend, um die Einhaltung geforderter Überwachungswerte sicher zu garantieren. Daher hat sich bei vielen Kläranlagen eine zusätzliche chemische Phosphatfällung als sinnvoll erwiesen. Beispielsweise erreichen die Kläranlagen der Berliner Wasserbetriebe mit einer Verfahrenskombination von Simultanfällung und Bio-P Ablaufwerte von $< 0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ bis $< 0,3 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ (Sabelfeld & Geißen, 2011). Die Vor- und Nachteile einer erhöhten biologischen Phosphorelimination sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Vor- und Nachteile des Bio-P-Verfahrens gegenüber der Phosphatfällung (eawag, 2008)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Salz- und Metallemissionen im Vergleich zur Fällung • Geringere Betriebskosten durch Fällmitteleinsparungen • Erhalt der Säurekapazität • Geringerer Schlammanfall • Leichtere Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Investitionskosten • z. T. vermehrte Inkrustationen in Rohrleitungen nach Schlammfäulung durch Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP)-Ausfällung • Schlechtere Schlammentwässerungseigenschaften • Leistung abhängig von vorangegangener Reinigungsstufe

3.3 Herausforderung für eine weitestgehende Phosphorelimination

Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen gilt es, limitierende Rahmenbedingungen zu optimieren. Dabei sind zwei Ansatzpunkte geeignet, um die Phosphorkonzentration im Ablauf von Kläranlagen weiter zu reduzieren (Voigt et al., 2013):

- Steigerung der Effizienz der chemischen Fällung des gelösten reaktiven Phosphors (ortho-Phosphat)
- Verbesserte Abtrennung des partikulären Phosphors

Bei Ersterem besteht die Herausforderung in der ökologischen und ökonomischen Vertretbarkeit der Maßnahme. Eine vollständige Fällung des fällbaren ortho-Phosphats würde zum einen zu einer überproportionalen Erhöhung des β -Wertes führen und zum anderen einen erhöhten Salzeintrag in die Gewässer bedeuten. Eine Erhöhung des Fällmitteleinsatzes ist zusammen mit dem vermehrten Schlammanfall mit Mehrkosten, besonders für die kleinen Kläranlagen, verbunden. Dem stehen verbesserte Absetzeigenschaften des Schlammes und damit verbunden eine höhere Gesamtablaufqualität gegenüber. Allerdings ist es auch bei einem vermehrten bzw. optimierten Fällmitteleinsatz oftmals nicht möglich einen Überwachungswert von 0,5 mg P_{ges} /L betriebsstabil einzuhalten (Voigt et al., 2013).

Die Einhaltung von erhöhten Anforderungen ist für Kläranlagen mit erhöhtem Feststoffabtrieb in der Nachklärung häufig nicht durch einen vermehrten Fällmitteleinsatz zu erreichen. Ein Feststoffabtrieb (Parameter Abfiltrierbare Stoffe (AFS)) von 1,0 mg AFS/L entspricht einer Zunahme der Gesamtphosphorkonzentration im Ablauf von etwa 0,02-0,04 mg P_{ges} /L (Sabelfeld & Geißen, 2011). Bei niedrigen Überwachungswerten stellt sich der Feststoffabtrieb daher häufig als limitierender Faktor dar. Bei einer einzuhaltenden Konzentration von 0,5 mg P_{ges} /L beträgt der Anteil des partikulär gebundenen Phosphors im Mittel bereits 0,25 mg P/L (eawag, 2008). Maßnahmen zur Verringerung

der AFS im Ablauf sind allerdings häufig mit hohen Investitions- und Betriebskosten verbunden, da bauliche Erweiterungen und kostenintensive Verfahren, wie beispielsweise eine (Membran-)Filtration, benötigt werden.

Eine besondere Herausforderung bedeutet der gelöste nicht-reaktive Phosphor, der weder fällbar noch biologisch verfügbar ist. Zu diesen Verbindungen zählen unter anderem Phosphonate, kondensierte Phosphate und Phosphite (Bild 1). Von einer Ablaufkonzentration von 0,50 mg P_{ges} /L ausgehend, beträgt der gelöste, nicht-reaktive Phosphoranteil rund 0,05-0,10 mg P/L (eawag, 2008). Auch wenn diese Phosphorfraktion in der Regel zu keiner unmittelbaren Beeinträchtigung der Gewässer führt, wird diese analytisch beim P_{ges} erfasst und ist daher von Relevanz für die Abwasserabgabe und die Einhaltung der geforderten Überwachungswerte.

Die Zusammensetzung des Gesamtphosphors ist abhängig von den angeschlossenen Einleitern, Schwankungen im Einzugsgebiet sowie der Kläranlage selbst. Eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Phosphoranteile am P_{ges} ermöglicht die wirtschaftliche Optimierung bereits bestehender Maßnahmen und hilft mögliche Defizite bezogen auf die Elimination einzelner Phosphorfraktionen aufzuzeigen. Eine temporäre Erweiterung des Messumfangs ist daher zu empfehlen, um optimale Verfahrenskombination zu identifizieren und eine bestmögliche Ausnutzung der Potentiale einzelner Maßnahmen für kommunale Kläranlagen zu erreichen. Des Weiteren ist ein pauschales Vorgehen zur Phosphorreduktion zu vermeiden und es sollte vielmehr für jede Kläranlage individuell über geeignete Maßnahmen entschieden werden.

3.4 Verfahren und Maßnahmen für eine erhöhte Phosphorelimination

Für eine erhöhte Phosphorelimination ist die Optimierung der bereits auf einer Kläranlage bestehenden Verfahren durch den Einsatz einer geeigneten Steuer- und Regeltechnik als erste Maßnahme sinnvoll. Mit einer Simultanfällung sind nach derzeitigem Stand der Technik Ablaufwerte $< 1,0$ mg P_{ges} /L betriebsstabil möglich (Barjenbruch & Geyer 2016). Bei einem verbesserten Fällmitteleinsatz können unter günstigen Bedingungen mittlere Ablaufkonzentrationen von 0,5 mg P_{ges} /L erreicht werden (persönliche Auskunft Herr Schwimmbeck, Wasserwirtschaftsamt Weilheim). Durch die Nachrüstung von technischen, kommunalen Kläranlagen der GK 1-3 mit einer einfachen Phosphatfällung wäre eine beträchtliche Reduktion der Phosphoremissionen möglich. Für die sichere Einhaltung von Überwachungswerten $\leq 0,5$ mg P_{ges} /L sind allerdings weitere Maßnahmen und Verfahren erforderlich.

3.4.1 Chemisch-physikalische Verfahren

3.4.1.1 Zwei-Punkt-Fällung

Für eine effektivere Entfernung des fällbaren ortho-Phosphats besteht die Möglichkeit zwei Fällungsverfahren zu einer zweistufigen Fällung zu kombinieren. Mögliche Kombinationen sind unter anderem Simultanfällung und Flockungsfiltration, Vor- und Simultanfällung, Vor- und Nachfällung sowie Simultan- und Nachfällung. Diese zweistufigen Verfahren ermöglichen eine frühzeitige Entlastung nachfolgender Verfahrensstufen und die Einhaltung tolerierbarer Filterlaufzeiten. Zudem wird ein wirtschaftlicherer Einsatz von Fällmitteln durch einen höheren Gesamtwirkungsgrad begünstigt. Ein niedrigerer Ablaufwert von $\leq 0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ ist daher bereits bei gleichem Fällmitteleinsatz zur einstufigen Fällung möglich (Barjenbruch & Exner, 2016). Es ist jedoch darauf zu achten, dass mit der Höhe des Qualitätsziels die Menge an benötigtem Fällmittel exponentiell steigt (eawag, 2008).

Bei optimierter Fällung, welche auch eine optimale Fällmitteleinmischung beinhaltet, ist eine weitere Verringerung der Ablaufkonzentration nur durch eine Senkung des partikulär gebundenen Phosphors zu erreichen. Für eine effektive Reduktion der Phosphorfrachten und des Feststoffabtriebs ist – sofern eine ausreichende Optimierung der bestehenden Nachklärung nicht möglich ist – die Nachrüstung von nachgeschalteten Filteranlagen oder eine Nachfällung als zusätzliche Reinigungsstufe erforderlich.

3.4.1.2 Nachfällung

Bei der Nachfällung als Maßnahme zur weitestgehenden Phosphorelimination wird das Fällmittel in den Zulauf der an die Nachklärung anschließenden Trennstufe dosiert (siehe Bild 6).

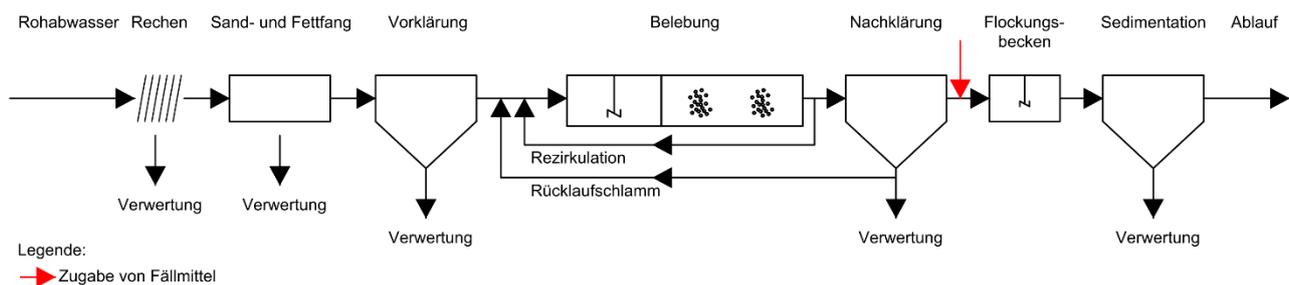


Bild 6: Dosierstelle Fällmittel bei Nachfällung (in Anlehnung an DWA-A 202, 2011)

Für eine optimale Fällmitteleinmischung sind Gerinne mit geeigneten Einbauten (statische oder dynamische Mischer) oder zusätzliche Misch- und Flockungsreaktoren erforderlich. Als anschließende Trennstufen sind einfache Absetzbecken, Schrägklärer oder Flotationsbecken sowie verschiedene firmenspezifische Technologien wie beispielsweise Actiflo (Veolia Water Solutions & Technologies),

CoMag (Cambridge Water Technology) und Tridant (Siemens) geeignet (Barjenbruch & Geyer, 2016).

Erfahrungen aus der Praxis haben jedoch gezeigt, dass eine Nachfällung aufgrund der separat benötigten Infrastruktur (z. B. Mischbecken, Flockungsbecken, Abscheideeinheit) und einem vermehrten Fällmittelbedarf mit einem wesentlich höheren Kostenaufwand verbunden ist (Tabelle 5), als die Flockungsfiltration (persönliche Auskunft Herr Schwimmbeck, Wasserwirtschaftsamt Weilheim) und niedrige Ablaufwerte häufig nicht betriebsstabil erreicht werden (Barjenbruch & Geyer, 2016).

Tabelle 5: Vor- und Nachteile der Nachfällung (eawag, 2008, Barjenbruch & Geyer, 2016)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Separat anfallender Fällschlamm → Phosphorrückgewinnung • Geringerer Schlammanfall als bei Vor- und Simultanfällung • Fällung separat steuer- und kontrollierbar • Gute Ablaufqualität • Bei Ca^{2+} gut entwässerbarer Schlamm • pH-Regulierung möglich ohne Rücksicht auf Biologie • Kein Einfluss auf andere Verfahrensstufen • Hoher Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Investitions- und Betriebskosten • Evtl. Recarbonisierung des Ablaufs bei Fällung mit Ca^{2+} • Evtl. separate Schlammentwässerung und dessen Entsorgung • Hoher Fällmittelbedarf

3.4.1.3 Flockungsfiltration

Bei der Flockungsfiltration zur weitestgehenden Phosphorelimination kommt im Anschluss an die Belebung eine Filtereinheit (u. a. Raumfilter oder Flächenfilter) zum Einsatz (Bild 7).

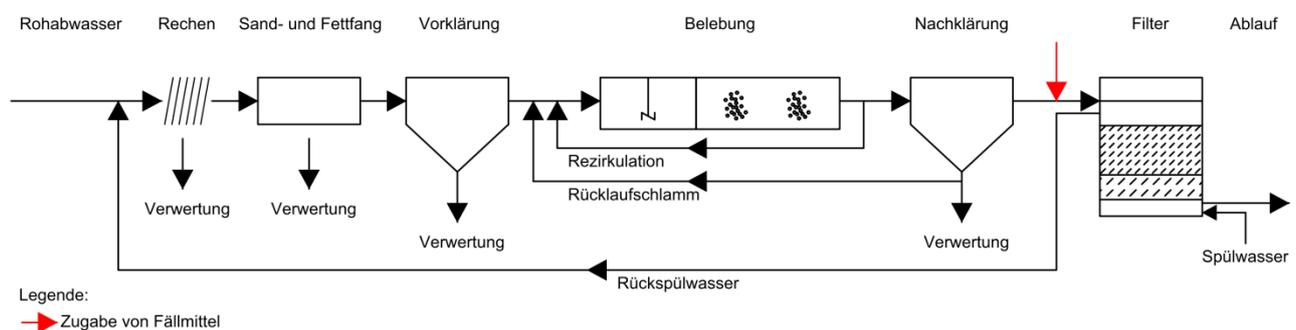


Bild 7: Dosierstelle Fällmittel bei Flockungsfiltration (in Anlehnung an DWA-A 202, 2011)

Dieses Verfahren ist nicht durch einen speziellen Filtertyp, sondern durch die Vorbehandlung des zu filtrierenden Wassers gekennzeichnet, bei der durch die Zugabe von Fällmittel die gelösten und kolloidalen Phosphorkomponenten in eine abfiltrierbare Form überführt werden. Die Dosierung des

Flockungsmittels erfolgt im Zulauf des Filters. Die anschließende Flockung findet im Filterbett statt und wird durch die dort auftretenden Mischvorgänge begünstigt. Organische Polymere können als Flockungshilfsmittel die Makroflockenbildung unterstützen, werden in der Praxis jedoch in der Regel nicht eingesetzt, da sie häufig zu betrieblichen Problemen (Verklebungen) führen können. Mit einer Flockungsfiltration sind durch die Elimination partikulärer und gelöster Phosphorverbindungen Überwachungswerte $\leq 0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ sicher einzuhalten (Barjenbruch & Exner, 2016).

Die Reinigungsleistung eines Flockungsfilters beruht auf verschiedenen chemischen, physikalischen und biologischen Prozessen:

- Größere Partikel werden durch den Siebeffekt zwischen den Filterkörnern herausgefiltert.
- Kleinere Partikel werden an der Oberfläche des Filtermediums oder an bereits abgelagerten Partikeln zurückgehalten.

Bereits ohne Zugabe von Flockungsmitteln kommt es durch die verschiedenen im Filter wirkenden Rückhaltemechanismen (z. B. Sorption, mikrobieller Abbau, Van-der-Waals-Kräfte) zu einer Verringerung der Feinstflockenanteile im Abwasser und somit zu niedrigeren CSB- und Phosphorfrachten im Ablauf (Barjenbruch & Exner, 2009). Die Filterwirkung ist dabei nahezu unabhängig von der Filtergeschwindigkeit.

Um eine wirtschaftliche Filterstandzeit zu garantieren, sollte die Phosphorkonzentration im Zulauf zum Filter $1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ nicht übersteigen (DWA-A 202, 2011). Daher kommt die Flockungsfiltration nur als zweite Stufe nach einer vorangegangenen Vor- oder Simultanfällung oder als Ergänzung einer biologischen Phosphatentfernung und im Anschluss an die Nachklärung zum Einsatz (Barjenbruch & Exner, 2016). Neben der Beladung sind weitere Faktoren für den ökonomischen Betrieb von Flockungsfiltern ausschlaggebend, wie beispielsweise die richtige Wahl des Fällmittels, eine genaue Abstimmung des Energieeintrags bei der Intensivmischung sowie die Filtergeschwindigkeit.

Bei der Flockungsfiltration können prinzipiell verschiedene gängige Filtertechnologien zum Einsatz kommen (Barjenbruch & Geyer, 2016):

- Für eine Flächenfiltration stehen verschiedene Filtersysteme, wie Feinkornfilter, Tuchfilter und Mikrosiebe, zur Auswahl. Das Wirkungsspektrum dieser Filter beschränkt sich dabei im Wesentlichen auf den Siebeffekt der Oberfläche.
- Bei der Raumfiltration findet die Partikelabscheidung im gesamten Filterbett statt, wodurch wesentlich höhere Beladungskapazitäten und längere Filterstandzeiten zu Stande kommen. Die Einteilung der Raumfilter erfolgt nach ihrer Ausführung (Einschicht- oder Mehrschichtfilter), der Durchströmungsrichtung (aufwärts oder abwärts), dem Spülzyklus (kontinuierlich oder diskontinuierlich) und den verwendeten Filtermaterialien. In der Praxis sind Raumfilter häufig das Mittel der Wahl für die Flockungsfiltration.
- Sonderformen der kontinuierlich durchspülten Raumfilter, wie BluePro (Blue Water Technologies Inc.) oder DynaSand D2 (Nordic Water GmbH/Parkson), ermöglichen Phosphorkonzentrationen $< 0,05 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$. Beim BluePro Filter sorgt eine zusätzliche Ummantelung des Filtermaterials mit Eisenhydroxid für eine verstärkte Adsorption von Phosphorverbindungen. Eine weitere Sonderform stellt der Fuzzy Filter (Bosman Watermanagement GmbH) dar, der einen variablen Partikelgrößenrückhalt von mehreren Millimetern bis zu $5 \text{ }\mu\text{m}$ ermöglicht.
- Nachgeschaltete Membranfiltrationen in Form von Mikro- oder Ultrafiltrationsanlagen werden bisher in Deutschland nicht eingesetzt. Mit Mikrofiltration ist eine Feststoffabtrennung leicht möglich, mit einer Ultrafiltration können zusätzlich noch kolloidale Stoffe und Makromoleküle aus dem Abwasserstrom gefiltert werden.

Als zweite Stufe in Kombination mit einer Simultanfällung bietet die Flockungsfiltration im Vergleich zur Nachfällung die Vorteile eines geringeren Flächenbedarfs, eines weitestgehend schwebstoffarmen Ablaufs ($< 0,5 \text{ mg AFS/L}$) sowie eines geringeren Fällschlammanfalls (Barjenbruch & Exner, 2009). Allerdings werden viele bereits auf Kläranlagen installierte Flockungsfiler nicht mehr als solche betrieben, da häufig die Einhaltung der bisher geforderten Überwachungswerte auch mit einfacher Fällung möglich ist (persönliche Auskunft Mecana, Schweiz). Die Vor- und Nachteile der Flockungsfiltration sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile der Flockungsfiltration (eawag, 2008, Barjenbruch & Geyer, 2016)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Stabile und sehr gute Ablaufqualität in Bezug auf TS und P_{ges} • Fällmitteleinsparungen • Geeignet als Ausbaustufe bestehender Anlagen • Separat anfallender Fällschlamm → Phosphorrückgewinnung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Investitions- und Betriebskosten • Teilweise Stapelbecken für Spül- und Schlammwasser notwendig • Evtl. Einsatz von Polyelektrolyten • Leistung abhängig von vorrangegangener Reinigungsstufe

3.4.2 Physikalisches Verfahren: Membranbelebungsverfahren

Das Membranbelebungsverfahren (MBR) kombiniert die biologische Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren mit einer physikalischen Phasenseparation des Schlamm-Wasser-Gemisches mittels Membranfiltration. Nach dem biologischen Abbau der Abwasserinhaltsstoffe in der Belebungsstufe wird die suspendierte Biomasse in der anschließenden Membranstufe vom gereinigten Abwasser abgeschieden. Die eingesetzten Membranfilter garantieren einen vollständigen Rückhalt von Feststoffen und Biomasse, wodurch keine weitere Nachklärung benötigt wird. Ein feststofffreier Ablauf wird somit unabhängig von den Absetzeigenschaften des Schlamms garantiert. Dies ermöglicht auch den Betrieb der Belebungsstufe mit wesentlich höheren Biomassekonzentrationen (9-16 g TS/L) als sonst bei konventionellen Anlagen (< 5 g TS/L) üblich (Pinnekamp & Friedrich, 2003). Das benötigte Belebungsbeckenvolumen kann daher um bis zu 75 % reduziert werden. Folglich eignet sich das Membranbelebungsverfahren besonders für Anlagen, die aufgrund erhöhter Anforderungen verschärfte Überwachungswerte einhalten müssen, aber nur über eine begrenzte Fläche für bauliche Maßnahmen verfügen.

Bei dem Membranbelebungsverfahren wird grundsätzlich zwischen zwei baulichen Ausführungen unterschieden (Bild 8). Bei der internen Anordnung werden die Membranmodule direkt in das Belebtschlamm-Wasser-Gemisch innerhalb des Bioreaktors getaucht (getauchtes System). Bei der externen Anordnung befinden sich die Module außerhalb des Bioreaktors und werden im Crossflow-Betrieb mit dem Schlamm-Wasser-Gemisch beschickt.

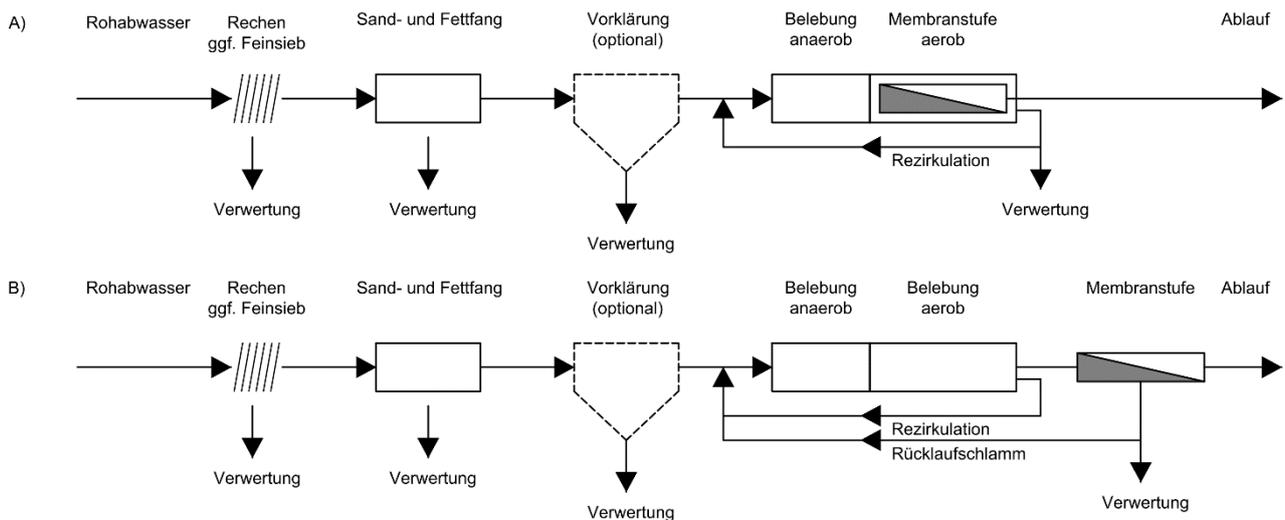


Bild 8: Anordnungsmöglichkeiten von Membranstufen bei kommunalen Kläranlagen. A) interne Anordnung (getauchtes System); B) externe Anordnung

Aus Kostengründen werden auf kommunalen Kläranlagen fast ausschließlich getauchte Systeme eingesetzt. Die getauchten Mikro- oder Ultrafiltrationsmodule werden im Niederdruckverfahren (Unterdruck- oder Überstaubetrieb) bei Transmembrandrücken von $< 0,5$ bar betrieben. Derzeit sind verschiedene Membranmodule auf dem Markt erhältlich, wobei die Kapillarmodule der Firma Zenon (Kanada) und die Plattenmodule der Firma Kubota (Japan) den größten Anteil der weltweit eingesetzten Systeme ausmachen (Pinnekamp & Friedrich, 2003).

In Bezug auf die Eliminationsleistung von Phosphorkomponenten lassen sich, in Kombination mit einer Simultanfällung, Ablaufwerte von $< 0,3$ mg P_{ges}/L erreichen (Pinnekamp & Friedrich, 2003). Die hohe Phosphoreliminationsleistung von Membranbelebungsverfahren ist auf eine vollständige Feststoffabtrennung zurückzuführen. Derzeit wird das Verfahren in Deutschland nur vereinzelt bei kleineren bis mittleren Anlagen (max. 90.000 EW) eingesetzt (Pinnekamp & Friedrich, 2003). In Kapitel 4.2.4 sind die Ergebnisse der Bilanzierung für eine kommunale Kläranlage aufgeführt.

Versuche von Adam et al. (2003) zur vermehrten biologischen Phosphorelimination in einer MBR-Laboranlage zeigen, dass sehr niedrige und stabile Ablaufwerte von $0,05-0,15$ mg P_{ges}/L auch ohne chemische Fällung möglich sind. Lesjean et al. (2002) gelang es ebenfalls eine stabile Bio-P in MBR-Pilotsystemen mit Eliminationsraten von ≥ 99 % und Phosphorablaufkonzentrationen von $\leq 0,1$ mg P_{ges}/L zu erreichen. Allerdings ist die weitergehende biologische Phosphorelimination in MBR durch die hohe Konzentration an gelösten Sauerstoff im Belebtschlamm häufig limitiert (Crawford et al., 2006), sodass in der Praxis zur sicheren Einhaltung der Überwachungswerte eine ergänzende Dosierung von Fällmittel notwendig ist. Nach derzeitigem Kenntnisstand gibt es noch keine MBR-An-

lage mit vermehrter biologischer Phosphorelimination, die im großtechnischen Maßstab auf Kläranlagen zum Einsatz kommt. Die Vor- und Nachteile des Verfahrens sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile des Membranbelebungsverfahrens (Pinnekamp & Friedrich, 2003)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Vollständiger Feststoffrückhalt • Feststoffabtrennung unabhängig von Schlammqualität • Geringer Platzbedarf • Modulare Erweiterung möglich • Weitgehend hygienisierter Ablauf bei Ultrafiltration → Badewasserqualität • Keine nachgeschalteten Stufen zur weitergehenden Reinigung notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Investitions-, Betriebs- und Energiekosten • Durch geringes Reaktorvolumen vermehrte Sauerstoffverschleppungen aus Nitrifikations- und Filtrationsbereich in Denitrifikation • Intensivere mechanische Vorreinigung notwendig • Aufwendige Intensivreinigung, idealerweise in beheizten separaten Becken • Bei in situ Reinigung sind Schädigungen der Biozönose durch die eingesetzten Reinigungsmittel und erhöhte AOX-Konzentrationen im Ablauf möglich • Lagerung und Anwendung von Reinigungschemikalien

3.4.3 Weitere chemisch-physikalische Verfahren

Neben den zuvor beschriebenen Verfahren, die bereits großtechnisch auf kommunalen Kläranlagen zur weitestgehenden Phosphorelimination eingesetzt werden, gibt es noch weitere Ansätze zur Phosphorelimination aus kommunalen Abwässern, von denen im Folgenden einige Ausgewählte genauer vorgestellt werden.

3.4.3.1 Elektrokoagulation und Elektroflotation

Elektrokoagulation und Elektroflotation sind elektrochemische Verfahren, die seit Beginn des 20. Jahrhunderts zur Elimination von Abwasserinhaltsstoffen untersucht werden (Chen, 2004; Holt et al., 2005). Beide Verfahren kennzeichnen sich durch das Einbringen von Elektroden in den Abwasserstrom, welche mit Gleichspannung versorgt werden. Bei der Elektroflotation kommt es durch die Hydrolyse von Wasser an den Elektroden zur Freisetzung von Wasserstoff und Sauerstoff. Im Abwasser dispergierte Partikel (Ionen, Moleküle, Feststoffe) werden durch die feinen Gasbläschen aggregiert und an die Oberfläche transportiert. Die abzutrennenden Partikel können dann mit dem Flotat (Schaumdecke) abgeschieden werden. Die Elektroflotation tritt häufig auch als ein Prozess bei der Elektrokoagulation auf. Bei dieser werden in Abhängigkeit vom verwendeten Anodenmaterial

(Eisen oder Aluminium) Metallionen ins Abwasser abgegeben, die dort mit unterschiedlichen Abwasserinhaltsstoffen reagieren und unlösliche Verbindungen bilden. Neben der Koagulation treten bei dem Verfahren noch folgende weitere Prozesse auf:

- Reduktion organischen und anorganischen Materials an der Kathode
- Flotation partikulärer und emulgierter Verunreinigungen durch den an der Kathode gebildeten Wasser- und Sauerstoff
- Sorption von Ionen und Molekülen an Metallhydroxide

Die Elektrokoagulation ist eine Methode, die es ermöglicht eine große Bandbreite an Verunreinigungen, wie beispielsweise organische Bestandteile, Nährstoffe und Schwermetalle aus dem Abwasser zu entfernen. Bisher wurden zahlreiche Versuche im Labor- und Pilotmaßstab durchgeführt (siehe Tabelle 8). Allerdings ist eine Vergleichbarkeit durch den fehlenden systematischen Ansatz zur Konstruktion und dem Betrieb von Elektrokoagulationsanlagen nicht gegeben. Auch im Hinblick auf die Phosphorelimination sind nur wenige Studien verfügbar.

Bei der Elektrokoagulation reagieren die an der Anode freigesetzten Metallionen mit dem im Abwasser enthaltenen Phosphor und es kommt zur Ausfällung des Reaktionsproduktes. Dieses kann anschließend durch Flotation, in einigen Fällen auch durch Sedimentation entfernt werden. İrdemez et al. (2006a) haben gezeigt, dass die Eliminationsleistung stark von dem verwendeten Anodenmaterial, der anfänglichen Phosphorkonzentration und der Stromdichte abhängt. Eine Phosphorentfernung von bis zu 100 % konnte bei der Verwendung von Aluminiumanoden nahezu unabhängig von der initialen Phosphorkonzentration erreicht werden. Bei Eisenanoden hingegen nahm die Eliminationsleistung mit steigender Phosphorkonzentration ab. Mit zunehmender Stromdichte nahm die Effizienz der Phosphorentfernung für beide Anodenmaterialien zu. Weitere Ergebnisse der Literaturrecherche zur Phosphorelimination mittels Elektrokoagulation sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Phosphorelimination mittels Elektrokoagulation und -flotation

Quelle	Maßstab	Elektrodenmaterial		Abwasser	Zulauf P _{ges} [mg/L]	Ablauf P _{ges} [mg/L]	Eliminations- leistung
		Kathode	Anode				
Groeterud & Smoczynski, 1986	Labormaßstab (3,6- 10,2 mL/min)		Eisen u. Aluminium	Synthetisches Abwasser (KH ₂ PO ₄)	20,0		> 90 %
Feng et al., 2003	Pilotanlage (0,3 m ³ /h)	Edelstahl	Eisen u. Ti/RuO ₂ - TiO ₂	Kommunales Abwasser	4,5	0,045	99 %
İrdemez et al., 2006b	Labormaßstab (Batchreaktor)	Aluminium	Aluminium	Synthetisches Abwasser (KH ₂ PO ₄)	50 [*]		100 %
Tran et al., 2012	Labormaßstab (Batchreaktor)	Weich- stahl	Weichstahl	Kommunales Abwasser mit KH ₂ PO ₄ angerei- chert	12,7	2,04	84 %
Tran et al., 2012	Labormaßstab (90 mL/min)	Weich- stahl	Weichstahl	Kommunales Abwasser mit KH ₂ PO ₄ angerei- chert	10 und 21,4	0,11- 0,30	> 97 %

* ortho-Phosphatkonzentration

3.4.3.2 Elektrophosphatfällerverfahren

Das auf der Elektrokoagulation basierende Elektrophosphatfällerverfahren (EPH) wurde in den 1990er Jahren in Österreich entwickelt und wird seit 1996 auf einigen Kläranlagen in Österreich, Tschechien, Rumänien, Deutschland sowie der Türkei auch im großtechnischen Maßstab betrieben (Herstellerangaben, Europhat). Das Funktionsprinzip des Verfahrens beruht auf Elektrodenpaaren, welche in das Belebungsbecken eingebracht und über ein EPH-Steuergerät mit 25 V Gleichspannung versorgt werden. Durch den Aufbau eines elektrischen Feldes erfolgen eine pH-Wert-Änderung und infolgedessen eine Ionenverschiebung an den Elektroden. Durch die veränderten Ionenverhältnisse reagiert das im Abwasser enthaltene Magnesium mit Nitrat und es kommt zur Ausbildung eines Ionengitters aus Magnesium-Nitrat. In der anschließenden Denitrifikationsphase wird das im Ionengitter gebundenen Magnesium-Nitrat zu Magnesium-Ammonium reduziert, welches sich mit Phosphor zu MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat) verbindet. Als Salze können das MAP und das auf gleiche Weise gebildete CAP (Calcium-Ammonium-Phosphat) mit dem Überschussschlamm aus dem System entfernt werden. Bei Anlagen mit einer gezielten biologischen Phosphorelimination

erfolgt die MAP- bzw. CAP-Bildung analog im Anaerobbecken durch die Reaktion mit dem rückgelösten Phosphor.

Unter idealen Bedingungen kann eine Phosphorreduktion von 98 % erreicht werden. Für eine optimale elektrische Phosphorelimination müssen allerdings verschiedene Voraussetzungen und Abwassereigenschaften gegeben sein:

- Härtegrad des Abwassers $> 5^{\circ}$ dH (deutsche Härte)
- Regelbare Belüftung der Belebungsbecken, je nach Abwasseranfall und Belastung
- Hohe Nitrifikationsleistung mit Ammoniumkonzentrationen im Ablauf $< 2,0$ mg/L
- Möglichkeit einer ausreichenden Denitrifikation mit Nitratwerten von $< 3,0$ mg/L
- Optimal ist außerdem ein vorgeschaltetes Anox- oder Denitrifikationsbecken

In der kommunalen Abwasserreinigung kommen in der Regel Stahlrohre mit einer Nennweite von DN 50 bis DN 90 als Elektroden zum Einsatz. Abhängig vom Anwendungsgebiet (z. B. Industrieabwasserreinigung, Trinkwasseraufbereitung) können auch Röhren- oder Plattenelektroden aus Diamant oder Titan verwendet werden (Hauptmann, 2011, Rodler, 2014).

Für Kläranlagen ist die elektrische Phosphorelimination, im Hinblick auf niedrige Investitionskosten und einen geringen Wartungsaufwand sowie auf Einsparungen von Fällmitteln und damit verbunden geringeren Schlammanfalls, grundsätzlich wirtschaftlich interessant.

Für den langjährigen erfolgreichen Betrieb von elektrischen Phosphatfällern gibt es allerdings in der Praxis bisher nur wenige Erfahrungen. Zu dem genauen Eliminationsmechanismus, der dem Verfahren zugrunde liegt, wurden bisher noch keine belastbaren Untersuchungen durchgeführt, wodurch der Grad der Phosphorentfernung nur schwer bilanzierbar ist. Zudem könnten Veränderungen der Abwasserqualität dazu führen, dass die gewünschte Reinigungsleistung nicht mehr erreicht wird. Laut Herstellerangaben funktioniert das System bei 2 % der installierten Anlagen aus unbekanntem Gründen nicht. Das EPH-Verfahren kann als sinnvolle Ergänzung zur chemischen Phosphorelimination dienen, um bei Einhaltung der Grenzwerte den Fällmitteleinsatz bis zu 90 % zu reduzieren (Hauptmann, 2011; Herstellerangaben, Europhat). Als alleinige Maßnahme zur Reduktion der Phosphoremissionen birgt es aufgrund fehlender Erfahrungen und der Abhängigkeit von konstanten Abwassereigenschaften ein gewisses Risiko. Die Vor- und Nachteile des EPH-Verfahrens sind in der nachfolgenden Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Vor- und Nachteile des EPH-Verfahrens

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Investitions- und Betriebskosten • Integration in bestehende Kläranlagen ohne bauliche Maßnahmen • Fällmitteleinsparungen (Dosierung nur bei Bedarf) • Kein Chemikalieneinsatz • Geringerer Schlammanfall • Elimination weiterer Abwasserinhaltsstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Abwasser muss bestimmte Eigenschaften aufweisen (z. B. elektrische Leitfähigkeit) • Optimale Reinigungsleistung nur bei stabilen Abwassereigenschaften • Eliminationsmechanismen noch nicht genau untersucht → Risiko bei Betriebsstörungen • Keine Bilanzierung möglich • Evtl. MAP-Ablagerungen in Rohrleitungen

3.4.3.3 Adsorption

Die Adsorption von Phosphor an bestimmte Adsorbentmaterialien aus Eisen-, Aluminium- und Calciumverbindungen ist aus der naturnahen Abwasserreinigung bekannt und bietet den großen Vorteil, dass neben ortho-Phosphat auch der schwer eliminierbare nicht-reaktive Phosphor entfernt werden kann (Sabelfeld & Geißen, 2011). In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Materialien (z. B. Flugasche, Ca-, Fe- und Al-haltige Kiesarten, Tonerde und Rotschlamm) auf ihre Fähigkeit zur Phosphoradsorption im Labor- oder Pilotmaßstab untersucht, mit dem Ziel geeignete großtechnische Adsorptionsverfahren zu entwickeln (Westholm, 2006; Vohla et al., 2011). Aktivtonerde (Al_2O_3) und granuliertes Eisenhydroxid (GEH) haben sich als besonders geeignete Materialien mit hoher Selektivität und großem Phosphoradsorptionspotential erwiesen (Sabelfeld & Geißen, 2011; Huber et al., 2017). Die erreichten Beladungen lagen bei bis zu 20 mg P pro g Al_2O_3 und waren für GEH um den Faktor 2 höher. Allerdings wird die großtechnische Umsetzung durch eine aufwändige Filterregeneration, die stets mit einem Material- und Kapazitätsverlust verbunden ist, und die hohen Materialkosten im Fall von GEH erschwert. In Tabelle 10 sind die Ergebnisse einiger Adsorptionsstudien zusammengestellt.

Tabelle 10: Phosphorelimination mittels Adsorption

Referenz	Maßstab	Adsorbiermaterial	Abwasser	Zulauf	Ablauf
				P_{ges} [mg/L]	P_{ges} [mg/L]
Genz et al., 2004	Labormaßstab	Aktiviertes Aluminiumoxid und GEH	MBR-Filtrat	0,3	< 0,05
Rustige, 2012	Pilotanlage	Konverterschlacke	Kommunales Abwasser (Ablauf Biologie)	6-31 (Ø 11,8)	4
Rustige, 2012	Pilotanlage	Elektroofenschlacke	Kommunales Abwasser (Ablauf Biologie)	6-31 (Ø 11,8)	2
Wei et al., 2008	Labormaßstab	Schlamm aus Grubenentwässerung	Kommunales Abwasser (Ablauf Biologie)	1,8	0,013-0,043

Zur Entfernung und Rückgewinnung von Phosphor aus dem Abwasser hat das österreichische Unternehmen TimacAgro das Phosclean Verfahren entwickelt. Dabei wird granulierter Apatit als Adsorbiermaterial verwendet. Mit zunehmender Sättigung des Apatits kommt es zur Ausfällung des Phosphors. Dieser kann dann zurückgewonnen und der Apatit recycelt werden. Hierfür muss das Adsorbiermaterial ca. alle zehn Jahre ausgetauscht werden. Bisher wurde das Verfahren vor allem bei kleineren Kläranlagen (bis 4.500 EW) insbesondere Pflanzenkläranlagen angewendet (Herstellerangaben, TimacAgro). Dabei wird der mit Apatitgranulat befüllte Phosphatfilter der konventionellen Reinigung nachgeschaltet. Bei Versuchen mit einer Pilotanlage konnten im ersten halben Jahr Ablaufkonzentrationen von $\leq 0,5$ mg P_{ges} /L bei durchschnittlich 12 mg P_{ges} /L im Zulauf und einer durchschnittlichen Aufenthaltszeit von zehn Stunden erreicht werden. Allerdings ließ die Eliminationsleistung schon nach sechs Monaten nach (Herstellerangaben, TimacAgro). Die Vor- und Nachteile des Phosclean Verfahrens sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Vor- und Nachteile des Phosclean Verfahrens

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Rückgewinnung von Phosphor • Entfernung des nicht-reaktiven Phosphors 	<ul style="list-style-type: none"> • Weitestgehend partikelfreies Wasser und niedrige P_{ges}-Konzentrationen im Zulauf notwendig • Aufwendige Filterregeneration • Lange Filtrationszeit

3.4.3.4 Ionenaustausch

Seit den 1970er Jahren gibt es Bestrebungen, Phosphor mittels selektiven Ionenaustausch aus dem Abwasser zu entfernen. Im Hinblick auf die weltweit begrenzten Phosphorressourcen bietet diese Technologie den großen Vorteil der einfachen Rückgewinnung des Phosphors durch Regeneration der beladenen Ionenaustauschersäulen. Mit dem RIM-NUT-Verfahren gelang Liberti et al. (1979) eine 95 %-ige Entfernung von Phosphor und Stickstoff aus einem kommunalen Abwasserstrom durch die Serienschaltung kationischer (Ammoniumrückhalt) und anionischer (ortho-Phosphatrückhalt) Ionenaustauscherharze. Nach Regeneration der Austauscherharze mit 0,6 molarer NaCl-Lösung konnte durch die Zugabe von Mg^{2+} -Salzen der Phosphor als hochwertiger Dünger in Form von MAP bzw. Struvit ($NH_4MgPO_4 \cdot 6 H_2O$) aus dem Eluat ausgefällt und zurückgewonnen werden. Das Verfahren wurde auch im Pilotmaßstab auf einer Kläranlage in Italien implementiert (Liberti, 1982). Allerdings haben sich Ionenaustauscherverfahren zur Phosphorelimination aufgrund der großen Fäulnisanfälligkeit der Austauschermaterialien und der hohen Kosten nicht zur großtechnischen Anwendung auf kommunalen Kläranlagen durchgesetzt. Im Bereich der industriellen Prozesswasseraufbereitung mit hohen Phosphorkonzentrationen werden Ionenaustauscher bereits erfolgreich eingesetzt (Sabelfeld & Geißen, 2011).

3.4.3.5 Kristallisation

Zur erhöhten Phosphorelimination und mit der Absicht ein vermarktbare Endprodukt zu gewinnen wird seit den 1970er Jahren die Kristallisationstechnologie zur Behandlung von Abwasser erforscht. Führend auf dem Gebiet ist die Firma DHV Consulting Engineers, deren DHV-Crystalactor mittlerweile auch kommerziell in den Niederlanden, USA, China und Israel eingesetzt wird (DHV Consulting Engineers, 2009). Das Verfahren basiert auf der gezielten Auskristallisierung von Calciumphosphat an einem Kristallisationskeim (z. B. Sand) in einem Fließbettreaktor nach Zugabe eines Ca^{2+} -Salzes. Neben Calciumphosphat kann das Phosphat auch bei Zugabe von Mg^{2+} -Salzen als Magnesiumphosphat, Kaliummagnesiumphosphat oder Struvit zurückgewonnen werden. Im Fall der Calciumphosphatkristallisation können Konzentrationen $< 0,5 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ erreicht werden. Der Kristallisationsprozess kann durch die Zugabe von Kalkmilch oder Ätznatron zusätzlich gefördert werden. Durch den schnellen Kristallisationsvorgang wird nur ein kleiner Reaktor benötigt, der entweder im Haupt- oder im Nebenstromverfahren implementiert werden kann. In der Regel hat sich der Betrieb im Nebenstrom, bei dem ein mit Phosphat angereicherter Abwasserstrom in den Reaktor geleitet wird, als ökonomischer herausgestellt. Allerdings ist dafür ein weiterer Verfahrensschritt zur Phosphatanreicherung notwendig. Zusätzlich zu der Rückgewinnung von Phosphor bietet das Verfahren den Vorteil, dass kein weiterer Schlamm (Fällschlamm) bei der Abwasserbehandlung anfällt (siehe Bild 9).

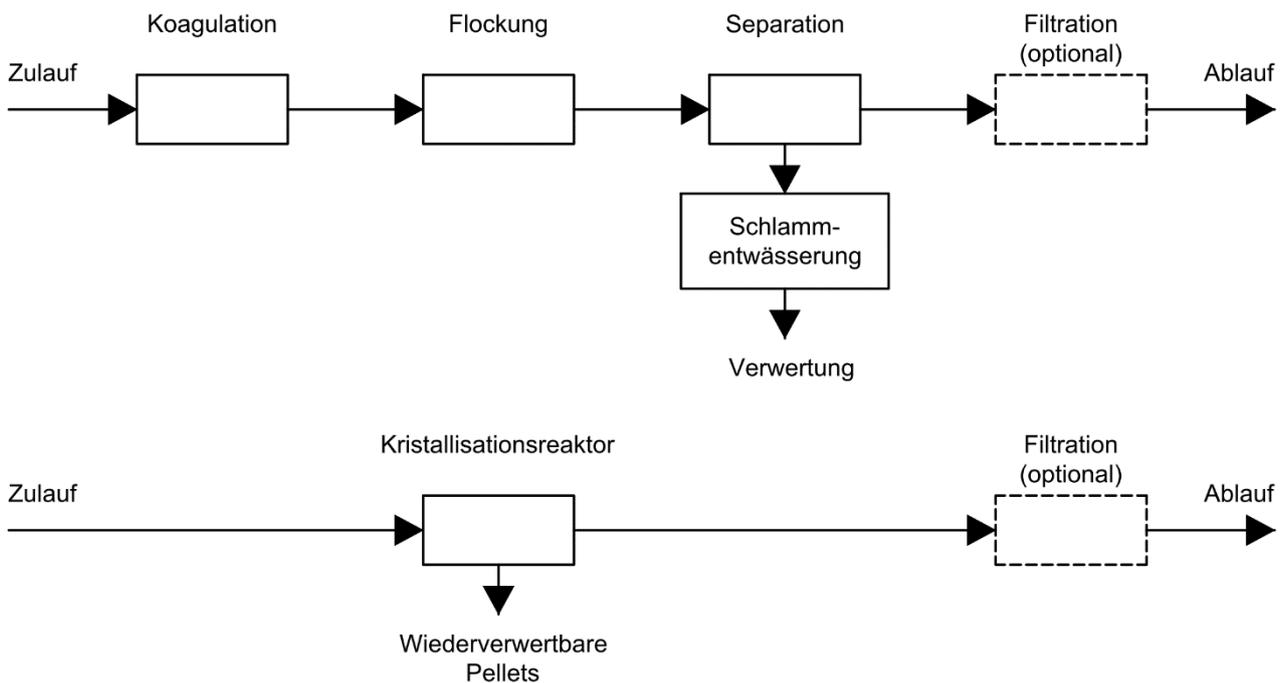


Bild 9: Vergleich der Verfahrensstufen einer konventionellen chemischen Phosphorelimination (oben) zum Kristallisationsverfahren (unten) (in Anlehnung an Piekema & Giesen, 2001)

Weitere Vor- und Nachteile des Kristallisationsverfahrens sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Vor- und Nachteile der Phosphorelimination mittels Kristallisation

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Rückgewinnung von Phosphor (hohe Reinheit) • Kompakte Bauweise des Reaktors • Einfache Nachrüstung bei bestehenden Kläranlagen • Kein Fällschlamm 	<ul style="list-style-type: none"> • Bisher wenige Erfahrungswerte • Für einen wirtschaftlichen Betrieb sind hohe Phosphorfrachten im Zulauf notwendig • z. T. für kommunale Kläranlagen nur ökonomisch bei vorheriger Phosphoranreicherungsstufe • Anschließende Filtration notwendig

Neben dem DHV-Crystalactor wurden noch andere Verfahren entwickelt, die auf demselben Prinzip basieren. Das CSIR-Verfahren verwendet beispielsweise verschiedene Materialien als Kristallisationskeime und ermöglicht somit die Produktion von Hydroxylapatit ($\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$) oder Struvit. Bisher wurde jedoch abgesehen vom DHV-Crystalactor noch keine dieser Technologien über den Labor- oder Pilotmaßstab hinaus weiterentwickelt. Ein Überblick über die Kristallisationsverfahren ist in dem Review-Artikel von Morse et al. (1998) gegeben. In der nachfolgenden Tabelle 13 sind einige Beispiele zusammengestellt:

Tabelle 13: Kristallisation zur Phosphorelimination

Referenz	Verfahren	Maßstab	Abwasser	Zulauf	Ablauf
				P _{ges} [mg/L]	P _{ges} [mg/L]
Piekema & Giesen, 2001	DHV-Crystallator	Großtechnische Anwendung	Abwasser aus Lebensmittelindustrie	120-150	10
Piekema & Giesen, 2001	DHV-Crystallator	Großtechnische Anwendung	Kommunales Abwasser	10	0,5
Piekema & Giesen, 2001	DHV-Crystallator	Großtechnische Anwendung	Kommunales Abwasser (mit biologischer Phosphoranreicherung)	60-80	
Joko, 1985	Kurita	Labormaßstab	Kommunales Abwasser (sekundär)	1-6	0,3-0,5
Angel, 1999	Sydney Water Board	Pilotanlage	Kommunales Abwasser (sekundär)	Ø 5,1	Ø 0,14

3.4.3.6 Fällungsverfahren zur Phosphorrückgewinnung (Präzipitation)

Neben dem Ionenaustausch und der Kristallisation wurden auch neue Fällungsverfahren zur Rückgewinnung des Phosphors (Präzipitation) entwickelt, die den hochwertigen Dünger Struvit als Produkt liefern.

Bei dem PHOSPAQ-Verfahren wird das Abwasser in einen belüfteten Durchfluss-Rührkessel (CSTR; *continous stirred tank reactor*) geleitet. Durch die Belüftung kommt es zur Ausstrippung von CO₂ und somit zu einem Anstieg des pH-Werts. Unter Zugabe von Magnesiumoxid fällt Struvit bei einem pH-Wert von 8,2-8,3 aus und wird durch einen Separator an der Oberseite des Reaktors im Tank zurückgehalten. Das Struvit kann dann von unten aus dem Tank abgezogen werden. Bisher ist das Verfahren nur auf einer kartoffelverarbeitenden Industrieanlage in den Niederlanden zur Behandlung des anaeroben Abwassers aus einem aufwärtsdurchströmten Anaerobreaktor (UASB; *up-flow anaerobic sludge blanket reactor*) großtechnisch im Einsatz. Zusätzlich wird in der Anlage das aus der Schlammfäulung anfallende Wasser einer kommunalen Kläranlage behandelt, sodass bei einer Phosphatentfernung > 80 % rund 1,2 Tonnen Struvit pro Tag gewonnen werden können (Desmidt et al., 2015).

Beim ANPHOS-Verfahren kommen zwei separate Batchreaktoren zum Einsatz. Im ersten Reaktor kommt es durch Belüftung zu einer CO₂-Strippung und damit verbunden zu einem pH-Wert-Anstieg. Im zweiten Tank erfolgt die Magnesiumoxidzugabe zur Gewinnung von Struvit. Bisher wird das Verfahren auf zwei kartoffelverarbeitenden Industrieanlagen sowie auf einer kommunalen Kläranlage

zur Gewinnung von Phosphor aus dem Abwasser der Schlammwässerung eingesetzt. Dabei wird ein Gesamtphosphorrückhalt von 80-90 % erreicht (Desmidt et al., 2015).

Weitere Technologien zur Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserstrom oder dem Klärschlamm sind beispielsweise das AirPrex-, Phosnix- und das NuReSys-Verfahren. Da für die Präzipitation von Struvit hohe Ammoniumkonzentrationen benötigt werden, wurden diese Verfahren bisher vor allem zur Behandlung von Industrieabwässern (z. B. Schweinehaltungsanlagen) eingesetzt. Langfristig wird die Implementierung solcher Systeme zur Behandlung von Teilströmen (Prozessabwässer aus der Klärschlammbehandlung) auf kommunalen Kläranlagen in Betracht gezogen (Desmidt et al., 2015).

4 Kenndaten und Bilanzierung der Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen

4.1 Betrachtung des Ist-Zustandes auf bayerischen Kläranlagen

4.1.1 Allgemeine Betrachtungen

Bei einer Auswertung des Statistischen Bundesamtes wurden in Bayern für das Jahr 2013 2.480 Kläranlagen (≥ 50 EW) mit einer Gesamtausbaugröße von ca. 26,9 Mio. EW und einer mittleren Jahresbelastung von ca. 20,9 Mio. EW verzeichnet (Statistisches Bundesamt Wiesbaden, 2015). Davon fallen 1,5 % der Anlagen in die GK 5 (43 % der Jahresabwassermenge) und 13,8 % in die GK 4 (38 % der Jahresabwassermenge). Somit sind bisher 15,3 % der erfassten Anlagen in Bayern mit einem Anteil von ca. 81 % an der Jahresabwassermenge (entspricht 1,49 Mrd. m³) entsprechend der Abwasserabgabenverordnung (AbwV, 2004) verpflichtet, Überwachungswerte für Phosphor im Endablauf einzuhalten. Bei den Kläranlagen der GK 1 bis GK 3 betrug die Jahresabwassermenge im Jahr 2013 354 Mio. m³, was ca. 19 % des in Bayern angefallenen Abwassers (Schmutzwasser, Fremdwasser und Niederschlagswasser) entspricht.

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes verfügen 3.855 Kläranlagen der insgesamt 9.307 in Deutschland erfassten Anlagen (≥ 50 EW) über Ausbaustufen zur gezielten Phosphorentfernung (Statistisches Bundesamt Wiesbaden, 2015). Davon befinden sich 803 Anlagen in Bayern (behandeln ca. 87 % der Jahresabwassermenge). Für 99,3 % aller Kläranlagen lagen Daten für das Jahr 2013 zu den Phosphorfrachten im Ablauf vor. Die berechnete Jahresfracht für Bayern betrug 1.789 t/a und dies entspricht einer durchschnittlichen Ablaufkonzentration von 1,0 mg P_{ges}/L (Statistisches Bundesamt Wiesbaden, 2015). Die 803 Kläranlagen mit gezielter Phosphorelimination haben mit einer durchschnittlichen Ablaufkonzentration von 0,8 mg P_{ges}/L im Jahr 2013 eine Phosphorfracht von 1.212 t in die bayerischen Gewässer eingeleitet. Der Anteil der Kläranlagen der GK 5 an den Phosphoremissionen lag im Jahr 2013 bei knapp 24 % mit einer Jahresfracht von 431 t/a. Mit 31 % (562 t/a) hatten die Anlagen der GK 4 den größten Anteil. Somit wird ca. 45 % (796 t/a) der jährlichen Phosphorfracht in Bayern von Kläranlagen, die derzeit keine Vorgaben zur Einhaltung von Überwachungswerten nach der Abwasserabgabenverordnung haben, emittiert. Von diesen haben die bayerischen Kläranlagen der GK 2 einen Anteil von ca. 26 % (465 t/a) an den Phosphoremissionen, sodass diese kleineren Kläranlagen einen großen Anteil an den Gesamtemissionen haben. Ausgewählte Daten des Statistischen Bundesamtes sind in der Tabelle 14 zusammengefasst und zeigen eine gute Übereinstimmung mit den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Berechnungen für das Jahr 2013.

Tabelle 14: Zusammenfassung der in DABay erfassten Daten zu der Anzahl der kommunalen Kläranlagen in Bayern (≥ 50 EW) mit Angaben zum Phosphoraufkommen für die Jahre 2010-2015

Größenklasse	2010	2011	2012	2013	2013b*	2014	2015***
Anzahl KA [-]							
GK 1-5	2.626	2.605	2.583	2.523	2.480	2.523	2.468
GK 1	1.241	1.223	1.209	1.171	1.104	1.170	1.143
GK 2	778	776	769	759	778	759	746
GK 3	230	230	229	219	219	220	221
GK 4	340	340	339	337	343	337	322
GK 5	37	37	37	37	36	37	36
Jahresabwassermenge [1.000 m³]							
GK 1-5	1.790.704	1.660.417	1.669.579	1.811.839	1.848.516	1.492.313	1.489.851
GK 1	35.438	31.810	30.932	33.335	33.569	26.771	25.522
GK 2	183.490	162.935	166.103	181.052	182.362	142.811	144.233
GK 3	144.988	130.142	133.674	142.623	138.405	114.095	116.720
GK 4	674.089	616.267	632.168	685.903	698.375	562.151	546.408
GK 5	752.700	719.263	706.702	768.925	795.805	646.485	656.968
Phosphorfracht im Ablauf [t/a]							
GK 1-5	1.687	1.668	1.684	1.679	1.789	1.430	1.378
GK 1	94	98	100	87	93	88	87
GK 2	476	465	473	449	465	406	407
GK 3	244	234	236	229	238	197	196
GK 4	502	484	487	504	562	411	395
GK 5	371	387	388	410	431	328	293
Konzentration im Ablauf [mg P_{ges}/L]							
GK 1-5	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9
GK 1	2,7	3,1	3,2	2,6	2,5-2,9**	3,3	3,4
GK 2	2,6	2,9	2,8	2,5	2,4-2,9**	2,8	2,8
GK 3	1,7	1,8	1,8	1,6	1,7	1,7	1,7
GK 4	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6-0,9**	0,7	0,7
GK 5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4

* Statistisches Bundesamt Wiesbaden (2015); ** Aufschlüsselung nicht nach GK, sondern nach mehreren Kategorien;

*** Stand März 2017 fehlten noch Daten für 2015 – allein ca. 14 t P fehlen von einer Kläranlage der GK 5

Dabei basieren die in diesem Projekt verwendeten Daten nicht nur auf Angaben in DABay (Datenverbund Abwasser Bayern), sondern wurden zusätzlich durch eigene Erhebungen ergänzt und mit den Daten aus DWA (2016) abgeglichen. Bei den Auswertungen ist zu beachten, dass die Jahre 2014 und 2015 vergleichsweise trocken waren.

Die detaillierte Auswertung der in DABay erfassten Kläranlagen für die Jahre 2010-2015, welche ebenfalls nur Anlagen ab mindestens 50 EW (Bemessungsgröße gemäß Genehmigungsbescheid) berücksichtigte, ergab vergleichsweise große Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren (Tabelle 14).

Außerdem wurden die Daten der Anlagensysteme nach zehn Kategorien und sowohl nach Größenklassen als auch nach Jahren geordnet, ausgewertet (Tabelle 15). Für die Jahre 2010 bis 2015 ist eine geringe Abnahme der Anzahl der bayerischen Kläranlagen zu verzeichnen, besonders bei der GK 1 sowie bei den mechanischen Behandlungsanlagen und den Abwasserteichen, welche die nach den Belebungsanlagen am meisten verwendeten Anlagensysteme sind. Die Verteilung der Anlagensysteme ist besonders abhängig von der Größenklasse und den damit verbundenen Anforderungen, sodass Pflanzenkläranlagen, Abwasserteiche (unbelüftet oder belüftet und ggf. mit technischer Zwischenstufe) sowie Rotationstauchkörper vermehrt bei den kleineren Anlagen zur Behandlung kommunaler Abwässer in Bayern verwendet werden, wohingegen mit Zunahme der Ausbaugröße Tropfkörperanlagen, Belebungsanlagen sowie mehrstufige biologische Anlagen zur Anwendung kommen. Dieser Zusammenhang zwischen Größenklasse und Kläranlagensystem ist, neben der absoluten Anzahl der Anlagensysteme, auch für die Bewertung der Phosphorelimination bedeutsam. Dies betraf sowohl die Auswahl der zehn zu bilanzierenden Anlagen als auch die Methodik der Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf ganz Bayern sowie zur Berechnung der spezifischen Investitions- und Betriebskosten in den folgenden Kapiteln.

Tabelle 15: Zusammenfassung der in DABay erfassten Daten zu der Anzahl der kommunalen Kläranlagen in Bayern (≥ 50 EW) mit Angaben zum Anlagensystem für die Jahre 2011, 2013 und 2015

Größenklasse	GK 1-5	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
2011: 2.605 Anlagen*						
Abwasserteich (belüftet)	149	64	83	2	-	-
Abwasserteich (unbelüftet)	636	614	21	1	-	-
Abwasserteich (technisch)	305	159	140	5	1	-
Belebungsanlage	330	48	37	32	190	23
Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabil.	737	104	359	161	112	1
Mechan. Behandlungsanlage	43	42	1	-	-	-
Mehrstufige biolog. Anlage	53	6	5	3	26	13
Pflanzenkläranlage	46	46	-	-	-	-
Rotationstauchkörperanlage	134	102	32	-	--	-
Tropfkörperanlage	171	37	98	25	11	-
2013: 2.523 Anlagen*						
Abwasserteich (belüftet)	142	62	78	2	-	-
Abwasserteich (unbelüftet)	610	588	21	1	-	-
Abwasserteich (technisch)	301	158	137	5	1	-
Belebungsanlage	327	47	36	31	190	23
Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabil.	724	103	356	154	110	1
Mechan. Behandlungsanlage	31	31	-	-	-	-
Mehrstufige biolog. Anlage	52	6	5	3	25	13
Pflanzenkläranlage	46	46	-	-	-	-
Rotationstauchkörperanlage	126	94	32	-	-	-
Tropfkörperanlage	163	35	94	23	11	-
2015: 2.468 Anlagen*						
Abwasserteich (belüftet)	136	62	72	2	-	-
Abwasserteich (unbelüftet)	587	568	18	1	-	-
Abwasserteich (technisch)	296	156	134	5	1	-
Belebungsanlage	319	49	39	31	178	22
Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabil.	729	109	355	157	107	1
Mechan. Behandlungsanlage	21	21	-	-	-	-
Mehrstufige biolog. Anlage	50	5	5	2	25	13
Pflanzenkläranlage	44	44	-	-	-	-
Rotationstauchkörperanlage	128	96	32	-	-	-
Tropfkörperanlage	157	32	91	23	11	-

* zusätzlich je eine PWC-Anlage (450 EW)

Die aktuelle Auswertung der Statistikdaten aus DABay für das Jahr 2015 ergab, dass die Kläranlagen der GK 2-4 zu den wesentlichen Phosphoremittenten gehören (Tabelle 14 sowie Bild 10 links), wobei die Kläranlagen mit Ausbaugrößen bis 10.000 EW oftmals noch keine weitestgehende Phosphorelimination betreiben. Außerdem kommt den Belebungsanlagen (Tabelle 15) aufgrund der großen Anzahl eine hohe Bedeutung bei der Phosphorelimination zu. So stellen die Belebungsanlagen einschließlich der mehrstufigen biologischen Anlagen ca. 44,5 % aller Anlagen und emittieren ca. 77 % der gesamten Phosphorfracht (Bild 10 rechts). Dies hängt aber auch mit dem hohen Anteil dieser Anlagen an der gesamten Jahresabwassermenge der kommunalen Kläranlagen von ca. 92 % zusammen. Andererseits sind die Phosphoremissionen aus Pflanzenkläranlagen sowie mechanischen Behandlungsanlagen mit jeweils ca. 0,1 % für eine großflächige Betrachtung vernachlässigbar gering, sodass auf diese beiden Anlagentypen im Folgenden nicht weiter eingegangen wird.

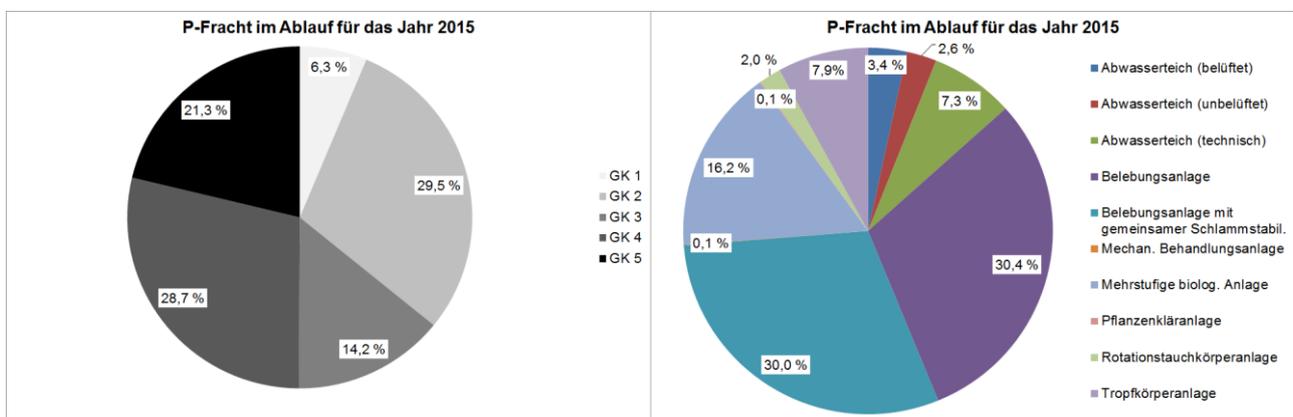


Bild 10: Anteile an den Phosphorfrachten im Ablauf bayerischer Kläranlagen (≥ 50 EW) für das Jahr 2015, aufgeschlüsselt nach Größenklassen (links) sowie nach Anlagensystemen (rechts)

4.1.2 Datenqualität

Bei den Auswertungen ist zu beachten, dass zwar für fast alle Kläranlagen Messwerte aus amtlichen Überwachungen (ÜW) sowie durch den Kläranlagenbetreiber genommene Ablaufproben vorliegen, jedoch nur ca. die Hälfte der Kläranlagen Zulaufkonzentrationen auf Gesamtphosphor analysiert und diese Werte in die Datenbank DABay einträgt. Für die statistische Auswertung ist nicht nur die Gesamtanzahl der Kläranlagen mit Messwerten wichtig, sondern auch die Robustheit der Daten. Diese Beschaffenheit hängt nicht nur von der Anzahl der pro Kläranlage und Jahr entnommenen Proben ab, sondern auch von der Methodik der Probenahme, Analytik und Auswertung. Viele dieser wichtigen Einflussgrößen hängen vornehmlich mit den Anforderungen aus der EÜV (1995) (z. B. Parameterumfang, Häufigkeit der Untersuchungen und Probenart) zusammen. So sind für knapp 28 % der bayerischen Kläranlagen nur sechs oder weniger Messwerte für die Ablaufkonzentrationen für das Jahr 2015 verfügbar. Bei rund 45 % der Anlagen wurde maximal 13 Mal im Jahr gemessen (dies

entspricht meist einer Probe pro Monat und zusätzlich eine amtliche Überwachung pro Jahr). Dahingegen messen knapp 30 % aller Anlagenbetreiber mindestens einmal pro zwei Wochen die Ablaufkonzentrationen an Gesamtposphor. Bei 22 Anlagen der GK 4 und 15 Anlagen der GK 5 werden tägliche Werte für den Ablauf erfasst und in DABay eingepflegt. Für den Zulauf liegen nur bei drei Anlagen der GK 4 und sechs Anlagen der GK 5 tägliche Werte für Gesamtposphor vor. Bei ca. 15 % aller Anlagen werden mindestens einmal pro zwei Wochen die Zulaufkonzentrationen an Gesamtposphor gemessen, sodass es deutlich weniger Zulaufmesswerte (ca. 32.400) als Ablaufmesswerte (ca. 66.000) für das Jahr 2015 in DABay gibt. Eine statistische Auswertung der Anzahl an Messungen ist in Tabelle 16 zusammengefasst. Dabei liegen für das Jahr 2015 von 2.458 Kläranlagen Daten zu der Anzahl der amtlichen Überwachungen vor, bei 2.382 Kläranlagen Daten zur Anzahl der Messungen im Ablauf sowie bei 1.339 Anlagen Daten zur Anzahl der Messungen im Zulauf vor.

Tabelle 16: In DABay erfasste Daten kommunaler Kläranlagen in Bayern (≥ 50 EW) bezüglich der Anzahl an Gesamtposphormesswerten (Flüssigproben) pro Kläranlage für das Jahr 2015

Bezeichnung	Minium	25 %- Perzentil	Median	Mittelwert	75 %- Perzentil	Maximum
Anzahl amtliche ÜW	0	1	2	2	2	6
Anzahl Messungen Ablauf	0	5	12	28	29	365
Anzahl Messungen Zulauf	0	8	12	24	28	365

Dieser Umstand hat auch einen großen Einfluss auf die Bilanzierung, besonders der kleineren Kläranlagen (siehe Kapitel 4.2). Hierbei hat neben den sehr wenigen Probenahmen pro Kläranlage besonders die Methodik der Probenahme (Stichprobe und Zeitpunkt) einen großen Einfluss auf das Ergebnis (siehe auch Kapitel 9 in Barjenbruch & Exner (2009)), wobei auch der zeitliche Versatz zwischen zusammengehörigen Zulauf- und Ablaufproben sehr individuell umgesetzt ist. Ferner ist die Verschiebung der Probenahme um jeweils 1 Tag und um 2 Stunden bei kleineren Kläranlagen oftmals nicht praktikabel umsetzbar.

4.1.3 Phosphorzulaufsrachten

Für das Jahr 2015 liegen von 1.592 Kläranlagen in Bayern (ca. 85 % der Jahresabwassermenge) Angaben zur mittleren Zulaufkonzentration sowie zu den angeschlossenen Einwohnern (Belastungsfall) vor. Zur Charakterisierung der Variabilität der Zulaufsrachten an Gesamtposphor sind diese auf die angeschlossenen Einwohner und die dazugehörigen Jahresabwassermengen, bezogen auf das Jahr 2015, in Bild 11 dargestellt. Dabei weißten die berechneten einwohnerspezifischen

Phosphorfrachten eine breite Streuung auf, welche meist aus einer Verdünnung mit Fremdwasser oder aus einer Belastung durch angeschlossene Industrieanlagen resultiert, aber teils auch aus den Unsicherheiten der gemessenen Konzentrationen bei nur wenigen Messdaten sowie den ermittelten angeschlossenen Einwohnern stammen kann. Die Spitzenwerte der mittleren Zulauffrachten lagen bei allen Größenklassen über 5,0 g/(EW·d). Der Mittelwert aus den einzelnen mittleren Zulauffrachten aller betrachteten Kläranlagen lag bei 2,4 g/(EW·d). Frachtgemittelt aus der Summe der Gesamtposphorzulauffracht aller Kläranlagen mit Messwerten und der Summe der zugehörigen angeschlossenen Einwohner ergeben die Daten für Bayern einen Mittelwert für die einwohnerspezifische Phosphorfracht von 1,5 g/(EW·d). Bei dieser Art der Auswertung fallen die größeren Kläranlagen, für die mehr Messwerte vorliegen, stärker ins Gewicht. Dieser niedrigere Wert ist vergleichbar mit dem typischen Wertebereich anderer Veröffentlichungen (1,6-1,8 g/(EW·d) nach DWA (2011) oder 1,66 g/(EW·d) nach ATV-DVWK-Arbeitsbericht (2003)). Bei diesem Wert ist aber zu beachten, dass bei manchen Kläranlagen die Zulaufkonzentrationen nach der Vorklärung (Sandfang bzw. Vorklärbecken) gemessen wurden und diese somit geringer als im Zulauf zur Kläranlage sind.

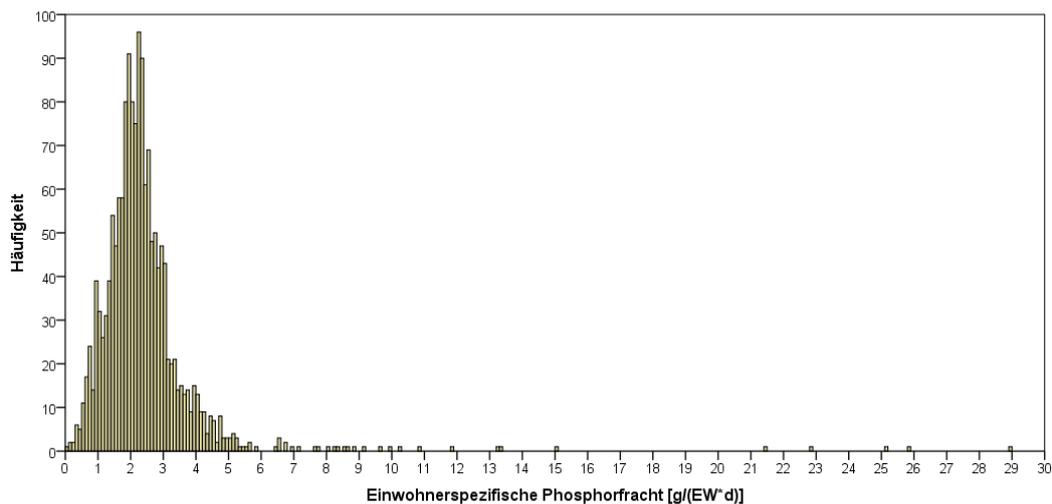


Bild 11: Häufigkeitsverteilung der einwohnerspezifischen Phosphorfrachten im Zulauf der bayerischen kommunalen Kläranlagen für das Jahr 2015 (n=1.592), teilweise mit hohem Industrieinfluss; Datenquelle: LfU/DABay 2015

Zusammenfassend liegen die berechneten Werte im Bereich der bisherigen Erfahrungswerte für die Phosphorfracht, zeigen aber aufgrund von Messungenauigkeiten sowie kläranlagenspezifischer Einflussfaktoren eine weite Streuung auf, sodass eine generelle Übertragbarkeit der Ergebnisse von den zehn ausgewählten Kläranlagen (siehe Kapitel 4.2) auf andere Anlagen nicht immer gegeben ist, da beispielsweise individuell erhöhte oder stark reduzierte Phosphorzulauffrachten und Konzent-

rationen, auch in Abhängigkeit von der verfügbaren Kohlenstoffquelle, einer besonderen Behandlung bedürfen. Dabei unterliegen die kleineren Anlagen besonders starken Schwankungen im Zulaufsignal.

4.1.4 Wirkungsgrade der Phosphorelimination

Der jeweilige Wirkungsgrad der Gesamtposphorelimination wurde für jede Kläranlage auf Grundlage der durch eigene Umfragen erweiterten DABay-Daten für das Jahr 2015 berechnet bzw. es wurde der in DWA (2016) angegebene Wert übernommen. Die resultierende Häufigkeitsverteilung ist für alle Kläranlagen sowie aufgeschlüsselt nach Größenklassen in Bild 12 dargestellt. Die Wirkungsgrade in Bezug auf den Gesamtposphorrückhalt variieren zwischen -15 % und 99 % für alle Kläranlagen. Die negativen Wirkungsgrade ergaben sich bei Anlagen mit lediglich 1-4 Zulaufkonzentrationsmessungen und sind daher wenig robust, da die Anzahl der Messungen auf die Beurteilung der kleinen Anlagen neben den allgemeinen Faktoren der Probenahme und deren Vorbereitung einen sehr großen Einfluss hat (siehe Kapitel 4.1.2). Bei den Kläranlagen der GK 1 wird der Wirkungsgrad meist durch die reine Schlammabnahme erreicht. Bei den Anlagen der GK 2 und GK 3 beruht die Phosphorreduktion vermehrt auf weiteren Verfahren. Die Kläranlagen der GK 4 und GK 5, welche alle über ein chemisches Verfahren zur Phosphorelimination verfügen, weisen besonders hohe Wirkungsgrade auf. Diese liegen bei GK 5 in der Regel bei über 85 %. Bei GK 4 haben aufgrund des geringeren Anforderungsniveaus Anlagen auch einen geringeren Wirkungsgrad als 85 % (Bild 12).

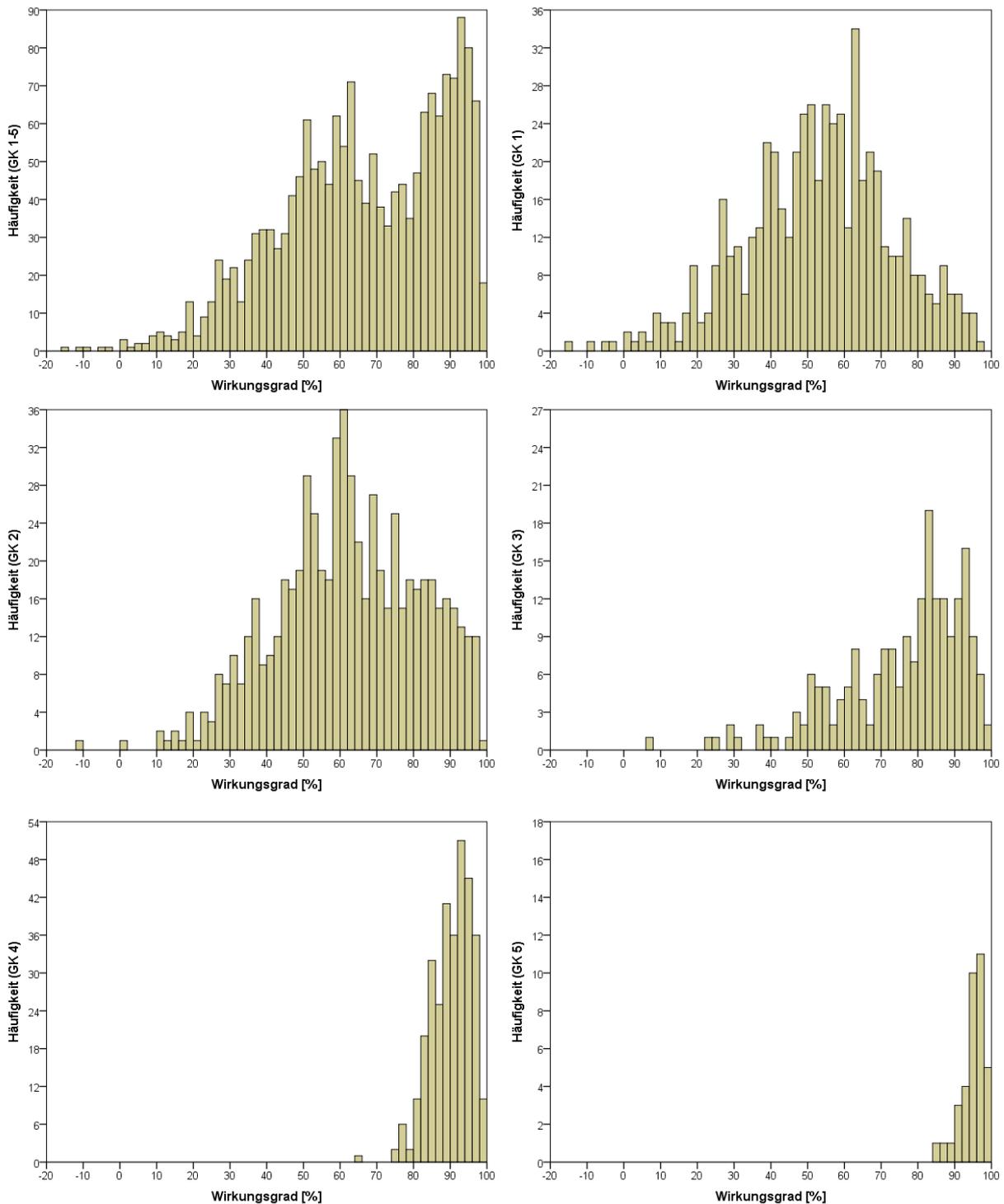


Bild 12: Wirkungsgrade in Bezug auf die Gesamtphosphorelimination (Mittelwerte pro Kläranlage) aller bayerischen Kläranlagen (GK 1-5, n=1.770), kategorisiert nach Größenklassen (n=560/648/209/317/36); Datenquelle: LfU/DABay 2015 bzw. DWA (2016)

4.1.5 Ablaufkonzentrationen für Gesamtphosphor

Im Vergleich zu den Wirkungsgraden ist die absolute Abnahme der Phosphorkonzentration (ΔP = Differenz aus der Zulaufkonzentration und der Ablaufkonzentration) in der Kläranlage weitestgehend unabhängig von der Größenklasse, sodass die Häufigkeitsverteilungen vergleichbar für alle Größenklassen sind (Bild 13). Bei den 17 kommunalen Kläranlagen der GK 1-4, die ein ΔP von über 20 mg P_{ges}/L aufweisen, liegen die mittleren Ablaufkonzentrationen zwischen 0,3 mg P_{ges}/L und 5,7 mg P_{ges}/L sowie die Wirkungsgrade zwischen 81 % und 99 %. Die Anforderungswerte im Ablauf liegen zwischen 1,0 mg P_{ges}/L und 15 mg P_{ges}/L für diese 17 Anlagen in Bayern. Folglich ist auch bei hohen Zulaufkonzentrationen eine weitestgehende Phosphorelimination möglich, mit der die jeweilige Anforderung an die Ablaufkonzentrationen eingehalten werden kann.

Die mittlere Ablaufkonzentration liegt im Regelfall bei der einzelnen Kläranlage unterhalb des wasserrechtlichen Anforderungswertes. In Bild 14 sind die Häufigkeitsverteilungen der mittleren Ablaufkonzentrationen in den einzelnen Größenklassen dargestellt. Daraus wird z. B. erkennbar, dass der Mittelwert bei keiner bayerischen Kläranlage der GK 5 über 0,8 mg P_{ges}/L liegt (Mindestanforderung: 1,0 mg P_{ges}/L). Aus der Darstellung kann auch abgeleitet werden, bei wie vielen Kläranlagen Maßnahmen erforderlich wären, um einen bestimmten strengeren Mittelwert einhalten zu können (bzw. den damit verbundenen strengeren Anforderungswert) (siehe auch Kapitel 5).

4.1.6 Verfahrenstechniken zur Phosphorelimination

In Abhängigkeit von den Zulaufmengen, den Anlagensystemen, den Anforderungen und weiteren Parametern werden die Verfahren zur Entfernung des Gesamtphosphors auf Kläranlagen ausgewählt. 737 Anlagen in Bayern verfügten im Jahr 2015 über Ausbaustufen zur gezielten Phosphorentfernung (diese behandelten ca. 89 % der Jahresabwassermenge) (Daten in DABay, welche durch eigene Umfragen sowie weitere Daten aus DWA (2016) ergänzt wurden). Die restlichen 11 % der Gesamtjahresabwassermenge ohne gezielte Phosphorelimination beinhalten ca. 37 % der bayerischen Gesamtfracht aus Kläranlagenabläufen.

Von den 737 kommunalen Anlagen mit weitergehenden Verfahren zur Phosphorelimination gab es in Bayern im Jahr 2015 nach den ergänzten Daten in DABay (u. a. bereinigt um drei Anlagen der GK 4, welche mittlerweile auch eine chemische Phosphatfällung verwenden) zehn Kläranlagen, die ein reines Bio-P-Becken ohne chemische Fällung verwendeten. Vier der Kläranlagen sind Belebungsanlagen der GK 3, fünf sind Belebungsanlagen der GK 2 und eine GK 2-Kläranlage hat als Anlagensystem einen Rotationstauchkörper.

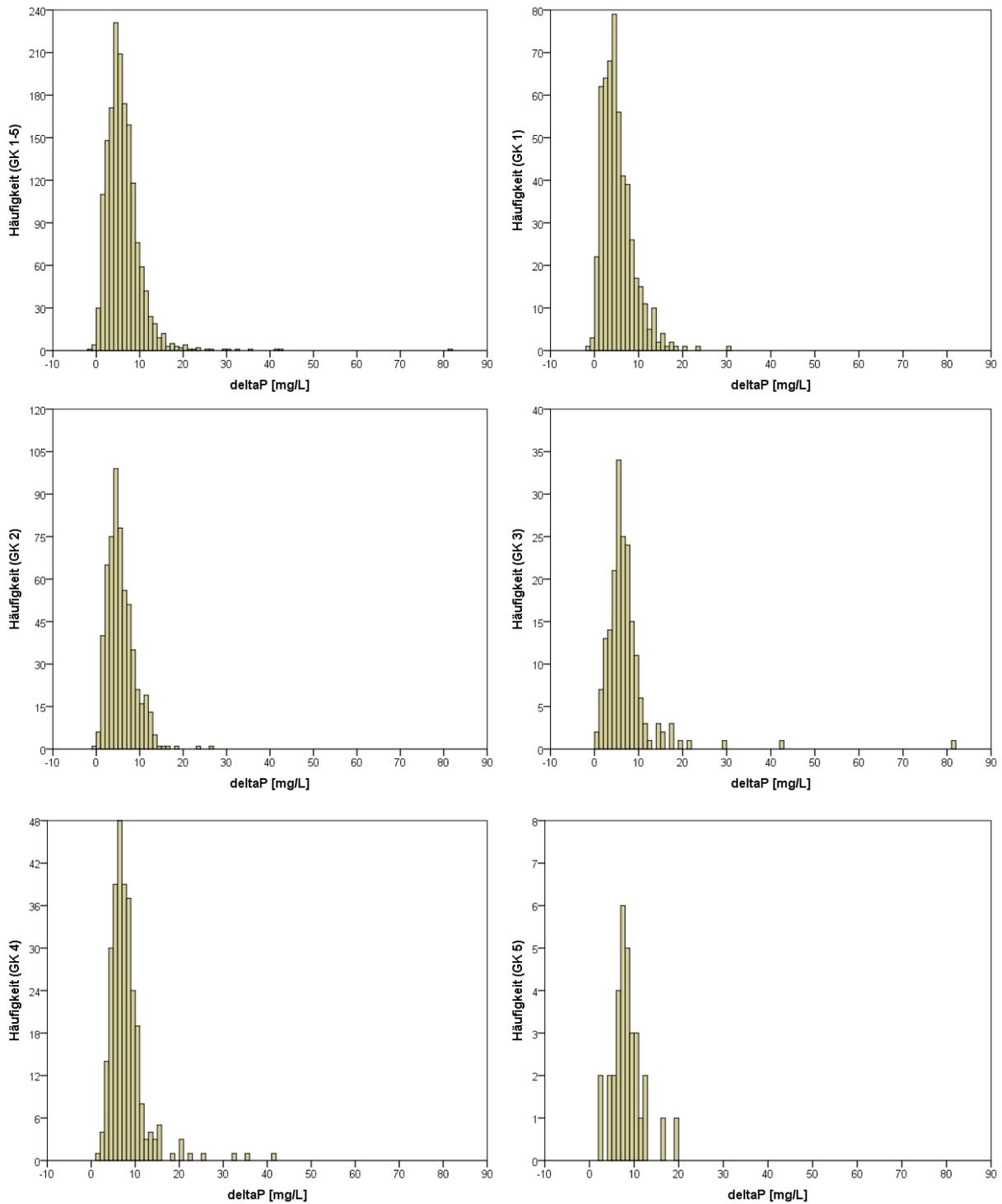


Bild 13: Differenzen der Zulauf- und Ablaufkonzentrationen (deltaP) des Parameters P_{ges} (Mittelwerte pro Kläranlage) aller bayerischen Kläranlagen (GK 1-5, $n=1.626$), kategorisiert nach Größenklassen ($n=532/586/189/287/32$); Datenquelle: LfU/DABay 2015

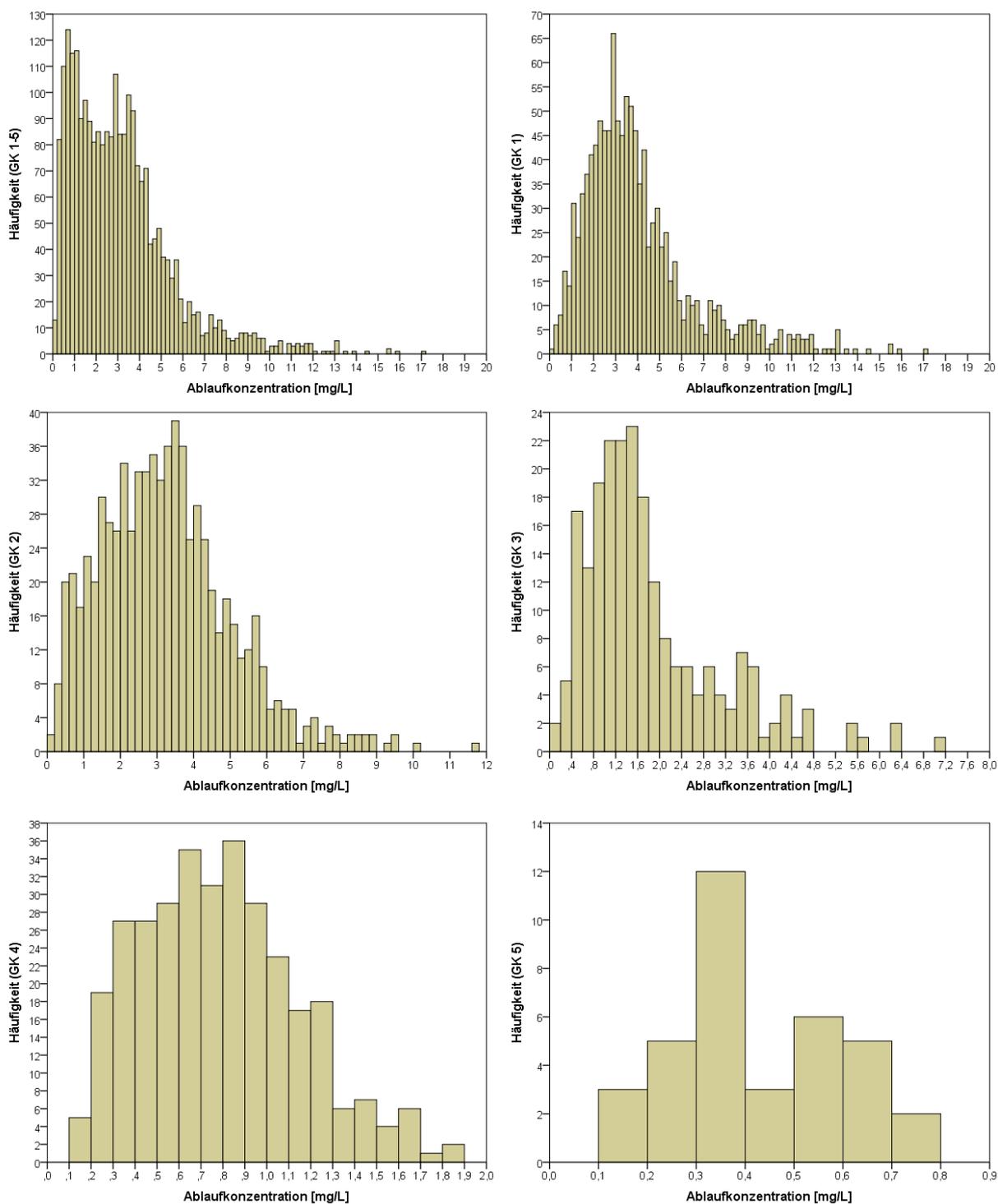


Bild 14: Ablaufkonzentrationen des Parameters P_{ges} (Mittelwerte pro Kläranlage) aller bayerischen Kläranlagen (GK 1-5, $n=2.454$), kategorisiert nach Größenklassen ($n=1.135/741/220/322/36$); Datenquelle: LfU/DABay 2015

Die Anforderungen an diese Kläranlagen sind im Vergleich zu den Bio-P-Anlagen mit chemischer Fällung (0,5-12 mg P_{ges}/L) meist niedriger (3-6 mg P_{ges}/L), wobei bei diesen Anlagen die Zulaufkonzentrationen im Jahr 2015 im Mittel zwischen 4 mg P_{ges}/L und 11 mg P_{ges}/L ($n=8$) variierten. Bei den Anlagen der GK 4 und GK 5 sind keine reinen Bio-P-Becken im Betrieb.

Eine Zusammenfassung der Anzahl der Kläranlagen mit chemischer Fällung (641 Anlagen) und Anlagen mit Bio-P-Becken und chemischer Fällung (86 Anlagen) ist in Tabelle 17 nach Größenklassen und Anlagensystemen kategorisiert wiedergegeben. Während die zusätzlichen Bio-P-Becken meist nur in Belebungsanlagen integriert werden, kann die reine chemische Fällung in allen Anlagensystemen verwendet werden. Bei einigen Anlagensystemen ist jedoch eine Dosierung als Vor- oder Simultanfällung nicht immer an allen Stellen möglich ist. Beispielsweise kann bei Tropfkörperanlagen die Dosierung als Simultanfällung nur in den Zulauf zur Nachklärung erfolgen (siehe auch Kapitel 4.4).

Tabelle 17: Zusammenfassung der in DABay, DWA (2016) und eigenen Recherchen erfassten Daten kommunaler Kläranlagen (≥ 50 EW) mit Angaben zum Anlagensystem für das Jahr 2015

	GK 1-5	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Bio-P-Becken und chemische Fällung						
Abwasserteich (technisch)	1	-	1	-	-	-
Belebungsanlage	51	-	1	2	39	9
Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabil.	30	1	2	7	19	1
Mehrstufige biolog. Anlage	4	-	-	-	3	1
Chemische Fällung ohne vermehrte Bio-P						
Abwasserteich (belüftet)	6	1	5	-	-	-
Abwasserteich (unbelüftet)	2	2	-	-	-	-
Abwasserteich (technisch)	19	6	10	2	1	-
Belebungsanlage	198	10	14	22	139	13
Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabil.	311	8	114	101	88	-
Mehrstufige biolog. Anlage	36	-	1	1	22	12
Pflanzenkläranlage	1	1	-	-	-	-
Rotationstauchkörperanlage	17	10	7	-	-	-
Tropfkörperanlage	51	2	22	16	11	-

Eine Zusammenfassung der Anforderungswerte für Gesamtphosphor sowie der mittleren Ablaufwerte der bayerischen Kläranlagen mit gezielter Phosphorelimination ist differenziert nach Größenklassen und den drei Verfahren „Bio-P-Becken“, „Bio-P-Becken mit Phosphatfällung“ sowie reine „Phosphatfällung“ in Bild 15 für die 737 Anlagen dargestellt.

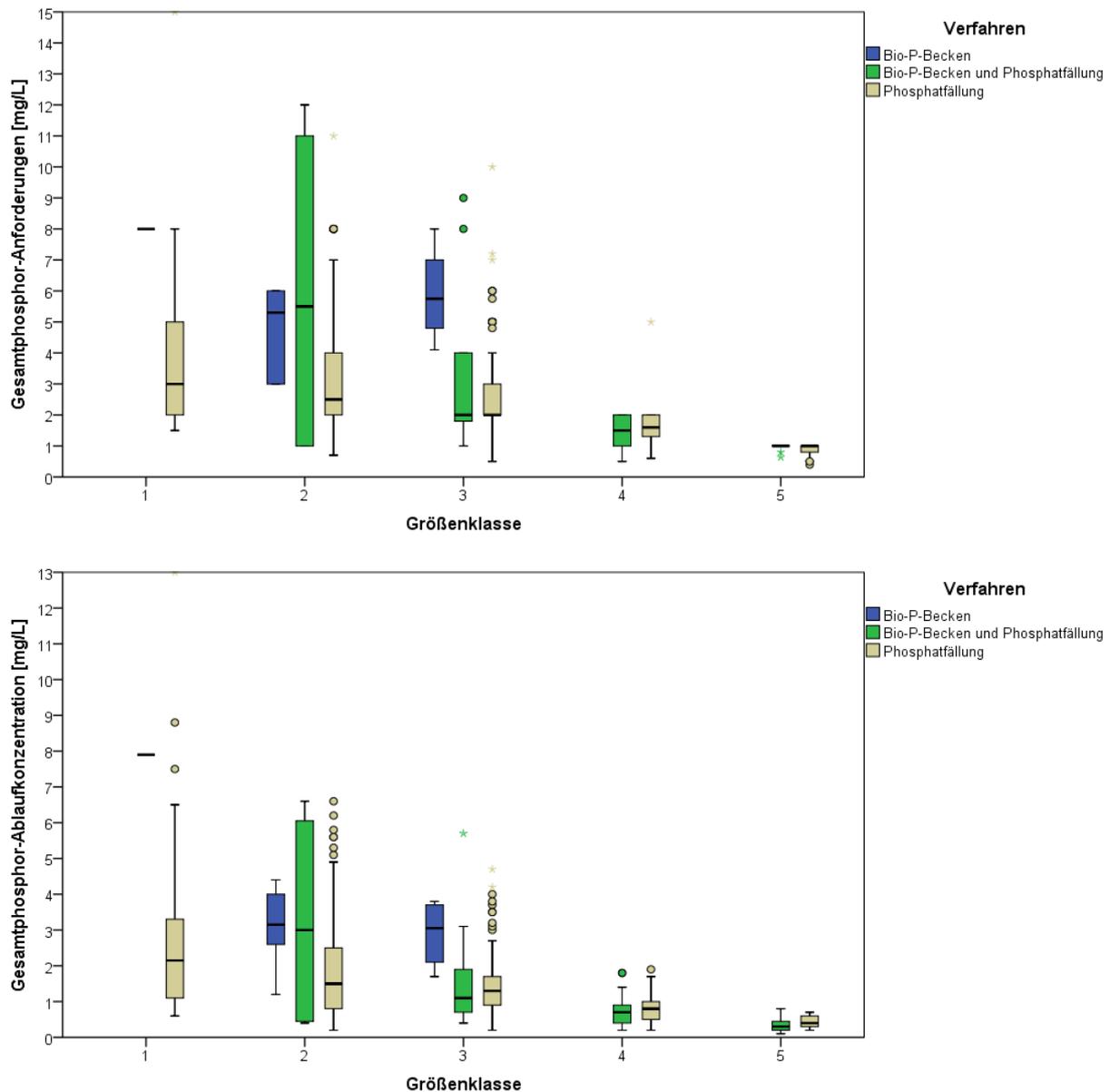


Bild 15: Gesamtphosphorablaufkonzentrationen (P_{ges} , Mittelwerte pro Kläranlage) und dazugehörige Anforderungen bayerischer Kläranlagen, die im Jahr 2015 ein Bio-P-Becken und/oder chemische Phosphatfällung betrieben haben (alle Anlagensysteme, $n=737$), kategorisiert nach Größenklassen ($n=41/183/155/322/36$); Datenquelle: LfU/DABay 2015 bzw. DWA (2016) oder persönliche Auskünfte

Wie in Tabelle 17 zusammengefasst, gibt es für die Kläranlagen der GK 1 nur eine kommunale Kläranlage, die ein Bio-P-Becken mit chemischer Fällung benutzt, sowie weitere Anlagen in den GK

2-5. Dahingegen sind die Kläranlagen mit reinen Bio-P-Becken nur in GK 2 und GK 3 vertreten, da ein betriebsstabiler Einhalt der Mindestanforderungen für die GK 4 und GK 5 mit Bio-P-Anlagen ohne Fällung nicht sichergestellt werden kann. Jene erreichen im Mittel Ablaufkonzentrationen von 1,2 mg P_{ges}/L bis 4,4 mg P_{ges}/L .

Bei Anforderungswerten an Gesamtphosphor unter 3 mg P_{ges}/L sind in Bayern daher nur Bio-P-Anlagen mit zusätzlicher Fällung in Betrieb. Aufgrund des erhöhten betrieblichen Aufwandes wird diese Verfahrenskombination am häufigsten bei den Kläranlagen der GK 4 eingesetzt. Zwölf bayerische Kläranlagen erreichen mit einer Kombination dieser beiden Verfahren im Ablauf Mittelwerte von maximal 0,3 mg P_{ges}/L , bei sieben weiteren Anlagen liegt der Wert bei maximal 0,35 mg P_{ges}/L .

Im Gegensatz zu reinen Bio-P-Anlagen ist bei den Anlagen mit reiner chemischer Fällung das Erreichen der Ablaufkonzentrationen unterhalb der Anforderungswerte für alle Größenklassen meist problemlos möglich. Außerdem erreichen bei den GK 2- und GK 3-Anlagen die Kläranlagen mit reinen chemischen Fällungen die niedrigsten Ablaufkonzentrationen an Gesamtphosphor im Vergleich zu den Anlagen mit Bio-P-Becken, sodass eine chemische Fällung aus technischer Sicht eine ausreichende Reduzierung der Phosphorkonzentrationen ermöglichen sollte. Eine Auswertung der Anforderungswerte und Ablaufkonzentrationen für Gesamtphosphor, getrennt nach den Anlagensystemen, ermöglicht für die kommunalen Anlagen in Bayern mit reiner chemischer Fällung weitere Erkenntnisse (Bild 16). Für jeden Anlagentyp gibt es mehrere Anlagen, die als Anforderungswerte mindestens 1,0 mg P_{ges}/L für Gesamtphosphor einhalten müssen und somit im Betrieb im Jahresmittel Ablaufkonzentrationen von deutlich unter 1,0 mg P_{ges}/L aufweisen. Somit kann im Praxisbetrieb von mehreren Kläranlagen mit entsprechendem Fällmitteleinsatz ein Anforderungswert von 1,0 mg P_{ges}/L bei verschiedenen Systemen eingehalten werden, sodass die Einhaltung von Überwachungswerten von 1,0 mg P_{ges}/L in der Regel durch einen effizienten Fällmitteleinsatz ohne einen technischen Systemwechsel möglich ist. Dieser Aspekt wird in der Bilanzierung der zehn ausgewählten Kläranlagen in Kapitel 4.2 genauer betrachtet, ebenso wie die mögliche Reduzierung eines Überwachungswertes auf 0,5 mg P_{ges}/L (siehe auch Kapitel 5). Der Bereich der Wirkungsgrade der 639 Anlagen mit chemischer Fällung (Bild 16) zeigt zudem deutlich, dass oftmals eine Phosphatfällung aus wirtschaftlichen Gründen mit verringertem Fällmitteleinsatz betrieben wird, wobei gleichzeitig die derzeit geltenden Anforderungen eingehalten werden können.

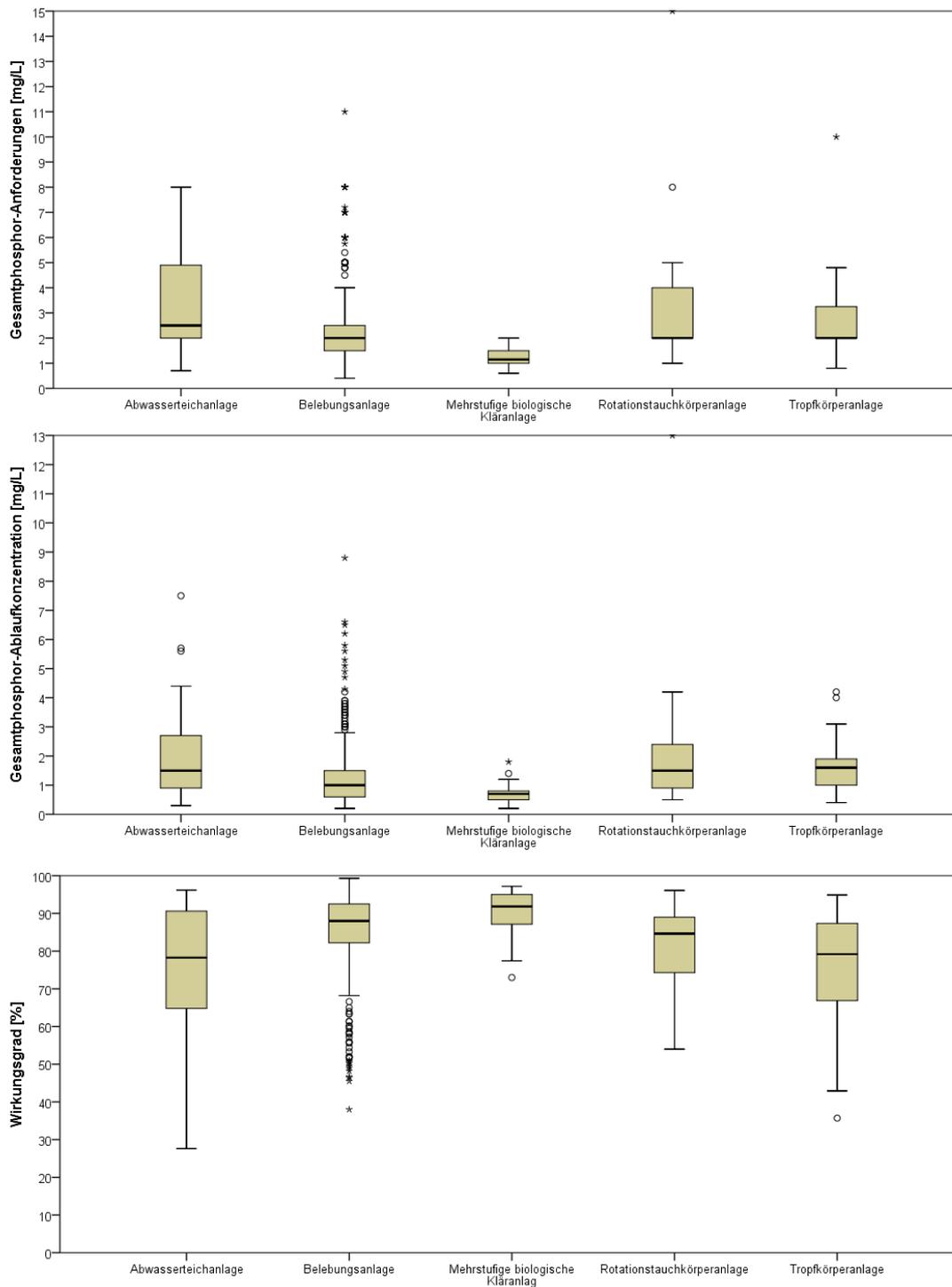


Bild 16: Gesamtposphorablaufkonzentrationen (P_{ges} , Mittelwerte pro Kläranlage), dazugehörige Anforderungen und Wirkungsgrade bayerischer Kläranlagen, die eine chemische Phosphatfällung betrieben haben (GK 1-5, n=639), kategorisiert nach zusammengefassten Anlagensystemen (n=27/508/36/17/51); Datenquelle: LfU/DABay 2015 bzw. DWA (2016) oder persönliche Auskünfte

Aufgrund des partikulären Phosphoranteils ist die Entfernung der Feststoffe (Parameter Abfiltrierbare Stoffe (AFS)) für die Bewertung der Leistung der Kläranlagen bei erhöhten Anforderungen ebenfalls heranzuziehen, was besonders auf die Ablaufkonzentrationen der Anlagen der GK 4 und GK 5 zutrifft (Bild 17). Der Median der AFS-Anforderungen liegt bei allen Kategorien bei 15 mg AFS/L, auch bei den Anlagen mit Abwasserfiltern (Einschichtfilter, Membranfilter, Mikrosieb oder Zweischichtfilter).

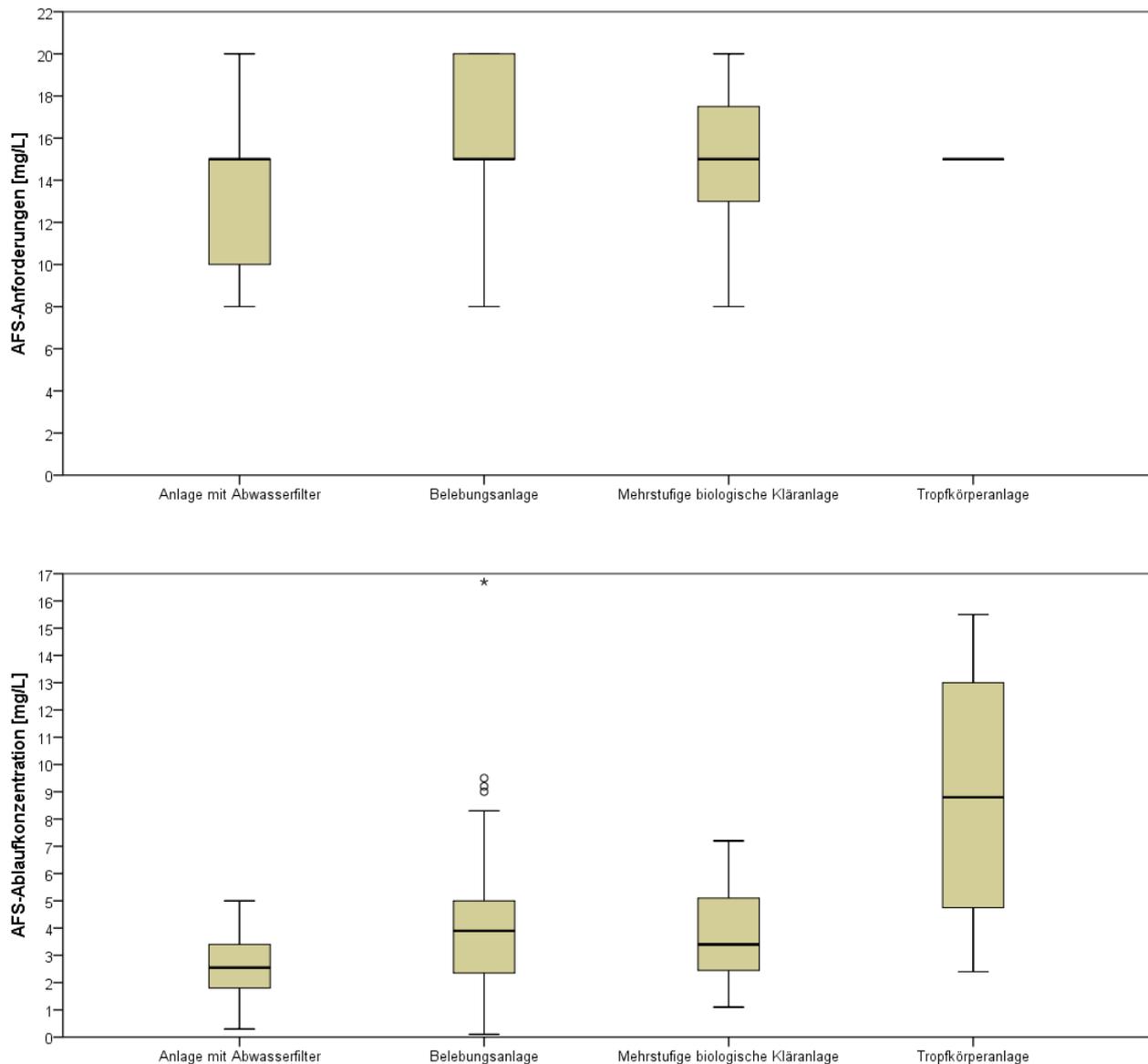


Bild 17: AFS-Ablaufkonzentrationen (Mittelwerte pro Kläranlage) und dazugehörige Anforderungen bayerischer Kläranlagen (GK 4-5, n=143), kategorisiert nach Anlagensystemen (n=14/119/20/4); Anlagen der Kategorie „Anlage mit Abwasserfilter“ sind doppelt berücksichtigt; Datenquelle: LfU/DABay 2015

Im Mittel liegt die AFS-Ablaufkonzentration bei den Anlagen der GK 4 und GK 5 ohne Abwasserfilter bei ca. 4 -5 mg AFS/L (n=129). Da ein Feststoffabtrieb von 1,0 mg AFS/L einer Zunahme der Phosphorkonzentration im Ablauf von ca. 0,02-0,04 mg P_{ges} /L entspricht (Sabelfeld & Geißen, 2011), muss bei den Kläranlagen der GK 4 und GK 5 im Mittel mit einem Anteil des partikulär gebundenen Phosphors von ca. 0,10-0,20 mg P/L ausgegangen werden. Bei den 14 Anlagen mit Abwasserfilter liegt die mittlere Ablaufkonzentration bei ca. 2,6 mg AFS/L, sodass im Ablauf mit einem Anteil des partikulär gebundenen Phosphors von im Mittel ca. 0,05-0,10 mg P/L ausgegangen werden kann.

Unter Berücksichtigung eines nicht-reaktiven Phosphoranteils von rund 0,05-0,10 mg P/L (eawag, 2008), ergeben sich somit für Anlagen mit Filtern im Mittel eine Mindestablaufkonzentration von etwa 0,10-0,20 mg P_{ges} /L, sofern das gesamte ortho-Phosphat entfernt wird. Bei den vorgenannten 14 Kläranlagen mit Filterstufe liegt der niedrigste Einzelwert für das Jahresmittel 2015 bei 0,17 mg P_{ges} /L. Der Mittelwert für alle 14 Anlagen beträgt 0,47 mg P_{ges} /L.

Für alle ausgewerteten Kläranlagen der GK 4 und GK 5 mit Messwerten zu AFS-Ablaufkonzentrationen ist allein durch die AFS im Mittel mit mindestens 0,15-0,25 mg P_{ges} /L (ohne ortho-Phosphat) zu rechnen. Die real gemessenen Werte dieser Anlagen liegen für das Jahr 2015 jedoch im Bereich 0,17-1,65 mg P_{ges} /L. Somit ist bei fast allen Anlagen noch fällbares ortho-Phosphat im Ablauf vorhanden.

Eine detaillierte Auswertung der Kläranlagen der GK 4 und GK 5 in Bezug auf den partikulären Anteil am Gesamtphosphor hat ergeben, dass im Mittel bei den 139 Kläranlagen mit AFS- und P_{ges} -Messungen ca. 25 % des Phosphors partikulär vorliegt und die restlichen ca. 75 % als ortho-Phosphat und nicht-fällbare Verbindungen gelöst vorhanden sind (Annahmen für die Berechnung des partikulären Anteils: AFS-Messwerte multipliziert mit 0,03 für den Phosphoranteil für Anlagen mit reiner chemischer Fällung bzw. 0,06 für Anlagen mit zusätzlichem Bio-P-Becken). Dabei ist zu beachten, dass bei den Kläranlagen der GK 4 der Mittelwert für den partikulären Anteil geringer ist (ca. 23 %, n=122) und bei den Anlagen der GK 5 deutlich höher liegt (etwa 34 %). Die absoluten partikulären Phosphorablaufkonzentrationen liegen jedoch rechnerisch im Mittel bei etwa 0,15 mg P/L (GK 4) bzw. 0,12 mg P/L (GK 5) und somit in vergleichbarer Höhe. Auch weisen laut dieser Auswertung die GK 5-Kläranlagen deutlich geringere ortho-Phosphatablaufkonzentrationen im Verhältnis zu den kleineren Anlagen auf, wobei auch bei zahlreichen größeren Anlagen grundsätzlich noch weiteres ortho-Phosphat eliminiert werden könnte (Bild 18 unten).

Die Verteilungen der partikulären Phosphorablaufkonzentrationen sowie deren Anteile am Gesamtphosphor ergeben, dass bei den Anlagen der GK 5 alle partikulären Ablaufkonzentrationen unterhalb von 0,25 mg P/L liegen (Bild 18). Dies trifft auch auf die meisten Anlagen der GK 4 zu, wobei

die partikulären Ablaufkonzentrationen nur zwei Mal über 0,37 mg P/L lagen (0,50 mg P/L und 0,55 mg P/L). Somit kann für Anlagen der GK 4 und GK 5 angenommen werden, dass bei Beachtung der allgemein anerkannten Regeln der Technik partikuläre Ablaufkonzentrationen von 0,25 mg P/L eingehalten werden können. Höhere berechnete Werte für die partikulären Phosphorablaufkonzentrationen sollten zuerst durch Messung vor Ort überprüft werden. Bei einer anstehenden Verschärfung der Phosphoranforderungen sollte dann eine ggf. notwendige Verbesserung der Nachklärung einer Erhöhung der Fällmittelmenge vorgezogen werden.

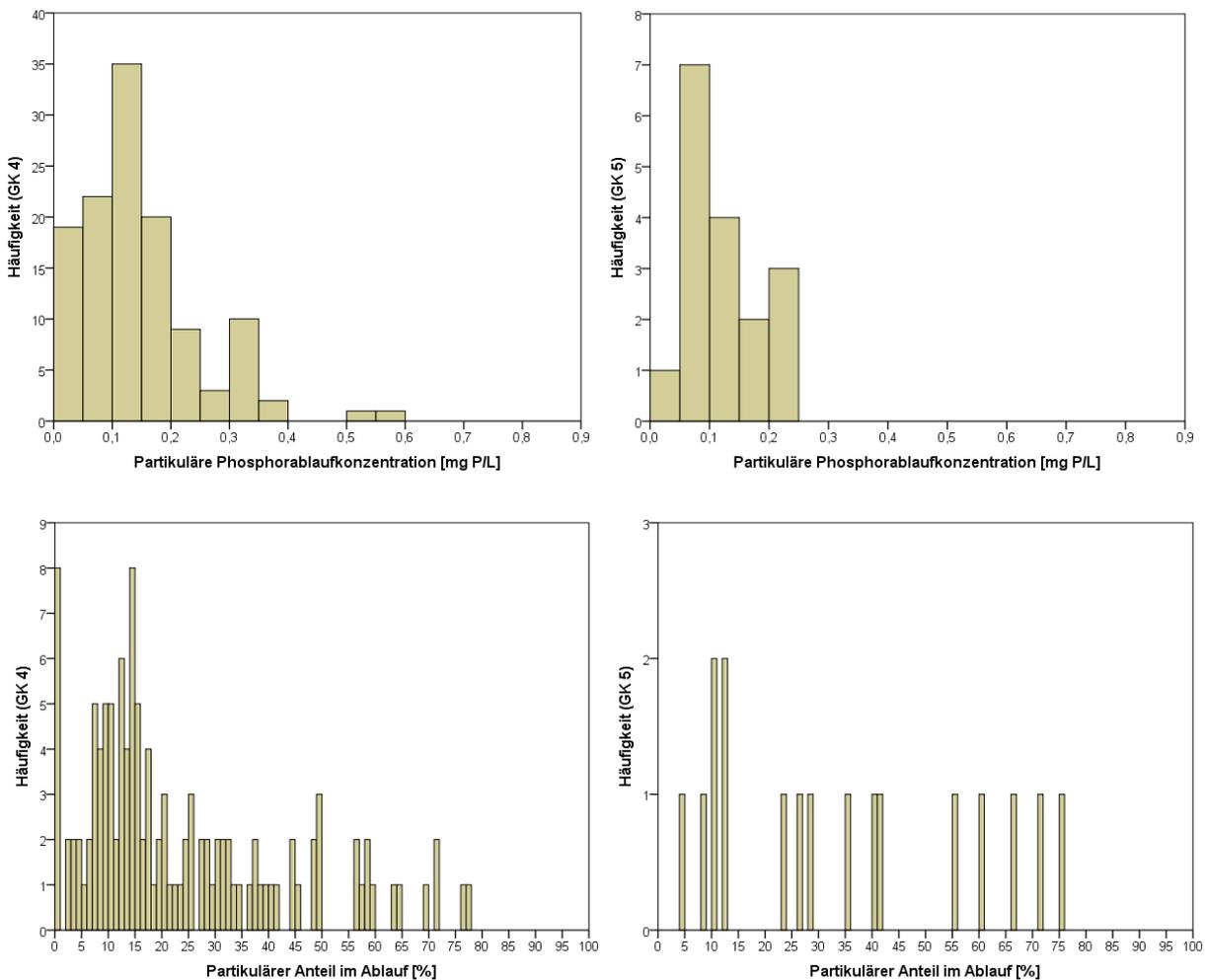


Bild 18: Berechnete partikuläre Phosphorablaufkonzentrationen (AFS-Messwerte multipliziert mit 0,03 für den Phosphoranteil für Anlagen mit reiner chemischer Fällung bzw. 0,06 für Anlagen mit zusätzlichem Bio-P-Becken) sowie die daraus berechneten partikulären Anteile am Gesamtphosphor im Ablauf für bayerische Kläranlagen der GK 4 (n=122) und GK 5 (n=17) für das Jahr 2015; Datenquelle: LfU/DABay 2015

Unter Berücksichtigung des nicht-fällbaren Phosphoranteils von 0,05-0,10 mg P/L sowie eines geringen Restanteils an ortho-Phosphat, welcher aus Effizienzgründen nicht gefällt werden sollte, kann bei den GK 4 und GK 5 von einer mittleren Ablaufkonzentration von 0,30-0,50 mg P_{ges}/L nach einer Anlagenoptimierung ohne Errichtung eines Abwasserfilters ausgegangen werden, wobei auch geringere Ablaufkonzentrationen möglich sind. Dabei ist zu beachten, dass die berechneten Werte für die partikulären Anteile eine breite Streuung aufweisen. Dies liegt teilweise an den Berechnungsannahmen, gibt aber auch das Spektrum der Anforderungen, Verfahren und Betriebsweisen wieder.

Um festzustellen, in welchem Umfang Filtrationsanlagen zur gezielten Phosphorelimination in Bayern verwendet werden, erfolgte eine telefonische Umfrage bei 30 Kläranlagen, von denen 29 Anlagen in DWA (2016) angegeben haben, dass sie im Jahr 2015 einen Abwasserfilter (FI) verwendeten, um festzustellen, in welchem Umfang Filtrationsanlagen zur gezielten Phosphorelimination in Bayern verwendet werden (zusätzlich wurde Weissenburg/Bay. berücksichtigt). Aktuell ist in Erlangen der Filter nicht mehr in Betrieb, da der nachgerüstete Hydrograph (Einlaufbauwerk) sehr geringe AFS-Konzentrationen im Ablauf ermöglicht.

Als Ergebnis der Auswertung der 29 in Betrieb befindlichen Abwasserfilter kann festgehalten werden, dass bei ca. der Hälfte der Anlagen die Anforderungen an die Phosphorkonzentration im Ablauf einer der Hauptgründe für die Planung und den Bau der Abwasserfilter waren. Weitere Ergebnisse der eigenen Umfrage umfassen den Typ des Filters und Angaben zur Betriebsweise. Diese Daten sind zusammen mit den aktuellen Hauptzielen der Verwendung des jeweiligen Filters in Tabelle 18 zusammengefasst. Somit werden die Abwasserfilter aktuell größtenteils zum erweiterten AFS-Rückhalt (und damit auch indirekt zur Phosphorelimination) eingesetzt.

Anhand der Telefonumfrage konnte zudem festgestellt werden, dass Flockungshilfsmittel derzeit nur bei einer Anlage im Bedarfsfall verwendet werden. Daher wurden diese Kosten nicht bei der Ermittlung der spezifischen Betriebskosten berücksichtigt (siehe Kapitel 6.2). Bei den Ergebnissen ist zu beachten, dass 27 der 29 Kläranlagen eine chemische Phosphatfällung betreiben sowie drei Anlagen zusätzlich ein Bio-P-Becken besitzen. Zwei Tropfkörperanlagen der GK 2 besitzen kein zusätzliches Verfahren zur Phosphorentfernung (Anforderungswerte 4,5 mg P_{ges}/L bzw. 8 mg P_{ges}/L). Bei allen anderen 27 Kläranlagen liegen die Anforderungswerte für Phosphor im Bereich 0,4-2,0 mg P_{ges}/L .

Tabelle 18: Charakteristika von 29 derzeit in Bayern betriebenen Abwasserfiltern

Kläranlage	Typ des Filters	Betriebsweise 1	Betriebsweise 2	Flockungshilfsmittel	Hauptziele
Altötting-Neuötting	Mikrosieb	diskontinuierlich	Vollstrom	keine	CSB
Amperverband	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS
AV Isar-Loisachgruppe	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	Desinfektion
AV Starnberger See	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS, Denitrifikation
AZV Achenal	Zweischicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS, Phosphor
AZV Erdinger Moos	Zweischicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS
Bad Tölz	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS
Benediktbeuern/Bichl	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS
Freising	Zweischicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	Denitrifikation
Güntersleben	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS
Hallbergmoos	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS
Herzogenaurach	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS, CSB
Hof	Zweischicht	diskontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS
Hutthurm	Membran	diskontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS, Desinfektion
Lindau/Bodensee	Zweischicht	kontinuierlich	Vollstrom	-	AFS, Phosphor
Monheim	Membran	diskontinuierlich	Vollstrom	keine	CSB, Desinfektion
Mühlhausen*	Schlacke	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS
München I	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS, Denitrifikation
München II	Einschicht**	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS, CSB
Nürnberg II	Zweischicht	kontinuierlich	Vollstrom	PE***	AFS
Oberes Isartal/Mittenwald	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	Phosphor
Regnitzlosau	Einschicht	kontinuierlich	Nebenstrom	keine	Phosphor
Schäftlarn	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS
Seybothenreuth/Wallenbrunn	-	-	-	-	Hygienisierung
Vorra*	Mikrosieb	diskontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS, CSB
Weilheim/Ob	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	Phosphor
Weissenburg/Bay.****	Einschicht	kontinuierlich	Nebenstrom	keine	Spurenstoffe
ZV Klärwerk Steinhäule	Zweischicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	AFS, CSB, Spurenstoffe
ZV Unterschleißheim, Eching u. Neufahrn	Einschicht	kontinuierlich	Vollstrom	keine	Denitrifikation

* kein weiteres Verfahren zur Phosphorentfernung, ** als Zweischicht geplant, *** bei Bedarf, **** Pilotvorhaben 4. Reinigungsstufe (Ozonung und 2-straßige Nachbehandlung mit zwei verschiedenen Filtern)

4.2 Bilanzierung der Phosphorelimination auf zehn Kläranlagen in Deutschland

4.2.1 Allgemeine Informationen

Ausgehend von den vorhandenen Daten wurden in Abstimmung mit dem LfU zehn kommunale Kläranlagen in Deutschland ausgesucht, die bereits eine weitestgehende Phosphorelimination betreiben und besonders für die GK 2-4 charakteristisch sind. So wurde für die GK 2 je eine Anlage mit Rotationstauchkörper bzw. Tropfkörper sowie eine Belebungsanlage in Erdbauweise ausgesucht, um die Umsetzung der Phosphorelimination durch chemische Fällung für diese verschiedenen Systeme bewerten zu können. Zusätzlich wurden für die Anlagen der GK 3 und GK 4 charakteristische Belebungsanlagen, teils auch mit Bio-P-Becken, ausgewählt, um zusätzliche Verfahrensstufen bei größeren Anlagen abzubilden. Dabei wurden auch verschiedene Verfahren zur Abtrennung der Feststoffe berücksichtigt (z. B. Nachklärbecken, Membranfilter und Zweischichttraumfilter). Auch wurde die mögliche Übertragbarkeit der verwendeten Steuerungs- und Regelungstechniken sowie der Online-Messungen auf kleinere Kläranlagen besonders berücksichtigt.

Die nachfolgend als Musterdörfer bezeichneten Kläranlagen haben eine Ausbaugröße von jeweils unter 12.000 EW. Alle Anlagenbetreiber erhielten einen Fragebogen (siehe Anhang A.2), der während der Ortsbesichtigung gemeinsam mit den Betreibern ausgefüllt wurde. Dieser enthielt Fragen zur Kurzcharakteristik der Kläranlage, der zugehörigen Kanalisation, den Abwassereinleitern, der Anlagentechnik, der bestehenden Phosphorelimination, des Schlammmanagements und dessen Behandlung sowie zu verschiedenen chemisch-physikalischen Parametern. Weitere Angaben wurden entsprechend der örtlichen Gegebenheiten ebenfalls aufgenommen. Als mögliche betriebliche Probleme in Verbindung mit der Phosphorelimination wurden explizit folgende vier Punkte in den Fragebogen aufgenommen: MAP-Ausfällung, Ablagerungen in Rohrleitungen, Blähschlamm sowie hoher Feststoffabtrieb. Zusätzlich wurden die Monatsberichte des Jahres 2016 sowie die Jahresberichte 2014-2016 in die Auswertung mit einbezogen. Weitere Daten (z. B. Online-Messungen, Fällmittellieferscheine und Schlammanalysen) wurden im Einzelfall erhoben und flossen ebenfalls in die Bilanzierung ein.

Aus den Anlagen der GK 2 wurde je eine Anlage mit Rotationstauchkörper (Musterdorf 4), Tropfkörper (Musterdorf 1) sowie eine Belebungsanlage in Erdbauweise (Musterdorf 5) ausgesucht. Zusätzlich wurde aus der GK 3 eine Belebungsanlage mit Membranfiltration (Musterdorf 3) ausgewählt. Weitere charakteristische Belebungsanlagen wurden aus der GK 4 ausgewählt, um die für größere Anlagen zusätzlichen Verfahrensstufen abzubilden. Darunter fallen drei Anlagen mit Bio-P (Musterdorf 2, Musterstadt 1 und Musterstadt 4), eine Anlage mit nachgeschalteter Flockungsfiltration mit Sandfilter ohne Flockungshilfsmittel sowie Fällung an zwei Stellen (Musterstadt 3), eine Anlage mit

nachgeschaltetem Zweischichtraumfilter ohne Flockungshilfsmittel und Fällung an drei Stellen (Musterstadt 2) sowie eine Kläranlage mit Zwei-Punkt-Fällung (Musterstadt 5).

Neben einer kurzen Beschreibung der Kläranlage wurden die wesentlichen Fließwege (Wasserphase und Schlamm), die Messpunkte für Durchflüsse und Konzentrationen sowie die Fällmitteldosierstellen für jede Anlage schematisch dargestellt. Die in den Fließschemata verwendeten Abkürzungen sind in Tabelle 19 aufgeführt. Für die Bilanzierung mussten oftmals aufgrund fehlender Werte Annahmen getroffen werden, die im Einzelnen erläutert sind.

Tabelle 19: Abkürzungen, die in Kapitel 4.2 v. a. bei den Fließschemata verwendet werden

Abkürzung	Beschreibung
Al	Aluminium
ANA	Anaerobbecken
Bio-P	Phosphorelimination biologisch mit Anaerobbecken
DN	Denitrifikation
ELHW	Einlaufhebewerk
F	Durchfluss (<i>flow</i>) nach DIN 19222 Teil 1
Fe	Eisen
FM	Fällmittel
Me	Metall (z. B. Eisen oder Aluminium)
N	Nitrifikation
NKB	Nachklärbecken
OS	Originalschlamm
PAC	Polyaluminiumchlorid
PS	Primärschlamm
Q	Qualitätsgröße, Stoffeigenschaft, Analyse nach DIN 19222 Teil 1
RS	Rücklaufschlamm
RZ	Interne Rezirkulation
SBR	Belebungsanlage im Chargenbetrieb (<i>sequencing batch reactor</i>)
SSB	Schlammstapelbehälter
TK	Tropfkörper
ÜSS	Überschussschlamm
VK	Vorklärung
VKB	Vorklärbecken

Bei der Berechnung der für die Phosphorelimination typischen Kennwerte K_P (Fällmittelmenge bezogen auf die Gesamtphosphorfracht im Zulauf zur Kläranlage [mol Me/kg P]) und β -Wert (Fällmittelmenge bezogen auf den zu fällenden Phosphor [mol Me/mol P]) wurde auf die in den Arbeitsblättern DWA-A 202 (2011) und DWA-A 131 (2016) aufgeführten Herangehensweisen zurückgegriffen, wobei die berechneten Kennzahlen auf den Jahresmittelwerten basieren (Empfehlung nach ATV-DVWK-Arbeitsbericht (2003)). Zur Einordnung der im Folgenden berechneten Kennwerte sollen an

dieser Stelle kurz die bereits publizierten Erfahrungswerte zusammengefasst werden. Im ATV-DVWK-Arbeitsbericht (2003) sind die Ergebnisse der Betriebsdaten zur Phosphorelimination von 341 Abwasserreinigungsanlagen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz zusammengefasst sowie die Kennwerte zum Chemikalienverbrauch berechnet. Diese ermöglichen einen spezifischen Vergleich des Fällmitteleinsatzes, wobei der Einfluss verschiedener Randbedingungen getrennt für drei Kläranlagenkategorien erfasst wurde (Tabelle 20). Dabei hat der Anlagentyp den größten Einfluss auf die berechneten K_P -Werte. Es ist aber zu beachten, dass die Angaben bei den Anlagen mit reiner chemischer Phosphatfällung ohne Denitrifikation (letzte Spalte in Tabelle 20) aufgrund der geringen Datenmengen die größten Unsicherheiten aufweisen. Eine Zusammenfassung dieser K_P -Werte ist in DWA-A 202 (2011) gegeben: 11 mol Me/kg P für Bio-P-Anlagen, 17 mol Me/kg P für Stabilisierungsanlagen, 23 mol Me/kg P für Anlagen mit Denitrifikation sowie 30 mol Me/kg P für Anlagen mit ausschließlicher Phosphatfällung.

Tabelle 20: Mittelwerte des K_P -Wertes in Abhängigkeit vom Anlagentyp und von vier verschiedenen Einflussfaktoren (ATV-DVWK-Arbeitsbericht, 2003)

Anlagentyp und Einflussfaktor	Mit Bio-P und chemischer Fällung	Mit Denitrifikation und chemischer Fällung	Nur chemische Phos- phatfällung
Ablaufkonzentration			
≤ 0,5 mg P_{ges} /L	10,1	28,5	37
≤ 1,0 mg P_{ges} /L	11,5	25	32
≤ 2,0 mg P_{ges} /L	9	21	20
Dosierstelle			
Zulauf Biologie	13	28	28,5
Rücklaufschlamm	11	21	-
Ablauf Biologie	9,6	22,5	25
Mehrfachdosierung	9,6	25	31,5
Steuerung/Regelung			
Zeitproportional	10	25	29
Durchflussproportional	9	37	14
Ganglinie	12	27	20
Frachtproportional	12	26	32
Fällmittel			
Fe^{2+}	11	29,5	22
Al^{3+}/Fe^{3+}	11,3	25	31
Aluminat	7,5	23	-
PAC	9,8	22	15

In DWA-A 202 (2011) sind auch typische Beträge für den β -Wert zusammengefasst. Dieser soll bei kommunalen Kläranlagen ca. 1,2 mol Me/mol P betragen, außer bei der Nachfällung als zweite Stufe und Flockungsfiltration (etwa 2,5 mol Me/mol P). Gemäß DWA-A 131 (2016) kann der mittlere Fällmittelbedarf mit $\beta=1,5$ mol Me/mol P abgeschätzt werden. Laut Baumann (2003) beträgt der β -Wert üblicherweise bei Belebungsanlagen mit chemischer Fällung 1,2-1,5 mol Me/mol P bei einem Überwachungswert von 2,0 mg P_{ges}/L bzw. 1,5-3,0 mol Me/mol P bei einem Überwachungswert von 1,0 mg P_{ges}/L . Bei Tropfkörperanlagen sind Werte im Bereich 2,0-3,0 mol Me/mol P je nach Überwachungswert üblich. Zur Erreichung sehr niedriger Ablaufwerte kann der Wert bei allen Anlagentypen allerdings bis auf 4,0 mol Me/mol P ansteigen.

Bei Verwendung dieser Kennwerte ist zu beachten, dass Fällmittel häufig nicht nur zur Entfernung der Phosphate verwendet wird, sondern auch um weitere Ziele zu erfolgen. Dazu zählen u. a. eine Verbesserung der Schlammstruktur, die Blähschlammbekämpfung sowie die Verbesserung der Absetzeigenschaften. Mischprodukte als Fällmittel werden in der Regel verwendet, um eine verbesserte Flockenbildung zur Verhinderung von Schlammabtrieb zu ermöglichen, genauso wie zur Bekämpfung von Blähschlamm, zur Reduzierung von Schwimmschlamm und zur Sulfidbindung in der Faulung (DWA-A 202, 2011). Der Fällmittelbedarf erhöht sich auch bei zunehmender Trübung und zunehmenden Gehalt an gelösten organischen Stoffen. Auch finden neben den Fällungsreaktionen weitere konkurrierende Reaktionen statt, wie Hydroxidbildung, Carbonatbildung sowie Adsorptionsreaktionen (Tränckner et al., 2016), die den Fällmittelverbrauch erhöhen können. Bei den im Folgenden bilanzierten Kläranlagen sind solche Besonderheiten entsprechend aufgeführt, genauso erfolgt eine Einordnung der berechneten Werte mit den oben aufgeführten Erfahrungswerten.

4.2.2 Musterdorf 1

Die Kläranlage hat eine Ausbaugröße von 5.000 EW mit derzeit ca. 3.900 angeschlossenen EW und als Ziel die Kohlenstoffelimination. Die größtenteils über eine Mischkanalisation zugeführte Jahresabwassermenge (Mischwasserzufluss) beträgt rund 312.000 m³/a bzw. ca. 219 L/(EW·d) (138 L/(EW·d) bezogen auf die Jahresschmutzwassermenge ohne Niederschlagswasser, aber mit Fremdwasser; entspricht dem Trockenwetterzufluss). Nach der mechanischen Behandlungsstufe, welche aus Rechen sowie Sand- und Fettfang besteht (Bild 19), erfolgt die Behandlung des Abwassers in einer Schreiber-Tropfkörperanlage mit integriertem Vorklärbecken. Daher wird das Fällmittel Polyaluminiumchlorid im Ablauf des Tropfkörpers zugegeben werden (Simultanfällung, etwa 120 L/d). Aufgrund der zu kleinen Bemessung des Nachklärbeckens erfolgt im Regenwetterfall ab einem gemessenen Durchfluss von 25 L/s eine zusätzliche Dosierung des gleichen Fällmittels in den An-

lagenzulauf (Vorfällung) mit ca. 2 L/h, da es bei hohen Zuflüssen vermehrt zum Abtrieb von Feststoffen kommen kann. Insgesamt werden im Trockenwetterfall etwa 14,8 kg Al/d bzw. 548 mol Al/d Fällmittel verwendet. Weitere betriebsbedingte Probleme beziehen sich auf den pH-Wert, da dieser in den Sommermonaten bei sehr geringen Zuflüssen zur Kläranlage in der Belebung zeitweise auf unter 6,5 sinken kann. In diesem Fall wird die Fällmittelmenge reduziert. Der Überschussschlamm wird regelmäßig abgezogen und in zwei der drei Stapelbehälter zwischengelagert. Mittels mobiler Schlammentwässerung wird der Klärschlamm meist einmal pro Quartal entwässert und abgeholt. Trübwasser und Filtrat werden im dritten Schlammstapelbehälter gespeichert und automatisch, meist nachts, mit ca. 30 m³/d in den Zulauf gegeben. Konzentrationsmessungen erfolgen nach dem Sand- und Fettfang sowie im Ablauf. Im Zulauf wird eine Probe pro Monat (24 h-Mischprobe) genommen und im Ablauf mindestens eine Probe pro Monat (2 h-Mischprobe).

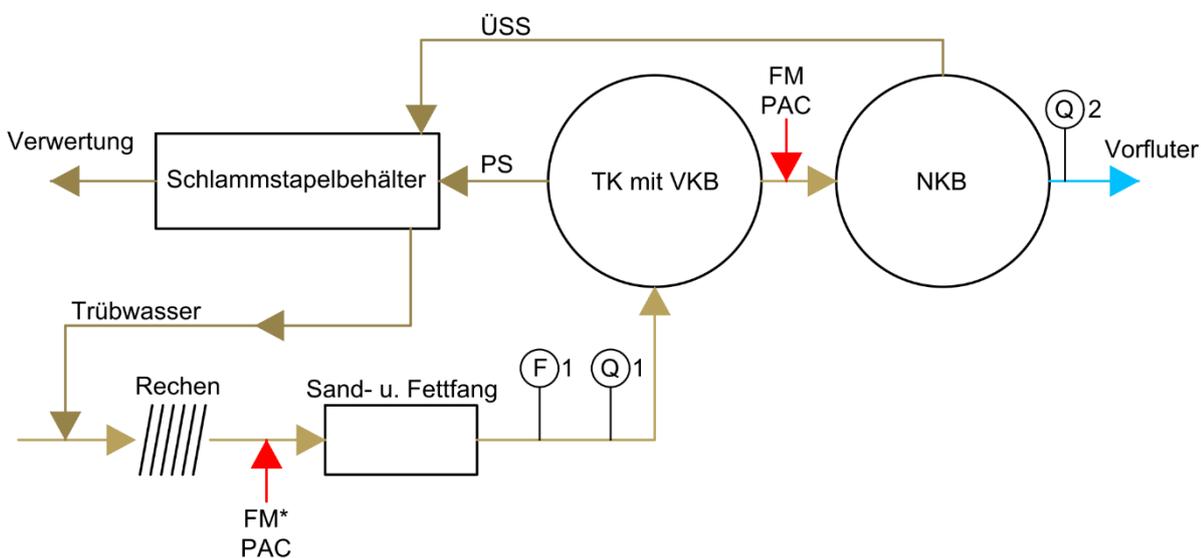


Bild 19: Fließschema Musterdorf 1 (5.000 EW); FM* wird nur bei Regenwetter (ab 25 L/s) zudosiert

Für den Bilanzzeitraum 2013-2016 lag die mittlere Zulaufkonzentration (Gesamtphosphor, Messstelle Q1 in Bild 19) bei etwa 9,40 mg P_{ges}/L und die tägliche Phosphorfracht bei ca. 8,24 kg P_{ges}/d im Zulauf. Über die Jahre 2013 bis 2016 betrug die Ablaufkonzentration im Mittel rund 0,47 mg P_{ges}/L bzw. die Phosphorfracht im Ablauf etwa 0,41 kg P_{ges}/d (Messstelle Q2), wobei der Anforderungswert für Phosphor bei 2,0 mg P_{ges}/L liegt. Die Phosphoreliminationsleistung betrug somit etwa 95 %. Da nur einmal pro Monat im Zulauf eine 24 h-Mischprobe genommen wird und die Dosiermittelmengen nicht aufgezeichnet werden, ist eine genaue Bilanzierung der Kläranlage nicht möglich.

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Dosierung des Fällmittels zeitweise auch das kleine Nachklärbecken kompensiert und somit die Kennwerte, auch aufgrund des hohen Wirkungsgrades, vergleichsweise hoch sind. Diese Kennwerte liegen beispielsweise für K_P im Mittel bei ca.

60 mol Al/kg P und für β bei etwa 3,0 mol Al/mol P. Bei der Bilanzierung war zudem zu berücksichtigen, dass beispielsweise im Jahr 2016 der Tagesdurchfluss im Mittel bei 928 m³/d lag (Tabelle 21). Dieser betrug aber an den Tagen mit Zulaufbeprobung im Mittel nur 576 m³/d, an den Tagen mit Ablaufbeprobung im Mittel 868 m³/d. Somit liegt der Mittelwert der Zulauffrachten für das Jahr 2016 aus den einzeln berechneten Werten bei 5,34 kg P_{ges}/d (Tabelle 21) während die über die Jahresmittel errechnete Fracht mit 8,74 kg P_{ges}/d (928 m³/d * 9,42 mg P_{ges}/L aus Tabelle 21) viel höher ist.

Neben dem Einfluss der Durchflüsse am Probenahmetag hat auch die Schwankungsbreite der Konzentrationen einen Einfluss auf die Bilanzierung. Sie ist insbesondere für die Erfassung des Zulaufs von Bedeutung, während die Schwankungen im Ablauf deutlich geringer sind (Bild 20). Da gleichzeitig bei den Schlammmessungen Werte fehlen bzw. unklar sind (Schlammengen, TS, Phosphorgehalt) wurde bei dieser Kläranlage auf eine detailliertere Bilanzierung verzichtet. Dies betrifft auch weitere Anlagen, bei denen mehrere Parameter ungewiss sind, sodass im Folgenden nur bei einer ausreichenden Datengrundlage bzgl. Zulauf und Schlamm eine Bilanzierung gezeigt wird.

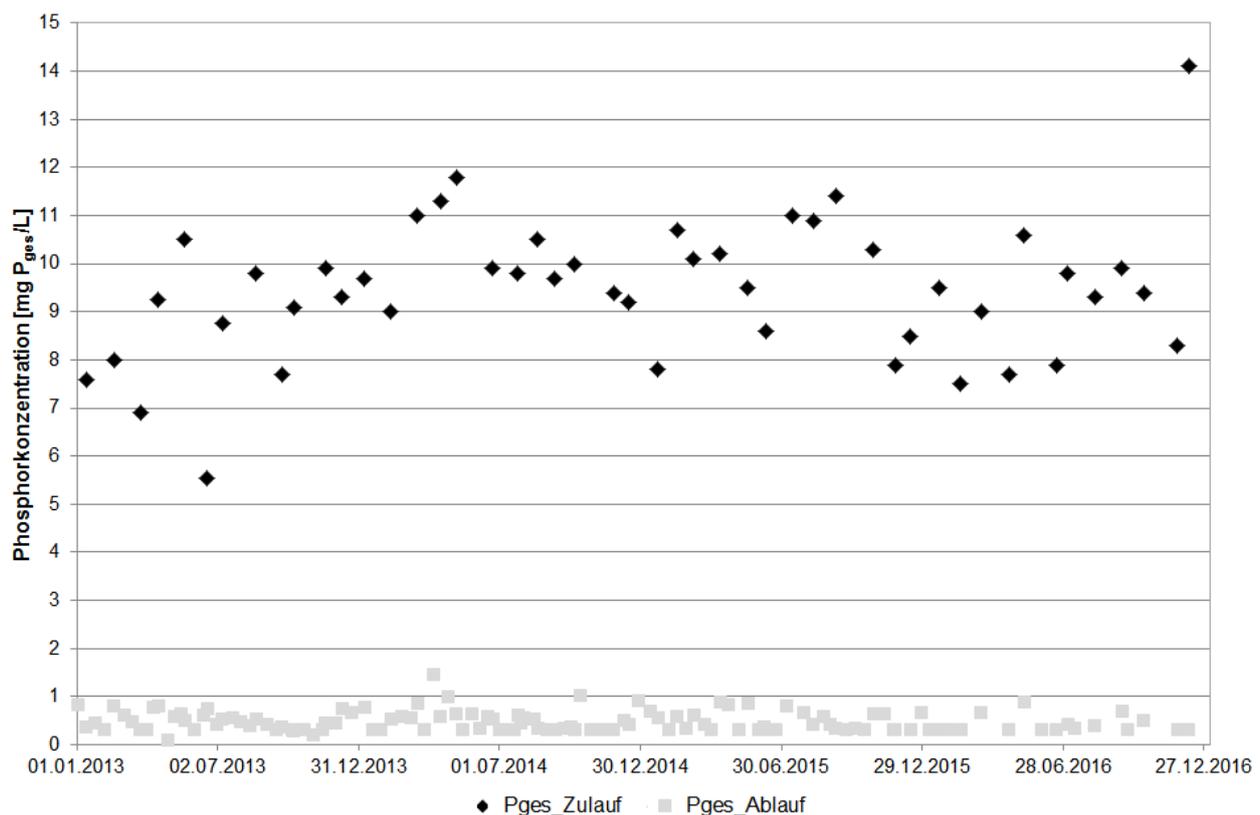


Bild 20: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Musterdorf 1 für den Zeitraum 2013-2016; Überwachungswert 2,0 mg P_{ges}/L

Tabelle 21: Zusammenfassung der für die Phosphorbilanzierung vorliegenden Daten (Jahr 2016)

Datum	Tages- durch- fluss [m ³]	Zulauf P _{ges} [mg/L]	Zulauf P _{ges} [kg/d]	Ablauf P _{ges} [mg/L]	Ablauf P _{ges} [kg/d]	Klär- schlamm [m ³]	P ₂ O ₅ im OS [%]
08.01.2016	949			0,30	0,28		
19.01.2016	601	9,50	5,71				
20.01.2016	660			0,30	0,20		
01.02.2016	2.160			0,30	0,65		0,21
16.02.2016	766	7,50	5,75				
17.02.2016	760			0,30	0,23		
09.03.2016	706					761	
14.03.2016	630	9,00	5,67				
15.03.2016	1.838			0,65	1,19		
19.04.2016	621	7,70	4,78				
20.04.2016	584			0,30	0,18		
08.05.2016	513	10,60	5,44				
09.05.2016	475			0,88	0,42		
01.06.2016	595			0,30	0,18		
19.06.2016	638	7,90	5,04				
20.06.2016	760			0,30	0,23		
04.07.2016	515	9,80	5,05				
05.07.2016	498			0,40	0,20		
07.07.2016	497					932	0,17
14.07.2016	1.921			0,33	0,63		
08.08.2016	523	9,30	4,86				
09.08.2016	913			0,38	0,35		
12.09.2016	479	9,90	4,74				
13.09.2016	462			0,68	0,31		
14.09.2016	461					828	
20.09.2016	555			0,30	0,17		
10.10.2016	516	9,40	4,85				
11.10.2016	517			0,50	0,26		
22.11.2016	583	8,30	4,84				
23.11.2016	590			0,30	0,18		
07.12.2016	521	14,10	7,35				
08.12.2016	514			0,30	0,15		0,18
Anzahl	366	12	12	17	17	3	3
Minimum	441	7,50	4,74	0,30	0,15	761	0,17
Mittelwert	928	9,42	5,34	0,40	0,34	840	0,19
Maximum	2.864	14,10	7,35	0,88	1,19	932	0,21

Aus der Untersuchung des Musterdorfes 1 kann abgeleitet werden, dass Ablaufwerte unter $1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ für eine Tropfkörperanlage mit chemischer Fällung eingehalten werden können. Der hohe Fällmittelbedarf ist sowohl auf den Anlagentyp (Baumann, 2003) als auch auf die zu klein dimensionierte Nachklärung zurückzuführen. Bei einer Optimierung der Nachklärung wären geringere Ablaufwerte bei geringerem Fällmitteleinsatz möglich, wobei gleichzeitig auf die zweite Fällmittel-Dosierstelle verzichtet werden könnte.

4.2.3 Musterdorf 2

Die aerob stabilisierende Kläranlage der Größenklasse 4 hat eine Ausbaugröße von 12.000 EW mit derzeit ca. 10.950 angeschlossenen EW. Die Jahresabwassermenge (Mischwasserzufluss) beträgt rund $1.210.000 \text{ m}^3/\text{a}$ bzw. ca. $226 \text{ L}/(\text{EW}\cdot\text{d})$ (ca. $88 \text{ L}/(\text{EW}\cdot\text{d})$ bezogen auf die Jahresschmutzwassermenge im Trockenwetterzufluss) bei einer mittleren Zulaufbelastung von etwa 11.700 EW (90 %-Perzentil). Das zu 98 % im Mischsystem gefasste Abwasser enthält ca. 2 % industrielles Abwasser aus der Galvanik und der Holzverarbeitung. Nach der Entfernung der anorganischen Fracht durch Rechen sowie Sand- und Fettfang folgt die biochemische Behandlung in der Belebungsanlage mit intermittierender Belüftung (Bild 21). Dieser Anlagenteil wurde als Kombinationsklärwerk System NR geplant, bei welcher das zentral angeordnete Nachklärbecken bautechnisch mit dem außenliegenden Belebtschlammringbecken kombiniert ist. Die Belüftung wird über die Online-Messung von Ammonium und Nitrat (Q2, Bild 21) gesteuert, wobei die Denitrifikationsphase maximal 70 Minuten dauert, um eine Phosphorrücklösung zu vermeiden. Neben der Phosphorelimination durch Bio-P (ca. 26 % im Jahr 2016, früher etwa 40 %) erfolgt eine Simultanfällung mit Eisen(III)chlorid in den Rücklaufschlammstrom, wobei derzeit eine kontinuierliche Dosierung eingestellt ist (ca. $144 \text{ L}/\text{d}$). Im Gegensatz zu den meisten anderen Kläranlagen kann bei dieser Dosierstation der genaue Durchfluss in Bezug auf die Fällmittelmengen abgelesen werden (Bild 22). Auch die Anordnung der Leitungen, deren Beschriftungen sowie die Hinweisschilder sind zusammen mit der optischen Sauberkeit der Einrichtung vorbildhaft. Der Zustand der Dosiereinrichtung sowie die Möglichkeit zur Ableitung ist in dieser Form auch auf anderen Anlagen anzuraten. Jedoch wäre eine kontinuierliche Speicherung der Durchflüsse oder zumindest eine Notierung der vom MID aufsummierten Durchflüsse einmal pro Woche für eine Bilanzierung und Auswertung von Optimierungsmaßnahmen vorteilhaft. Im Anschluss an das Belebungsbecken (2.425 m^3) erfolgt die Abtrennung der Feststoffe im Nachklärbecken (3.500 m^3). Der entwässerte Überschussschlamm wird der Rekultivierung zugeführt. Im Jahr 2016 fielen $790,5 \text{ t}$ Klärschlamm (25,0 % TS) mit einem Phosphorgehalt bezogen auf die Schlamm-trockenmasse von etwa 7,8 % an. Der Durchfluss wird im Ablauf der Anlage bestimmt (F3). Die Probenahme im Zulauf (2 h- oder 24 h-Mischproben) erfolgt einmal pro Woche nach dem Sand-

und Fettfang (Q1), wohingegen im Ablauf (Q3) täglich Mischproben (2 h oder 24 h) genommen werden. Laut Betreiber gibt es keine betrieblichen Probleme mit der Phosphorelimination.

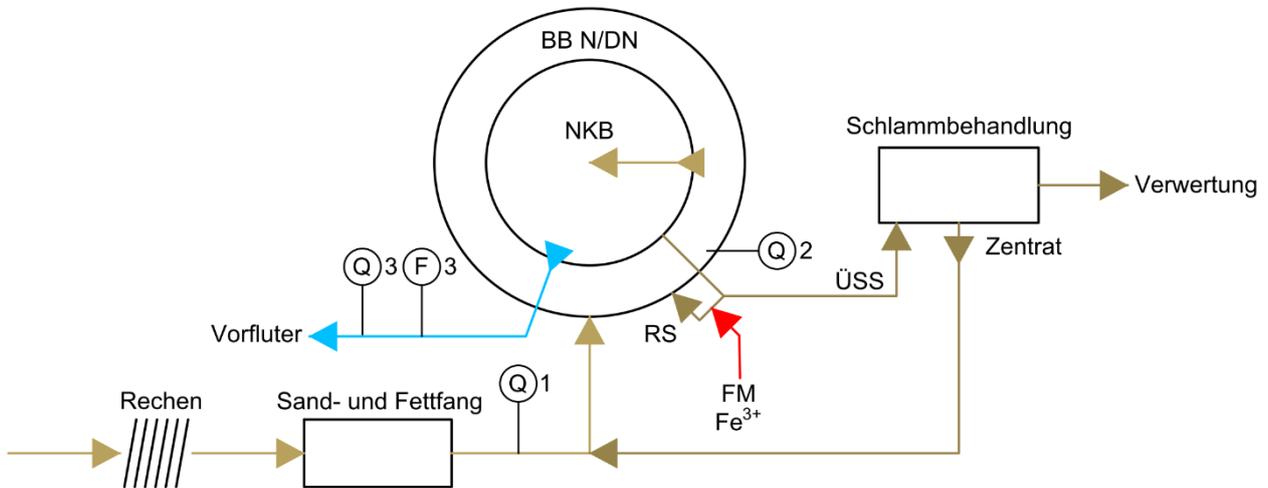


Bild 21: Fließschema Musterdorf 2 (12.000 EW)



Bild 22: Fällmitteldosierstelle der Kläranlage Musterdorf 2 mit zwei Pumpen (regelbar in Bezug auf die ortho-Phosphatkonzentrationen im Ablauf der Biologie) und einem MID zur Durchflussmessung

Die mittlere Zulaufkonzentration betrug im Zeitraum 2014-2016 5,24 mg P_{ges} /L und die mittlere Zulauffracht etwa 17,4 kg P_{ges} /d. Im Ablauf lag die mittlere Konzentration bei etwa 0,45 mg P_{ges} /L, dies entspricht einer täglichen Fracht von ca. 1,5 kg P_{ges} /d. Der Überwachungswert, der auch der erklärte Wert ist, liegt bei 1,6 mg P_{ges} /L und wird somit deutlich unterschritten. Die Gesamtposphoreliminationsleistung der Anlage liegt somit bei ca. 91 %. Der β -Wert wurde für das Jahr 2016 mit ca. 1,5 mol Fe^{3+} /mol P berechnet und entspricht somit dem mittleren Fällmittelbedarf gemäß DWA-A 131 (2016). Für K_P ergibt sich ein Wert von ca. 28 mol Fe^{3+} /kg P, welcher vergleichsweise hoch ist. Nach dem ATV-DVWK-Arbeitsbericht (2003) wäre für diese Anlage mit einem Wert von etwa 11 mol Fe^{3+} /kg P zu rechnen gewesen. Der Fällmittelverbrauch stieg von 35,2 t/a im Jahr 2013, über 40,0 t/a im Jahr 2014 sowie 48,2 t/a im Jahr 2015 auf 50,4 t/a im Jahr 2016 an und nahm entsprechend der Abnahme des vermehrten Bio-P-Anteils an der Phosphorelimination zu.

Auffallend bei dieser Anlage ist, dass die Phosphorkonzentrationen sowie die Phosphorfrachten im Zulauf von Monat zu Monat stark schwanken (Bild 23). Zu erkennen ist auch die Abnahme der Ablaufkonzentrationen und der zugehörigen Frachten ab August 2016.

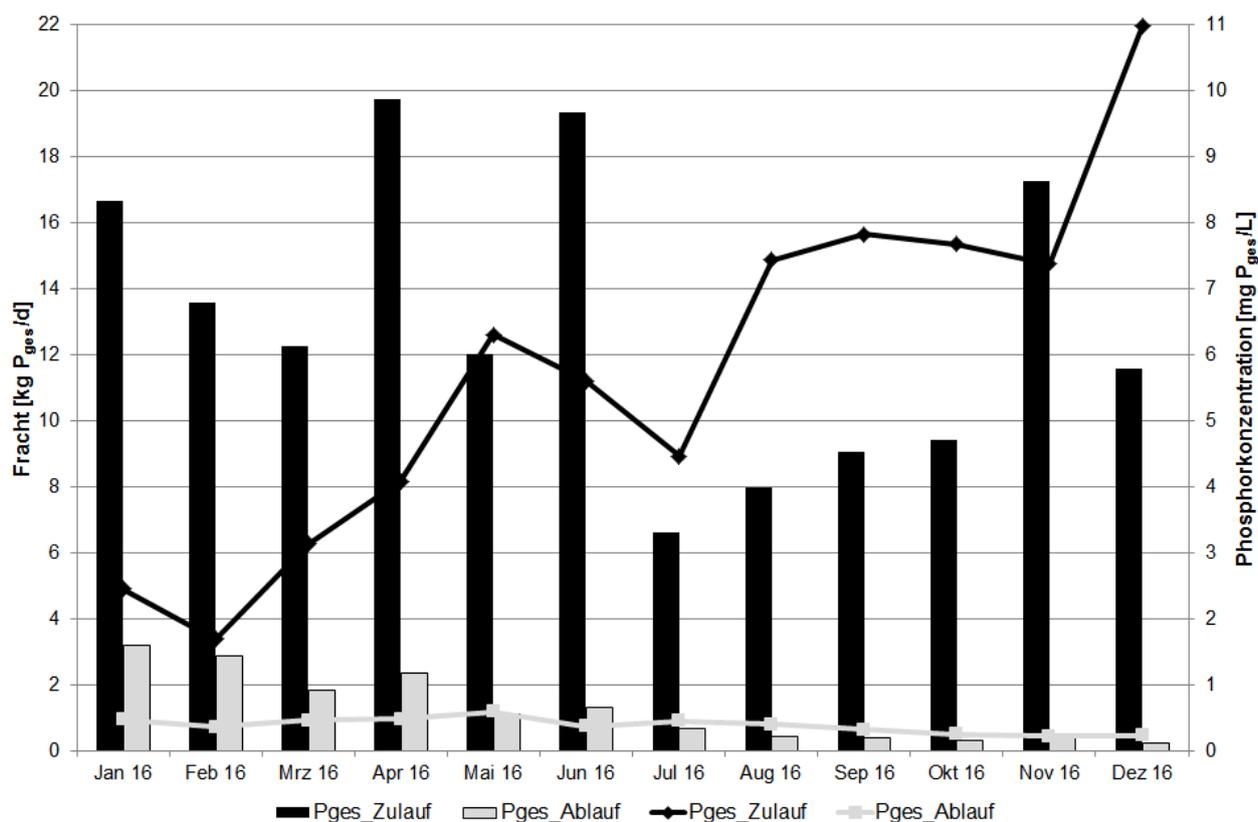


Bild 23: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf (Linien) sowie die pro Monat im Mittel berechneten Frachten (Balken; Q1, Q3) der Kläranlage Musterdorf 2 für das Jahr 2016; Überwachungswert 1,6 mg P_{ges} /L

Dies hängt mit dem Start des freiwilligen Monitorings zu den Möglichkeiten der Umsetzung einer möglichst weitestgehenden Phosphorelimination zusammen, anhand dessen u. a. zusätzlich die Konzentrationen an ortho-Phosphat im Ablauf hochaufgelöst bestimmt werden.

Seit 01. September 2016 wird im Ablauf täglich neben P_{ges} auch ortho-Phosphat mittels Küvetten-tests bestimmt (Bild 24). Anhand der Messwerte wird deutlich, dass eine vollständige Entfernung des ortho-Phosphats unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Faktoren nicht möglich und auch nicht sinnvoll ist. Die Ergebnisse bestätigen jedoch, dass mit einer Kombination aus vermehrter Bio-P und chemischer Fällung bei der untersuchten Anlage der GK 4 eine weitestgehende Elimination des Phosphors möglich ist und Ablaufkonzentrationen unter $0,40 \text{ mg } P_{ges}/\text{L}$ durchgehend eingehalten werden können. Dabei ist zu beachten, dass laut Betreiber im Ablauf die AFS unter der Bestimmungsgrenze liegen und somit der Großteil des nicht als ortho-Phosphat vorliegenden Phosphors gelöste, nicht-fällbare Phosphoranteile (z. B. Phosphate und Phosphite, meist von Indirekteinleitern aus der Metall- und Textilindustrie; regelmäßige Bestimmungen von P_{ges} in der filtrierten Probe als mögliche Ergänzung des Monitorings wäre interessant) sein müssen.

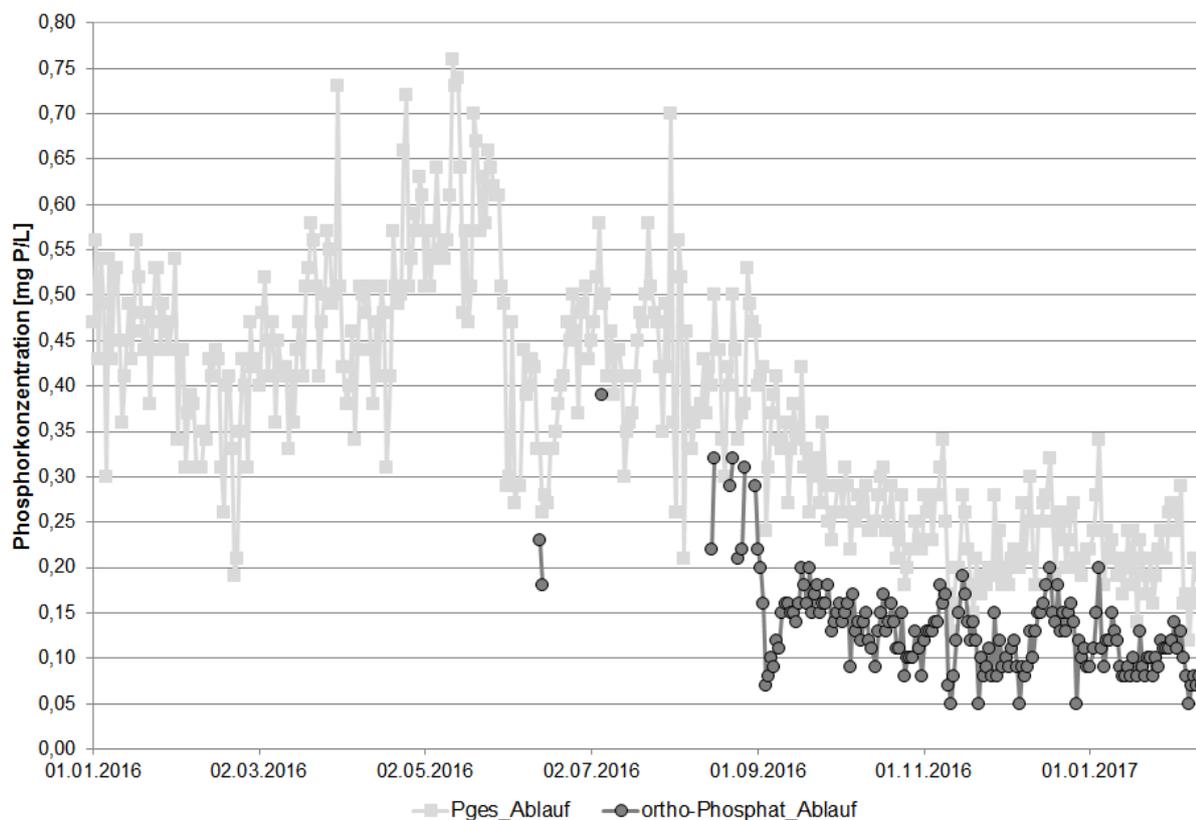


Bild 24: Phosphorkonzentrationen (P_{ges} und ortho-Phosphat) im Ablauf der Kläranlage Musterdorf 2 für das Jahr 2016; Überwachungswert $1,6 \text{ mg } P_{ges}/\text{L}$

Wichtig bei dieser Verfahrenskombination aus Bio-P und chemischer Fällung ist aber auch die Verfügbarkeit einer ausreichenden Messtechnik zusammen mit einer angepassten Steuerungs- und Regelungstechnik sowie die Motivation des Betreibers, um Optimierungspotential festzustellen und geeignete Lösungsmaßnahmen zu ergreifen.

Eine Zusammenfassung der in Bild 24 dargestellten Kurven seit Beginn der Umsetzung einer weitestgehenden Phosphorelimination mit erweiterter Messkampagne ist in Tabelle 22 wiedergegeben. Diese Konzentrationen zeigen deutlich die betriebsstabile Elimination des Phosphats und die Höhe der Schwankungsbreite der Gesamthosphorkonzentrationen. Zur Untermauerung der Messwerte wurden vereinzelte Proben einer Qualitätskontrolle unterzogen, um die Genauigkeit der gemessenen, sehr geringen Konzentrationen zu bestätigen. Die Differenz zwischen ortho-Phosphat und Gesamthosphor betrug in den letzten Monaten konstant 0,10-0,12 mg P_{ges}/L und könnte von der Größenordnung her auf gelöste, nicht-fällbare Phosphoranteile zurückzuführen sein (Erfahrungswerte rund 0,05-0,10 mg P/L (eawag, 2008)). Somit sind im Jahresmittel sehr niedrige Ablaufkonzentrationen möglich, wobei an einzelnen Tagen erhöhte Ablaufkonzentrationen auftreten können (z. B. einzelne, abgetriebene Belebtschlammflocken). Außerdem hat die Zusammensetzung des Abwassers im Zulauf, welche bei kommunalen Anlagen auch von den Indirekteinleitern aus der Industrie beeinflusst werden kann, auf die Phosphorelimination einen noch größeren Einfluss bei Zielablaufkonzentrationen < 0,5 mg P_{ges}/L.

Tabelle 22: Mittlere Ablaufkonzentrationen der Kläranlage Musterdorf 2 während des erweiterten Monitorings zur weitestgehenden Phosphorelimination

Parameter	Sep 16	Okt 16	Nov 16	Dez 16	Jan 17
Gesamthosphor					
Minimum [mg P _{ges} /L]	0,23	0,18	0,13	0,18	0,14
Mittelwert [mg P _{ges} /L]	0,33	0,25	0,22	0,23	0,22
Maximum [mg P _{ges} /L]	0,42	0,31	0,34	0,32	0,34
ortho-Phosphat					
Minimum [mg PO ₄ -P/L]	0,07	0,08	< 0,05	< 0,05	0,08
Mittelwert [mg PO ₄ -P/L]	0,15	0,13	0,12	0,12	0,11
Maximum [mg PO ₄ -P/L]	0,22	0,17	0,19	0,20	0,20

Aufgrund der pro Jahr gemessenen 52 Zulaufmesswerte und 365 Ablaufmesswerte sowie der zwischen zwei Typen von Mischproben variierenden Probenahmetechnik konnte für diese Kläranlage der Einfluss der Probenahmedauer auf die gemessenen Messwerte genauer untersucht werden. Während bei den Ablaufkonzentrationen die Mittelwerte zwischen den 2 h-Mischproben

(0,45 mg P_{ges}/L, n=551) und den 24 h-Mischproben (0,44 mg P_{ges}/L, n=545), jeweils an unterschiedlichen Tagen gemessen, bezogen auf den Zeitraum 2014-2016 vergleichbar hoch sind, sind die Ergebnisse bei den Zulaufproben recht unterschiedlich (Bild 25). Für die 2 h-Mischproben lag der Mittelwert bei 4,85 mg P_{ges}/L (1,09-8,43 mg P_{ges}/L, n=63) und bei den 24 h-Mischproben bei 5,51 mg P_{ges}/L (0,80-15,00 mg P_{ges}/L, n=93) bezogen auf den Zeitraum 2014-2016. Somit zeigt dieser Vergleich, dass die Probenahme im Zulauf vergleichsweise unsichere Werte liefert. Da diese Zulaufkonzentrationen aber sowohl in den Wirkungsgrad der Anlage als auch in die Berechnung von Kennwerten (z. B. K_P und β -Wert) eingehen, können durch Abweichungen der gemittelten Werte von den tatsächlichen Konzentrationen erhebliche Ungenauigkeiten entstehen. Bei den Ablaufkonzentrationen, die im Rahmen der Anforderungen an den Ablauf und bei Emissions- und Immissionsbetrachtungen genau zu kennen sind, sind diese Ungenauigkeiten durch die Messmethodik vergleichsweise gering, sodass die Auswirkungen der Einleitungen auf die Vorfluter bei einer ausreichenden Probenanzahl hinreichend genau anhand von Mischproben abgeschätzt werden können.

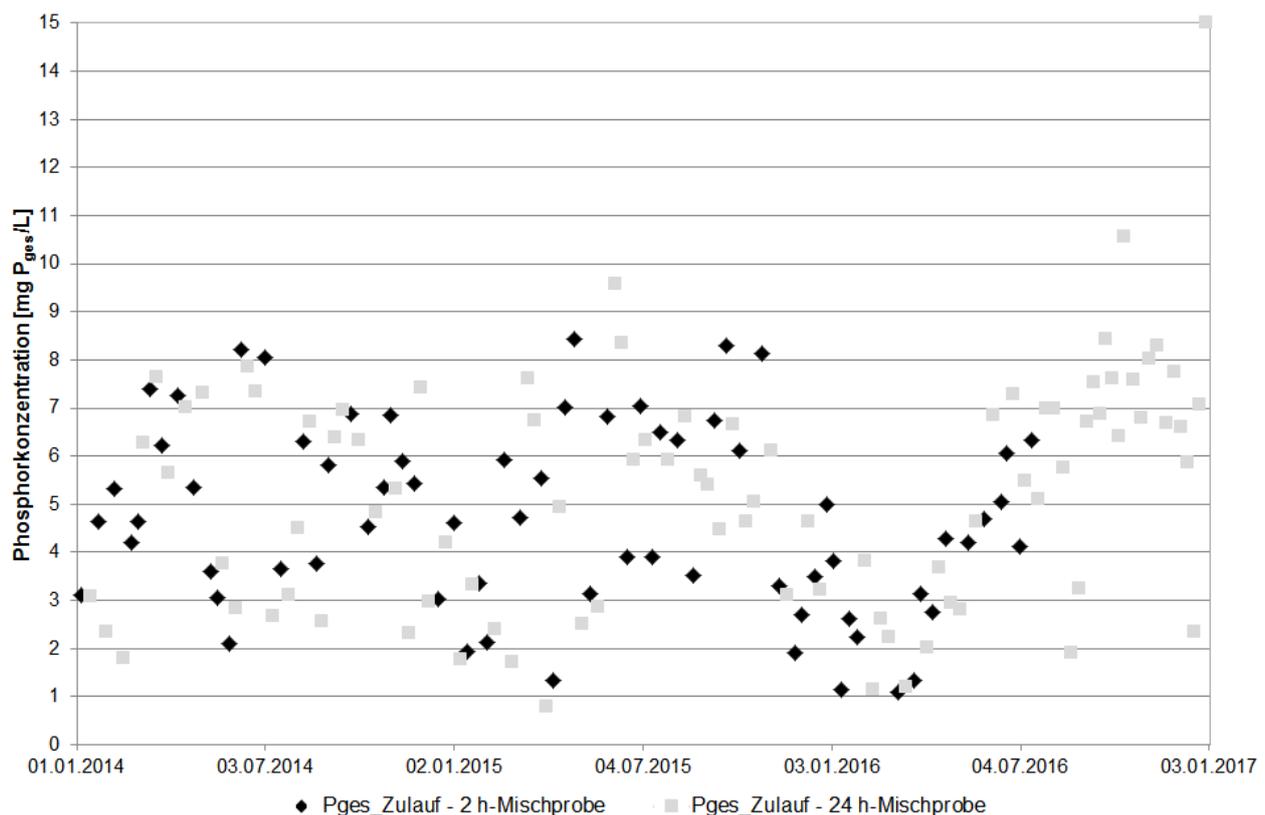


Bild 25: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf der Kläranlage Musterdorf 2 für den Zeitraum 2014-2016, getrennt nach Dauer der Probenahme

4.2.4 Musterdorf 3

Diese Kläranlage wurde im Jahr 2003 als erste Membranbelebungsanlage in Bayern in Betrieb genommen und ist auf Stickstoffelimination ausgelegt. Das Pilotprojekt Membrantechnologie ist auch darauf zurückzuführen, dass das Einzugsgebiet des Vorfluters in einem Karstgebiet liegt und somit weitergehende Anforderungen an den Kläranlagenneubau gestellt wurden. Die Anlage hat eine Ausbaugröße von 9.700 EW, wobei derzeit etwa 7.100 EW angeschlossen sind. Die über ein Mischsystem zugeführte Jahresabwassermenge (Mischwasserzufluss) beträgt rund 748.000 m³/a bzw. ca. 289 L/(EW·d) (etwa 173 L/(EW·d) bezogen auf die Jahresschmutzwassermenge im Trockenwetterzufluss). Über das Zulaufpumpwerk wird das Abwasser der mechanischen Behandlungsstufe, bestehend aus zwei Straßen, zugeführt (1 mm Spaltsieb, belüfteter Sand- und Fettfang sowie neuerdings ein Bürstensieb zur Entfernung von Fasern zum Schutz der Membranen). Die beiden Belebungsbecken mit vorgeschalteter Denitrifikation und interner Rezirkulation sowie die vier Filtrationsstraßen werden für den biologischen Abbau sowie die Phasentrennung verwendet (Bild 26). Im Zulauf der Belebung werden täglich ca. 110 L/d Polyaluminiumchlorid zur Phosphatfällung zugegeben (Simultanfällung). Dies entspricht einer Menge von ca. 14 kg Al/d bzw. 500 mol Al/d. Die Dosierung erfolgt frachtproportional anhand der Online-Messung im Zulauf. Es gab bisher keine betrieblichen Probleme in Verbindung mit der Phosphorelimination. Die Fällprodukte werden zusammen mit dem Belebtschlamm über eine Überschussschlammpumpe dem Schlammstapelbehälter zugeführt. Dort wird der Schlamm für ca. 40 Tage stabilisiert, statisch eingedickt sowie anschließend maschinell eingedickt und extern entsorgt. Das Trübwasser wird zum Zulauf der Belebung gepumpt. Im Gegensatz zu Belebungsanlagen mit Nachklärbecken kann die Membranbelebungsanlage, mit einem deutlich höheren Trockensubstanzgehalt von ca. 8,0-8,5 g TS/L gefahren werden. Dadurch konnten die Belebungsbecken mit einem Volumen von jeweils 340 m³ vergleichsweise kompakt gestaltet werden. Die hydraulische Aufenthaltszeit beträgt ca. 18 h, das Schlammalter 25 d. Das Filtrat/Permeat wird ohne weitere Behandlung in den Vorfluter eingeleitet.

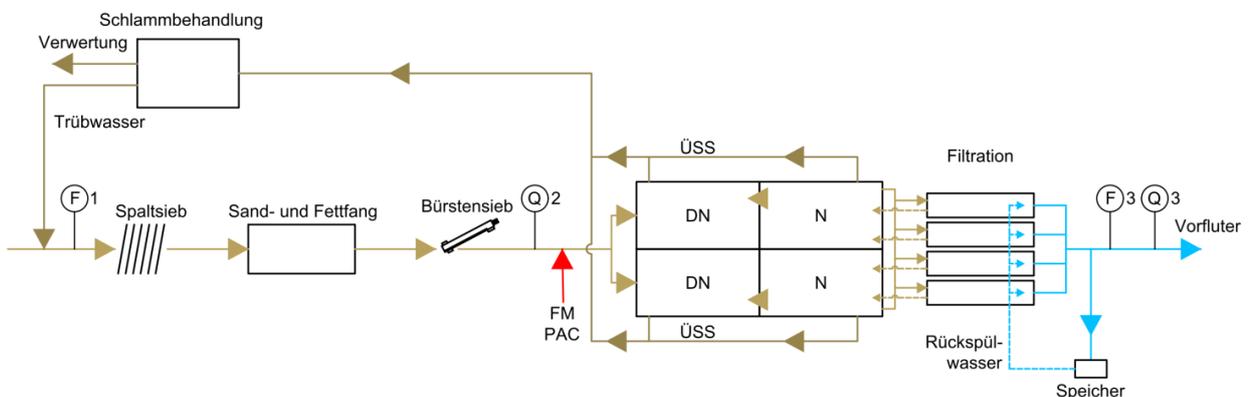


Bild 26: Fließschema Musterdorf 3 (9.700 EW)

Anhand der vorliegenden Betriebstagebücher für die Jahre 2014 bis 2016 konnte eine durchschnittliche Phosphorzulaufkonzentration von 6,79 mg P_{ges}/L sowie eine aus den Tageswerten, an denen die Phosphorkonzentrationen zusätzlich zum Tagesdurchfluss gemessen wurden, gemittelte Phosphatfracht von rund 11,9 kg P_{ges}/d berechnet werden. Ausgehend von der mittleren Konzentration und dem mittleren täglichen Durchfluss (2.163 m³) ergibt sich eine höhere, mittlere Zulauf fracht von etwa 14,7 kg P_{ges}/d (siehe auch die Ausführungen in Kapitel 4.2.2 zur Berechnung). Dies hängt auch mit den stark variierenden Abwassermengen von rund 700 m³/d bis 5.300 m³/d zusammen. Außerdem unterliegen die Phosphorzulaufkonzentrationen und die dazugehörigen Frachten über das gesamte Jahr bedeutenden Schwankungen (Bild 27). Bei einer Eliminationsleistung der Kläranlage von ca. 95 % wurde im Durchschnitt eine Ablaufkonzentration von ca. 0,36 mg P_{ges}/L (0,8 kg P_{ges}/d) erreicht (Bild 28). Dieser niedrige Ablaufwert ist neben der chemischen Fällung vor allem auf einen effektiven Feststoffrückhalt in der Membranfiltrationsstufe zurückzuführen. Aufgrund der guten Eliminationsleistung der Kläranlage hat der Betreiber den Überwachungswert für Phosphor von 1,0 mg P_{ges}/L auf 0,5 mg P_{ges}/L erklärt.

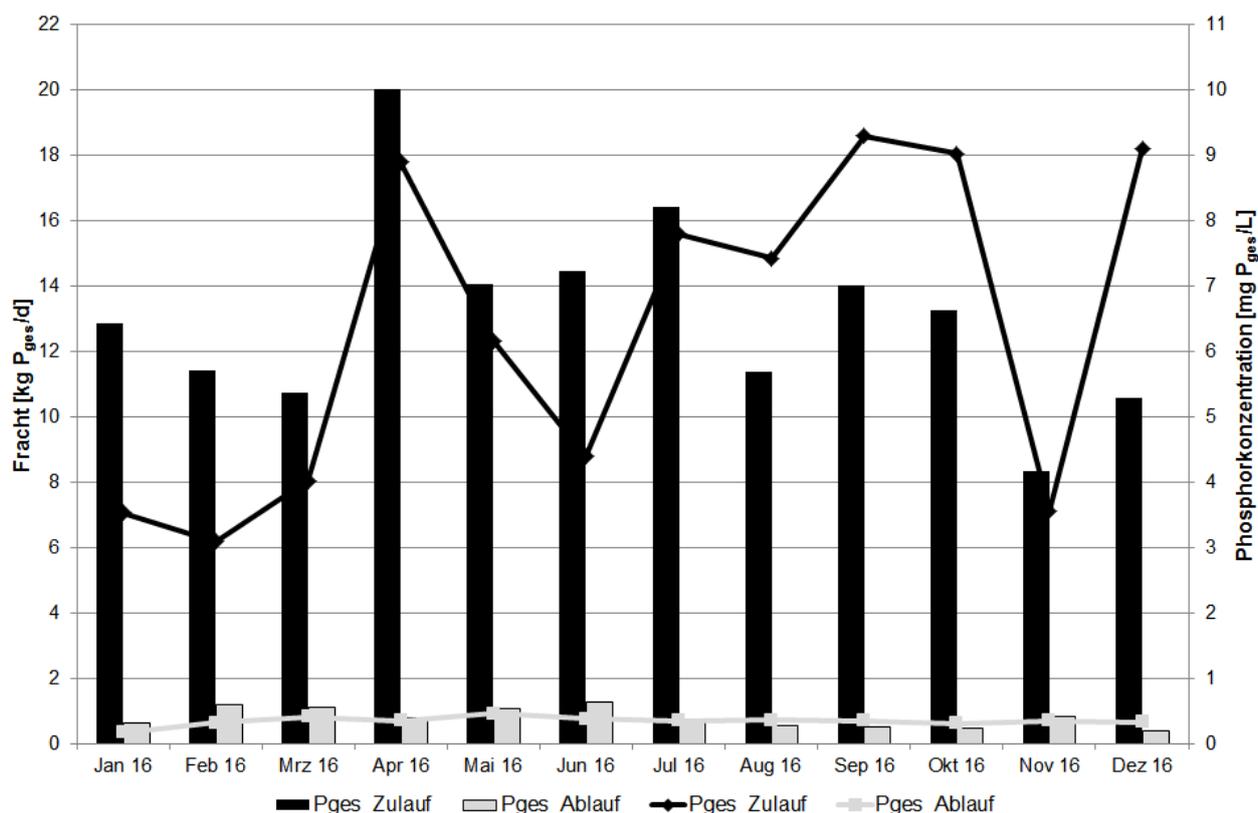


Bild 27: Gesamtphosphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf (Linien) sowie die pro Monat im Mittel berechneten Frachten (Balken) der Kläranlage Musterdorf 3 für das Jahr 2016; erklärter Überwachungswert 0,5 mg P_{ges}/L

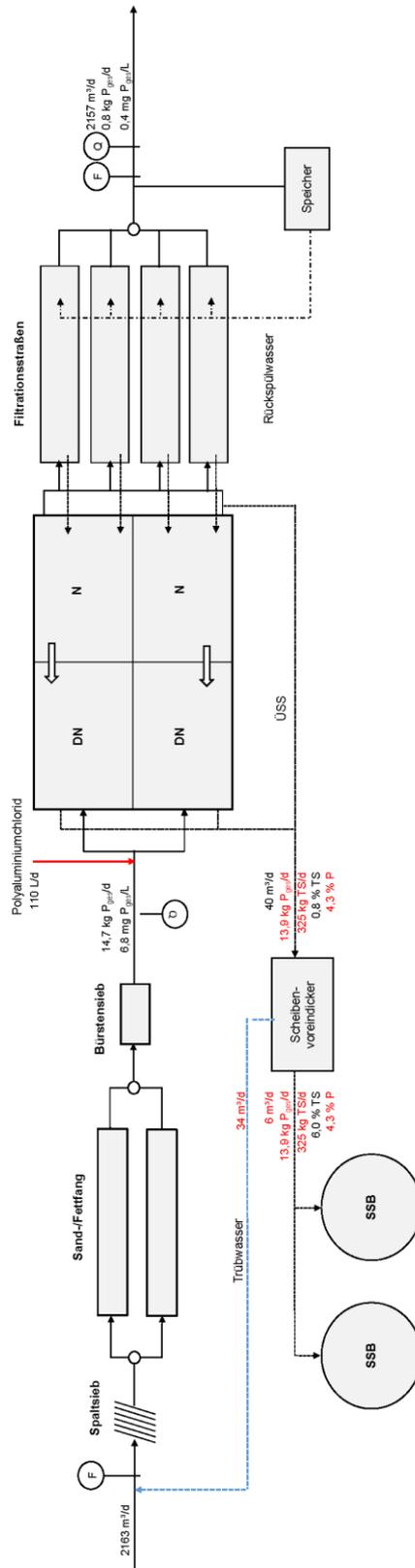


Bild 28: Bilanzierung der Kläranlage Musterdorf 3 für den Zeitraum 2014-2016; schwarze Zahlen stammen aus den Betriebstagebüchern und rote Zahlen wurden berechnet

Wie in Bild 27 zu sehen ist, kann dieser trotz der über das Jahr stark schwankenden Zulaufkonzentrationen und Frachten eingehalten werden. Die über den Überschussschlamm abgezogene Phosphorfracht wurde aus der Differenz von Zulauf- und Abflussfracht mit $13,9 \text{ kg P}_{\text{ges}}/\text{d}$ berechnet, wobei die Trockenmasse des Schlammes einen berechneten Phosphorgehalt von ca. 4,3 % aufweist (Bild 28).

In Anlehnung an das Arbeitsblatt DWA-A 131 (2016) wurden die biologisch und chemisch eliminierten Phosphoranteile ermittelt (Bild 29). Dabei ergab sich für den im Zuge der Kohlenstoffelimination in die heterotrophe Biomasse aufgenommenen Phosphor, mit durchschnittlich $2,00 \pm 0,77 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$, ein Anteil von etwa 32 %. Aufgrund der vorgeschalteten Denitrifikation wurde für die Phosphorbilanz auch ein geringer Anteil an vermehrter Bio-P mit:

$$X_{\text{P,BioP}} = 0,002 * C_{\text{CSB,ZB}}$$

$X_{\text{P,BioP}}$ (mg P/L) bei der biologischen Phosphorelimination biologisch gebundener Phosphor

$C_{\text{CSB,ZB}}$ (mg CSB/L) CSB-Konzentration im Zulauf zur Belebung

angenommen.

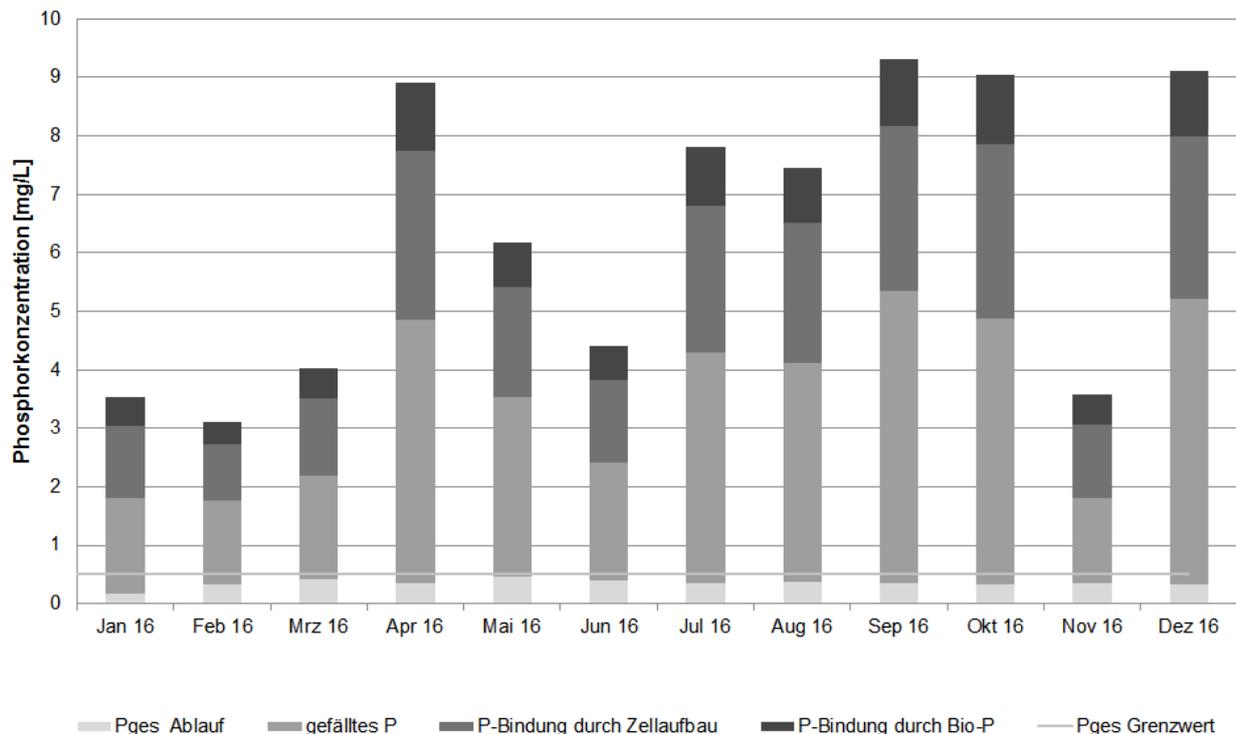


Bild 29: Detaillierte Zusammensetzung der pro Monat im Mittel berechneten Phosphoranteile der Zulaufkonzentrationen der Kläranlage Musterdorf 3 für das Jahr 2016

Der ermittelte Bio-P-Anteil beträgt dabei mit durchschnittlich $0,8 \pm 0,31$ mg P_{ges}/L eliminiertem Phosphor ca. 13 % der gesamten Eliminationsleistung der Kläranlage. Rund 49 % des Phosphors, durchschnittlich $3,2 \pm 1,43$ mg P_{ges}/L , werden dem Abwasserstrom durch die chemische Phosphatfällung als Fällschlamm entzogen. Dabei beträgt die Fällschlammmenge mit ca. 36 kg/d rund 11 % des täglichen Überschussschlammanfalls. Unter Berücksichtigung der biologisch eliminierten Phosphoranteile ergeben sich für die Kläranlage relativ hohe Kennwerte: ein β -Wert von ca. 2,9 mol Al/mol P und ein K_P -Wert von etwa 45 mol Al/kg P.

4.2.5 Musterdorf 4

Die Abwasserteichanlage mit technischer Zwischenstufe (Rotationstauchkörper) von Musterdorf 4 weist eine Ausbaugröße von 3.116 EW auf und ist baulich unverändert seit 1990 in Betrieb. Das Abwasser wird der Kläranlage überwiegend über eine Mischkanalisation zugeführt. Dabei beträgt die Jahresabwassermenge (Mischwasserzufluss) rund 147.000 m³/a bzw. ca. 245 L/(EW·d) (149 L/(EW·d) bezogen auf die Jahresschmutzwassermenge im Trockenwetterzufluss) bei 1.650 angeschlossenen Einwohnern. An die Kläranlage werden Anforderungen bezüglich Kohlenstoffparameter und von Mai bis Oktober zusätzlich bezüglich Stickstoffparameter gestellt. Nach dem Vorpumpwerk, der initialen Durchflussmessung (F1 in Bild 30) und Erfassung der Qualitätsparameter (Q1, 24 h-Mischproben) erfolgt die Grobstoffabtrennung mittels Feinrechen. Im darauffolgenden 1.100 m³ fassenden Vorklärbecken werden die absetzbaren Stoffe sedimentiert und mit dem Primärschlamm dreimal im Jahr in ein Schlammstilo abgezogen. Nach der mechanischen Vorreinigung wird der Abwasserstrom in eine Scheibentauchkörperanlage geleitet. Diese besteht aus vier getauchten Walzenkörpern mit hintereinander angeordneten Styroporscheiben, die insgesamt eine Aufwuchsfläche von rund 1.400 m² bieten. Neben der Kohlenstoffelimination erfolgt hier auch die Nitrifikation. Aufgrund der begrenzten Denitrifikationsleistung der Anlage kann der im Sommer geforderte Grenzwert in den Wintermonaten nicht erreicht wird. Der Feststoffrückhalt erfolgt in der abschließenden Nachklärung, bestehend aus einem 60 m³ fassenden Nachklärbecken (Dortmundbecken) und einem nachfolgenden Schönungsteich mit Flachwasserzone. Im Ablauf erfolgt neben der Probenahme (Q2, qualifizierte Stichprobe) eine Durchflussmessung mittels Venturigerinne (F2). In den Übergangszeiten zwischen Winter und Frühjahr sowie Sommer und Herbst kommt es allerdings durch Ablösung des Biofilmes vom Tauchkörper zu einem vermehrten Schlammabtrieb. Der ganzjährig zum Schutz eines stehenden Gewässers geforderte Überwachungswert für Phosphor von 1,0 mg P_{ges}/L (Bodenseerichtlinie) im Ablauf der Kläranlage kann mittels Simultanfällung im Zulauf der Tauchkörperanlage eingehalten werden. Dabei werden meist kontinuierlich 24 L/d des Fällmittels Eisen(III)chlorid in den Abwasserstrom gegeben. Eine minimale Regulierung der Pumpen erfolgt

nach Bedarf händisch (ca. 20-25 L/d) und wird nicht dokumentiert. Ein Teil des anfallenden Fällschlammes wird gemeinsam mit dem Überschussschlamm aus dem Nachklärbecken dem Vorklärbecken zugeführt (Bild 30), wo der Schlammabzug gemeinsam mit dem Primärschlamm dreimal jährlich erfolgt. In unregelmäßigen Abständen wird der Schlamm gemeinsam mit Schlämmen anderer Kläranlagen aus der Umgebung abgeholt und zur weiteren Verwertung auf der Kläranlage einer Nachbargemeinde gesammelt. Dort erfolgt auch die Messung von Schlammparametern, wie beispielsweise des Trockensubstanzgehaltes. Da die Parameter aus dem Schlammgemisch bestimmt werden, liegen keine Messwerte für den Schlamm der Kläranlage Musterdorf 4 vor. Der im Schönungsteich zurückgehaltene Fäll- und Überschussschlamm wird in großen zeitlichen Abständen (ca. alle 10 Jahre) geräumt.

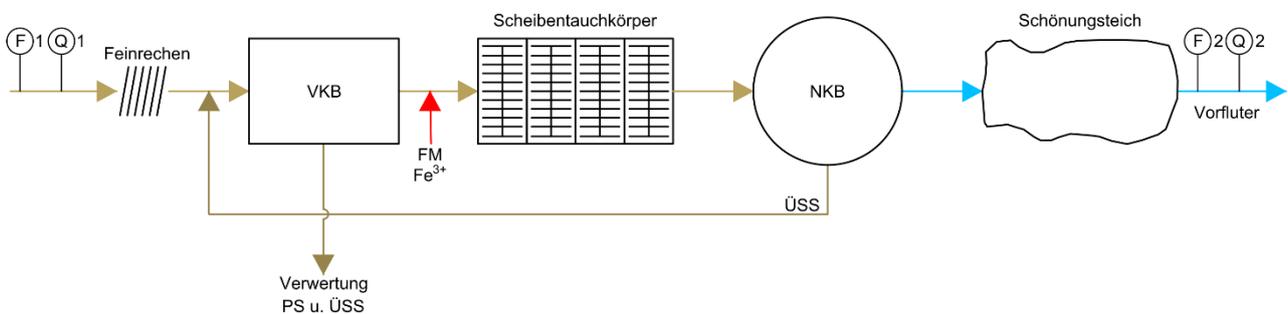


Bild 30: Fließschema Musterdorf 4 (3.100 EW)

Mit einer durchschnittlich erreichten Phosphorablaufkonzentration von $0,69 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ in dem untersuchten Bilanzzeitraum von 3 Jahren (2014-2016) weist die Kläranlage eine Eliminationsleistung von rund 95 % auf. Dabei wird die Zulaufkonzentration von durchschnittlich $5,2 \text{ kg P}_{\text{ges}}/\text{d}$ bei einer Konzentration von ca. $12,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ auf $0,3 \text{ kg P}_{\text{ges}}/\text{d}$ reduziert. Dafür kommen täglich ca. $4,8 \text{ kg}$ (etwa 86 mol) der Wirksubstanz Fe^{3+} zum Einsatz, was einem β -Wert von ca. $1,5 \text{ mol Fe}^{3+}/\text{mol P}$ und einem K_P -Wert von etwa $18 \text{ mol Fe}^{3+}/\text{kg P}$ entspricht. Somit fällt der β -Wert der Kläranlage in dem nach Baumann (2003) für Belebungsanlagen mit einem Grenzwert von $1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ üblichen Bereich. Der K_P -Wert liegt allerdings deutlich unterhalb des im DWA-A 202 (2011) aufgeführten Erfahrungswertes für Anlagen mit chemischer Phosphatelimination ohne Denitrifikation ($30 \text{ mol Me}/\text{kg P}$). Dies hängt sowohl mit der effizienten Verwendung des Fällmittels (β -Wert) als auch mit den vergleichsweise hohen Phosphorzulaufkonzentrationen zusammen. Die nach EÜV (1995) sowie dem Wasserrechtsbescheid geforderten Probenahmeintervalle (einmal monatlich), die Beprobung an lediglich zwei Messstellen (Zu- und Ablauf) und die fehlenden Schlammesswerte bieten für eine detaillierte Bilanzierung der Kläranlage bezogen auf die Phosphorelimination keine ausreichende Datengrundlage. Insbesondere der Einfluss und das Ausmaß von Phosphorrücklösungen aus dem über lange Zeit im Schönungsteich verweilenden Schlamm können nicht abgebildet werden. Es kann

jedoch abschließend festgehalten werden, dass mit einer einfachen chemischen Fällung ein Überwachungswert von $1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ im Ablauf auch für kleine Kläranlagen mit Rotationstauchkörper realisierbar ist (Bild 31). Zur Identifizierung von Einsparungsmaßnahmen und Optimierungsmaßnahmen wäre allerdings eine umfassende Messkampagne zur Abbildung des Leistungspotentials der einzelnen Verfahrensschritte notwendig.

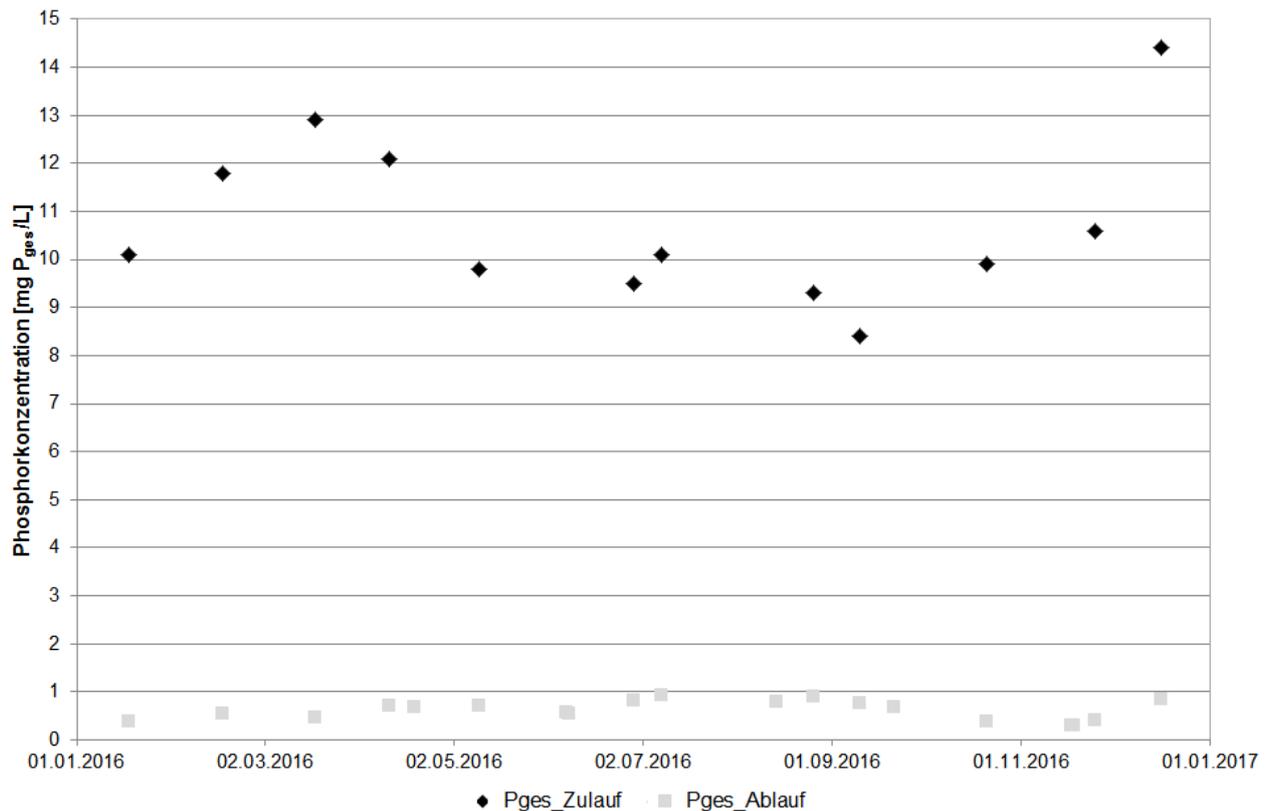


Bild 31: Gesamtphosphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Musterdorf 4 für das Jahr 2016; Überwachungswert $1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$

4.2.6 Musterdorf 5

Das Abwasser der Gemeinde Musterdorf 5 wird fast ausschließlich im Trennsystem gesammelt und durch zwei Pumpwerke intermittierend zur Kläranlage mit einer Ausbaugröße von 3.000 EW gefördert. Die Jahresabwassermenge (Mischwasserzufluss) beträgt rund $106.000 \text{ m}^3/\text{a}$ bzw. ca. $193 \text{ L}/(\text{EW}\cdot\text{d})$ ($113 \text{ L}/(\text{EW}\cdot\text{d})$ bezogen auf die Jahresschmutzwassermenge im Trockenwetterzufluss) bei rund 1.500 angeschlossenen Einwohnern. An die Kläranlage werden Anforderungen bezüglich Kohlenstoffparameter und von Mai bis Oktober zusätzlich bezüglich der Stickstoffparameter Ammonium und Nitrat gestellt. Die Kläranlage besteht aus drei Becken in Erdbauweise (Bild 32),

wobei die ersten beiden Belebungsbecken belüftet werden können. Das durch einen Spiralsieb-
 rechen vorbehandelte Abwasser wird im ersten Belebungsbecken mit Überlaufbecken behandelt, wo-
 bei dieses Becken eine Schlammrückführung aus dem Überlaufbecken zum gegenüberliegenden
 Zulauf mit Überschussschlammabzug besitzt. Das zweite Belebungsbecken dient zum weiteren Ab-
 bau der Abwasserinhaltsstoffe und die Schlamm-anreicherung wird unregelmäßig (ca. alle zehn
 Jahre) entfernt. Das dritte Becken ist als Nachklärbecken konzipiert, welches zum Schlammrückhalt,
 besonders während der Regenwetterzuflüsse, verwendet wird und seltener als das Belebungsbe-
 cken 2 entleert wird. Aufgrund des intermittierenden Zuflusses erfolgt die Simultanfällung durch Zu-
 dosierung des Fällmittels Eisen(III)chloridsulfat in den Rücklaufschlammstrom (Simultanfällung). Es
 gibt laut Betreiber keine betrieblichen Probleme in Verbindung mit der Phosphorelimination. Der
 entnommene Überschussschlamm wird in drei Stapelbehältern gesammelt und ca. drei Mal im Jahr
 mit einer mobilen Schneckenpresse für jeweils ca. 12 Tage entwässert. Das dabei anfallende Was-
 ser wird kontinuierlich in den Anlagenzulauf zugegeben, wobei mit Ausnahme von Ammonium keine
 Verschlechterung der Ablaufwerte beobachtet wurde. Der abgefahrene Schlamm wird thermisch
 verwertet.

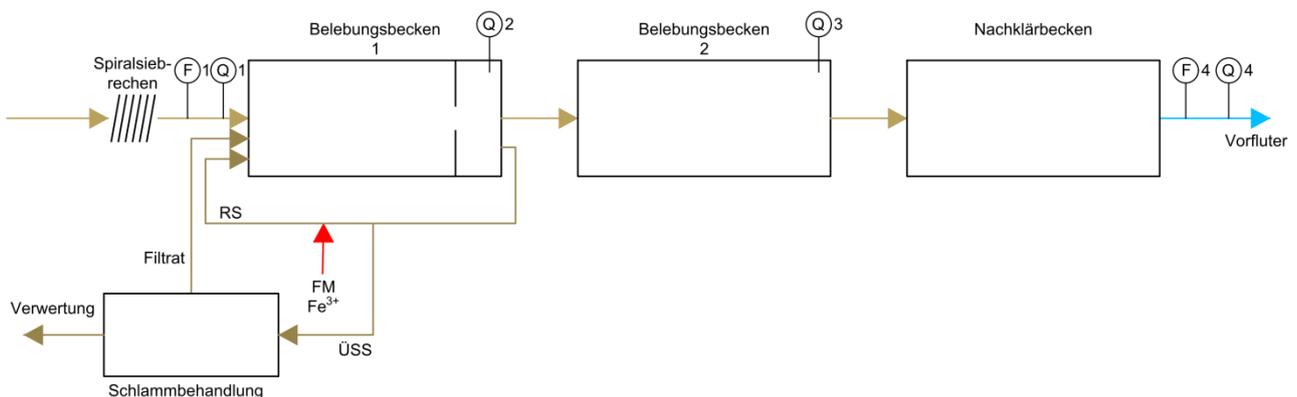


Bild 32: Fließschema Musterdorf 5 (3.000 EW)

Eine Bilanzierung der Phosphorelimination ist auch für die Kläranlage des Musterdorfes 5 aufgrund
 der nach EÜV (1995) sowie im Wasserrechtsbescheid geforderten Probenahmeintervalle und deren
 Umfang mit großen Unsicherheiten verbunden. Im Zulauf zur Anlage erfolgt einmal pro Monat eine
 Probenahme sowie ca. 30 Ablaufproben pro Jahr, die jeweils auch den Parameter P_{ges} umfassen.
 Die abgegebene Überschussschlammmenge variiert aufgrund der ungleichen Zeiträume zwischen
 den je ca. drei Entnahmen pro Jahr stark. Außerdem liegt nur der Trockenrückstand des nassen
 sowie des entwässerten Schlamms vor. Eine Bestimmung weiterer Parameter, wie beispielsweise
 Phosphor, aus dem Schlamm erfolgt nicht. Folglich sind weder die Zulauffrachten sicher abschätz-
 bar noch die Phosphorentnahme mittels Schlamm im selben Zeitraum bestimmbar. Auch ist der

tatsächliche Schlammanfall für die Jahre 2014-2016 durch die Akkumulation von Schlamm im Belebungsbecken 2 sowie im Nachklärbecken und deren unregelmäßige Entnahme in sehr langen Zeiträumen nicht kalkulierbar. Außerdem sind mögliche Phosphorrücklöseeffekte aus den Schlammablagerungen nicht auszuschließen, wobei deren Höhe mit den vorliegenden Daten nicht abgeschätzt werden kann (Cornel et al., 2015). Hinzu kommt, dass das Fällmittel mittels Tankzug an mehrere Kläranlagen angeliefert wird und dabei keine Erfassung der abgenommenen Mengen pro Lieferung und getrennt nach Kläranlagen erfolgt. Eine Ablesung des Füllstands im Behälter findet ebenfalls nicht statt, eine Ablesung der Pumpenförderung vor Ort war nicht möglich. Eine minimale Regulierung der Pumpen erfolgt nach Bedarf händisch und wird nicht dokumentiert. Ausgehend von früheren Abnahmen (ungefähr ein Tanklastzug mit ca. 23.900 kg pro Jahr) kann von einer Fällmitteldosierung von etwa 43 L/d ausgegangen werden. Somit werden täglich ca. 8 kg Fe^{3+} bzw. 140 mol Fe^{3+} zugegeben.

Trotz des fast vollständigen Trennsystems schwanken die Zulaufkonzentrationen stark, wobei die Ablaufkonzentrationen geringeren Schwankungen unterliegen (Bild 33). Als Ergebnis kann wiederum bei dieser kleinen Kläranlage festgehalten werden, dass die in den Jahren 2014-2016 gemessenen Tagesfrachten im Zulauf (2,24-7,02 kg $\text{P}_{\text{ges}}/\text{d}$) im Gegensatz zu den Frachten im Ablauf (im Mittel 0,02-0,29 kg $\text{P}_{\text{ges}}/\text{d}$) absolut gesehen stärker variieren.

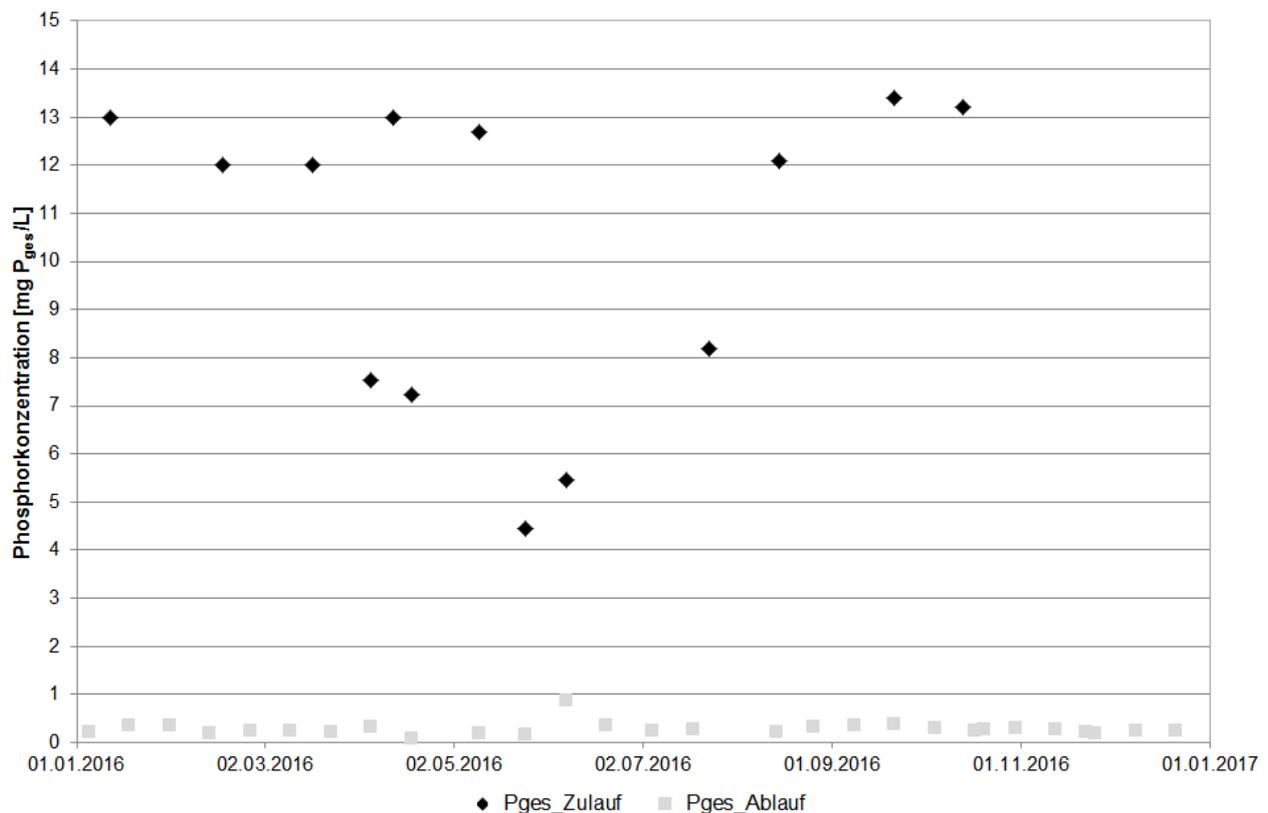


Bild 33: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Musterdorf 5 für das Jahr 2016; Überwachungswert 1,0 mg P_{ges}/L

Da die Dosierung der Pumpe meist gleich bleibt, schwanken die berechneten K_P -Werte für diese Anlage stark. Der mittlere Jahreswert für K_P liegt bei ca. 45 mol Fe/kg P, wobei der Erfahrungswert nach DWA-A 202 (2011) für Anlagen mit reiner chemischer Fällung ohne Denitrifikation bei ca. 30 mol Me/kg P liegt. Hierbei muss aber beachtet werden, dass beim Erfahrungswert eine geringere Phosphorelimination angenommen wird. Bei dieser Kläranlage ist die Phosphorelimination sehr hoch mit ca. 97 % und das Verhältnis von P_{ges} zu BSB_5 im Zulauf beträgt knapp 2 %. Aufgrund der meist kontinuierlichen Dosierung ist von einem zeitweise zu hohen Fällmittelverbrauch auszugehen. Der Kennwert β wurde im Mittel für 2014-2016 mit etwa 1,4 mol Fe/mol P abgeschätzt, jedoch unterliegt dieser Wert ebenfalls großen Unsicherheiten.

Im Mittel liegt bei dieser Anlage die Ablaufkonzentration unter 0,3 mg P_{ges} /L, in den Jahren 2014 und 2015 sogar unter 0,2 mg P_{ges} /L, und ist somit sehr gering. Die maximale Ablaufkonzentration lag bei 0,87 mg P_{ges} /L (Bild 33) und lag somit unter dem geforderten Ablaufwert von 1,0 mg P_{ges} /L. Folglich kann auch bei kleineren Anlagen bei entsprechendem Fällmitteleinsatz eine weitestgehende Phosphorelimination erreicht werden. Die in diesem Abschnitt berechneten Kennwerte sind unter Berücksichtigung

sichtigung der hohen Eliminationsleistung als realistisch anzusehen, wobei derzeit eine genaue Ermittlung nicht möglich ist. Daher sollten zukünftig die Fällmittelmengen aufgezeichnet sowie stichprobenartig die Phosphorbelastung des abgezogenen Schlammes bestimmt werden. Mit diesen zusätzlichen Daten wäre eine genauere Bilanzierung der Kläranlage möglich und es könnte anschließend über Maßnahmen einer optimierten Fällmitteldosierung, beispielsweise mittels automatischer Steuerung, entschieden werden. Grundsätzlich stellen aber die langen Aufenthaltszeiten des abgesetzten Schlammes in den letzten beiden Becken als Phosphorsenken eine Rücklösungsfahr dar. Daher sollten zukünftig die Reinigungsintervalle bei diesem Anlagentyp kürzer gehalten werden, damit auch der Austrag von Feststoffen möglichst geringgehalten wird. Dies würde aber für solch kleine Anlagen mit vergleichsweise hohen spezifischen Kosten verbunden sein.

4.2.7 Musterstadt 1

Die Kläranlage der Musterstadt 1 hat eine Ausbaugröße von 35.000 EW. Derzeit sind etwa 25.700 Einwohner angeschlossen, wobei die mittlere Zulaufbelastung ca. 38.500 EW beträgt. Die Jahresabwassermenge (Mischwasserzufluss) beträgt rund 2.664.000 m³/a bzw. ca. 190 L/(EW·d) (124 L/(EW·d) bezogen auf die Jahresschmutzwassermenge im Trockenwetterzufluss). Der letzte große Umbau erfolgte Anfang der 1990er Jahre, um die Ziele der Stickstoff- und Phosphorelimination erreichen zu können. Der mittlere Zulauf aus dem Misch- und Trennsystem beträgt ca. 4.850 m³/d bei Trockenwetter, bei einer Jahresabwassermenge von rund 2.960.600 m³/a im Jahr 2016. Das gesammelte Abwasser wird über das Einlaufhebewerk zum Trommelrechen gepumpt und anschließend in zwei parallelen Sand- und Fettfängen behandelt (Bild 34). Danach folgt die Messung des Durchflusses (F1, Bild 34) und der Zulaufkonzentrationen (Q1, 24 h-Mischproben). Das gesamte Abwasser durchfließt das Vorklärbecken (230 m³), das anaerobe Bio-P-Becken (590 m³) sowie die beiden Denitrifikationsbecken (je 400 m³). Die Denitrifikation ist somit vorgeschaltet und wird intermittierend betrieben.

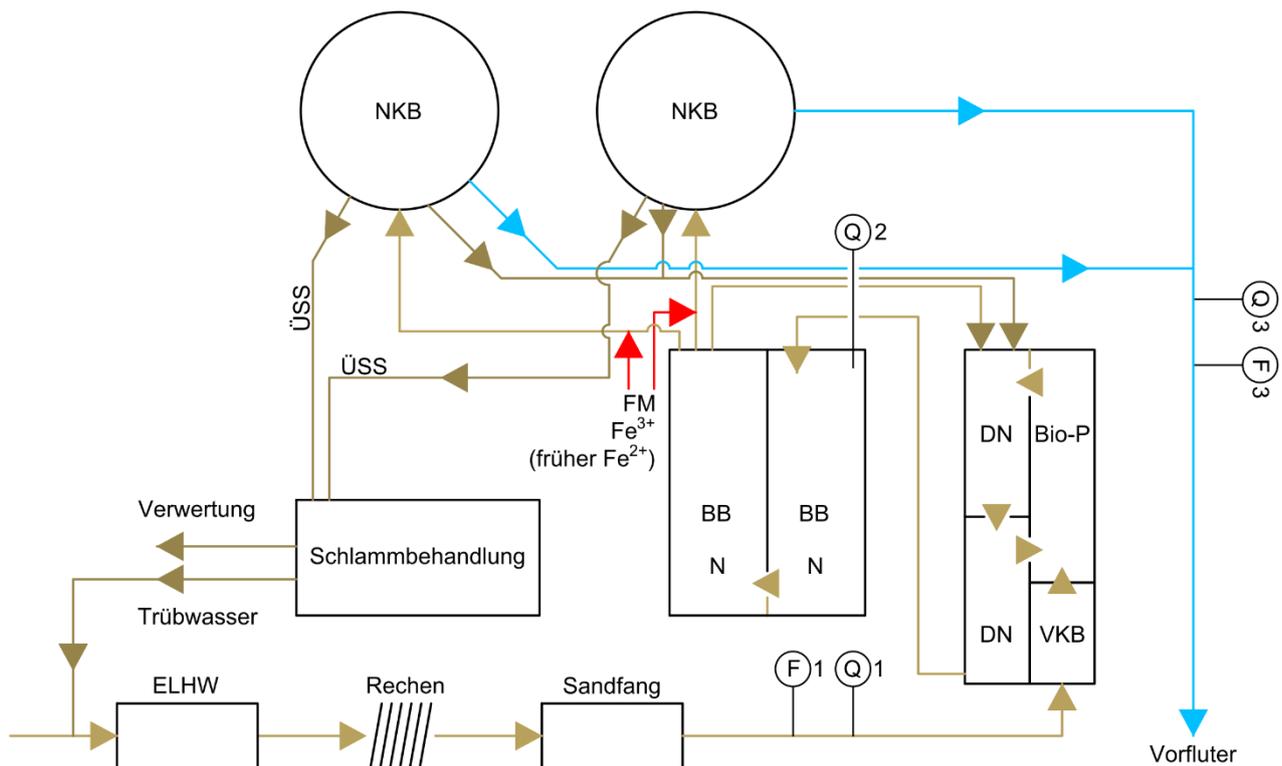


Bild 34: Fließschema Musterstadt 1 (35.000 EW)

Im Auslauf des zweiten Nitrifikationsbeckens (je 1.030 m³) erfolgt die Dosierung des Fällmittels Eisen(III)chlorid (Simultanfällung). Dabei erfolgte im Jahr 2015 eine Umstellung von Fe²⁺ auf Fe³⁺, da man zuvor nicht sicher wusste, ob die Aufenthaltszeit in der Belebung für die vollständige Oxidation des Eisens ausreicht. Diese Maßnahme bedeutet zwar einen höheren Einkaufspreis für das Fällmittel, jedoch sanken seit deren Umsetzung die verbrauchten Fällmittelmengen und die Betriebssicherheit nahm zu. Die Grunddosierung ist auf 2 % der Dosierleistung eingestellt und eine Zudosierung erfolgt entsprechend der Phosphatkonzentration im Nitrifikationsbecken (Q2, Online-Messung). Die Phosphatkonzentration in der Belebung schwankt meist zwischen 0,3 mg PO₄-P/L und 2,0 mg PO₄-P/L, abhängig davon, wie gut die Bio-P funktioniert. Ab einer Konzentration von 1,0 mg PO₄-P/L im Nitrifikationsbecken wird die Grunddosierung frachtproportional erhöht, eine Übernahme der eingestellten Werte ins Betriebstagebuch erfolgt jedoch nicht. Die Funktionsweise der beiden Nachklärbecken (2.390 m³ und 1.800 m³) wurde durch nachgerüstete Hydrographen (Einlaufbauwerke) deutlich verbessert. Im Ablauf erfolgt ebenfalls eine Messung des Durchflusses (F3) sowie eine Probenahme zur Bestimmung der Ablaufkonzentrationen (Q3, 2 h-Mischproben). Eine Online-Messung des Phosphors im Ablauf erfolgt nicht, sodass man nicht unmittelbar erfährt, ob die Fällmitteldosierung

ausreichend ist. Laut Betreiber traten bisher keine betrieblichen Probleme mit der Phosphorelimination auf. Der entnommene Primär- und Überschussschlamm wird in einer Schneckenpresse entwässert.

Die Zulaufbelastung an Gesamtphosphor betrug im Jahr 2016 etwa 81 kg P_{ges}/d , bei einer mittleren Konzentration im Zulauf von ca. 10,0 mg P_{ges}/L (Q1, Bild 34) und einer mittleren Abwassermenge von etwa 8.100 m³/d (F1). Im Jahr 2016 wurden ca. 120 t Eisen(III)chlorid als Fällmittel verwendet. Dies entspricht bei einem Wirkstoffgehalt von 132 g/kg Fällmittel einer täglichen Menge von etwa 45 kg Eisen bzw. 808 mol Eisen. Die Ablauffracht des Gesamtphosphors betrug für das Jahr 2016 im Mittel etwa 4,9 kg P_{ges}/d (Q3, Bild 34), bei einer mittleren Konzentration von 0,60 mg P_{ges}/L . Der Überwachungswert bei dieser Anlage der GK 4 liegt bei 2,0 mg P_{ges}/L , wurde aber auf 1,4 mg P_{ges}/L heruntererklärt. Die Eliminationsleistung betrug für das Jahr 2016 ca. 94 %. Auffällig ist auch bei dieser recht großen Anlage, dass die Zulaufkonzentrationen stark schwanken (Bild 35).

Als Kennwerte wurden für die Kläranlage Musterstadt 1 im Mittel für K_P ca. 10 mol Fe/kg P und für β etwa 2,4 mol Fe/mol P für das Jahr 2016 berechnet. Dieser recht niedrige Wert für K_P ist vergleichbar mit anderen gut funktionierenden Bio-P-Anlagen, die zusätzlich eine chemische Phosphatfällung betreiben (Tabelle 20).

Aufgrund der vermehrten Bio-P ist in der Schlammbehandlung (Schneckenpresse) mit erhöhten Phosphorkonzentrationen im Filtrat zu rechnen (Tabelle 23). Vergleichsweise höhere Konzentrationen im Filtrat sind ein Indikator für eine besser funktionierende Bio-P. Im Jahr 2016 betrug die Konzentration im Filtrat im Mittel 47 mg P_{ges}/L , bei einem täglichen Filtratanfall von rund 78 m³/d. Dies ergibt somit eine zusätzliche Belastung des Zulaufs von rund 3,7 kg P_{ges}/d bzw. von knapp 5 % der gemessenen Zulauffracht. Aufgrund der vermehrten Bio-P ist der Phosphorgehalt bezogen auf die Schlamm-trockenmasse sehr hoch und betrug im Jahr 2016 ca. 8,2 %. Dieser Bilanzausschnitt bestätigt, dass mit dem Bio-P-Verfahren Fällmittel in einem wesentlichen Umfang eingespart werden kann, jedoch die Rückbelastung bei der Betriebsweise mitberücksichtigt werden muss.

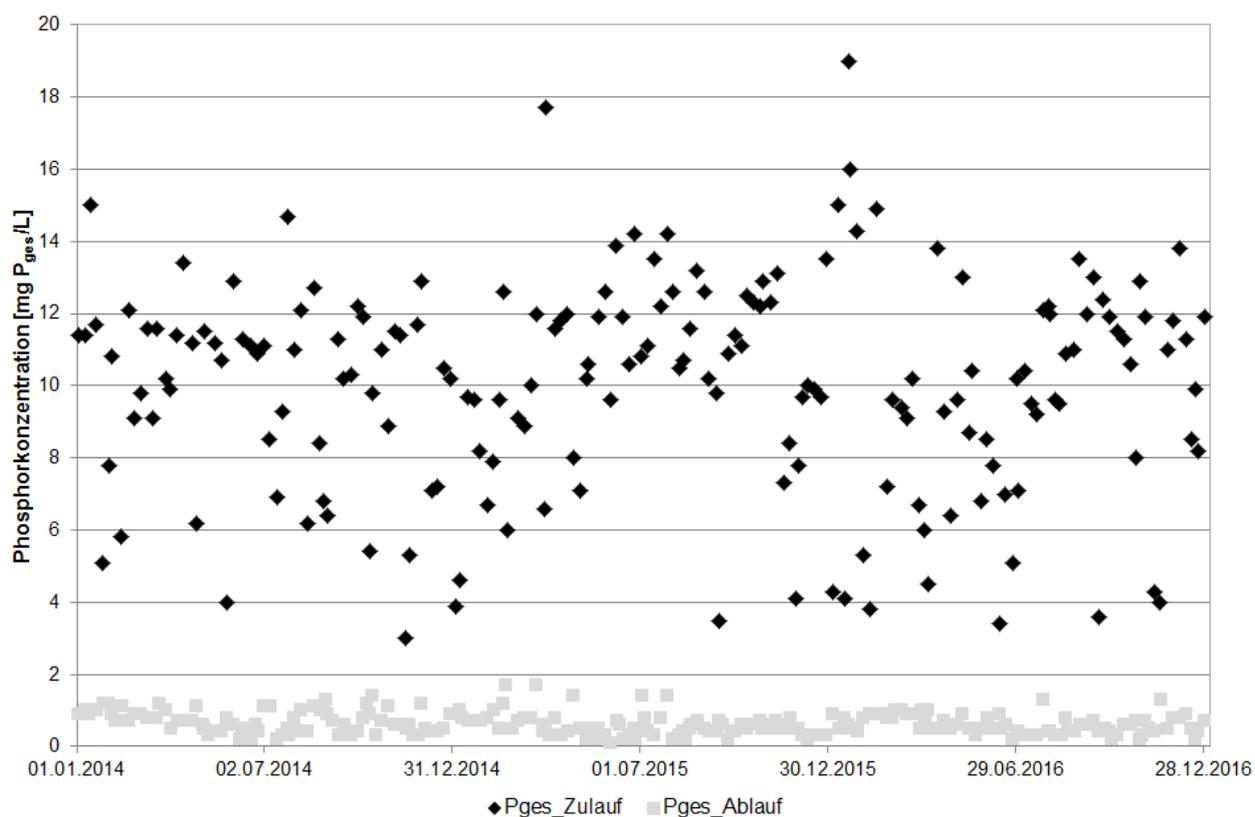


Bild 35: Gesamtphosphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Musterstadt 1 für den Zeitraum 2014-2016; erklärter Überwachungswert 1,4 mg P_{ges}/L

Tabelle 23: Gesamtphosphorkonzentrationen (mg P_{ges}/L) im Filtrat der Schneckenpresse

Monat	2014	2015	2016
Januar	58,5	26,6	29,5
Februar	52,7	29,6	33,3
März	-	42,4	25,6
April	-	51,7	45,4
Mai	49,5	56,5	69,5
Juni	100	-	53,6
Juli	129	93,9	49,4
August	98,3	96,1	58,5
September	-	186	-
Oktober	33,1	-	-
November	58,3	22,2	58,9
Dezember	-	33,4	-

4.2.8 Musterstadt 2

Die Kläranlage hat eine Ausbaugröße von 87.500 EW und die mittlere Zulaufbelastung beträgt derzeit ca. 75.100 EW. Die Jahresabwassermenge (Mischwasserzufluss) beträgt etwa 9.000.000 m³/a bzw. ca. 328 L/(EW·d) (196 L/(EW·d) bezogen auf die Jahresschmutzwassermenge im Trockenwetterzufluss). Das Einzugsgebiet der Kläranlage wird vornehmlich über ein Mischsystem entwässert. Das Abwasser wird zunächst über Schneckenpumpen angehoben (Bild 36). Anschließend werden Grobstoffe mechanisch in der Rechenanlage durch einen Feinsiebreen entfernt. Aufschwimmende Stoffe wie Fette und Öle, sowie Sand werden im belüfteten Sand- und Fettfang entfernt. Im darauffolgenden Vorklärbecken mit einem Volumen von 2.500 m³ werden die absetzbaren Stoffe entfernt und als Primärschlamm den zwei in Serie geschalteten Faultürmen zugeführt, wo sie unter anaeroben Bedingungen der Klärgaserzeugung dienen. Die biologische Stufe besteht aus drei Belebungsbecken mit einem vorgeschalteten Denitrifikationsbecken und zwei belüfteten Nitrifikationsbecken mit insgesamt 9.080 m³ Fassungsvermögen.

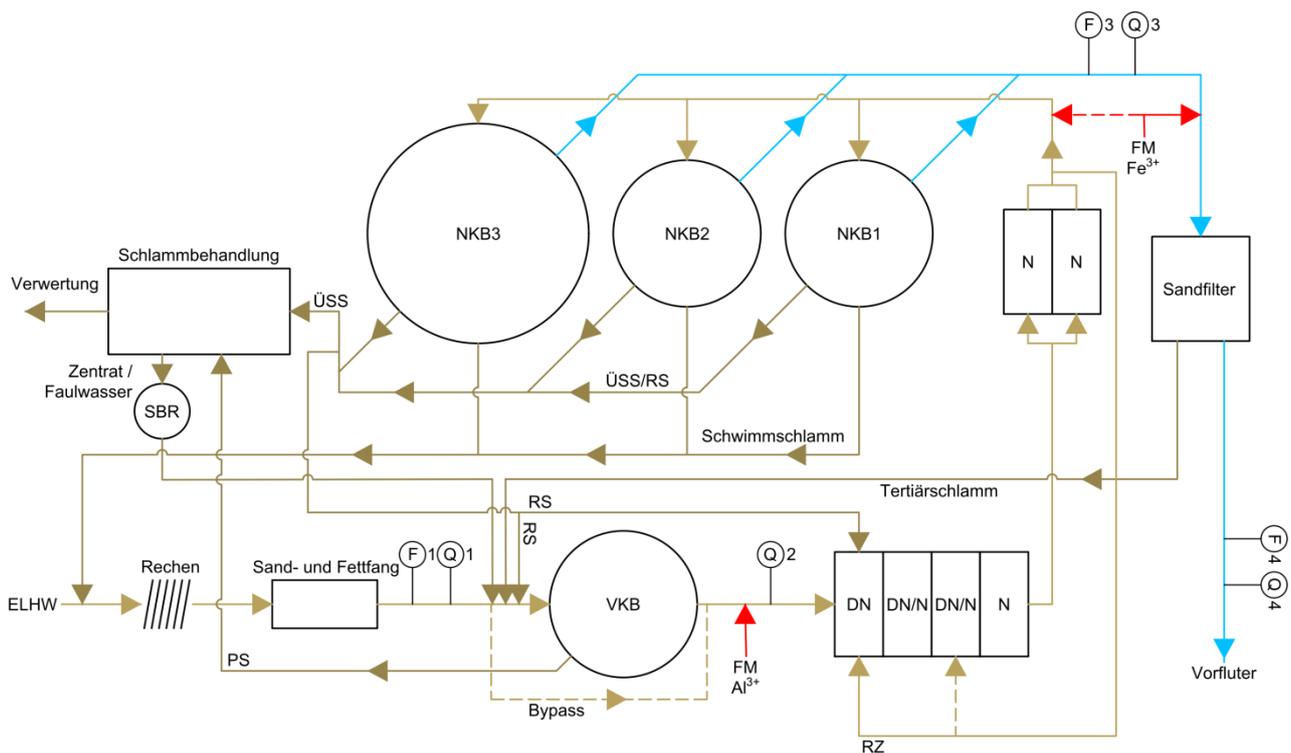


Bild 36: Fließschema Musterstadt 2 (87.500 EW)

In drei parallelen Nachklärbecken wird der Schlamm abgezogen und zum Großteil der Denitrifikation als Rücklaufschlamm zugeführt und zu einem kleinen Teil in Form von Überschussschlamm der Entwässerung zugeführt. Der eingedickte Überschussschlamm wird zusammen mit dem Primärschlamm in den Faultürmen fermentiert. Die Entsorgung des Schlammes erfolgt seit 2007 als Co-

Verbrennung (Zementwerk). Das in der Schlammfäulung anfallende Faulwasser wird zusammen mit dem Zentrat aus der Faulschlammwässerung in einer SBR-Anlage behandelt. Der nur noch schwach belastete Ablauf aus der SBR-Anlage wird daraufhin wieder dem Vorklärbecken zugeführt. Die letzte Reinigungsstufe besteht aus einem Flockungsfilter mit zehn Kammern, in dem neben physikalischen Prozessen auch biologische Prozesse stattfinden. Es werden keine Flockungshilfsmittel verwendet. Die zurückgehaltenen Feststoffe werden durch Rückspülung aus dem Filterbett entfernt und in der Vorklärung abgeschieden. Betriebliche Probleme in Verbindung mit der Phosphorelimination sind laut dem Betreiber MAP-Ausfällungen sowie deren Ablagerungen in den Rohrleitungen. Daher werden die Rohrleitungen einmal jährlich gereinigt, was v. a. auf der Schlammseite wichtig ist. Außerdem kommt es bei der Umstellung vom Sommer- zum Winterbetrieb und umgekehrt für kurze Zeit zu einer vermehrten Blähschlamm-Bildung.

Die Zulaufbelastung an Gesamtphosphor betrug in den Jahren 2014 bis 2016 etwa $151 \text{ kg P}_{\text{ges}}/\text{d}$, bei einer mittleren Konzentration im Zulauf von $5,72 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ (Q1, Bild 36) und einer mittleren Abwassermenge pro Tag von $26.400 \text{ m}^3/\text{d}$ (F1). Durch die unmittelbare Nähe zum Bodensee und dessen Funktion als Vorfluter werden an die Ablaufqualität der Kläranlage besondere Anforderungen gestellt, weshalb die Anlage einen Überwachungswert von $0,3 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ einhalten muss. Die Phosphorelimination wird daher hauptsächlich durch chemische Fällung in Kombination mit einem Zweischichtfilter erzielt, wobei die Kläranlage über drei Fällmitteldosierstellen verfügt: Die erste Dosierstelle befindet sich im Zulauf zur Biologie (Bild 36). Als Fällmittel wird Aluminiumsulfat verwendet. Dieses dient in erster Linie der Bekämpfung von fadenförmigen Bakterien (*Mikrothrix parvicella*). Es werden hier täglich ca. 38 kg Aluminium bzw. 1.390 mol Aluminium verbraucht. Die Flockenbildung findet simultan mit den biologischen Prozessen in den Belebungsbecken statt. Die zweite Dosierstelle befindet sich am Ablauf der Belebungsbecken. Hier wird täglich etwa 82 kg Eisen bzw. 1.470 mol Eisen in Form von Eisen(III)chlorid eingesetzt. Die Metallphosphatflocken der Simultanfällung werden in den Nachklärbecken durch Sedimentation entfernt. Die letzte Dosierstelle befindet sich im Zulauf des Flockungsfilters. Dort wird ein Großteil der verbliebenen fällbaren Phosphate durch Eisen(III)chlorid gefällt und im Zweischichtfilter zurückgehalten. Der Fällmittelverbrauch beträgt pro Tag etwa 31 kg Eisen bzw. 560 mol Eisen. Die Dosiermengen sind jeweils frachtproportional bezogen auf das in Online-Messsonden bestimmte ortho-Phosphat, wobei die geringsten Mengen an Fällmittel vor dem Filter hinzugegeben werden (Bild 37). Außerdem schwanken die mittleren Monatswerte der dosierten Fällmittelmengen für die beiden anderen Standorte stark. Eine hohe Korrelation zum Durchfluss ist nicht erkennbar.

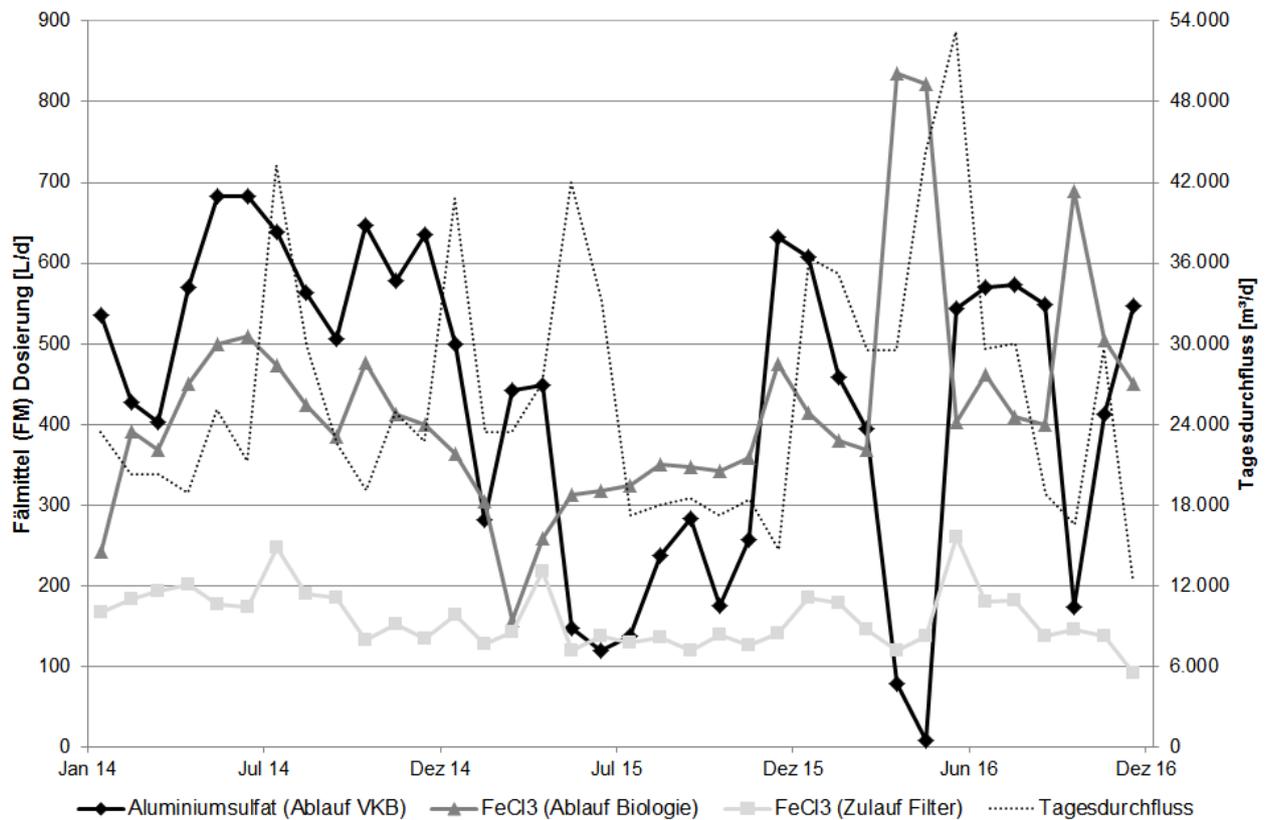


Bild 37: Fällmittelmengen getrennt nach Dosierstellen und Tagesdurchflüsse der Kläranlage Musterstadt 2 als Monatsmittelwerte für den Zeitraum 2014-2016

Die Ablauffracht des Gesamtphosphors betrug über die Jahre 2014 bis 2016 im Mittel etwa 3,3 kg P_{ges}/d (Q4, Bild 36), bei einer mittleren Konzentration von 0,13 mg P_{ges}/L . Die Eliminationsleistung beträgt somit ca. 97 %. Als Kennwerte wurden für die Kläranlage Musterstadt 2 im Mittel für K_P ca. 23 mol Me/kg P und für β etwa 2,0 mol Me/mol P über den Zeitraum 2014-2016 berechnet.

Im Ablauf der Nachklärbecken beträgt die AFS-Konzentration im Mittel ca. 6,1 mg AFS/L. Diese wird durch die Filtration (Filtergeschwindigkeit 5,5 m/h) um ca. 75 % auf 1,6 mg AFS/L reduziert. Somit kann davon ausgegangen werden, dass im Kläranlagenablauf nur ca. 0,05 mg P/L partikulär vorliegen. Im Ablauf des Nachklärbeckens wären es knapp 0,20 mg P/L und somit müsste bei einer reinen chemischen Fällung ohne Filtration ein deutlich erhöhter Aufwand betrieben werden, um den Überwachungswert von 0,3 mg P_{ges}/L einzuhalten. Derzeit liegen die Gesamtphosphorkonzentrationen im Ablauf der Nachklärbecken im Mittel bei rund 0,40 mg P_{ges}/L (Bild 38), wobei im Monatsmittel Konzentrationen bis 0,54 mg P_{ges}/L gemessen wurden.

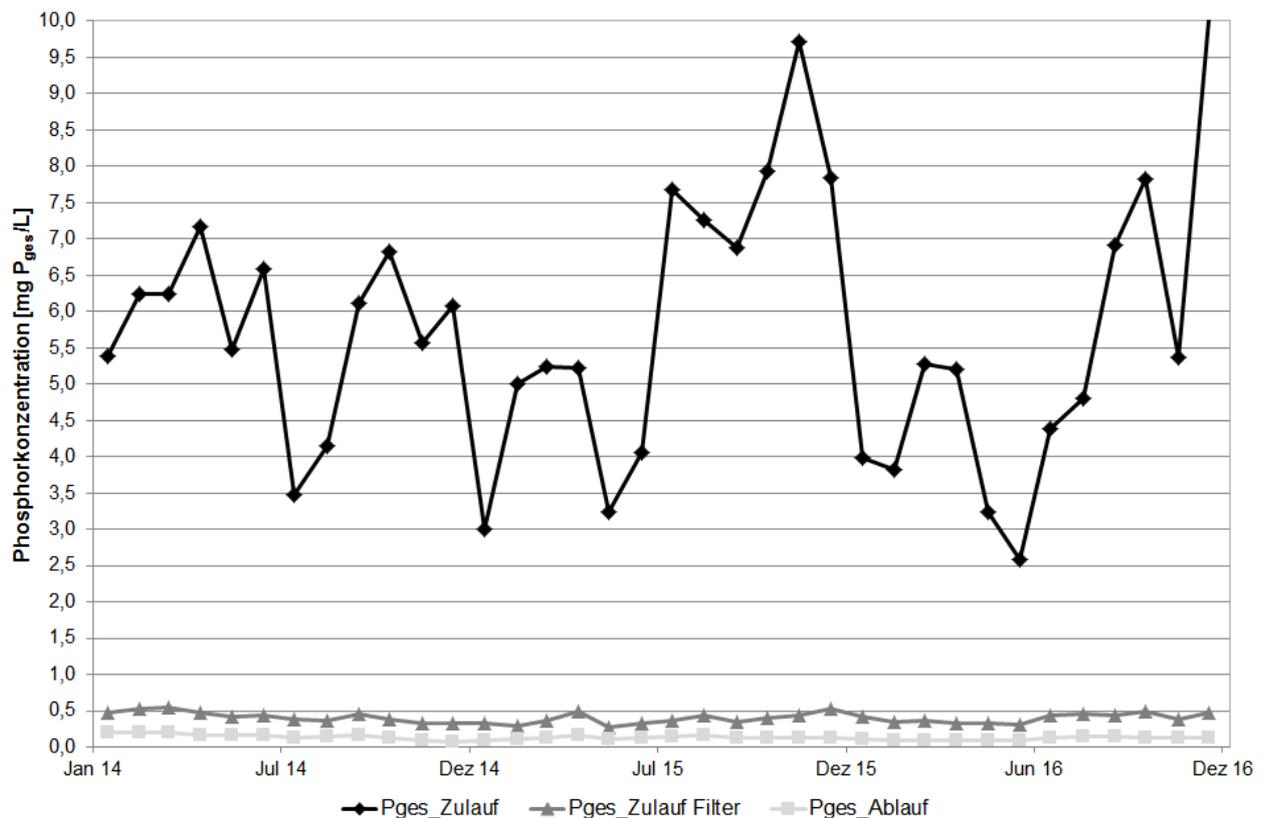


Bild 38: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf der Kläranlage, im Zulauf zum Filter (gleich Ablauf Nachklärbecken) und im Ablauf der Kläranlage Musterstadt 2 als Monatsmittelwerte für den Zeitraum 2014-2016; Überwachungswert 0,3 mg P_{ges}/L

Somit wäre eine Einhaltung eines Überwachungswertes von 0,5 mg P_{ges}/L auch ohne Filtration potentiell möglich, aufgrund des Wertes von 0,3 mg P_{ges}/L ist die Filtration aber für diese Kläranlage notwendig, da im Mittel ein Ablaufwert von 0,2 mg P_{ges}/L gefahren werden muss. Dies ist mit höheren Betriebskosten verbunden, beispielsweise um das Wasser ca. 8 m hochzupumpen (für weitere Kostenfaktoren siehe auch Kapitel 6.2).

4.2.9 Musterstadt 3

Die Kläranlage der Musterstadt 3 hat eine Ausbaugröße von 290.000 EW. Derzeit sind ca. 98.000 Einwohner durch ein Mischsystem angeschlossen. Hinzu kommen 120.000 EW an Industrieabwasser durch eine Hefefabrik mit eigener Vorbehandlung und starken Belastungsschwankungen sowie zusätzlich textilverarbeitendes Gewerbe und eine Lederfabrik. Durch diese Indirekteinleiter kommt es zu einer hohen Belastung durch schwer abbaubare Kohlenstoffverbindungen und Stickstoff. Die Jahresabwassermenge (Mischwasserzufluss) beträgt etwa 1.754.000 m³/a bzw.

1.237.000 m³/a bezogen auf die Jahresschmutzwassermenge im Trockenwetterzufluss. Die mechanische Entfernung von Grobstoffen erfolgt durch drei parallele Bogenrechen mit 8 mm Spaltbreite (Bild 39). Danach werden Öle und Fette sowie Sand in vier parallelen, belüfteten Sand- und Fettfängen zurückgehalten. Absetzbare Feststoffe werden anschließend in parallel durchflossenen Vorklärbecken entfernt. Nach der Vorklärung gelangt das Abwasser in die Belebungsstufe, die aus sechs Belebungsbecken mit insgesamt 35.000 m³ Volumen besteht. 14.000 m³ davon werden als vorge-schaltete Denitrifikation (vier Becken) betrieben. Der entstehende Belebtschlamm wird in den drei Nachklärbecken mit insgesamt 16.800 m³ Volumen abgezogen. Der Schlammanteil, der nicht als Rücklaufschlamm dem Denitrifikationsbecken zugeführt wird, wird gemeinsam mit dem Primär-schlamm in drei Faultürmen anaerob zu Faulgas umgesetzt. Der zu Ende gefaulte Faulschlamm wird eingedickt und das Zentrat in einem Sammelbehälter zwischengespeichert und kontinuierlich der Denitrifikationsstufe zugeführt. Die Gesamtphosphorkonzentration im Zentrat betrug im Jahr 2016 im Mittel 42,6 mg P_{ges}/L (n=45) und ist somit deutlich geringer als die Werte der Kläranlage Musterstadt 1 mit ausgeprägter Bio-P (Tabelle 23). Die letzte Reinigungsstufe besteht aus einem abwärts durchströmten zweischichtigen Flockungsfilter mit zehn Kammern (Filtergeschwindigkeit 12 m/h). Hier werden Feststoffe entfernt, die durch die Nachklärung nicht abgetrennt werden konnten, sowie zusätzlich Fällungsprodukte zurückgehalten. Die Filter werden regelmäßig rückgespült und das Rückspülwasser wird der Vorklärung zugeführt, ebenso wie das Zentrat und das Prozesswasser aus der Schlammbehandlung. Derzeit wird kein Flockungshilfsmittel eingesetzt. In Verbindung mit der Phosphorelimination gibt es laut Betreiber keine betrieblichen Probleme.

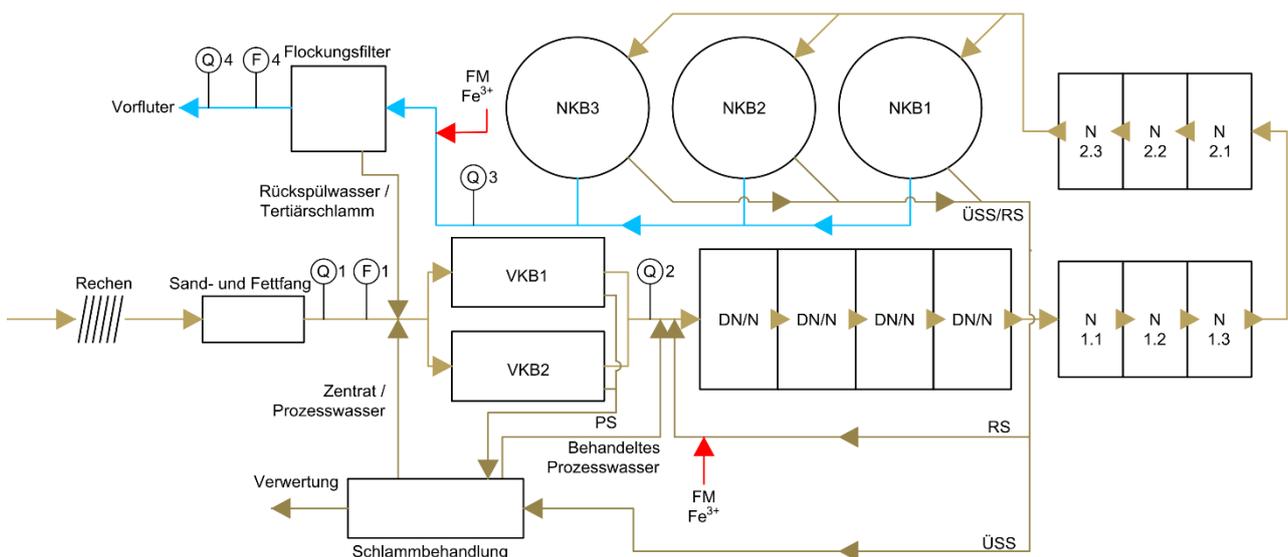


Bild 39: Fließschema Musterstadt 3 (290.000 EW)

Im Zeitraum 2014-2016 betrug die mittlere, tägliche Phosphorfracht im Zulauf ca. 273 kg P_{ges}/d , bei einer mittleren Konzentration von etwa 5,8 mg P_{ges}/L . Ein Teil des Phosphors wird bereits in den Vorklärbecken entfernt. Dabei schwankt der Anteil des entfernten Gesamtphosphors von Monat zu Monat zwischen 7 % und 28 % (Bild 40). Der Phosphor wird anschließend durch den Zellaufbau sowie durch die Simultanfällung und den Flockungsfilter entfernt. Die erste Fällmitteldosierstelle befindet sich im Rücklaufschlammstrom zum Denitrifikationsbecken (Bild 39). Das verwendete Fällmittel ist Eisen(III)chloridsulfat. Hiervon werden täglich ca. 173 kg Eisen bzw. 3.100 mol Eisen in den Rücklaufstrom dosiert. Die Dosiermenge wird über eine Online-Messsonde (Parameter ortho-Phosphat) in der Belebung geregelt, wodurch sich unterschiedliche Dosierungen ergeben (Bild 40). Die im Belebungsbecken gebildeten Eisenphosphatflocken werden gemeinsam mit dem Überschussschlamm in den Nachklärbecken abgezogen. Die zweite Dosierstelle befindet sich im Zulauf des Flockungsfilters. Auch hier wird Eisen(III)chloridsulfat als Fällmittel verwendet. Die Menge pro Tag beträgt ca. 23 kg Eisen bzw. 400 mol Eisen und wird über eine ortho-Phosphat-Onlinesonde im Ablauf des Filters geregelt. Die gebildeten Flocken werden durch das Filterbett zurückgehalten, mit dem Rückspülwasser der Vorklärung zugeführt, und dort als Bestandteil des Primärschlammes entfernt. Dabei korreliert die Dosierung des Fällmittels im Filter negativ mit den Ablaufkonzentrationen und ist im Vergleich zu den Fällmittelmengen bei der Simultanfällung recht gering (Bild 40). Für das Jahr 2016 wurde im Jahresmittel ein K_P -Wert von ca. 14 mol Fe/kg P berechnet, der vergleichsweise gering ist. Die mittlere Ablaufkonzentration der Jahre 2014 bis 2016 lag bei 0,26 mg P_{ges}/L , was etwa 12,2 kg P_{ges}/d entspricht. Die Phosphoreliminationsleistung beträgt somit ca. 96 %. Der Überwachungswert für Gesamtphosphor beträgt nach AbwV (2004) 1,0 mg P_{ges}/L . Der Betreiber der Kläranlage Musterstadt 3 hat jedoch einen niedrigeren Wert von 0,4 mg P_{ges}/L erklärt.

Im Jahr 2016 schwankten jedoch die Ablaufkonzentrationen zwischen 0,10 mg P_{ges}/L und 1,21 mg P_{ges}/L , sodass in den ersten Oktobertagen die Ablaufkonzentrationen für 3 Tage über 1,0 mg P_{ges}/L lagen sowie für insgesamt 13 Tage über 0,40 mg P_{ges}/L . Ähnlich erhöhte Werte wurden für wenige Tage im Juli 2016 und September 2016 (jeweils maximal 0,74 mg P_{ges}/L) gemessen. Bei den beiden Überschreitungen im Herbst waren auch die AFS-Konzentrationen im Ablauf erhöht. Somit können trotz Zwei-Punkt-Fällung mit Flockungsfiltration bei besonderen Betriebsbedingungen die Ablaufkonzentrationen oberhalb der Erfahrungswerte liegen. Dies hängt auch damit zusammen, dass die Zulaufbelastung aufgrund der an die Kläranlage angeschlossenen Industrieeinleiten stark variiert, was sich besonders bei den Stickstoffparametern, aber auch an der CSB-Belastung zeigt. So variierten die Zulaufkonzentrationen im Monatsmittel für das Jahr 2016 um den Faktor 3 (Bild 41). Außerdem schwankt das Verhältnis aus P_{ges} zu CSB im Zulauf fortwährend, sodass erhöhte Anforderungen an den Betrieb gestellt werden. Beim CSB-Abbau ist zu beobachten, dass der Filter

fast keine zusätzliche Eliminationsleistung erzielt (etwa 10 % im Jahr 2016), wohingegen er beim Gesamtphosphor aufgrund der Fällmittelzugabe eine weitergehende Behandlung ermöglicht (rund 30 % im Jahr 2016) (Bild 40, Bild 41).

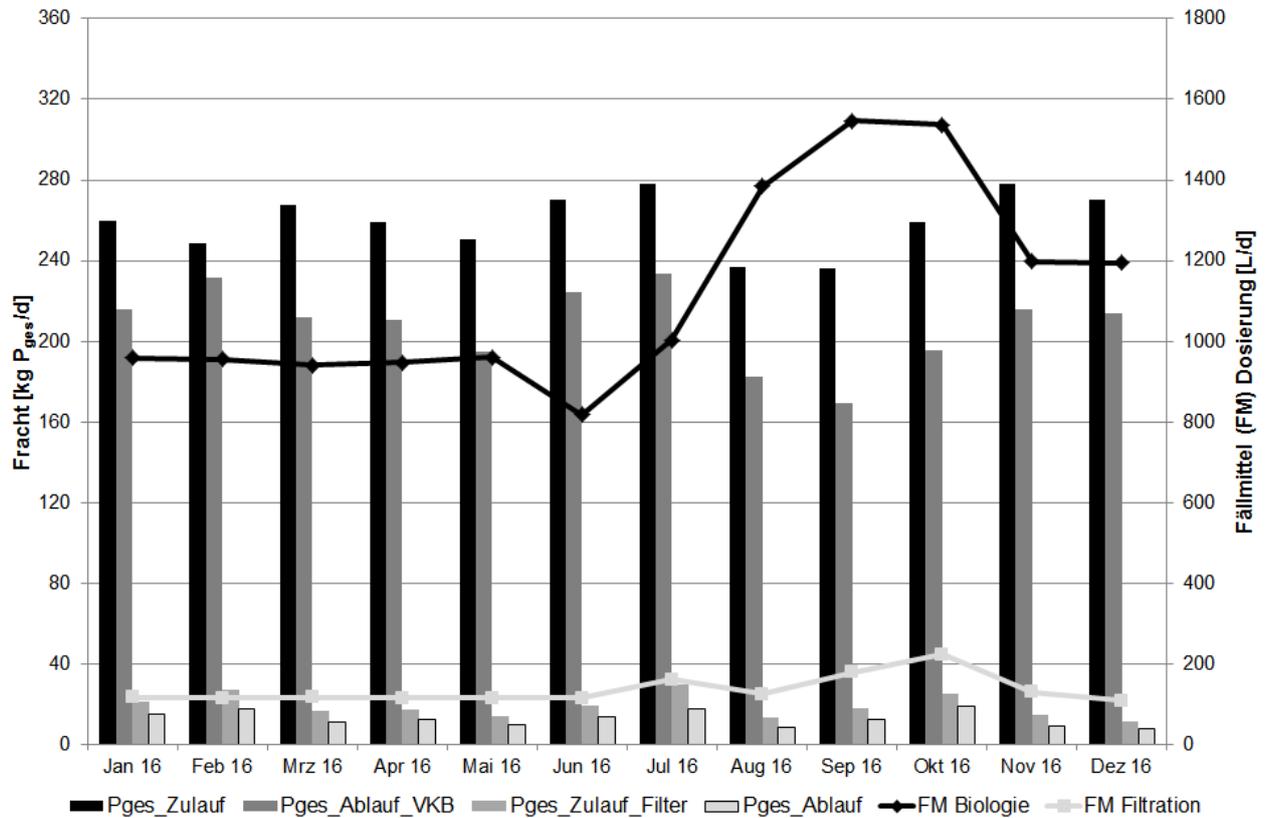


Bild 40: An vier Messstationen (Q1-Q4) berechnete Phosphorfrachten (Balken) und Fällmittelmengen (FM, Linien) getrennt nach den beiden Dosierstellen der Kläranlage Musterstadt 3 für 2016

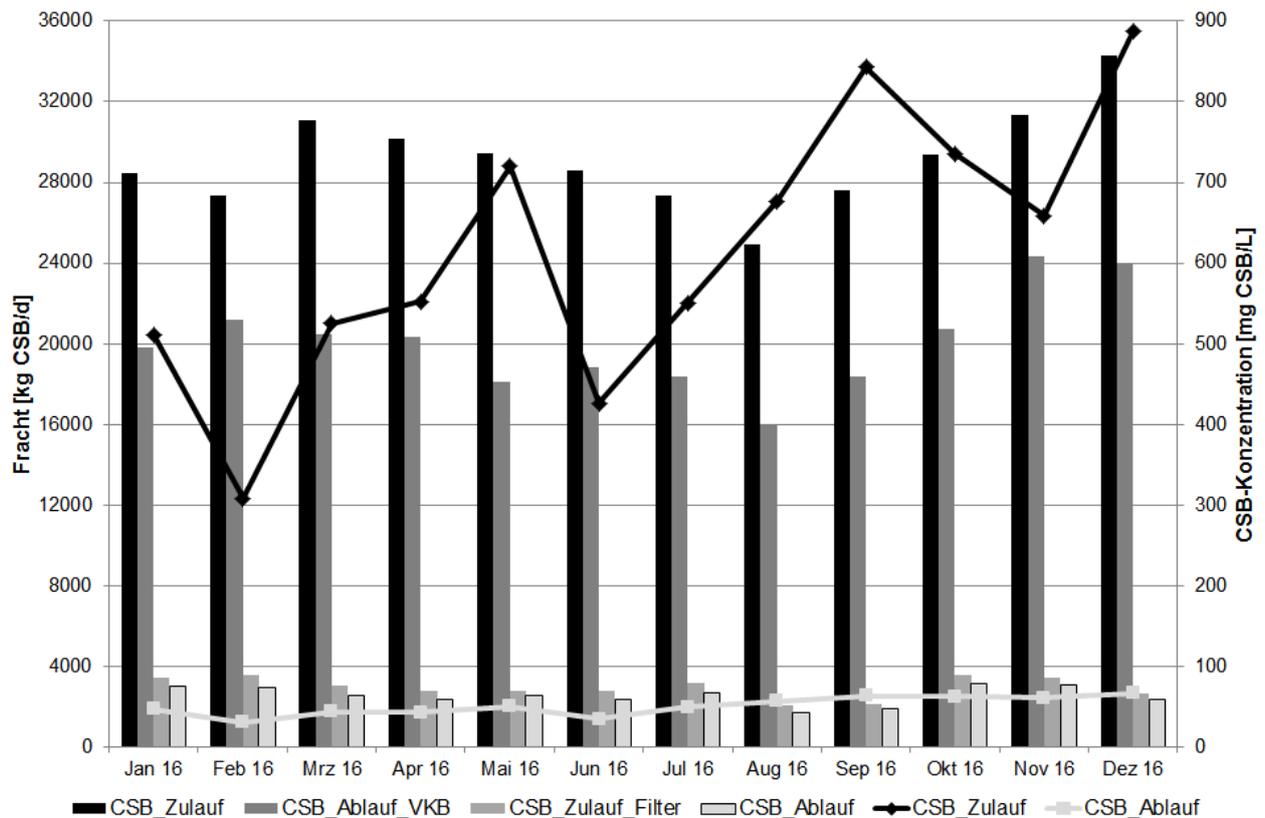


Bild 41: CSB-Konzentrationen (Linien) im Zulauf und Ablauf sowie die berechneten CSB-Frachten (Balken) an vier Messstationen (Q1-Q4) der Kläranlage Musterstadt 3 für 2016

Die Behandlungsleistung des Filters zeigt sich v. a. beim AFS-Rückhalt. Da für diese Kläranlage sowohl AFS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärbecken (Zulauf Filter) als auch im Ablauf des Filters täglich gemessen werden, ist eine statistisch robuste Aussage zum AFS-Rückhalt dieser Anlage möglich. Im Ablauf der Nachklärbecken variierten die AFS-Konzentrationen im Jahr 2016 zwischen 2 mg AFS/L und 22 mg AFS/L, bei einem Mittelwert von 7,3 mg AFS/L. Im Ablauf des Filters waren die Werte noch einmal deutlich geringer, sodass die AFS-Konzentrationen zwischen 1 mg AFS/L und 10 mg AFS/L schwankten, bei einem Mittelwert von 2,5 mg AFS/L. Somit kann im Kläranlagenablauf im Mittel, bei einem Phosphoranteil von ca. 2 % (Ergebnis der durch den Betreiber veranlassten Analysen), mit ca. 0,05 mg P/L aus dem partikulären Anteil gerechnet werden. Ohne Filter würde der partikuläre Anteil etwa 0,15 mg P/L betragen, sodass unter Berücksichtigung des gelösten, nicht-fällbaren Phosphoranteils von etwa 0,05-0,10 mg P/L die Ablaufkonzentrationen ca. 0,20-0,25 mg P/L betragen würden. Zur Einhaltung der erklärten Ablaufkonzentration von 0,4 mg P_{ges} /L müsste somit im Mittel, in diesem Gedankenspiel ohne Flockungsfiltration, sämtliches ortho-Phosphat für einen sicheren Betrieb entfernt werden.

Aufgrund der sehr vielen Messwerte war es für diese Kläranlage auch möglich, Summenkurven für die Frachten im Zulauf für das Jahr 2016 zu erstellen (Bild 42). Diese zeigen deutlich die Variation in der Zulaufzusammensetzung für die beiden Parameter CSB und P_{ges} .

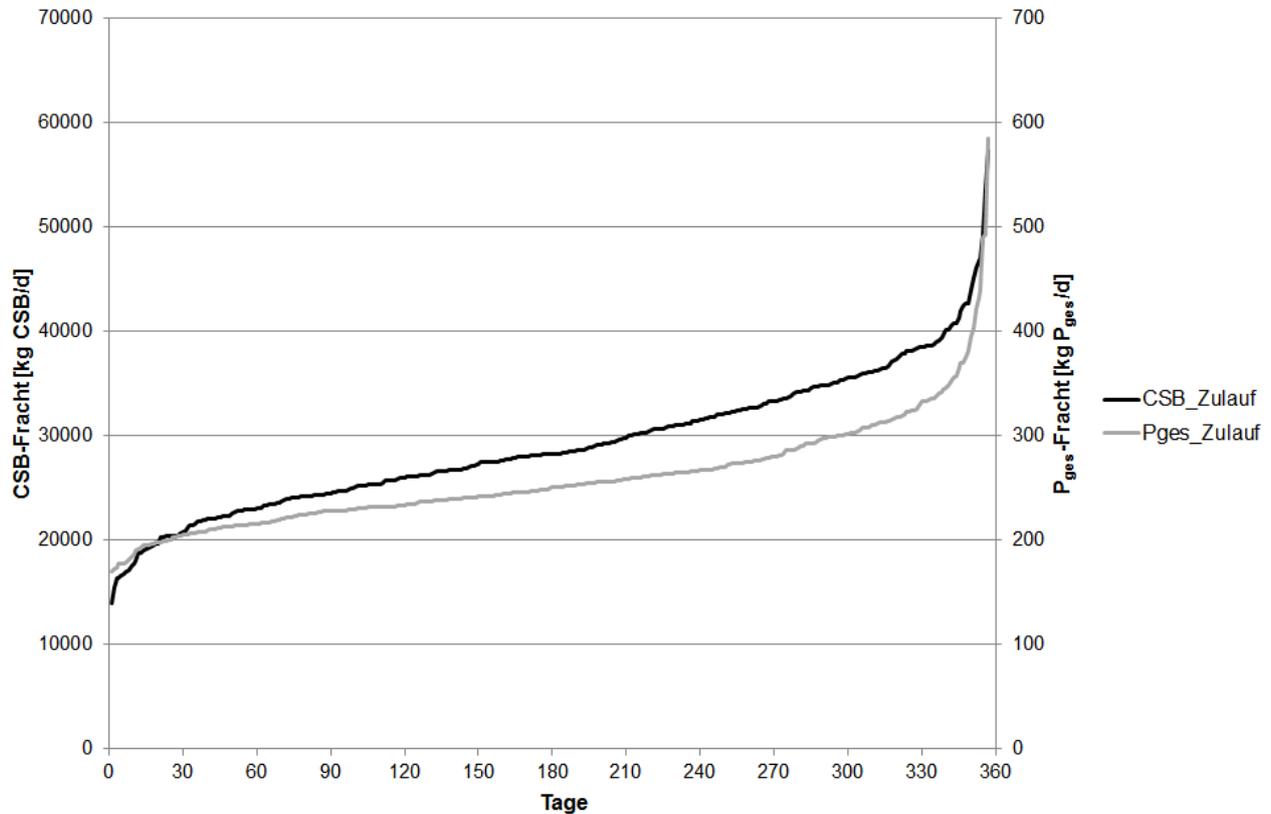


Bild 42: Summenkurven der Frachten im Zulauf zur Kläranlage im Jahr 2016 (n=357)

Zudem kann anhand der umfassenden Betriebsdaten dieser Kläranlage gezeigt werden, dass die Phosphorkonzentrationen im Zulauf zum Filter eine Konzentration von 1,0 mg P_{ges} /L nicht übersteigen (Empfehlung nach DWA-A 202 (2011)). Jedoch zeigen die Gesamtposphorkonzentrationen deutliche Schwankungen, die sich auch auf die Ablaufwerte auswirken (Bild 43). Die mittleren Konzentrationen im Filterzulauf steigen fallweise auf über 0,4 mg P_{ges} /L an und verursachen dadurch deutlich höhere Fällmittelverbräuche, sodass eine entsprechende Regelung für den Kläranlagenbetrieb unabdingbar ist. Folglich ist eine generelle Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Kläranlagenauswertung auf andere Anlagen nicht gegeben.

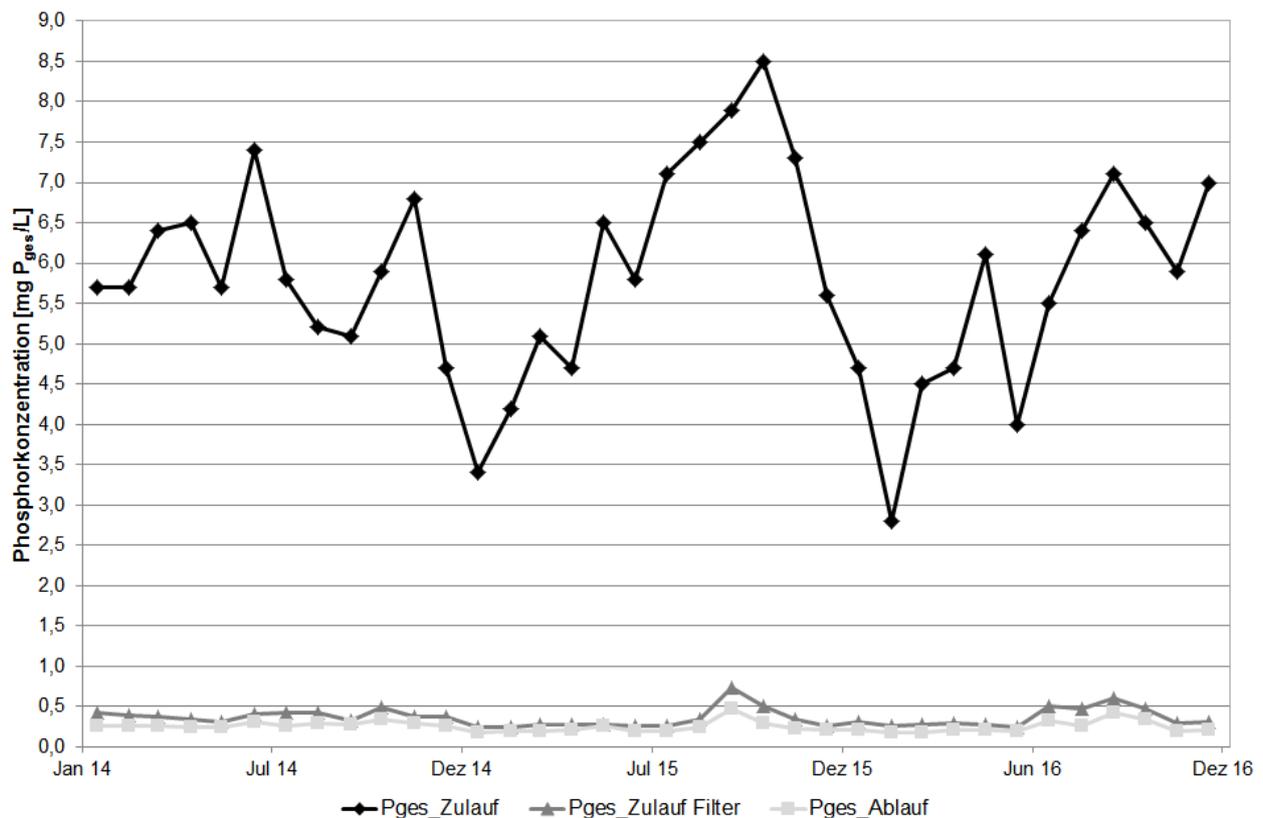


Bild 43: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf der Kläranlage, im Zulauf zum Filter (gleich Ablauf Nachklärbecken) und im Ablauf der Kläranlage Musterstadt 3 als Monatsmittelwerte für den Zeitraum 2014-2016; erklärter Überwachungswert 0,4 mg P_{ges}/L

4.2.10 Musterstadt 4

Mit einer Kapazität von 210.000 EW und einer angeschlossenen Einwohnerzahl von 180.000 EW (85 %-Perzentil) behandelt die Kläranlage der Musterstadt 4 das über eine Trennkanalisation zugeleitete Abwasser mit einem Fremdwasseranteil von ca. 13 %. Die Jahresabwassermenge beträgt rund 6.259.000 m³/a bzw. ca. 95 L/(EW·d). Nach einer ersten mechanischen Behandlung, bestehend aus einem Grobrechen (100 mm Spaltbreit), drei Feinrechen (3 mm Lochblech) sowie Sand- und Fettfang wird der Abwasserstrom geteilt. Ein Abwasserstrom wird durch ein der Belebungsstufe vorgeschaltetes Anaerobbecken geleitet (Bild 44), um den Großteil des im Abwasser enthaltenen Phosphats durch vermehrte biologische Phosphorelimination (Bio-P) zu entfernen. Zusätzlich wird eine chemische Fällung als Simultanfällung betrieben. Der Hauptstrom (84 %) durchläuft die zwei Vorklärbecken, in denen durch Sedimentation die absetzbaren Feststoffe abgetrennt und über den Primärschlamm abgezogen werden. Die verbleibenden 16 % werden als Kohlenstoffquelle für die vermehrte biologische Phosphorelimination im Bypass direkt in das anaerobe Bio-P Becken geleitet.

Vor der anschließenden Belebungsstufe werden die beiden Abwasserströme aus Anaerob- und Vorklärbecken wieder zusammengeführt. Die Kaskadenbelebung der Kläranlage setzt sich aus zwei Straßen mit jeweils vier Denitrifikations- und zwei Nitrifikationsbecken zusammen. Die finale Phasentrennung des Schlamm-Wasser-Gemischs erfolgt in zwei Nachklärbecken als letzte Behandlungsstufe. Der abgetrennte Belebtschlammanteil, der nicht als Rücklaufschlamm in die Denitrifikationsbecken geleitet wird, wird maschinell entwässert und gelangt gemeinsam mit dem Primärschlamm in die anaerobe Schlammfäulung, wo er zu Faulgas umgesetzt wird. Am Ende der Schlammfäulung wird der entstandene Faulschlamm mittels Zentrifuge entwässert. Das anfallende Zentrat wird gemeinsam mit dem Filtrat aus der maschinellen Überschussschlammfällung erneut der Kläranlage vor der Belebungsstufe zugeführt.

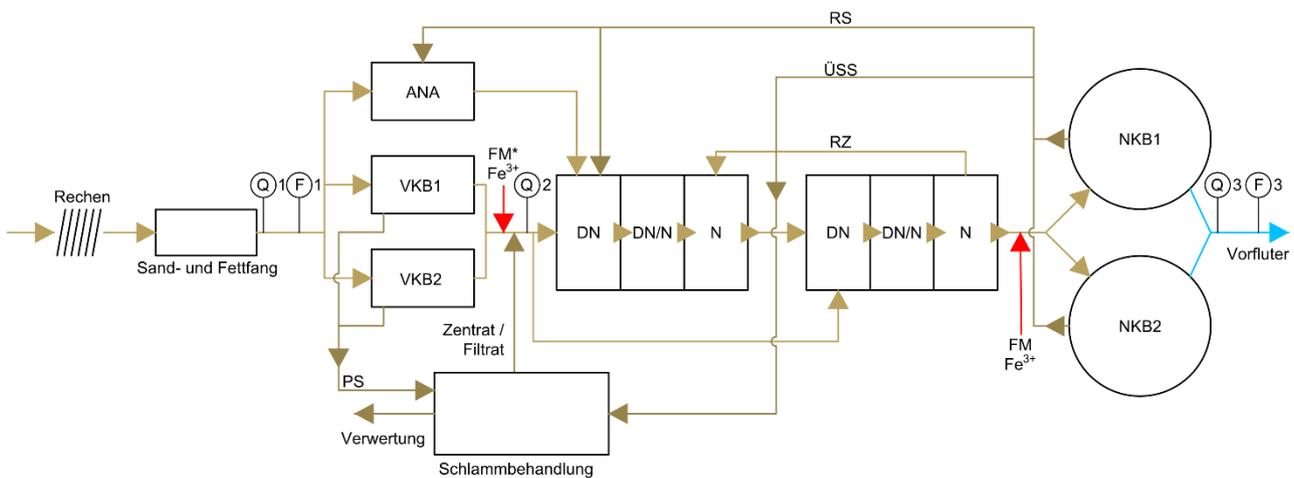


Bild 44: Fließschema Musterstadt 4 (210.000 EW); FM* erst seit Ende 2015 in Betrieb (nur eine Straße für die Belebung dargestellt)

Der Überwachungswert für Gesamtphosphor beträgt $1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$. Von Mai bis Oktober wurde vom Betreiber der Kläranlage ein niedrigerer Wert von $0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ erklärt. Die tägliche Phosphorfracht beträgt $200\text{-}220 \text{ kg P}_{\text{ges}}$ im Zulauf bei einer Konzentration von etwa $12,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$. Die mittlere Abauffracht der Jahre 2014 bis 2016 betrug mit $0,17 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ etwa $3,2 \text{ kg P}_{\text{ges}}/\text{d}$. Die Jahresmittelwerte der Phosphorkonzentrationen unterliegen dabei nur sehr geringen Schwankungen von $0,62 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ im Zulauf und $< 0,01 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ im Ablauf der Kläranlage. Die Eliminationsleistung beträgt somit über 98 %. Die Bio-P der Kläranlage weist dabei eine hohe Effizienz auf, bei der das ortho-Phosphat fast vollständig entfernt wird. Nach Aussage des Betreibers kann mit der Bio-P das ortho-Phosphat im Ablauf der Belebungsstufe nahezu vollständig eliminiert werden. Die bis Ende 2015 betriebene Fällmitteldosierung von Eisen(III)chlorid mit täglich 2.623 mol Eisen (entspricht 147 kg Eisen) im Ablauf der Belebungsstufe diente daher vornehmlich dem Ziel, verbesserte Absetzeigenschaften des Schlammes zu erreichen und eventuelle Phosphatspitzen abzufangen. Allerdings traten

durch die gute Bio-P-Leistung betriebliche Störungen in nachfolgenden Verfahrensteilen auf, die mit erheblichen Mehrkosten und einem hohen Personalaufwand verbunden waren. Die in der Schlammfäulung vorherrschenden anaeroben Bedingungen führten zu Rücklösungen des in der Biomasse gespeicherten Phosphats. Durch die Reaktion mit Magnesium und Ammonium bildete sich außerdem MAP. Die Folge waren massive MAP-Ablagerungen in den Fallleitungen der Faulbehälter und den Leitungen im Bereich des Nacheindickers sowie im gesamten Bereich des Prozesswasserspeichers. Zusätzlich führte das MAP zu erheblichen Schäden an der Entwässerungszentrifuge. Als Gegenmaßnahme erfolgt seit Ende 2015 zusätzlich eine zusätzliche Grunddosierung von 96 kg Eisen bzw. 1.716 mol Eisen pro Tag (40 L/h) des Fällmittels im Zulauf der Biologie. Auf diese Weise wird ein Teil des im vorgeschalteten Anaerobbecken rückgelösten Phosphats chemisch gebunden, so dass es zu keiner vermehrten Rücklösung während der anaeroben Schlammfäulung kommen kann. Die durch den erhöhten Fällmitteleinsatz anfallenden Mehrkosten sind durch den Wegfall der im Zuge der MAP-Ausfällung verursachten Kosten und erheblichen betrieblichen Mehraufwands zu rechtfertigen.

Die Phosphorelimination wurde anteilig für die einzelnen Verfahrensstufen der Kläranlage Musterstadt 4 für die Jahre 2014 und 2016 (Bild 45) ausgewertet. Aufgrund fehlender Messungen zwischen den einzelnen Verfahrensstufen (z. B. im Ablauf der Belebung und nach der Fällmitteldosierung im Zulauf der Nachklärung) wurden die aus dem Abwasserstrom entfernten Phosphatanteile für Bio-P, chemischer Fällung und normalen, heterotrophen Zellstoffwechsel auf Grundlage des DWA-A 131 (2016) berechnet. Dabei wurde für die Berechnung des Bio-P-Anteils der Faktor 0,006 angesetzt:

$$X_{P,BioP} = 0,006 * C_{CSB,ZB}$$

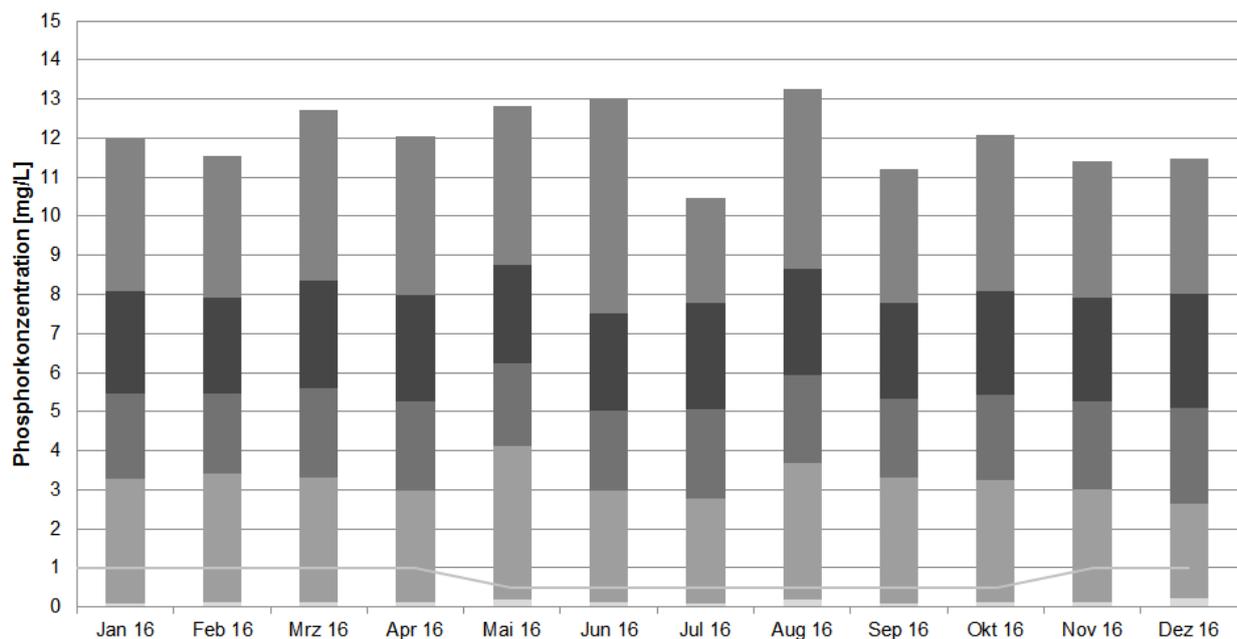
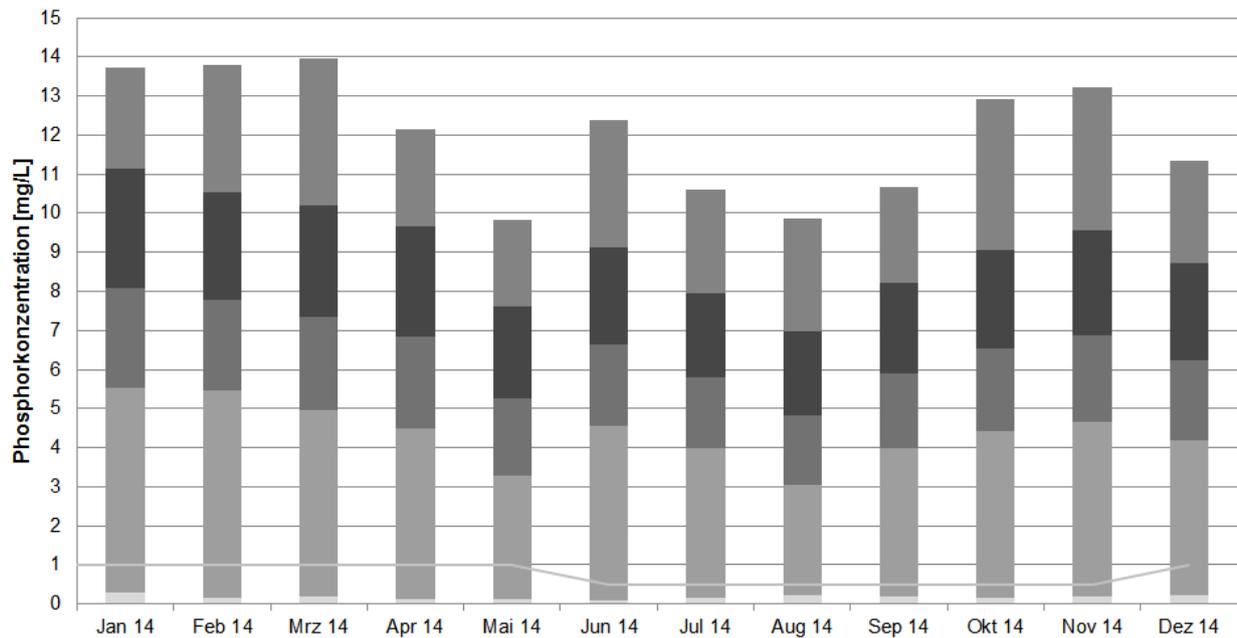
mit:

$X_{P,BioP}$ (mg P/L) bei der biologischen Phosphorelimination biologisch gebundener Phosphor

$C_{CSB,ZB}$ (mg CSB/L) CSB-Konzentration im Zulauf zur Belebung.

Allerdings ist der auf diese Weise ermittelte Bio-P-Anteil nur begrenzt aussagefähig, da bei der Berechnung eine wesentliche Einflussgröße, die tägliche Überschussschlammproduktion, nicht berücksichtigt wird. Diese ist von verschiedenen zusätzlichen Faktoren wie Temperatur, Schlammalter und Zulaufzusammensetzung abhängig. Für das Jahr 2014 zeigt sich somit, dass die rechnerisch ermittelte Leistung der Bio-P mit rechnerisch im Durchschnitt 2,6 mg PO₄-P/L entferntem Phosphat lediglich auf einen Anteil von knapp über 20 % an der gesamten Eliminationsleistung der Anlage kommt. Dies deckt sich nicht mit den Aussagen des Betreibers, der in einzelnen Stichproben im Ablauf des Belebungsbeckens (vor der Fällmitteldosierstelle) ortho-Phosphatkonzentration von < 0,05 mg PO₄-

P/L gemessen hat. Daher ist davon auszugehen, dass in diesem Fall die in Anlehnung an das Arbeitsblatt DWA-A 131 (2016) ermittelte Bio-P Leistung das tatsächliche Potential der vermehrten biologischen Phosphorelimination nicht abbildet. Ein Vergleich der Betriebsdaten der Jahre 2014 und 2016 zeigt, dass der Anteil des in der Vorklärung eliminierten Phosphats von durchschnittlich 25 % ($2,98 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L} \pm 0,70 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$) um ca. 8 % auf 33 % ($3,93 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L} \pm 0,56 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$) steigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die zusätzliche Fällmitteldosierung im Zulauf der Belebung im Jahr 2016 noch vor der Messung der Phosphatkonzentration erfolgt (Bild 45). Somit ist die scheinbare Steigerung der Eliminationsleistung der Vorklärung um ca. 8 % auf die zusätzliche Fällmitteldosierung zurückzuführen und muss daher zu dem chemisch gebundenen Phosphatanteil gerechnet werden. Der Anteil des im Zuge des Kohlenstoffabbaus in der heterotrophen Biomasse gebundenen Phosphats bleibt für beide Jahre mit rund 18 % gleich. Dieser Wert entspricht annäherungsweise dem im DWA-Leitfaden Nr. 2-13 (2011) angegebenen, durchschnittlich im Überschussschlamm (ohne Bio-P) gebundenen Phosphatanteil von ca. 20 %. Beim Vergleich der Eliminationsleistung von Bio-P und chemischer Fällung wird deutlich, dass sich der Anteil des jeweiligen Verfahrens an der Gesamteliminationsleistung bei fehlender Datengrundlage rein rechnerisch nicht abbilden lässt. So erreichte die Bio-P im Jahr 2014 einen rechnerisch ermittelten Eliminationsanteil von ca. 21 % ($2,55 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L} \pm 0,29 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$) bezogen auf die Gesamteliminationsleistung der Kläranlage. Im Jahr 2016 betrug dieser rund 22 % ($2,64 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L} \pm 0,15 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$) und lag somit höher als vor der zusätzlichen Fällmitteldosierung. Umgekehrt verhält es sich bei dem rechnerisch ermittelten gefällten Phosphatanteil. Dieser betrug im Jahr 2014 etwa 35 % ($4,20 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L} \pm 0,74 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$) und lag damit deutlich über dem für 2016 ermittelten Anteil von ca. 26 % ($3,10 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L} \pm 0,40 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$). Dadurch kommt es, trotz zusätzlicher Fällmitteldosierung, zu einem geringeren berechneten Fällschlammanfall von ca. 540 kg/d im Jahre 2016 im Vergleich zu etwa 630 kg/d im Jahr 2014. Anhand der Betriebstagebücher ergibt sich nach Einführung der zusätzlichen Fällmitteldosierung ein um 36 % höherer Überschussschlammfall, der zumindest teilweise auf eine höhere Fällschlammproduktion zurückzuführen ist.



Pges_Ablauf
 gefälltes P
 P-Bindung durch Zellaufbau
 P-Bindung durch Bio-P
 P durch VK eliminiert
 Pges Grenzwert

**Bild 45: Detaillierte Zusammensetzung der pro Monat im Mittel berechneten Phosphoranteile der Zu-
lauffrachten der Kläranlage Musterstadt 4 für die Jahre 2014 und 2016**

Anhand der angestellten Betrachtung wird deutlich, dass auch bei einer weitreichenden Datengrundlage eine genaue Bilanzierung von Kläranlagen mit dem Ziel, mögliche Optimierungspotentiale zu

identifizieren und Defizite aufzuzeigen, nur möglich ist, wenn dafür geeignete Betriebsdaten vorliegen oder gezielt Messprogramme durchgeführt werden. Es hat sich in diesem Beispiel zudem gezeigt, dass der Einsatz von Fällmitteln auch für die Stabilisierung des Kläranlagenbetriebs und zur Vermeidung von Betriebsstörungen, insbesondere durch Nebeneffekte der Bio-P, wichtig sein kann.

4.2.11 Musterstadt 5

Die Ausbaugröße der Kläranlage wurde im Jahr 1999 auf 100.000 EW erweitert, wobei derzeit gesamt etwa 48.000 EW angeschlossen sind. Die Jahresabwassermenge (Mischwasserzufluss) beträgt rund 5.443.000 m³/a bzw. ca. 350 L/(EW·d) (252 L/(EW·d) bezogen auf die Jahresschmutzwassermenge im Trockenwetterzufluss). Neben kommunalem Abwasser fließt der Anlage auch Abwasser von Brauereibetrieben sowie aus der Porzellan- und Kunststoffindustrie zu. Durch Letztere kommt es zu erhöhter mineralischer Belastung. Am Zulauf wird das Abwasser über Schneckenpumpen (ELHW, Bild 46) angehoben. Die mechanische Reinigung besteht aus zwei parallelen Trommelsieben mit 3-5 mm Lochweite. Danach werden Sand sowie Fette und Öle im belüfteten Sand- und Fettfang entfernt, bevor die absetzbaren Feststoffe in zwei parallelen Vorklärbecken mit jeweils 940 m³ Volumen von der Flüssigphase getrennt werden. Aus baulichen Gründen ist die automatische Probenahme mit Durchflussmessung erst nach der Vorklärung angebracht (Q1, Bild 46), sodass die an dieser Stelle berechneten Phosphorfrachten (Ablauf VK) mit einem Faktor 1,125 (=1,8/1,6) multipliziert werden müssen, um die Zulauffrachten zu erhalten. Diese Umrechnung wurde anhand eines kleinen Messprogramms durch den Betreiber in Abstimmung mit dem Wasserwirtschaftsamt validiert. Die biologische Stufe besteht aus zwei belüfteten Nitrifikationsbecken mit 3.750 m³ sowie einem vorgeschalteten Denitrifikationsbecken mit 2.500 m³ Volumen (Bild 46). Die Abtrennung der entstandenen Biomasse findet in den zwei Nachklärbecken mit 3.500 m³ Fassungsvermögen statt. Der hier abgezogene Schlamm wird vollständig der Vorklärung zugeführt, wo Primärschlamm und Überschussschlamm gemeinsam entfernt und in eine Kaskade aus drei Faultürmen geleitet werden. Dabei fallen ca. 140 m³/d Rohschlamm mit einem TS-Gehalt von etwa 3,3 % an. Der Phosphorgehalt im Rohschlamm wird nicht bestimmt. Der Faulschlamm wird anschließend in einer Siebbandpresse entwässert. Das Zentrat sowie anfallendes Trübwasser aus den Faultürmen wird in einem Sammelbehälter gespeichert und je nach Zulaufbelastung kontrolliert in die Vorklärbecken abgegeben. Laut Betreiber gibt es keine betrieblichen Probleme in Verbindung mit der Phosphorelimination.

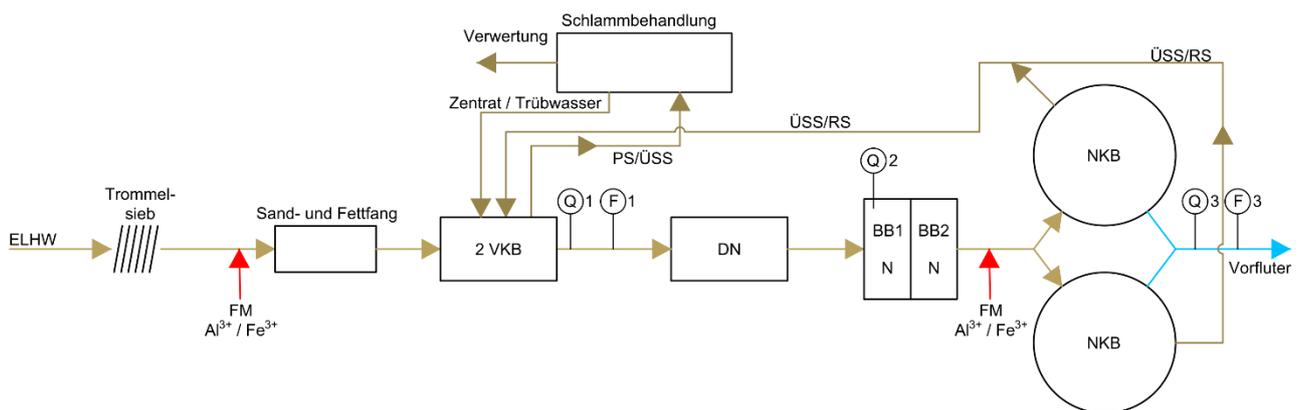


Bild 46: Fließschema Musterstadt 5 (100.000 EW)

Die berechnete, mittlere Phosphorkonzentration im Zulauf beträgt etwa $7,10 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ (ca. $107 \text{ kg P}_{\text{ges}}/\text{d}$), wobei die Konzentrationen einmal pro Woche im Ablauf des Vorklärbeckens gemessen werden. Auf der Kläranlage Musterstadt 5 wird die chemische Phosphorelimination als Zwei-Punkt-Fällung (Vor- und Simultanfällung) betrieben. Die erste Dosierstation befindet sich im Zulauf des Sand- und Fettfangs und die Fällmittelmenge wird über eine Online-Messung des ortho-Phosphats im Belebungsbecken (Q2, Bild 46) geregelt. Die Grunddosierung des Fällmittels, welches Aluminium- und Eisen(III)chlorid als Basis enthält, beträgt 60 L/h (Bild 47). Ab einer ortho-Phosphatkonzentration von $0,25 \text{ mg PO}_4\text{-P/L}$ im Belebungsbecken werden 110 L/h als Vorfällung dosiert. Wenn die Konzentration über $0,35 \text{ mg PO}_4\text{-P/L}$ steigt, werden 160 L/h zugegeben. Insgesamt werden an dieser Stelle pro Tag etwa 21 kg Eisen bzw. 380 mol Eisen sowie 30 kg Aluminium bzw. $1.120 \text{ mol Aluminium}$ dosiert. Die Belüftung des Sand- und Fettfangs sorgt für turbulente Strömungen und führt damit laut Untersuchungen des Betreibers zu einer guten Einmischung des Fällmittels sowie zu einem besseren Wirkungsgrad als im Zulauf zum Vorklärbecken. Der entstehende Fällschlamm wird in den Vorklärbecken abgesetzt und mit dem Primär- und Überschussschlamm entfernt.

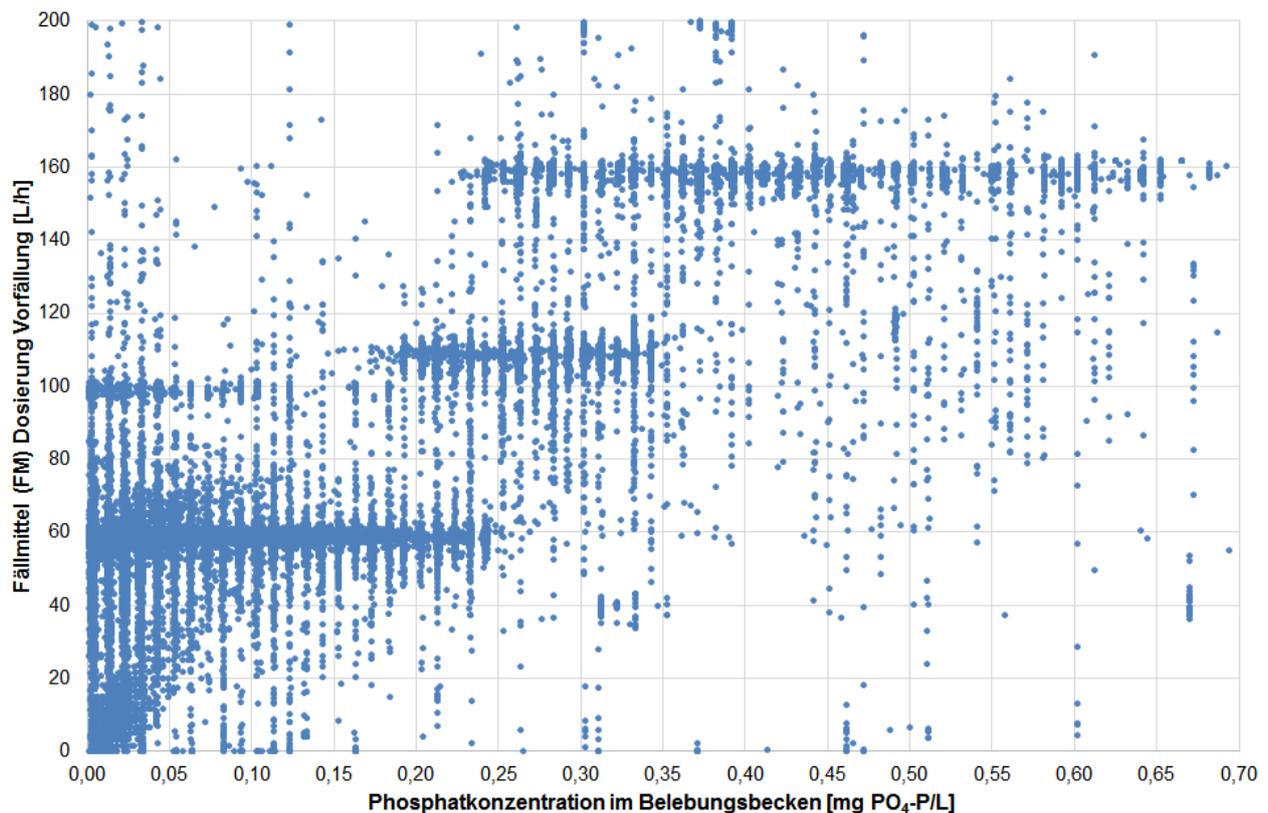


Bild 47: Regelung der Dosiermengen der Vorfällung in Abhängigkeit der Online-Messwerte (Phosphatkonzentrationen) im Belebungsbecken im Zeitraum 2014-2016; jeder Punkt gibt ein aufgezeichnetes 1 Min-Wertepaar wieder

Die zweite Dosierstation befindet sich im Verteilerbauwerk vor den beiden Nachklärbecken, in dem ebenfalls eine gute Durchmischung gewährleistet ist. Die Dosierung wird über die Online-Messung von ortho-Phosphat im Ablauf der Kläranlage (Q3, Bild 46) geregelt. Auch hier beträgt die Grunddosierung 60 L/h des Fällmittels (Bild 48), jedoch werden, aufgrund der kürzeren hydraulischen Aufenthaltszeit in der Nachklärung, im Vergleich zur Vorfällung bei einem Anstieg der ortho-Phosphatkonzentration eine deutlich höhere Fällmittelmenge zudosiert. So werden beispielsweise bei einer Überschreitung des Schwellenwertes von 0,40 mg PO₄-P/L zusätzlich 160 L/h zugegeben. Bei einer Überschreitung von 0,45 mg PO₄-P/L werden 350 L/h dosiert, damit der erklärte Ablaufwert von 0,50 mg P_{ges}/L auf jeden Fall eingehalten wird. In Bild 48 ist zu beachten, dass jeder Punkt einen 1 Min-Wert wiedergibt und somit kurzzeitige Werte über 0,50 mg PO₄-P/L keine Überschreitung des Wertes in der 2 h-Mischprobe bedeuten sowie Einzelwerte der Online-Messung aufgrund der Analytik auch mal falsch sein können (z. B. Verunreinigung oder nicht repräsentative Probe), wodurch diese Fälle bei der Regelungstechnik ebenfalls mitberücksichtigt werden müssen. Im Mittel werden

für die Simultanfällung pro Tag 25 kg Eisen bzw. 450 mol Eisen und 36 kg Aluminium bzw. 1.330 mol Aluminium verbraucht.

Generell können durch die Online-Messung eine genaue Regelung der Anlage sowie eine vertiefte Bilanzierung erfolgen. Da anhand der Online-Messtechnik im Regelfall nur ortho-Phosphat bestimmt wird, ist eine Bilanzierung der einzelnen Verfahrensschritte in Bezug auf die Phosphorelimination anhand der verfügbaren Online-Daten nicht vollständig möglich. Hierfür würden zusätzliche Daten zum prozentualen Anteil des ortho-Phosphats am Gesamtphosphor benötigt.

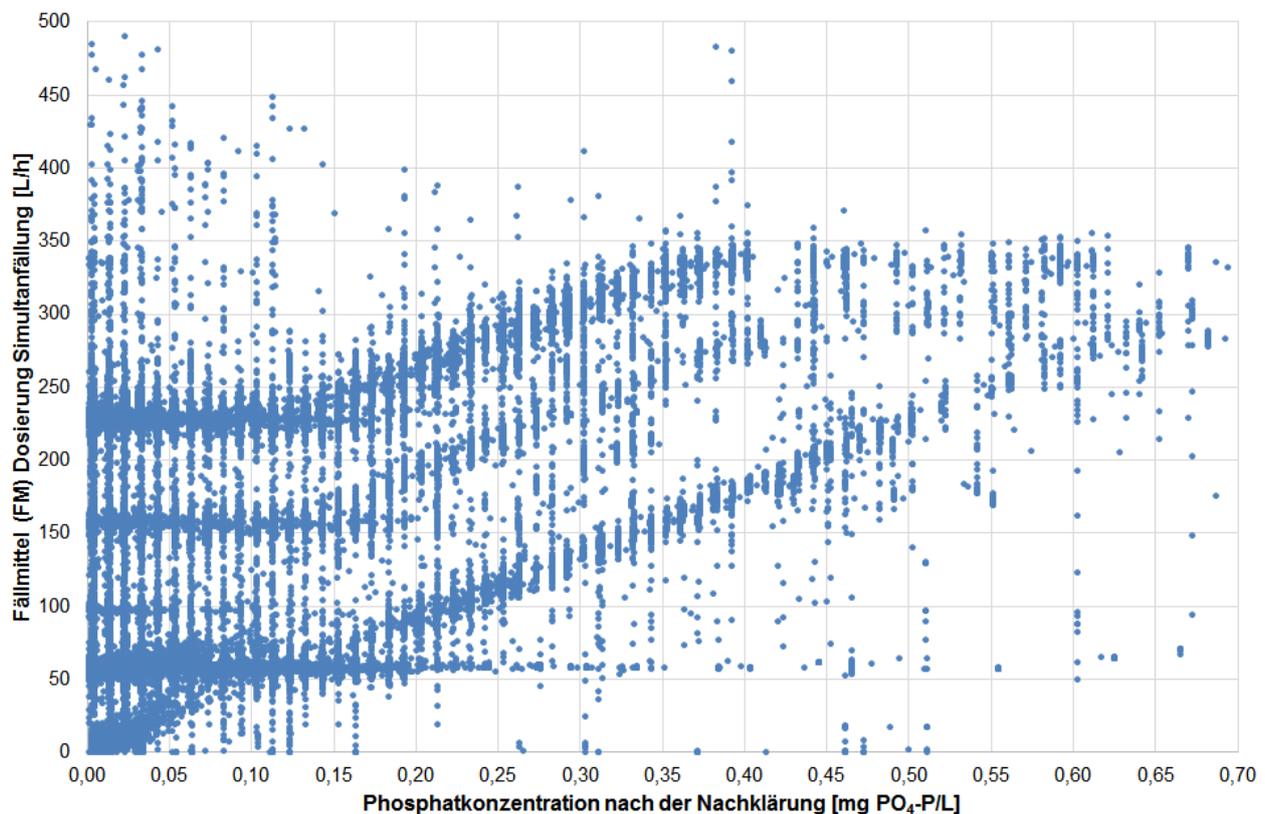


Bild 48: Regelung der Dosiermengen der Simultanfällung in Abhängigkeit der Online-Messwerte (Phosphatkonzentrationen) im Ablauf der Nachklärung im Zeitraum 2014-2016; jeder Punkt gibt ein aufgezeichnetes 1 Min-Wertepaar wieder

Zusätzlich zur chemischen Phosphatfällung kommt es im vorgeschalteten Denitrifikationsbecken teilweise zu einer vermehrten biologischen Phosphoraufnahme. Zeitweise können daraus Rücklöseprozesse im Nachklärbecken resultieren. Daher erfolgt bei dieser Anlage nach 30 Minuten eine Zwangsbelüftung in der Denitrifikation, um diesen Effekt zu minimieren.

Die Ablaufkonzentration, welche täglich gemessen wird, betrug über die letzten drei Jahre (2014-2016) im Mittel $0,22 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ (Bild 49) und die Ablaufracht etwa $3,3 \text{ kg P}_{\text{ges}}/\text{d}$ (Bild 50). Laut Betreiber hängt eine erhöhte Gesamtphosphorfracht im Ablauf meist mit erhöhten Zulauffrachten (etwa 80 % der Fälle) zusammen, aber auch von der Phosphatrücklösung durch die Bakterien bei Sauerstoffmangel (ca. 20 % der Fälle). Diese Kläranlage erreicht mit der Zwei-Punkt-Fällung im Mittel eine Reinigungsleistung von ca. 97 % in Bezug auf den Gesamtphosphor. Als Kennwerte wurden im Mittel für K_P ca. 32 mol Me/kg P und für β etwa $1,8 \text{ mol Me/mol P}$ über den Zeitraum 2014-2016 berechnet. Diese vergleichsweise hohen Werte hängen auch mit dem sehr hohen Wirkungsgrad der Phosphorelimination zusammen.

Die AFS-Konzentrationen im Ablauf werden einmal pro Woche gemessen und variieren zwischen 1 mg AFS/L und 18 mg AFS/L , mit einem Mittelwert von $4,8 \text{ mg AFS/L}$. Bei einem angenommenen, mittleren Phosphorgehalt von 3 %, ergibt sich somit eine mittlere partikuläre Phosphorablaufkonzentration von etwa $0,14 \text{ mg P/L}$, sodass der partikuläre Anteil ca. 65 % am Gesamtphosphor im Kläranlagenablauf ausmacht.

Eine geschlossene Phosphorbilanzierung über die einzelnen Behandlungsstufen und unter Berücksichtigung der verschiedenen Fraktionen an Phosphorverbindungen konnte aus folgenden Gründen nicht durchgeführt werden:

Die im Ablauf des Vorklärbeckens gemessenen Konzentrationen (24 h-Mischproben) schwanken stark (Bild 49). Dies kann einerseits mit den schwankenden Zulaufbelastungen (z. B. Industrieeinleiter, Regenwetter, Fremdwasser) zusammenhängen, aber auch mit der Einleitung des Trübwassers ins Vorklärbecken (Bild 46). Da die Messungen im Ablauf des Vorklärbeckens im Gegensatz zu den Kläranlagenablaufmessungen nur einmal wöchentlich erfolgen und die Zulauffrachten durch einen konstanten Faktor berechnet werden, ist die Bilanzierung der Zulauffrachten mit vergleichsweise großen Unsicherheiten behaftet. Hinzu kommt, dass in diesem Fall die Frachten im Ablauf der Vorklärung ebenfalls über zwei Möglichkeiten errechnet werden können (siehe auch Kapitel 4.2.2). Da pro Monat mindestens vier Frachten berechnet werden konnten, erfolgte eine Auswertung sowohl über die Mittelung der tatsächlich gemessenen Frachten (Bild 50) sowie über eine Berechnung der Frachten aus den mittleren Konzentrationen multipliziert mit den mittleren Tagesdurchflüssen pro Monat, welche für jeden Tag erfasst werden (Bild 51). Letztere Methode liefert für September und Oktober 2016 deutlich höhere Frachten sowie im Februar stark reduzierte Frachten im Ablauf der Vorklärung. Der Mittelwert der Frachten im Ablauf der Vorklärung in Bild 50 beträgt $89 \text{ kg P}_{\text{ges}}/\text{d}$ und in Bild 51 $96 \text{ kg P}_{\text{ges}}/\text{d}$ für das Jahr 2016. Somit hat die Methodik der Auswertung auch bei relativ großen Datensätzen einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis. Eine Validierung der Frachten

anhand einer geschlossenen Phosphorbilanz konnte nicht erfolgen, da die Phosphorfrachten im Schlammabzug ebenfalls nur abgeschätzt werden konnten.

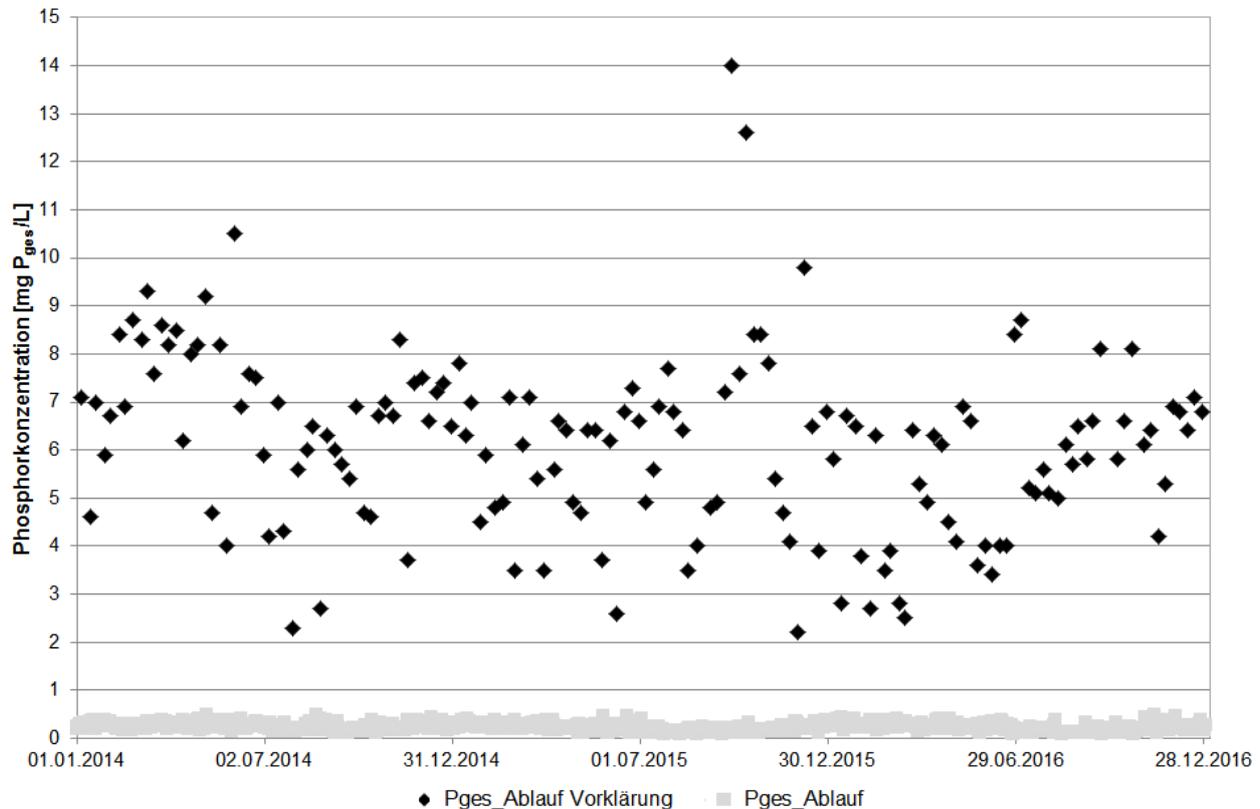


Bild 49: Gesamtphosphorkonzentrationen im Ablauf der Vorklärung und Ablauf der Kläranlage Musterstadt 5 für den Zeitraum 2014-2016; Überwachungswert 0,5 mg P_{ges}/L

Ausgehend von dem Messprogramm und der Bilanzierung kann festgehalten werden, dass niedrige Gesamtphosphorablaufkonzentrationen von im Mittel unter 0,3 mg P_{ges}/L mit einer Zwei-Punkt-Fällung mit entsprechender Messtechnik und Regelung eingehalten werden können, auch bei stark variablen Zuflüssen. Jedoch konnten vereinzelt Konzentrationen von bis zu 0,49 mg P_{ges}/L im Ablauf gemessen werden, also knapp unterhalb des erklärten Wertes von 0,5 mg P_{ges}/L . In diesen Fällen ist eine deutlich erhöhte Fällmitteldosierung erforderlich. Bei dieser Belebungsanlage beruht die Restbelastung v. a. auf dem partikulär gebundenen Phosphor. Somit sind ohne (Flockungs-)Filtration die betrieblichen Möglichkeiten für eine weitere Reduzierung der Phosphorablaufkonzentrationen begrenzt.

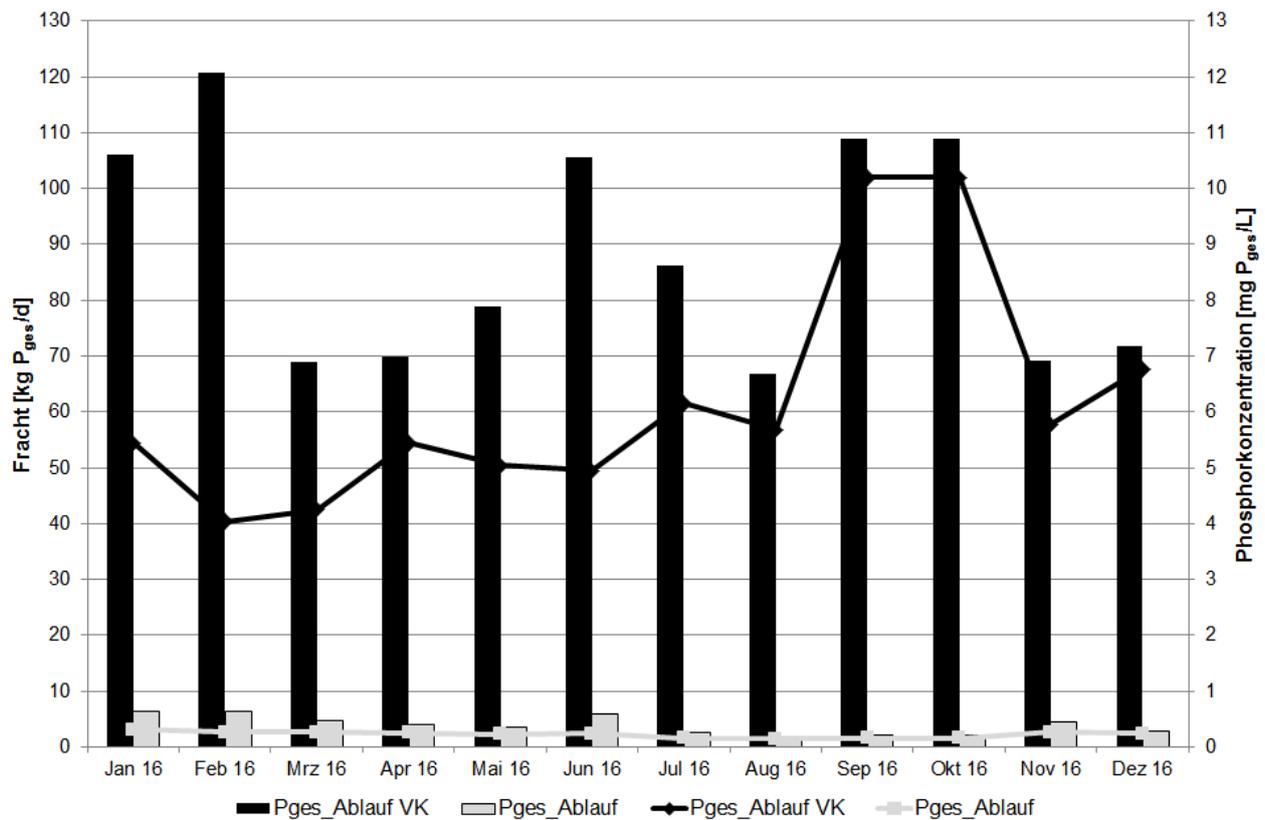


Bild 50: Gesamtphosphorkonzentrationen (Linien) im Ablauf der Vorklärung und im Ablauf der Kläranlage sowie die pro Monat im Mittel berechneten Frachten (Balken) der Kläranlage Musterstadt 5 für das Jahr 2016; Ablauffrachten Vorklärung (VK) berechnet aus Mittelwerten der pro Tag berechneten Frachten aus gemessenen Konzentrationen (sofern verfügbar) und den dazugehörigen Tagesdurchflüssen (gleiche Anzahl an Messwerten pro Monat); Überwachungswert 0,5 mg P_{ges}/L

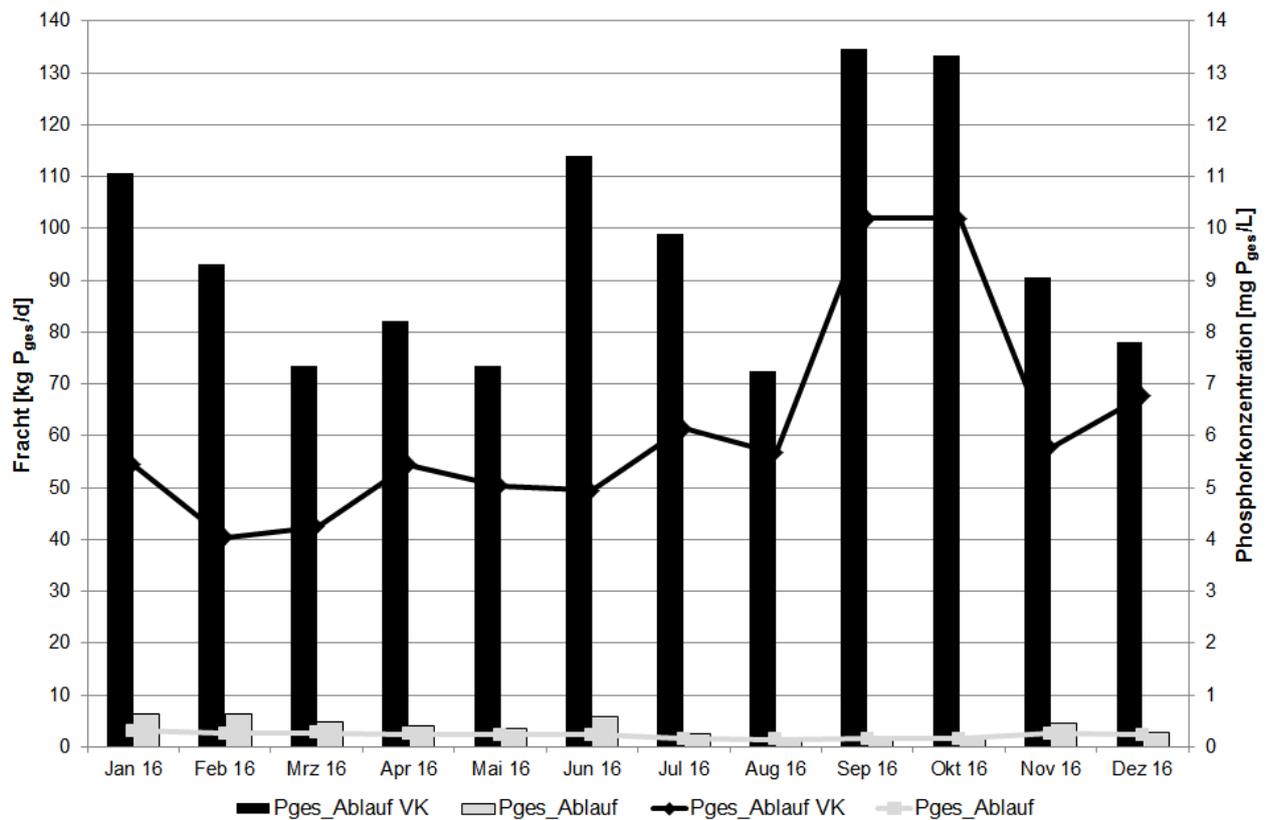


Bild 51: Gesamtposphorkonzentrationen (Linien) im Ablauf der Vorklärung und im Ablauf der Kläranlage sowie die pro Monat im Mittel berechneten Frachten (Balken) der Kläranlage Musterstadt 5 für das Jahr 2016; Ablaufrachten Vorklärung (VK) berechnet aus Monatsmittelwerten der gemessenen Konzentrationen und dem mittleren Tagesdurchfluss pro Monat (unterschiedliche Anzahl an Messwerten pro Monat); Überwachungswert 0,5 mg P_{ges}/L

4.2.12 Zusammenfassung

In der nachfolgenden Tabelle 24 ist ein Überblick zu den wichtigsten Daten der im Zuge des Projektes untersuchten zehn kommunalen Kläranlagen wiedergegeben.

Tabelle 24: Zusammenfassung der im Zuge des Projektes erhobenen Daten von zehn kommunalen Kläranlagen mit weitestgehender Phosphorelimination

Kläranlage	Ausbau- größe [EW]	Phosphor-eli- minations- verfahren	Konzentration ^a [mg P _{ges} /L]		Kennwerte		Überwachungs- wert (erklärt) [mg P _{ges} /L]
			Roh- abwas- ser	Kläranla- genab- lauf	β [mol Me/mol P]	K _P [mol Me/kgP]	
Musterdorf 1	5.000	Simultanfällung (z. T. zwei Do- sierstellen)	9,40 ^b	0,47 ^b	3,0	60	2,0
Musterdorf 2	12.000	Simultanfällung, Bio-P	5,24	0,45	1,5	28	1,6
Musterdorf 3	9.700	Simultanfällung, Membranfiltration	6,79	0,36	2,9	45	1,0 (0,5)
Musterdorf 4	3.116	Simultanfällung	12,5	0,69	1,5	18	1,0
Musterdorf 5	3.000	Simultanfällung	12,5	0,23	1,4	45	1,0
Musterstadt 1	35.000	Simultanfällung	10,0 ^c	0,60 ^c	2,4	10	2,0 (1,4)
Musterstadt 2	87.500	Simultanfällung (zwei Dosierstel- len), Flockungs- filtration	5,72	0,13	2,0	23	0,3
Musterstadt 3	290.000	Simultanfällung, Flockungsfiltra- tion	5,80	0,26	-*	14	1,0 (0,4)
Musterstadt 4	210.000	Simultanfällung (zwei Dosierstel- len), Bio-P	12,0	0,17	3,4	23	1,0 (0,5)
Musterstadt 5	100.000	Zweipunktfällung (Vor- und Simult- anfällung)	7,10	0,22	1,8	32	0,5

^a mittlere Konzentration im Bilanzierungszeitraum 2014-2016

^b mittlere Konzentration im Bilanzierungszeitraum 2013-2016

^c mittlere Konzentration im Bilanzierungszeitraum 2016

* Kennwert fehlt aufgrund stark variabler Betriebsführung

4.3 Bestandsaufnahme von anderen Kläranlagen in der Schweiz und Deutschland

In einem Gutachten der eawag (2008) zur Optimierung der chemischen Phosphatfällung auf hessi-
schen Kläranlagen wurden verschiedene schweizerische Kläranlagen in Bezug auf die ergriffenen

Maßnahmen und die Phosphoreliminationsleistung beschrieben. Die wichtigsten Parameter sind in der nachfolgenden Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25: Ergebnisse der Bestandsaufnahme für schweizerische (CH) und deutsche (D) Kläranlagen

Kläranlage, Land	Anschluss- größe [EW]	Phosphor-elimi- nation Verfahren	Konzentration ^a [mg P _{ges} /L]		Feststoff-ab- trieb [mg TS/L]	Grenzwert [mg P _{ges} /L]
			Rohabwas- ser	Kläranlagenab- lauf		
Glarnerland (AVG), CH	55.000	Simultanfällung (β -Wert: 1,1)	6,2*	0,57	5,0	0,8
Region Lu- zern, CH	200.000	Simultanfällung (β -Wert: 1,7)	3,0*	0,57	4,0	0,8
Morgental (AVM), CH	32.000	Zwei-Punkt-Fäl- lung (β -Wert 1,9)	4,7	0,22	3,2	0,3
Hofen, CH	65.000	Simultanfällung (β -Wert: 1,9)	4,8	0,37	6,2	0,3
Konstanz, D	190.000	Zwei-Punkt-Fäl- lung (β -Wert: 1,4) Anaerobbecken für Bio-P (im Sommer)	6,6	0,28	5,2	0,3
Kloten/ Opfikon, CH	55.000	Simultanfällung + Zwei-Schicht-Fil- ter (β -Wert: 1,4)	5,4	0,53	1,0	0,8
Altenrhein, CH	85.000	Vor- und Simult- anfällung + Flo- ckungsfiltration (β -Wert: 1,9)	3,5*	0,25	5,9	0,3
Regensdorf, CH	30.000	Simultanfällung + Flockungsfiltra- tion (β -Wert: 1,9)	7,1*	0,15	2,5	0,3
Jungholz, CH	30.000	Simultanfällung + Flockungsfiltra- tion (β -Wert: 2,3)	3,9	0,09	1,0	0,2
Thunersee, CH	140.000	Simultanfällung (β -Wert; 1,13); Anaerobbecken für Bio-P	7,3	0,27	1,7	0,8

^a mittlere Konzentration 2016

* P_{ges}-Konzentration im Zulauf der Biologie

Bei einem Vergleich mit den in Deutschland erhobenen Werten ist zu beachten, dass die gesetzlichen Vorschriften in der Schweiz mit einem Grenzwert von 0,8 mg P_{ges}/L sowohl ein hohes Fällmittel/P-Verhältnis als auch eine gut funktionierende Feststoffabtrennung erfordern (eawag, 2008). Auf-

grund der sehr niedrigen Grenzwerte ist somit eine möglichst vollständige Elimination der phosphorhaltigen Feststoffe erforderlich (Spalte Feststoffabtrieb in Tabelle 25). Sofern Ablaufkonzentrationen unter $0,2 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ erzielt werden sollen, ist als nachgeschaltete Stufe eine zusätzliche Filtration zu verwenden. Mittels Flockungsfiltration können in der Schweiz Ablaufkonzentrationen von $0,09\text{-}0,25 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ im Kläranlagenablauf eingehalten werden. Werte zwischen $0,2 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ und $0,3 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ im Ablauf können aber auch ohne Filtration eingehalten werden, in dem entweder eine Zwei-Punkt-Fällung oder eine Kombination aus Simultanfällung und Bio-P Anwendung findet. Beispielsweise beträgt bei der Kläranlage Konstanz mit einer ausgefeilten Analyse- und Regelungstechnik der gelöste Phosphoranteil im Ablauf $0,1 \text{ mg P}/\text{L}$, bei einer Ablaufkonzentration von $0,28 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$. Somit bestätigen die in Kapitel 4.2 erläuterten aktuellen Ergebnisse aus Deutschland diese Daten.

4.4 Besonderheiten bei verschiedenen Systemen

Bei verschiedenen Anlagentypen sind hinsichtlich der Rahmenbedingungen für eine Optimierung der Phosphorelimination Besonderheiten zu beachten, die über die häufig publizierten Erkenntnisse (z. B. Art der Dosierstelle und Einmischung des Fällmittels, Art des Fällmittels, Kontaktzeit, Schlammalter und Schlammwässerung; siehe auch Barjenbruch & Exner (2009)) hinausgehen. Diese sind für verschiedene Anlagentypen im Folgenden zusammengefasst.

Anlagen mit Bio-P

Bei der vermehrten Bio-P bestehen für den Betrieb erhöhte Anforderungen, insbesondere durch mögliche Phosphorrücklösungen in weiteren Schritten der Abwasser- und Schlammbehandlung. Außerdem verschlechtert sich in der Regel die Entwässerbarkeit des Schlammes (Tränckner et al., 2016). Vor dem Hintergrund einer möglichen Phosphorrücklösung vom Überschussschlamm in das abzuziehende Trübwasser wird daher eine regelmäßige Entnahme und eine vergleichmäßigte Rückführung des Trübwassers empfohlen sowie die konsequente Vermeidung einer gemeinsamen Eindickung und Lagerung von Primär- und Überschussschlamm. Dadurch sollte die Rückbelastung selbst bei sehr gut arbeitenden Bio-P-Anlagen unter 10 % des Zulaufs liegen. Die damit verbundenen Konzentrationen des Entwässerungswassers sind dennoch hoch genug (etwa $30\text{-}80 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$), um eine Bildung von MAP zu begünstigen (Tränckner et al., 2016).

Belebungsanlagen

Bei den Belebungsanlagen hat sich neben der vermehrten biologischen Phosphorelimination insbesondere die Simultanfällung mit einer oder mehreren Dosierstellen als Verfahren der Phosphorelimination bewährt. Wie an den Beispielen gezeigt, lassen sich mit dem Verfahren sehr niedrige Phos-

phorablaufwerte erzielen. Wesentlich für den Erfolg der Fällung sind neben der geeigneten Dosierstelle (intensive Einmischung, Flockungsmöglichkeiten) die sichere Abtrennung der Belebtschlammflocken mit Fällschlamm in der Nachklärung, da die Phosphorelimination nach ausreichendem Fällmitteleinsatz ausschließlich von der sicheren Feststoffabtrennung abhängt. Diese wird bestimmt durch

- die Absetzbarkeit des Belebtschlammes (ISV) und
- die ausreichende Auslegung und optimale hydraulische Gestaltung der Nachklärbecken (vor allem Einlaufgestaltung und untergeordnet auch die Gestaltung der Ablaufrinnen).

Die Absetzbarkeit des Belebtschlammes lässt sich durch den Betrieb der Belebungsanlage beeinflussen. Soweit nicht Chemikalien zur „Beschwerung“ der Flocke eingesetzt werden sollen, kann die Absetzbarkeit durch einen ausreichend großen aeroben Anteil der Belebungsanlage und eine ausreichend hohe Sauerstoffkonzentration in den belüfteten Becken positiv beeinflusst werden. Dies steht aber in einigen Fällen im Zielkonflikt mit der Tendenz vieler Kläranlagenbetreiber, möglichst niedrige Stickstoffablaufwerte zu erzielen bzw. den Energieeinsatz bei der Belüftung zu optimieren. Häufig werden niedrige Gesamtstickstoffkonzentrationen mit zeitweiligem Schlammabtrieb und erhöhten Ammoniumstickstoffkonzentrationen erkauft, was zumindest im Hinblick auf den Gewässerschutz fragwürdig erscheint.

Im Hinblick auf die hydraulische Gestaltung der Nachklärbecken sind inzwischen durch den vermehrten Einsatz von hydraulischen Simulationen (CFD-Berechnungen) in der Vergangenheit Erkenntnisse gewonnen worden, die zu nützlichen und konkreten Gestaltungsvorschlägen in dem neuen Arbeitsblatt DWA-A 131 (2016) geführt haben. Mit Umsetzung dieser Empfehlungen können auch viele Nachklärbecken nachträglich optimiert und damit auch die Phosphorablaufkonzentrationen deutlich reduziert werden.

Rotationstauchkörper

Bei Anlagen mit Rotationstauchkörpern werden die Fällmittel ausschließlich in den Zulauf zum Nachklärbecken dosiert (DWA-A 202, 2011). Dabei ist aufgrund der geringen spezifischen Biomasseproduktion bei diesem Verfahren mit einem erhöhten Fällmittelverbrauch zu rechnen (Tränckner et al., 2016).

Tropfkörperanlagen

Generell ist die Phosphorelimination bei diesem Anlagentyp weniger leicht integrierbar. Zur Verbesserung der Phosphorablaufwerte kommt beim Tropfkörper ausschließlich eine chemische Fällung

infrage. Zur Vermeidung von Verstopfung und Verockerung des Rieselbettes ist eine Fällmittelzugabe direkt vor den Aufwuchskörpern nicht zu empfehlen. Bei Tropfkörperanlagen sollten daher die Fällmittel ausschließlich in den Zulauf zum Nachklärbecken dosiert werden (DWA-A 202, 2011), wobei auch eine Vorfällung im Einzelfall sinnvoll sein kann. Beispielsweise wenn der Tropfkörper als zweite biologische Stufe zur Nitrifikation ausgelegt ist. Zu beachten ist, dass aufgrund der verringerten Überschussschlammproduktion und dem damit verbundenen geringeren Phosphoreinbau in die Biomasse vergleichsweise mehr Fällmittel hinzugegeben werden muss (Tränckner et al., 2016).

Abwasserteichanlagen

Die Vorfällung ist eine Möglichkeit, um bei allen Typen von Abwasserteichen eine weitergehende Phosphorelimination betreiben zu können. Als Nachteile sind ein erhöhter Schlammanfall und Fällmittelbedarf zu nennen (Barjenbruch & Exner, 2009). Grundsätzlich kann eine Simultanfällung bei belüfteten und unbelüfteten Abwasserteichen eingesetzt werden (DWA-A 202, 2011), wobei hierbei die seltene Schlammmentnahme berücksichtigt werden muss.

Nach Möglichkeit wird bei Abwasserteichanlagen vor den jeweiligen Teichen gefällt, die häufiger geräumt werden. Daher sollte bei unbelüfteten Abwasserteichen in der Regel eine Vorfällung in den Zulauf des Absetzteiches erfolgen. Die Simultanfällung in den Zulauf des Nachklärteiches kann dagegen bei belüfteten Abwasserteichen sinnvoll sein. Bei Abwasserteichen mit einer Zwischenstufe, wie beispielsweise Rotationstauchkörpern, bei denen dem Nachklärteich eine Grobentschlammung vorgeschaltet ist, bietet sich die Zugabe des Fällmittels in den Zulauf der Grobentschlammung an (siehe Musterdorf 4). Bei Anlagen ohne technische Zwischenstufe führen fehlende Regeltechniken sowie Schwierigkeiten bei der Implementierung einer chemischen Fällung häufig zu einer Überdosierung.

Da der Schlamm oft sehr lange gelagert wird und bisher die Auswirkung der Anreicherung des Fällschlammes in Nachklärteichen nicht abschließend geklärt ist, ist eine allgemeingültige Aussage zu Kosten und Verfahrenstechnik bei Teichanlagen nicht möglich. Wichtige Aspekte werden jedoch im Folgenden kurz zusammengefasst und anhand einer Beispielbilanzierung verdeutlicht.

Da die Entschlammung von Teichen sehr aufwändig und unangenehm für den Betreiber ist, wird diese häufig sehr lange hinausgeschoben, sodass die oben beschriebenen Effekte verstärkt auftreten. Eine einfache Rechnung (Annahmen: $\beta=2,0$ mol Me/mol P, Anforderungswert $2 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$, Phosphorelimination über Schlamm 20 %) zeigt, dass sich bei einer Teichanlage mit 1.000 EW durch eine Fällung über 10 Jahre eine zusätzliche Trockenmasse je nach Fällmittel von ca. 25 Tonnen ansammeln wird, soweit diese nicht durch Schlammabtrieb reduziert wird (Tabelle 26, Tabelle 27). Eine Überdosierung ist hierbei noch nicht mitberücksichtigt.

Tabelle 26: Betrachtung der Überschussschlammproduktion (ÜS) für Abwasserteiche bei Verwendung eines Al³⁺-Salzes

EW	P [kg/d]	P _{ÜS} [kg/d]	P _{ab} [kg/d]	η _P [%]	P _{Fäll} [kg/d]	Me ³⁺ [kMol/d]	Al ³⁺ [kg/d]	ÜS _{P,Al} [kg/d]	ÜS _{P,Al} [t/a]	ÜS _{P,Al} [t/(10a)]
500	0,72	0,14	0,17	76,9	0,41	0,027	11,1	2,9	1,0	10,5
600	0,87	0,17	0,20	76,9	0,49	0,032	13,3	3,4	1,3	12,6
700	1,01	0,20	0,23	76,9	0,58	0,037	15,5	4,0	1,5	14,6
800	1,16	0,23	0,27	76,9	0,66	0,042	17,8	4,6	1,7	16,7
900	1,30	0,26	0,30	76,9	0,74	0,048	20,0	5,2	1,9	18,8
1.001	1,45	0,29	0,33	76,9	0,82	0,053	22,2	5,7	2,1	20,9
2.000	2,89	0,58	0,67	76,9	1,65	0,106	44,4	11,5	4,2	41,8
3.000	4,34	0,87	1,00	76,9	2,47	0,159	66,6	17,2	6,3	62,8
4.000	5,78	1,16	1,33	76,9	3,29	0,212	88,8	22,9	8,4	83,7
5.000	7,23	1,45	1,67	76,9	4,11	0,265	111,1	28,7	10,5	104,6

Tabelle 27: Betrachtung der Überschussschlammproduktion (ÜS) für Abwasserteiche bei Verwendung eines Fe³⁺-Salzes

EW	P [kg/d]	P _{ÜS} [kg/d]	P _{ab} [kg/d]	η _P [%]	P _{Fäll} [kg/d]	Me ³⁺ [kMol/d]	Fe ³⁺ [kg/d]	ÜS _{P,Fe} [kg/d]	ÜS _{P,Fe} [t/a]	ÜS _{P,Fe} [t/(10a)]
500	0,72	0,14	0,17	76,9	0,41	0,027	1,5	3,7	1,4	13,6
600	0,87	0,17	0,20	76,9	0,49	0,032	1,8	4,5	1,6	16,3
700	1,01	0,20	0,23	76,9	0,58	0,037	2,1	5,2	1,9	19,0
800	1,16	0,23	0,27	76,9	0,66	0,042	2,4	5,9	2,2	21,7
900	1,30	0,26	0,30	76,9	0,74	0,048	2,7	6,7	2,4	24,4
1.001	1,45	0,29	0,33	76,9	0,82	0,053	3,0	7,4	2,7	27,1
2.000	2,89	0,58	0,67	76,9	1,65	0,106	5,9	14,9	5,4	54,2
3.000	4,34	0,87	1,00	76,9	2,47	0,159	8,9	22,3	8,1	81,4
4.000	5,78	1,16	1,33	76,9	3,29	0,212	11,9	29,7	10,8	108,5
5.000	7,23	1,45	1,67	76,9	4,11	0,265	14,9	37,2	13,6	135,6

Lange Schlammagerzeiten in den Teichen führt zur Phosphorrücklösung aus biologischem Schlamm und selbst eine Phosphorrücklösung aus Fe³⁺-Salzen in anaeroben Schlammzonen mit Sulfid-Bildung ist bei sehr langen Lagerzeiten nicht auszuschließen. In Bild 52 sind die möglichen Vorgänge bezüglich Phosphor verdeutlicht. Selbst in belüfteten Teichen wird Schlamm ungeplant sedimentiert und Rücklösungsvorgänge können stattfinden. Im Nachklärteich sind dann insbesondere bei langen Lagerzeiten Rücklösungsvorgänge zu erwarten, die schwer durch die Dosierung

kompensiert werden können. Gesichert wäre nur eine Nachfällung einzusetzen, deren Einsatz aber der naturnahen Technologie des Teichverfahrens sowohl im Hinblick auf Betreuungsaufwand wie technischem Aufwand widerspricht.

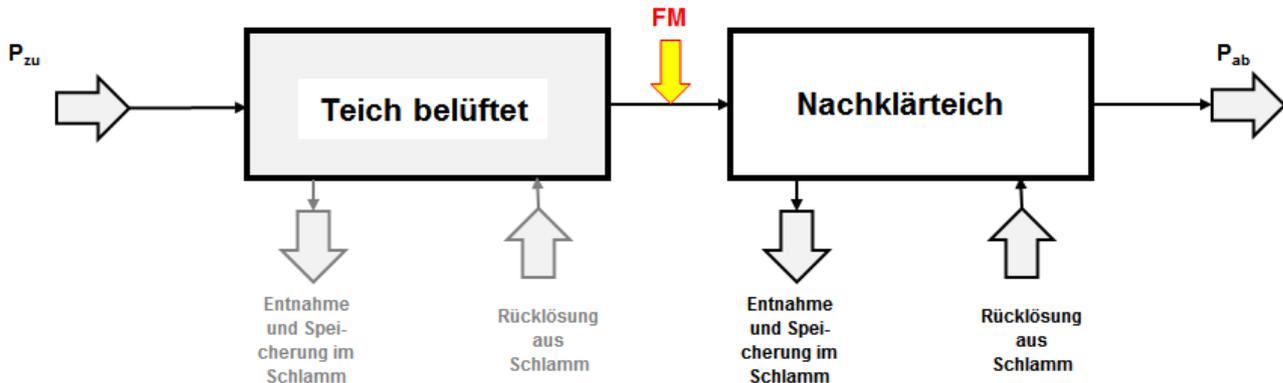


Bild 52: Bilanzbeispiel für einen belüfteten Abwasserteich

Der Anteil von Fällschlamm an Gesamtschlamm ist bei Teichen höher als bei technischen Anlagen anzusetzen, da durch lange Aufenthaltszeiten der organische Schlamm zunehmend mineralisiert und reduziert, der Fällschlamm jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit akkumuliert wird. Damit entstehen langfristig deutlich höhere Schlammentsorgungskosten.

Bei hydraulischen Spitzenbelastungen wird oft eine Schlammverlagerung und Schlammabtrieb beobachtet, insbesondere, wenn bereits sehr viel Schlamm in den Teichen gestapelt ist. Außerdem sind die Teichanlagen meist kleine Anlagen mit starken Zulaufschwankungen. Zwar ist das Volumen der Teiche groß, die Praxis zeigt jedoch, dass Kurzschlussströmungen auftreten können, die zu Ablaufspitzenwerten führen können. Bei belüfteten Teichen kann es beispielsweise zu einem Schlammabtrieb aus dem Nachklärteich bzw. zu Schlammverlagerung bei Ablagerungen im belüfteten Teil kommen. Bei unbelüfteten Abwasserteichen sind Schlammverlagerungen aus dem Absetzteich bzw. zu Schlammabtrieb ins Gewässer möglich. Dies kann nur dadurch vermieden werden, wenn den Teichen häufiger Schlamm entnommen wird.

Um eine schlüssige Phosphorbilanz bei Teichanlagen mit Berücksichtigung des Schlammanfalls aufstellen zu können, bedürfte es jedoch einer intensiven messtechnischen Begleitung über einen langen Untersuchungszeitraum (ca. 2-3 Entschlammungszeiträume). Entsprechende Messungen über einen entsprechend langen Zeitraum in ausreichender zeitlicher Dichte wären im Rahmen einer beispielhaften Implementierung einer Fällung Voraussetzung, um offene Fragen eindeutig beantworten zu können. Die üblichen Betriebsdaten solcher Anlagen alleine können dafür keine Anhaltspunkte liefern. Erschwerend kommt hinzu, dass bei kleinen Teichanlagen zu wenig Personal zur

Verfügung steht, um intensivere Messungen und Analysen im Rahmen des Kläranlagenbetriebs durchzuführen.

Zusammenfassung

Eine Übertragung und Implementierung der Ergebnisse dieser Studie auf andere Kläranlagen ist somit nicht uneingeschränkt möglich und bedingt immer eine genaue Analyse der Situation vor Ort inklusive einer angepassten Messkampagne zur Bestimmung verschiedener Parameter an mehreren Orten und Zeitpunkten in der Kläranlage (siehe auch Kapitel 4.5), welche im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen konnte. Daher konnten nur Empfehlungen für die weitestgehende Phosphorelimination gegeben werden. Ein mögliches Vorgehen zur Implementierung ist in Kapitel 7 gegeben.

4.5 Probenahme und Datenauswertung

Die Probenahme ist ein sehr wichtiger Faktor, um ein repräsentatives Analysenergebnis zu erhalten, da eine noch so gute Durchführung einer Analyse die Fehler bei der Probenahme nicht ausgleichen kann. Dabei ist zu beachten, dass ökologisch gesehen die Einhaltung der Anforderungen anhand einer qualifizierten Stichprobe weniger Sinn macht als mit Mischproben, da für das Algen- und Pflanzenwachstum die mittlere Fracht von Bedeutung ist (eawag, 2008). Eine volumenproportionale Probenahme ist daher auch für die Bilanzierung vorzuziehen. Außerdem wird bei den kleineren Kläranlagen aufgrund der EÜV (1996) bisher in Bezug auf Gesamtphosphor nur ein sehr kleines Messprogramm gefahren. Um sowohl Aussagen zur Effizienz einer chemischen Fällung treffen als auch Kennwerte für den Vergleich von Anlagen berechnen zu können, ist der Umfang deutlich zu erweitern. Temporär sollte für jeweils ein halbes Jahr vor und nach Inbetriebnahme einer chemischen Fällung mindestens der Parameter ortho-Phosphat zusätzlich mitbestimmt werden; besser wären noch darüberhinausgehende Messungen der AFS im Kläranlagenablauf. Als Mindestumfang sollten wöchentliche Probenahmen in diesem Zeitraum vorgenommen und nicht nur bei Trockenwetterzeiten beprobt werden. Zur Beurteilung der Effizienz der einzelnen Behandlungsstufen bei großen Anlagen ist ein Messumfang erforderlich, welcher in der Regel nicht Bestandteil des regulären Messprogramms ist, sodass die Beurteilung von Zwei-Punkt-Fällungen oder Bio-P-Anlagen mit chemischer Phosphatfällung meist nur durch zahlreiche Annahmen möglich ist. Auch eine Rückbelastung aus der Schlammbehandlung, besonders bei Anlagen mit Bio-P-Becken, sollte stichprobenartig erfasst werden. Durch solch erweiterte Messprogramme könnte zudem die Aussagekraft der Bilanzierungen deutlich verbessert werden.

Eine Aufzeichnung des Fällmittelverbrauchs sollte zusätzlich bei den Kläranlagen eingeführt werden, sodass mindestens quartalsweise die verbrauchte Chemikalienmenge vermerkt wird. Nur durch die

genaue Kenntnis der verbrauchten Fällmittelmengen, am besten pro Dosierstelle, können Kennwerte berechnet und verglichen werden. Anhand der aktuell meist vorhandenen Werten sind die Bilanzierungen der Fällmittelmengen und die Berechnungen der Kennwerte zur Charakterisierung der Phosphorelimination auf den meisten Kläranlagen mit großen Unsicherheiten behaftet.

Zusätzlich wird empfohlen, dass weitere Daten auf den Kläranlagen erhoben und in DABay eingepflegt werden, um zukünftig eine Optimierung der weitestgehenden Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen zu erreichen. Hierzu zählen die pro Jahr eingebrachten Mengen sämtlicher Zusatzstoffe getrennt nach Abwasserbehandlung und Schlammbehandlung, wie es beispielsweise in Hessen im Eigenkontrollbericht Pflicht ist. Diese sollten beispielsweise die Gruppen „Kalk“, „Eisen“, „Aluminium“, „sonstige organische Stoffe“ und „organische Stoffe“ umfassen und sowohl die Fällmittelmenge pro Jahr (t/a) als auch die Jahresmengen auf die Wirksubstanz bezogen berücksichtigen.

4.6 Schlussfolgerungen

Die hier dargestellten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass zumindest bei Belebungsanlagen durch eine optimierte Simultanfällung eine mittlere Konzentration des Gesamtphosphors im Kläranlagenablauf von $0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ erreicht werden kann, sofern die Nachklärung gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik bemessen ist und betrieben wird (DWA-A 131, 2016). Dafür ist bei noch nicht optimierten Anlagen mit bereits bestehender Phosphorfällung ein erhöhter Fällmittelbedarf notwendig, sowie gegebenenfalls ein größerer Fällmitteltank bzw. eine neue Mess- und Regeltechnik. Bei Anlagen, die bisher ohne Fällung betrieben werden, ist dagegen eine komplette Fällmittelstation als Erstinvestition erforderlich. Die spezifischen Investitions- und Betriebskosten für verschiedene Bemessungsfälle inklusive Steuerung/Regelung werden in Kapitel 6 zusammengefasst.

Auch bei Tropfkörperanlagen und Teichanlagen mit technischer Stufe, die eine effiziente Fällmitteldosierung erlaubt, besteht ein entsprechendes Optimierungspotenzial ohne Wechsel des Anlagentyps.

Die Einhaltung mittlerer Ablaufkonzentrationen unter $0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ erfordert grundsätzlich zusätzliche Maßnahmen wie Zwei-Punkt-Fällung, Filtration bzw. Flockungsfiltration, welche für den Einzelfall abzuleiten sind.

5 Abschätzung der potenziellen Frachtreduktion durch erhöhte Anforderungen an den Gesamtphosphor im Kläranlagenablauf

5.1 Annahmen und Vorbemerkungen

Ausgehend von den in Kapitel 4 dargestellten Ergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass mittels chemischer Fällmittel eine Konzentration des Gesamtphosphors im Kläranlagenablauf von im Mittel $0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ mittels Simultanfällung eingehalten werden kann, sofern die Nachklärung dem Stand der Technik entspricht und entsprechende betriebliche Optimierungen vorliegen. Niedrigere Ablaufkonzentrationen können je nach Kläranlage zusätzliche Maßnahmen wie eine Zwei-Punkt-Fällung oder eine (Flockungs-)Filtration bedingen. Folglich bewirkt eine Verschärfung der Anforderungen an die Gesamtphosphorablaufkonzentrationen der bayerischen Kläranlagen in den meisten Fällen, dass für eine Reduzierung der Frachten bei Anlagen mit bestehender Ausbaustufe zur gezielten Phosphorentfernung lediglich ein erhöhter Fällmittelbedarf notwendig werden würde (ggf. zusätzlich ein größerer Fällmitteltank bzw. neue Mess- und Regeltechnik) sowie bei den anderen Anlagen zusätzlich eine komplette Fällmittelstation als Erstinvestition benötigt würde. Die spezifischen Investitions- und Betriebskosten für verschiedene Bemessungsfälle inkl. Steuerung/Regelung werden in Kapitel 6 zusammengefasst.

Im Folgenden soll anhand zweier ausgewählter Szenarien berechnet werden, welche erhöhten Anforderungen an bayerische Kläranlagen zu stellen wären, um Reduzierungen der Phosphorfracht um etwa ein Drittel (Szenario 1) bzw. die Hälfte (Szenario 2) zu erreichen. Alle Betrachtungen basieren auf unterschiedlichen Verschärfungen der Anforderungen, welche je nach Höhe des Überwachungswertes für eine unterschiedliche Anzahl an kommunalen Kläranlagen Reduzierungen der mittleren Ablaufkonzentrationen bedeuten. Meist liegt aus betrieblichen Gründen die mittlere Gesamtphosphorablaufkonzentration beim 0,6-0,7-Fachen des Überwachungswertes (Empfehlung nach DWA-A 131 (2016)) bzw. beim 0,75-Fachen des Überwachungswertes (Empfehlung nach DWA-A 202 (2011)), sodass die für die Frachtberechnung maßgeblichen Mittelwerte deutlich unterhalb der Anforderungswerte liegen. Die Berechnungen zur Reduzierung der Phosphorfrachten gehen für alle Szenarien von einer vollständigen Umsetzung auf sämtlichen bayerischen, kommunalen Kläranlagen aus, sodass die real erzielten Reduktionen von den berechneten Frachten abweichen können. Die Frachtreduktionsberechnungen dienen daher dazu, den Umfang und die Höhe der zu verschärfenden Anforderungen für die beiden Reduktionspotentiale abzuschätzen sowie die Anzahl der dadurch betroffenen Anlagen zu quantifizieren. Somit ist es durch diese Betrachtung möglich, einen Zusammenhang zwischen Frachtreduktionen und Anzahl der betroffenen Kläranlagen zu ziehen.

Im Gegensatz zu einer Verschärfung der Anforderungen an die Ablaufkonzentrationen würde eine Reduzierung der Phosphorfrachten durch Einführung eines ggf. zusätzlichen Mindestwirkungsgrades nur sehr wenige Anlagen der GK 4 und GK 5 betreffen (siehe Bild 12) und ist zudem aus betrieblichen Gründen meist nicht zielführend. So ist der Wirkungsgrad bezüglich des Gesamtphosphors im Anlagenablauf für kommunale Kläranlagen eher unbedeutend, da die absolute Zulaufkonzentration bei kommunalen Anlagen bezüglich der erreichbaren Ablaufkonzentrationen von untergeordneter Bedeutung ist. Folglich ist die Ablaufkonzentration bei ausreichender Dosierung des Fällmittels hauptsächlich von der Abtrennung der partikulären Stoffe im letzten Behandlungsschritt abhängig und somit auch der Abbaugrad bezüglich Phosphor. Außerdem haben Kläranlagen mit niedrigen Zulaufkonzentrationen in der Regel einen schlechteren Wirkungsgrad als Anlagen mit höheren Zulaufkonzentrationen. Kritisch zu sehen sind lediglich kommunale Anlagen mit sehr starkem Industrieinfluss und extrem hohen Phosphorzulaufkonzentrationen, da meist zu viel Fällschlamm entsteht. In diesen Fällen muss mit vermehrter Bio-P, Nachfällung oder (Flockungs-) Filtration gearbeitet werden, um eine ausreichende und betriebsstabile Phosphorelimination sicherstellen zu können. Aber auch für diese Fälle mit derzeit geringen Wirkungsgraden können durch eine Verschärfung der Anforderungen an die Phosphorablaufkonzentrationen deutliche Reduzierungen der Phosphorfrachten erreicht werden.

5.2 Szenario 0: Keine Maßnahmen auf den kommunalen Kläranlagen

Die kommunalen Kläranlagen in Bayern würden weiterhin die in Tabelle 14 angegebenen Werte emittieren. So betragen die Gesamtphosphoremissionen in Fließgewässer für das Jahr 2015 1.378 t bezogen auf alle 2.468 Kläranlagen mit mindestens 50 EW. Im gleichen Jahr wurden ca. 89 % der Jahresabwassermenge in 736 Kläranlagen behandelt, welche bereits über Verfahren zur gezielten Phosphorelimination verfügten. Jedoch spiegeln die anderen etwa 11 % der Jahresabwassermenge ca. 37 % der bayerischen Gesamtfracht für Phosphor im Kläranlagenablauf wider.

5.3 Szenario 1: Erhöhung der Anforderungen für Anlagen der GK 2-5 (Theoretisches Phosphorreduktionspotential von ca. 35 %)

Unter der Annahme einer weitergehenden Phosphorelimination bei den bayerischen Kläranlagen der GK 2-5 ergeben sich, basierend auf den Daten des Jahres 2015, berechnete Reduktionsmöglichkeiten von rund einem Drittel. Bei diesem Berechnungsmodell ist teilweise mit erhöhten Investitions- und Betriebskosten zu rechnen (siehe Kapitel 6).

Eine mögliche Umsetzung sähe die Einführung von Anforderungswerten von 2,0 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 2 und GK 3 sowie von 0,8 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 4 und GK 5 vor (Variante

A, Tabelle 28). Eine andere Umsetzung zur Reduzierung der Phosphoremissionen um rund ein Drittel sähe die Einführung von Anforderungswerten von 2,0 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 2, von 1,0 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 3 und GK 4 sowie von 0,5 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 5 vor (Variante B, Tabelle 29).

Tabelle 28: Reduzierung der Frachten bei erhöhten Anforderungen für Kläranlagen der GK 2-5 (Szenario 1 A, n=1.325), die prozentuale Reduktion bezieht sich auf die Gesamtjahresfracht von 1.378 t; Datenquelle: LfU/DABay 2015

Größenklasse [-]	Möglicher Mittelwert [mg P_{ges}/L]	Anzahl der betroffenen Kläranlagen	Gesamtemis- sion an P_{ges} [t/a]	Mögliche Re- duktion [t/a]	Mögliche Re- duktion [%]
\sum 2-5	1,30 bzw. 0,50	1.026	803	488	35,4
2	1,30	640	175	232	16,8
3	1,30	129	128	68	4,9
4	0,50	244	248	147	10,7
5	0,50	13	252	41	3,0

Tabelle 29: Reduzierung der Frachten bei erhöhten Anforderungen für Kläranlagen der GK 2-5 (Szenario 1 B, n=1.325), die prozentuale Reduktion bezieht sich auf die Gesamtjahresfracht von 1.378 t; Datenquelle: LfU/DABay 2015

Größenklasse [-]	Möglicher Mittelwert [mg P_{ges}/L]	Anzahl der betroffenen Kläranlagen	Gesamtemis- sion an P_{ges} [t/a]	Mögliche Re- duktion [t/a]	Mögliche Re- duktion [%]
\sum 2-5	0,35-1,50	1.007	806	485	35,2
2	1,50	623	199	208	15,1
3	0,80	184	87	109	7,9
4	0,70	179	315	80	5,8
5	0,35	21	205	88	6,4

Von dieser Maßnahme zur Reduzierung der Phosphorfrachten um rund ein Drittel wären ca. 76 % der Kläranlagen der GK 2-5 betroffen. Eine angepasste Steuerungs- oder Regelungstechnik ist zusammen mit einer Nachklärung nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik (DWA-A 131 (2016)) für die meisten Anlagen Voraussetzung zum Erreichen der angegebenen Mittelwerte. Hohe Kosten entstehen meist nur dann, wenn die Nachklärung nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik entspricht und die Ablaufwerte in Bezug auf den partikulären Anteil nur durch eine hydraulisch optimierte Nachklärung (Einlaufgestaltung, ausreichender Flockungsraum) und nicht durch

eine veränderte Betriebsweise erreicht werden können. In fast allen Fällen würden sich der Aufwand und die damit verbundenen Kosten v. a. auf die vergleichsweise kostengünstige Nachrüstung von Fällmittelstationen (Kapitel 6) bzw. die Änderung der Fällmitteldosierung sowie die Implementierung bzw. Anpassung von Steuerungs- oder Regelungstechniken beschränken. Außerdem könnte durch eine veränderte Betriebsführung, wie dem Betrieb der Belebung bei niedrigeren Schlammindizes (Maßnahme zur Bekämpfung von Schwimm- und Blähschlamm), ein niedrigerer Ablaufwert bei den Belebungsanlagen erreicht werden. Darüber hinaus müssten Kläranlagen der GK 4 und GK 5 vereinzelt auf Zwei-Punkt-Fällung umgerüstet werden, wobei im Regelfall die Umsetzung des Szenarios 1 A technisch gesehen ohne den Bau von Filteranlagen möglich ist, da bei den meisten dieser Anlagen bereits ein Abwasserfilter vorhanden ist (Tabelle 18) bzw. eine Nachrüstung aufgrund einer ausreichenden Nachklärung (Bild 18) nicht notwendig sein sollte. Bei Szenario 1 B können im Einzelfall erhöhte Kosten durch weitere bauliche Maßnahmen für die Anlagen der GK 5 entstehen.

5.4 Szenario 2: Starke Erhöhung der Anforderungen für Anlagen der GK 2-5 (Theoretisches Phosphorreduktionspotential von ca. 53 %)

Unter der Annahme einer möglichst weitestgehenden Phosphorelimination bei den Kläranlagen der GK 2-5 (Reduktionspotential von rund der Hälfte der bisherigen Phosphoremissionen) ergeben sich erhöhte Anforderungen für 90,7 % der Anlagen der GK 2-5 (Tabelle 30). Bei diesem Fall ist mit deutlich erhöhten Investitions- und Betriebskosten zu rechnen.

Eine mögliche Umsetzung des stark erhöhten Reduktionspotentials sähe die Einführung von Anforderungswerten von 1,0 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 2 und GK 3 sowie 0,5 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 4 und GK 5 vor.

Tabelle 30: Reduzierung der Frachten bei stark erhöhten Anforderungen für Kläranlagen der GK 2-5 (Szenario 2, n=1.325), die prozentuale Reduktion bezieht sich auf die Gesamtjahresfracht von 1.378 t; Datenquelle: LfU/DABay 2015

Größenklasse [-]	Möglicher Mittelwert [mg P_{ges}/L]	Anzahl der betroffenen Kläranlagen	Gesamtemis- sion an P_{ges} [t/a]	Mögliche Re- duktion [t/a]	Mögliche Re- duktion [%]
\sum 2-5	0,70 bzw. 0,35	1.202	565	726	52,6
2	0,70	707	99	308	22,3
3	0,70	191	77	119	8,6
4	0,35	283	184	211	15,3
5	0,35	21	205	88	6,4

Hierzu müssten die meisten Kläranlagen der GK 4 und GK 5 auf Zwei-Punkt-Fällung umgerüstet werden, teils mit Flockungsfiltration oder Bio-P. Bei den Anlagen der GK 2 und GK 3 ist meist eine angepasste Steuerungs- und Regelungstechnik notwendig, wobei bei klein dimensionierten Nachklärbecken mit deutlich erhöhten Fällmittelmengen (ca. Faktor 2 über den Erfahrungswerten) bzw. sehr hohen baulichen Kosten zur Optimierung der Nachklärung zu rechnen ist. Außerdem ist für die kleineren Anlagen ein Anforderungswert von $1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ betrieblich anspruchsvoll, insbesondere wenn Teichkläranlagen zum Einsatz kommen. Daher würde eine Umsetzung von Szenario 2 bei vielen Anlagen zu stark erhöhten Kosten durch bauliche Maßnahmen führen, wobei bei den naturnahen Anlagen (z. B. Abwasserteiche) im Einzelfall ein Systemwechsel (z. B. Belebungsanlage bzw. Anschluss an eine größere Kläranlage) notwendig werden würde. Somit würde diese deutliche Reduzierung der Phosphorfracht im Vergleich zu Szenario 1 sowohl einen stark erhöhten Aufwand bedeuten als auch deutlich höhere Investitions- und Betriebskosten verursachen.

5.5 Schlussfolgerungen

Insgesamt gesehen ist eine deutliche Reduzierung der Phosphorfrachten durch die Verwendung gängiger Verfahren rechnerisch möglich. Jedoch nehmen die Anzahl der betroffenen Kläranlagen sowie die Kosten mit einer Steigerung der Anforderungen deutlich zu. Die Kosten für die Errichtung einer Fällmittelstation sowie einer Flockungsfiltration sind in Kapitel 6 zusammengefasst. Weitere Kosten durch die Optimierung der Nachklärung sowie durch die Anpassung der Steuerung/Regelung sind darin nicht enthalten und fallen entsprechend zusätzlich an. Bei einem Reduktionsziel von rund 50 % (bezogen auf die Gesamtphosphoremissionen der kommunalen Kläranlagen) wären ca. 1.200 Anlagen und somit rund 90 % der Kläranlagen der GK 2-5 von zusätzlichen Maßnahmen zur weitestgehenden Phosphorreduktion betroffen. Durch die Berücksichtigung weiterer Rahmenbedingungen (v. a. örtliche Gegebenheiten, Relevanz des Frachtbeitrags der einzelnen Kläranlage, wirtschaftliche Umsetzbarkeit der Maßnahmen) wird der reale Effekt von diesen Berechnungen abweichen. Bei den kleineren Anlagen ist nicht nur die Umsetzung der weitestgehenden Phosphorelimination, sondern auch die effiziente Verwendung der Fällmittel in hohem Maße von der Qualifizierung und Weiterbildung des Personals abhängig. Somit ist besonders bei den kleineren Anlagen der GK 2 und GK 3 mit zusätzlichen Kosten beim Betriebspersonal zu rechnen, wobei eine Vollzeitstelle für Kläranlagen der GK 3 sinnvoll wäre. Dabei ist zu berücksichtigen, dass viele Tätigkeiten aus Arbeitssicherheitsgründen nur zu zweit ausgeführt werden dürfen und dies besonders in Urlaubs- und Krankheitsfällen zu Problemen beim sicheren Betrieb einer weitestgehenden Phosphorelimination führen kann. Auch aus diesen Gründen ist die Nachrüstung eines Bio-P-Beckens für kleinere Anlagen nicht zu empfehlen.

6 Spezifische Investitions- und Betriebskosten für die weitestgehende Phosphorelimination

6.1 Kosten der Simultanfällung bei kleinen und mittleren Anlagen

6.1.1 Grundsätzliche Überlegungen

In den vorangegangenen Ausführungen hat sich gezeigt, dass im Bereich der Kläranlagen der GK 2-4 das größte Potenzial für die Verminderung der gesamten Phosphorfacht in den Gewässereinleitungen vorliegt. Weiterhin konnte dargestellt werden, dass die überwiegende Zahl der Anlagen in dieser Größenordnung Kläranlagen mit Belebungsverfahren sind.

Aus diesem Grund wurden Kostenkurven ermittelt, die sich auf Beispielrechnungen für Belebungsanlagen mit und ohne Vorklärung beziehen. Bei Biofilmverfahren ist der Fällungsprozess in etwa vergleichbar, die Größenordnung der Fällungsanlagen nahezu gleich und es sind lediglich im Bereich des Einbaus von Phosphor in den biologischen Schlamm geringfügige Unterschiede zu erwarten.

Naturnahe Verfahren (Abwasserteiche, Pflanzenkläranlagen) mit Phosphorelimination sind differenziert zu betrachten, da hier häufig individuelle Lösungen und lokale Bedingungen sich dominierend auswirken. Zu beachten ist auch, dass die Pflanzenkläranlagen bei der Anzahl der Anlagen (≥ 50 EW) lediglich eine untergeordnete Rolle spielen (Bild 10). Daher wird im Folgenden nicht weiter auf diese Anlagentypen eingegangen. Für die Abwasserteiche sind jedoch in Kapitel 5.7 allgemeine Besonderheiten zusammengefasst, die vor einer Berechnung der Investitions- und Betriebskosten geklärt werden müssten.

Die Kostenansätze in den folgenden Kapiteln sind als Orientierung zu sehen und können keine projektbezogene Kostenschätzung ersetzen; sie stellen jedoch die wesentlichen Einflüsse auf die Kosten zur Installation und dem Betrieb einer Fällungsanlage dar.

Die einzelnen Annahmen zur Berechnung des Fällmittelbedarfs, der spezifischen CSB- und Phosphor-Frachten sowie der Inkorporation des Phosphors in den Schlamm sind im Anhang A.3 bzw. A4 zusammengefasst und beschrieben. Die Berechnungen orientieren sich an den Arbeitsblättern ATV-DVWK-A 198 (2003) und DWA-A 131 (2016).

Bei den Kostenschätzungen wurde die Abwasserabgabe zunächst nicht berücksichtigt. In einem getrennten Abschnitt (Kapitel 6.1.5) werden die Aspekte der Abwasserabgabe (Verrechnungsmöglichkeiten, Abgabereduzierung) getrennt beleuchtet.

6.1.2 Betriebskosten

Fällmittelkosten

Die Fällmittelkosten wurden auf Grundlage der Ausarbeitung von Theilen (2015) und eigenen Erfahrungswerten in Abhängigkeit der Liefermenge ermittelt, letztere ist wiederum abhängig von der verfügbaren Tankgröße. Die spezifischen Kosten steigen signifikant bei geringeren Liefermengen unter 20 m³ (Bild 53). Damit ist eine Optimierungsmöglichkeit bei der Wahl der Tankgröße in Abhängigkeit der Lieferkosten des Fällmittels gegeben. Zusätzlich ist die Mindestlagerzeit zu berücksichtigen (siehe Kapitel 6.1.3). Für eine detaillierte Berechnung wären auch die Art des Fällmittels sowie dessen Wirkstoffgehalt zu berücksichtigen.

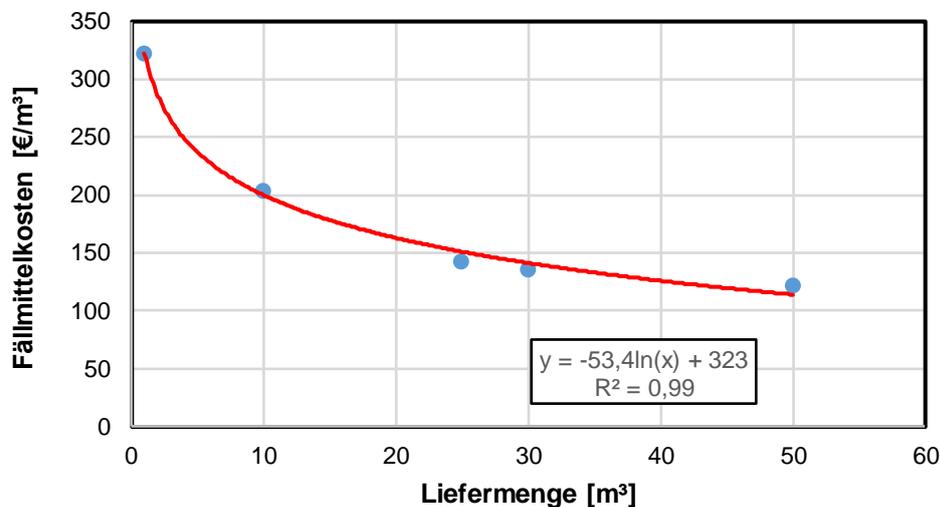


Bild 53: Fällmittelkosten (Basis Fe³⁺) in Abhängigkeit der Liefermenge (Theilen (2015) und eigene Erfahrungswerte)

Personalkosten

Bei den Personalkosten wird davon ausgegangen, dass bei kleinen Anlagen der zusätzliche Betreuungsaufwand der Anlagentechnik deutlich höher ist, da bei den kleinen Anlagen nicht davon ausgegangen werden kann, dass vorhandenes Personal die Phosphoreliminationsanlage mitbetreibt. Für die Berechnungen wurden die in Tabelle 31 zusammengefassten Ansätze verwendet.

Tabelle 31: Ansatz für Personalkosten zur Betreuung der Phosphatfällung

Größenklasse	Zeit [h/Woche]	Spezifische Kosten [€/h]	Kosten [€/a]
GK 2	1,00	35,00	1.820,00
GK 3	0,63	35,00	1.137,50
GK 4	0,25	35,00	455,00

Stromkosten

Die Stromkosten beschränken sich im Wesentlichen auf den Stromverbrauch der Dosierpumpen zur Förderung des Fällmittels zur Dosierstelle. Dieser Aufwand ist abhängig von der Distanz zwischen Dosierstation und Dosierstelle, die nur projektbezogen exakt berechnet werden kann. Insgesamt ist dieser Kostenfaktor nach erster Schätzung allerdings von untergeordneter Bedeutung für die Gesamtkosten.

Wartungskosten

Für die Wartungskosten wurde vereinfacht der Ansatz von 1 % sämtlicher Investitionskosten (Bau, Maschinenteknik (MT) sowie Elektro-, Mess-, Steuer- und Regeltechnik (EMSR)) verwendet.

Schlamm Entsorgung

Durch die Fällung entsteht Fällschlamm, der bis zu mehr als 10 % des Gesamtschlammfalls als Trockenmasse betragen kann. Im Rahmen der Kostenabschätzungen wurde auf die Ansätze der einschlägigen Regelwerke (DWA-A 131, 2016; DWA-A 202, 2011) zurückgegriffen; die Annahmen sind im Anhang A.3 bzw. A.4 dokumentiert.

Die Kosten der Entsorgung des zusätzlichen Schlammfalls sind unter anderem von folgenden Randbedingungen abhängig:

- Art der Klärschlammverwertung (thermisch, Landwirtschaft entwässert, Landwirtschaft flüssig, Weiterbehandlung bei größerer Anlage)
- Lage der Anlage (Transportentfernungen, Transportwege)
- Preisgestaltung von Entsorgungsdienstleistern

Aufbauend auf Erfahrungswerten wurde pro Tonne Trockenmasse ein Entsorgungspreis von 340 € angesetzt (siehe auch Anhang A.3 bzw. A.4), unabhängig von der Anlagengröße, da eine von der Anlagengröße abhängige verlässliche Kostenangabe nicht möglich erscheint.

Durch Überdosierung des Fällmittels mangels Regelung und mangelnder Betreuung der Fällanlage können auch deutlich höhere Fällschlammengen anfallen.

6.1.3 Investitionskosten

Umrechnung von Investitionskosten in laufende Kosten

Die Umrechnung der Investitionskosten in laufende jährliche Kosten erfolgte mittels des Kapitalwiedergewinnungsfaktors KFAKR mit folgenden Annahmen, die im Wesentlichen den Empfehlungen der KVR-Leitlinien (2012) entsprechen (Tabelle 32).

$$\text{KFAKR}(i, \text{ND}) = (i + (1+i)^{\text{ND}}) / ((1+i)^{\text{ND}} - 1)$$

mit:

i Zinssatz

ND Nutzungsdauer

Hierbei wurde zwischen Maschinen- und EMSR-technischer Ausrüstung (MT/ET) und Bautechnik (BT) hinsichtlich der Nutzungsdauer (ND) unterschieden.

Tabelle 32: Ermittlung von Investitionen in laufende jährliche Kosten

Faktor	MT/ET	BT
Zinssatz i	3 %	3 %
Nutzungsdauer ND	15 a	30 a
Annuität KFAKR	0,08377	0,05102

Fällmitteltank und Dosiereinrichtungen

Auf Grundlage eines Richtpreisangebots (Fa. Alltech, für Tankvolumina zwischen 2 m³ und 19 m³) und eigener Erfahrungswerte wurde eine Kostenkurve abgeleitet, die die Kosten des Fällmitteltanks (unterschiedlicher Größe) in Abhängigkeit des Tankvolumens darstellt (Bild 54).

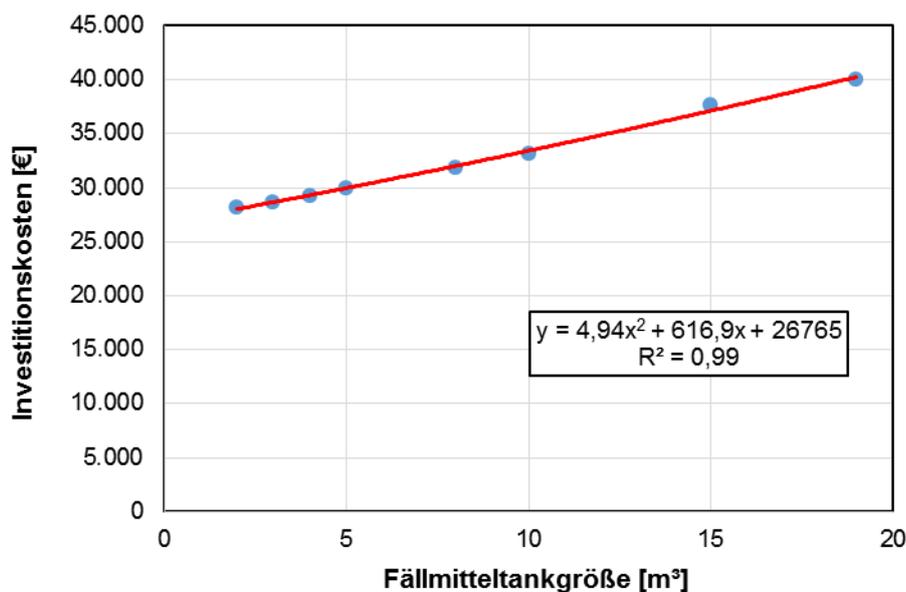


Bild 54: Fällmitteltankkosten (mit Dosierschrank) in Abhängigkeit des Tankvolumens (Richtpreisangebote, Erfahrungswerte, brutto mit Baunebenkosten)

Bei den Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass eine Mindestlagerzeit von 60 Tagen vorgesehen wird. Über diese Mindestlagerzeit lässt sich zusammen mit dem errechneten täglichen Fällmittelbedarf die Mindesttankgröße ermitteln.

Im Zusammenhang mit der Abhängigkeit der Fällmittelkosten von der Liefermenge (siehe Bild 53) ergibt sich in Abhängigkeit der Anlagengröße eine quasi-optimale Tankgröße, die dann der Kostenschätzung zugrunde gelegt wurde. Beispielhaft wurden die jährlichen Kosten für eine Anlage mit 5.000 EW und 10.000 EW auf dieser Grundlage für verschiedene Tankgrößen berechnet (Bild 55), um die Vorgehensweise darzustellen. Die Kosten für den Tank mit dem zugehörigen Dosierschrank und der lokalen Steuerung wurden den MT/ET-Kosten zugeordnet.

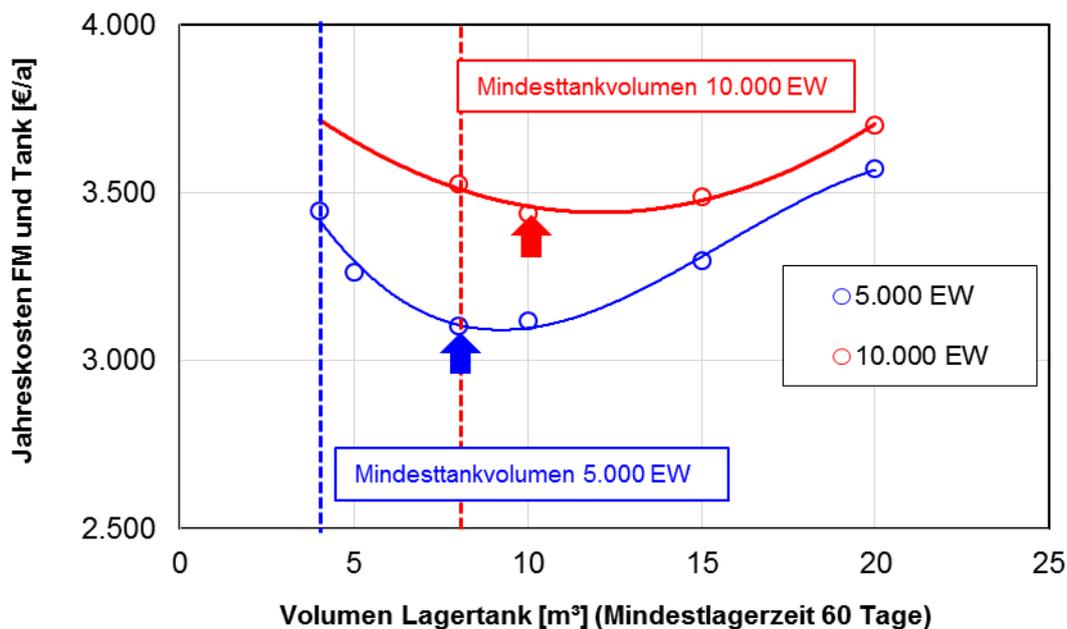


Bild 55: Wahl des optimalen Fällmitteltankvolumens (Fällmittel- und Tankkosten)

Dosierleitungen, Abfüllplatz und Fundamente für Fällmitteltank

Die Kosten für Dosierleitungen, Abfüllplatz und Fundamente für den Lagertank sind stark abhängig von der örtlichen Situation. Aus diesem Grunde können für diese Position der Kostenschätzung nur orientierende Ansätze gewählt werden, die gestaffelt nach den Anschlusswerten/Größenklassen wie folgt festgelegt wurden:

1.000 EW bis 5.000 EW	GK 2:	15.000 €
5.001 EW bis 10.000 EW	GK 3:	20.000 €

10.001 EW bis 16.000 EW	GK 4:	25.000 €
16.001 EW bis 25.000 EW	GK 4:	30.000 €

Hierbei wurde davon ausgegangen, dass sowohl bei der Fundamentierung als auch bei der Verlegung von Dosierleitungen bei größeren Anlagen höhere Kosten anfallen werden. Als Orientierung dienen hier die Ausarbeitungen von Theilen (2015) und eigene Erfahrungswerte. Diese Kosten wurden den BT-Kosten zugeordnet.

Elektro-, Mess-, Steuer- und Regeltechnik (EMSR)

Bei den Maßnahmen zur EMSR-Technik wurden ebenfalls pauschale Kostenansätze, gestaffelt nach der Größe der Kläranlage, verwendet. Der Einsatz einer Online-ortho-Phosphatmessung wird getrennt betrachtet. Mit diesen Kosten ist die Verkabelung und Anbindung der Fällstation an die zentrale Datenverarbeitung und Leittechnik berücksichtigt. Die Staffelung der Kosten berücksichtigt einen bei einfacherer Leittechnik geringeren Aufwand bei kleineren Anlagen und geht davon aus, dass bei kleineren Anlagen kürzere Wege zur Verkabelung etc. erforderlich werden:

1.000 EW bis 5.000 EW	GK 2:	4.000 €
5.001 EW bis 10.000 EW	GK 3:	6.000 €
10.001 EW bis 16.000 EW	GK 4:	8.000 €
16.001 EW bis 25.000 EW	GK 4:	10.000 €

Als Orientierung dienen hier ebenfalls die Kostenangaben von Theilen (2015) und eigene Erfahrungswerte.

Hiermit können allenfalls Orientierungswerte beschrieben werden. In jedem Fall ist eine individuelle Kostenermittlung erforderlich, weil die örtlichen Bedingungen großen Einfluss auf den entsprechenden Aufwand haben.

Online-Messung zur Regelung

Falls zur Regelung der Fällmitteldosierung auf Online-Messungen des ortho-Phosphats zurückgegriffen werden soll, entstehen zusätzliche Kosten, die in Abhängigkeit der Anzahl der eingesetzten Messsysteme steigen.

Diese zusätzliche Ausstattung ist sinnvoll bei größeren Anlagen, in der Regel bei kleinen Anlagen aber nur dann erforderlich, wenn örtliche Gegebenheiten (besonders niedrige Grenzwerte für Gesamtphosphor) dies erfordern. Daher werden diese Kosten (Angaben aus Theilen (2015)) getrennt ausgewiesen, um zu verdeutlichen, welche zusätzlichen Kosten entstehen würden. Diese absoluten

Kosten sind grundsätzlich nicht abhängig von der Größenklasse der Kläranlage. Die spezifischen Kosten pro angeschlossenen Einwohner steigen daher deutlich bei kleineren Kläranlagen (Bild 56). Die mit der aufwändigen Messtechnik verbundenen spezifischen Kosten liegen im Bereich der hier betrachteten Kläranlagengrößen deutlich über den Kosten für das Fällmittel.

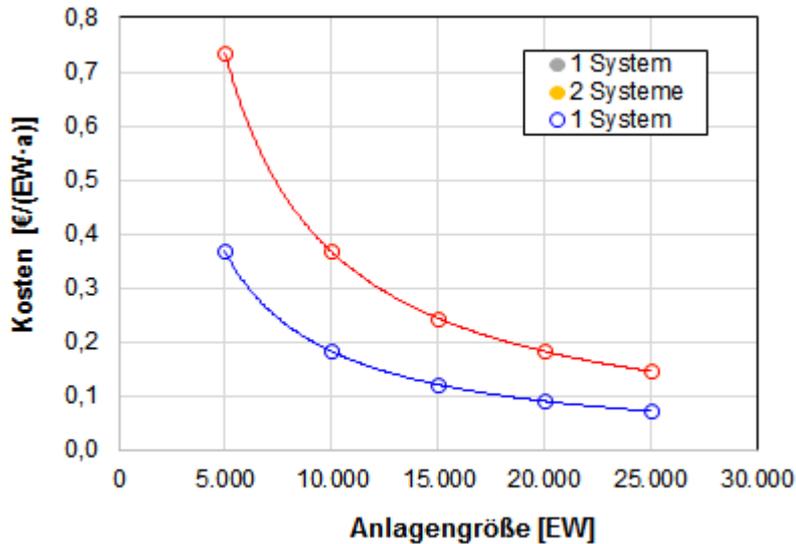


Bild 56: Spezifische Kosten einer Online-ortho-Phosphatmessung in Abhängigkeit von der Anlagengröße (ohne Personalkosten)

6.1.4 Kostenabschätzung für Anlagen von 1.000 EW bis 25.000 EW

Bild 57 zeigt das Ergebnis der Kostenabschätzung zur Implementierung einer Simultanfällung bei Kläranlagen einer Größenordnung zwischen 1.000 EW und 25.000 EW. Es wurde davon ausgegangen, dass eine Phosphorablaufkonzentration von im Mittel $1,0 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ erzielt werden soll.

Wie aus der Grafik erkennbar, sind die Kosten für das Fällmittel selbst bezogen auf die Gesamtkosten eher von untergeordneter Bedeutung ($0,04 \text{ €/}(\text{EW}\cdot\text{a})$ bis $0,21 \text{ €/}(\text{EW}\cdot\text{a})$), ebenso wie die Energiekosten, die in der Größenordnung von deutlich weniger als $0,10 \text{ €/}(\text{EW}\cdot\text{a})$ liegen.

Dominierend sind vielmehr bei den Betriebskosten die Wartung und das Personal und letztendlich die Kosten für die Entsorgung des vermehrt anfallenden Schlammes aus der Fällung.

Die durch die erforderlichen Investitionen entstehenden Kosten haben einen hohen Anteil und sind im Wesentlichen für die Kostendegression bei den spezifischen Kosten je Einwohner und Jahr verantwortlich.

Insgesamt stellt sich eine Fällung des Phosphats als durchaus finanzierbar dar, wie die spezifischen Kosten im Bereich der kleinen Anlagen von etwa 2-5 €/EW·a zeigen. Selbst bei den kleinen Anlagen unter 5.000 EW liegt damit der „Kubikmeterpreis“ der Fällung noch bei erschwinglichen 0,03-0,11 €/EW·a (Ansatz 0,125 m³/(EW·d) Schmutzwasseranfall und 25 % Fremdwasseranteil).

Die Kurve in Bild 57 verdeutlicht aber, dass bei kleineren Anlagen mit weniger als 5.000 EW Belastung die Kosten stark ansteigen, da die Grundausstattung für eine Fällung stets aufzuwenden ist.

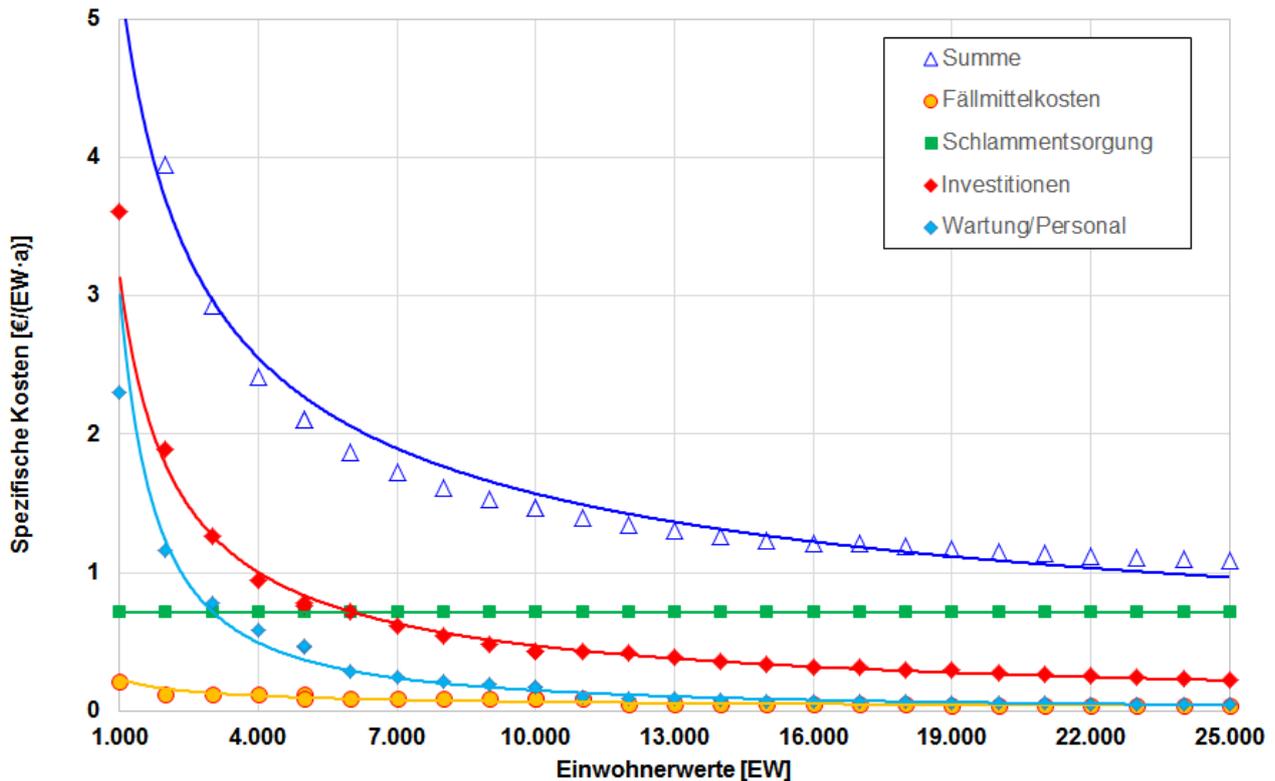


Bild 57: Abgeschätzte Gesamtkosten für Phosphatfällung in Abhängigkeit der angeschlossenen Einwohnerwerte

Bezogen auf den zusätzlich entnommenen Phosphor ergeben sich in etwa folgende spezifische Kosten:

Anlage mit 1.000 EW:	ca. 22 €/kg P
Anlage mit 2.000 EW:	ca. 13 €/kg P
Anlage mit 5.000 EW:	ca. 7 €/kg P
Anlage mit 10.000 EW:	ca. 5 €/kg P
Anlage mit 20.000 EW:	ca. 3,7 €/kg P
Anlage mit 25.000 EW:	ca. 3,5 €/kg P

Insbesondere bei den sehr kleinen Kläranlagen steigt der finanzielle Aufwand bezogen auf die entfernte Phosphorfracht beachtlich.

Den Einfluss des angestrebten Gesamtphosphorablaufwertes auf die Gesamtkosten der Fällung zeigt Bild 58. Es wird deutlich, dass der Einfluss des Gesamtphosphorablaufgrenzwertes auf die Kosten zwar erkennbar ist, aber im Vergleich zum Einfluss der Kostendegression bei größeren Anlagen von eher untergeordneter Bedeutung ist. Die Kostensteigerung durch höhere Ablaufanforderungen wird dabei hauptsächlich durch den vermehrten Schlammanfall und dessen Entsorgungskosten verursacht, nicht durch die Kosten des Fällmittels. Die modellhafte Kostenschätzung ist allerdings für kleine Anlagen mit einer vorgegebenen Ablaufkonzentration von $< 1 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ ungenau, da eventuell zur Erzielung stabiler niedriger Werte zusätzliche Maßnahmen wie Online-Messungen oder intensivere personelle Betreuung eine zunehmende Rolle spielen.

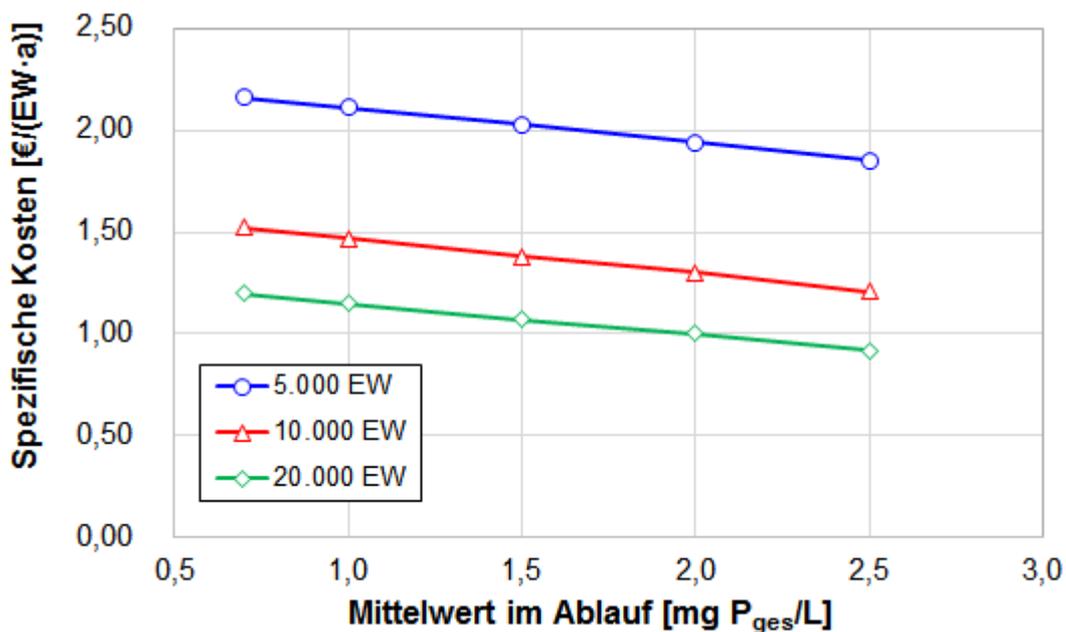


Bild 58: Einfluss des Gesamtphosphorablaufwertes auf die Kosten der Phosphatfällung

6.1.5 Auswirkungen im Hinblick auf die Abwasserabgabe

Das Abwasserabgabegesetz (AbwAG, 2005) ermöglicht den Betreibern von Kläranlagen, Investitionen für Maßnahmen zur Verminderung einer Schadstoffeinleitung von mindestens 20 % mit der Abwasserabgabe der letzten 3 Jahre zu verrechnen (§ 10(3) AbwAG (2005)). Dies gilt auch für den Parameter Phosphor. Weiterhin führt die Verringerung der Schadstofffracht (hier Gesamtphosphor) auch zu einer Verringerung der laufenden Abwasserabgabe und reduziert somit die laufenden Kosten der Phosphorelimination.

Bei zwei Anlagen der GK 2 wird im Folgenden beispielhaft verdeutlicht, welchen Einfluss die Regelungen des Abwasserabgabengesetzes (AbwAG, 2005) auf die Kosten der Fällung haben. Hierzu wurde von den bisherigen Ansätzen ausgegangen (Anhang A.3) und daraus für eine Belebungsanlage ohne Vorklärung die Abwasserabgabe für die Parameter CSB, Gesamtstickstoff und Gesamtphosphor beispielhaft berechnet (Anhang A.5).

Ausgehend von der Annahme, dass die Belebungsanlage mit aerober Schlammstabilisierung und Stickstoffelimination betrieben wird, wurde bei der Berechnung daher von folgenden Einleitkonzentrationen bei CSB, Gesamtstickstoff und Gesamtphosphor vor der Installation der Phosphatfällung ausgegangen:

CSB: 90 mg/L

N_{ges} : 18 mg/L

P_{ges} : 6 mg/L

Bei den kleinen Anlagen ist gemäß AbwV (2004) zwar keine Stickstoffelimination gefordert, es ist aber bei Ansatz der gewählten Verfahrenstechnik davon auszugehen, dass aus betrieblichen Gründen denitrifiziert wird. Ebenso sind die Überwachungswerte bei CSB bei der GK 2 geringer. Dennoch kann auch hier davon ausgegangen werden, dass die angenommene Verfahrenstechnik den niedrigeren Wert sicherstellen kann. Nach Installation der Fällung wird eine Phosphorablaufkonzentration von 2,0 mg P_{ges} /L als Überwachungswert für die Abwasserabgabe berücksichtigt.

Wie aus Tabelle 33 deutlich wird, kann wegen der geringen Schadstoffeinleitmenge bei kleinen Anlagen weder die Verrechnungslösung noch die Einsparung an Abwasserabgabe bei der kleinen Anlage (1.000 EW) die Investitionskosten (Erstinvestition) abdecken oder einen Betriebskostenvorteil gegenüber dem Betrieb ohne Fällung aufweisen. Die sehr kleinen Anlagen können somit auch unter Berücksichtigung der Verrechnungsmöglichkeit und der Betriebskostenreduzierung durch die laufende geringere Abwasserabgabe für Gesamtphosphor keinen wirtschaftlichen Nutzen aus der Phosphatfällung erzielen.

Dagegen finanziert bereits bei der Anlagengröße 5.000 EW die Verrechnung mit der Abwasserabgabe (§ 10(3) AbwAG (2005)) voraussichtlich die Erstinvestition und es kann unter Berücksichtigung der Abwasserabgabe auch ein Betriebskostenvorteil aus der Maßnahme erzielt werden. Je größer die Anlage wird und damit die Verringerung der Schadstofffracht bezüglich Gesamtphosphor, umso größer ist der Kostenvorteil, der durch die Nutzung der Regelungen des AbwAG (2005) entsteht. Voraussetzung ist, dass die Phosphorelimination neu installiert wird. Siehe auch Barjenbruch & Exner (2009).

Tabelle 33: Auswirkung der Abwasserabgabe auf die Kosten der Phosphatfällung am Beispiel der GK 2

Anlagen- größe GK 2 [EW]	3 Jahre Abwasserabgabe vor Phosphatfällung abzü- glich erforderlicher Erstin- vestitionen [€]	Einsparung bei Abwasserabgabe abzüglich Betriebskosten Fällung		
		[€/a]	[€/(EW·a)]	[€/kg]
1.000	-34.100	-1.640	-1,64	-5,26
2.000	-21.400	-1.490	-0,74	-2,39
5.000	21.400	1.050	0,21	0,67

Bei Anlagen ab der GK 4, die bereits eine Phosphorelimination gemäß Mindestanforderungen der AbwV betreiben müssen, ist die bei Einhalten höherer Anforderungen zusätzlich reduzierte Phosphorfracht in der Regel nicht ausreichend, um über die eingesparte Abwasserabgabe die Betriebskostendifferenz abzudecken.

6.1.6 Schlussfolgerungen

Die reinen Fällmittelkosten sind bei Einsatz der Simultanfällung bei kleinen und mittleren Anlagen nur ein untergeordneter Kostenfaktor. Damit ist eine höhere Dosierung zum Erhalt niedrigerer Konzentrationen grundsätzlich vertretbar, sofern größere Mengen an Fällmittel abgenommen werden (d. h. keine Kanister), aus ökologischen Gründen im Einzelfall jedoch abzuwägen (Aufsalzung des Abwassers gegenüber eingeleiteter Phosphorfracht bzw. Einbringung von (Schwer-)Metallen durch die Fällmittel). Eine Überdosierung des Fällmittels zur Absicherung der Ablaufwerte bei kleinen Anlagen erhöht nicht nur den Fällmittelverbrauch, sondern zudem auch den Schlammanfall, der einen maßgeblichen Einfluss auf die Betriebskosten hat. Insbesondere bei kleinen, schlecht betreuten Anlagen ist eine Überdosierung wahrscheinlich.

Während bei kleinen Anlagen der Investitionskostenanteil die Fällungskosten dominiert, überwiegt bei den meisten Anlagen (über etwa 3.000 EW) der Betriebskostenanteil.

Kostenrelevant sind insbesondere bei den kleinen Kläranlagen die mit der Fällmitteldosierung verbundenen Investitionskosten und die Betriebskosten für Schlamm, Personal und Wartung. Insgesamt liegen die Kosten allerdings selbst bei geringen Anschlussgrößen in einem in der Regel noch finanzierbaren Rahmen. Bei Anlagen unter 5.000 EW sind allerdings recht hohe spezifische Kosten zu erwarten. Dies gilt sowohl für die einwohnerspezifischen Werte als auch auf die auf den entfernten Phosphor bezogenen Werte.

Eine Optimierung der Fällmitteldosierung kann durch relativ kostenintensive Mess- und Regeltechnik erzielt werden, die hierzu erforderlichen Investitionen für die Messtechnik wirken sich aber insbesondere bei kleinen Anlagen auf die spezifischen Kosten aus. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass kleine Anlagen höhere Lastschwankungen haben und damit eine gut geregelte Dosierung eigentlich gerade dort relevant wäre. Hierbei sind Biofilmanlagen (Tropfkörper, Rotationstauchkörper) wegen ihres Durchströmungsverhaltens (Pfropfenströmung, kurze Kontaktzeiten) in der Regel sensibler als z. B. Belebtschlammanlagen mit Simultanstabilisierung. Sehr strenge Anforderungen an die Ablaufwerte bei kleinen Anlagen führen daher zu kostspieligen Lösungen.

Die Betrachtungen zur Abwasserabgabe zeigen, dass es bei Anlagen der GK 2 und GK 3 spätestens ab etwa 3.000-5.000 EW lohnend sein kann, eine Phosphorelimination zu installieren, weil die Erstinvestitionen mit der Abgabe der vorangegangenen 3 Jahre verrechnet werden und im laufenden Betrieb durch geringere Abwasserabgabe die Betriebskosten abgedeckt werden können bzw. die Einsparungen bei der Abwasserabgabe die Betriebskosten übersteigen. Bei sehr kleinen Anlagen (unter 3.000 EW) ist die absolute reduzierte Phosphorfracht allerdings in der Regel zu gering, um mittels Phosphorelimination insgesamt Kostenvorteile zu erzielen.

Diese Modellbetrachtung ersetzt nicht im Einzelfall spezifische Auswertungen und Analysen.

6.2 Kosten weitergehender Maßnahmen (Flockungsfiltration)

6.2.1 Grundsätzliche Überlegungen

Um besonders niedrige Phosphorablaufwerte zu erreichen, benötigt man in der Regel das Verfahren der Flockungsfiltration in Kombination mit Simultanfällung, weil im Vergleich zur konventionellen Nachfällung weniger Fällschlamm anfällt. Größter Nachteil dieses Verfahrens ist der hohe zusätzliche Bauaufwand mit sehr hohen Investitionen. Alternative Technologien wie Membrantechnologie sind ebenfalls möglich, aber deutlich weniger verbreitet (siehe Tabelle 18) und bezüglich Mehrkosten in einem ähnlich hohen Niveau.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird davon ausgegangen, dass die Dosierung der Fällmittel (z. B. FeCl_3) im Zulauf des Flockungsfilters stattfindet und die geschätzte ortho-Phosphatkonzentration im Zulauf des Filters 1 mg $\text{PO}_4\text{-P/L}$ beträgt. Die Flockenabtrennung der kolloidalen, organischen und anorganischen Verbindungen erfolgt in einer kontinuierlichen Sandfiltrationsanlage (z. B. Dyna-Sand-Filter). Überwachungswerte von 0,5 mg $\text{P}_{\text{ges}}/\text{L}$ oder kleiner können eingehalten werden.

Alle Kostenansätze sind als Orientierung zu sehen und können keine projektbezogene Kostenschätzung / Kostenberechnung ersetzen; sie stellen jedoch die wesentlichen Einflüsse auf die Kosten der Installation und dem Betrieb einer Flockungsfiltrationsanlage dar.

6.2.2 Investitionskosten

In den Investitionskosten der kontinuierlichen Sandfiltrationsanlage sind enthalten:

- DynaSand-Filter
- Arbeitsplattform mit Steigleiter
- Sandlieferung
- Interne Rohrleitung
- Waschwasserreduzierungsanlage
- Filterdruckmessung mit Alarmmelder
- Filterabdeckungen
- Druckluftanlage
- Schraubenkompressoren
- Dosierstation ohne Lagertank und Befüll-Schrank
- Pumpstation.

Die Umrechnung der Investitionskosten in laufende jährliche Kosten erfolgte mittels des Kapitalwiedergewinnungsfaktors KFAKR mit Annahmen, die im Wesentlichen den Empfehlungen der KVR-Leitlinien (2012) entsprechen (Tabelle 32). Hierbei wurde zwischen Maschinen- und Elektro-MSR-technischer Ausrüstung (MT/ET) und Bautechnik (BT), hinsichtlich der Nutzungsdauer (ND), unterschieden.

Bautechnikkosten

Auf Grundlage eines Richtpreisangebots (Fa. Nordic Water GmbH, für eine DynaSand-Filteranlage mit einer Behandlungskapazität von 80 m³/h – 6 Filtereinheiten in einem Betonbecken) und eigener Erfahrungswerte wurde eine Kostenkurve abgeleitet, die die Kosten der Filteranlage, in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage, darstellt (Bild 59).

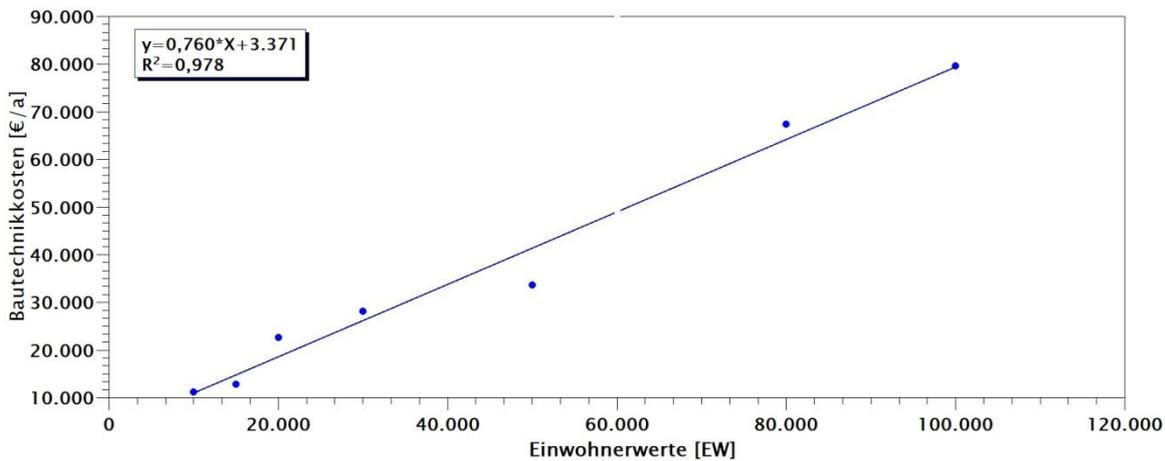


Bild 59: Bautechnikkosten in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage (Richtpreisangebote, Erfahrungswerte, netto mit Baunebenkosten) am Beispiel des DynaSand-Filters

Filteranlagen mit hohen Durchsatzmengen werden in Betonbauweise ausgefertigt. Bei dieser Bauweise werden mehrere Filtereinheiten (typisch bis zu 6 Einheiten) in einem Betonbecken zusammengebracht. Für Kläranlagen größer als 40.000 EW gibt es die Möglichkeit mehr als 6 Filtereinheiten in einem Betonbecken zu integrieren, um die Baukosten zusätzlich zu optimieren. Im Ausland sind Installationen bis 200 DynaSand-Filtereinheiten in einem Betonbecken oder einer großen Halle typisch für Meerwasserentsalzungsanlagen.

MT und EMSR

Bei den Maßnahmen zur EMSR-Technik fallen Kosten an für:

- Elektroschaltschrank für die Dosieranlage
- Verkabelung der gelieferten Teile
- Schaltschrank mit Frequenzumrichter
- Herausführung der verschiedenen Signale auf die zentrale EMSR-Anlage

Für die zentrale Regelung der Fällmitteldosierung auf Online-Messungen des Phosphats entstehen zusätzliche Kosten, die in Abhängigkeit der Anzahl der eingesetzten Messsysteme steigen. Diese zusätzliche Ausstattung ist sinnvoll bei größeren Kläranlagen und in der Regel bei kleinen Anlagen nur dann erforderlich, wenn örtliche Gegebenheiten (besonders niedrige Grenzwerte für Phosphor) dies erfordern. Diese absoluten Kosten sind grundsätzlich nicht abhängig von der Größenklasse der Anlage. Die spezifischen Kosten, pro angeschlossenem Einwohner, steigen daher deutlich bei kleineren Kläranlagen.

Bei den Maßnahmen zur Maschinentechnik wurden Kosten für DynaSand-Filteranlagen mit einem Maximum von 6 Filtereinheiten pro Betonbecken gerechnet. Jede Filteranlage besteht aus:

- 6 Stück DynaSand-Filter DS 5000 E
- 1 Stück Steuerschrank
- 6 Stück Arbeitsplattformen mit einer Steigleiter
- Sandlieferung
- Interne Rohrleitung
- Waschwasserreduzierungsanlage
- Filterdruckmessung mit Alarmmelder
- 6 Stück Filterabdeckungen
- 1 Druckluftanlage für 6 Filtereinheiten
- 2 Schraubenkompressoren (1 Reserve) mit Wechselschaltung
- 1 Druckluft Behälter
- 1 Dosierstation ohne Lagertank und Befüll-Schrank
- Elektroschaltschrank für die Dosieranlage
- Pumpstation

Die extrem hohen Maschinen- und EMSR-Technikkosten ergeben sich aus der hydraulischen Bemessung der Filteranlage, für welche die Mischwassermenge maßgeblich ist (Bild 60). Würde die hydraulische Dimensionierung der Filteranlage auf dem Trockenwetterzufluss basieren, könnten die Maschinen- und EMSR-Technikkosten um ca. 65 % reduziert werden.

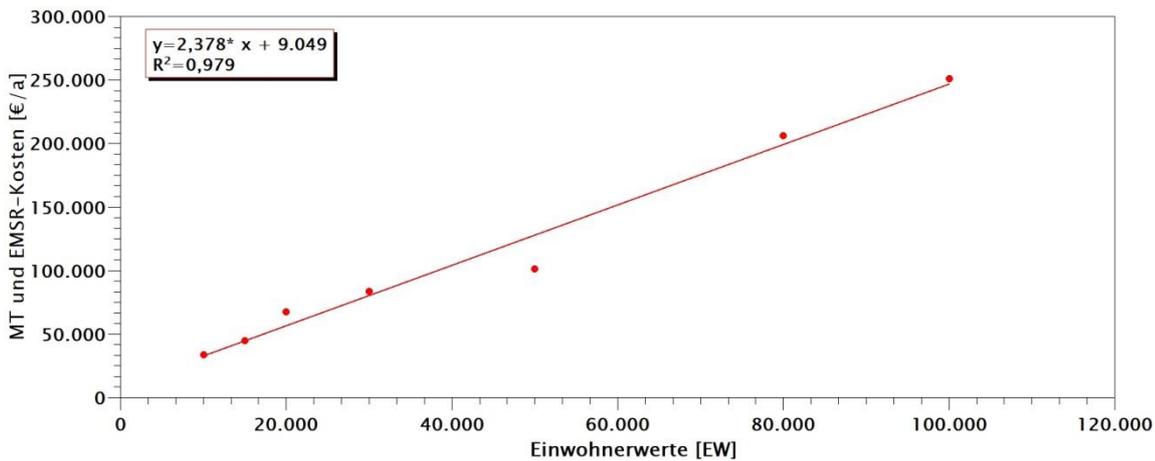


Bild 60: Maschinen- und EMSR-Technikkosten in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage (Richtpreisangebote, Erfahrungswerte, netto mit Baunebenkosten)

Im Einzelfall ist in jedem Fall eine individuelle Kostenermittlung erforderlich, da die örtlichen Bedingungen großen Einfluss auf den entsprechenden Aufwand haben.

6.2.3 Betriebskosten

Wartungskosten

Für einen DynaSand-Filter Typ DS 5000 werden nach eigenen Erfahrungen folgende Hauptersatzteile benötigt:

- Mammutpumpe etwa alle 7 Jahre
- Luftsieb in der Mammutpumpe alle 3-5 Jahre
- Sandwässer alle 10 Jahre
- Magnetventil und Quetschventil alle 10 Jahre
- Sandauffüllung alle 5 Jahre
- Wartung der Kompressoren jährlich

Die spezifischen Wartungskosten einer DynaSand-Filteranlage sind für kleine Kläranlagen extrem hoch (Bild 61). Es ist klar, dass je größer die Kläranlage desto kleiner die spezifischen Wartungskosten der Filteranlage sind.

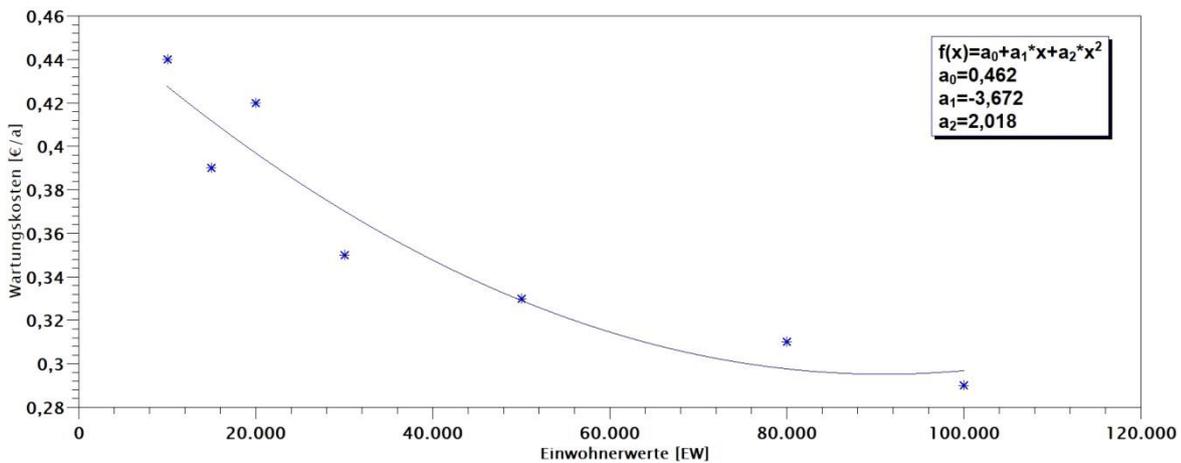


Bild 61: Spezifische Wartungskosten in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage am Beispiel des Dyna-Sand-Filters

Personalkosten

Bei den Personalkosten wird davon ausgegangen, dass bei allen Anlagen kein zusätzliches Personal benötigt wird und somit das vorhandene Personal die Phosphoreliminations- und die Filteranlage mitbetreibt. Folgende Ansätze wurden verwendet:

- Optische Kontrolle der Filter und des Steuerschrankses 0,5 h/Woche
- Überprüfung der Sandumwälzung 2,4 h/Monat
- Sichtkontrolle und Ölprüfung der Kompressoren, Filtermattenreinigung 0,25 h/Woche
- Dosierstation und andere Kontrollen 2 h/Woche

Folglich sind die spezifischen Personalkosten der Filteranlage desto kleiner je größer die Kläranlage ist (Bild 62).

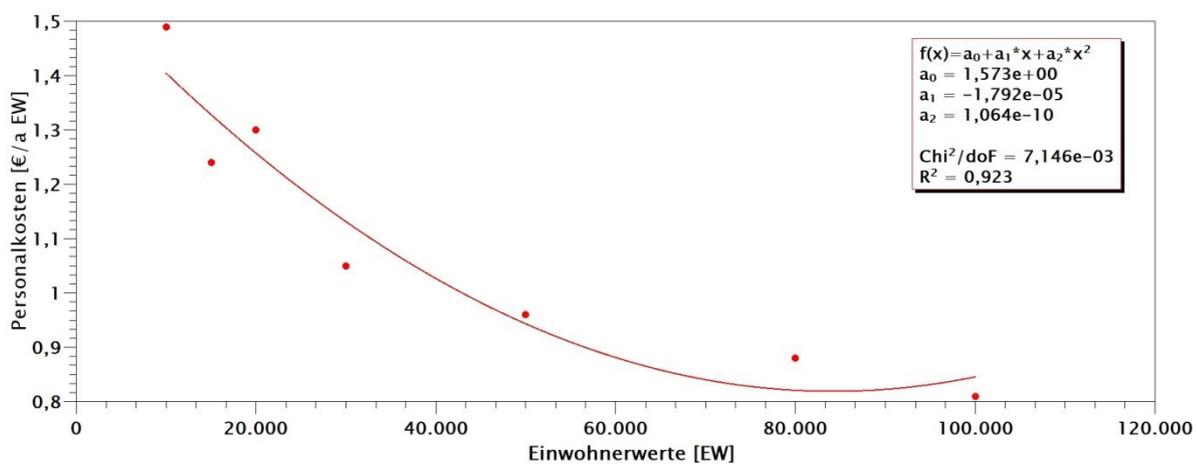


Bild 62: Spezifische Personalkosten in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage

Energiekosten

Die Energiekosten beschränken sich im Wesentlichen auf den Stromverbrauch der Kreiselpumpen der Filteranlage und des Schraubenkompressors für die Filterspülung. Die Energiekosten der Dosierstationspumpen sind vernachlässigbar. Die spezifischen Energiekosten, welche stark von die Beziehung zwischen Bemessungswassermenge und Einwohnerwerte beeinflusst sind, sind, wie bei den Wartungskosten, extrem hoch für kleine Kläranlagen, werden für mittlere Kläranlagen optimiert und steigen wieder für Kläranlagen größer als 80.000 EW (Bild 63).

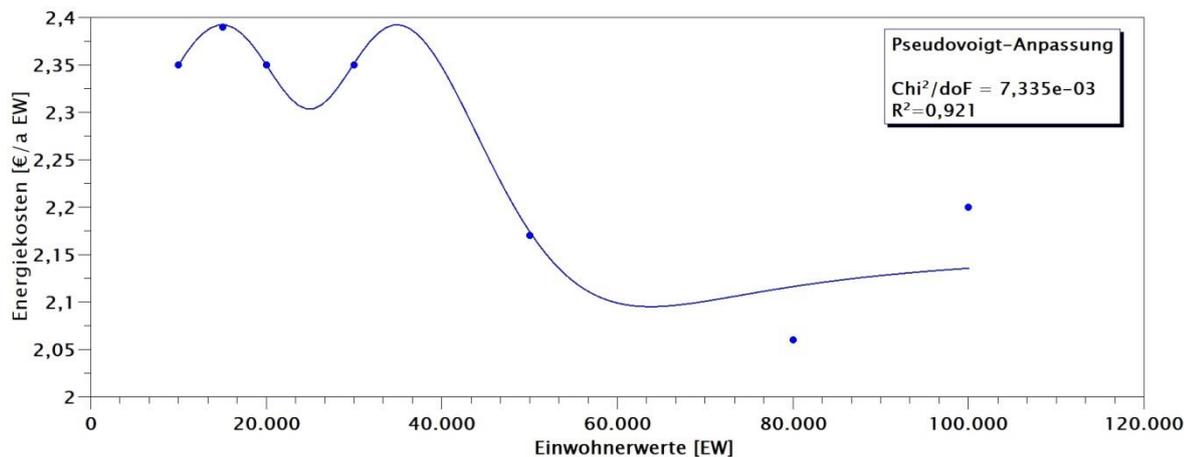


Bild 63: Spezifische Energiekosten in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage

6.2.4 Kostenabschätzung für Anlagen von 10.000 EW bis 100.000 EW

Bild 64 zeigt das Ergebnis der Kostenabschätzung zur Implementierung einer Flockungsfiltrationsanlage zur Phosphatfällung bei Kläranlagen einer Größenordnung zwischen 10.000 EW und 100.000 EW. Es wurde davon ausgegangen, dass eine Phosphorablaufkonzentration niedriger als 0,5 mg P_{ges}/L erzielt werden soll.

Wie aus der Grafik erkennbar, sind die Investitionskosten sowie die Betriebskosten einer Flockungsfiltrationsanlage sehr hoch und liegen zwischen 3 €/(EW·a) bis 5 €/(EW·a). Bei den Betriebskosten sind vielmehr die Energiekosten dominierend; die zwischen 2 €/(EW·a) und 2,4 €/(EW·a) liegen.

Insgesamt stellt sich eine Flockungsfiltrationsanlage als sehr teuer dar, wie die spezifischen Kosten im Bereich der kleinen Kläranlagen (10.000 EW bis 30.000 EW) von etwa 7,5-9,0 €/(EW·a) zeigen. Selbst bei den großen Kläranlagen (40.000 EW bis 100.000 EW) bleiben die spezifischen Kosten konstant bei etwa 6,5 €/(EW·a).

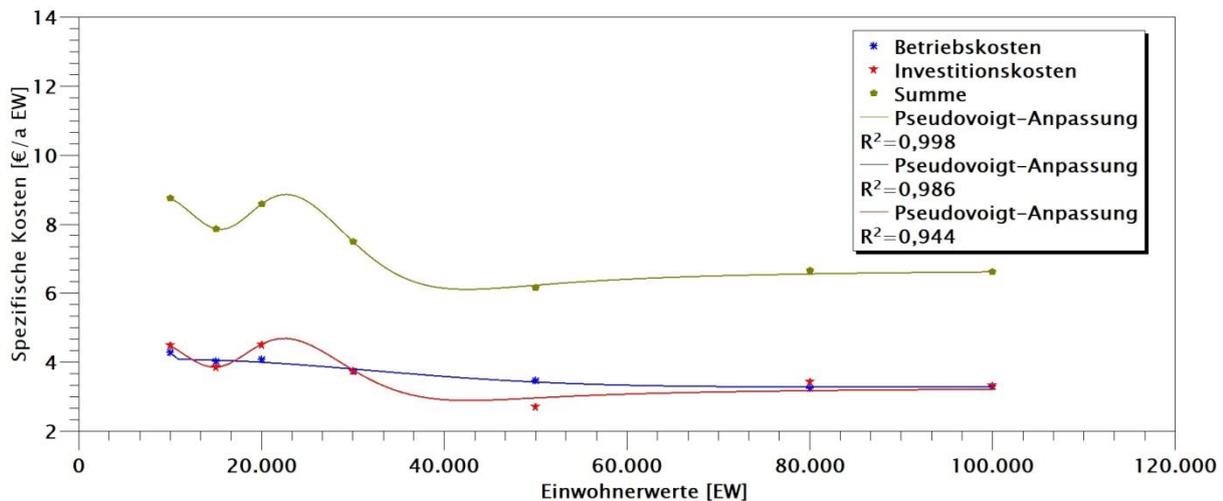


Bild 64: Abgeschätzte Gesamtkosten einer Flockungsfiltrationsanlage zur Phosphatfällung in Abhängigkeit der angeschlossenen Einwohnerwerte

Die Kurve in Bild 65 verdeutlicht, dass die Investitionsanforderungen einer Flockungsfiltrationsanlage, um eine Phosphorablaufkonzentration unter $0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ bei allen Kläranlagen mit einer Ausbaugröße zwischen 10.000 EW und 100.000 EW zu erreichen, sehr hoch sind. Die Investitionskosten pro eliminierten kg P liegen zwischen 170 € und 240 € und betragen somit das mehr als 40-fache der Kosten für eine Simultanfällung.

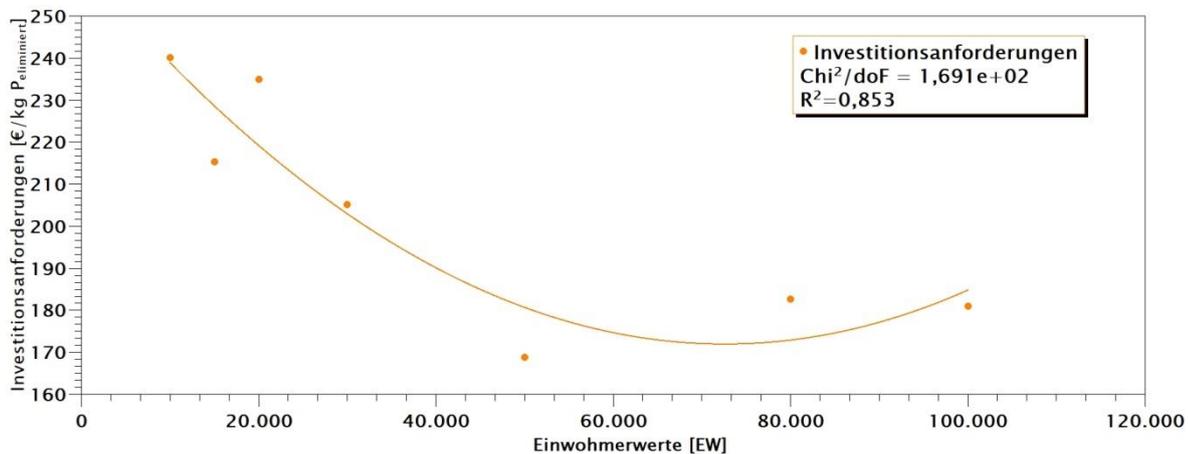


Bild 65: Investitionsanforderungen einer Flockungsfiltrationsanlage zur Phosphatfällung in Abhängigkeit des eliminierten Phosphors

6.2.5 Schlussfolgerung

Um sehr niedrige Phosphorablaufwerte zu erreichen, braucht man eine weitestgehende Abtrennung der AFS, entweder in einer sehr gut funktionierenden, optimierten Nachklärung oder in einer Filtrationsanlage.

Die vorstehend beschriebenen Investitionsanforderungen einer Filtrationsanlage ergeben, dass aus finanziellen Gründen soweit als möglich die Nachklärungsoption zu bevorzugen ist (siehe auch die Kläranlage Erlangen, Kapitel 4.1). Bedingung hierfür ist eine gute Absetzbarkeit des Belebtschlammes und eine ausreichend große, hydraulisch optimal gestaltete Nachklärung. Die Kläranlage der Musterstadt 4 ist ein sehr gutes Beispiel, da dort durch eine sehr gute Abtrennung der Suspensa in der Nachklärung sehr niedrige Phosphorablaufkonzentrationen erzielt werden, ohne dass weitere Maßnahmen wie Nachfällung und Filtration erforderlich werden (Steinle et al., 2017). Diese Anlage ist kein Einzelfall. Auch andere große Anlagen erzielen bereits nach der Nachklärung geringe Gehalte an AFS und Phosphorablaufwerte deutlich unter $0,8 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ im Mittel.

7 Zusammenfassung

Allgemeines

Derzeit bestehen Anforderungen nach dem Stand der Technik für Gesamtphosphor im Kläranlagenablauf in der Abwasserverordnung (AbwV, 2004) nur für die GK 4 und GK 5. Anlagen mit kleinerer Ausbaugröße (≤ 10.000 EW) führen eine gezielte Phosphorelimination durch, wenn aus wasserwirtschaftlichen Gründen strengere Anforderungen bestehen (z. B. Bodenseerichtlinie oder Einleitung in sensible Gewässer) oder aus abgaberechtlichen Gründen eingehalten werden sollen. Teilweise entsteht eine wesentliche Phosphorelimination als Nebeneffekt betrieblicher Optimierungen aufgrund der Verwendung von Fällmitteln zur Schlammstabilisierung (z. B. Blähschlamm bekämpfung). Die mittleren Gesamtphosphorablaufkonzentrationen liegen daher bei vielen Kläranlagen bereits deutlich unterhalb der aufgrund der Mindestanforderungen der AbwV (2004) zu erwartenden Ablaufkonzentrationen. Die durchschnittliche Ablaufkonzentration der bayerischen Kläranlagen lag für das Jahr 2015 frachtgemittelt bei ca. $0,9 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$. Diese Konzentration ist im bundesdeutschen Vergleich vergleichsweise hoch (je nach Bundesland $0,4\text{-}1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$; Statistisches Bundesamt Wiesbaden (2015)).

Die jährlich von den kommunalen Kläranlagen in die bayerischen Gewässer eingebrachte Gesamtphosphormenge (ca. 1.378 t im Jahr 2015) könnte reduziert werden, wenn allgemeine Qualitätsziele auch für kleinere Anlagen (GK 2 und GK 3) definiert würden. In Bayern ist der Anteil der Kläranlagen der GK 1-3 an der emittierten Phosphormenge mit etwa 50 % wesentlich höher als im bundesdeutschen Durchschnitt. Bei diesen Anlagen besteht aufgrund der vergleichsweise hohen Ablaufkonzentrationen von im Mittel meist $1,7\text{-}3,4 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ ein großes Potential zur Emissionsminderung, insbesondere bei den Kläranlagen der GK 2 mit einer jährlichen Phosphorfracht von $407 \text{ t P}_{\text{ges}}$ (2015). Daher sollten in diesem Vorhaben die Möglichkeiten für eine weitestgehende Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen dargestellt werden. Als weitestgehende Phosphorelimination wird hierbei die Anwendung von Verfahren verstanden, die über die bisherigen Ansätze der technischen Regeln und des Stands der Technik hinausgehen und mit denen Phosphorverbindungen mit vertretbarem technischen und wirtschaftlichen Aufwand so effektiv wie möglich entfernt werden können. Um verschiedene Rahmenbedingungen zu berücksichtigen, wurden während der Bearbeitung dieses LfU-Projekts statistische Auswertungen des Ist-Zustandes aller bayerischen Kläranlagen erstellt, detaillierte Bilanzierungen von zehn Kläranlagen durchgeführt sowie die spezifischen Investitions- und Betriebskosten für die weitestgehende Phosphorelimination berechnet.

Im Folgenden ist eine Zusammenfassung der empfohlenen Verfahren zur Phosphorelimination je nach Größenklasse, Anforderung und System gegeben. Außerdem werden die Aspekte Personalbedarf, Kosten, Probenahme und Datenauswertung, Mess-, Steuer- und Regeltechnik sowie die Umsetzung im Einzelfall besonders beleuchtet, unter deren Berücksichtigung eine möglichst weitestgehende Phosphorelimination bei kommunalen Kläranlagen grundsätzlich möglich ist.

Weitestgehende Elimination von Phosphor

Mit einer Simultanfällung sind gemäß dem derzeitigen Regelwerk Überwachungswerte $\leq 1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$, insbesondere für die Kläranlagen der GK 3-5, betriebsstabil einhaltbar. Die zehn im Rahmen des LfU-Projekts im Detail untersuchten Kläranlagen sowie weitergehende Befragungen zeigen sogar, dass mit den konventionellen Verfahren (Simultanfällung, teils mit Bio-P) im Mittel deutlich niedrigere Gesamtposphorkonzentrationen im Ablauf erzielt werden können (bis ca. $0,15 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$). So können durch eine optimierte Fällung mit einer individuellen Steuerung bzw. Regelung bei den meisten Anlagen der GK 3-5 mittlere Ablaufkonzentrationen von $0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ oder niedriger betriebsstabil erreicht werden. Dies entspricht Anforderungswerten von ca. $0,7\text{-}0,8 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$.

Die kommunalen Kläranlagen der GK 2 ohne gezielte Phosphorelimination benötigen zum Erreichen niedrigerer Ablaufkonzentrationen ($\leq 2,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$) in der Regel die Nachrüstung einer Fällmittelstation mit einer einfachen Steuerung, um eine deutliche Reduktion der Phosphoremissionen zu ermöglichen. Voraussetzung ist, dass eine geeignete Dosierstelle eingerichtet und der Fällschlamm effizient entfernt werden kann. Durch weitergehende Optimierungen sind, insbesondere bei Belebungsanlagen, mit geeigneten Randbedingungen grundsätzlich ohne große Investitionen Ablaufwerte von im Mittel $0,7\text{-}0,8 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ verfahrenstechnisch und ökonomisch möglich. Zu beachten ist, dass bei der Verwendung von (Schönungs-)Teichen eine häufigere Entnahme des Schlammes vorzunehmen ist, um Rücklöseerscheinungen zu verringern und eine weitergehende Phosphorelimination zu ermöglichen. Für Kläranlagen der GK 4 und GK 5 ist die Einhaltung solch niedriger Mittelwerte grundsätzlich realisierbar, vorausgesetzt die Nachklärbecken entsprechen dem Stand der Technik und die Anlage wird im Hinblick auf die Schlammabsetzbarkeit betrieblich optimiert. Kommunale Kläranlagen, die ein Bio-P-Becken besitzen, müssen bei diesen niedrigen Anforderungen zusätzlich Fällmittel dosieren, da andernfalls entweder der Ablaufwert nicht betriebsstabil eingehalten werden kann oder es zu Problemen mit MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat) kommen kann.

Die dominierende Rolle für die Erzielung sehr niedriger Phosphorablaufkonzentrationen ($< 0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$) ist die effiziente Abtrennung der partikulären Stoffe in der Nachklärung. Hierauf ist

insbesondere im Betrieb durch Maßnahmen zur Optimierung der Absetzbarkeit des Belebtschlammes und bei der Konstruktion der Nachklärung (siehe Empfehlungen im DWA-A 131 (2016)) zu achten. So liegen die absoluten partikulären Phosphorablaufkonzentrationen berechnet im Mittel bei etwa 0,15 mg P/L (GK 4) bzw. 0,12 mg P/L (GK 5), wobei bei den Anlagen der GK 4 bis zu 0,35 mg P/L im Ablauf vorkommen können. Hinzu kommen ein gelöster, nicht-fällbarer Phosphoranteil von etwa 0,05-0,10 mg P/L (u. a. Phosphite sowie Phosphonate, meist von Indirekteinleitern aus der Metall- und Textilindustrie) sowie ein geringer Anteil an ortho-Phosphat, der aus ökologischen und ökonomischen Gründen nicht gefällt wird, da bei einer vollständigen Fällung des gelösten ortho-Phosphats sowohl mit einem sehr hohen Fällmittelverbrauch als auch mit einem erhöhten Salzeintrag in die Gewässer zu rechnen ist. Somit sind für Belebungsanlagen bei geeigneten Randbedingungen und bei einem optimierten Betrieb Ablaufkonzentrationen von 0,30-0,50 mg P_{ges} /L im Mittel betriebsstabil erreichbar. Für eine betriebssichere Einhaltung von Überwachungswerten $\leq 0,5$ mg P_{ges} /L ist somit meist eine weitestgehende Reduktion des gebundenen Phosphoranteils erforderlich. Welche Maßnahmen dafür infrage kommen (z. B. optimiertes Einlaufbauwerk oder (Flockungs-)Filtration), muss jeweils im Einzelfall untersucht werden.

Folglich ist sowohl für die Kläranlagen der GK 2 und GK 3 als auch für die Anlagen der GK 4 und GK 5 eine deutliche Reduzierung der Phosphorfrachten grundsätzlich verfahrenstechnisch möglich, wobei der Aufwand mit strengeren Anforderungen stark steigt, wie auch die eingesetzte Fällmittelmenge mit abnehmenden Ablaufkonzentrationen überproportional zunimmt.

Kosten für Investition und Betrieb einer weitestgehenden Phosphorelimination

Die Fällmittelkosten fallen in der Regel im Vergleich zu den übrigen Kostenfaktoren (Wartung/Personal, Schlamm Entsorgung, Investitionen) für die Umsetzung einer weitestgehenden Phosphorelimination nicht ins Gewicht. In den betrachteten Fällen liegen die mit der Fällmitteldosierung verbundenen Investitionskosten selbst bei geringen Anschlussgrößen der GK 2 bei ca. 2-5 €/ (EW·a). Diese spezifischen Kosten für eine zusätzliche Fällung sind bei kleinen Anlagen niedriger als die Kosten für eine Nachrüstung einer Filtration bei großen Anlagen. Eine Optimierung der Dosierung kann durch Mess- und Regeltechnik erzielt werden, wobei diese bei kleinen Anlagen maßgeblich für die Kosten sind. Da kleine Anlagen in der Regel höhere Zulaufschwankungen haben als große Anlagen, wäre eine geregelte Dosierung dort besonders relevant. Eine Zwei-Punkt-Fällung mit nachgeschalteter Raumfiltration ist allerdings für GK 3 und kleiner aufgrund der erhöhten Investitionskosten nicht geeignet. Der Mehranfall an Fällschlamm durch eine zusätzlich erhöhte Fällung ist vergleichsweise gering und somit nicht kostenentscheidend.

Die Regelungen des Abwasserabgabengesetzes können für kleinere und mittlere Anlagen, die bisher keine Phosphatfällung betrieben haben, einen Anreiz zur Nachrüstung einer Fällmittelstation darstellen, da die Erstinvestition mit der Abwasserabgabe der letzten drei Jahre verrechnet werden kann. Zudem fallen aufgrund des niedrigeren Überwachungswertes weniger Abgaben an, sodass die Betriebskosten sinken. Lediglich bei sehr kleinen Anlagen (< 3.000 EW) ergibt sich hieraus kein entscheidender Vorteil. Modellrechnungen anderer Autoren zu den zusätzlichen Betriebskosten haben gezeigt, dass die Phosphorelimination unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Abwasserabgabe oft kostengünstiger ist, als eine weitere unverminderte Einleitung der Phosphatfracht in den Vorfluter (Barjenbruch & Exner, 2009).

Personalbedarf

Eine weitestgehende Phosphorelimination (z. B. durch Erhöhung der Fällmittelmenge, Anpassung der Regelung/Steuerung oder Implementierung weiterer Messtechnik) ist für Kläranlagen der GK 4 und GK 5 mit dem bestehenden Personal machbar, sofern keine weiterreichenden baulichen Maßnahmen (z. B. Abwasserfilter) erforderlich sind. Dahingegen ist bei den Kläranlagen der GK 3 und besonders der GK 2 zu prüfen, ob das vorhandene Personal, das in der Regel häufig weitere kommunale Aufgaben übernehmen muss, im Hinblick auf die erforderliche Qualifikation und den zusätzlichen Zeitaufwand ausreicht. Bei den kleineren Anlagen ist nicht nur die Umsetzung der weitestgehenden Phosphorelimination sondern auch die effiziente Verwendung der Fällmittel in hohem Maße von der Qualifizierung und Weiterbildung des Personals abhängig. Die Nachrüstung eines Bio-P-Beckens für kleinere Anlagen nicht zu empfehlen, da der personelle Aufwand für diese Anlagen deutlich höher ist und nur in Einzelfällen vom Betriebspersonal zusätzlich abgedeckt werden kann. Zudem ergab sich bei der Befragung der Kläranlagenbetreiber, die Anlagen mit Bio-P und chemischer Fällung betreuen, dass seit Jahren der Anteil der Bio-P zugunsten der Fällung aufgrund betrieblicher Probleme reduziert wurde.

Mess-, Steuerungs- und Regelungs-Technik

Generelle Aussagen zur Implementierung der Steuerungs- und Regelungs-Technik können nicht getroffen werden. Grundvoraussetzung bei Kläranlagen mit chemischer Fällung ist, dass sowohl eine Steuerungseinheit vorhanden ist bzw. nachgerüstet wird, als auch die Pumpen automatisch gesteuert werden können. Die Fällmitteldosierung sollte je nach Belastung stufenweise erhöht werden können, da eine konstante Dosierung bei hohen Anforderungen sonst eine zu große Fällmittelmenge benötigen würde. Die Steuerung der Fällmitteldosierung kann zeitabhängig unter Berücksichtigung gemessener Ganglinien, wassermengenproportional oder frachtproportional durchgeführt

werden (DWA-A 202, 2011). Daneben ist eine Aufzeichnung der Steuerung sowie der Einstellungen der veränderten Parameter unabdingbar, um eine Datenauswertung durchführen zu können.

Eine Regelungstechnik mit Online-Überwachung kann den Fällmitteleinsatz optimieren, ist jedoch für kleinere Anlagen meist nicht notwendig. Es muss sichergestellt werden, dass die Messgrößen sicher und zuverlässig bestimmt werden. Die Betriebsanweisung muss eine alternative Vorgehensweise aufführen, die bei Störungen in der Messung oder sonstigen Ausfällen zum Einsatz kommen kann.

Rechnerische Potenzialabschätzung für Bayern

Für eine wesentliche Reduzierung der Phosphorfracht aus den kommunalen Kläranlagen sind strengere Anforderungen erforderlich. Bei deren Ausgestaltung sollten die ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen Berücksichtigung finden. Wesentliche Aspekte sind dabei insbesondere die Ausbaugröße der Kläranlage (Größenklasse) und die Empfindlichkeit des betroffenen Gewässers. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde pauschal für ganz Bayern abgeschätzt, mit welchen Anforderungen für Kläranlagen der GK 2-5 eine Verringerung der Phosphorfracht um ein Drittel bzw. die Hälfte des bisherigen Wertes erreicht werden könnte. Einzelfallabhängige Aspekte blieben dabei unberücksichtigt.

Folgende Szenarien wurden dargestellt:

Szenario 1: Reduzierung der Phosphorfracht um ein Drittel

- Anforderungen für P_{ges} nach Variante A:
 - GK 2 und GK 3: 2,0 mg P_{ges}/L
 - GK 4 und GK 5: 0,8 mg P_{ges}/L
- Anforderungen für P_{ges} nach Variante B:
 - GK 2: 2,0 mg P_{ges}/L
 - GK 3 und GK 4: 1,0 mg P_{ges}/L
 - GK 5: 0,5 mg P_{ges}/L
- Anzahl der betroffenen Kläranlagen: ca. 1.000 (nach beiden Varianten); entspricht ca. 76 % der Kläranlagen der GK 2-5

Szenario 2: Reduzierung der Phosphorfracht um die Hälfte

- Anforderungen für P_{ges} :
 - GK 2 und GK 3: 1,0 mg P_{ges}/L
 - GK 4 und GK 5: 0,5 mg P_{ges}/L
- Anzahl der betroffenen Kläranlagen: ca. 1.200; entspricht ca. 90 % der Kläranlagen der GK 2-5

Folgende Maßnahmen sind für die Einhaltung der strengeren Anforderungen insbesondere bei technischen Abwasserbehandlungsanlagen – in Abhängigkeit von der Ausgangssituation und dem erforderlichen Reinigungsziel – grundsätzlich möglich:

- Nachrüstung einer Phosphatfällung (Fällmittelstation)
- Optimierte Simultanfällung auf der Grundlage eines Messprogramms
- Optimierte Steuerung bzw. Regelung der Fällung
- Optimierte Nachklärung
- Zwei-Punkt-Fällung (bei GK 4 und GK 5)
- Flockungsfiltration (bei GK 5)

Durch die Einführung einer weitestgehenden Phosphorelimination (Szenario 2) auf den Kläranlagen der GK 2 und GK 3 mittels chemischer Phosphatfällung könnten ca. 30 % der gesamten Phosphoremissionen der bayerischen Kläranlagen reduziert werden. Gerade für die kleineren Anlagen der GK 2 ist ein Anforderungswert von 1,0 mg P_{ges}/L jedoch betrieblich sehr anspruchsvoll, insbesondere wenn Teichkläranlagen zum Einsatz kommen. Anhand einer zusätzlichen Verschärfung der Anforderungen an die kommunalen Kläranlagen der GK 4 wären weitere ca. 15 % der Gesamtphosphoremissionen reduzierbar. Vergleichbare Maßnahmen bei den GK 5 können zu einer zusätzlichen Reduzierung der Gesamtemissionen von bis zu 6 % beitragen, wobei in der Regel eine Nachrüstung der Nachklärung (ggf. Filtration) neben anderen kostenintensiven Maßnahmen notwendig wird.

Geringere und praxisgerechtere Verschärfungen der Anforderungen für die Anlagen der GK 2-5 (Szenario 1), die mittels Fällung und ggf. Bio-P noch erreicht werden könnten, würden zu einer Reduktion der Phosphoremissionen von ca. 35 % führen und würden nur rund 1.000 der etwa 2.500 Kläranlagen in Bayern betreffen bzw. rund 76 % der Kläranlagen der GK 2-5. In fast allen Fällen würden sich der Aufwand und die damit verbundenen Kosten v. a. auf die vergleichsweise kostengünstige Nachrüstung von Fällmittelstationen (Kapitel 6) bzw. die Änderung der Fällmitteldosierung

sowie die Implementierung bzw. Anpassung von Steuerungs- oder Regelungstechniken beschränken. Somit ist im Gegensatz zu Szenario 2 nur im Einzelfall mit hohen Kosten (z. B. für den Bau einer Filteranlage) bei der Umsetzung zu rechnen.

Bei Berücksichtigung der vorhandenen Rahmenbedingungen für eine praktikable Umsetzung (v. a. örtliche Gegebenheiten, Relevanz des Frachtbeitrags der einzelnen Kläranlage, wirtschaftliche Umsetzbarkeit der Maßnahmen) wird der reale Effekt von den durchgeführten Abschätzungen abweichen.

Hinweise für die Umsetzung im Einzelfall

Ein pauschales Vorgehen zur Implementierung einer weitestgehenden Phosphorreduktion auf einer kommunalen Kläranlage wird als nicht zielführend angesehen, es sollte vielmehr für jede Kläranlage individuell über geeignete Umsetzungsmaßnahmen entschieden werden. Die Umsetzung muss neben den Überwachungswerten, auch die örtlichen Randbedingungen berücksichtigen.

Allgemein ist festzuhalten, dass sehr strenge Reinigungsziele nicht nur einen sehr hohen Aufwand verursachen, sondern auch mit jeder Steigerung das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen überproportional steigt. Um für Bayern eine möglichst betriebssichere und effiziente Reduzierung der Phosphoremissionen zu erreichen, ist ein differenziertes Vorgehen unter Berücksichtigung der Verhältnisse in den einzelnen Größenklassen und der jeweiligen Immissionssituation erforderlich.

Zu Beginn der Implementierung einer weitestgehenden Phosphorelimination ist zuerst eine Nachberechnung der Dimensionierung der Nachklärung vorzunehmen. Bei einem zu hohen Feststoffabtrieb sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen, da eine dauerhafte Dosierung von Fällmitteln zur Verbesserung der Absetzeigenschaften des Schlammes aus Gründen der zusätzlichen Aufsatzung aber auch besonders aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Nachhaltigkeit abzulehnen ist. Beispielsweise kann eine Optimierung des Ein- und Auslaufbauwerkes die Trennleistung der Nachklärung deutlich verbessern. Anschließend ist eine Optimierung der bereits auf einer Kläranlage bestehenden Verfahren durch den Einsatz einer geeigneten Steuerungs- und Regelungstechnik als erste Maßnahme sinnvoll. Die Zusammensetzung des Gesamtphosphors ist abhängig von den angeschlossenen Einleitern, Schwankungen im Einzugsgebiet sowie der Kläranlage selbst und muss im Rahmen eines erweiterten Monitorings bestimmt werden. Eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Phosphoranteile unter Berücksichtigung des Feststoffabtriebs ermöglicht die wirtschaftliche Optimierung bereits bestehender Maßnahmen und hilft mögliche Defizite bezogen auf die Elimination einzelner Phosphorfraktionen aufzuzeigen. In vielen Fällen wäre beispielsweise ein niedrigerer Ablaufwert durch die Reduktion des partikulären Phosphoranteils möglich. Dies könnte durch eine

veränderte Betriebsführung, wie dem Betrieb der Belebung bei niedrigeren Schlammindizes (Maßnahme zur Bekämpfung von Schwimm- und Blähschlamm) oder durch eine hydraulisch optimierte Nachklärung (Einlaufgestaltung, ausreichender Flockungsraum) erreicht werden. Auch eine Reduzierung des Schlammalters kann die Phosphorentfernung erhöhen. Da die Betriebsweise zur Minimierung von Schwimmschlamm/Blähschlamm häufig besser belüftete Belebungsbecken sowie einen höheren Anteil belüfteter Zonen verlangt, kann ein Zielkonflikt zwischen Stickstoffelimination und optimaler Phosphorelimination entstehen. Eine temporäre Erweiterung des Messumfangs ist daher auch zu empfehlen, um zusätzlich eine optimale Verfahrenskombination zu identifizieren und eine bestmögliche Ausnutzung der Potentiale einzelner Maßnahmen zu erreichen.

8 Fazit

In Bayern ist das Reduktionspotential der Gesamtposphoremissionen bei den Kläranlagen der GK 2-5 am größten (Frachtbetrachtung). Würde bei jeder bestehenden Kläranlage der GK 2-5 eine Umrüstung auf eine weitestgehende Phosphorelimination vorgenommen, wäre rechnerisch eine maximale Reduktion der Gesamtposphorfracht aus Kläranlagen in einer Größenordnung von etwa 30 % bis 55 % vorstellbar.

Die Betrachtung des Ist-Zustandes auf allen bayerischen Kläranlagen (> 50 EW) anhand statistischer Kenndaten sowie die Bilanzierungen der Phosphorelimination auf zehn ausgewählten Kläranlagen in Deutschland ergaben, dass für die weitestgehende Phosphorelimination die bestehenden Verfahren (chemische Phosphatfällung, ggf. mit Filtration oder in Kombination mit Bio-P) geeignet sind. Für Belebungsanlagen der GK 2 sind durch eine optimierte Simultanfällung mittlere Konzentrationen $\leq 0,8 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ im Ablauf möglich. Bei den Kläranlagen der GK 3-5 ist durch eine Optimierung der Betriebsweise eine mittlere Konzentration des Gesamtposphors im Kläranlagenablauf von $0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ grundsätzlich betriebsstabil erreichbar, sofern die Nachklärung gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik bemessen ist und betrieben wird (DWA-A 131, 2016). Die Verwendung eines Abwasserfilters ist nur bei stark erhöhten Anforderungen notwendig. Dafür ist bei noch nicht optimierten Anlagen mit bereits bestehender Phosphatfällung ein erhöhter Fällmittelbedarf notwendig sowie gegebenenfalls ein größerer Fällmitteltank bzw. eine neue Mess- und Regeltechnik. Bei Anlagen, die bisher ohne Fällung betrieben wurden, ist dagegen eine komplette Fällmittelstation als Erstinvestition erforderlich. Auch bei Tropfkörperanlagen und Teichanlagen mit technischer Stufe, die eine effiziente Fällmitteldosierung erlaubt, besteht ein entsprechendes Optimierungspotenzial ohne Wechsel des Anlagentyps. Gerade für die kleineren, naturnahen Anlagen der GK 2 ist ein Anforderungswert von $1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ jedoch betrieblich sehr anspruchsvoll. Die Einhaltung mittlerer Ablaufkonzentrationen unter $0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ erfordert grundsätzlich zusätzliche Maßnahmen wie Zwei-Punkt-Fällung, Bio-P, Filtration bzw. Flockungsfiltration, welche für den Einzelfall abzuleiten sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die effiziente Verwendung der Fällmittel in hohem Maße von der Qualifizierung und Weiterbildung des Personals abhängig ist. Somit ist besonders bei den kleineren Anlagen der GK 2 und GK 3 mit zusätzlichen Kosten beim Betriebspersonal zu rechnen. Auch aus diesen Gründen ist die Nachrüstung eines Bio-P-Beckens für kleinere Anlagen nicht zu empfehlen.

Die spezifischen Investitions- und Betriebskosten zur Implementierung einer Simultanfällung bei Belebungsanlagen mit 1.000 EW und 25.000 EW wurden für verschiedene Bemessungsfälle inklusive Steuerung/Regelung berechnet. Diese liegen bei den Kläranlagen der GK 2 bei ca. $2\text{-}5 \text{ €}/(\text{EW}\cdot\text{a})$.

Insbesondere bei den sehr kleinen Kläranlagen steigt der finanzielle Aufwand bezogen auf die entfernte Phosphorfracht deutlich.

Danksagung

An dieser Stelle möchten sich die Mitarbeiter der Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH und das Projektteam des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität München (TUM) für die gute Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) und beim Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) für die Finanzierung bedanken. Besonderer Dank gilt allen an diesem Vorhaben beteiligten Kläranlagenbetreibern sowie den bayerischen Wasserwirtschaftsämtern für die stets freundliche Auskunft und sehr gute Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- AbwAG (2005): Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz - AbwAG), vom 18. Januar 2005 (BGBl. I S. 114), zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 1. Juni 2016 (BGBl. I S. 1290) geändert.
- AbwV (2004). Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung), vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 01. Juni 2016 (BGBl. I S. 1290) geändert.
- Adam, C., Kraume, M., Gnirss, R. & Lesjean, B. (2003). Membranbelebungsverfahren mit vermehrter biologischer Phosphorelimination (EBPR). *Chemie Ingenieur Technik* 75(5), 628-632.
- Angel, R. (1999). Removal of phosphate from sewage as amorphous calcium phosphate. *Environmental Technology*, 20(7), 709-720.
- ATV-DVWK-A 198 (2003) Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, April 2003. ISBN 3-924063-48-6.
- ATV-DVWK-Arbeitsbericht (2003). Kennzahlen zur gezielten P-Elimination in kommunalen Kläranlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2003. ISBN 13: 978-3-88721-331-2.
- Barjenbruch, M. & Exner, E. (2009). Leitfaden zur Verminderung des Phosphoreintrags aus Kläranlagen. Herausgegeben vom Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt des Landes Thüringen (TMLNU). Online verfügbar unter <http://apps.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1044.pdf> (abgerufen am 15.08.2016).
- Barjenbruch, M. & Exner, E. (2016). Grundlagen der chemischen Phosphorelimination (Chem-P) in Kläranlagen - Das DWA Arbeitsblatt 202. Expertenseminar „Neues zur Phosphorelimination in Kläranlagen“. DWA 2016, Hennef (unveröffentlicht).
- Barjenbruch, M. & Geyer, P. (2016). Weitestgehende Phosphorelimination auf Kläranlagen – Mit welchen Möglichkeiten können neue Forderungen der WRRL erfüllt werden? Expertenseminar „Neues zur Phosphorelimination in Kläranlagen“. DWA 2016, Hennef (unveröffentlicht).
- Baumann, P. (2003). Phosphatelimination aus Abwasser, Oldenbourg Industrie Verlag GmbH, München, 2003. ISBN: 3-486-26508-3.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41.
- Cornel, P., Schaum, C. & Lutze, R. (2015). Gutachten zur Rücklösung von Phosphor im Gewässer aus Feststoffen von Kläranlagenabläufen. Im Auftrag des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie (HULG), Stand 11.03.2015.

- Crawford, G., Daigger, G. & Erdal, Z. (2006). Enhanced biological phosphorus removal within membrane bioreactors. Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2006, 1856-1867.
- Desmidt, E., Ghyselbrecht, K., Zhang, Y., Pinoy, L., Van der Bruggen, B., Verstraete, W., Rabaey, C. & Meesschaert, B. (2015). Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(4), 336-384.
- DHV Consulting Engineers (2009). P-Recovery with the crystalactor – efficient water treatment without waste. Online verfügbar unter http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_koordinierend/bs_naehrstofftage/baltic21/17_Giesen.pdf (abgerufen am 05.10.2016).
- Dr.-Ing. Steinle GmbH: Machbarkeitsstudie zur gemeinsamen Klärschlammverwertung für 19 Kommunen aus und um den Landkreis Rottal-Inn, im Auftrag des Landkreises Rottal-Inn und dem Markt Arnstorf, Weyarn, November 2016.
- DWA (2011). Betrieb von Abwasseranlagen; Die Phosphorbilanz im kommunalen Abwasser. Leitfa-den Nr. 2-13, Stand 2//2011
- DWA (2013). 26. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen – Phosphor im Visier.
- DWA (2016). Kanal- und Kläranlagen-Nachbarschaften - DWA-Landesverband Bayern - 2016 Fortbildung des Betriebspersonals. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., DWA-Landesverband Bayern, München, 2016. ISBN 13: 978-3-88721-377-0.
- DWA-A 131 (2016). Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2016. ISBN 13: 978-3-88721-331-2.
- DWA-A 202 (2011). Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2011. ISBN 13: 978-3-941897-87-8.
- eawag (2008). Möglichkeiten zur Optimierung der chemischen Phosphorfällung an hessischen Kläranlagen. Gutachten im Auftrag der Europa Fachhochschule Fresenius und des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG). Online verfügbar unter <http://flussgebiete.hessen.de> (abgerufen am 15.08.2016).
- EÜV (1995). Eigenüberwachungsverordnung (EÜV) vom 20. September 1995 (GVBl. S. 769, BayRS 753-1-12-U), zuletzt durch § 78 Abs. 3 des Gesetzes vom 25. Februar 2010 (GVBl. S. 66) geändert.
- Feng, C., Sugiura, N., Shimada, S. & Maekawa, T. (2003). Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system. *Journal of Hazardous Materials*, 103(1), 65-78.

- Genz, A., Kornmüller, A. & Jekel, M. (2004). Advanced phosphorus removal from membrane filtrates by adsorption on activated aluminium oxide and granulated ferric hydroxide. *Water Research*, 38(16), 3523-3530.
- Groeterud, O. & Smoczynski, L. (1986). Phosphorus removal from water by means of electrolysis. *Water Research*, 20(5), 667-669.
- Hauptmann, H. (2011). Schon gehört? Das EPH-Verfahren, *KA-Betriebs-Info* 2011, 41(2), 1841-1847.
- Holt, P. K., Barton, G. W. & Mitchell, C. A. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 59(3), 355-367.
- Huber, M., Welker, A., Hilbig, H., Wulff, M. & Helmreich, B. (2017). Vergleich zweier Filtermaterialien zur Entfernung von Phosphat und Schwermetallen aus Verkehrsflächenabflüssen. *gwf Wasser/Abwasser*, 158(3), 99-112.
- İrdemez, Ş., Demircioğlu, N., Yıldız, Y. Ş. & Bingül, Z. (2006a). The effects of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron plate electrodes. *Separation and Purification Technology*, 52(2), 218-223.
- İrdemez, Ş., Yıldız, Y. Ş. & Tosunoğlu, V. (2006b). Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes. *Separation and Purification Technology*, 52(2), 394-401.
- Joko, I. (1985). Phosphorus removal from wastewater by the crystallization method. *Water Science and Technology*, 17(2-3), 121-132.
- KVR-Leitlinien (2012). Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen, 8. überarbeitete Auflage. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, Juli 2012. ISBN 13: 978-3-941897-55-7
- Lesjean, B., Gnirss, R. & Adam, C. (2002). Process configurations adapted to membrane bioreactors for enhanced biological phosphorous and nitrogen removal. *Desalination*, 149(1), 217-224.
- LfU Merkblatt 4.4/22 (2013): Anforderungen an die Einleitungen von häuslichem und kommunalem Abwasser sowie an Einleitungen aus Kanalisationen. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/wasser/merkblattsammlung/teil4_oberirdische_gewaesser/doc/nr_4422.pdf (abgerufen am 02.05.2017).
- Liberti, L. (1982). Ion exchange advanced treatment to remove nutrients from sewage. *Studies in Environmental Science*, 19, 225-238.
- Liberti, L., Boari, G. & Passino, R. (1979). Phosphates and ammonia recovery from secondary effluents by selective ion exchange with production of a slow-release fertilizer. *Water Research*, 13(1), 65-73.
- Morse, G. K., Brett, S. W., Guy, J. A. & Lester, J. N. (1998). Review: Phosphorus removal and recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 212(1), 69-81.

- OGewV (2016). Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung) vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373).
- Piekema, P. & Giesen, A. (2001). Phosphate recovery by the crystallisation process: Experience and developments. *Environmental Technology*, 21, 1067-1084.
- Pinnekamp, J. & Friedrich, H. (2003). Membrantechnik für die Abwasserreinigung. Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen, Band 1.
- Pinnekamp, J. (2007). Studie „Stand der Phosphorelimination bei der Abwasserreinigung in NRW sowie Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und aus Prozesswässern der Schlammbehandlung“. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter [https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/forschungsvorhaben/details/?tx_mmkresearchprojects_pi1\[uid\]=217](https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/forschungsvorhaben/details/?tx_mmkresearchprojects_pi1[uid]=217) (abgerufen am 30.09.2016).
- Rodler, B. (2014). Wirkungsvergleich elektrochemischer versus chemischer und biochemischer Phosphoreliminierung in Abwasserreinigungsanlagen. Bachelorarbeit an der Fachhochschule Österreich.
- Rustige, H. (2012) Entphosphorung von Abwässern im Festbett auf Basis von Elektroofen- und Konverterschlacke – Ein Pilotprojekt –. Schlacken aus der Metallurgie, Band 2, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiens. Online verfügbar unter http://www.vivis.de/phocadownload/2012_sam/2012_sam_139_150_rustige.pdf (abgerufen am 06.10.2016).
- Sabelfeld, M. & Geißen, S.-U. (2011). Verfahren zur Eliminierung und Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser. *Chemie Ingenieur Technik*, 83(6), 782-795.
- Statistisches Bundesamt Wiesbaden (2015). Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung – Öffentliche Abwasserbehandlung und -entsorgung 2013, Fachserie 19, Reihe 2.1.2.
- Steinle, E. & Stubenrauch, R. (2017). Bio-P in Kombination mit chemischer Fällung am Beispiel der ZKA Jena. 45. Abwassertechnisches Seminar: Weitestgehende Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen – Möglichkeiten und Grenzen, München, 28. Juni 2017. Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität München, Band 215, ISSN 0942-914X.
- Theilen, U. (2015). Arbeitshilfe zur Verminderung der Phosphoremissionen aus kommunalen Kläranlagen. Überarbeitung des Kap. 5 der Arbeitshilfe vom 18.02.2011 „Exemplarische Darstellung und Bewertung von Maßnahmen zur P-Elimination“, April 2015. Online verfügbar unter <http://flussgebiete.hessen.de/information/hintergrundinformationen-2015-2021.html> (abgerufen am 02.05.2017).

- Tran, N., Drogui, P., Blais, J. F. & Mercier, G. (2012). Phosphorus removal from spiked municipal wastewater using either electrochemical coagulation or chemical coagulation as tertiary treatment. *Separation and Purification Technology*, 95, 16-25.
- Tränckner, J., Koegst, T., Cramer, M., Gießler, M., Richter, B. & Mütter, F. (2016). Phosphor-Elimination in Kläranlagen bis 10.000 Einwohnerwerte in Mecklenburg-Vorpommern. Abschlussbericht. Auftraggeber: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, April 2016.
- Vohla, C., Kõiv, M., Bavor, H. J., Chazarenc, F. & Mander, Ü. (2011). Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands – A review. *Ecological Engineering*, 37(1), 70-89.
- Voigt, A., Kleffmann, M. & Durth, A. (2013). Verbesserung der Phosphorelimination auf Kläranlagen vor dem Hintergrund steigender Anforderungen. 14. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium am 09. und 10.09.2013, Tagungsband "Aachener Schriften zur Stadtentwässerung", Band 17, 28/1-28/12.
- Wei, X., Viadero, R. C. & Bhojappa, S. (2008). Phosphorus removal by acid mine drainage sludge from secondary effluents of municipal wastewater treatment plants. *Water Research*, 42(13), 3275-3284.
- Westholm, L. J. (2006). Substrates for phosphorus removal—Potential benefits for on-site wastewater treatment?. *Water Research*, 40(1), 23-36.
- WHG (2009). Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 04. August 2016 (BGBl. I S. 1972) geändert.
- WRRL (2000). Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (ABl. L 327 vom 22.12.2000, 1-73).

Anhang

A.1 Hinweise zur statistischen Auswertung

Für die statistische Auswertung und das Erstellen zahlreicher Bilder in Kapitel 4.1 wurde das Programmpaket SPSS 22 von IBM verwendet. Als Darstellung wurden Histogramme sowie Box-Whisker-Plots gewählt, bei denen das obere bzw. untere Ende der Box dem oberen bzw. unteren Quartil entspricht und der Strich in der Box dem Median. Die Länge der Whisker gibt das 1,5-Fache des Interquartilsabstands (IQR) wieder. Ausreißer ($> 1,5$ -Fache des IQR) wurden mit kleinen Kreisen und Extremwerte ($> 3,0$ -Fache des IQR) mit Sternen gekennzeichnet.

A.2 Fragebogen

Der sieben Seiten umfassende Fragebogen ist auf den folgenden Seiten im Original wiedergegeben. Dieser wurde zur detaillierten Bilanzierung von zehn Kläranlagen verwendet. Die Auswertung der Fragebögen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind in Kapitel 4.2 dargestellt.



Forschungsprojekt weitestgehende Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen

der TU München und Dr.-Ing. Steinle

Sehr geehrte Damen und Herren,

wir freuen uns, dass Sie sich bereit erklärt haben an einer Umfrage im Rahmen des Forschungsvorhabens „weitestgehende Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen“ teilzunehmen. Das Vorhaben wird vom Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität München im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) bearbeitet. Zielsetzung des Projekts ist die Durchführung einer Bestandsaufnahme zu den Möglichkeiten einer weitestgehenden Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen und eine Zusammenstellung der Handlungsmöglichkeiten. Um eine gute Datengrundlage aufzubauen würden wir Sie daher bitten den beigefügten Fragebogen (ab S. 3 in elektronischer oder in Papierform) auszufüllen.

Dieses Schreiben beinhaltet

- A) eine Kurzbeschreibung des Projekts
- B) einen Fragebogen zum Betrieb der KA

Die Teilnahme am Forschungsprojekt „weitestgehende Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen“ ist für Sie als Anlagenbetreiber vollständig kostenfrei und mit keinen weiteren Verpflichtungen verbunden.

Bei Rückfragen können Sie sich an Meriam Muntau (TUM) oder Dr.-Ing. Eberhard Steinle (Dr.-Ing. Steinle – Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH, Weyarn) bzw. einen weiteren unten genannten Ansprechpartner wenden. Die Rücksendung des Fragebogens richten Sie bitte per Mail an meriam.muntau@tum.de oder postalisch an:

*Technische Universität München,
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
z.Hd. Meriam Muntau
Am Coulombwall 3, 85748 Garching*

Nach Auswertung der Fragebögen setzen wir uns schnellstmöglich mit Ihnen in Verbindung. Wir würden uns sehr freuen, mit Ihnen als Partner im Projekt zur „weitestgehenden Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen“ rechnen zu dürfen!

Es verbleibt mit freundlichen Grüßen,

Meriam Muntau



Ansprechpartner:

Meriam Muntau, M.Sc.

Projektbearbeiterin (TUM) meriam.muntau@tum.de 089 / 28913716

Prof. Dr. Brigitte Helmreich

Projektleiterin (TUM) b.helmreich@tum.de 089 / 28913719

Dr.-Ing. Eberhard Steinle

Projektpartner (Dr.-Ing. Steinle) esteinle@dr-steinle.de 08020/ 905410

Dr.-Ing. Kostas Athanasiadis

Projektpartner (Dr.-Ing. Steinle) athanasiadis@dr-steinle.de 08020/ 905410

A) Kurzbeschreibung des Projekts:

Im Zuge der neuen Oberflächengewässerverordnung wurde ein neuer Orientierungswert für Gesamtphosphor eingeführt. Zu hohe Konzentrationen an Phosphor in Oberflächengewässern können eine Eutrophierung bedingen und den aquatischen Lebensraum schädigen. Daher hat die Phosphorelimination in kommunalen Kläranlagen, deren Abläufe als punktuelle Eintragsquelle gelten, seit Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Ziel eines vom Bayerischen Landesamt für Umwelt beauftragten Forschungsvorhabens ist die Durchführung einer Bestandsaufnahme bereits bestehender technischer Maßnahmen und Umsetzungen zur weitestgehenden Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen und eine Zusammenstellung und Analyse der Handlungsmöglichkeiten. Dies beinhaltet sowohl chemische wie auch biologische Verfahren und Verfahrenskombinationen inklusive mechanisch-physikalischer Abtrennverfahren ausgefallter Produkte.

Das Forschungsvorhaben läuft im Zeitraum Juli 2016 bis Juli 2017 und wird in Zusammenarbeit mit der Fa. Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH, Weyarn, bearbeitet.

Projektleiterin: Prof. Dr. Brigitte Helmreich

Sachbearbeiterin: Meriam Muntau, M.Sc.

Finanzierung: Bayerisches Landesamt für Umwelt

Weiterführende Informationen:

<http://www.sww.bgu.tum.de/forschung/weitergehende-wasserbehandlung-und-wasser-recycling/phosphorelimination/>



B) Fragebogen

Anleitung:

Zutreffendes bitte ankreuzen

| | Feld für Texteingabe

1) Allgemeines

Kläranlage/Gemeinde	_____	Ansprechpartner	_____
Wasserwirtschaftsamt	_____	Telefonnummer	_____
PLZ, Ort	_____	E-Mail-Adresse	_____
Straße, Hausnummer			
Liegen die Betriebstagebücher in digitaler Form vor (z.B. in Excel)?			
		<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein

2) Kurzcharakteristik

Baujahr	_____	Ausbaugröße	_____	EW
Jahresabwasser- menge	m ³ /a	Angeschlossene Einwohner	_____	EW
Jahresschmutz- wassermenge	m ³ /a	Mittlere Zulaufbelastung	_____	EW
Fremdwasser- anteil	%	Mittl. Zulauf TW	_____	m ³ /d
		Zulauf max.	_____	m ³ /h
Kanalisation	<input type="checkbox"/> Mischsystem	%	<input type="checkbox"/> Trennsystem	%
Abwasser- einleiter	<input type="checkbox"/> nur kommunal	<input type="checkbox"/> mit Brauerei	<input type="checkbox"/> mit Molkerei	
	<input type="checkbox"/> fetthaltige Abwässer	<input type="checkbox"/> sonstige org. hochbelastete oder industrielle Abwässer:		

	Anteil: _____	%		



3) Anlagentechnik

Um die Datenerhebung für Sie zu erleichtern und den Fragebogen so kurz wie möglich zu halten, bitten wir Sie, falls vorhanden, ein Verfahrensschema der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung der Kläranlage beizufügen.

Verfahrensschema liegt bei nicht vorhanden

Auslegung auf _____

Verfahren/Anlagenteile (Anzahl)

<input type="checkbox"/>	Rechen	Vorklärbecken	<input type="checkbox"/>	m ³ /Becken	
<input type="checkbox"/>	Sieb	Anaerobes Bio-P Becken	<input type="checkbox"/>	m ³ /Becken	
<input type="checkbox"/>	Sandfang	Separate Denitrifikationsbecken	<input type="checkbox"/>	m ³ /Becken	
<input type="checkbox"/>	Fettfang	Belebungsbecken	<input type="checkbox"/>	m ³ /Becken	
<input type="checkbox"/>	Tropfkörper	Nachklärbecken	<input type="checkbox"/>	m ³ /Becken	<input type="checkbox"/> m ² /Becken
<input type="checkbox"/>	Rotationstauchkörper	Zwischenklärbecken	<input type="checkbox"/>	m ³ /Becken	<input type="checkbox"/> m ² /Becken
<input type="checkbox"/>	SBR	Teich, unbelüftet	<input type="checkbox"/>	m ³	
		Teich, belüftet	<input type="checkbox"/>	m ³	

Weitere Verfahren _____

Nachgeschaltete Verfahren

Filter Tuchfilter Mikrosieb Feinkornfilter
 Einschichtraumfilter Zweischichtraumfilter Membranfilter

Sonstige _____

Hersteller _____

Filtermaterial _____

Desinfektion Art _____

Sonstige Verfahren _____

Betriebsweise

Keine Denitrifikation Filter
 Vorgeschaltete Denitrifikation kontinuierlich Membranmodul integriert
 Kaskadendenitrifikation diskontinuierlich Membranmodul nachgeschaltet



<input type="checkbox"/> Simultane Denitrifikation	<input type="checkbox"/> Hauptstrom
<input type="checkbox"/> Alternierende Denitrifikation	<input type="checkbox"/> Nebenstrom
<input type="checkbox"/> Intermittierende Denitrifikation	<input type="checkbox"/> aufwärtsdurchströmt
<input type="checkbox"/> Nachgeschaltete Denitrifikation	<input type="checkbox"/> abwärtsdurchströmt
Belüftungsart	<input type="text"/>
O ₂ -Gehalt in Belebung	<input type="text"/> g/l
ggf. Nitri : Deni	<input type="text"/> : <input type="text"/> %
Filtergeschwindigkeit	<input type="text"/> m/h
Oberflächenbeschickung Nachklärbecken	<input type="text"/> m/h

4) Phosphorelimination

Überwachungswert	mg/L	Gesetzliche Grundlage
Eliminationsverfahren	<input type="checkbox"/> Vorfällung	<input type="checkbox"/> Bio-P %
	<input type="checkbox"/> Simultanfällung	<input type="checkbox"/> Flockungsfiltration
	<input type="checkbox"/> Nachfällung	<input type="checkbox"/> Zwei-Punkt-Fällung
	Sonstige <input type="text"/>	
Dosierstelle/n	<input type="text"/>	
Fällmittelart	<input type="text"/>	
Fällmittelmenge	<input type="text"/> l/d bzw. kg/d	
kg Wirksubstanz / kg Fällmittel	<input type="text"/>	
β-Wert (molares Verhältnis)	β = Mol Metall ³⁺ dosiert / Mol PO ₄ ³⁻ zu fällen	
ggf. β-Wert zweite Dosierstelle bei Zwei-Punkt-Fällung	<input type="text"/>	
Flockungshilfsmittel	<input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ja	Welches ? <input type="text"/>
Betriebliche Probleme in Verbindung mit der Phosphorelimination		
MAP Ausfällung	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Ablagerungen in Rohrleitungen <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Blähschlamm	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Hoher Feststoffabtrieb <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Sonstige Probleme	<input type="text"/>	



5) Schlammmanagement/-behandlung

Schlammstabilisierung aerob anaerob

Primärschlamm _____ m³/d Trockensubstanz _____ kg TS/d

Überschussschlamm _____ m³/d Trockensubstanz _____ kg TS/d

Rücklaufschlamm _____ m³/d Trockensubstanz _____ kg TS/d

Schlammalter _____ d Schlammvolumenindex _____ ml/g

Art der Schlamm entwässerung _____

Phosphatgehalt bezogen auf Schlamm trockenmasse _____ %

Interne Phosphor-Rückbelastung aus Schlammbehandlung bezogen auf den Zulauf _____ % (P-Fracht/d im Jahresmittel)

Abwasserrückführung: MÜSE _____ m³/d

Abwasserrückführung: Zentrat _____ m³/d

6) Chemische Parameter

Parameter	Zulauf [mg/l] (Jahresmittelwert)	Ablauf [mg/l] (Jahresmittelwert)	Überwachungswert [mg/l]	Erklärter Wert [mg/l]
Abfiltrierbare Stoffe				
CSB				
BSB ₅				
NH ₄ -N				
NO ₃ -N				
N _{ges}				
P _{ges}				
Ortho-P				

Probenahmestellen

Art der Probe Stichprobe 24h-Mischprobe 2h-Mischprobe

7) Sonstige Anmerkungen



A.3 Annahmen zur Berechnung des Fällmittelbedarfs

Berechnungsgrundlagen:

Allgemeines Arbeitsblatt für P-Fällung:

Verfahrenstechnik für Fällmitteldosierung:

Spez. Schmutzwasseranfall	qs	125 l/(E·d)	
Fremdwasseranteil	Q _{af} /Q _{SM}	25%	
Spez. Abwasseranfall	q _{ab}	167 l/(E·d)	mit Fremdwasser
Spezifische Fracht CSB	CSB _E	85 g/(E·d)	Jahresmittel
Spezifische Fracht TS	TS _E	49,6 g/(E·d)	TS/CSB= 0,583
Spezifische Fracht P	P _E	1,45 g/(E·d)	P/CSB = 0,017
Inkorporation P in Schlamm	i _{p,US}	0,010 kg/kgTS	in US ohne verm. Bio P
Abbau P in VKB	i _{p,PS}	0,009 kg/kgTS	in PS
Abbau CSB in VKB	η _{lv} VK	15%	mit VKB
Abbau TS in VKB	η _{ts,vk}	30%	mit VKB
	η _{ts,vk}	50%	mit VKB
Spez. Primärschlammfall	PS _{sp} /CSB	0,29 kg/kg	mit VKB
Spez. US-Produktion	US _{sp} /CSB	0,35 kg/kg	mit VKB
Spez. US-Produktion	US _{sp} /CSB	0,50 kg/kg	o. VKB
Fällmittelüberschuss	β	1,5 mol/mol	
Ablaufkonzentration	C _{p,AN}	1,0 mg/l	
Fällmittelbevorratung min	t _{FM,Tank}	60,0 d	

Kosten :

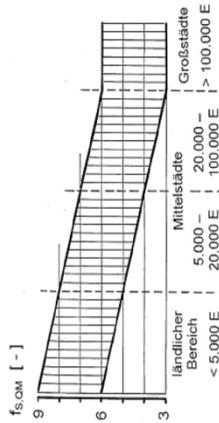
Umrechnen von Investitionen in jährliche Kapitalkosten:

$$KFAKR (I,ND) = (I+(1+i)^{ND})/((1+i)^{ND}-1)$$

	MT/ET	BT
Zinssatz	3%	3%
Nutzungsdauer	15 a	30 a
Annuität	KFAKR = 0,08377	0,05102

Ansatz für Beispielrechnungen Sandfiltration:

1000 bis 20000 EW	20001 bis 50000 EW	50001 bis 100000 EW
$f_{s,OM} = (Q_M \cdot C_M) / Q_{SM}$	$f_{s,OM} = (Q_M \cdot C_M) / Q_{SM}$	$f_{s,OM} = (Q_M \cdot C_M) / Q_{SM}$
$f_{s,OM} = 6$	$f_{s,OM} = 5$	$f_{s,OM} = 4$
$Q_M = 781,25$	$Q_M = 656,25$	$Q_M = 531,25$
$Q_M / Q_{SM} = 4,6875$	$Q_M / Q_{SM} = 3,9375$	$Q_M / Q_{SM} = 3,1875$



Wartung und Instandhaltung :Ansatz für Fällungseinrichtungen **1,00%** der Investitionen

Personalkosten (Betreuung)	Zeit in/Woche	sp.Kost pro h	Kosten p.a.
Personalansatz GK2 :	1,00	35,00	1.820,00 €
Personalansatz GK3 :	0,63	35,00	1.137,50 €
Personalansatz GK4 :	0,25	35,00	455,00 €

Zusätzliche Online-Messung (Theilen 2015):

Online-Messung 1 System	22.000 €	1.843 € p.a
Online-Messung 2 Systeme	44.000 €	3.686 € p.a

Energiebedarf in Abhängigkeit der Dosiermenge:

Annahmen Leistungsaufnahme Dosierpumpen:

Q_{PM}	l/h :	1,0
ΔH	l/s :	0,00028
η_{PM}	m :	3,0
P	% :	60%
E_M	W :	0,0136
	kWh/h :	0,0491
	kWh/l :	0,049

Stromkosten angenommen **0,24 € /kWh****Schlamm Entsorgung:**

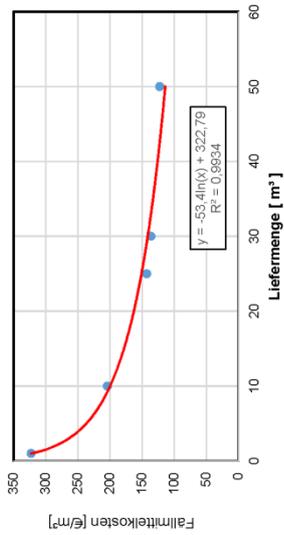
Ansatz Entsorgungskosten entwässert	312,50 € /MgTS
Feststoffgehalt	75,00 € /Mg
Ansatz Entsorgungskosten Naßschlammabfuhr	240 kg/m³
Feststoffgehalt	375,00 € /MgTS
	15,00 € /m³
	40 kg/m³

Mittlerer Preis für Fällschlamm **340,00 € /MgTS**

Berechnungsgrundlagen:

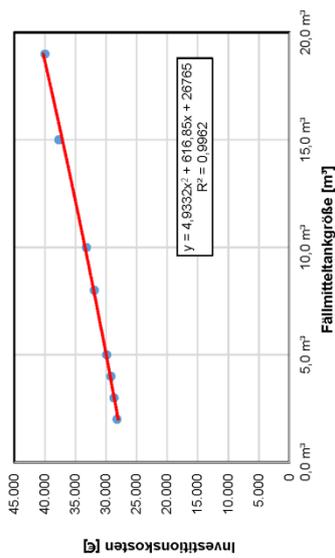
Verwendete Kostenkurven:

Fällmittelkosten in Abhängigkeit von der Liefermenge (Theilen 2015):



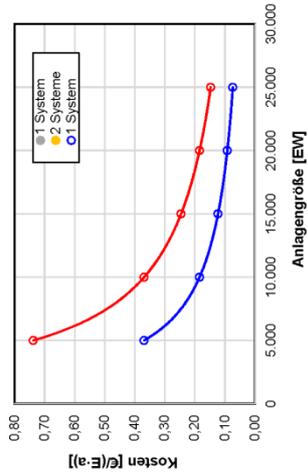
Parameter	
a (ln x)	53,4
b	322,79

Tankkosten mit Dosterschrank in Abhängigkeit der Tankgröße (Alltech 2017):



Parameter	
a (x ²)	4,9332
b (x)	616,85
c	26765

Kosten Online-P-Messung (Theilen 2015):



	für 5000 E	für 10000 E	für 15000 E	für 20000 E	für 25000 E
1 System	0,37 €/Ea	0,18 €/Ea	0,12 €/Ea	0,09 €/Ea	0,07 €/Ea
2 Systeme	0,74 €/Ea	0,37 €/Ea	0,25 €/Ea	0,18 €/Ea	0,15 €/Ea

Mit VKB:

EW	P	PS	US	P _{FS}	P _{US}	P _{ab}	η _P	P _{Fall}	Me ³⁺	Fe ³⁺	Al ³⁺	Ü _{SP,Fe}		Ü _{SP,Al}	
												kg/d	Mg/a	kg/d	Mg/a
GK2	1001	1,45	25	0,22	0,21	0,17	88,5%	0,9	0,041	2,3	1,1	5,8	2,1	4,5	1,6
	2000	2,89	50	0,43	0,42	0,33	88,5%	1,7	0,083	4,6	2,2	11,6	4,2	8,9	3,3
	3000	4,34	74	0,65	0,62	0,50	88,5%	2,6	0,124	6,9	3,3	17,3	6,3	13,4	4,9
	4000	5,78	99	0,87	0,83	0,67	88,5%	3,4	0,165	9,2	4,5	23,1	8,4	17,8	6,5
	5000	7,23	124	1,08	1,04	0,83	88,5%	4,3	0,206	11,6	5,6	28,9	10,5	22,3	8,1
GK3	5001	7,23	124	1,08	1,04	0,83	88,5%	4,3	0,206	11,6	5,6	28,9	10,6	22,3	8,1
	6000	8,67	149	1,30	1,25	1,00	88,5%	5,1	0,248	13,9	6,7	34,7	12,7	26,8	9,8
	7000	10,12	174	1,52	1,46	1,17	88,5%	6,0	0,289	16,2	7,8	40,5	14,8	31,2	11,4
	8000	11,56	198	1,73	1,67	1,33	88,5%	6,8	0,330	18,5	8,9	46,2	16,9	35,7	13,0
	9000	13,01	223	1,95	1,87	1,50	88,5%	7,7	0,372	20,8	10,0	52,0	19,0	40,1	14,6
GK4	10000	14,45	248	2,17	2,08	1,67	88,5%	8,5	0,413	23,1	11,1	57,8	21,1	44,6	16,3
	10001	14,45	248	2,17	2,08	1,67	88,5%	8,5	0,413	23,1	11,1	57,8	21,1	44,6	16,3
	11000	15,90	273	2,38	2,29	1,83	88,5%	9,4	0,454	25,4	12,3	63,6	23,2	49,1	17,9
	12000	17,34	298	2,60	2,50	2,00	88,5%	10,2	0,495	27,7	13,4	69,4	25,3	53,5	19,5
	13000	18,79	322	2,71	2,82	2,17	88,5%	11,1	0,537	30,1	14,5	75,1	27,4	58,0	21,2
GK4	14000	20,23	347	3,03	2,92	2,33	88,5%	11,9	0,578	32,4	15,6	80,9	29,5	62,4	22,8
	15000	21,68	372	3,25	3,12	2,50	88,5%	12,8	0,619	34,7	16,7	86,7	31,6	66,9	24,4
	16000	23,12	397	3,47	3,33	2,67	88,5%	13,7	0,661	37,0	17,8	92,5	33,8	71,3	26,0
	17000	24,57	421	3,68	3,54	2,83	88,5%	14,5	0,702	39,3	19,0	98,3	35,9	75,8	27,7
	18000	26,01	446	3,75	3,90	3,00	88,5%	15,4	0,743	41,6	20,1	104,1	38,0	80,3	29,3
GK4	19000	27,46	471	3,96	4,12	3,17	88,5%	16,2	0,785	43,9	21,2	109,8	40,1	84,7	30,9
	20000	28,90	496	4,17	4,34	3,33	88,5%	17,1	0,826	46,2	22,3	115,6	42,2	89,2	32,6
	21000	30,35	521	4,37	4,55	3,50	88,5%	17,9	0,867	48,6	23,4	121,4	44,3	93,6	34,2
	22000	31,79	545	4,58	4,77	3,67	88,5%	18,8	0,908	50,9	24,5	127,2	46,4	98,1	35,8
	23000	33,24	570	4,79	4,99	3,83	88,5%	19,6	0,950	53,2	25,6	133,0	48,5	102,6	37,4
GK4	24000	34,68	595	5,00	5,00	4,00	88,5%	20,5	0,991	55,5	26,8	138,7	50,6	107,0	39,1
	25000	36,13	620	5,21	5,21	4,17	88,5%	21,3	1,032	57,8	27,9	144,5	52,7	111,5	40,7

Mit VKB:

EW	Anteil Fällschlamm		Fällmittel		Tank		Füllung		FMKkosten		Kosten Tank		JK Tank+FM (Optim)	
	Fe	Al	l/d	m³/a	min. m³	gew. m³	1/a	€/Füll.	p.a.	Invest.	p.a.	p.a.	pro E.u. a	
GK2	1001	11,2%	8,9%	12,4	4,5	0,74	5,0	0,9	236,85	213,70 €	29,972,58 €	2.510,70 €	2.724,40 €	2,72 €
	2000	11,2%	8,9%	24,7	9,0	1,48	8,0	1,1	211,75	238,58 €	32,015,52 €	2.681,83 €	2.920,41 €	1,46 €
	3000	11,2%	8,9%	37,0	13,5	2,22	8,0	1,7	211,75	357,87 €	32,015,52 €	2.681,83 €	3.039,70 €	1,01 €
	4000	11,2%	8,9%	49,4	18,0	2,96	8,0	2,3	199,83	477,16 €	32,015,52 €	2.681,83 €	3.158,99 €	0,79 €
	5000	11,2%	8,9%	61,7	22,5	3,70	10,0	2,3	199,83	450,31 €	33,426,82 €	2.800,05 €	3.250,36 €	0,65 €
GK3	5001	11,2%	8,9%	61,8	22,5	3,71	10,0	2,3	199,83	450,40 €	33,426,82 €	2.800,05 €	3.250,45 €	0,65 €
	6000	11,2%	8,9%	74,1	27,0	4,45	10,0	2,7	199,83	540,37 €	33,426,82 €	2.800,05 €	3.340,42 €	0,56 €
	7000	11,2%	8,9%	86,4	31,5	5,19	10,0	3,2	199,83	630,43 €	33,426,82 €	2.800,05 €	3.430,48 €	0,49 €
	8000	11,2%	8,9%	98,8	36,1	5,93	10,0	3,6	199,83	720,49 €	33,426,82 €	2.800,05 €	3.520,54 €	0,44 €
	9000	11,2%	8,9%	111,1	40,6	6,67	10,0	4,1	199,83	810,55 €	33,426,82 €	2.800,05 €	3.610,61 €	0,40 €
GK4	10000	11,2%	8,9%	123,5	45,1	7,41	10,0	4,5	199,83	900,62 €	33,426,82 €	2.800,05 €	3.700,67 €	0,37 €
	10001	11,2%	8,9%	123,5	45,1	7,41	10,0	4,5	199,83	900,71 €	33,426,82 €	2.800,05 €	3.700,76 €	0,37 €
	11000	11,2%	8,9%	135,8	49,6	8,15	10,0	5,0	199,83	990,68 €	33,426,82 €	2.800,05 €	3.790,73 €	0,34 €
	12000	11,2%	8,9%	148,2	54,1	8,89	15,0	3,6	178,18	642,43 €	37,127,72 €	3.110,06 €	3.752,49 €	0,31 €
	13000	11,2%	8,9%	160,5	58,6	9,63	15,0	3,9	178,18	695,96 €	37,127,72 €	3.110,06 €	3.806,03 €	0,29 €
	14000	11,2%	8,9%	172,9	63,1	10,37	15,0	4,2	178,18	749,50 €	37,127,72 €	3.110,06 €	3.859,56 €	0,28 €
	15000	11,2%	8,9%	185,2	67,6	11,11	15,0	4,5	178,18	803,03 €	37,127,72 €	3.110,06 €	3.913,10 €	0,26 €
	16000	11,2%	8,9%	197,6	72,1	11,85	15,0	4,8	178,18	856,57 €	37,127,72 €	3.110,06 €	3.966,63 €	0,25 €
	17000	11,2%	8,9%	209,9	76,6	12,59	15,0	5,1	178,18	910,11 €	37,127,72 €	3.110,06 €	4.020,17 €	0,24 €
	18000	11,2%	8,9%	222,3	81,1	13,34	15,0	5,4	178,18	963,64 €	37,127,72 €	3.110,06 €	4.073,70 €	0,23 €
	19000	11,2%	8,9%	234,6	85,6	14,08	19,0	4,5	165,56	746,14 €	40,266,04 €	3.372,95 €	4.119,09 €	0,22 €
	20000	11,2%	8,9%	247,0	90,1	14,82	19,0	4,7	165,56	785,41 €	40,266,04 €	3.372,95 €	4.158,36 €	0,21 €
	21000	11,2%	8,9%	259,3	94,6	15,56	19,0	5,0	165,56	824,68 €	40,266,04 €	3.372,95 €	4.197,63 €	0,20 €
	22000	11,2%	8,9%	271,6	99,2	16,30	19,0	5,2	165,56	863,96 €	40,266,04 €	3.372,95 €	4.236,90 €	0,19 €
	23000	11,2%	8,9%	284,0	103,7	17,04	19,0	5,5	165,56	903,23 €	40,266,04 €	3.372,95 €	4.276,17 €	0,19 €
24000	11,2%	8,9%	296,3	108,2	17,78	19,0	5,7	165,56	942,50 €	40,266,04 €	3.372,95 €	4.315,45 €	0,18 €	
25000	11,2%	8,9%	308,7	112,7	18,52	19,0	5,9	165,56	981,77 €	40,266,04 €	3.372,95 €	4.354,72 €	0,17 €	

Mit VKB:

EW	Kosten Bautechnik		Kosten EMSR o. online PO4-P		JK Investitionen		Wartung/Instandhaltung		Personal	
	Invest.	p.a.	Invest.	p.a.	p.a.	pro E u. a	p.a.	pro E u. a	p.a.	pro E u. a
GK2	1001	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.611,08 €	3,61 €	489,73 €	0,49 €	1.820,00 €	1,82 €
	2000	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.782,19 €	1,89 €	510,16 €	0,26 €	1.820,00 €	0,91 €
	3000	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.782,19 €	1,26 €	510,16 €	0,17 €	1.820,00 €	0,61 €
	4000	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.782,19 €	0,95 €	510,16 €	0,13 €	1.820,00 €	0,46 €
	5000	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.900,41 €	0,78 €	524,27 €	0,10 €	1.820,00 €	0,36 €
GK3	5001	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.900,41 €	0,78 €	524,27 €	0,10 €	1.820,00 €	0,36 €
	6000	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,72 €	594,27 €	0,10 €	1.137,50 €	0,19 €
	7000	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,62 €	594,27 €	0,08 €	1.137,50 €	0,16 €
	8000	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,54 €	594,27 €	0,07 €	1.137,50 €	0,14 €
	9000	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,48 €	594,27 €	0,07 €	1.137,50 €	0,13 €
GK4	10000	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,43 €	594,27 €	0,06 €	1.137,50 €	0,11 €
	10001	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,43 €	594,27 €	0,06 €	1.137,50 €	0,11 €
	11000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	4.745,66 €	0,43 €	664,27 €	0,06 €	455,00 €	0,04 €
	12000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	5.055,68 €	0,42 €	701,28 €	0,06 €	455,00 €	0,04 €
	13000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	5.055,68 €	0,39 €	701,28 €	0,05 €	455,00 €	0,04 €
	14000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	5.055,68 €	0,36 €	701,28 €	0,05 €	455,00 €	0,03 €
	15000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	5.055,68 €	0,34 €	701,28 €	0,05 €	455,00 €	0,03 €
	16000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	5.055,68 €	0,32 €	701,28 €	0,04 €	455,00 €	0,03 €
	17000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.376,27 €	0,32 €	751,28 €	0,04 €	455,00 €	0,03 €
	18000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.376,27 €	0,30 €	751,28 €	0,04 €	455,00 €	0,03 €
	19000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,30 €	782,66 €	0,04 €	455,00 €	0,02 €
	20000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,28 €	782,66 €	0,04 €	455,00 €	0,02 €
	21000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,27 €	782,66 €	0,04 €	455,00 €	0,02 €
	22000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,26 €	782,66 €	0,04 €	455,00 €	0,02 €
	23000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,25 €	782,66 €	0,03 €	455,00 €	0,02 €
24000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,23 €	782,66 €	0,03 €	455,00 €	0,02 €	
25000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,23 €	782,66 €	0,03 €	455,00 €	0,02 €	

Mit VKB:

E	E	Stromkosten		Schlamm Entsorgung Fe ³⁺		Invest.	FM	Wartung	Pers.	Energie	Schlamm	Summe	Summe
		kWh/a	p.a.	MgT/S/a	p.a.								
GK2	10001	221,28 €	53,11 €	0,05 €	718,10 €	0,72 €	0,21 €	0,49 €	1,82 €	0,05 €	0,72 €	6,90 €	22,15 €
	2000	442,12 €	106,11 €	0,05 €	1.434,76 €	0,72 €	0,42 €	0,26 €	0,91 €	0,05 €	0,72 €	3,95 €	12,67 €
	3000	663,19 €	159,16 €	0,05 €	2.152,13 €	0,72 €	0,61 €	0,17 €	0,61 €	0,05 €	0,72 €	2,93 €	9,40 €
	4000	884,25 €	212,22 €	0,05 €	2.869,51 €	0,72 €	0,95 €	0,13 €	0,46 €	0,05 €	0,72 €	2,42 €	7,76 €
	5000	1.105,31 €	265,27 €	0,05 €	3.586,89 €	0,72 €	0,78 €	0,10 €	0,36 €	0,05 €	0,72 €	2,11 €	6,77 €
GK3	5001	1.105,53 €	265,33 €	0,05 €	3.587,61 €	0,72 €	0,09 €	0,10 €	0,36 €	0,05 €	0,72 €	2,11 €	6,77 €
	6000	1.326,37 €	318,33 €	0,05 €	4.304,27 €	0,72 €	0,09 €	0,10 €	0,19 €	0,05 €	0,72 €	1,87 €	6,00 €
	7000	1.547,43 €	371,38 €	0,05 €	5.021,65 €	0,72 €	0,62 €	0,08 €	0,16 €	0,05 €	0,72 €	1,73 €	5,54 €
	8000	1.768,50 €	424,44 €	0,05 €	5.739,02 €	0,72 €	0,54 €	0,07 €	0,14 €	0,05 €	0,72 €	1,62 €	5,19 €
	9000	1.989,56 €	477,49 €	0,05 €	6.456,40 €	0,72 €	0,48 €	0,07 €	0,13 €	0,05 €	0,72 €	1,53 €	4,92 €
GK4	10000	2.210,62 €	530,55 €	0,05 €	7.173,79 €	0,72 €	0,43 €	0,06 €	0,11 €	0,05 €	0,72 €	1,47 €	4,71 €
	11000	2.431,68 €	583,60 €	0,05 €	7.891,16 €	0,72 €	0,43 €	0,06 €	0,04 €	0,05 €	0,72 €	1,39 €	4,47 €
	12000	2.652,74 €	636,66 €	0,05 €	8.608,54 €	0,72 €	0,42 €	0,06 €	0,04 €	0,05 €	0,72 €	1,34 €	4,31 €
	13000	2.873,80 €	689,71 €	0,05 €	9.325,91 €	0,72 €	0,39 €	0,05 €	0,04 €	0,05 €	0,72 €	1,30 €	4,18 €
	14000	3.094,87 €	742,77 €	0,05 €	10.043,29 €	0,72 €	0,36 €	0,05 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,27 €	4,07 €
	15000	3.315,93 €	795,82 €	0,05 €	10.760,67 €	0,72 €	0,34 €	0,05 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,24 €	3,98 €
	16000	3.536,99 €	848,88 €	0,05 €	11.478,05 €	0,72 €	0,32 €	0,04 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,21 €	3,89 €
	17000	3.758,05 €	901,93 €	0,05 €	12.195,43 €	0,72 €	0,32 €	0,04 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,21 €	3,89 €
	18000	3.979,11 €	954,99 €	0,05 €	12.912,81 €	0,72 €	0,30 €	0,05 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,19 €	3,82 €
	19000	4.200,18 €	1.008,04 €	0,05 €	13.630,19 €	0,72 €	0,30 €	0,04 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,17 €
GK4	20000	4.421,24 €	1.061,10 €	0,05 €	14.347,56 €	0,72 €	0,28 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,15 €	3,70 €
	21000	4.642,30 €	1.114,15 €	0,05 €	15.064,94 €	0,72 €	0,27 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,14 €	3,65 €
	22000	4.863,36 €	1.167,21 €	0,05 €	15.782,32 €	0,72 €	0,26 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,12 €	3,60 €
	23000	5.084,42 €	1.220,26 €	0,05 €	16.499,70 €	0,72 €	0,25 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,11 €	3,56 €
	24000	5.305,48 €	1.273,32 €	0,05 €	17.217,07 €	0,72 €	0,23 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,10 €	3,52 €
25000	5.526,55 €	1.326,37 €	0,05 €	17.934,45 €	0,72 €	0,23 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,08 €	3,48 €	

Ohne VKB:

EW	P	PS	US	P _{PS}	P _{US}	P _{ab}	η _P	P _{Fall}	Me ³⁺	Fe ³⁺	Al ³⁺	Ü _{SP,Fe}		Ü _{SP,Al}	
												kg/d	Mg/a	kg/d	Mg/a
GK2	1001	1,45	0	43	0,00	0,43	88,5%	0,9	0,041	2,3	1,1	5,8	2,1	4,5	1,6
	2000	2,89	0	85	0,00	0,85	88,5%	1,7	0,083	4,6	2,2	11,6	4,2	8,9	3,3
	3000	4,34	0	128	0,00	1,28	88,5%	2,6	0,124	6,9	3,3	17,3	6,3	13,4	4,9
	4000	5,78	0	170	0,00	1,70	88,5%	3,4	0,165	9,2	4,5	23,1	8,4	17,8	6,5
	5000	7,23	0	213	0,00	2,13	88,5%	4,3	0,206	11,6	5,6	28,9	10,5	22,3	8,1
GK3	5001	7,23	0	213	0,00	2,13	88,5%	4,3	0,206	11,6	5,6	28,9	10,6	22,3	8,1
	6000	8,67	0	255	0,00	2,55	88,5%	5,1	0,248	13,9	6,7	34,7	12,7	26,8	9,8
	7000	10,12	0	298	0,00	2,98	88,5%	6,0	0,289	16,2	7,8	40,5	14,8	31,2	11,4
	8000	11,56	0	340	0,00	3,40	88,5%	6,8	0,330	18,5	8,9	46,2	16,9	35,7	13,0
	9000	13,01	0	383	0,00	3,83	88,5%	7,7	0,372	20,8	10,0	52,0	19,0	40,1	14,6
GK4	10000	14,45	0	425	0,00	4,25	88,5%	8,5	0,413	23,1	11,1	57,8	21,1	44,6	16,3
	10001	14,45	0	425	0,00	4,25	88,5%	8,5	0,413	23,1	11,1	57,8	21,1	44,6	16,3
	11000	15,90	0	468	0,00	4,68	88,5%	9,4	0,454	25,4	12,3	63,6	23,2	49,1	17,9
	12000	17,34	0	510	0,00	5,10	88,5%	10,2	0,495	27,7	13,4	69,4	25,3	53,5	19,5
	13000	18,79	0	553	0,00	5,53	88,5%	11,1	0,537	30,1	14,5	75,1	27,4	58,0	21,2
	14000	20,23	0	595	0,00	5,95	88,5%	11,9	0,578	32,4	15,6	80,9	29,5	62,4	22,8
	15000	21,68	0	638	0,00	6,38	88,5%	12,8	0,619	34,7	16,7	86,7	31,6	66,9	24,4
	16000	23,12	0	680	0,00	6,80	88,5%	13,7	0,661	37,0	17,8	92,5	33,8	71,3	26,0
	17000	24,57	0	723	0,00	7,23	88,5%	14,5	0,702	39,3	19,0	98,3	35,9	75,8	27,7
	18000	26,01	0	765	0,00	7,65	88,5%	15,4	0,743	41,6	20,1	104,1	38,0	80,3	29,3
	19000	27,46	0	808	0,00	8,08	88,5%	16,2	0,785	43,9	21,2	109,8	40,1	84,7	30,9
	20000	28,90	0	850	0,00	8,50	88,5%	17,1	0,826	46,2	22,3	115,6	42,2	89,2	32,6
	21000	30,35	0	893	0,00	8,93	88,5%	17,9	0,867	48,6	23,4	121,4	44,3	93,6	34,2
	22000	31,79	0	935	0,00	9,35	88,5%	18,8	0,908	50,9	24,5	127,2	46,4	98,1	35,8
	23000	33,24	0	978	0,00	9,78	88,5%	19,6	0,950	53,2	25,6	133,0	48,5	102,6	37,4
24000	34,68	0	1020	0,00	10,20	88,5%	20,5	0,991	55,5	26,8	138,7	50,6	107,0	39,1	
25000	36,13	0	1063	0,00	10,63	88,5%	21,3	1,032	57,8	27,9	144,5	52,7	111,5	40,7	

Ohne VKB:

EW	Anteil Fällschlamm		Fällmittel		Tank		Füllung		FMKkosten		Kosten Tank		JK Tank+FM (Optim)	
	Fe	Al	l/d	m ² /a	min. m ²	gew. m ²	1/a	€/Füll.	p.a.	Invest.	p.a.	p.a.	pro E	
GK2	1001	12,0%	12,4	4,5	0,74	5,0	0,9	236,85	213,70 €	29.972,58 €	2.510,70 €	2.724,40 €	2,72 €	
	2000	12,0%	24,7	9,0	1,48	8,0	1,1	211,75	238,58 €	32.015,52 €	2.681,83 €	2.920,41 €	1,46 €	
	3000	12,0%	37,0	13,5	2,22	8,0	1,7	211,75	357,87 €	32.015,52 €	2.681,83 €	3.039,70 €	1,01 €	
	4000	12,0%	49,4	18,0	2,96	8,0	2,3	211,75	477,16 €	32.015,52 €	2.681,83 €	3.158,99 €	0,79 €	
	5000	12,0%	61,7	22,5	3,70	8,0	2,8	211,75	596,45 €	32.015,52 €	2.681,83 €	3.278,28 €	0,66 €	
GK3	5001	12,0%	61,8	22,5	3,71	10,0	2,3	199,83	450,40 €	33.426,82 €	2.800,05 €	3.250,45 €	0,65 €	
	6000	12,0%	74,1	27,0	4,45	10,0	2,7	199,83	540,37 €	33.426,82 €	2.800,05 €	3.340,42 €	0,56 €	
	7000	12,0%	86,4	31,5	5,19	10,0	3,2	199,83	630,43 €	33.426,82 €	2.800,05 €	3.430,48 €	0,49 €	
	8000	12,0%	98,8	36,1	5,93	10,0	3,6	199,83	720,49 €	33.426,82 €	2.800,05 €	3.520,54 €	0,44 €	
	9000	12,0%	111,1	40,6	6,67	10,0	4,1	199,83	810,55 €	33.426,82 €	2.800,05 €	3.610,61 €	0,40 €	
GK4	10000	12,0%	123,5	45,1	7,41	10,0	4,5	199,83	900,62 €	33.426,82 €	2.800,05 €	3.700,67 €	0,37 €	
	10001	12,0%	123,5	45,1	7,41	10,0	4,5	199,83	900,71 €	33.426,82 €	2.800,05 €	3.700,76 €	0,37 €	
	11000	12,0%	135,8	49,6	8,15	10,0	5,0	199,83	990,68 €	33.426,82 €	2.800,05 €	3.790,73 €	0,34 €	
	12000	12,0%	148,2	54,1	8,89	15,0	3,6	178,18	642,43 €	37.127,72 €	3.110,06 €	3.752,49 €	0,31 €	
	13000	12,0%	160,5	58,6	9,63	15,0	3,9	178,18	695,96 €	37.127,72 €	3.110,06 €	3.806,03 €	0,29 €	
	14000	12,0%	172,9	63,1	10,37	15,0	4,2	178,18	749,50 €	37.127,72 €	3.110,06 €	3.859,56 €	0,28 €	
	15000	12,0%	185,2	67,6	11,11	15,0	4,5	178,18	803,03 €	37.127,72 €	3.110,06 €	3.913,10 €	0,26 €	
	16000	12,0%	197,6	72,1	11,85	15,0	4,8	178,18	856,57 €	37.127,72 €	3.110,06 €	3.966,63 €	0,25 €	
	17000	12,0%	209,9	76,6	12,59	15,0	5,1	178,18	910,11 €	37.127,72 €	3.110,06 €	4.020,17 €	0,24 €	
	18000	12,0%	222,3	81,1	13,34	15,0	5,4	178,18	963,64 €	37.127,72 €	3.110,06 €	4.073,70 €	0,23 €	
	19000	12,0%	234,6	85,6	14,08	19,0	4,5	165,56	746,14 €	40.266,04 €	3.372,95 €	4.119,09 €	0,22 €	
	20000	12,0%	247,0	90,1	14,82	19,0	4,7	165,56	785,41 €	40.266,04 €	3.372,95 €	4.158,36 €	0,21 €	
	21000	12,0%	259,3	94,6	15,56	19,0	5,0	165,56	824,68 €	40.266,04 €	3.372,95 €	4.197,63 €	0,20 €	
	22000	12,0%	271,6	99,2	16,30	19,0	5,2	165,56	863,96 €	40.266,04 €	3.372,95 €	4.236,90 €	0,19 €	
	23000	12,0%	284,0	103,7	17,04	19,0	5,5	165,56	903,23 €	40.266,04 €	3.372,95 €	4.276,17 €	0,19 €	
24000	12,0%	296,3	108,2	17,78	19,0	5,7	165,56	942,50 €	40.266,04 €	3.372,95 €	4.315,45 €	0,18 €		
25000	12,0%	308,7	112,7	18,52	19,0	5,9	165,56	981,77 €	40.266,04 €	3.372,95 €	4.354,72 €	0,17 €		

Ohne VKB: 51.015,52 € 4.999,32 €

EW	Kosten Bautechnik		Kosten EMSR o. online P04-P		JK Investitionen		Wartung/Instandhaltung		Personal	
	Invest.	p.a.	Invest.	p.a.	p.a.	pro E	p.a.	pro E	p.a.	pro E
GK2	1001	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.611,08 €	3,61 €	489,73 €	0,49 €	1.820,00 €	1,82 €
	2000	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.782,19 €	1,89 €	510,16 €	0,26 €	1.820,00 €	0,91 €
	3000	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.782,19 €	1,26 €	510,16 €	0,17 €	1.820,00 €	0,61 €
	4000	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.782,19 €	0,95 €	510,16 €	0,13 €	1.820,00 €	0,46 €
	5000	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.782,19 €	0,76 €	510,16 €	0,10 €	1.820,00 €	0,36 €
GK3	5001	15.000,00 €	765,29 €	335,07 €	3.900,41 €	0,78 €	524,27 €	0,10 €	1.820,00 €	0,36 €
	6000	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,72 €	594,27 €	0,10 €	1.137,50 €	0,19 €
	7000	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,62 €	594,27 €	0,08 €	1.137,50 €	0,16 €
	8000	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,54 €	594,27 €	0,07 €	1.137,50 €	0,14 €
	9000	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,48 €	594,27 €	0,07 €	1.137,50 €	0,13 €
GK4	10000	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,43 €	594,27 €	0,06 €	1.137,50 €	0,11 €
	10001	20.000,00 €	1.020,39 €	502,60 €	4.323,04 €	0,43 €	594,27 €	0,06 €	1.137,50 €	0,11 €
	11000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	4.745,66 €	0,43 €	664,27 €	0,06 €	455,00 €	0,04 €
	12000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	5.055,68 €	0,42 €	701,28 €	0,06 €	455,00 €	0,04 €
	13000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	5.055,68 €	0,39 €	701,28 €	0,05 €	455,00 €	0,04 €
	14000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	5.055,68 €	0,36 €	701,28 €	0,05 €	455,00 €	0,03 €
	15000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	5.055,68 €	0,34 €	701,28 €	0,05 €	455,00 €	0,03 €
	16000	25.000,00 €	1.275,48 €	670,13 €	5.055,68 €	0,32 €	701,28 €	0,04 €	455,00 €	0,03 €
	17000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.376,27 €	0,32 €	751,28 €	0,04 €	455,00 €	0,03 €
	18000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.376,27 €	0,30 €	751,28 €	0,04 €	455,00 €	0,03 €
	19000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,30 €	782,66 €	0,04 €	455,00 €	0,02 €
	20000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,28 €	782,66 €	0,04 €	455,00 €	0,02 €
	21000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,27 €	782,66 €	0,04 €	455,00 €	0,02 €
	22000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,26 €	782,66 €	0,04 €	455,00 €	0,02 €
	23000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,25 €	782,66 €	0,03 €	455,00 €	0,02 €
24000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,23 €	782,66 €	0,03 €	455,00 €	0,02 €	
25000	28.000,00 €	1.428,54 €	837,67 €	5.639,15 €	0,23 €	782,66 €	0,03 €	455,00 €	0,02 €	

Ohne VKB:

EW	Stromkosten		Schlammisorgung		Invest.	FM	Wartung	Pers.	Energie	Schlamm	Summe	Summe	
	kWh/a	p.a.	MgT/S/a	p.a.									pro E.u.a.
GK2	10001	221,28 €	53,11 €	2,1	718,10 €	0,72 €	0,21 €	0,49 €	1,82 €	0,05 €	0,72 €	6,90 €	22,15 €
	2000	442,12 €	106,11 €	4,2	1.434,76 €	0,72 €	0,42 €	0,26 €	0,91 €	0,05 €	0,72 €	3,95 €	12,67 €
	3000	663,19 €	159,16 €	6,3	2.152,13 €	0,72 €	0,63 €	0,17 €	0,61 €	0,05 €	0,72 €	2,93 €	9,40 €
	4000	884,25 €	212,22 €	8,4	2.869,51 €	0,72 €	0,84 €	0,13 €	0,46 €	0,05 €	0,72 €	2,42 €	7,76 €
	5000	1.105,31 €	265,27 €	10,5	3.586,89 €	0,72 €	1,05 €	0,10 €	0,36 €	0,05 €	0,72 €	2,11 €	6,78 €
GK3	5001	1.105,53 €	265,33 €	10,6	3.587,61 €	0,72 €	0,09 €	0,10 €	0,36 €	0,05 €	0,72 €	2,11 €	6,77 €
	6000	1.326,37 €	318,33 €	12,7	4.304,27 €	0,72 €	0,09 €	0,10 €	0,19 €	0,05 €	0,72 €	1,87 €	6,00 €
	7000	1.547,43 €	371,38 €	14,8	5.021,65 €	0,72 €	0,09 €	0,08 €	0,16 €	0,05 €	0,72 €	1,73 €	5,54 €
	8000	1.768,50 €	424,44 €	16,9	5.739,02 €	0,72 €	0,09 €	0,07 €	0,14 €	0,05 €	0,72 €	1,62 €	5,19 €
	9000	1.989,56 €	477,49 €	19,0	6.456,40 €	0,72 €	0,09 €	0,07 €	0,13 €	0,05 €	0,72 €	1,53 €	4,92 €
GK4	10001	2.210,84 €	530,55 €	21,1	7.173,79 €	0,72 €	0,43 €	0,06 €	0,11 €	0,05 €	0,72 €	1,47 €	4,71 €
	11000	2.431,68 €	583,60 €	23,2	7.891,16 €	0,72 €	0,43 €	0,06 €	0,04 €	0,05 €	0,72 €	1,39 €	4,47 €
	12000	2.652,74 €	636,66 €	25,3	8.608,54 €	0,72 €	0,42 €	0,06 €	0,04 €	0,05 €	0,72 €	1,34 €	4,31 €
	13000	2.873,80 €	689,71 €	27,4	9.325,91 €	0,72 €	0,39 €	0,05 €	0,04 €	0,05 €	0,72 €	1,30 €	4,18 €
	14000	3.094,87 €	742,77 €	29,5	10.043,29 €	0,72 €	0,36 €	0,05 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,27 €	4,07 €
GK4	15000	3.315,93 €	795,82 €	31,6	10.760,67 €	0,72 €	0,34 €	0,05 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,24 €	3,98 €
	16000	3.536,99 €	848,88 €	33,8	11.478,05 €	0,72 €	0,32 €	0,04 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,21 €	3,89 €
	17000	3.758,05 €	901,93 €	35,9	12.195,43 €	0,72 €	0,32 €	0,04 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,21 €	3,89 €
	18000	3.979,11 €	954,99 €	38,0	12.912,81 €	0,72 €	0,30 €	0,05 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,19 €	3,82 €
	19000	4.200,18 €	1.008,04 €	40,1	13.630,19 €	0,72 €	0,30 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,17 €	3,76 €
GK4	20000	4.421,24 €	1.061,10 €	42,2	14.347,56 €	0,72 €	0,28 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,15 €	3,70 €
	21000	4.642,30 €	1.114,15 €	44,3	15.064,94 €	0,72 €	0,27 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,14 €	3,65 €
	22000	4.863,36 €	1.167,21 €	46,4	15.782,32 €	0,72 €	0,26 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,12 €	3,60 €
	23000	5.084,42 €	1.220,26 €	48,5	16.499,70 €	0,72 €	0,25 €	0,04 €	0,02 €	0,05 €	0,72 €	1,11 €	3,56 €
	24000	5.305,48 €	1.273,32 €	50,6	17.217,07 €	0,72 €	0,23 €	0,04 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,10 €	3,52 €
25000	5.526,55 €	1.326,37 €	52,7	17.934,45 €	0,72 €	0,23 €	0,04 €	0,03 €	0,05 €	0,72 €	1,08 €	3,48 €	

A.4 Berechnungsgrundlagen Sandfiltration

Grundlagen für Sandfiltrationsanlage

Auslegung Hydraulik und Frachten siehe Anhang A3

Filterbeschickung: 10 - 15 m/hr

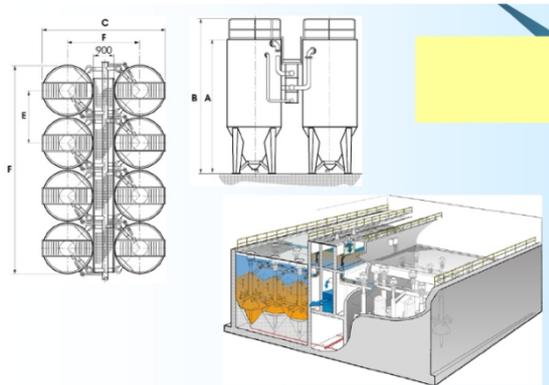
Zulaufbelastung:
 (=Ablauf NKB): AFS < 50 mg/l (kurzfristig bis zum 400 mg/l)
 PO₄-P < 1,5 mg/l

Durchsatzmenge: 300 - 2500 m³/h

Zielsetzung: AFS < 10 mg/l
 Phosphorelimination mit P_{ges} < 0,5 mg/l

Verfahrenstechnische Bemessung der Sandfiltrationsanlage

Laufzahl			10.000 EW	15.000 EW	20.000 EW	30.000 EW	50.000 EW	80.000 EW	100.000 EW
Mischwassermenge	Q _M	m ³ /h	325,5	488,3	651,0	820,3	1.367,2	1.770,8	2.213,5
Anteil Waschwasser	Q _{WW}	-	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
		m ³ /h	16,3	24,4	32,6	41,0	68,4	88,5	110,7
Abwasseranfallmenge	Q _{F,akt}	m ³ /h	69,4	104,2	138,9	208,3	347,2	555,6	694,4
Durchsatzmenge (inkl. WW)	Q _{ges}	m ³ /h	342	513	684	861	1.436	1.859	2.324
Durchmesser Filter	D	m	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52
Oberfläche je Filter	A	m ²	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Anzahl Filter	n	-	6	8	12	15	24	36	42
Oberfläche alle Filter	A _{ges}	m ²	30	40	60	75	120	179	209
Filterbeschickung	v _F	m/h	11,4	12,9	11,4	11,5	12,0	10,4	11,1
Inputdaten Filterstufe (= Ablauf Nachklärbecken)									
Zulauf-Konzentration	PO4-P	mg/l	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Zulauf-Konzentration	AFS	mg/l	20	20	20	20	20	20	20
Zulauf-Fracht	PO4-P	kg/h	0,07	0,10	0,14	0,21	0,35	0,56	0,69
Zulauf-Fracht	AFS	kg/h	1,39	2,08	2,78	4,17	6,94	11,11	13,89
Outputdaten Filterstufe (Zielsetzung)									
Ablauf-Konzentration	PO4-P	mg/l	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Ablauf-Konzentration	AFS	mg/l	10	10	10	10	10	10	10
Ablauf-Fracht	PO4-P	kg/h	0,03	0,04	0,06	0,08	0,14	0,22	0,28
Ablauf-Fracht	AFS	kg/h	0,69	1,04	1,39	2,08	3,47	5,56	6,94
Rechnerisch erforderliche Eliminationsraten									
PO4-P-Fracht		kg/h	0,042	0,06	0,08	0,13	0,21	0,33	0,42
AFS-Fracht (ohne Fällung)		kg/h	0,69	1,04	1,39	2,08	3,47	5,56	6,94
Berechnungen zur P-Fällung mit Fe(III)-Cl (40%)									
Spez. Fällmittelbedarf (b = 2,0)	FM	kg/kg	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
Dichte Fällmittel	r	kg/l	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Fällmitteleinsatz	FM	kg/h	1,22	1,83	2,44	3,66	6,10	9,76	12,20
		l/h	0,80	1,20	1,60	2,41	4,01	6,42	8,02
Fällmittelverbrauch	FM	kg/d	29,3	43,9	58,5	87,8	146,3	234,1	292,7
		l/d	19,3	28,9	38,5	57,8	96,3	154,0	192,6
Zusätzlicher Schlammfall	ÜS _{F,FM}	kg _{TS} /kg _{FM}	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
		kg _{TS} /h	0,38	0,56	0,75	1,13	1,88	3,00	3,75
		kg _{TS} /d	9,0	13,5	18,0	27,0	45,0	72,0	90,0
Mehrschlammfall / Waschwassercharakteristik									
Schlammfall - gesamt	ÜS _{sf}	kg _{TS} /h	1,1	1,6	2,1	3,2	5,3	8,6	10,7
		kg _{TS} /d	26	39	51	77	128	205	257
TS-Gehalt im Waschwasser (i.M.)	TS	mg/l	66	66	66	78	78	97	97



Kosten Sandfiltration

	10.000 EW	15.000 EW	20.000 EW	30.000 EW	50.000 EW	80.000 EW	100.000 EW
Investitions- und Betriebskosten	183.000 €	210.000 €	370.000 €	460.000 €	550.000 €	1.100.000 €	1.300.000 €
Bautechnik	334.000 €	448.000 €	670.000 €	835.000 €	1.010.000 €	2.050.000 €	2.500.000 €
Maschinen-technik & EMISR	103.400 €	131.200 €	208.000 €	259.000 €	312.000 €	630.000 €	760.000 €
Bauelemente	4.632 €	5.776 €	8.464 €	10.480 €	16.528 €	24.892 €	28.624 €
Installation und Wartung (E/a)	14.868 €	18.564 €	25.956 €	31.500 €	48.132 €	70.308 €	81.396 €
Personalkosten	23.547 €	35.908 €	47.094 €	70.841 €	108.316 €	184.628 €	219.806 €
Energiekosten							

Reparatur, Instandhaltung und Wartung

Für die jährliche Wartung pro Fille ca. 4h zu 68 €/h
 jährliche Wartung der Kompressoren
 Ersatz- und Verschleißteile für 10-jährigen Betrieb

Personalkosten

Optische Kontrolle der Filler und des Steuerschrankes
 Überprüfung der Sandumwälzung
 Sichtkontrolle und Ölprüfung der Kompressoren, Filtermatrariemengung
 Dosierstation und andere Kontrollen

Energiekosten

Kreiselpumpe

Liefermenge 80 m³/h
 Förderhöhe 10 m
 Wirkungsgrad 61 %
 Motorleistung 3,7 kW

Stromkosten angenommen 0,24 € /kWh

272 €/a/Filter
 400 €/a
 400 €/a/Filter

wöchentlich
 monatlich
 wöchentlich
 wöchentlich

Schraubkompressor
 Luftmenge 68 m³/h
 Mindestdruck 6 bar
 Motorleistung 7,5 kW

EW	P _{einwert} (kg/a)	Bautechnik (€/a)	Maschinen-technik & EMISR (€/a)	Investitionskosten (€/a EW)	Wartungskosten (€/a EW)	Personalkosten (€/a EW)	Energiekosten (€/a EW)	Summe (€/a EW)	Betriebskosten (€/E-a)
10.000	365,0	11204	33574	44777	4,43	14,868	2,35	8,76	4,28
15.000	547,5	12857	44832	57689	6,39	18,564	2,39	7,86	4,02
20.000	730,0	22653	67248	90001	4,50	25,956	2,35	6,58	4,08
30.000	1.085,0	28163	83834	112087	3,74	31,500	2,35	7,49	3,75
50.000	1.825,0	33673	101525	135188	2,70	48,132	2,17	6,16	3,46
80.000	2.920,0	67345	208066	273411	3,42	70,808	2,06	6,66	3,25
100.000	3.650,0	76590	251900	330890	3,31	81,936	2,20	6,61	3,30

Umrrechnen von Investitionen in jährliche Kapitalkosten:

$KFAKR (IND) = \frac{(i \cdot (1+i)^N) \cdot (1+i)^N - 1}{(1+i)^N - 1}$	
Zinssatz	3%
Nutzungsdauer	15 a
Annuität	0,08377
MT/ET	3%
BT	30 a
KFAKR =	0,05102

A.5 Berechnungsgrundlagen für Abschätzung Einfluss AbwAG

Berechnungsgrundlagen für Abschätzung Einfluss AbWAG:

Allgemeines Arbeitsblatt für P-Fällung:

Verfahrenstechnik für Fällmitteldosierung:		Grundlage Belebungsverfahren	
Spez. Schmutzwasseranfall	q_s	125 l/(E·d)	
Fremdwasseranteil	Q_{sF}/Q_{sM}	25%	
Spez. Abwasseranfall	q_{sM}	167 l/(E·d)	mit Fremdwasser
Spezifische Fracht CSB	$CSB_E =$	85 g/(E·d)	Jahresmittel
Spezifische Fracht TS	$TS_E =$	49,6 g/(E·d)	$TS/CSB = 0,583$
Spezifische Fracht P	$P_E =$	1,45 g/(E·d)	$P/CSB = 0,017$
Inkorporation P in Schlamm	$i_{P,US}$	0,010	kg/kgTS in US ohne verm. Bio P
	$i_{P,PS}$	0,009	kg/kgTS in PS
Abbau P in VKB	$\eta_{P,VKB}$	15%	mit VKB
Abbau CSB in VKB	$\eta_{CSB,VKB}$	30%	mit VKB
Abbau TS in VKB	$\eta_{TS,VKB}$	50%	mit VKB
Spez. Primärschlammfall	PS_P/CSB	0,29	kg/kg
Spez. US-Produktion	US_{ac}/CSB	0,35	kg/kg
Spez. US-Produktion	US_{ac}/CSB	0,50	kg/kg o. VKB
Fällmittelüberschuss	$\beta =$	1,5	mol/mol
Ablaufkonzentration	$C_{P,AN}$	1,0	mg/l

Beleuchtungsanlage ohne VKB (Stabilisierung):

	EW	P	PS	US	P _{Ps}	P _{Us}	P _{ab}	η _p	P _{Fall}	Me ³⁺	Fe ³⁺
	E	kg/d	kgTSt/d	kgTSt/d	kg/d	kg/d	kg/d	-	kg/d	kmol/d	kg/d
GK2	1001	1,45	0	43	0,00	0,43	0,17	88,5%	0,9	0,041	2,3
	2000	2,89	0	85	0,00	0,85	0,33	88,5%	1,7	0,083	4,6
	3000	4,34	0	128	0,00	1,28	0,50	88,5%	2,6	0,124	6,9
	4000	5,78	0	170	0,00	1,70	0,67	88,5%	3,4	0,165	9,2
	5000	7,23	0	213	0,00	2,13	0,83	88,5%	4,3	0,206	11,6
GK3	5001	7,23	0	213	0,00	2,13	0,83	88,5%	4,3	0,206	11,6
	6000	8,67	0	255	0,00	2,55	1,00	88,5%	5,1	0,248	13,9
	7000	10,12	0	298	0,00	2,98	1,17	88,5%	6,0	0,289	16,2
	8000	11,56	0	340	0,00	3,40	1,33	88,5%	6,8	0,330	18,5
	9000	13,01	0	383	0,00	3,83	1,50	88,5%	7,7	0,372	20,8
GK4	10000	14,45	0	425	0,00	4,25	1,67	88,5%	8,5	0,413	23,1
	10001	14,45	0	425	0,00	4,25	1,67	88,5%	8,5	0,413	23,1
	11000	15,90	0	468	0,00	4,68	1,83	88,5%	9,4	0,454	25,4
	12000	17,34	0	510	0,00	5,10	2,00	88,5%	10,2	0,495	27,7
	13000	18,79	0	553	0,00	5,53	2,17	88,5%	11,1	0,537	30,1
	14000	20,23	0	595	0,00	5,95	2,33	88,5%	11,9	0,578	32,4
	15000	21,68	0	638	0,00	6,38	2,50	88,5%	12,8	0,619	34,7
	16000	23,12	0	680	0,00	6,80	2,67	88,5%	13,7	0,661	37,0
	17000	24,57	0	723	0,00	7,23	2,83	88,5%	14,5	0,702	39,3
	18000	26,01	0	765	0,00	7,65	3,00	88,5%	15,4	0,743	41,6
	19000	27,46	0	808	0,00	8,08	3,17	88,5%	16,2	0,785	43,9
	20000	28,90	0	850	0,00	8,50	3,33	88,5%	17,1	0,826	46,2
	21000	30,35	0	893	0,00	8,93	3,50	88,5%	17,9	0,867	48,6
	22000	31,79	0	935	0,00	9,35	3,67	88,5%	18,8	0,908	50,9
	23000	33,24	0	978	0,00	9,78	3,83	88,5%	19,6	0,950	53,2
24000	34,68	0	1020	0,00	10,20	4,00	88,5%	20,5	0,991	55,5	
25000	36,13	0	1063	0,00	10,63	4,17	88,5%	21,3	1,032	57,8	

Kostenstelle Abwasserabgabe :

Anlage

1000 EW

JSM in m³/a geschätzt 61.000 Kosten je Schadeinheit in pro SE 35,79 €

Bewertete Schadstoffe	Überwachungs-wert mg/l	Schwellenwert mg/l	Umrechnungs-faktor	Schadein-heiten (SE)	Erhöhungs-faktor	Ermäßigungs-faktor	Abwasser-abgabe pro a
CSB	90,0	20,0	0,00002	110	1,00	0,50	1.965 €
Stickstoff	18,0	5,0	0,00004	44	1,00	0,50	786 €
Phosphor	6,0	0,1	0,00033	122	1,00	0,50	2.183 €
Summe der Abwasserabgabe							4.934 €

Vorrechnungsfähig 3 Jahre
 Investitionskosten Fällungsanlage 1000 E
 Verrechnungsfähige AbwAG - Erstinvestition gemäß Schätzung
 14.802 €
 48.900 €
 -34.098 €

Abgabe P mit P-Fällung

Bewertete Schadstoffe	Überwachungs-wert mg/l	Schwellenwert mg/l	Umrechnungs-faktor	Schadein-heiten (SE)	Erhöhungs-faktor	Ermäßigungs-faktor	Abwasser-abgabe pro a
CSB	90,0	20,0	0,00002	110	1,00	0,50	1.965 €
Stickstoff	18,0	5,0	0,00004	44	1,00	0,50	786 €
Phosphor	2,0	0,1	0,00033	41	1,00	0,50	728 €
Summe der Abwasserabgabe							3.479 €

Einsparung laufende Abwasserabgabe pro Jahr 1.455 €
 Betriebskosten Fällungsanlage pro Jahr 3.090 €
 Einsparung Laufende Kosten pro Jahr und Jahr -1.625 €
 pro E und Jahr -1,62 €

Kostenstelle Abwasserabgabe :

Anlage

3000 EW

JSM in m³/a geschätzt 183.000 Kosten je Schadeinheit in pro SE 35,79 €

Bewertete Schadstoffe	Überwachungs-wert mg/l	Schwellenwert mg/l	Umrechnungs-faktor	Schadein-heiten (SE)	Erhöhungs-faktor	Ermäßigungs-faktor	Abwasser-abgabe pro a
CSB	90,0	20,0	0,00002	329	1,00	0,50	5.895 €
Stickstoff	18,0	5,0	0,00004	132	1,00	0,50	2.388 €
Phosphor	6,0	0,1	0,00033	366	1,00	0,50	6.560 €
Summe der Abwasserabgabe							14.802 €

Vorrechnungsfähig 3 Jahre
 Investitionskosten Fällungsanlage 3000 E
 Verrechnungsfähige AbwAG - Erstinvestition gemäß Schätzung

44.406 €
 51.020 €
 -6.614 €

Abgabe P mit P-Fällung

Bewertete Schadstoffe	Überwachungs-wert mg/l	Schwellenwert mg/l	Umrechnungs-faktor	Schadein-heiten (SE)	Erhöhungs-faktor	Ermäßigungs-faktor	Abwasser-abgabe pro a
CSB	90,0	20,0	0,00002	329	1,00	0,50	5.895 €
Stickstoff	18,0	5,0	0,00004	132	1,00	0,50	2.388 €
Phosphor	2,0	0,1	0,00033	122	1,00	0,50	2.183 €
Summe der Abwasserabgabe							10.436 €

Einsparung laufende Abwasserabgabe pro Jahr 4.366 €
 Betriebskosten Fällungsanlage pro Jahr 5.000 €
 Einsparung Laufende Kosten pro Jahr und Jahr -634 €
 pro E und Jahr -0,21 €

Kostenstelle Abwasserabgabe : Anlage 5000 EW

JSM in m³/a geschätzt 304.000 Kosten je Schadeinheit in pro SE 35,79 €

Bewertete Schadstoffe	Überwachungs-wert mg/l	Schwellenwert mg/l	Umrechnungs-faktor	Schadein-heiten (SE)	Erhöhungs-faktor	Ermäßigungs-faktor	Abwasser-abgabe pro a
CSB	90,0	20,0	0,00002	547	1,00	0,50	9.792 €
Stickstoff	18,0	5,0	0,00004	219	1,00	0,50	3.917 €
Phosphor	6,0	0,1	0,00033	608	1,00	0,50	10.880 €
Summe der Abwasserabgabe							24.589 €

Vorrechnungsfähig 3 Jahre
 Investitionskosten Fällungsanlage 5000 E
 Verrechnungsfähige AbwAG - Erstinvestition gemäß Schätzung

Abgabe P mit P-Fällung

Bewertete Schadstoffe	Überwachungs-wert mg/l	Schwellenwert mg/l	Umrechnungs-faktor	Schadein-heiten (SE)	Erhöhungs-faktor	Ermäßigungs-faktor	Abwasser-abgabe pro a
CSB	90,0	20,0	0,00002	547	1,00	0,50	9.792 €
Stickstoff	18,0	5,0	0,00004	219	1,00	0,50	3.917 €
Phosphor	2,0	0,1	0,00033	203	1,00	0,50	3.627 €
Summe der Abwasserabgabe							17.336 €

Einsparung laufende Abwasserabgabe pro Jahr 7.253 €
 Betriebskosten Fällungsanlage pro Jahr 6.200 €
 Einsparung Laufende Kosten: pro Jahr 1.053 €
 pro E und Jahr 0,21 €

Kostenstelle Abwasserabgabe : Anlage **5000 EW**

JSM in m³/a geschätzt **304.000** Kosten je Schadeinheit in pro SE **35,79 €**

Bewertete Schadstoffe	Überwachungswert mg/l	Schwellenwert mg/l	Umrechnungsfaktor	Schadeinheiten (SE)	Erhöhungsfaktor	Ermäßigungsfaktor	Abwasserabgabe pro a
CSB	90,0	20,0	0,00002	547	1,00	0,50	9.792 €
Stickstoff	18,0	5,0	0,00004	219	1,00	0,50	3.917 €
Phosphor	2,0	0,1	0,00033	203	1,00	0,50	3.627 €
Summe der Abwasserabgabe							17.336 €

Abgabe P mit P-Fällung

Bewertete Schadstoffe	Überwachungswert mg/l	Schwellenwert mg/l	Umrechnungsfaktor	Schadeinheiten (SE)	Erhöhungsfaktor	Ermäßigungsfaktor	Abwasserabgabe pro a
CSB	90,0	20,0	0,00002	547	1,00	0,50	9.792 €
Stickstoff	18,0	5,0	0,00004	219	1,00	0,50	3.917 €
Phosphor	1,0	0,1	0,00033	101	1,00	0,50	1.813 €
Summe der Abwasserabgabe							15.522 €

Einsparung laufende Abwasserabgabe **1.813 €** pro Jahr
 Betriebskosten Fällungsanlage **6.200 €** pro Jahr
 Einsparung Laufende Kosten: **-4.387 €** pro Jahr
-0,88 € pro E und Jahr

Kostenstelle Abwasserabgabe : Anlage **10000 EW**

JSM in m³/a geschätzt **608.000** Kosten je Schadeinheit in pro SE **35,79 €**

Bewertete Schadstoffe	Überwachungswert mg/l	Schwellenwert mg/l	Umrechnungsfaktor	Schadeinheiten (SE)	Erhöhungsfaktor	Ermäßigungsfaktor	Abwasserabgabe pro a
CSB	90,0	20,0	0,00002	1,094	1,00	0,50	19.584 €
Stickstoff	18,0	5,0	0,00004	438	1,00	0,50	7.834 €
Phosphor	2,0	0,1	0,00033	405	1,00	0,50	7.263 €
Summe der Abwasserabgabe							34.671 €

Abgabe P mit P-Fällung

Bewertete Schadstoffe	Überwachungswert mg/l	Schwellenwert mg/l	Umrechnungsfaktor	Schadeinheiten (SE)	Erhöhungsfaktor	Ermäßigungsfaktor	Abwasserabgabe pro a
CSB	90,0	20,0	0,00002	1,094	1,00	0,50	19.584 €
Stickstoff	18,0	5,0	0,00004	438	1,00	0,50	7.834 €
Phosphor	1,0	0,1	0,00033	203	1,00	0,50	3.627 €
Summe der Abwasserabgabe							31.045 €

Einsparung laufende Abwasserabgabe **3.627 €** pro Jahr
 Betriebskosten Fällungsanlage **9.440 €** pro Jahr
 Einsparung Laufende Kosten: **-5.813 €** pro Jahr
-0,58 € pro E und Jahr