

Machbarkeitsstudie

Weitergehende Reduktion von Stickstoff und Phosphor auf der Kläranlage Billerbeck



GELSENWASSER AG Abteilung: AWA Arne Steinkamp Willy-Brandt-Allee 26 45891 Gelsenkirchen Telefon: 02 09/708-1908 Telefax: 02 09/708-1989 E-Mail: arne.steinkamp@gelsenwasser.de Internet: www.gelsenwasser.de	erstellt am: 27.11.2019
	Gelesen von: Ingrid Gerard (AWA - Kläranlagenprojekte)
	Status: finale Version

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung / Aufgabenstellung	9
1.1	Kläranlage Billerbeck	9
1.2	Aufgabenstellung	10
2.	Datengrundlage	12
2.1	Überwachungswerte der Kläranlage Billerbeck	13
2.2	Vorbelastung des Oberflächenwasserkörper Berkel (DE_NRW_9284_97977)	14
3.	Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Senkung des P_{ges} Betriebsmittelwert	16
3.1	Grundlagen der Phosphatelimination auf Kläranlagen	16
3.2	Betriebsdatenauswertung - Phosphat	18
3.3	Bewertung der Verfahrenstechnik zur P-Reduktion	21
3.4	Verfahren zur erweiterten P-Reduktion	25
3.5	Betrachtete Varianten auf der Kläranlage Billerbeck	27
3.6	Vor-Ort Versuche zur erweiterten Phosphatreduktion	30
4.	Kosten der erweiterten Phosphatreduktion	38
4.1	Investitionskostenschätzung – erweiterte Phosphatreduktion	38
4.2	Betriebskostenschätzung – erweiterte Phosphatreduktion	39
4.3	Jahreskostenschätzung – erweiterte Phosphatreduktion	41
4.4	Bewertung der Varianten	42
5.	Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Senkung des NH_4-N Betriebsmittelwerts	44
5.1	Grundlagen zur erweiterten Stickstoffreduktion auf Kläranlagen	44
5.1.1	Anpassung des Sauerstoffsollwertes und der TS-Konzentration	44
5.1.2	Prozesswasserbehandlung (PWB)	44
5.1.3	Zentraltbewirtschaftung	46
5.2	Betriebsdatenauswertung der Stickstoffelimination und Bewertung des Betriebsmittelwertes	46
5.3	Bewertung der Verfahrenstechnik zur Stickstoffelimination	51

6.	Dynamische Simulation	53
6.1	Modellabgleich	53
6.2	Simulation der Varianten zur Reduzierung des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration	58
7.	Kosten der erweiterten Stickstoffreduktion	67
7.1	Investitionskostenschätzung - erweiterte Stickstoffreduktion	67
7.2	Betriebskostenschätzung - erweiterte Stickstoffreduktion	68
7.3	Jahreskostenschätzung – erweiterte Stickstoffreduktion	70
7.4	Bewertung der Varianten	72
8.	Gewässerökologische Maßnahmen zur Senkung des P_{ges} und $\text{NH}_4\text{-N}$ Betriebsmittelwertes	74
9.	Vergleich der Maßnahmenpakete	77
9.1	Bestimmung der Betriebskosten	78
9.2	Bestimmung der Jahreskosten	80
9.3	Bewertung der Varianten	81
10.	Zusammenfassung	83
11.	Anhang	88
12.	Literaturverzeichnis	89

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Fließschema der Kläranlage Billerbeck	10
Abbildung 2 P_{ges} und PO_4 -P Konzentration oberhalb der Kläranlage (letzte Messungen aus Vorjahr).....	14
Abbildung 3 NH_4 -N Konzentration oberhalb der Kläranlage (letzte Messungen aus Vorjahr)	15
Abbildung 4 Phosphorbilanz im Abwasser nach (DWA, 2011)	16
Abbildung 5 P_{ges} im Zulauf zur Kläranlage 207 - 2018.....	18
Abbildung 6 P_{ges} Konzentration im Ablauf der Nachklärung 2017 bis 2018	18
Abbildung 7 Verlauf der Zulaufmengen zur Kläranlage 2017-2018	19
Abbildung 8 P_{ges} -Fracht im Zulauf zur Kläranlage 2017-2018	19
Abbildung 9 durchschnittlicher Fällmittelverbrauch 2018.....	20
Abbildung 10 Verlauf der P_{ges} -Elimination 2017-2018	20
Abbildung 11 Berechneter β -Wert der chemischen Fällung für 2017 und 2018.....	21
Abbildung 12 Dosierstelle des Fällmittels.....	22
Abbildung 13 Einfluss der Feststoffe im Ablauf der Nachklärung auf den Gehalt an Phosphor im Ablauf (Cornel, 2016).....	23
Abbildung 14 Feststoffwolke in der Nachklärung.....	24
Abbildung 15 Berechnet AFS-Ablaufkonzentration anhand der P_{part} -Betriebsdaten.....	24
Abbildung 16 Prinzip eines Mikrosiebes nach (Pinnekamp, 2012)	26
Abbildung 17 Prinzip eines Tuchfilters nach (Pinnekamp, 2012).....	26
Abbildung 18 Prinzip eines Sandfilters in Rummler (2015).....	27
Abbildung 19 Einsatz einer Zwei-Punkt Fällung ohne Inbetriebnahme des zweiten Nachklärbeckens	28
Abbildung 20 Simultanfällung und Nachfällung mit der Reaktivierung des zweiten Nachklärbeckens	28
Abbildung 21 Simultanfällung und Nachfällung inkl. einer Tuchfiltration zur Feststoffabscheidung.....	29

Abbildung 22 Simultanfällung und Nachfällung inkl. einer Sandfiltration zur Feststoffabscheidung.....	29
Abbildung 23 P-Elimination der Nachklärung bei aktueller Betriebsweise (v. NK = vor Nachklärung; n. NK = nach Nachklärung).....	31
Abbildung 24 P_{ges} Konzentration nach Zugabe von Fällmittel.....	32
Abbildung 25 Resultierende Phosphatfraktionen bei unterschiedlichen β -Werten.....	33
Abbildung 26 P-Elimination bei erhöhter Fällmitteldosierung (Simultanfällung).....	34
Abbildung 27 P-Elimination bei erhöhter Fällmitteldosierung (Nachfällung).....	36
Abbildung 28 Jahreskostenschätzung der einzelnen Varianten.....	41
Abbildung 29 TN_b Fracht im Zulauf zur Kläranlage 2017-2018.....	46
Abbildung 30 NH_4-N Konzentration im Ablauf der Nachklärung 2016-2018.....	47
Abbildung 31 Plausibilitätsprüfung der gewählten Abflüsse $Q_{Gew,oh}$ und Q_{KA}	48
Abbildung 32 NH_4-N Konzentrationen der Messkampagne.....	48
Abbildung 33 Typische Nährstoffkonzentrationsverlauf im Zulauf einer Kläranlage nach Langergraber et al. (2007).....	49
Abbildung 34 Vergleich der Soll- und Ist- NH_4 -Konzentration 2017 bei Einhaltung einer Gewässerkonzentration von 0,2 mg/l (Messkampagne).....	50
Abbildung 35 Vergleich der Soll- und Ist- NH_4-N -Konzentration bei Einhaltung einer Gewässerkonzentration von 0,2 mg/l (Selbstüberwachung).....	50
Abbildung 36 Normierte Zulaufganglinie nach Langergraber et al. (2008) und nach Messungen durch die OWL Umweltanalytik GmbH.....	52
Abbildung 37 Modellabgleich des TS-Gehaltes im Belebungsbecken.....	53
Abbildung 38 Modellabgleich der CSB Konzentration.....	54
Abbildung 39 Modellabgleich der NH_4-N Konzentration.....	54
Abbildung 40 Modellabgleich der NO_3-N Konzentration.....	55
Abbildung 41 Modellabgleich der $N_{anorg,ges}$ Konzentration.....	55
Abbildung 42 Geschätzter Fremdwasseranteil im Zulauf zur Kläranlage.....	56
Abbildung 43 Modellabgleich der P_{ges} Konzentration.....	57
Abbildung 44 NH_4-N Konzentration mit und ohne Prozesswasserbehandlung (PWB).....	59

Abbildung 45 NO ₃ -N Konzentration mit und ohne Prozesswasserbehandlung (PWB).....	59
Abbildung 46 N _{anorg} Konzentration mit und ohne Prozesswasserbehandlung (PWB).....	60
Abbildung 47 NH ₄ -N Konzentration bei einer O ₂ Konzentration von 1 g/l und eine O ₂ Konzentration entsprechend der Betriebsdaten	61
Abbildung 48 NO ₃ -N Konzentration bei einer O ₂ Konzentration von 1 g/l und eine O ₂ Konzentration entsprechend der Betriebsdaten	61
Abbildung 49 N _{anorg} Konzentration bei einer O ₂ Konzentration von 1 g/l und eine O ₂ Konzentration entsprechend der Betriebsdaten	62
Abbildung 50 NH ₄ -N Konzentration bei einem TS _{BB} von 4 g/l und einem TS _{BB} entsprechend der Betriebsdaten	63
Abbildung 51 NO ₃ -N Konzentration bei einem TS _{BB} von 4 g/l und einem TS _{BB} entsprechend der Betriebsdaten	63
Abbildung 52 N _{anorg} Konzentration bei einem TS _{BB} von 4 g/l und einem TS _{BB} entsprechend der Betriebsdaten	64
Abbildung 53 Korrelation zwischen spezifischer Überschussschlammproduktion und Schlammalter (Bezugsjahre: 2013, 2014, 2015, 2017, 2018).....	64
Abbildung 54 Investitionskostenvergleich verschiedener Verfahren zur separaten Schlammwasserbehandlung nach (Jardin)	68
Abbildung 55 Jahreskostenschätzung der einzelnen Varianten	71
Abbildung 56 Jahreskostenschätzung der einzelnen Varianten	80

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Wasserrechtliche Anforderungen an Menge und Beschaffenheit nach BRMS (2018a)	13
Tabelle 2 Ergebnisse des Intensivessprogramms nach BRMS (2018b)	14
Tabelle 3 Phosphatarten und dessen Entfernung nach (Wassermann, 2016)	17
Tabelle 4 Fällverfahren mit β -Wert und zu erwartender Restkonzentration von $P_{\text{gelöst}}$ (Gujer & Boller, 1979)	17
Tabelle 5 Möglichkeiten der weitergehenden Phosphor-Elimination nach Cornel et al. (2016)	25
Tabelle 6 maximal erreichbare P_{ges} -Ablaufkonzentration nach Cornel et al. (2016)	25
Tabelle 7 Ergebnisse der Messkampagne zur Phosphatfraktionierung	30
Tabelle 8 Anteile der Phosphatablaufkonzentration nach Böhler und Siegrist (2008) und auf der Kläranlage Billerbeck	30
Tabelle 9 Phosphat-Fraktionen im Ablauf der Kläranlage	32
Tabelle 10 Eliminationsraten der jeweiligen Fraktion bezogen auf die Blindprobe	34
Tabelle 11 Eliminationsraten der jeweiligen Fraktion bezogen auf die Blindprobe	35
Tabelle 12 Theoretische Ablaufkonzentration bei gesteigerter Simultanfällung	35
Tabelle 13 Eliminationsraten der jeweiligen Fraktion bezogen auf die Blindprobe	36
Tabelle 14 Eliminationsraten der jeweiligen Fraktion bezogen auf die Blindprobe	37
Tabelle 15 theoretische Phosphatablaufwerte bei Einsatz einer Flockungsfiltration	37
Tabelle 16 Investitionskostenschätzung für die erweiterte Phosphatreduktion	39
Tabelle 17 Betriebskostenannahme für die Varianten 1 bis 5	39
Tabelle 18 Bewertung der Varianten zur erweiterten Phosphatentfernung	43
Tabelle 19 Gegenüberstellung wesentlicher Betriebskennzahlen unterschiedlicher Prozesswasserbehandlungsmethoden (Beier, 2018)	45
Tabelle 20 Jahreszeitliche Ammoniumfrachten – Bezugsjahr 2017	51
Tabelle 21 Änderung der Stickstoffablaufwerte bei Verwendung einer PWB	58
Tabelle 22 Änderung der Stickstoffablaufwerte bei Erhöhung des Sauerstoffsollwertes	60

Tabelle 23 Änderung der Stickstoffablaufwerte bei Erhöhung der TS-Konzentration	62
Tabelle 24 Investitionskostenschätzung für die erweiterte Stickstoffreduktion.....	68
Tabelle 25 Betriebskostenschätzung für die Varianten 1 bis 5	69
Tabelle 26 Bewertung der Varianten zur erweiterten NH ₄ -N Reduktion.....	73
Tabelle 27 Vergleich der Investitionskostenschätzungen der Vorzugsvarianten.....	78
Tabelle 28 Betriebskostenannahme für die Vorzugsvarianten.....	79
Tabelle 29 Bewertung der unterschiedlichen Maßnahmenansätze	82

1. Einleitung / Aufgabenstellung

1.1 Kläranlage Billerbeck

Betreiber	Abwasserbetrieb der Stadt Billerbeck Markt 1 48727 Billerbeck	
Ansprechpartner	Herr Rainer Hein	
Einzugsgebiet	Ausbaugröße	20.000 EW
	Belastung	11.500 EW
	Größenklasse	4

Die Kläranlage der Stadt Billerbeck wurde 1982 errichtet und in den Jahren 1994 und 2009 ertüchtigt. Das überwiegend kommunale Abwasser wird über ein Schneckenpumpwerk gehoben und durchläuft eine mechanische Reinigung, welche aus einer Rechenanlage und einem belüfteten Sandfang mit Sandfangwäsche besteht. Das vorgereinigte Abwasser wird zusammen mit dem Rücklaufschlamm in eine zweistraßige Belebung geleitet. Jede Straße besteht aus mehreren Denitrifikations- und Nitrifikationsstufen. Die Trennung des Belebtschlammgemisches erfolgt in einer Nachklärung. Das gereinigte Abwasser wird in den Vorfluter abgeleitet, die Rückführung des Belebtschlammes erfolgt Ablaufmengengeregelt über ein Schneckenpumpwerk.

Der Überschussschlamm wird als Teilstrom des Rücklaufschlammes entnommen, eingedickt und der Faulung zugeführt. Der ausgefaulte Schlamm wird in zwei Schlammsilos gespeichert und zweimal jährlich mobil entwässert. Das bei der Entwässerung anfallende Trübwasser wird in einem 1.500 m³ großen Speicher gepuffert und gleichmäßig über das Rücklaufschlammumpwerk der Kläranlage wieder zugeführt. Das bei der Faulung produzierte Klärgas kann über ein BHKW energetisch verwertet werden.

Die Phosphorelimination erfolgt über eine Simultanfällung mittels 10%igen Aluminat, welches in Abhängigkeit des Phosphates im Ablauf der Belebung, in das Zulaufgerinne nach dem Sandfang dosiert wird.

Aus diesem Grund wird in der aktuellen Einleitgenehmigung gefordert bis spätestens zum 30.10.2020 ein Konzept zur weitergehenden Frachtreduzierung, mindestens für die Parameter P_{ges} und $\text{NH}_4\text{-N}$, zu erarbeiten und der Bezirksregierung Münster vorzulegen.

In dem geforderten Konzept soll untersucht werden, welche Technik zur Minderung von P_{ges} geeignet ist und welche Reduzierungen zu erwarten sind. Ebenso soll geprüft werden, ob es technisch möglich ist die $\text{NH}_4\text{-N}$ Frachten weiter zu reduzieren. Insbesondere von Interesse sind auch die geschätzten Kosten für die möglichen Maßnahmen.

Diesbezüglich werden zwei unterschiedliche Ansätze geprüft. Das Ingenieurbüro Wiehager prüft die Möglichkeiten von strukturverbessernden Maßnahmen an der Berkel, um die geforderten Zielwerte zu erreichen. Die Gelsenwasser AG prüft dagegen die Möglichkeiten verfahrenstechnischer Maßnahmen auf der Kläranlage. Die Ergebnisse beider Ansätze werden im vorliegenden Bericht verglichen. Auf Basis dieses Vergleiches wird eine Handlungsempfehlung ausgegeben.

Als Planungsgröße für die unterschiedlichen Konzepte soll ein mittlerer Betriebswert für P_{ges} von kleiner 0,2 mg/l und ein mittlerer Betriebswert für $\text{NH}_4\text{-N}$ von kleiner 0,5 mg/l angesetzt werden. Das endgültige Konzept dient als Entscheidungsgrundlage für eine sich an den 30.04.2021 anschließende neu zu fassende Einleitungserlaubnis.

2. Datengrundlage

Quelle / Autor	Dokumententitel / Dokumentenbeschreibung	Datum
k.A.	Lageplan KA Billerbeck + Berkel	k.A.
Gesellschaft für Abwasserberatung Nordhorn	Schaltbild KA Billerbeck	k.A.
NU Umweltservice GmbH	Zielbiotope	09.07.2014
Kläranlage Billerbeck	Betriebstagebuch	2017 + 2018
Kaup, Timo; König- Gravemeier, Iris (Bezirksregierung Münster)	Präsentation Ermittlung Betriebsmittelwert	15.03.2018
König-Gravemeier, Iris (Bezirksregierung Münster)	Entwurf Erlaubnisbescheid (WR-5002002109)	k.A.
GIS-Portal, Kreis Coesfeld Der Landrat	Einleitstelle Übersicht	18.12.2018
Bezirksregierung Münster	Auswertung Intensivmessprogramm 2016/2017 Kläranlage Billerbeck - Kläranlagenablauf	01.02.2018
Bezirksregierung Münster	Auswertung Intensivmessprogramm 2016/2017 Kläranlage Billerbeck – Kläranlagenablauf (Sonderuntersuchung)	02.02.2018
Bezirksregierung Münster	Auswertung Intensivmessprogramm 2016/2017 Kläranlage Billerbeck – Gewässer Berkel oh und uh Kläranlage	01.02.2018
Bezirksregierung Münster	Auswertung Intensivmessprogramm 2016/2017 Kläranlage Billerbeck – Sonderuntersuchung Berkel oh und uh Kläranlage	02.02.2018

2.1 Überwachungswerte der Kläranlage Billerbeck

Nach der aktuellen Einleitgenehmigung sind folgende Überwachungswerte einzuhalten, sowie Betriebsmittelwerte anzustreben:

Tabelle 1 Wasserrechtliche Anforderungen an Menge und Beschaffenheit nach BRMS (2018a)

Parameter		Grenzwert	Einheit
Volumenstrom	-	366	m ³ /(0,5·h)
Jahresschmutzwassermenge	-	1.355.000	m ³ /a
CSB	Überwachungswert	56	mg/l
BSB	Überwachungswert	10	mg/l
NH ₄ -N	Überwachungswert	3,1	mg/l
P _{ges}	Überwachungswert	1	mg/l
N _{ges}	Überwachungswert	17	mg/l
P _{ges}	Betriebsmittelwert	0,5	mg/l
NH ₄ -N	Betriebsmittelwert	1,5	mg/l

Die Überwachungswerte sind in einer qualifizierten Stichprobe einzuhalten. Die Anforderungen gelten bei einer Abwassertemperatur von 12° C und größer im Ablauf des biologischen Reaktors der Kläranlage.

Der Betriebsmittelwert ist nicht relevant für die Abwasserabgabe oder strafrechtliche Konsequenzen. Aus einer Überschreitung des Betriebsmittelwertes ergeben sich auch keine Konsequenzen im Sinne einer Ordnungswidrigkeit. Der Betriebsmittelwert soll nur dem Ziel einer stabilen betriebsspezifischen Anlagensicherheit dienen.

2.2 Vorbelastung des Oberflächenwasserkörper Berkel (DE_NRW_9284_97977)

Die Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. fasst die gemessenen mittleren Konzentrationen des Intensivmessprogramms der Bezirksregierung Münster zusammen (BRMS, 2018b):

Tabelle 2 Ergebnisse des Intensivmessprogramms nach BRMS (2018b)

Parameter	Oberhalb	Unterhalb	Orientierungswert	Ablauf KA	ÜW KA	Einheit
P _{ges}	0,137	0,226	≤ 0,1	0,43	1,0	mg/l
PO ₄ -P	0,082	0,162	-			mg/l
NH ₄ -N	0,12	0,29	≤ 0,2	0,8	3,1	mg/l

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. stellt die PO₄-P und P_{ges} Konzentration oberhalb der Einleitstelle der Kläranlage Billerbeck dar. Es wird deutlich, dass der Orientierungswert für Phosphat bereits oberhalb der Kläranlage überschritten ist. Es kann jedoch ein genereller Einfluss der Kläranlage auf die Stickstoff- sowie Phosphatkonzentrationen erkannt werden (Tabelle 2).

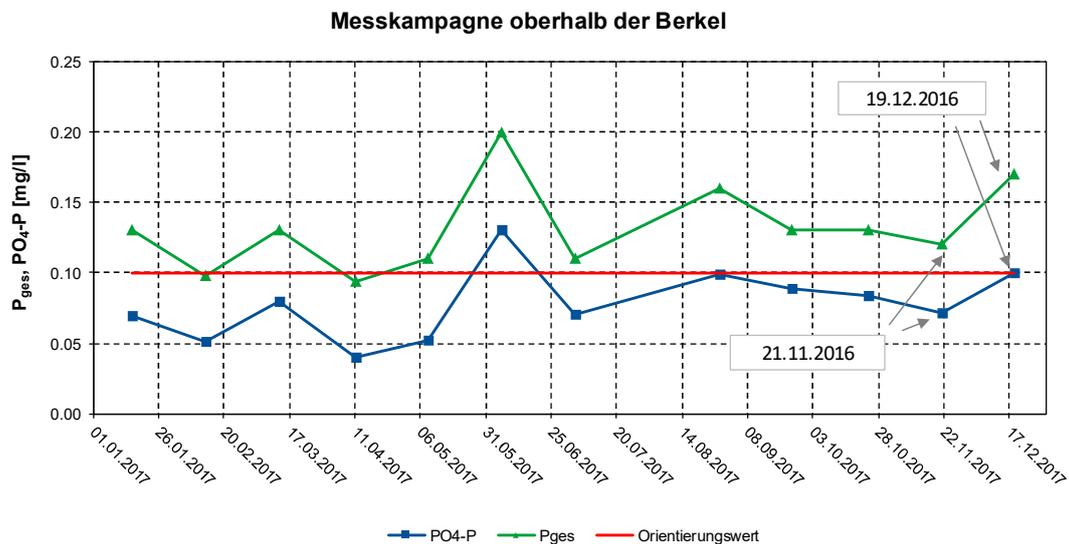


Abbildung 2 P_{ges} und PO₄-P Konzentration oberhalb der Kläranlage (letzte Messungen aus Vorjahr)

Abbildung 3 stellt die $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration oberhalb der Einleitstelle der Kläranlage Billerbeck dar. Es lässt sich ein klarer Jahreszeitlicher Verlauf erkennen. Der Orientierungswert wird die meiste Zeit unterschritten.

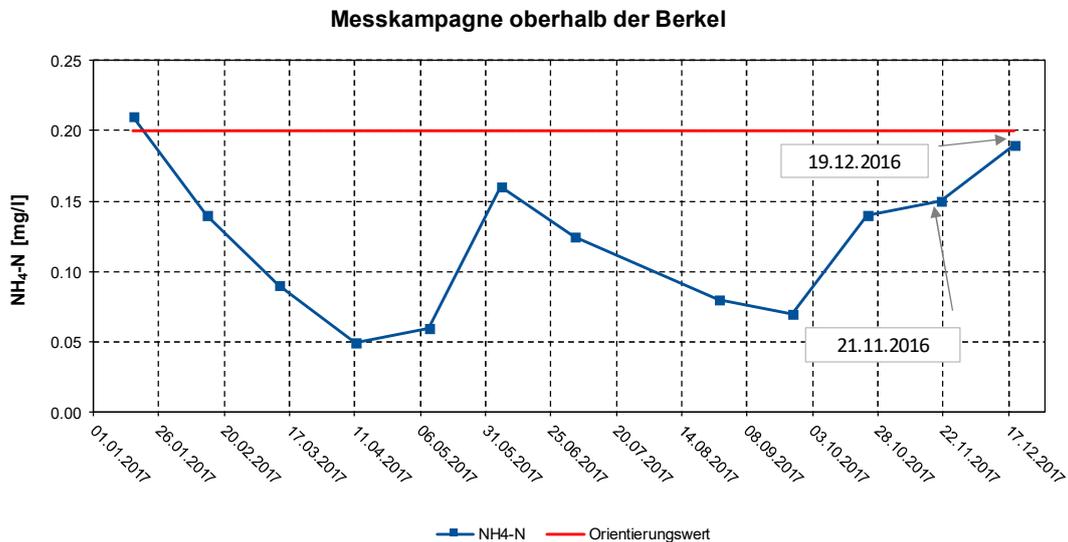


Abbildung 3 $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration oberhalb der Kläranlage (letzte Messungen aus Vorjahr)

Da für den Pegel DE_NRW_9284_97977 im ELWAS-WEB keine Abflussdaten für das Jahr 2017 vorliegen, kann keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, wodurch dieser jahreszeitlicher Konzentrationsverlauf zustande kommt.

Nach Caesperlein (2018) weist die Berkel einen Trend zu abflussärmeren Sommerhalbjahren auf. So fand zwischen 1955 und 2016 eine mittlere Reduktion der Sommerabflüsse von ca. einen Drittel statt. Durch die geringen Abflüsse wirken sich die Einleitungen der Kläranlage stärker aus, da der Basisabfluss geringer ausfällt. Generell wird in den von Caesperlein (2018) erstellten Unterhaltungskonzept für die Berkel auf eine massive Überdüngung der Berkel hingewiesen. Ebenfalls liegt eine drei bis 15-fache Überdüngung bezogen auf den Phosphatgehalt vor. Auffällig ist, dass die Phosphatkonzentration durch den Verlauf der Berkel abseits der Siedlungskerne nicht abnimmt sondern um 50 bis 100 % zunimmt.

3. Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Senkung des P_{ges} Betriebsmittelwert

Im folgendem werden die Verfahren der Phosphatelimination erläutert und auf die möglichen Verfahren auf der Kläranlage Billerbeck eingegangen.

3.1 Grundlagen der Phosphatelimination auf Kläranlagen

Die Phosphatelimination auf einer Kläranlage erfolgt prinzipiell über folgende Prozesse:

- Mechanische Abscheidung über Vorklärung
- Reduktion durch Inkorporation in die Biomasse (Kohlenstoffabbau)
- Reduktion durch Inkorporation in die Biomasse (Bio-P)
- Abscheidung über chemische Fällung

Die Abbildung 4 stellt die typischen Abbaugrade der einzelnen Verfahrensstufen dar.

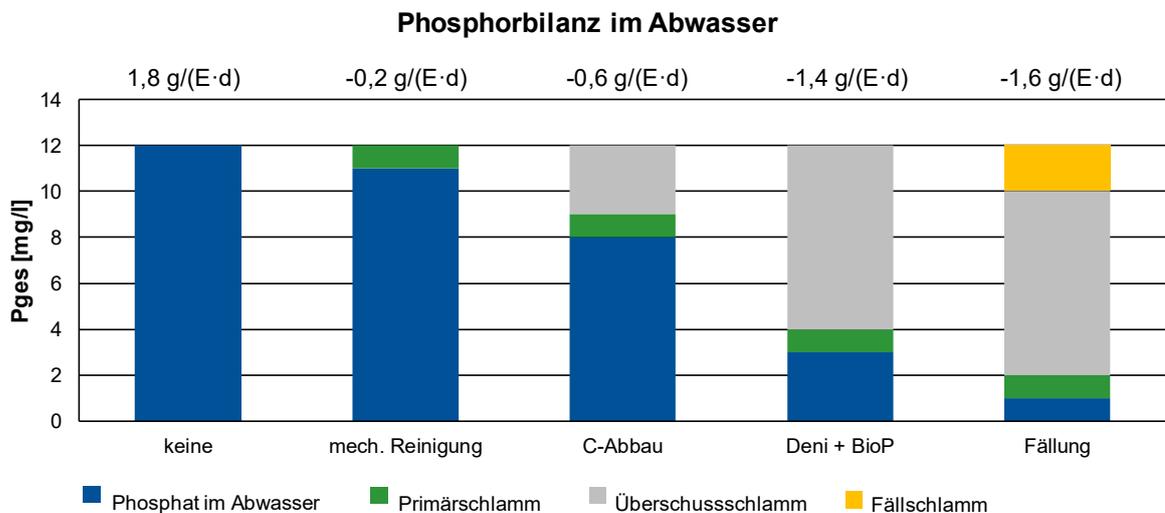


Abbildung 4 Phosphorbilanz im Abwasser nach (DWA, 2011)

Das vorliegende Phosphat lässt sich in verschiedene Fraktionen unterteilen. Neben dem partikulären Anteil und der gelöst fällbaren Fraktion, liegen auch gelöste inerte Phosphonate vor. Die einzelnen Phosphatfraktionen, ihre Bestimmung und die mögliche Elimination werden in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3 Phosphatarten und dessen Entfernung nach (Wassermann, 2016)

Art	Bestimmung	Entfernung durch
Orthophosphat	P-Messung ohne Kochen	Fällung, biologische Bindung
Polyphosphate	Nicht getrennt bestimmbar	Fällung, biologische Bindung (temperaturabhängig)
Phosphonate	$P_{ges} - P_{ortho} - P_{part}$	Nicht fällbar (biologisch abbaubar bei hoher HRT)
Partikuläres Phosphat	P_{ges} – P-Messung mit Kochen von filtrierter Probe	Sedimentation, Filtration, Flockung, biologische Bindung
Gesamt Phosphat	P-Messung mit Kochen	-

Anhand der Abbildung 4 lässt sich erkennen, dass auch durch eine Kombination der aufgeführten Verfahren keine vollständige Phosphatelimination möglich ist. Zum einen verbleibt ein nicht fällbarer gelöster Anteil im Abwasser. Zum anderen führt ein gewisser Feststoffabtrieb über die Nachklärung zu einer Erhöhung des partikulär gebundenen Phosphates im Ablauf der Kläranlage. Zusätzlich wird aus wirtschaftlicher Sicht oftmals nicht der gesamte Orthophosphat ($PO_4\text{-P}$) gefällt. So ergibt sich nach Böhler und Siegrist (2008) bei einer P_{ges} Ablaufkonzentration von 0,5 mg/l eine mittlere $PO_4\text{-P}$ Konzentration von 0,15 mg/l. Der nicht fällbare Anteil liegt bei 0,05 bis 0,1 mg/l, der partikulär gebundene Anteil durch den Feststoffabtrieb bei ca. 0,25 mg/l.

Um eine weitergehende Phosphatelimination zu erreichen kann zum einen die Fällmittelmenge erhöht werden, das Verfahren angepasst oder der Feststoffrückhalt im Ablauf der Kläranlage optimiert werden. Die Tabelle 4 spiegelt die möglichen Fällverfahren mit dem zugehörigen β -Wert und der zu erwartenden $P_{gelöst}$ Restkonzentration wieder.

Tabelle 4 Fällverfahren mit β -Wert und zu erwartender Restkonzentration von $P_{gelöst}$ (Gujer & Boller, 1979)

Verfahren	β -Wert	Rest $P_{gelöst}$
Vorfällung	2,0-3,0	0,5
Simultanfällung allein	2,0	0,5
Simultanfällung vor Flockungsfiltration	1,0	1,5
Zulauf zur Flockungsfiltration nach Simultanfällung	2,0 – 2,5	0,1

3.2 Betriebsdatenauswertung - Phosphat

Die Abbildungen Abbildung 5 und Abbildung 6 stellen die P_{ges} -Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Kläranlage dar. Es fällt auf, dass trotz Anstieg der P_{ges} Konzentration im Zulauf, die Ablaufkonzentration über das Jahr 2018 um 67 % gesunken ist.

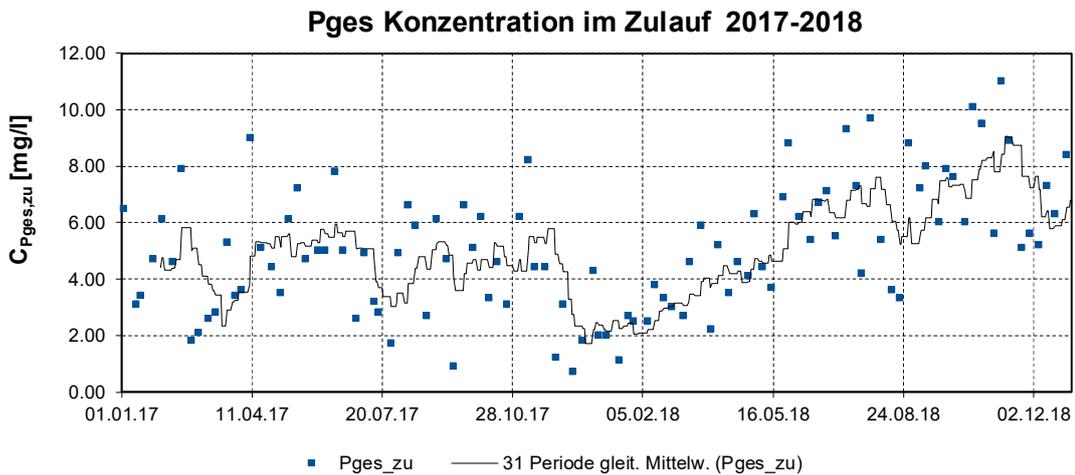


Abbildung 5 P_{ges} im Zulauf zur Kläranlage 207 - 2018

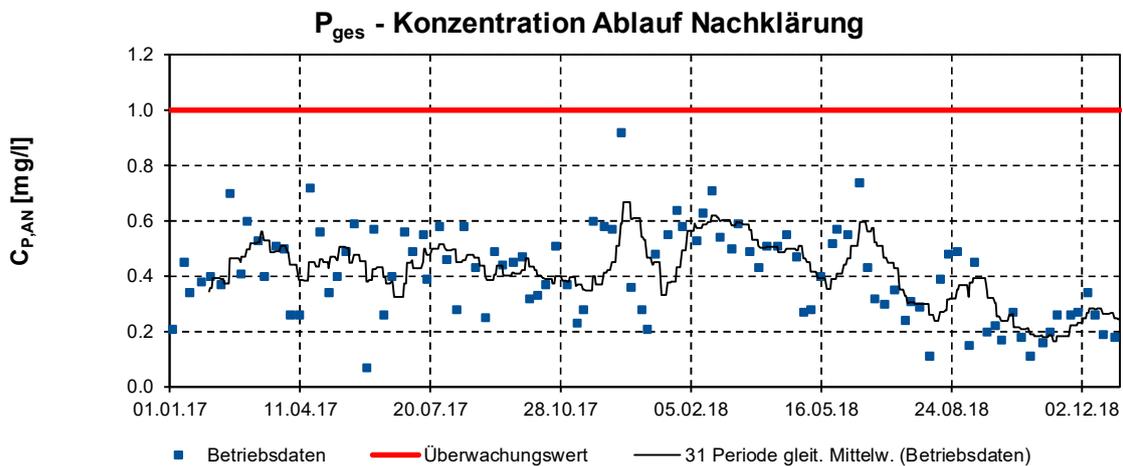


Abbildung 6 P_{ges} Konzentration im Ablauf der Nachklärung 2017 bis 2018

Dieser Trend lässt sich ebenfalls in der Abflussmenge erkennen. Hierbei reduzierte sich der Volumenstrom 2018 um 71 % (Abbildung 7). Der Rückgang des Volumenstromes kann zum einen durch den niedrigen Niederschlag 2018 und zum anderen durch den Bau neuer Trennkanäle erklärt werden. Im Gegensatz zu 2018, weisen die Zulaufdaten 2017 eine weitaus höhere Variabilität auf.

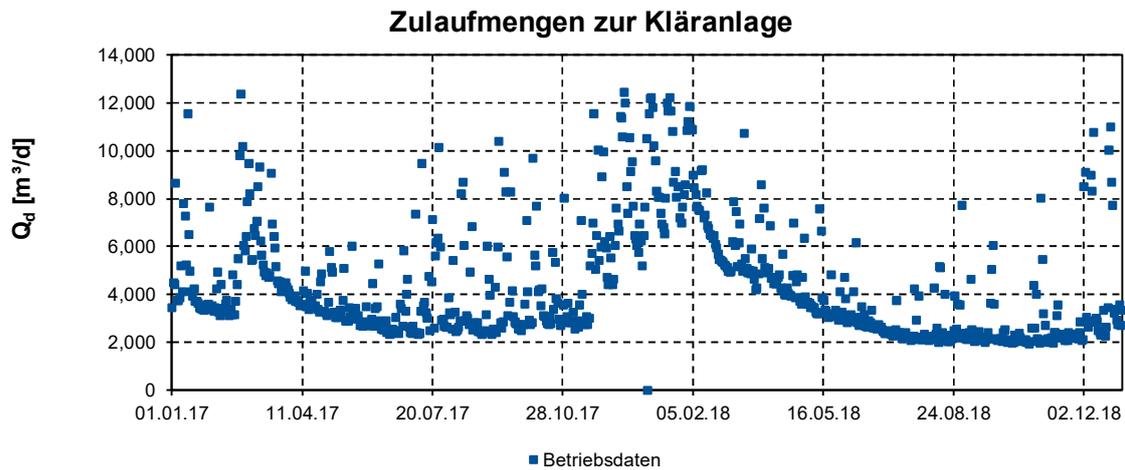


Abbildung 7 Verlauf der Zulaufmengen zur Kläranlage 2017-2018

Abbildung 8 stellt die P_{ges} Fracht im Zulauf der Kläranlage dar. Über das Zwei-Jahre Mittel (2017-2018) bleibt die P_{ges} -Fracht relativ konstant. Dies lässt darauf schließen, dass der Großteil des reduzierten Volumenstroms aus Fremdwasser bestand. Dies erklärt ebenfalls den Anstieg der P_{ges} -Konzentration.

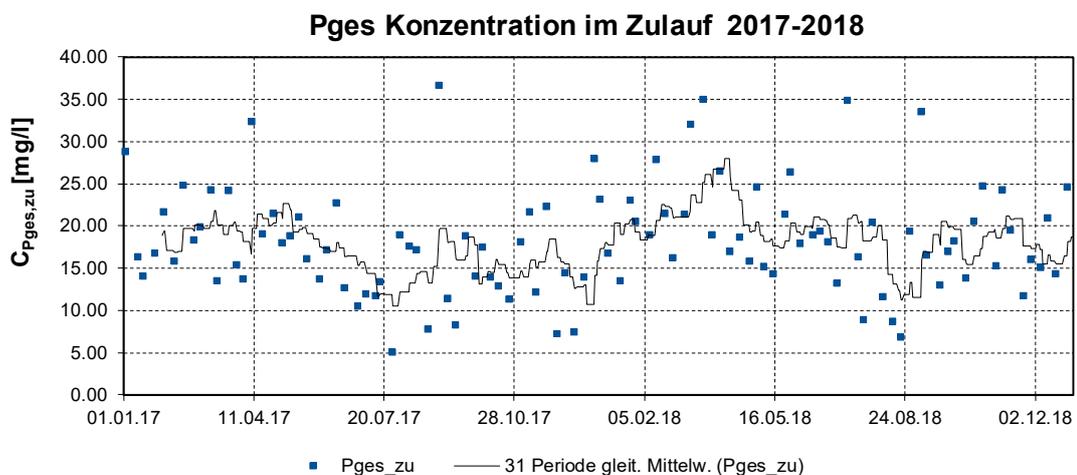


Abbildung 8 P_{ges} -Fracht im Zulauf zur Kläranlage 2017-2018

Der durchschnittliche Fällmittelverbrauch das Zwei-Jahre Mittel korreliert mit der P_{ges} -Zulaufkonzentration und weist ebenfalls keine große langzeitige Änderung auf (Abbildung 9).

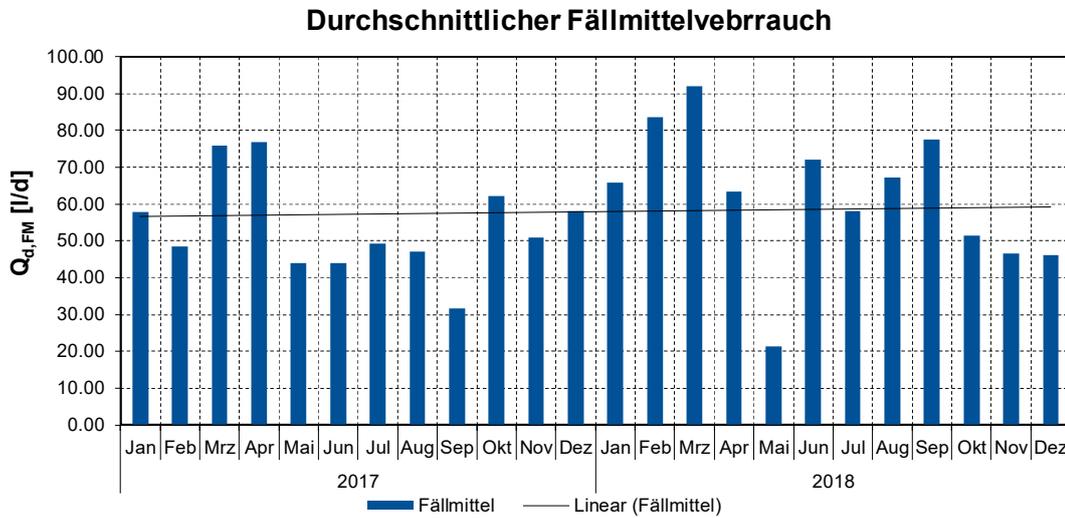


Abbildung 9 durchschnittlicher Fällmittelverbrauch 2018

Der starke Rückgang der P_{ges} -Konzentration im Ablauf der Kläranlage lässt sich somit nicht durch einen Mehrverbrauch an Fällmittel erklären. Bei gleichbleibenden Fällmittelverbrauch, stieg die P_{ges} -Elimination an (Abbildung 10). Ebenfalls fällt auf, dass bei einem hohen Zulaufvolumenstrom, die P-Elimination zusammenbricht.

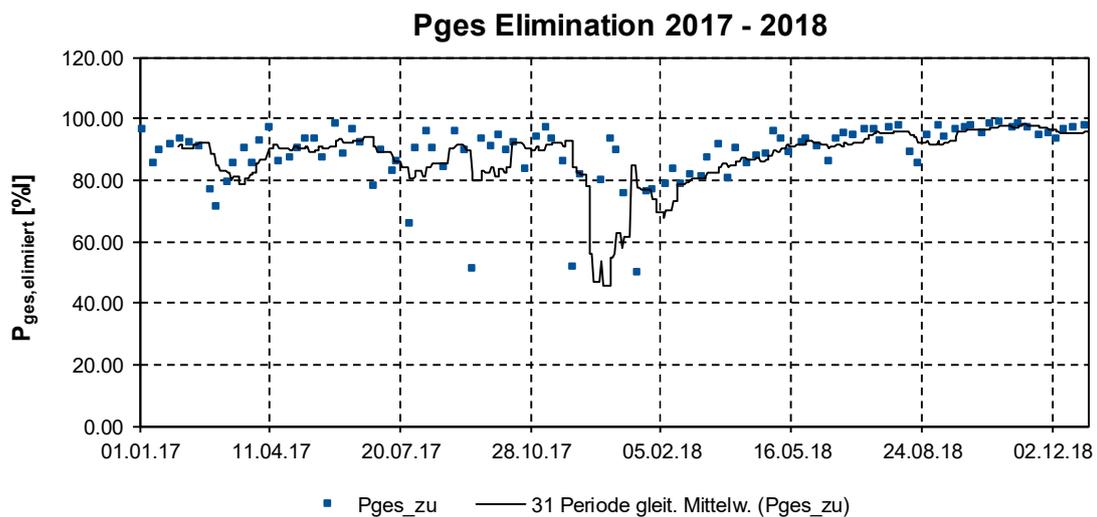


Abbildung 10 Verlauf der P_{ges} -Elimination 2017-2018

Eine höhere P_{ges} -Konzentration führt dazu, dass das Fällmittel weniger Nebenreaktionen eingeht und der Großteil des Fällmittels für die P-Reduktion zur Verfügung steht. So stellt die Abbildung 11 den errechneten β -Wert dar. Bei gleichbleibender P_{ges} -Fracht führte der Anstieg der P_{ges} -Konzentration zu einem besseren Ausnutzungsgrad des Fällmittels.

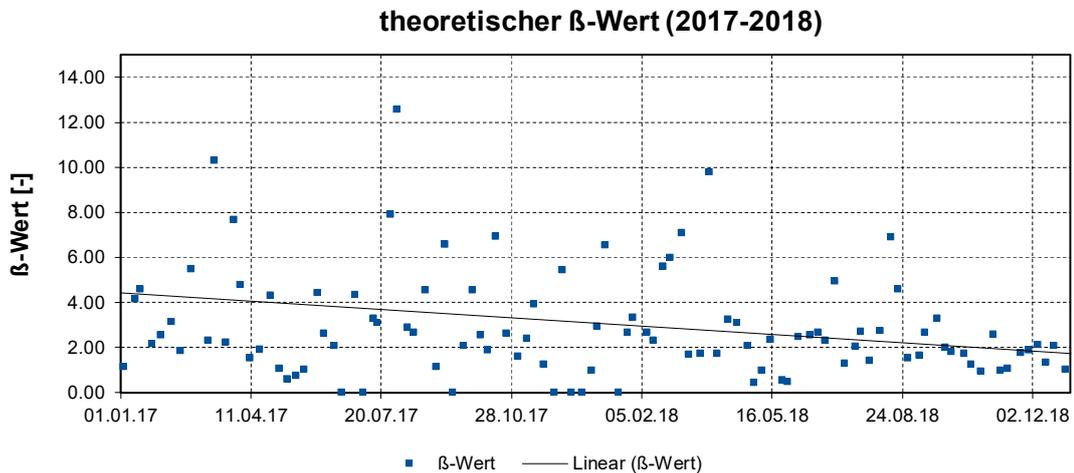


Abbildung 11 Berechneter β -Wert der chemischen Fällung für 2017 und 2018

Ein β -Wert von 4,0 kann für eine Simultanfällung als hoch eingestuft werden. Nach dem DWA-A 202 wird bei dieser Art von Fällung und einen Überwachungswert von 1,0 mg/l ein β -Wert von 1,2 als Anhaltspunkt angegeben. Dies zeigt, dass mitunter der hohe Fremdwasseranteil den Fällmittelbedarf stark erhöht.

Es ist anzumerken, dass trotz der kontinuierlichen Reduzierung der P_{ges} -Ablaufkonzentration über das Jahr 2018, der geforderte Betriebsmittelwert von < 0,2 mg/l bei 81 % der Messungen überschritten worden wäre.

3.3 Bewertung der Verfahrenstechnik zur P-Reduktion

Biologische P-Reduktion

Auf der Kläranlage Billerbeck wird keine gesonderte Bio-P betrieben. Auf Grund der vorgeschalteten Denitrifikation und der Kaskadierung kann jedoch eine gewisse Bio-P nicht ausgeschlossen werden.

Chemische P-Fällung

Aktuell erfolgt die P-Reduktion als Simultanfällung unter Einsatz von Natriumaluminat. Natriumaluminat ist ein basisches Fällmittel, welches besonders bei weichen Abwässern geeignet ist die eine geringe Pufferkapazität aufweisen. Gegenüber Eisenchlorid und Aluminiumsulfat weist es tendenziell einen geringeren Wirkungsgrad auf (Böhler & Siegrist, 2008). Dies zeigt sich ebenfalls in den errechneten β -Werten (vgl. Abbildung 11).

Die chemische Reaktion der Fällung erfolgt umso effizienter, je homogener und schneller das Fällmittel eingebracht werden kann. Hierzu bieten sich vor allem hydraulische Sprünge, Überfälle, Venturi-Kanäle oder Mischeinrichtungen mit schnelldrehenden Rührern an.

Auf der Kläranlage in Billerbeck erfolgt die Dosierung in den Zulaufkanal mehrere Meter vor dem Einlaufbauwerk des Rücklaufschlammes. Um einen höheren Ausnutzungsgrad des Fällmittels zu gewährleisten, sollte die Dosierstelle weiter in Richtung des Überfalls verlegt werden.



Abbildung 12 Dosierstelle des Fällmittels

Mechanische P-Reduktion

Die Daten des Intensivmessprogramms weisen auf eine sehr gut funktionierende Nachklärung hin. Im Mittel wurde eine Konzentration von abfiltrierbaren Stoffen (kurz. AFS) von 3,6 mg/l erreicht. Dies kann als sehr gering angesehen werden. Typische Werte liegen zwischen 10 und 20 mg/l. Die Konzentration an AFS hat einen signifikanten Einfluss auf den partikulären Phosphatanteil. Nach dem A-131 (2000) erhöht 1 mg/l AFS die P_{ges} Ablaufkonzentration um 0,02 bis 0,04 mg/l. Abbildung 13 stellt diesen Zusammenhang grafisch dar.

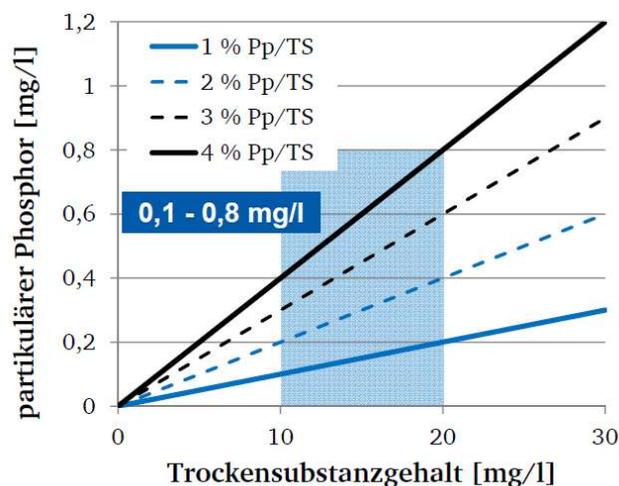


Abbildung 13 Einfluss der Feststoffe im Ablauf der Nachklärung auf den Gehalt an Phosphor im Ablauf (Cornel, 2016)

Die geringe AFS-Konzentration kann jedoch nicht kontinuierlich gehalten werden. Nach Aussage des Klärwerkspersonals kommt es durch eine ineffiziente Verteilung des Zulaufes immer wieder zu einem gewissen Feststoffabtrieb. Eine uneinheitliche Verteilung der AFS am Ablaufgerinne konnte beim vor-Ort Besuch bestätigt werden (Abbildung 14). Durch ein optimiertes Einlaufbauwerk (Königstuhl), z.B. durch Einbau von Leitblechen oder adaptiven Einlaufbauwerken, kann der abgesetzte Schlamm zudem als Flockenfilter dienen, was zu einer Reduzierung der Schwebstoffe im Klarwasserüberlauf führt.



Abbildung 14 Feststoffwolke in der Nachklärung

Wie hoch dieser Abtrieb ist kann, durch fehlende AFS-Messungen innerhalb des Betriebstagebuches, lediglich abgeschätzt werden. Die Abbildung 15 zeigt die theoretischen AFS Konzentrationen auf Basis der P_{ges} Betriebsdaten (Anteil P_{part} von P_{ges} : 22,2 %; siehe Tabelle 9).

Die berechneten Daten liegen auf einem ähnlichen Niveau wie die Daten der Messkampagne. Trotz der Feststoffwolken in der NK, kann von einer guten Abscheideleistung ausgegangen werden.

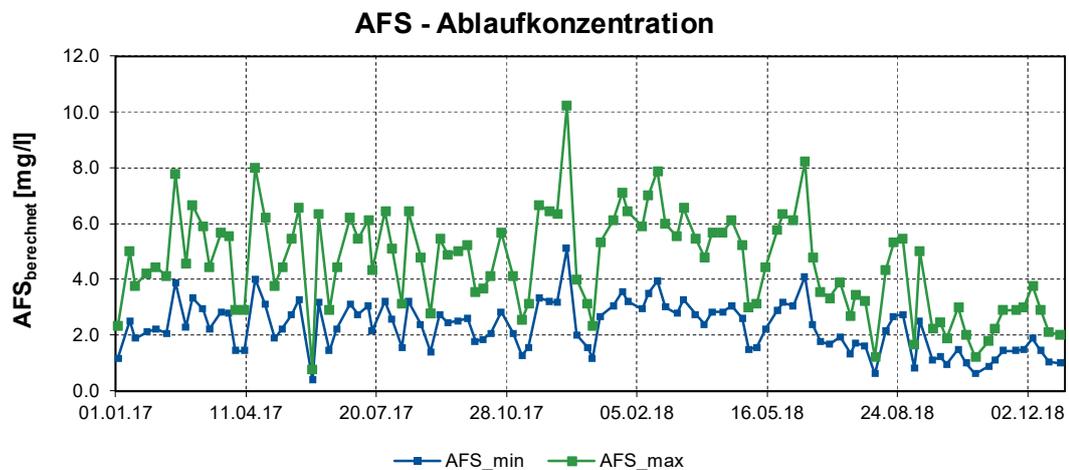


Abbildung 15 Berechnet AFS-Ablaufkonzentration anhand der P_{part} -Betriebsdaten

3.4 Verfahren zur erweiterten P-Reduktion

Um eine weitere Phosphatreduktion zu erzielen kann zum einen das gelöste, sowie das partikuläre Phosphat reduziert werden. Tabelle 5 fasst die möglichen Ansätze tabellarisch zusammen.

Tabelle 5 Möglichkeiten der weitergehenden Phosphor-Elimination nach Cornel et al. (2016)

partikulärer Phosphor	gelöster Phosphor
<i>Minimierung des Feststoffabtriebes</i>	<i>Optimierung der P-Elimination</i>
Verbesserung des Absetzverhaltens	Zwei-Punkt-Fällung
Optimierung der Nachklärung	Erhöhung der Fällmittelmenge
Betrieb einer Filtration	Einsatz / Optimierung BioP

Um einen geforderten Betriebsmittelwert von 0,2 mg/l kontinuierlich einzuhalten wird ein zusätzliches Filtrationsverfahren empfohlen. Je nach eingesetzter Technik können so Ablaufkonzentration von $\leq 0,1$ mg/l erreicht werden (Tabelle 6).

Tabelle 6 maximal erreichbare P_{ges} -Ablaufkonzentration nach Cornel et al. (2016)

Filtrationsverfahren	Mittlere P_{ges} Ablaufkonzentration [mg/l]
Mikrosieb / Tuchfilter	$\leq 0,2 - 0,3$
Sandfilter	$\leq 0,2$
Mikrofiltration	$\leq 0,1$
Siebung (deckschichtkontrolliert)	$\leq 0,1$

Die unterschiedlichen Filtrationsverfahren werden im Folgenden erläutert:

Mikrosieb

Mikrosiebe werden besonders bei regelmäßigen Grenzwertüberschreitungen der AFS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung eingesetzt. Als Material werden üblicherweise gewebte Polyestersiebfolien mit einer Spaltweite von 20 μm eingesetzt (Pinnekamp, 2012). Das mit Feststoffen beladene Abwasser wird von innen nach außen auf eine Siebtrommel geleitet.

Die Filtrerrückstände werden auf der Innenseite der Trommel zurückgehalten und müssen in regelmäßigen Abständen abgespült werden. Für die Spülung wird das Filtrat verwendet. Abbildung 16 stellt das Prinzip des Mikrosiebes schematisch dar.

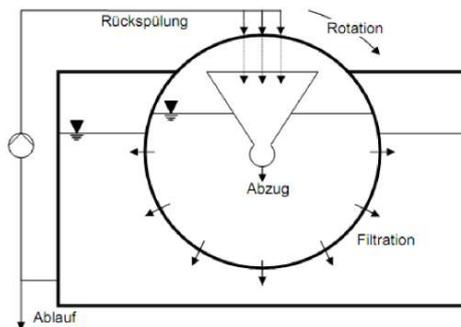


Abbildung 16 Prinzip eines Mikrosiebes nach (Pinnekamp, 2012)

Tuchfilter

Die Tuchfiltration besteht aus einer horizontal liegenden Trommel, die mit einem Mikrofasertuch bespannt ist und komplett im Abwasser getaucht ist. Der Filter wird von außen nach innen beschickt. Die abfiltrierbaren Stoffe lagern sich an den Fasern an und bilden eine Art Filterkuchen. Sobald der Filter voll beladen ist, werden die Fasern abgesaugt.

Nach Rummler (2015) zeigten sich bei der PAK- und Fällmittelzugabe stabilere Betriebszustände als beim Mikrosieb.

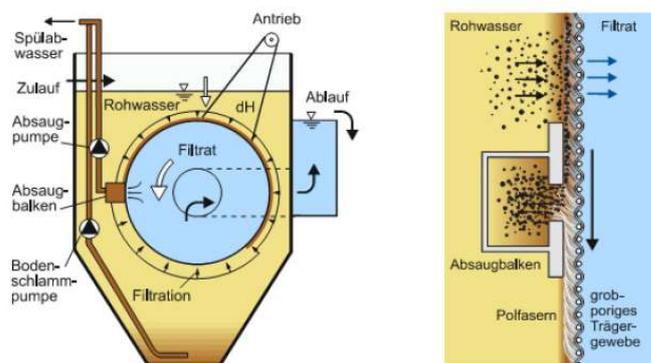


Abbildung 17 Prinzip eines Tuchfilters nach (Pinnekamp, 2012)

Kontinuierlich gespülte Filter

Kontinuierlich gespülte Filter sind Sandfilter, welche ohne Rückspülvorgänge auskommen. Das Abwasser durchströmt von unten nach oben das Filterbett. Die Feststoffe werden im Sand zurückgehalten. Im unteren Teil des Filters befördert eine Mammutpumpe den verschmutzten Sand mittels Druckluft in den oberen Bereich des Filters, in dem die Feststoffe ausgewaschen werden. Der gereinigte Sand sedimentiert anschließend wieder in das Filterbett.

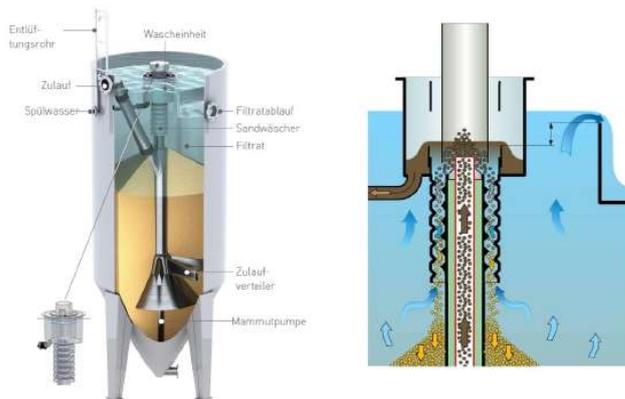


Abbildung 18 Prinzip eines Sandfilters in Rummeler (2015)

3.5 Betrachtete Varianten auf der Kläranlage Billerbeck

Anhand der örtlichen Gegebenheiten wurden folgende Varianten zur weiteren P-Reduktion näher betrachtet:

- Einsatz einer Zwei-Punkt Fällung ohne Inbetriebnahme des zweiten Nachklärbeckens
- Simultanfällung und Nachfällung mit der Reaktivierung des zweiten Nachklärbeckens
- Simultanfällung und Nachfällung inkl. einer Tuchfiltration zur Feststoffabscheidung

Im Folgenden werden die einzelnen Varianten grafisch dargestellt.

Zwei-Punkt Fällung:

Eine Zwei-Punkt Fällung nach Abbildung 19 erlaubt gleiche $P_{\text{gelöst}}$ Ablaufwerte wie eine Simultanfällung bei gleichzeitiger Reduzierung der Fällmittelmenge. Insbesondere bei angestrebten sehr tiefen Restkonzentrationen bezüglich $P_{\text{gelöst}}$ ergeben sich zunehmend größere prozentuale Ersparnisse (Böhler und Siegrist, 2008).

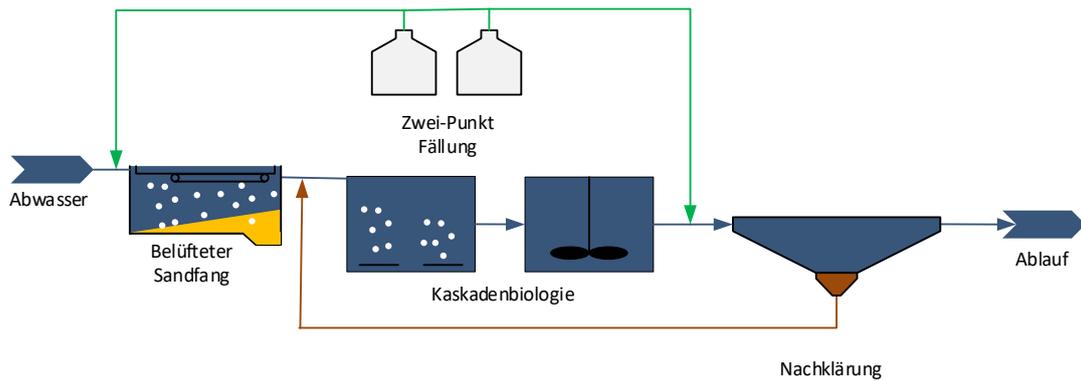


Abbildung 19 Einsatz einer Zwei-Punkt Fällung ohne Inbetriebnahme des zweiten Nachklärbeckens

Simultan- und Nachfällung mit Inbetriebnahme des zweiten Nachklärbeckens

Die Nachfällung ist ein nachgeschaltetes mit einer eigenen Fällungsstufe ausgestattetes Fäll-Verfahren. Im Allgemeinen ist der Fällmittelverbrauch für die Nachfällung höher als die die Simultanfällung, damit eine ausreichende Flockung erzielt werden kann (Böhler und Siergist, 2008).

Im vorliegenden Fall werden zwei wesentliche Varianten betrachtet. Zum einen kann das aktuell nicht genutzte Nachklärbecken als nachgeschaltete Sedimentationsstufe eingesetzt werden oder es wird eine zusätzliche Filtrationsstufe wie ein Tuch- oder Sandfilter installiert.

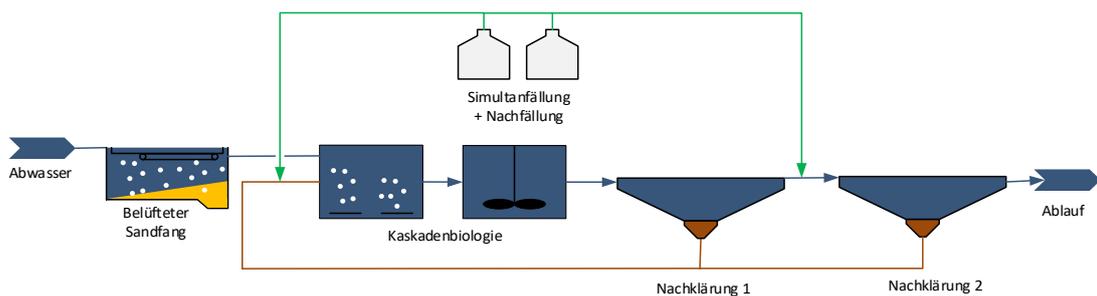


Abbildung 20 Simultanfällung und Nachfällung mit der Reaktivierung des zweiten Nachklärbeckens

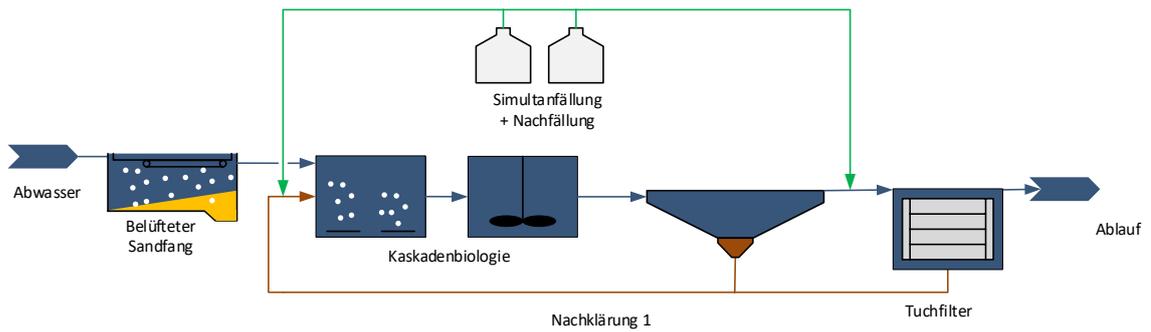


Abbildung 21 Simultanfällung und Nachfällung inkl. einer Tuchfiltration zur Feststoffabscheidung

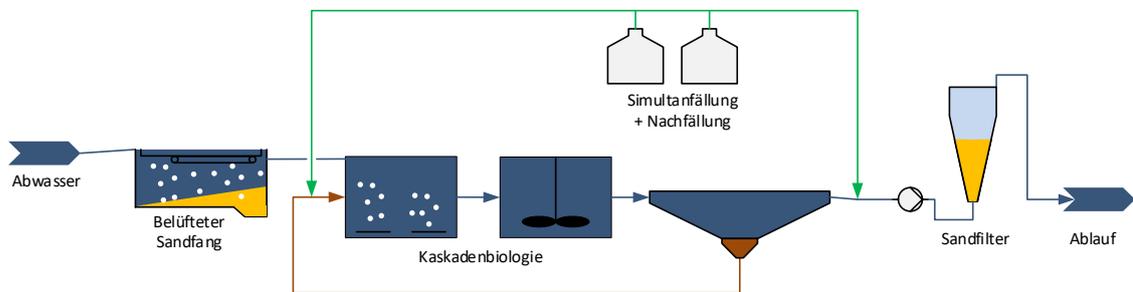


Abbildung 22 Simultanfällung und Nachfällung inkl. einer Sandfiltration zur Feststoffabscheidung

3.6 Vor-Ort Versuche zur erweiterten Phosphatreduktion

Um die Möglichkeiten der weiteren Phosphatelimination zu identifizieren, wurden vor Ort Versuche zur Phosphatfraktionierung sowie Fällungsversuche durchgeführt. Um die Grenzen der erweiterten chemischen Fällung zu ermitteln wurde vorab die Fraktionierung des Phosphates im Ablauf der Nachklärung analysiert.

Vorliegende Phosphatfraktion

Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen.

Tabelle 7 Ergebnisse der Messkampagne zur Phosphatfraktionierung

Phosphatfraktionierung	PO ₄ -P	P _{part}	P _{n,f}	P _{ges}	Einheit
19.02.2019	0,15	0,06	0,05	0,26	mg/l
20.02.2019	0,23	0,04	0,04	0,31	mg/l
21.02.2019	0,20	0,05	0,06	0,31	mg/l
22.02.2019	0,18	0,09	0,06	0,33	mg/l
Mittelwert	0,19	0,06	0,05	0,30	mg/l

Die Tabelle 8 stellt die Phosphatfraktionen der aktuell durchgeführten Messkampagne und des Intensivmessprogramms dar. Vergleichend werden die mittleren Phosphatanteile nach Böhler und Siegrist (2008) angegeben.

Tabelle 8 Anteile der Phosphatablaufkonzentration nach Böhler und Siegrist (2008) und auf der Kläranlage Billerbeck

Stoffgruppe	Böhler & Siegrist (2008)		Intensivmessprogramm		Messkampagne 2019	
	Konzentration	Anteil an P _{ges}	Konzentration	Anteil an P _{ges}	Konzentration	Anteil an P _{ges}
	[mg/l]	[%]	[mg/l]	[%]	[mg/l]	[%]
P _{ges}	0,5	100	0,43	100 %	0,30	100
P_{gelöst,ortho}	0,15	30 %	0,32	74 %	0,19	63 %
P _{gelöst,nicht fällbar}	(0,05) - 0,1	20 %	0,11	26 %	0,05	17 %
P _{partikulär}	0,25	50 %			0,06	20 %

Wie in Tabelle 8 zu erkennen, liegt der Anteil des $\text{PO}_4\text{-P}$ zum P_{ges} auf der KA Billerbeck deutlich höher, als bei den untersuchten Kläranlagen von Böhler und Siegrist (2008). Der partikuläre und der gelöste nicht fällbare Anteil weisen deutlich geringere Werte auf. Bei Beibehaltung der Verhältnisse könnte eine Reduzierung des $\text{PO}_4\text{-P}$ von 0,32 mg/l (Intensivmessprogramm) bzw. 0,19 mg/l (Messkampagne 2019) auf 0,15 mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$ (Böhler und Siegrist, 2008), die P_{ges} Konzentration auf 0,26 mg/l reduziert werden. Dies würde jedoch nicht ausreichen, um den angestrebten Betriebsmittelwert von 0,2 mg/l zu erreichen.

Ähnlich wie in der Betriebsdatenauswertung (vgl. Kapitel 3.2), lässt sich auch zwischen den Ergebnissen des Intensivmessprogrammes (2017) und der Messkampagne (2019) eine verbesserte Fällung erkennen. Die Summe aus dem nicht fällbaren gelösten und den partikulären Anteil ist bei beiden Kampagnen dieselbe. 2019 lag jedoch die $\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentration deutlich niedriger.

Auswertung des aktuellen Betriebes

Die Abbildung 23 sowie Tabelle 9 stellt die Phosphatelimination der vorhandenen Nachklärung bei aktueller Betriebsweise dar. Auch hier wird deutlich, dass die geforderte P_{ges} -Ablaufkonzentration von 0,2 mg/l nicht eingehalten wird. Die durchschnittliche P_{ges} -Elimination der Nachklärung liegt bei 23%. Der partikuläre Anteil wird um 67 % reduziert.

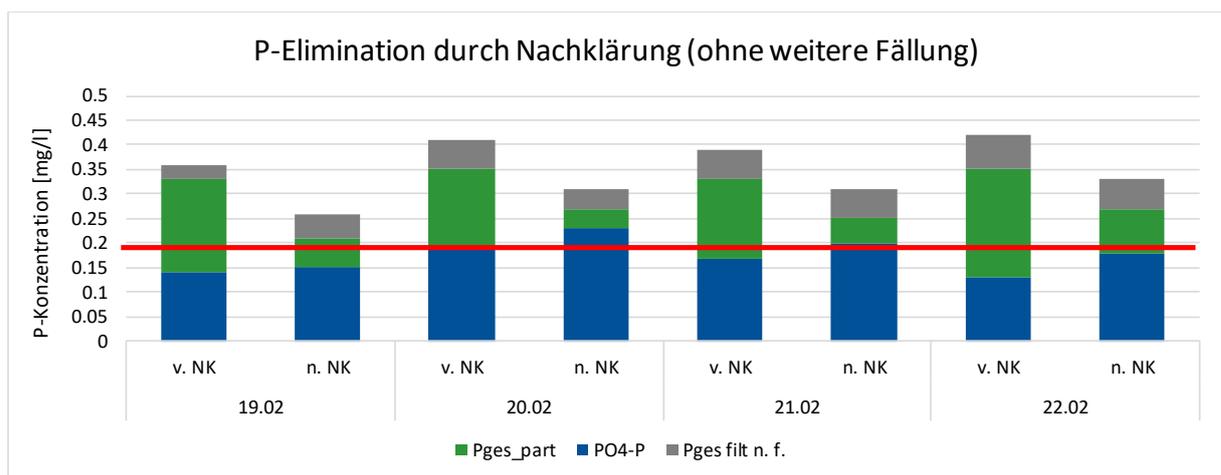


Abbildung 23 P-Elimination der Nachklärung bei aktueller Betriebsweise (v. NK = vor Nachklärung; n. NK = nach Nachklärung)

Bei einer vollständigen Feststoffabtrennung würde eine durchschnittliche P_{ges} -Konzentration von 0,21 mg/l erreicht werden (vgl. Tabelle 9). Der aktuelle Betrieb in Kombination mit einer erweiterten Feststoffabtrennung reicht somit wahrscheinlich nicht aus, um den geforderten Betriebsmittelwert einzuhalten. Da jedoch weiterhin 63 % des Phosphors als gelöstes und potentiell fällbares Orthophosphat vorliegt, könnte dieser Anteil ebenfalls weiter reduziert werden.

Tabelle 9 Phosphat-Fractionen im Ablauf der Kläranlage

Art Elimination	$PO_4\text{-P}$	P_{part}	$P_{n,f}$	P_{ges}	Einheit
Aktuell	0,16	0,06	0,05	0,27	mg/l
Vollständige Feststoffabtrennung	0,16	0,00	0,05	0,21	mg/l

Auffällig ist, dass die $PO_4\text{-P}$ Konzentration im Ablauf gegenüber dem Zulauf zur Nachklärung, durchschnittlich 21 % höher ist. Dies lässt darauf schließen, dass sich in der Nachklärung anaerobe Zonen bilden, die eine Rücklösung des Phosphates aus den Zellen bewirkt (Bio-P) oder auf Desorptionsprozesse zurückzuführen ist. Abbildung 24 stellt die P_{ges} -Konzentration im Verlauf der Zeit gemessen durch das Betriebspersonal dar.

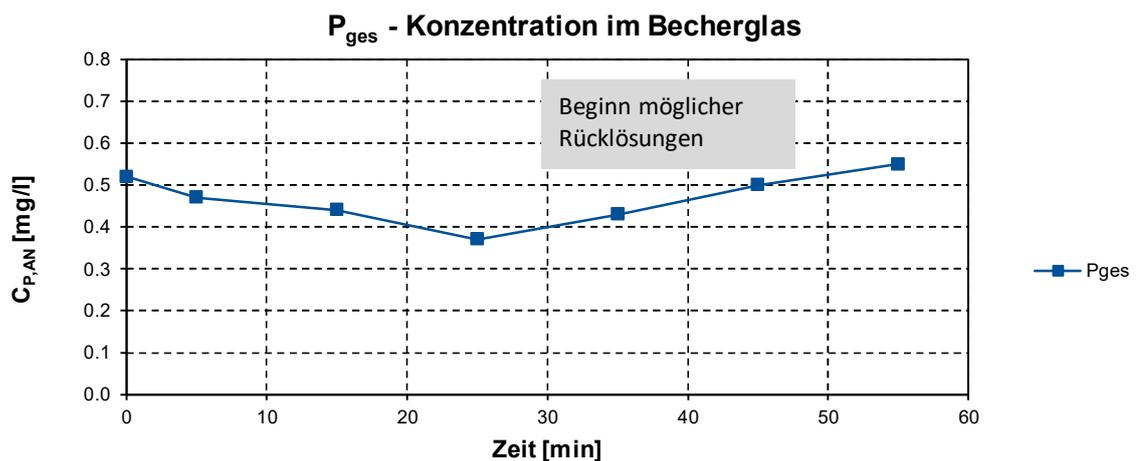


Abbildung 24 P_{ges} Konzentration nach Zugabe von Fällmittel

Ist die Rücklösung durch Bio-P Organismen zu erklären, kann ein höherer Sauerstoff-Sollwert möglicherweise die Rücklösung verringern. Durch einen höheren Sauerstoffgehalt wird die Wahrscheinlichkeit von anaeroben Zonen im Nachklärbecken reduziert. Als Begleiteffekt kann eine eventuelle wilde Denitrifikation vermieden werden.

Ermittlung einer geeigneten Fällmittelmenge

Um die Möglichkeiten der weitergehenden Phosphatelimination zu analysieren, wurden Versuche zur chemischen P-Elimination durch das Klärwerkspersonal vor Ort durchgeführt. In einer ersten Versuchsreihe wurden Proben aus dem Zulauf der Nachklärung entnommen und die Phosphatfraktionen bei unterschiedlichen Fällmittelmengen analysiert (siehe Abbildung 25).

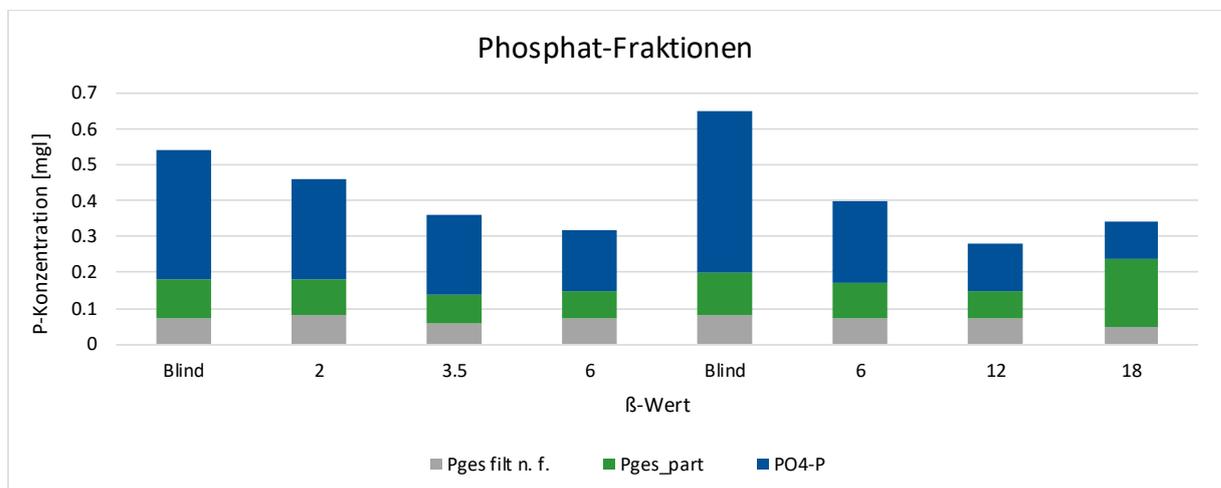


Abbildung 25 Resultierende Phosphatfraktionen bei unterschiedlichen β-Werten

Innerhalb der ersten Versuchsreihe (β-Wert 2; 3,5; 6) kann eine stetige Reduktion des Gesamtphosphates erkannt werden. Die Reduktion lässt sich durch den Rückgang der PO₄-P Konzentration erklären. Die ausgefällte Phosphatfraktion hat sich dabei abgesetzt. In der zweiten Versuchsreihe liegt die P_{ges}-Konzentration bei einem β-Wert von 6,0 deutlich höher als in der ersten. Die Gesamtelimination gegenüber der Blindprobe ist jedoch nahezu identisch (Reihe 1: 41 %; Reihe 2: 38 %). Durch eine Erhöhung der Fällmittelmenge auf einen β-Wert von 12 kann die PO₄-P Konzentration nochmals gesenkt werden.

Eine weitere Erhöhung auf einen β-Wert von 18,0 hat dagegen nur noch einen geringen Einfluss auf die PO₄-P Konzentration (siehe Tabelle 10). Der hohe Anteil des partikulären Phosphates in der dieser Versuchsreihe lässt darauf deuten, dass sich die Feststoffe weniger effektiv abgesetzt haben.

Tabelle 10 Eliminationsraten der jeweiligen Fraktion bezogen auf die Blindprobe

	Versuchsreihe 1			Versuchsreihe 2			
β-Wert	2	3.5	6	6	12	18	
EI*							
P _{ges}	14,8	33,3	40,7	38,5	56,9	47,7	%
PO ₄ -P	22,2	38,9	52,8	48,9	71,1	7,8	%
P _{part}	9,1	27,3	27,3	16,7	33,3	-58,3	%
	2	3.5	6	6	12	18	mg/l
P _{ges}	0,08	0,18	0,22	0,25	0,37	0,31	mg/l
PO ₄ -P	0,08	0,14	0,19	0,22	0,32	0,35	mg/l
P _{part}	0,01	0,03	0,03	0,02	0,04	-0,07	mg/l

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde für die weiteren Versuche, in Abstimmung mit dem Betriebspersonal, ein β-Wert von 6,0 festgelegt.

Ergebnisse der Simultanfällung

Um die Auswirkung einer erhöhten Fällmitteldosierung bei gleichbleibender Verfahrenstechnik zu analysieren, wurden an vier Tagen Proben aus dem Zulauf der Nachklärung genommen und eine zusätzliche Fällmittelmenge entsprechend eines β-Wertes von 6,0 hinzugegeben (Abbildung 24 und Tabelle 11).

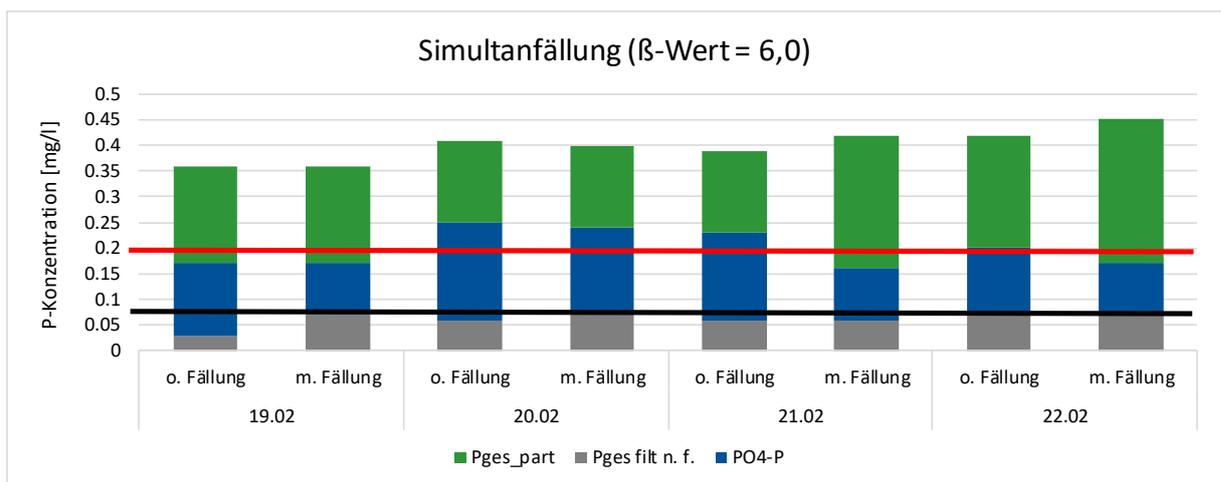


Abbildung 26 P-Elimination bei erhöhter Fällmitteldosierung (Simultanfällung)

Tabelle 11 Eliminationsraten der jeweiligen Fraktion bezogen auf die Blindprobe

Datum	19.02	20.02	21.02	22.02	MW ¹	
Elimination in %						
P _{ges}	0,0	2,4	-7,7	-7,1	-3,1	%
PO ₄ -P	35,7	15,8	41,2	23,1	23,1	%
P _{part}	0,0	0,0	-62,5	-27,3	-27,3	%
Elimination in mg/l						
P _{ges}	0,00	0,01	-0,03	-0,03	-0,03	mg/l
PO ₄ -P	0,05	0,03	0,07	0,03	0,03	mg/l
P _{part}	0,00	0,00	-0,10	-0,06	-0,06	mg/l

¹Mittelwert

Die Ergebnisse zeigen keine klare Aussage. Die Eliminationsraten des partikulären Phosphates deuten darauf hin, dass sich das ausgefällte Phosphat im Becherglas schlecht oder zu langsam abgesetzt hat.

Die durchschnittliche PO₄-P-Reduktion liegt bei 0,045 mg/l. Wird diese Reduktion auf die Betriebsdaten bezogen, wird eine PO₄-P Restkonzentration von 0,15 mg/l, entsprechend der durchschnittlichen Restkonzentration nach Böhler und Siegrist (2008) erreicht (vgl. Tabelle 8).

Um die P_{ges}-Ablaufwerte bei einer höheren Fällmitteldosierung abzuschätzen, wurde der partikuläre Anteil aus den Laborversuchen, entsprechend der vorhandenen Abscheideeffizienz der Nachklärung reduziert. Zusätzlich zeigt die Tabelle 12 die theoretische Ablaufkonzentration bei einer vollständigen Feststoffabtrennung.

Tabelle 12 Theoretische Ablaufkonzentration bei gesteigerter Simultanfällung

Art Elimination	PO ₄ -P	P _{ges,part}	P _{ges,filtr,nicht,fällbar}	P _{ges}	Einheit
Simultanfällung Versuch	0,11	0,22	0,07	0,40	mg/l
Simultanfällung mit NK ¹	0,11	0,08	0,07	0,26	mg/l
Vollständige Feststoffabtrennung	0,11	0,00	0,07	0,18	mg/l

¹Verrechnet mit einer 65%igen Eliminationsleistung der NK (bezogen auf part. P)

Ergebnisse der Nachfällung

Zusätzlich zur Erprobung der gesteigerten Simultanfällung wurden Proben aus dem Ablauf der Nachklärung entnommen und ebenfalls eine weitere Menge Fällmittel, entsprechend eines β -Wertes von 6,0 zugegeben. Anhand dieser Versuche sollte die mögliche Elimination einer Nachfällung eingeschätzt werden. Abbildung 27 und Tabelle 13 stellen die Versuchsergebnisse dar.

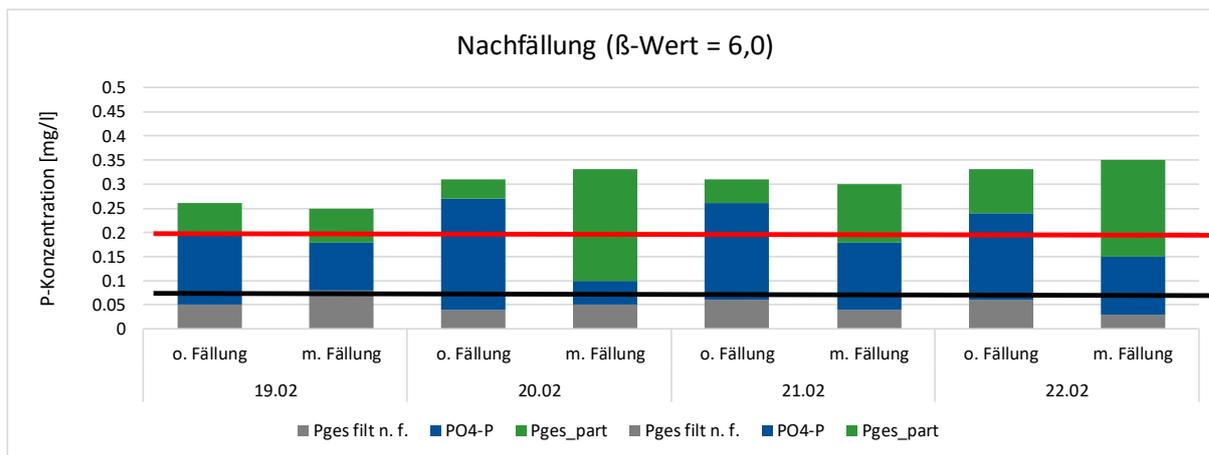


Abbildung 27 P-Elimination bei erhöhter Fällmitteldosierung (Nachfällung)

Es ist zu erkennen, dass ebenfalls keine effiziente Sedimentation des ausgefällten partikulären Phosphats im Becherglas erreicht wurde. Aus diesem Grund wird stellenweise eine negative Elimination erreicht. Die durchschnittliche PO_4 -P Reduktion durch die Nachfällung liegt bei 0,09 mg/l bzw. 0,06 mg/l (20.02.19 herausgerechnet).

Tabelle 13 Eliminationsraten der jeweiligen Fraktion bezogen auf die Blindprobe

Datum	19.02	20.02	21.02	22.02	MW ¹	
Elimination in %						
P_{ges}	3,8	-6,5	3,2	-6,0	-1,38	%
PO_4 -P	33,3	78,3	30,0	33,3	43,73	%
P_{part}	-16,7	-475,0	-140,0	-122,2	-188,48	%
$P_{n,f}$	-60,0	-25,0	33,3	50,0	-0,43	%

Tabelle 14 Eliminationsraten der jeweiligen Fraktion bezogen auf die Blindprobe

Datum	19.02	20.02	21.02	22.02	MW ¹	
Elimination in mg/l						
P _{ges}	0,01	-0,02	0,01	-0,02	-0,01	mg/l
PO ₄ -P	0,05	0,18	0,06	0,06	0,09	mg/l
P _{part}	-0,01	-0,19	-0,07	-0,11	-0,10	mg/l
P _{n,f}	-0,03	-0,01	0,02	0,03	0,00	mg/l

¹Mittelwert

Wird davon ausgegangen, dass durch eine nachgeschaltete Filtration das gesamte partikuläre Phosphat zurückgehalten wird, kann durch die Nachfällung eine P_{ges} Konzentration von < 0,2 mg/l erreicht werden (Tabelle 15).

Tabelle 15 theoretische Phosphatablaufwerte bei Einsatz einer Flockungsfiltration

Art Elimination	PO ₄ -P	P _{ges,part}	P _{ges,filtr,nicht,fällbar}	P _{ges}	Einheit
Nachfällung Versuch	0,10	0,16	0,05	0,31	mg/l
Nachfällung mit Filtration ¹	0,10-0,12	0,00	0,05	0,15-0,17	mg/l

¹Annahme eines vollständigen Feststoffrückhaltes

Fazit Laborversuche

Die zusätzliche PO₄-P Reduktion bei einem β -Wert von 6,0 liegt bei der Simultanfällung bei 0,045 mg/l. Innerhalb der Nachfällung kann diese auf 0,06 bis 0,09 mg/l erhöht werden. Wird die Nachfällung mit einer Filtration kombiniert, sollte der Betriebsmittelwert von 0,2 mg/l unterschritten werden können (vgl. Tabelle 15). Die mittlere Ablaufkonzentration lag 2018 bei 0,38 mg/l. Ob statt einer Filtrationsstufe, die Nutzung des zweiten Nachklärbeckens ausreicht, um den Betriebsmittelwert zu erreichen kann nicht eindeutig bestimmt werden.

4. Kosten der erweiterten Phosphatreduktion

Im Folgenden werden die im Kapitel 3.5 vorgestellten Varianten auf ihre Wirtschaftlichkeit geprüft:

Variante	Beschreibung
1	Erhöhte Fällmitteldosierung
2	Einsatz einer Zwei-Punkt Fällung ohne Inbetriebnahme des zweiten Nachklärbeckens
3	Simultanfällung und Nachfällung inkl. einer Tuchfiltration zur Feststoffabscheidung
4	Simultanfällung und Nachfällung inkl. eines Sandfilters zur Feststoffabscheidung
5	Simultanfällung und Nachfällung mit nachgeschaltetem zweiten Nachklärbecken

Innerhalb der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die Investitionskosten (Bautechnik, Maschinenteknik, EMSR-Technik), die Betriebskosten, sowie die resultierenden Jahreskosten betrachtet.

4.1 Investitionskostenschätzung – erweiterte Phosphatreduktion

In der folgenden Tabelle sind die Investitionskosten für die Varianten 1 bis 5 zusammengefasst. Die Kostenschätzungen bestehen aus spezifischen Kosten, Erfahrungswerten, sowie aus älteren Angeboten. Mit Hilfe der Preisindizes der Bauwirtschaft und der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte wurden die Investitionskosten angepasst (Destatis 2018a, 2018b)

Da bereits eine Fällmitteldosierstation vorhanden ist, fallen für die Variante 1 keine weiteren Investitionskosten an. Es liegt kein hydraulischer Längsschnitt vor, es wird davon ausgegangen, dass die Tuchfilter, im Gegensatz zu den Sandfiltern, im Freigefälle beschickt werden können und kein zusätzliches Pumpwerk benötigen. Wenn dies nicht der Fall ist muss ein zusätzliches Pumpwerk installiert werden. In diesem Fall würden die Investitionskosten der Tuch- und Sandfilter auf einem ähnlichen Niveau liegen. Die Instandsetzung des nicht genutzten Nachklärbeckens kann ohne genauere Zustandsklassifizierung nur grob eingeschätzt werden. Für die Variante zwei wurde eine zweite Fällmitteldosierstation eingeplant.

Tabelle 16 Investitionskostenschätzung für die erweiterte Phosphatreduktion

Anlage 1: Investitionskosten							
Pos.-Nr.	Text		Variante 1 erhöhte Dosierung	Variante 2 2-Punkt Fällung	Variante 3 Tuchfiltration	Variante 4 Sandfilter	Variante 5 2. Nachklärung
1	Bautechnik	EUR	0,00	0,00	234.200,00	145.000,00	265.000,00
2	Maschinentechnik	EUR	0,00	12.500,00	270.000,00	600.000,00	285.000,00
3	EMSR-Technik	EUR	0,00	27.500,00	115.000,00	80.000,00	80.000,00
Summe Herstellungskosten, netto		EUR	0,00	40.000,00	619.200,00	825.000,00	630.000,00
Nebenkosten pauschal 10 %		EUR	0,00	4.000,00	61.920,00	82.500,00	63.000,00
Summe Baukosten, netto		EUR	0,00	44.000,00	681.120,00	907.500,00	693.000,00
Mehrwertsteuer 19 %		EUR	0,00	7.600,00	117.648,00	156.750,00	119.700,00
Summe Baukosten, brutto		EUR	0,00	51.600,00	798.768,00	1.064.250,00	812.700,00

4.2 Betriebskostenschätzung – erweiterte Phosphatreduktion

In der folgenden Tabelle werden die Annahmen für die Betriebskosten der jeweiligen Variante zusammengefasst. Die betriebsgebundenen Kosten beinhalten Personal- und Wartungs-/Instandhaltungskosten. Die verbrauchsgebundenen Kosten setzen sich aus den Energie-, den Chemikalien- und den Schlammmentwässerungs- sowie Schlammentsorgungskosten zusammen.

Tabelle 17 Betriebskostenannahme für die Varianten 1 bis 5

Anlage 3: Betriebskosten						
Bezeichnung		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Kapitalkosten	EUR	0,00	4.020,80	53.038,61	77.230,88	52.913,89
Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	5.000,00	6.260,00	31.030,40	44.960,00	31.280,00
Personalkosten	EUR/a	5.000,00	5.000,00	12.500,00	12.500,00	12.500,00
Wartungs- und Instandhaltungskosten	EUR/a	0,00	1.260,00	18.530,40	32.460,00	18.780,00
Verbrauchsgebundene Kosten	EUR/a	11.379,26	5.862,95	6.008,36	11.079,40	9.156,00
Energiekosten	EUR/a	115,54	231,09	376,50	5.447,54	3.524,14
Energieverbrauch	kWh/a	683,28	1.366,56	2.226,50	32.214,90	20.840,59
spez. Preis	EUR/kWh	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Chemikalienkosten	EUR/a	5.837,24	2.918,62	2.918,62	2.918,62	2.918,62
zus. Fäll- / Flockungsmittel	Mg/a	38,91	19,46	19,46	19,46	19,46
spez. Preis	EUR/Mg	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
zus. Fäll- / Flockungsmittelkosten	EUR/a	5.837,24	2.918,62	2.918,62	2.918,62	2.918,62

Bezeichnung		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Schlammmentsorgungskosten	EUR/a	5.426,48	2.713,24	2.713,24	2.713,24	2.713,24
zus. Schlamm d. Fällung	Mg TS/a	60,90	30,45	30,45	30,45	30,45
Entsorgungskosten	EUR/Mg (OS)	89,10	89,10	89,10	89,10	89,10
Entwässerungsergebnis	%	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
Entsorgungskosten	EUR/a	5.426,48	2.713,24	2.713,24	2.713,24	2.713,24
Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	5.000,00	6.260,00	31.030,40	44.960,00	31.280,00
Verbrauchsgebundene Kosten	EUR/a	11.379,26	5.862,95	6.008,36	11.079,40	9.156,00
Gesamtsumme Betriebskosten, netto	EUR/a	16.379,26	12.122,95	37.038,76	56.039,40	40.436,00
Mehrwertsteuer	19%	3.112,06	2.303,36	7.037,36	10.647,49	7.682,84
Gesamtsumme Betriebskosten, brutto		19.491,32	14.426,31	44.076,13	66.686,89	48.118,84

Die Energiekosten setzen sich je nach Varianten aus Verbräuchen für Pumpen und Räumern bzw. Filterantrieben zusammen. Die Chemikalienverbräuche basieren auf den zusätzlichen Fällmittelverbrauch. Die Kosten für das Fällmittel entstammen aus aktuellen Ausschreibungsergebnissen. Die erhöhte Fällmitteldosierung führt zu einem Anstieg der Schlammproduktion. Die Preise für die Klärschlammmentsorgung sind in den vergangenen Jahren besonders stark gestiegen. Auf Grund der zusätzlichen Anlagentechnik wurde für die Varianten 3 bis 5 ein höherer Personalbedarf mit eingerechnet.

Die Energiekosten der Varianten 4 und 5 liegen auf Grund des nötigen Pumpwerks mit unterschiedlichen Förderhöhen deutlich höher, als bei den anderen Varianten.

Für Wartung und Instandhaltung wurden folgende Prozentsätze der Netto-Investitionskosten angesetzt:

Bautechnik: 1,0 % der Investitionskosten/a

Maschinenteknik: 4,0 % der Investitionskosten/a

E-/MSR-Technik: 2,0 % der Investitionskosten/a

Die betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten liegen für die Varianten 3 und 5 auf einem ähnlichen Niveau. Auf Grund der hohen Fällmittelmenge liegen die verbrauchsgebundenen Kosten für die Variante 1 am höchsten.

4.3 Jahreskostenschätzung – erweiterte Phosphatreduktion

Die Jahreskosten ergeben sich aus den betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten, sowie den Kapitalkosten. Die Kapitalkosten wurden anhand folgender Vorgaben berechnet:

Betrachtungszeitraum:	30 a
Nutzungsdauer Bautechnik:	30 a
Nutzungsdauer Maschinenteknik:	15 a
Nutzungsdauer E-/MSR-Technik:	15 a
Realzinssatz:	3 %

Die günstigsten brutto Jahreskosten wurden für die Variante 1 mit ca. 19.491 EUR/a und Variante 2 mit 19.211 EUR/a, brutto ermittelt. Die Varianten 3 bis 5 liegen mit 107.192, 158.592, 111.086 EUR/a, brutto deutlich höher. Der größte Anteil liegt im Bereich der kapital- und den betriebsgebundenen Kosten.

Die niedrigsten verbrauchsgebundenen Kosten werden bei der Variante 2 erreicht. Dadurch, dass innerhalb der Variante 1 die nötige Verfahrenstechnik bereits vorhanden ist, entfallen in die Investitionskosten. Die Abbildung 28 stellt die Jahreskosten bestehend aus Kapitalkosten, betriebsgebundenen Kosten und verbrauchsgebundenen Kosten zusammen.

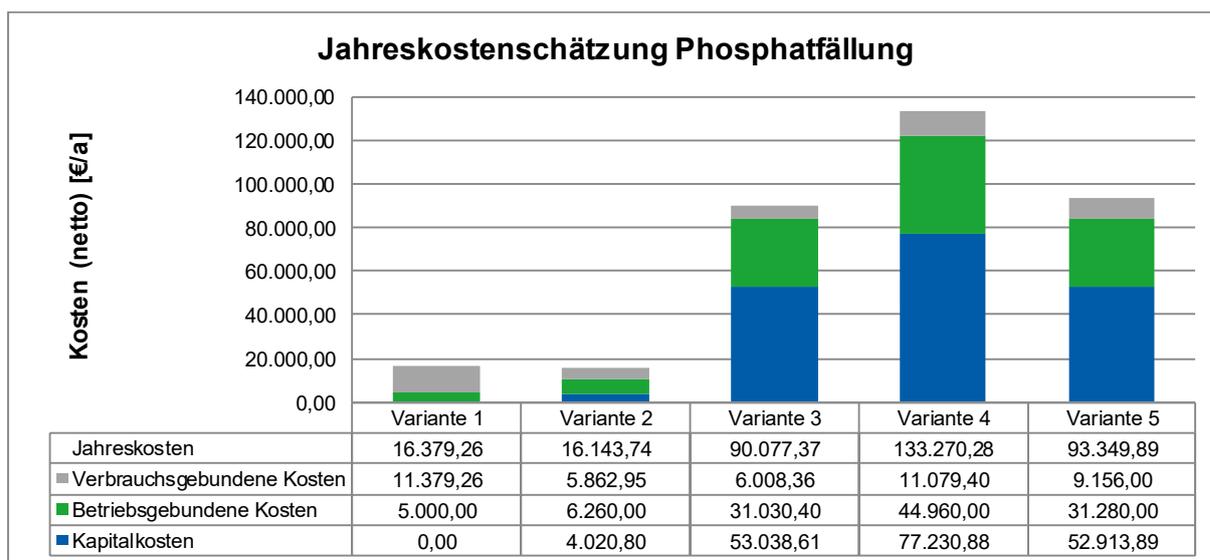


Abbildung 28 Jahreskostenschätzung der einzelnen Varianten

4.4 Bewertung der Varianten

Um die Varianten zu bewerten wurde zuzüglich der Ermittlung der Jahreskosten eine Bewertungsmatrix mit einer spezifischen Gewichtung aufgestellt. Folgende Kriterien werden in der Bewertung berücksichtigt:

- Jahreskosten
- Reinigungsleistung P_{ges}
- Erfahrungen / Referenzen
- Betriebs- und Wartungsaufwand
- Betriebssicherheit

Jahreskosten

Die Jahreskosten wurden mit 30 % gewichtet. Wie in Kapitel 4.3 dargelegt, sind die Jahreskosten bei Variante 1 und 2 am geringsten, bei den Varianten 4 und 5 am höchsten. Die Varianten 1 und 2 erhalten aufgrund der geringeren Kosten jeweils 5 Punkte, die Varianten 3 und 5 jeweils 2,5 Punkte und die Variante 4 insgesamt 2 Punkte.

Reinigungsleistung P_{ges}

Die Einhaltung des P_{ges} -Betriebsmittelwertes wird mit einer Wichtung von 40 % als wichtigstes Entscheidungskriterium eingestuft. Auf Grund der erweiterten Verfahrenstechnik und den wahrscheinlich höchsten Feststoffrückhalt erzielen die Varianten 3 und 4 die höchste Wertung. Für die Variante der Reaktivierung und Nachschaltung des Nachklärbeckens kann keine eindeutige Aussage über die Abscheideleistung getroffen werden. Zudem besteht hierbei die Gefahr, dass bei höheren Aufenthaltszeiten eine P-Rücklösung stattfindet und dadurch der Ablaufwert ansteigt. Aus diesem Grund erhält diese Variante lediglich 3,5 Punkte. Die Varianten 1 und 2 werden ähnliche Ablaufwerte erreichen. Jedoch kann hier nicht garantiert werden, dass der zu erzielende Betriebsmittelwert eingehalten werden kann. Aus diesem Grund erhalten diese beiden Varianten 2 Punkte.

Erfahrungen / Referenzen

Die Erfahrungen wurden mit 10 % gewichtet. Da die Simultanfällung und Zwei-Punktfällung Praxis sind erhalten diese Varianten jeweils 5 Punkte. Alle weiteren Verfahren erhalten 4 Punkte.

Betriebs- und Wartungsaufwand

Der Betriebs- und Wartungsaufwand ist für die zusätzliche Fällmitteldosierung und der Zwei-Punkt Fällung am geringsten und wird ähnlich hoch bewertet. Für die Varianten 4 und 5 werden, u.a. auf Grund durch den Betrieb eines Pumpwerkes, jeweils die geringsten Punkte vergeben.

Betriebssicherheit

Aufgrund der erweiterten Technik erhalten die Varianten 3-5 3 Punkte für die Betriebssicherheit, die Varianten 1 und 2 jeweils 4 Punkte.

Kriterium	Wichtung	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4		Variante 5	
		Punkte	gewichtet								
Jahreskosten	0,30	5,00	1,50	5,00	1,50	2,50	0,75	2,00	0,75	2,50	0,75
Reinigungsleistung NH4	0,40	2,00	0,80	2,00	0,80	5,00	2,00	5,00	2,00	3,50	1,40
Erfahrungen / Referenzen	0,10	5,00	0,50	5,00	0,50	4,00	0,40	4,00	0,40	4,00	0,40
Betriebs- und Wartungsaufwand	0,10	5,00	0,50	4,50	0,45	3,50	0,35	2,50	0,25	2,50	0,25
Betriebssicherheit	0,10	4,00	0,40	4,00	0,40	3,00	0,30	3,00	0,30	3,00	0,30
Summe	1,00	21,00	3,70	20,50	3,65	18,00	3,80	16,50	3,55	15,50	3,10

Tabelle 18 Bewertung der Varianten zur erweiterten Phosphatentfernung

Die höchste Punktzahl erreicht die Variante des Tuchfilters, gefolgt von der erhöhten Fällmitteldosierung. Es wird vermutet, dass die einfache Fällung den geforderten Betriebsmittelwert von 0,2 mg/l nicht einhalten kann. Nach den Ergebnissen der Laborversuche würden die Ablaufwerte um 0,08 mg/l höher liegen. Somit ist zu entscheiden, ob die Reduzierung der Phosphatablaufkonzentration um ca. 0,08 mg/l die Investition- und Betriebskosten einer nachgeschalteten Flockungsfiltration rechtfertigen.

Es wird empfohlen, die aktuelle Dosierstelle zu prüfen und ggf. umzusetzen (vgl. Kapitel 3.3). Anschließend sollte die Fällmitteldosierung angehoben werden. Die großtechnischen Versuche können einen genaueren Aufschluss auf die Machbarkeit der Zielwertehaltung geben.

5. Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Senkung des NH₄-N Betriebsmittelwerts

Im folgendem werden die möglichen Verfahren zur weiteren NH₄-N Reduktion auf der Kläranlage Billerbeck erläutert.

5.1 Grundlagen zur erweiterten Stickstoffreduktion auf Kläranlagen

Um die Ammoniumkonzentration weiter zu reduzieren, können folgende Verfahren eingesetzt werden:

- Erhöhung des Sauerstoffsollwertes
- Anhebung des aeroben Schlammalters
- Prozesswasserbehandlung des anfallenden Zentrates
- Zentratabwirtschaftung

5.1.1 Anpassung des Sauerstoffsollwertes und der TS-Konzentration

Eine Anhebung des Sauerstoffsollwertes und der TS-Konzentration können zu einer verbesserten Nitrifikation führen. Zum einen führt der höhere Sollwert zu einer verbesserten Verfügbarkeit des Sauerstoffes, zum anderen ermöglicht ein höherer TS und somit ein gestiegenes Schlammalter zu einem vermehrten Wachstum an Nitrifikanten.

5.1.2 Prozesswasserbehandlung (PWB)

Die Prozesswasserbehandlung dient zur Reduktion der Stickstofffracht aus dem Zentratswasser. Hierbei können unter anderem folgende Verfahren eingesetzt werden:

Biologische Verfahren

- Nitrifikation / Denitrifikation
- Nitritation/Denitritation
- Deammonifikation

Chemisch / physikalische Verfahren

- Ammoniakstrippung
- ~~Struvitfällung~~

Im vorliegenden Bericht wurde der Fokus auf die biologischen Verfahren gelegt.

Nitrifikation und Denitrifikation

Da der CSB im Zentratwasser hauptsächlich aus inertem CSB besteht, ist das C/N-Verhältnis für die Denitrifikation ungünstig. Somit ist eine zusätzliche Kohlenstoffquelle für die Denitrifikation notwendig. Zudem wird im Vergleich zu den anderen biologischen Verfahren für die Nitrifikation viel Sauerstoff verbraucht.

Nitritation und Denitritation

Bei der Nitritation wird NH_4 nur bis zum Nitrit NO_2 statt Nitrat NO_3 umgewandelt. Im zweiten Schritt wird bei der Denitritation das entstandene Nitrit in elementaren Stickstoff umgewandelt.

Durch dieses Verfahren kann der Sauerstoffbedarf bis zu 25 % und der Kohlenstoffbedarf, in Vergleich zu einer klassischen Nitrifikation / Denitrifikation bis zu 40 % gesenkt werden (Fimml, 2010).

Deammonifikation

Bei der Deammonifikation wird lediglich etwa die Hälfte des vorhandenen NH_4 zu NO_2 oxidiert. Unter anoxischen Bedingungen wird anschließend das restliche NH_4 und das entstandene NO_2 zusammen zu N_2 reduziert. Gegenüber der klassischen Nitrifikation / Denitrifikation wird somit bis zu 60 % des Sauerstoffbedarfs eingespart. Der Kohlenstoffbedarf geht gegen Null.

Tabelle 19 fasst den nach Verfahren unterschiedlichen Kohlenstoffbedarf, die Überschuss-schlammproduktion, sowie den Sauerstoff- und Energiebedarf zusammen.

Tabelle 19 Gegenüberstellung wesentlicher Betriebskennzahlen unterschiedlicher Prozesswasserbehandlungsmethoden (Beier, 2018)

Verfahren	C-Bedarf	ÜSS	O ₂ -Bedarf	Energiebedarf
	BSB ₅ /N	TS/gN	kgO ₂ /kgN	kWh/kgN
Nitrifikation/Denitrifikation	~5,5	1,8	4,30 ¹	3,5-5,7
Nitritation/Denitritation	~3,6	1,2	3,40 ¹	2,5 ²
Deammonifikation	0	0,23	1,50	< 1,5

¹Einsatz externer C-Quelle, Sauerstoffbedarf darf nicht der Denitrifikation gutgeschrieben werden; ²abgeschätzt aus großtechnischen Daten

5.1.3 Zentraltbewirtschaftung

Eine Zentraltbewirtschaftung erlaubt es das Zentralt so in die Biologie zu geben, dass die Belastung über den Tag relativ konstant gehalten wird. Dadurch wird verhindert, dass bei hohen Zulaufkonzentrationen, die Nitrifikation nicht zusätzlich durch die Rückbelastung belastet wird. Dies erlaubt eine vergleichmäßigte $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufkonzentrationen. Für eine Zentraltbewirtschaftung sollte die Zentraltmenge gemessen werden, sowie häufigere TN_b -Zulaufganglinien erstellt und $\text{NH}_4\text{-N}$ Zentraltanalysen durchgeführt werden.

5.2 Betriebsdatenauswertung der Stickstoffelimination und Bewertung des Betriebsmittelwertes

Zulauf:

Die Stickstoffzulaufmenge (TN_b) liegt im Mittel bei 148 kg/d. Es kann ein leichter Rückgang, sowie eine Saisonalität erkannt werden. Es findet keine Messung des $\text{NH}_4\text{-N}$ im Zulauf statt.

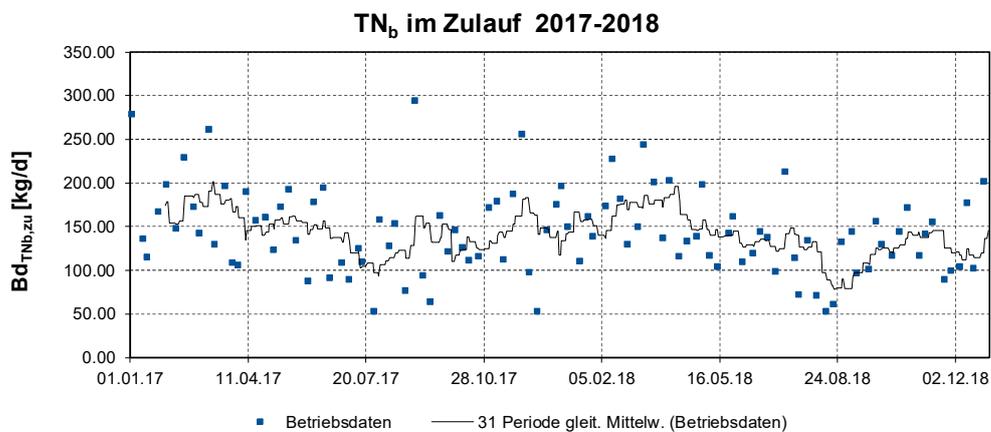


Abbildung 29 TN_b Fracht im Zulauf zur Kläranlage 2017-2018

Ablauf:

Die $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufkonzentration lag im Bezugszeitraum 2017 und 2018 bei 0,84 mg/l. Auf Grund der niedrigeren Abwassertemperatur in den Wintermonaten überschreitet, die $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufkonzentration stellenweise den zugehörigen Überwachungswert. Dieser ist jedoch erst ab einer Temperatur von $> 12\text{ °C}$ gültig.

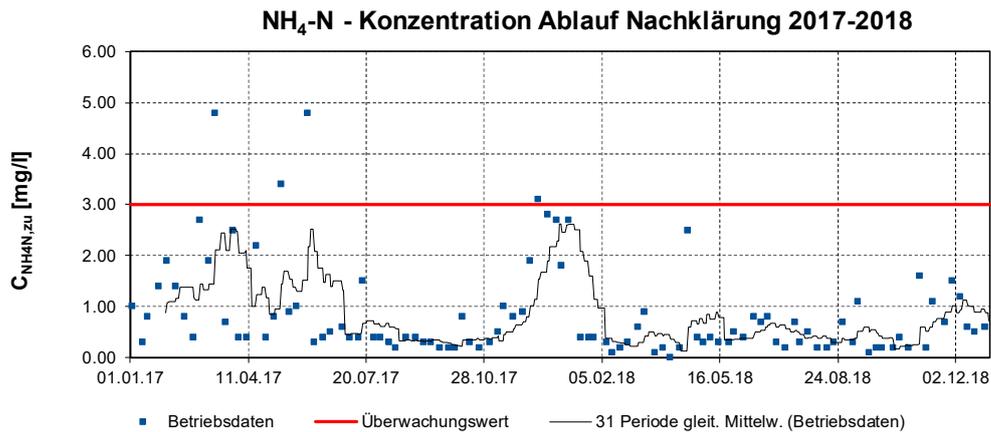


Abbildung 30 NH₄-N Konzentration im Ablauf der Nachklärung 2016-2018

Plausibilitätsprüfung der gemessenen und berechneten NH₄-N-Konzentrationen:

Der durch die Bezirksregierung Münster geforderte Betriebsmittelwert wird anhand folgender Mischungsrechnung ermittelt:

$$C_{NH_4-N,Gew,uh} = \frac{Q_{KA} \cdot C_{NH_4-N,KA} + Q_{Gew} \cdot C_{NH_4-N,Gew,oh}}{Q_{KA} + Q_{Gew}}$$

mit

$C_{NH_4-N,Gew,uh}$	Konzentration im Gewässer unterhalb der Einleitung (mg/l)
$C_{NH_4-N,KA}$	Konzentration im Ablauf der Kläranlage (mg/l)
$C_{NH_4-N,Gew,oh}$	Konzentration im Gewässer oberhalb der Einleitung (mg/l)
Q_{Gew}	mittlerer Abfluss im Gewässer (Q183) oberhalb der Einleitung (l/s)
Q_{KA}	Abfluss aus der Kläranlage (l/s)

Hierbei wurde für die Kläranlage ein Q_{KA} von 44 l/s und für das oberhalb liegende Gewässer ein $Q_{Gew,oh}$ von 111 l/s angenommen. Die Überprüfung zeigt, dass die theoretische Konzentration unterhalb der Einleitstelle und die gemessenen Werte sehr gut korrelieren (siehe Abbildung 31).

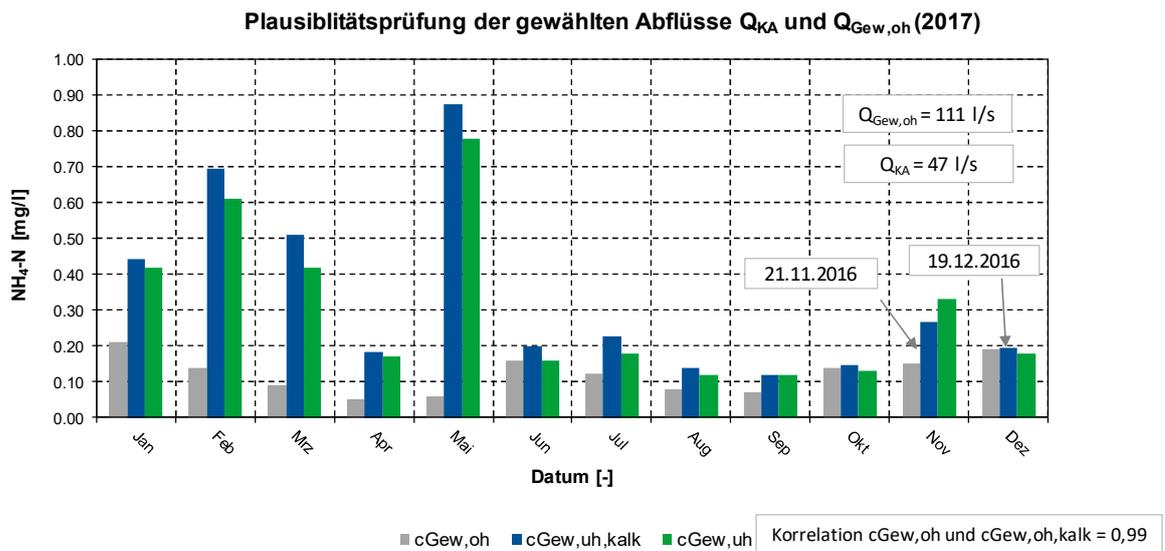


Abbildung 31 Plausibilitätsprüfung der gewählten Abflüsse $Q_{Gew,oh}$ und Q_{KA}

Einfluss der Kläranlage Billerbeck auf die NH_4-N Gewässerkonzentration:

Die Abbildung 32 stellt die einzelnen Konzentrationen der Messkampagne dar. Der Einfluss der Kläranlage auf die NH_4-N Konzentration der Berkel ist, besonders in den Wintermonaten, klar zu erkennen.

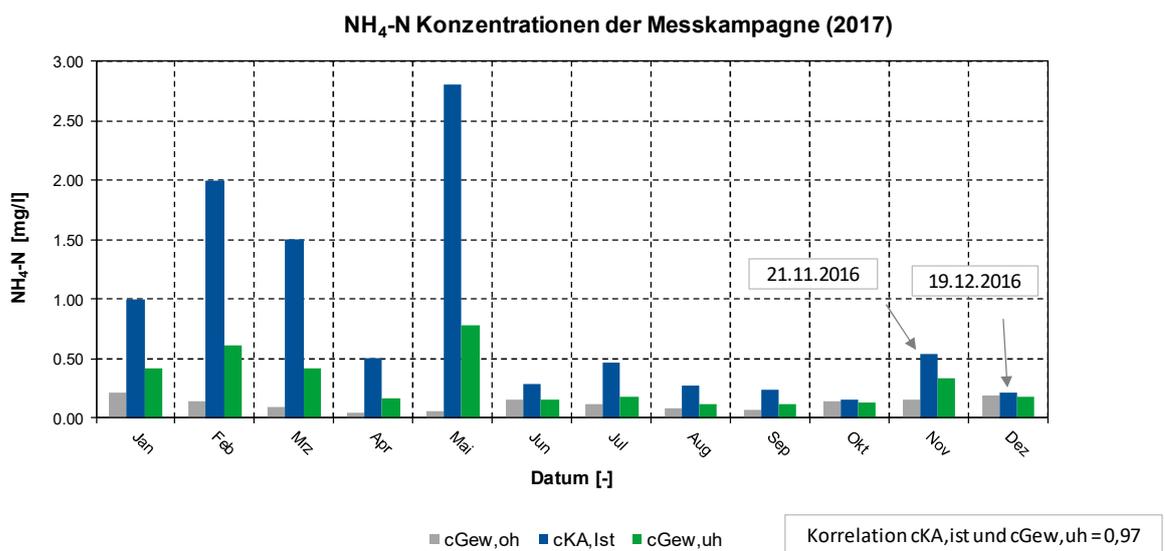


Abbildung 32 NH_4-N Konzentrationen der Messkampagne

Eignung des Betriebsmittelwertes:

Um die Konzentration unterhalb der Einleitstelle zu reduzieren, soll die $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufkonzentration der Kläranlage im Mittel bei 0,5 mg/l liegen. Die Genehmigung fordert die Beprobung des Ablaufes als qualifizierte Stichprobe. In Übereinstimmung mit Böhler und Siegrist (2008) ist anzumerken, dass ökologisch die Einhaltung des Grenzwertes bei einer qualifizierten Stichprobe ungeeignet ist, da für das Algen und Pflanzenwachstum die mittleren Frachten von Bedeutung sind. Da die einzelnen Nährstoffkonzentrationen über den Tag stark schwanken, kann je nach Zeitpunkt der Probenahme, eine Ermittlung des mittleren Betriebswertes durch die qualifizierte Stichprobe das Ergebnis stark verfälschen. Abbildung 33 spiegelt diesen Sachverhalt wieder.

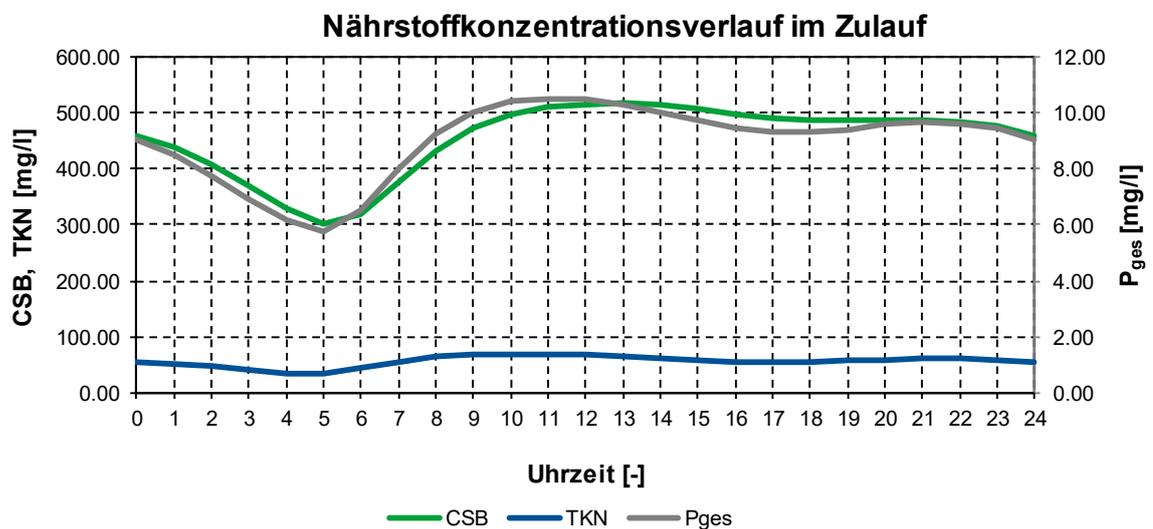


Abbildung 33 Typische Nährstoffkonzentrationsverlauf im Zulauf einer Kläranlage nach Langergraber et al. (2007)

Nötige Kläranlagen Ablaufkonzentration bei einem Orientierungswert von 0,2 mg/l im Gewässer:

Die Abbildung 34 stellt die Soll- sowie Ist-Ammoniumkonzentration im Ablauf der Kläranlage bei Einhaltung der geforderten 0,2 mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$ im Gewässer dar. Es wird deutlich, dass zur kontinuierlichen Einhaltung der Zielkonzentration, die Kläranlagenkonzentration zeitweise deutlich reduziert werden müsste. Weiterhin zeigt sich, dass bei Temperaturen über 12 °C der geforderte Betriebsmittelwert eingehalten werden kann. Dem gegenüber stehen höhere $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufkonzentrationen bei Temperaturen unter <12°C, welche zu einer Überschreitung des Jahresbetriebsmittelwertes führen.

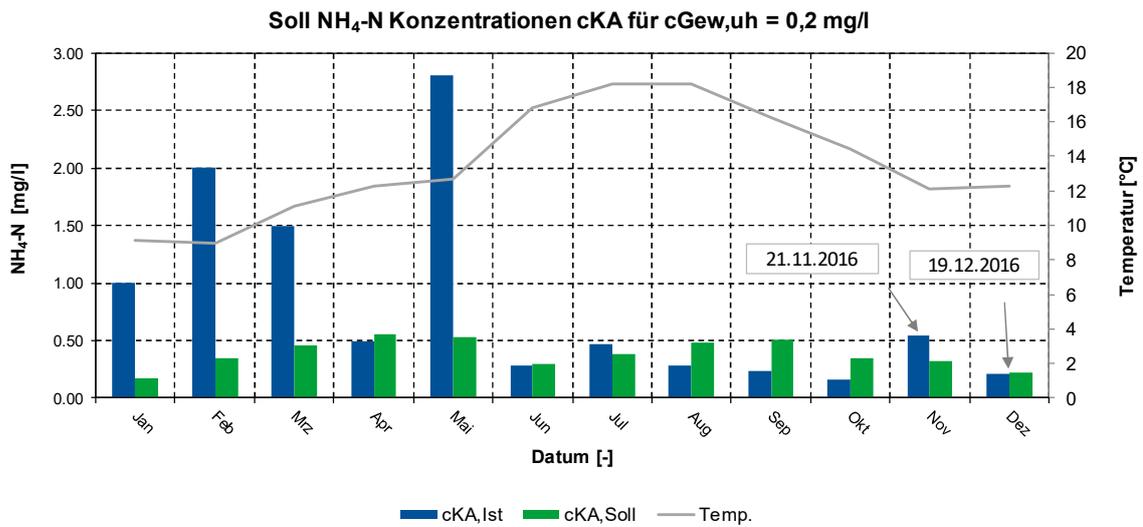


Abbildung 34 Vergleich der Soll- und Ist-NH₄-Konzentration 2017 bei Einhaltung einer Gewässerkonzentration von 0,2 mg/l (Messkampagne)

Um einen NH₄-N Betriebsmittelwert von 0,5 mg/l im Jahresmittel zu erreichen, müssen die NH₄-N Ablaufwerte in den Monaten Januar bis Mai um mehr als 50 % reduziert werden, bzw. eine kontinuierlicher Ablaufwert von 0,7 mg/l erreicht werden. Werden statt der Messkampagne die Ablaufwerte aus der Selbstüberwachung herangezogen, ist eine stärkere Reduzierung nötig (vgl. Abbildung 34 und Abbildung 35).

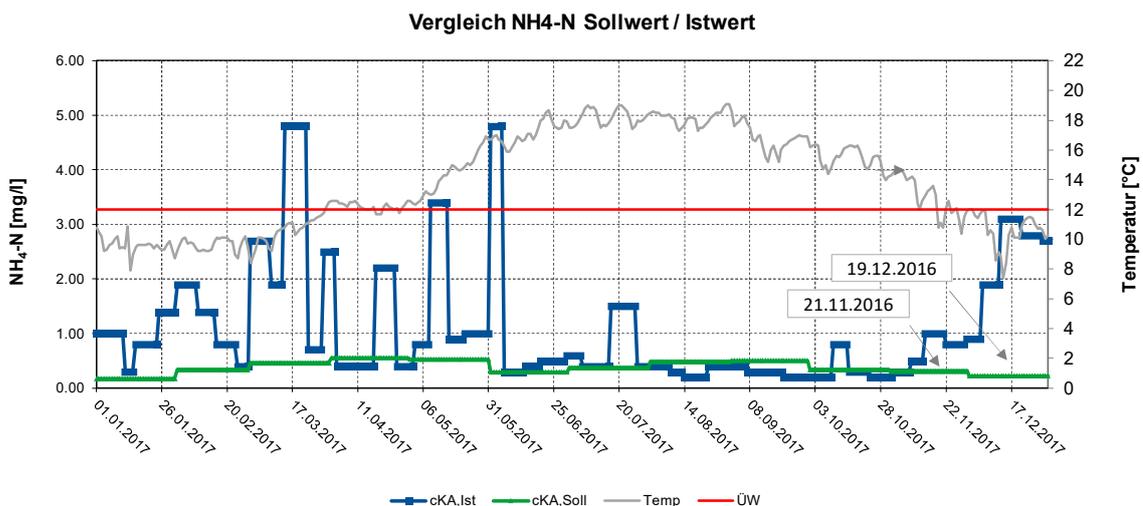


Abbildung 35 Vergleich der Soll- und Ist-NH₄-N-Konzentration bei Einhaltung einer Gewässerkonzentration von 0,2 mg/l (Selbstüberwachung)

Die geforderte $\text{NH}_4\text{-N}$ Gewässerkonzentration von 0,2 mg/l unterhalb der Einleitstelle entspricht einer Jahresfracht von 998 kg/a. Tabelle 20 stellt die Anzahl der Tage in denen die Abwassertemperatur über bzw. unter 12°C lagen und die mittleren Ablaufkonzentrationen in diesem Zeitraum dar. Es zeigt sich, dass bereits die Gesamtfracht an Ammonium an Tagen unter 12°C , in denen der Überwachungswert auf Grund einer biologisch eingeschränkten Nitrifikation nicht gilt, nahe an der zulässigen Gesamtjahresfracht liegt.

Tabelle 20 Jahreszeitliche Ammoniumfrachten – Bezugsjahr 2017

$\text{NH}_4\text{-N}$ Gesamt-Jahresfracht	Werte
Anzahl Tage > 12°C	235
Anzahl Tage < 12°C	130
Mittlere Ablaufkonzentrationen	
$C_{\text{NH}_4\text{-N}}$ bei > 12°C	0,71 mg/l
$C_{\text{NH}_4\text{-N}}$ bei < 12°C	1.80 mg/l
Jahreszeitliche Frachten	
$B_{\text{NH}_4\text{-N},>12\text{C}}$	677 kg
$B_{\text{NH}_4\text{-N},<12\text{C}}$	950 kg
$B_{\text{NH}_4\text{-N},a}$	1.626 kg/a
$B_{\text{NH}_4\text{-N},a,\text{gefordert}}$	998 kg/a

5.3 Bewertung der Verfahrenstechnik zur Stickstoffelimination

Die Kläranlage Billerbeck ist als Kaskade mit einer integrierten Wechselzone ausgebaut. Mit Hilfe der Wechselzone kann besonders bei niedrigeren Temperaturen eine höhere Nitrifikationskapazität ermöglicht werden.

Der ausgefaulte Schlamm wird in zwei Speicherbecken zwischengespeichert und zwei Mal im Jahr mobil entwässert. Das anfallende Zentrat wird in einem 1.500 m^3 Behälter zwischengespeichert. Die Zugabe erfolgt durch eine intervallgesteuerte Pumpe. Je nach aktueller Reinigungsleistung der Kläranlage wird das Intervall manuell angepasst. Es erfolgt keine Aufzeichnung der Zentratmenge.

Für das Jahr 2017 liegen lediglich zwei TN_b -Analysen des Zentrates vor. Da die Rückbelastung einen wesentlichen Einfluss auf die $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufwerte hat, sollte diese öfters analysiert werden.

Die Zulaufanalytik erfolgt über eine qualifizierte Stichprobe während der regulären Arbeitszeit. Der Hauptbeprobungszeitraum liegt zwischen 08:00 und 13:00 Uhr. Zulaufanganalysen der OWL Umweltanalytik GmbH zeigen, dass besonders in den nachmittags- und Nachtstunden die TN_b Zulaufkonzentration am geringsten sind (Abbildung 36). Eine automatisierte Zentratzugabe kann dazu dienen besonders in diesen Schwachlastzeiten mehr Zentratzugabe zu dosieren (vgl. Kapitel 5.1). Der Verlauf der Zulaufkonzentration ähnelt hierbei stark der typischen Zulaufganglinien kommunaler Kläranlagen nach Langergraber (2008).

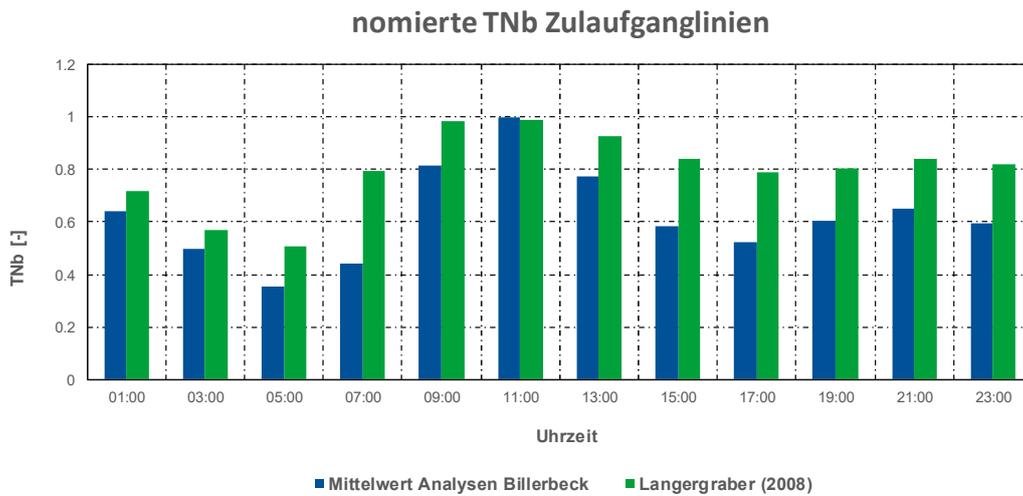


Abbildung 36 Normierte Zulaufganglinie nach Langergraber et al. (2008) und nach Messungen durch die OWL Umweltanalytik GmbH

6. Dynamische Simulation

Bereits im Jahr 2014 wurde die Kläranlage Billerbeck modelltechnisch abgebildet und simuliert. Im Rahmen dieses Auftrages wurde das Modell aktualisiert und den aktuellen Gegebenheiten angepasst.

6.1 Modellabgleich

Um Aussagen über das Verhalten der Kläranlage bei verfahrenstechnischen oder betrieblichen Änderungen treffen zu können, muss zuvor ein Modellabgleich der Simulation mit den realen Betriebsdaten durchgeführt werden.

Folgende Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Simulation und vorhandenen Betriebsdaten. Der Abgleich ist ausreichend genau, um die vorliegenden Fragestellungen in einer ausreichenden Güte zu beantworten.

Innerhalb des Modellabgleichs ist der korrekte Abgleich der Schlammproduktion von besonderer Wichtigkeit. Folgende Abbildung stellt den simulierten TS-Gehalt und den tatsächlichen TS-Gehalt dar. Der Abgleich der Schlammproduktion erreichte hierbei eine Genauigkeit von 95 %.

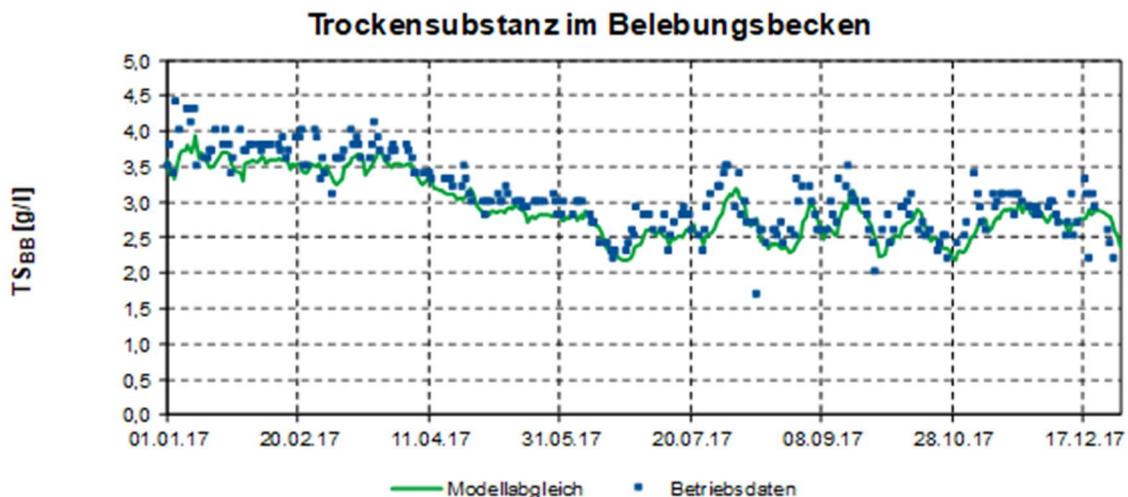


Abbildung 37 Modellabgleich des TS-Gehaltes im Belebungsbecken

Die Abbildung 38 stellt den Abgleich der CSB-Konzentration dar.

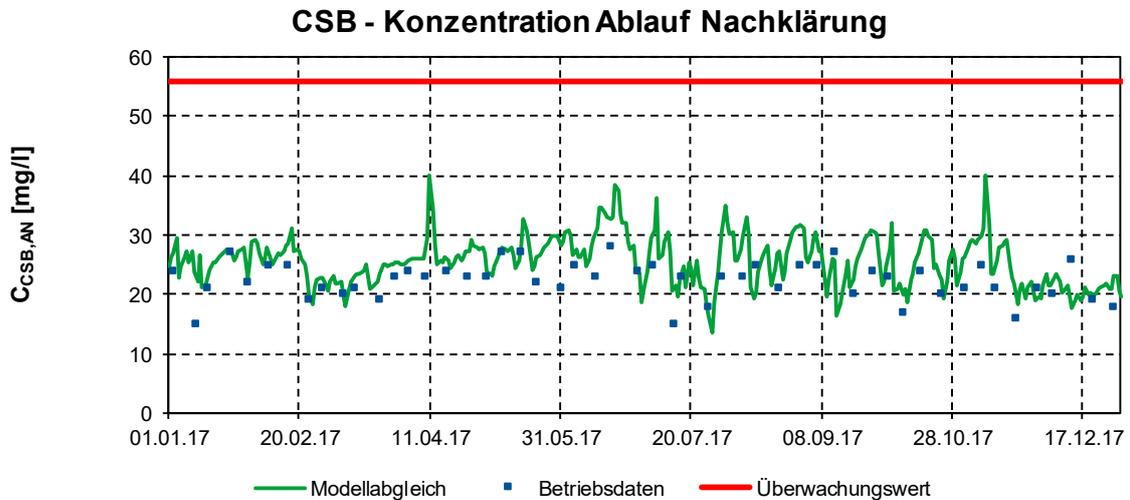


Abbildung 38 Modellabgleich der CSB Konzentration

Folgend wird der Modellabgleich der Stickstoffelimination dargestellt. Innerhalb des $\text{NH}_4\text{-N}$ Modellabgleichs können im Winter 2017 größere Stickstoffabweichungen zwischen der Simulation und der Betriebsdaten erkannt werden. Hierbei ist in der Simulation eine deutlich schlechtere Nitrifikation zu erkennen. Im Gegensatz dazu, erfolgt eine höhere Denitrifikation (Abbildung 40). In Summe zeigt die Simulation jedoch einen ausreichend genauen Modellabgleich bezogen auf die $N_{\text{anorg,ges}}$ Konzentration

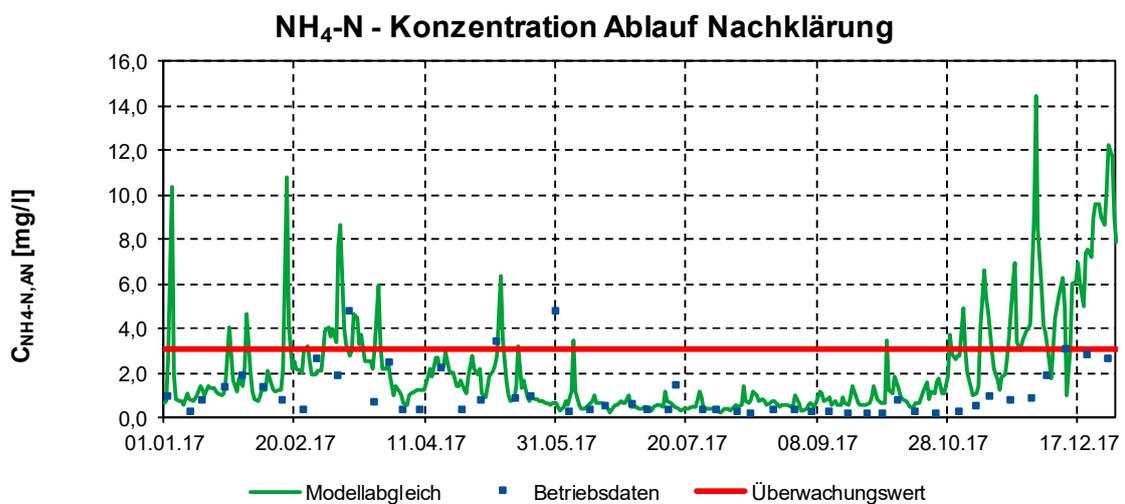


Abbildung 39 Modellabgleich der $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration

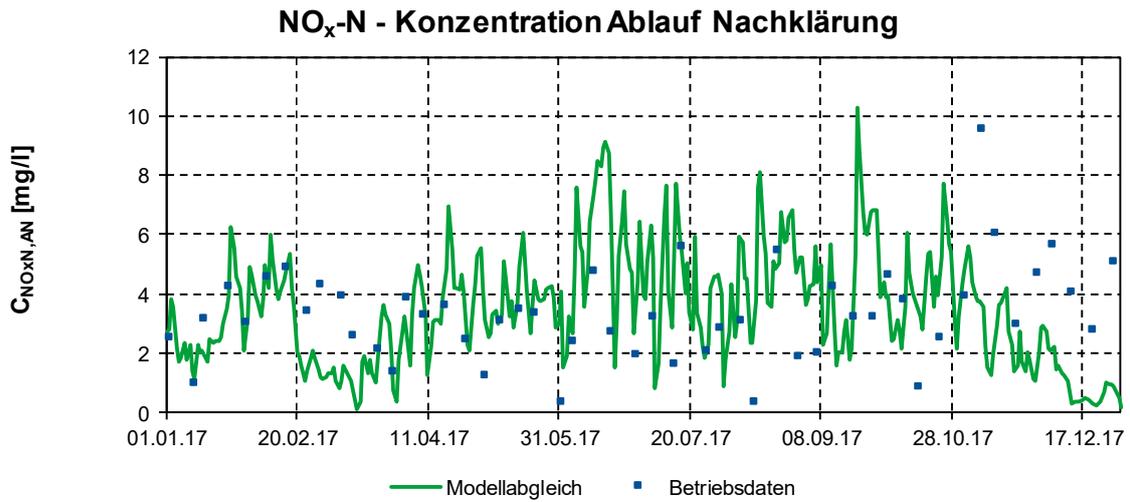


Abbildung 40 Modellabgleich der NO₃-N Konzentration

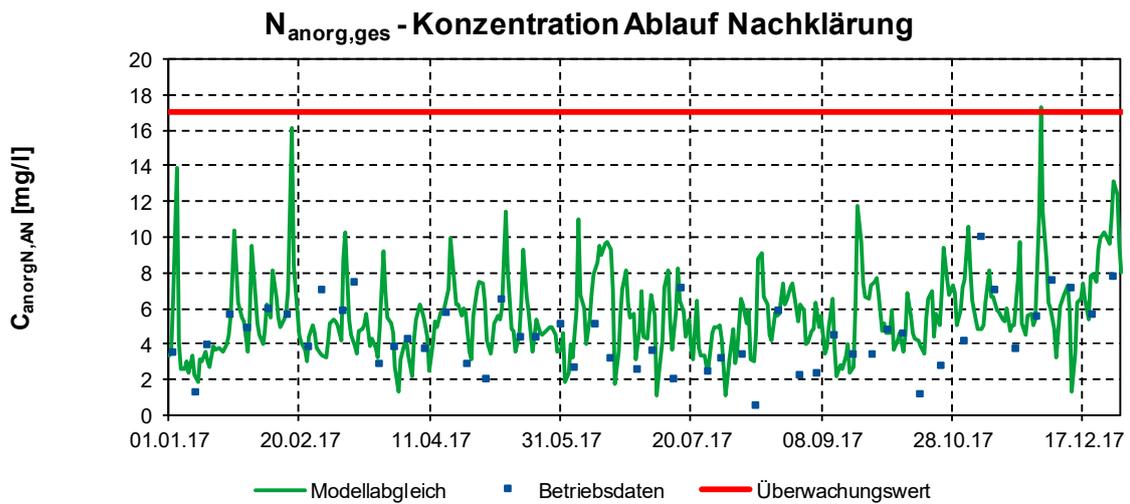


Abbildung 41 Modellabgleich der N_{anorg,ges} Konzentration

Die Abweichung der $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ Werte können unter anderem folgende Ursachen haben:

- Eintrag von Nitrat durch höheren Fremdwasseranteil im Winter
- Keine Aufzeichnung der Zentratdosierung vorhanden. Innerhalb der Simulation wird das Zentrat kontinuierlich zugegeben.
- Die Zulaufanalysen sind Stichproben. Je nach Zeitpunkt der Messung können so gewisse Unter- und Überschätzungen des Tagesmittelwertes entstehen

Abbildung 42 stellt den berechneten Fremdwasseranteil nach der Methode des Gleitenden Minimums nach LFU (2001) dar. Es zeigt sich, dass der Fremdwasseranteil Ende 2017 am höchsten war. Die Zulaufmessungen erfolgen anhand des TNbs. Innerhalb der Simulation wird aus dem TNb ein $\text{NH}_4\text{-N}$ Anteil, jedoch kein $\text{NO}_3\text{-N}$ Anteil berechnet. Im Falle, dass durch das Fremdwasser Nitrat im Zulauf vorzufinden ist, wird der Zulauf $\text{NH}_4\text{-N}$ innerhalb der Simulation überschätzt und $\text{NO}_3\text{-N}$ unterschätzt. Dies würde das Verhalten der simulierten $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablaufwerte erklären.

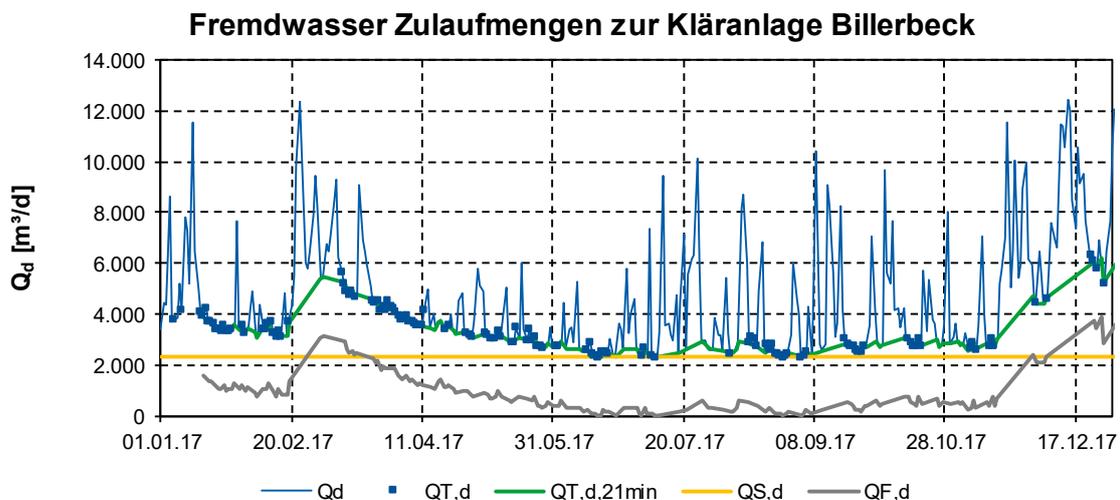


Abbildung 42 Geschätzter Fremdwasseranteil im Zulauf zur Kläranlage

Ein ähnliches Verhalten konnte bereits auf einer weiteren Kläranlage im Raum Münster beobachtet werden. Die ersten Zulaufmessungen konnten den Verdacht des Zulaufnitrates bestätigen.

Die in der Abbildung 36, Kapitel 5.3 gezeigte TNb-Zulaufganglinie weist die typisch hohen Stickstofffrachten morgens und vormittags auf. Im Falle, dass die Stichproben zumeist in dieser Zeit genommen werden, kann hierdurch eine gewisse Überschätzung der Zulauffrachten entstehen.

Die in der Simulation zu beobachtenden $\text{NH}_4\text{-N}$ Spitzen können zudem durch die kontinuierliche Zentratzugabe verursacht werden. In der Praxis erfolgt je nach aktueller Reinigungsleistung eine Anpassung der Dosierung. Hierzu liegen jedoch keine Aufzeichnungen vor.

Abbildung 43 stellt den Abgleich der P_{ges} -Ablaufwerte dar. Der Modellabgleich zeige eine gewisse Überschätzung der P-Elimination. Innerhalb der Simulation wurde, entsprechend dem DWA-A 131, ein β -Wert von 1,5 eingesetzt. Die Berechnungen des theoretischen β -Wertes in Kapitel 3.2 (Abbildung 11) zeigen, dass dieser vor Ort sehr wahrscheinlich höher liegt. Durch die Wahl eines höheren β -Wertes, erhöht sich auch die simulierte P_{ges} -Ablaufkonzentration.

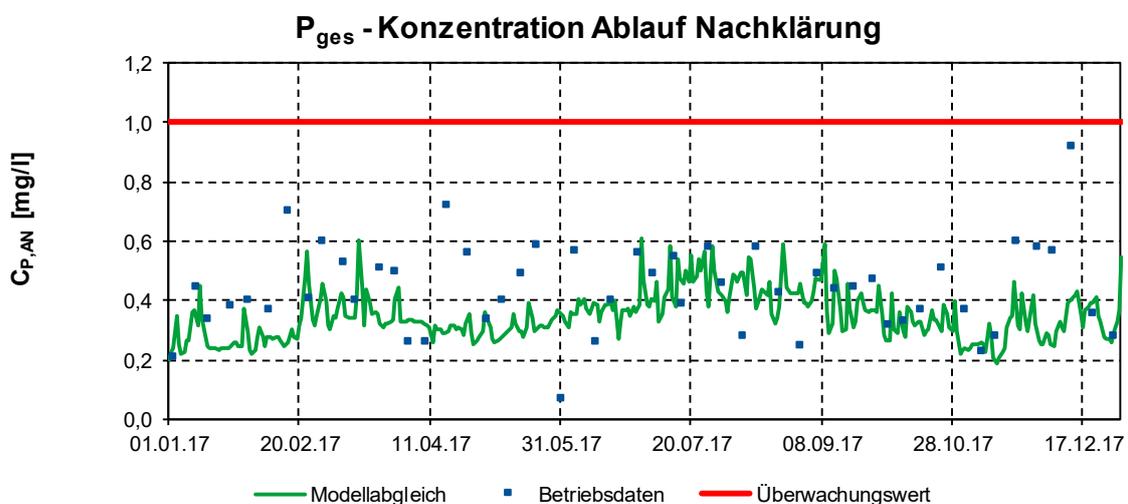


Abbildung 43 Modellabgleich der P_{ges} Konzentration

6.2 Simulation der Varianten zur Reduzierung des NH₄-N-Konzentration

Prozesswasserbehandlung (PWB)

Da nach dem Wissen des Autors bis dato kein allgemein anerkanntes Simulationsmodell einer Prozesswasserbehandlung vorliegt, wurde für die Simulation ein Konverterbaustein mit einer konstanten NH₄-N Reduktion entwickelt. Die Eliminationsrate wurde mit 75 % angenommen.

Die Werte für die spezifischen Energiekosten und zusätzlichen Schlammengen können der Tabelle 19 entnommen werden.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Reduktion der Stickstoffrückbelastung ohne Änderungen weiterer Parameter, wie die Erhöhung des Sauerstoffsollwertes, lediglich eine kleine Verringerung der NH₄-N Ablaufwerte zur Folge hat (siehe Tabelle 21). Durch die alleinige Nutzung einer PWB, erhöht sich zwar die Gesamtstickstoffelimination, die geforderte NH₄-N Ablaufkonzentration von 0,5 mg/l wird jedoch nicht erreicht.

Tabelle 21 Änderung der Stickstoffablaufwerte bei Verwendung einer PWB

Parameter	Reduktion [%]	Ablaufkonzentrationen	
		ohne PWB ¹ [mg/l]	mit PWB ¹ [mg/l]
NH ₄ -N	13,7	1,11 mg/l	0,96 mg/l
NO ₃ -N	21,5	3,10 mg/l	1,1 mg/l
N _{anorg}	15,8	4,42 mg/l	3,72 mg/l

¹Bezogen auf die realen Betriebsdaten

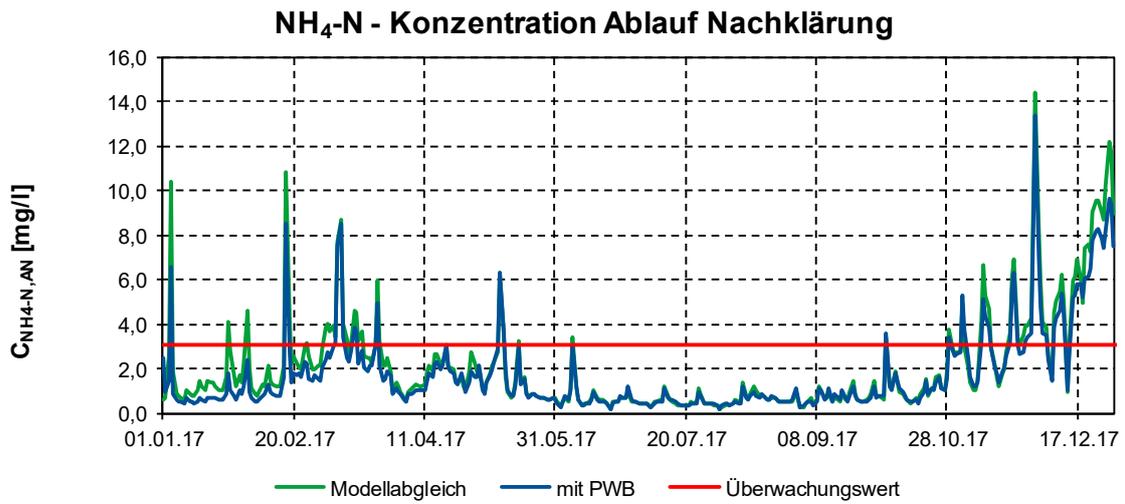


Abbildung 44 NH₄-N Konzentration mit und ohne Prozesswasserbehandlung (PWB)

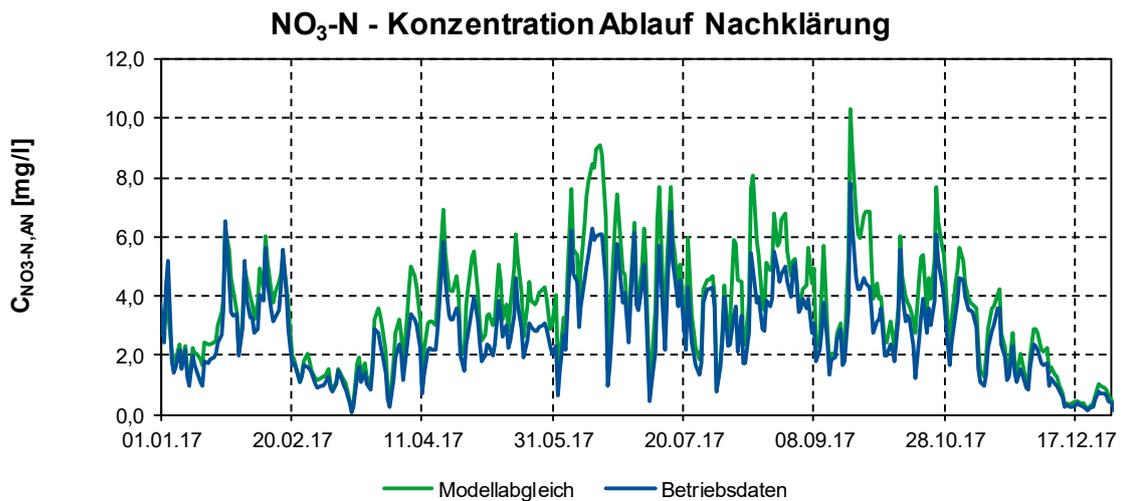


Abbildung 45 NO₃-N Konzentration mit und ohne Prozesswasserbehandlung (PWB)

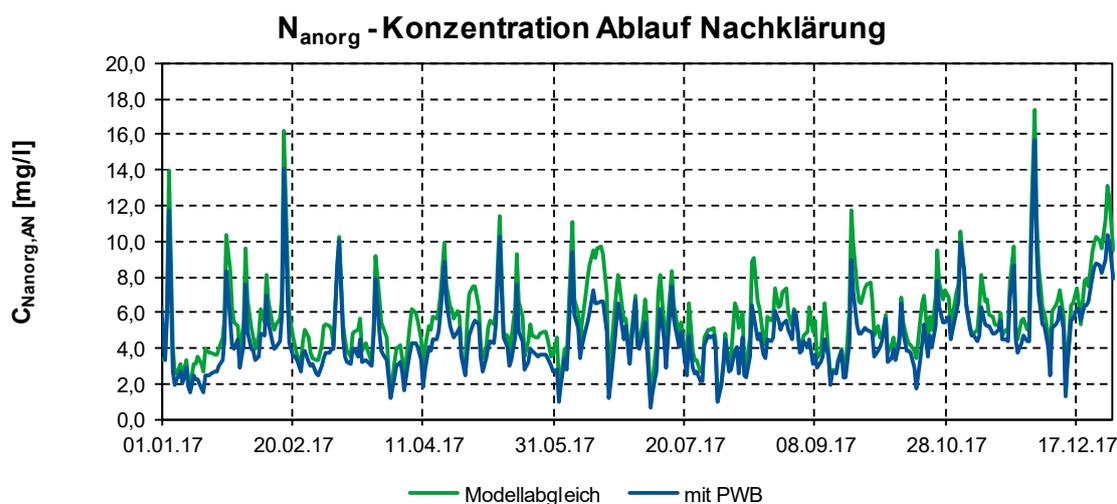


Abbildung 46 N_{anorg} Konzentration mit und ohne Prozesswasserbehandlung (PWB)

Erhöhung der Sauerstoffkonzentration

Aktuell wird die Belüftungsintensität anhand der NH₄-N und NO₃-N Konzentration ermittelt. Der Sauerstoffsollwert wird mit durchschnittlich 0,60 mg/l auf einem niedrigen Niveau gehalten. Um die Auswirkungen eines höheren Sauerstoffsollwertes zu prüfen, wurde in der Simulation eine Sauerstoffsollwert von 1,5 mg/l eingestellt.

Die Erhöhung der Sauerstoffkonzentration führt zu einer starken Verbesserung der Nitrifikation. Dahingegen führt die gleichbleibende TS-Konzentration dazu, dass nicht genügend Denitrifikanten zur Verfügung stehen, um das gebildete Nitrat zu denitrifizieren. Zudem besteht die Gefahr, dass Sauerstoff in die Deni-Zonen verschleppt werden kann. Daraus resultiert, dass die Steigerung der Sauerstoffkonzentration einen starken Anstieg der NO₃-N und N_{anorg} Konzentrationen mit sich führt.

Tabelle 22 Änderung der Stickstoffablaufwerte bei Erhöhung des Sauerstoffsollwertes

Parameter	Reduktion [%]	Ablaufkonzentrationen	
		C _{O2} nach BD [mg/l]	C _{O2} bei 1,5 g/l ¹ [mg/l]
NH ₄ -N	73,74	1,1	0,29
NO ₃ -N	-96,62	3,3	6,09
N _{anorg}	-33,64	4,4	5,90

¹Bezogen auf die realen Betriebsdaten

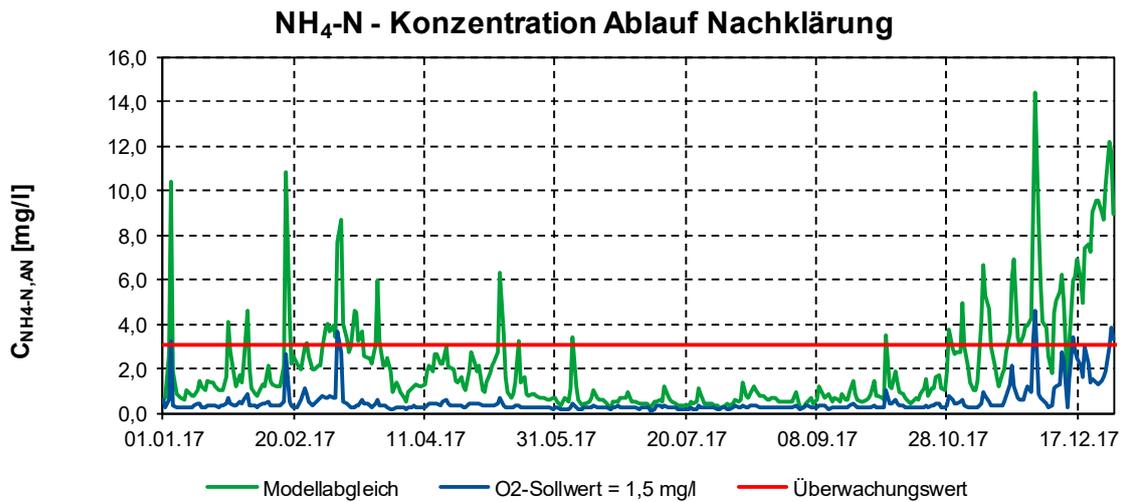


Abbildung 47 NH₄-N Konzentration bei einer O₂ Konzentration von 1 g/l und eine O₂ Konzentration entsprechend der Betriebsdaten

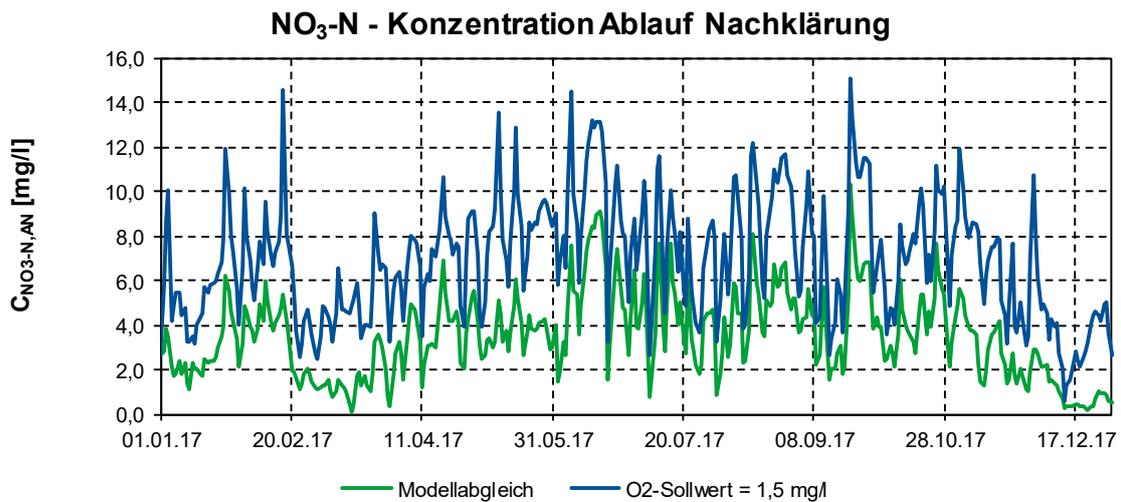


Abbildung 48 NO₃-N Konzentration bei einer O₂ Konzentration von 1 g/l und eine O₂ Konzentration entsprechend der Betriebsdaten

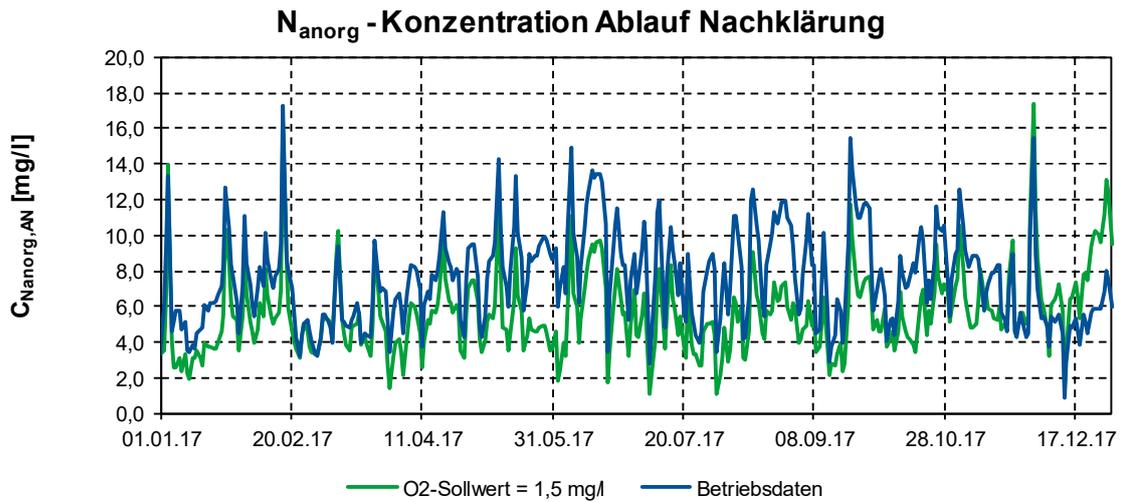


Abbildung 49 N_{anorg} Konzentration bei einer O₂ Konzentration von 1 g/l und eine O₂ Konzentration entsprechend der Betriebsdaten

Erhöhung der TS-Konzentration

Die deutliche NH₄-N Elimination wird durch die erhöhte Schlammmasse erreicht. Die Simulationsergebnisse zeigen hierbei eine Verbesserung der Elimination von durchschnittlich 55 %. Auf Grund der abweichenden NH₄-N Ablaufwerte zwischen Simulation und Betriebsdaten im Winter, kann nicht garantiert werden, dass die simulierte Verbesserung der NH₄-N Elimination auch in der Praxis erreicht werden kann.

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass, besonders in den Wintermonaten, eine Erhöhung der TS-Konzentration zu einer zu signifikanten Verbesserung der NH₄-N Ablaufwerte führt. Wie in Kapitel 5.2 Abbildung 34 gezeigt, sind besonders die Wintermonate ausschlaggebend für den zu erzielenden NH₄-N Betriebsmittelwert.

Tabelle 23 Änderung der Stickstoffablaufwerte bei Erhöhung der TS-Konzentration

Parameter	Reduktion [%]	Ablaufkonzentrationen	
		TS _{BB} nach BD [mg/l]	TS _{BB} bei 5 g/l ¹ [mg/l]
NH ₄ -N	54,7	1,1	0,5
NO ₃ -N	4,3	3,3	3,0
N _{anorg}	22,9	4,4	3,4

¹Bezogen auf die realen Betriebsdaten

Es sollte somit betrieblich geprüft werden in wie weit der TS im Belebungsbecken erhöht werden kann. Hierbei wird das vorhandene Nachklärbecken möglicherweise, besonders auf Grund des stellenweisen ineffizienten Einlaufs, zum limitierenden Faktor.

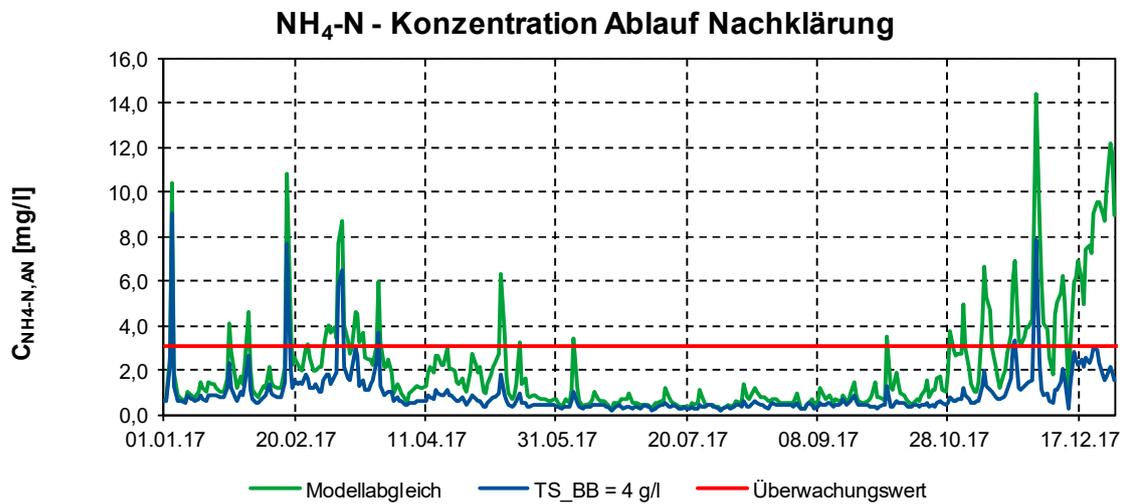


Abbildung 50 NH₄-N Konzentration bei einem TS_{BB} von 4 g/l und einem TS_{BB} entsprechend der Betriebsdaten

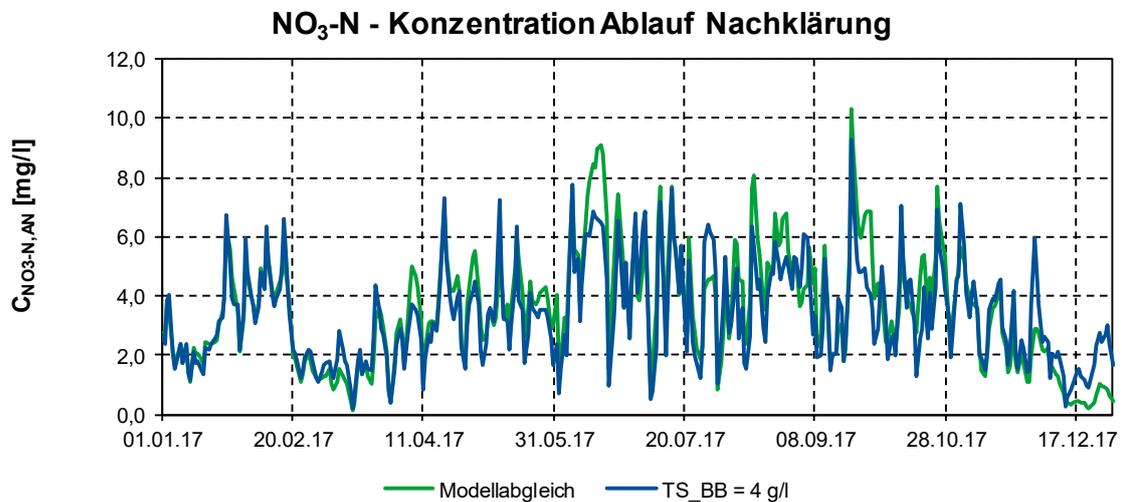


Abbildung 51 NO₃-N Konzentration bei einem TS_{BB} von 4 g/l und einem TS_{BB} entsprechend der Betriebsdaten

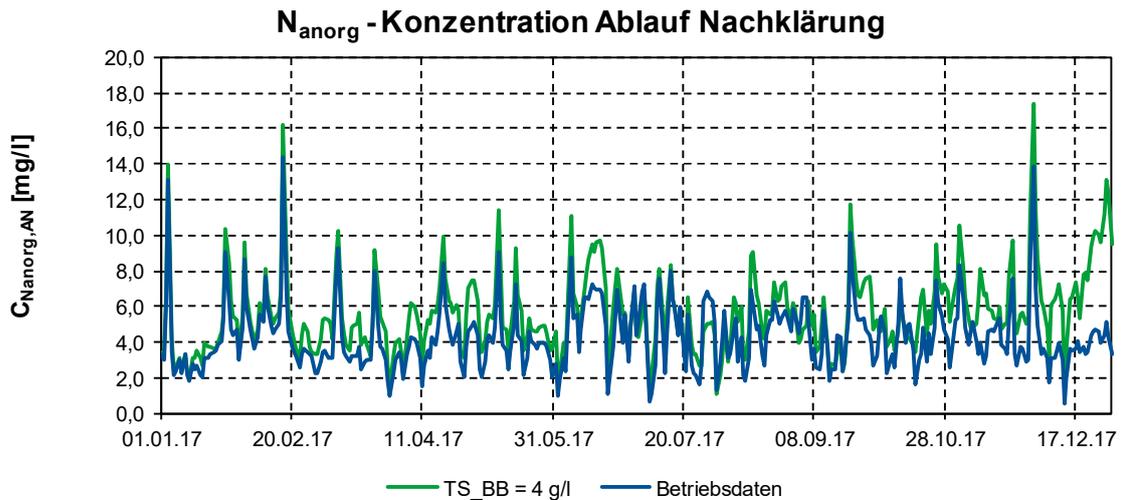


Abbildung 52 N_{anorg} Konzentration bei einem TS_{BB} von 4 g/l und einem TS_{BB} entsprechend der Betriebsdaten

Ein Vorteil der TS-Anhebung gegenüber der Erhöhung des Sauerstoffsollwertes liegt darin, dass bei einem höheren Sauerstoffsollwert die Gefahr der Verschleppung von Sauerstoff in die Denitrifikationszonen besteht. So zeigen die Ergebnisse der O₂-Sollwertanhebung höhere NO₃-N Ablaufwerte als die Ergebnisse der TS-Anhebung. Ebenso zeigt die Simulation einen Rückgang der Überschussschlammproduktion bei einem höheren Schlammalter. Dies lässt sich durch den Rückgang der Schlammbelastung und der damit einhergehenden Reduktion der spezifischen Überschussschlammproduktion erklären. Dieses Verhalten konnte auf der Kläranlage Billerbeck bereits in der Vergangenheit beobachtet werden. Mit Ausnahme des Jahres 2014 weist die vorliegende Beziehung zwischen Schlammalter und spezifischer Überschussschlammproduktion eine gute Korrelation auf (Abbildung 53).

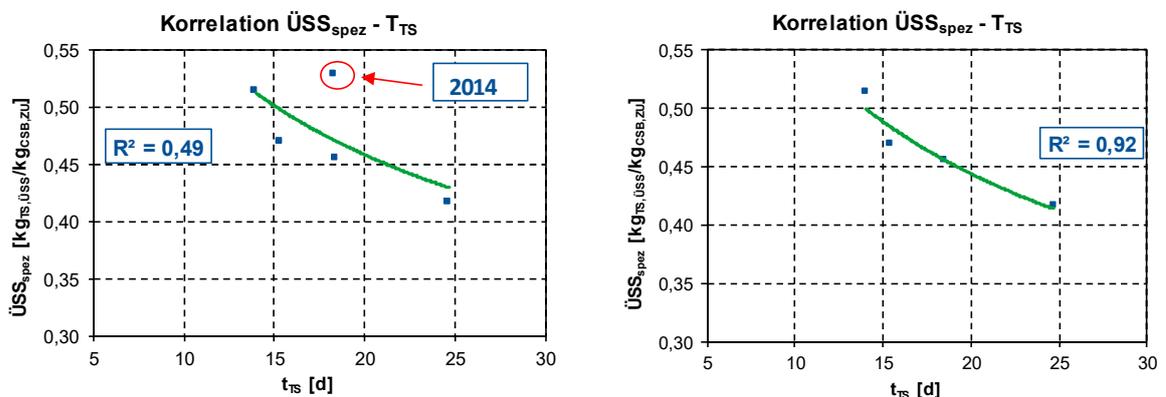


Abbildung 53 Korrelation zwischen spezifischer Überschussschlammproduktion und Schlammalter (Bezugsjahre: 2013, 2014, 2015, 2017, 2018)

Als negative Begleiterscheinung kann von einem Rückgang der Gasproduktion ausgegangen werden. Dies lässt sich durch den niedrigeren oTS-Gehalt auf Grund des höheren Schlammalters erklären. Dies konnte ebenfalls bereits vor Ort beobachtet werden. So wurde die Kläranlage bis 2016 noch mit einem höheren TS-Gehalt (Winter 4-5g/l, Sommer 3-4 g/l) und einer höheren Sauerstoffkonzentration (O₂-Sollwert = 1,0 mg/l) betrieben. In dieser Zeit lag die durchschnittliche Gasproduktion, nach Aussage des Kläranlagenpersonals, um 10-15 % niedriger.

Zwischenfazit

Die größten Auswirkungen auf die Ammoniumkonzentration hatte die Anhebung der Sauerstoffkonzentration und die Anhebung TS-Gehaltes. Bei der alleinigen Anhebung des Sauerstoffsollwertes besteht jedoch die Gefahr, eines starken Anstieges der N_{ges}-Ablaufwerte durch höhere Nitratlaufwerte. Die Implementierung einer Prozesswasserbehandlung führte zwar zu einer Verbesserung der N_{ges} Elimination. Bei gleichbleibender Betriebsweise der restlichen Anlage, ist jedoch von einer geringeren Änderung der NH₄-N Ablaufwerte zu rechnen.

Es zeigt sich somit, dass bereits die Anhebung der Feststoff- und Sauerstoffkonzentration eine erkennbare Reduzierung der NH₄-N Ablaufkonzentration mit sich führt. Im Nachgang der Präsentation der ersten Simulationsergebnisse konnte gezeigt werden, dass bereits 2016 mittlere Ablaufwerte von 0,3 mg/l NH₄-N erreicht wurden. Hierbei wurde die Anlage mit einem mittleren TS-Gehalt von 3,6 g/l und einem Sauerstoffsollwert von 1,0 mg/l betrieben. Ebenso wurde das Schlammalter der Jahreszeit dynamisch angepasst.

Da im Bereich der Sommermonate bereits jetzt zum Großteil ausreichende NH₄-N Ablaufwerte erreicht werden, sollte, wie in den früheren Jahren, besonders ein betrieblicher Fokus auf die Wintermonate gesetzt werden. So kann ein variables Schlammalter, mit höheren Werten im Winter, die NH₄-N Konzentration besonders in diesem Zeitraum gesenkt werden. Bei höheren Temperaturen kann wiederum das Schlammalter gesenkt werden.

Ebenso sollte in der Praxis geprüft werden, ob durch das ineffiziente Einlaufbauwerk der vorliegenden Nachklärung, ein erhöhter TS im Belebungsbecken zu keinen Feststoffabtrieb im Ablauf führt.

Es ist darauf hinzuweisen, dass innerhalb der Simulation mit Tagesmittelwerten gerechnet wurde. Zudem ist der zeitliche Verlauf der Zentratdosierung nicht bekannt. Eine optimierte Zentratbewirtschaftung würde voraussichtlich zu einer zusätzlichen Verbesserung der NH₄-N Ablaufwerte führen.

Abschließend kann ausgesagt werden, dass die betrieblichen Anpassungen zu einer Reduzierung der $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufwerte führten und die Ergebnisse älteren Betriebsbedingungen entsprechen. Auf Grund der in Kapitel 6.1 gezeigten Unterschiede im Modellabgleich kann die Einhaltung des Betriebsmittelwertes von 0,5 mg/l mittels der Simulation jedoch nicht garantiert werden.

7. Kosten der erweiterten Stickstoffreduktion

Im Folgenden werden die im Kapitel 3.5 vorgestellten Varianten auf ihre Wirtschaftlichkeit geprüft:

Variante	Beschreibung
1	Nitrifikation und Denitrifikation
2	Nitritation und Denitritation
3	Deammonifikation
4	Erhöhte Belüftungsintensität
5	Höhere Schlammkonzentration

Innerhalb der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die Investitionskosten, die Betriebskosten, sowie die resultierenden Jahreskosten betrachtet.

7.1 Investitionskostenschätzung - erweiterte Stickstoffreduktion

In der Tabelle 24 sind die Investitionskosten für die Varianten 1 bis 5 zusammengefasst. Da für eine Investitionsberechnung der Prozesswasserbehandlung eine detaillierte Auslegung nötig ist, wurde die aufgestellte Kostenschätzung im vorliegenden Rahmen mit dem Investitionskostenvergleich nach Jardin verglichen. Da für die Varianten 4 und 5 vorerst keine baulichen oder maschinentechnischen Veränderungen nötig sind, fallen für diese Varianten keine weiteren Investitionskosten an.

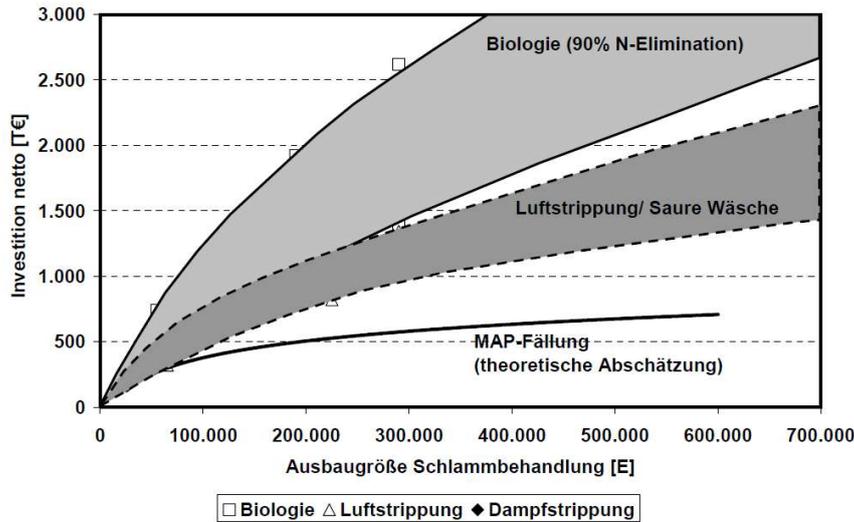


Abbildung 54 Investitionskostenvergleich verschiedener Verfahren zur separaten Schlammwasserbehandlung nach (Jardin)

Tabelle 24 Investitionskostenschätzung für die erweiterte Stickstoffreduktion

Anlage 1: Investitionskostenschätzung							
Pos.-Nr.	Text		Variante 1 PWB	Variante 2 PWB	Variante 3 PWB	Variante 4 Belüftung	Variante 5 TS-Konz.
1	Bautechnik	EUR	295.000,00	295.000,00	295.000,00	0,00	0,00
2	Maschinentechnik	EUR	146.000,00	146.000,00	146.000,00	0,00	0,00
3	EMSR-Technik	EUR	135.000,00	135.000,00	135.000,00	0,00	0,00
Summe Herstellungskosten, netto		EUR	576.000,00	576.000,00	576.000,00	0,00	0,00
Nebenkosten pauschal 10 %		EUR	57.600,00	57.600,00	57.600,00	0,00	0,00
Summe Baukosten, netto		EUR	633.600,00	633.600,00	633.600,00	0,00	0,00
Mehrwertsteuer 19 %		EUR	109.440,00	109.440,00	109.440,00	0,00	0,00
Summe Baukosten, brutto		EUR	743.040,00	743.040,00	743.040,00	0,00	0,00

7.2 Betriebskostenschätzung - erweiterte Stickstoffreduktion

In der folgenden Tabelle werden die Annahmen für die Betriebskosten der jeweiligen Variante zusammengefasst. Die betriebsgebundenen Kosten beinhalten Personal- und Wartungs-/Instandhaltungskosten. Die verbrauchsgebundenen Kosten setzen sich aus den Energie-, den Chemikalien- und den Schlammmentwässerungs- sowie Schlammentsorgungskosten zusammen.

Tabelle 25 Betriebskostenschätzung für die Varianten 1 bis 5

Anlage 3: Betriebskostenschätzung						
Bezeichnung		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	26.288,00	37.908,00	44.528,00	0,00	0,00
Personalaufwand	MA/d	0,25	0,45	0,55	0,00	0,00
Personalkosten	EUR/a	12.500,00	22.500,00	27.500,00	0,00	0,00
Wartungs- und Instandhaltungskosten	EUR/a	13.788,00	15.408,00	17.028,00	0,00	0,00
Verbrauchsgebundene Kosten	EUR/a	12.133,11	7.664,01	1.110,47	6.320,84	-11.708,93
Energiekosten	EUR/a	2.697,23	1.465,89	879,53	6.320,84	2.785,74
Energieverbrauch	kWh/a	15.950,50	8.668,75	5.201,25	37.379,32	13.269,45
spez. Preis	EUR/kWh	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
relative BHKW Stromproduktion	kWh/a	0,00	0,00	0,00	0,00	-3.204,44
Chemikalienkosten	EUR/a	6.357,08	4.161,00	0,00	0,00	0,00
Kohlenstoffverbrauch	Mg/a	25,43	16,64	0,00	0,00	0,00
spez. Preis	EUR/Mg	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
Kohlenstoffkosten	EUR/a	6.357,08	4.161,00	0,00	0,00	0,00
Schlamm Entsorgungskosten	EUR/a	1.807,38	1.204,92	230,94	0,00	-14.494,67
zusätzlicher Schlamm	Mg TS/a	4,06	2,70	0,52	0,00	-32,54
Entsorgungskosten	EUR/Mg (OS)	89,10	89,10	89,10	89,10	89,10
Entwässerungsergebnis	%	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
zusätzlicher Schlamm	Mg OS/a	20,28	13,52	2,59	0,00	-162,68
Entsorgungskosten	EUR/a	1.807,38	1.204,92	230,94	0,00	-14.494,67
Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	26.288,00	37.908,00	44.528,00	0,00	0,00
Verbrauchsgebundene Kosten	EUR/a	10.861,70	1.204,92	1.110,47	6.320,84	-11.708,93
Gesamtsumme Betriebskosten, netto	EUR/a	37.149,70	44.739,81	45.638,47	6.320,84	-11.708,93
Mehrwertsteuer	19%	7.058,44	8.500,56	8.671,31	1.200,96	-2.224,70
Gesamtsumme Betriebskosten, brutto	EUR/a	44.208,14	53.240,37	54.309,78	7.521,80	-13.933,63

Die Energiekosten für die Varianten 1 bis 3 basieren auf den Kennwerten nach Beier (2008). Der Energieverbrauch der Varianten 4 und 5 basieren auf den Energiekosten der Belüftung. Der Chemikalienverbrauch setzt sich aus dem Kohlenstoffbedarf (Essigsäure) für die Prozesswasserbehandlung zusammen. Je nach Variante steigt die Überschussschlammproduktion an oder sinkt. Auf Grund der aktuell hohe Entsorgungskosten sind die Entsorgungskosten ein wesentlicher Faktor der Betriebskosten.

Da, besonders die Deammonifikation, eine hohe betriebliche Kontrolle mit sich führt, weisen die Varianten 2 und 3 einen signifikant höheren Personalkostenaufwand auf.

Es ist darauf zu achten, dass die Werte zum Energieverbrauch lediglich grobe Kennzahlen sind, und je nach Begebenheit variieren können. Da für die Prozesswasserbehandlung ein hoher Anspruch auf die EMSR-Technik besteht, wurden dementsprechend höhere Prozentsätze für die die Wartung und Instandhaltung, bezogen auf die Netto-Investitionskosten, herangezogen.

Wartung und Instandhaltungskosten	V1	V2	V3	V4	V5
Bautechnik:	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %
Maschinenteknik	4,0 %	4,0 %	4,0 %	4,0 %	4,0 %
E-/MSR-Technik	2,0 %	3,0 %	4,0 %	2,0 %	2,0 %

Die betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten liegen für die Varianten 2 (Nitriration) und 3 (Deammonifikation) auf einem ähnlichen Niveau. Auf Grund der weit verbreiteten Technik der Nitrifikation, weist die Variante 1 den geringsten Personalaufwand innerhalb der Prozesswasserbehandlung auf. Für die Varianten 4 und 5 wird kein weiterer Personalaufwand angesetzt.

7.3 Jahreskostenschätzung – erweiterte Stickstoffreduktion

Die Jahreskosten ergeben sich aus den betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten, sowie den Kapitalkosten. Die Kapitalkosten wurden anhand folgender Vorgaben berechnet:

Betrachtungszeitraum:	30 a
Nutzungsdauer Bautechnik:	30 a
Nutzungsdauer Maschinenteknik:	15 a
Nutzungsdauer E-/MSR-Technik:	15 a
Realzinssatz:	3 %

Die günstigsten Jahreskosten werden bei der Variante 5 erreicht. Durch einen höheren TS-Gehalt im Belebungsbecken, wird der Überschussschlammabzug deutlich reduziert. Hierbei entstehen signifikant geringere Entsorgungskosten, so dass hierdurch jährliche Einsparungen eingefahren werden können.

Die zweitgeringsten Jahreskosten weist die Variante 4 auf. Innerhalb dieser Variante wird die aktuelle TS-Konzentration beibehalten, der Sauerstoffsollwert jedoch erhöht. Die Jahreskosten werden dabei durch den höheren Energieverbrauch der Verdichter verursacht.

Weitaus höhere Jahreskosten werden durch die Varianten 1 bis 3 verursacht, wobei die Prozesswasserbehandlung ausgeführt als Nitrifikation / Denitrifikation die geringeren Jahreskosten aufweist.

Da die Deammonifikation einen sehr geringen Sauerstoffbedarf und eine geringe Überschussschlammproduktion aufweist, weist diese Variante, innerhalb der Varianten 1 bis 3, die geringsten verbrauchsgebundenen Kosten auf.

Die Abbildung 55 stellt die Jahreskosten bestehend aus Kapitalkosten, betriebsgebundenen Kosten und verbrauchsgebundenen Kosten zusammen.

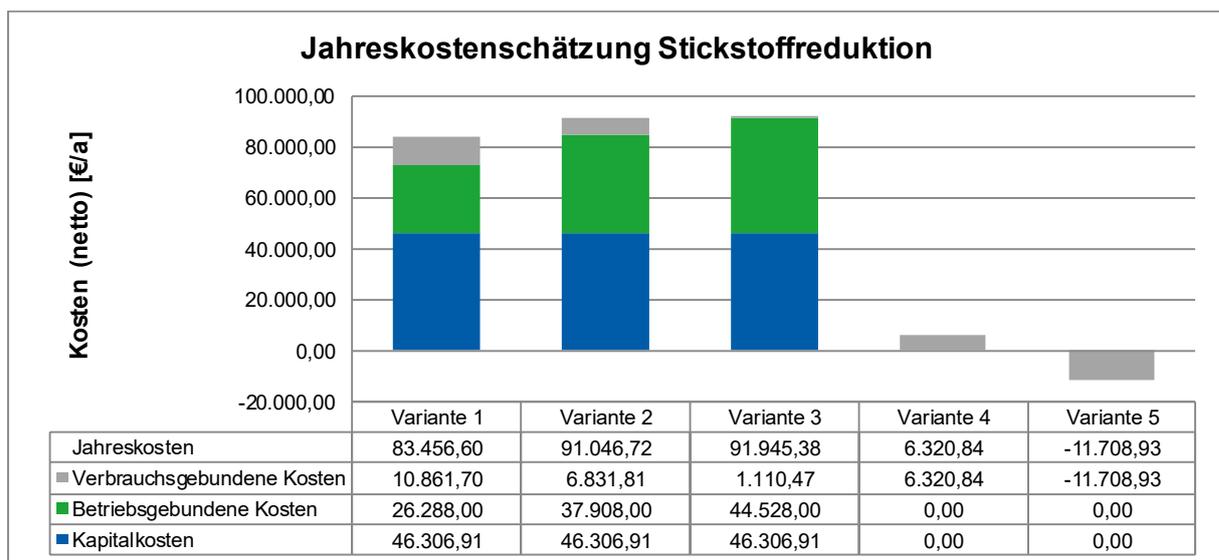


Abbildung 55 Jahreskostenschätzung der einzelnen Varianten

7.4 Bewertung der Varianten

Um die Varianten zu bewerten wurde zuzüglich der Ermittlung der Jahreskosten eine Bewertungsmatrix mit einer spezifischen Gewichtung aufgestellt. Folgende Kriterien werden in der Bewertung berücksichtigt:

- Jahreskosten
- Reinigungsleistung $\text{NH}_4\text{-N}$
- Erfahrungen / Referenzen
- Betriebs- und Wartungsaufwand
- Betriebssicherheit

Jahreskosten

Die Jahreskosten wurden mit 30 % gewichtet. Wie in Kapitel 7.2 dargelegt, können durch den geringeren Klärschlammanfall die Jahreskosten innerhalb der Variante 5 gesenkt werden. Durch höheren Sauerstoffsollwert werden in der Variante 4 mehr Energiekosten benötigt. Bedingt durch die Verfahrenstechnik weisen die Varianten 1-3 die höchsten Jahreskosten auf. Aus diesem Grund erhalten diese Varianten jeweils einen Punkt. Die Variante 4: 3,5 Punkte und die Variante 5: 5 Punkte.

Reinigungsleistung $\text{NH}_4\text{-N}$

Die Einhaltung des $\text{NH}_4\text{-N}$ Betriebsmittelwertes wird mit einer Wichtung von 40 % als wichtigstes Entscheidungskriterium eingestuft. Die Varianten der Prozesswasserbehandlung weisen zwar eine höhere Elimination vom N_{ges} auf, die Simulation zeigte bei der aktuellen Fahrweise der Kläranlage jedoch keine wesentliche Verbesserung der $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufwerte. Die größten Verbesserungen konnten bei den Varianten 4 und 5 erzielt werden. Somit erhalten diese Varianten jeweils 4 Punkte. Die Varianten der Prozesswasserbehandlung dagegen 3.

Erfahrungen / Referenzen

Die Erfahrungen und Referenzen wurden mit 10 % gewichtet. Die meisten Erfahrungen gibt es im Bereich der Nitrifikation/Denitrifikation und der betrieblichen Anpassung des Sauerstoffsollwertes, sowie des Schlammalter. Aus diesem Grund wurden die Varianten 1, 4 und 5 jeweils mit 4 Punkten bewertet.

Die Erfahrungen im Bereich der Nitritation/Denitritation und der Deammonifikation können eher als gering eingeschätzt werden. Aus diesem Grund erhalten beide jeweils 2 Punkte.

Betriebs- und Wartungsaufwand

Der Betriebs- und Wartungsaufwand ist für die höhere TS-Konzentration sowie höhere Belüftungsintensität am geringsten, gefolgt von der Nitrifikation/Denitrifikation. Auf Grund der nötigen hohen Genauigkeit der EMSR-Technik für die Varianten 2 und 3, erhalten diese Varianten jeweils die geringsten Punkte.

Betriebssicherheit

Aufgrund der erweiterten Technik erhalten die Varianten 1-3 jeweils 3 Punkte für die Betriebssicherheit, die Varianten 1 und 2 jeweils 3,5 Punkte.

Die Tabelle 26 stellt zusammenfassend die Ergebnisse der Bewertung dar. Die höchste Punktzahl erreicht die Variante der erhöhten TS-Konzentration bzw. des höheren Schlammalters. Die zweithöchste Punktzahl erreicht der Betrieb mit einem höheren Sauerstoffsollwert. Im Bereich der Prozesswasserbehandlung stellt sich die Variante der Nitrifikation/Denitrifikation als geeignete Alternative heraus.

Tabelle 26 Bewertung der Varianten zur erweiterten NH₄-N Reduktion

Kriterium	Wichtung	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4		Variante 5	
		Punkte	gewichtet								
Jahreskosten	0,30	1,00	0,30	1,00	0,30	1,00	0,30	3,50	0,75	5,00	1,50
Reinigungsleistung NH ₄	0,40	3,00	1,60	3,00	1,60	3,00	1,60	4,00	1,60	4,00	1,60
Erfahrungen / Referenzen	0,10	5,00	0,50	2,00	0,20	2,00	0,20	5,00	0,50	5,00	0,50
Betriebs- und Wartungsaufwand	0,10	3,50	0,35	3,00	0,30	2,00	0,20	4,50	0,45	4,50	0,45
Betriebssicherheit	0,10	3,00	0,30	3,00	0,30	3,00	0,30	3,50	0,35	3,50	0,35
Summe	1,00	15,50	2,65	13,00	2,30	12,00	2,20	20,50	3,95	22,00	4,40

Wertung nach Punkten (steigende Wertung = bessere Wertung); 1 = ungenügend, 5 = sehr gut

8. Gewässerökologische Maßnahmen zur Senkung des P_{ges} und $\text{NH}_4\text{-N}$ Betriebsmittelwertes

Neben der Prüfung verfahrenstechnischer Maßnahmen zur Erreichung der P_{ges} - und $\text{NH}_4\text{-N}$ Betriebsmittelwerte wurden vom Ingenieurbüro Wiehager die Potenziale ökologischer Verbesserungsmaßnahmen zur geforderten Zielerreichung untersucht. Im vorliegenden Kapitel wird der Inhalt des Ergebnisberichtes zitiert:

Die ökologische Umgestaltung des Gewässers kann hierbei als Ersatz zur weiteren Abwasserreinigung auf der Kläranlage dienen, wenn in der Berkel das gute ökologische Potenzial (GÖP) durch gezielte Maßnahmen zu erreichen ist. Das Entwicklungskonzept der Berkel wurde mit diesem Ziel erarbeitet und umfasst eine Neutrassierung der Berkel und strukturverbessernde Maßnahmen.

Die erforderlichen Flächen für einen Entwicklungskorridor zur Umsetzung der Maßnahme von bis zu 35 m Breite befinden sich bei der Kläranlage nordöstlich des zu überplanenden Gewässerabschnittes mit einer Länge von rd. 605 m (Stat. Km 108+425 bis 107+820). Davon befinden sich rd. 190 m im Oberlauf und 415 m im Unterlauf der Kläranlageneinleitung. Des Weiteren befindet sich im Umfeld der Kläranlage Billerbeck die durch die Wirtschaftsbetriebe Kreis Coesfeld GmbH (WBC) verwaltete "Ausgleichsfläche Mersmannsbach" (siehe Übersichtsplan). Die Berkel in diesem weiter südwestlichen zu überplanenden Gewässerabschnitt hat eine Lauflänge von rd. 750 m (Stat. Km 107+620 – 106+870).

Die Berkel ist im Planungsgebiet dem Fließgewässertyp 14 der „sandgeprägten Tieflandbäche“ zugeordnet. Charakteristisch für diesen Fließgewässertyp ist ein stark geschwungener bis mäandrierend verlaufender Tieflandbach und ein flaches Profil mit ausgeprägten Prall- und Gleithängen. Das Sohlsubstrat besteht hauptsächlich aus lagestabilem Sand mit lokal auftretenden Kies- und Totholzmassen.

Der Gewässerabschnitt ist als erheblich verändert und mit der Nutzungsgruppe „Landentwässerung und Hochwasserschutz“ eingestuft worden. Zur Erfüllung der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie gilt es für dieses Gewässer das GÖP zu erreichen. Die Gewässerstrukturgüte ist von stark verändert bis vollständig verändert bewertet (Quelle: www.elwasweb.nrw.de). Schlüsselfaktoren zur Erreichung des GÖP sind naturnahes Substrat und Tiefenvarianz, wenig Verbau und Anbindung der (Sekundär-)Aue.

Maßnahmen Nord (Städtische Flächen bei der Kläranlage)

Auf einer Länge von 605 m soll die Berkel in den Entwicklungskorridor von bis zu 30 m östliches des bestehenden Verlaufes verschwenkt und durch einen geschwungenen bis mäandrierenden Verlauf auf eine Lauflänge von rd. 700 m verlängert werden. Zur Aufweitung des Gewässerprofils sind Böschungsabflachungen und Sekundärauen geplant. Zur Strukturvielfalt, Tiefen – und Breitenvarianz wird Totholz in Form von Stubben und Stämmen vorgesehen, die im Boden verankert werden. Einige Bermen sollen mit Schilf bepflanzt werden, um bereits vor der Einleitungsstelle der Kläranlage Phosphor abzubauen sowie im Unterlauf das eingeleitete Abwasser weitergehend zu reinigen. Die Bermen sollen ab Mittelwasser benetzt werden. Insgesamt soll im nördlichen Bereich (Flächen der Stadt Billerbeck) eine Fläche von rd. 2160 m² mit Schilf angepflanzt werden. Optimale Bedingungen für die Schilfpflanzen bilden sonnige Standorte.

In Bereichen mit Bermen ohne Schilfbewuchs ist die Beschattung von Initialbepflanzung zur Regulierung der Wassertemperatur vorgesehen. Ufergehölze haben zudem den Vorteil der Stabilisierung von Ufer und Sohle durch ein dichtes Wurzelwerk. Ebenso stellen Ufergehölze ein Rückzugs- und Überwinterungsquartier und Nahrungsquelle für aquatische Lebewesen sowie Nist- und Brutplätze für Vögel dar. Die bestehenden Gehölze auf der westlichen Böschung sollen nach Möglichkeit erhalten bleiben.

Maßnahmen Süd (WBC Flächen)

Im ersten Abschnitt soll die Böschungs- und Sohlsicherung entfernt und ein altes Brückenwiderlager abgebrochen werden. Im Unterlauf des Brückenwiderlagers ist ein Seite 3 / 3 neuer, geschwungener bis mäandrierender Gewässerverlauf mit Inanspruchnahme der angrenzenden, beidseitigen Flächen und einer Laufverlängerung von rd. 515 m auf rd. 700 m geplant. Das Gewässerprofil der Neutrassierung soll durch Böschungsabflachungen und der Anlagen von Sekundärauen aufgeweitet werden. Zur Strukturvielfalt und als wichtiger Lebensraum für Kleinstlebewesen soll Totholz eingebaut und lagestabil gesichert werden.

Für einen weitergehenden Abbau von Phosphor sind Schilfzonen von rd. 2.190 m² geplant, die ab Mittelwasser langsam fließend überströmt werden. Die Bermen können z.B. durch Röhrichmatten, die eine schnelle Bepflanzung und Sicherung erzielen, ausgebildet werden.

Im Bereich vor der Einmündung des Hamerner Mühlenbachs soll sich der Eingriff auf die Entfernung der Böschungs- und Sohlsicherung und der Rückbau eines Querbauwerkes beschränken.

Einige zusätzlichen Gehölze sind zur Beschattung und Strukturvielfalt vorgesehen. Die beiden umgestalteten Gewässerabschnitte sollen sich frei und dynamisch entwickeln. Die Pflege und Unterhaltung soll lediglich im Bedarfsfall (z.B. bei Gefährdung der Hochwassersicherheit) erfolgen.

Der Retentionsraum innerhalb der Neutrassierung der Berkel vergrößert sich durch die geplanten Maßnahmen erheblich und trägt zum Hochwasserschutz bei. Die geplanten Maßnahmen entsprechen den Schlüsselfaktoren (Habitats) zur Erreichung des GÖP und bewirken eine deutliche Verbesserung der Gewässerstrukturgüte, wodurch das gute ökologische Potenzial erreicht werden kann.

9. Vergleich der Maßnahmenpakete

Folgend werden die vom Ingenieurbüro Wiehager empfohlenen Maßnahmen zur ökologischen Verbesserung der Berkel im Bereich der Kläranlageneinleitung mit den in diesem Bericht vorgestellten Konzepten auf der Kläranlage verglichen.

Die ökologischen Verbesserungsmaßnahmen zielen dabei auf die Reduktion von P_{ges} und NH_4-N ab. Die verfahrenstechnischen Konzepte auf der Kläranlage zielen dagegen separat auf die weiterführende Elimination von P_{ges} und NH_4-N . Somit werden die Jahreskosten der jeweiligen P_{ges} und NH_4-N Maßnahmen für die Kostenvergleichsrechnung zusammengefasst und dem Konzept des Ingenieurbüro Wiehagers gegenübergestellt.

Auf Basis der in Kapitel 4.4 und 7.4 durchgeführten Variantenbewertung werden, die in der folgenden Tabelle aufgeführten Maßnahmen verglichen. Um besonders im Winter die Einhaltung des NH_4-N Betriebsmittelwertes zu erreichen wird in der Variante 2 die Kombination aus den strukturverbessernden Maßnahmen und den betrieblichen Anpassungen zur erweiterten Stickstoffreduktion verglichen. Um eine generelle Verbesserung der Feststoffabscheidung der Nachklärung zu erreichen, wurden in der Variante 2 und 3 zusätzlich Investitionskosten für die Optimierung des Einlaufbauwerkes der Nachklärung einberechnet (vgl. Kapitel 3.3).

Variante	Beschreibung
1	- Ökologische Umgestaltung des Gewässers
2	- Ökologische Umgestaltung des Gewässers - Optimierung des Einlaufbauwerkes der Nachklärung - Anhebung des TS-Gehaltes - Anhebung der Sauerstoffkonzentration
3	- Erhöhung der Fällmittelzugabe - Optimierung des Einlaufbauwerkes der Nachklärung - Anhebung des TS-Gehaltes - Anhebung der Sauerstoffkonzentration
4	- Bau einer Tuchfiltration - Anhebung des TS-Gehaltes - Anhebung der Sauerstoffkonzentration

Die Tabelle 27 stellt die Investitionskostenschätzungen der Vorzugsvarianten dar. Die Investitionskosten des Ingenieurbüro Wiehager umfasst die Positionen der bautechnischen Maßnahmen. Nach jetzigem Kenntnisstand müssen keine neuen Flächen aufgekauft werden. Der 605 m lange Abschnitt im Bereich der Kläranlageneinleitung unterliegt städtischen Besitz. Die Flurbereinigungsbehörde würde bei einer Umstrukturierung der Berkel eine entsprechende Ausgleichsfläche bereitstellen. Der 705 m lange Abschnitt in der „Ausgleichsfläche Mersmannsbach“ wird durch die Wirtschaftsbetriebe Kreis Coesfeld GmbH unentgeltlich zur Verfügung gestellt.

Die Investitionskosten der Tuchfiltration wurden im Kapitel 4 näher beleuchtet. Insgesamt weist die Kostenschätzung geringere Investitionen bei dem Konzept nach dem Ingenieurbüro Wiehager auf.

Tabelle 27 Vergleich der Investitionskostenschätzungen der Vorzugsvarianten

Anlage 1: Investitionskostenschätzung						
Pos.-Nr.	Text		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
1	Bautechnik	EUR	556.780,00	576.780,00	20.000,00	234.200,00
2	Maschinentchnik	EUR	0,00	0,00	0,00	270.000,00
3	EMSR-Technik	EUR	0,00	0,00	0,00	115.000,00
Summe Herstellungskosten, netto		EUR	556.780,00	576.780,00	20.000,00	619.200,00
Nebenkosten pauschal 10 %		EUR	-	-	2.000,00	61.920,00
Summe Baukosten, netto		EUR	556.780,00	576.780,00	22.000,00	681.120,00
Mehrwertsteuer 19 %		EUR	105.788,20	109.588,20	3.800,00	117.648,00
Summe Baukosten, brutto		EUR	662.568,20	686.368,20	25.800,00	798.768,00

9.1 Bestimmung der Betriebskosten

In der folgenden Tabelle werden die Annahmen für die Betriebskosten der jeweiligen Variante zusammengefasst. Die betriebsgebundenen Kosten beinhalten Personal- und Wartungs-/Instandhaltungskosten. Die verbrauchsgebundenen Kosten setzen sich aus den Energie-, den Chemikalien- und den Schlammmentwässerungs- sowie Schlammmentsorgungskosten zusammen.

Tabelle 28 Betriebskostenannahme für die Vorzugsvarianten

Anlage 3: Betriebskosten					
Bezeichnung		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Kapitalkosten	EUR	34.087,80	35.312,27	1.224,46	53.038,61
Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	10.000,00	10.240,00	5.240,00	31.030,40
Personalkosten	EUR/a	5.000,00	5.000,00	5.000,00	12.500,00
Wartungs- und Instandhaltungskosten	EUR/a	5.000,00	5.240,00	240,00	18.530,40
Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	10.000,00	10.240,00	5.240,00	31.030,40
Verbrauchsgebundene Kosten	EUR/a	0,00	-5.388,09	5.991,18	620,27
Gesamtsumme Betriebskosten, netto	EUR/a	10.000,00	4.851,91	11.231,18	31.650,67
Mehrwertsteuer	19%	1.900,00	921,86	2.133,92	6.013,63
Gesamtsumme Betriebskosten, brutto	EUR/a	11.900,00	5.773,78	13.365,10	37.664,30

Die vorgestellten Maßnahmen von Wiehager unterliegen dem Konzept der freien und dynamischen Entwicklung der umgestalteten Gewässerabschnitte. Eine Pflege und Unterhaltung soll lediglich im Bedarfsfall, z.B. bei Gefährdung der Hochwassersicherheit, erfolgen.

Im Gegensatz zu Wiehager gehen wir von einer, zumindest alljährlichen, Pflege dieser Gewässerabschnitte aus. Ähnlich wie bei Teichkläranlagen sollte in gewissen Abständen das Schilf entfernt werden, um das in die Pflanzen gebundene Phosphat aus dem System zu entfernen. Für den Betriebskostenvergleich wurden für die betriebsgebundenen Kosten pauschal 10.000 EUR/a angenommen. Wir empfehlen den tatsächlichen Aufwand noch einmal explizit zu prüfen.

Die geringsten Jahresbetriebskosten weist die Variante 2 auf Grund der geringeren Überschussschlammproduktion auf (vgl. Kapitel 7.2).

9.2 Bestimmung der Jahreskosten

Die Jahreskosten ergeben sich aus den betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten, sowie den Kapitalkosten und werden in Abbildung 56 dargestellt. Die Kapitalkosten wurden anhand folgender Vorgaben berechnet:

Betrachtungszeitraum:	30 a
Nutzungsdauer Bautechnik:	30 a
Nutzungsdauer Maschinenteknik:	15 a
Nutzungsdauer E-/MSR-Technik:	15 a
Realzinssatz:	3 %

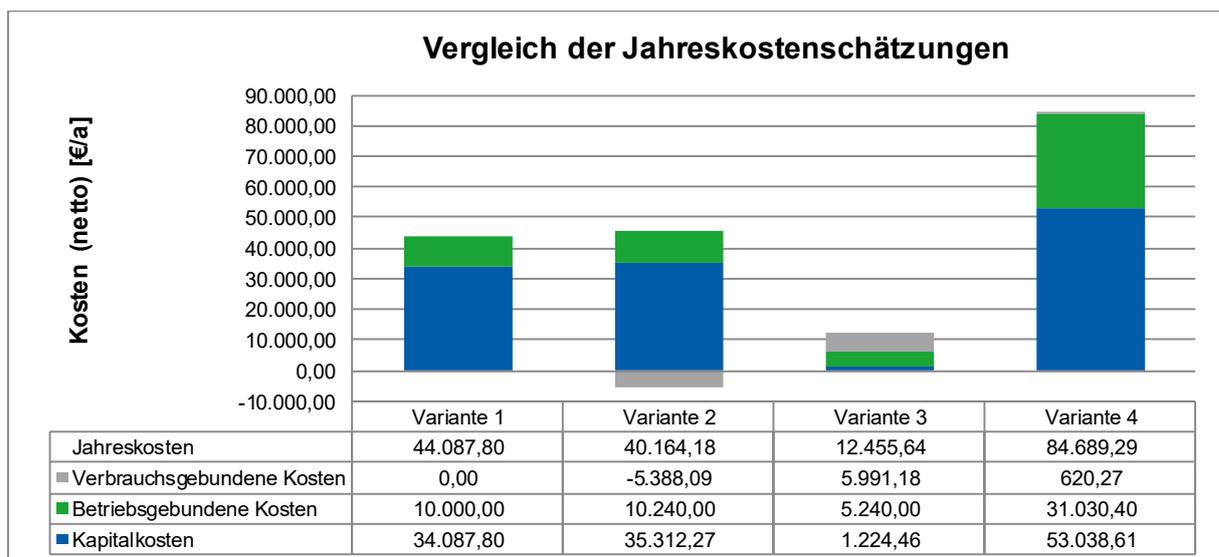


Abbildung 56 Jahreskostenschätzung der einzelnen Varianten

Die geringsten Jahreskosten weist die Variante 3 der betrieblichen Anpassungen auf der Kläranlage auf. Die höchsten Jahreskosten werden für die betrieblichen Anpassungen (O2-Sollwert, Anpassung Schlammalter) inkl. dem Bau des Tuchfilters erreicht. Die Variante 2 weist die gleichen Betriebsgebundenen- und Kapitalkosten wie die Variante 1 auf. Der Unterschied liegt darin, dass in der Variante 1 der strukturverbessernden Maßnahmen keine verbrauchsgebundenen Kosten entstehen. In der Variante 2 können dagegen, durch die wahrscheinlich geringere Überschussschlammproduktion, Kosten gegenüber dem heutigen Betrieb eingespart werden.

9.3 Bewertung der Varianten

Um die Varianten zu bewerten wurde zuzüglich der Ermittlung der Jahreskosten eine Bewertungsmatrix mit einer spezifischen Gewichtung aufgestellt. Folgende Kriterien werden in der Bewertung berücksichtigt:

- Jahreskosten
- Reinigungsleistung $\text{NH}_4\text{-N}$ und P_{ges}
- Erfahrungen / Referenzen
- Betriebs- und Wartungsaufwand
- Betriebssicherheit

Jahreskosten

Die Jahreskosten wurden mit 30 % gewichtet. Durch die geringsten Jahreskosten der betrieblichen Anpassungen (Variante 3) erhält diese die höchste Punktzahl. Mit 2 Punkten wird die Maßnahme der Tuchfiltration am niedrigsten eingestuft. Die Variante 2 erhält durch die niedrigeren Schlammentsorgungskosten eine geringfügig bessere Bewertung als die Variante 1.

Reinigungsleistung P_{ges} und $\text{NH}_4\text{-N}$

Die Einhaltung des P_{ges} und $\text{NH}_4\text{-N}$ Betriebsmittelwertes wird mit einer Wichtung von 40 % als wichtigstes Entscheidungskriterium eingestuft. Die höchste Punktzahl erhält die Variante 4. Zum einen zeigt die Simulation, sowie ältere Betriebsdaten, dass durch betriebliche Anpassungen auf der Kläranlage $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufwerte in Höhe des geforderten Betriebsmittelwertes erreichbar sind. Zum anderen zeigen die Laborversuche und vergleichbare Projekte, dass mit Hilfe einer Nachfällung und einer nachgeschalteten Filtration sehr niedrige P_{ges} -Ablaufwerte zu erreichen sind. Die Reinigungskapazität der strukturverbessernden Maßnahmen sind etwas schwerer einzuschätzen. Auf Grund der großen Fläche an zu pflanzendes Schilf, wird jedoch ausgegangen, dass eine signifikante Reduktion von $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{PO}_4\text{-P}$ erfolgen kann. Auf Grund der nicht genau zu charakterisierenden Reinigungsleistung, erhält diese Variante jedoch eine geringere Punktzahl.

Erfahrungen / Referenzen

Die Erfahrungen und Referenzen wurden mit 10 % gewichtet. Die meisten Erfahrungen gibt es im Bereich der nachgeschalteten Fällung inkl. Filtration und der betrieblichen Anpassung des Sauerstoffsollwertes, sowie des Schlammalters. Aus diesem Grund erhalten die Varianten 2 bis 4 mit je 3,5, 3,0 und 4,0 die höchsten Punktzahlen. Die Erfahrungen im Bereich der Phosphat- und Stickstoffelimination durch strukturverbessernde Maßnahmen sind am geringsten.

Betriebs- und Wartungsaufwand

Der Betriebs- und Wartungsaufwand ist für die Variante der strukturverbessernden Maßnahmen am geringsten. Das Ingenieurbüro Wiehager geht hierbei lediglich von einer Pflege und Unterhaltung im Bedarfsfall, z.B. bei Gefährdung der Hochwassersicherheit, aus. Wir gehen zusätzlich davon aus, dass das in den Pflanzen gebundene Phosphat durch Beschneidung des Schilfs aus dem System turnusmäßig entfernt werden muss.

Der höchste Betriebsaufwand obliegt bei der Nachfällung inklusive Filtration.

Betriebssicherheit

Bei ausreichender Pflege des Gewässers wird davon ausgegangen, dass die Umstrukturierung der Berkel den geringsten Einfluss auf die Betriebssicherheit hat. Aufgrund der erweiterten Technik erhält dagegen die Variante 4 die geringste Punktzahl.

Tabelle 29 Bewertung der unterschiedlichen Maßnahmenansätze

Kriterium	Wichtung	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet
Jahreskosten	0,30	3,50	1,05	4,00	1,20	5,00	1,50	2,00	0,60
Reinigungsleistung P _{ges} und NH ₄ -N	0,40	3,00	1,20	3,50	1,40	3,00	1,20	4,00	1,60
Erfahrungen / Referenzen	0,10	1,50	0,15	2,00	0,20	4,00	0,40	4,00	0,40
Betriebs- und Wartungsaufwand	0,10	5,00	0,50	3,50	0,35	4,00	0,40	3,00	0,30
Betriebssicherheit	0,10	4,50	0,45	4,50	0,45	4,50	0,45	3,00	0,30
Summe	1,00	17,50	3,35	17,50	3,60	20,50	3,95	16,00	3,20

Wertung nach Punkten (steigende Wertung = bessere Wertung); 1 = ungenügend, 5 = sehr gut

Die höchste Punktzahl erreicht die Variante 3 der betrieblichen Anpassungen auf der Kläranlage. Für diese Maßnahmen werden keine zusätzlichen Investitionen benötigt, zudem deuten die Ergebnisse hin, dass zumindest der NH₄-N Betriebsmittelwert hierdurch eingehalten werden kann.

Die zweithöchste Bewertung erhält die Variante 2. Im Falle, dass die Maßnahmen der betrieblichen Anpassungen nicht ausreichend, sollte die strukturverbessernden Maßnahmen der Berkel in Betracht bezogen werden. Auf Grund der höheren Investitions- sowie betriebsgebundenen Kosten, erhält die Variante der Tuchfiltration (Variante 4) die geringste Punktzahl.

10. Zusammenfassung

Das vorangegangene Monitoring der Berkel, dem Vorfluter der Kläranlage Billerbeck, ergab, dass das ökologische Potenzial als unbefriedigend zu bewerten ist. Die Orientierungswerte für P_{ges} , $\text{NH}_4\text{-N}$ und den pH-Wert werden zumindest zeitweise nicht eingehalten.

Anhand einer Intensivmesskampagne sollte der Einfluss der Kläranlage auf das Erreichen der Orientierungswerte der Berkel überprüft werden. Hierbei wurde festgestellt, dass die Einleitung aus der Kläranlage einen Einfluss auf die Berkel bezüglich der P_{ges} , $\text{PO}_4\text{-P}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentrationen besitzt.

Aus diesem Grund wird in der aktuellen Einleitgenehmigung gefordert, bis spätestens zum 30.10.2020, ein Konzept zur weitergehenden Frachtreduzierung, mindestens für die Parameter P_{ges} und $\text{NH}_4\text{-N}$, zu erarbeiten und der Bezirksregierung Münster vorzulegen. Um die Orientierungswerte einzuhalten, strebt die Bezirksregierung Münster einen Betriebsmittelwert für P_{ges} von 0,2 mg/l und einen $\text{NH}_4\text{-N}$ Betriebsmittelwert von 0,5 mg/l für die Kläranlage Billerbeck an.

Im vorliegenden Bericht wurde der Frage der technischen Umsetzbarkeit sowie den zu entstehenden Kosten nachgegangen. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Ansätze geprüft. Das Ingenieurbüro Wiehager prüfte die Möglichkeiten von strukturverbessernden Maßnahmen an der Berkel, um die geforderten Zielwerte zu erreichen. Die Gelsenwasser AG prüfte dagegen die Möglichkeiten verfahrenstechnischer Maßnahmen auf der Kläranlage. Die Ergebnisse beider Ansätze wurden anschließend verglichen und eine Handlungsempfehlung ausgegeben.

Verfahrenstechnische Optimierungen zur Einhaltung des P_{ges} Betriebsmittelwert

Um die Machbarkeit einer weiteren P_{ges} Elimination auf der Kläranlage zu ermitteln, wurde anhand einer Betriebsdatenauswertung, Laboranalysen und einer vor Ort Begehung durch die Gelsenwasser AG die aktuelle P-Elimination sowie die Möglichkeiten einer zusätzlichen Reduktion ermittelt.

Das Ingenieurbüro Wiehager prüfte zeitgleich mögliche Maßnahmen zur Erreichung des guten ökologischen Potenzials der Berkel oberhalb und unterhalb der Einleitstelle der Kläranlage.

Die Betriebsdatenauswertung zeigt, dass die P_{ges} Ablaufkonzentration 2018 im Mittel bei 0,38 mg/l lag, wobei eine stetig sinkende Konzentration zu beobachten ist. So lag die P_{ges} -Konzentration im 4. Quartal 2018 lediglich bei 0,22 mg/l. Diese höhere Eliminationsleistung ließ sich durch eine verbesserte Ausnutzung des Fällmittels erklären. Um den geforderten Betriebsmittelwert sicher zu erreichen, müssten weitere 0,02 bis 0,18 mg/l eliminiert werden.

Aus diesem Grund wurden Analysen zur Phosphatfraktionierung sowie Fällmittelversuche durchgeführt. Ein relativ hoher $\text{PO}_4\text{-P}$ Anteil im Ablauf der Kläranlage weist dabei auf Optimierungspotenziale hinsichtlich der Phosphatreduktion hin. Solange die Phosphatfraktionen keiner hohen Variabilität unterliegen, können bei einem weitgehenden Feststoffrückhalt, Ablaufwerte von bis zu 0,18 mg/l erreicht werden. Der vollständige Rückhalt des gebildeten partikulären Phosphates kann jedoch bei der jetzigen Verfahrenstechnik nicht garantiert werden.

Mit der aktuellen Verfahrenstechnik wird davon ausgegangen, dass durch einen höheren Einsatz von Fällmittel, P_{ges} Ablaufwerte von mindestens 0,26 mg/l erreicht werden können (Bezugsjahr 2018).

Eine Optimierung der Abscheideeffizienz der Nachklärung, z.B. durch ein Leitblech oder eines höhevariablen Einlaufbauwerks kann zu einer sicheren und ggf. zusätzlichen Phosphatabscheidung führen.

Eine weitere Senkung der Ablaufwerte könnte mittels eines nachgeschalteten Verfahrens ermöglicht werden. Diesbezüglich wurde der Einsatz von Sandfiltern, Tuchfiltern sowie die Reaktivierung der zweiten Nachklärung in Betracht gezogen und hinsichtlich der Verfahrenstechnik sowie der Kosten näher beleuchtet. Als Vorzugsvarianten stellten sich dabei der Tuchfilter heraus. Es ist jedoch zu prüfen, ob die weitere Senkung der P_{ges} -Konzentration die Investitions- und Betriebskosten einer nachgeschalteten Reinigungsstufe rechtfertigen.

Verfahrenstechnische Optimierungen zur Einhaltung des $\text{NH}_4\text{-N}$ Betriebsmittelwert

Zur Beantwortung der Frage, ob die Einhaltung eines $\text{NH}_4\text{-N}$ Betriebsmittelwertes von 0,5 mg/l möglich ist, wurde eine Betriebsdatenauswertung durchgeführt und eine dynamische Simulation der Kläranlage aufgebaut.

Die Betriebsdatenauswertung zeigte eine Saisonalität der TN_b-Frachten mit einem leichten Rückgang der Ablaufwerte 2018. Im Mittel lag die Stickstoffzulaufkraft bei 148 kg/d.

In den Jahren 2017 und 2018 lag die mittlere NH₄-N Ablaufkonzentration bei 0,84 mg/l. Dieser Wert kann bereits als niedrig eingestuft werden und weist auf eine effiziente Stickstoffelimination hin.

Der geforderte Betriebsmittelwert kann in den Sommermonaten bereits jetzt erreicht werden. Auf Grund der niedrigeren Abwassertemperatur in den Wintermonaten liegen die NH₄-N Ablaufwerte in diesem Zeitraum jedoch deutlich über dem Zielwert. So ist der Einfluss der Kläranlage auf die NH₄-N Konzentration der Berkel besonders in dieser Zeit klar zu erkennen.

Innerhalb der dynamischen Simulation wurden die Auswirkungen einzelner Verfahren der Prozesswasserbehandlung sowie betriebliche Anpassungen wie die Erhöhung des Schlammalters und des Sauerstoffsollwertes analysiert.

Die höchsten NH₄-N Eliminationsraten konnten die betrieblichen Anpassungen erzielen. Die Ergebnisse Untersuchungen ergaben, dass diese Anpassungen das Erreichen des Betriebsmittelwertes ermöglichen können. Auf Grund des eher geringen Einflusses einer Prozesswasserbehandlung auf die NH₄-N Ablaufwerte, wird in Anbetracht der hohen Kapital- und betriebsgebundenen Kosten der einzelnen Prozesswasserbehandlungen (Varianten 1 – 3), die Erhöhung des Sauerstoffsollwertes (Variante 4) und die Anpassung des Schlammalters (Variante 5) empfohlen. Besonders die Variante 5 könnte, neben der höheren NH₄-N Elimination, Einsparungen in den Entsorgungskosten mit sich führen.

Strukturverbessernde Maßnahmen zur Einhaltung des NH₄-N und P_{ges} Betriebsmittelwertes

Das Konzept durch das Ingenieurbüro Wiehager sieht eine ökologische Umgestaltung des Gewässers zur direkten Erreichung eines guten ökologischen Potentials in der Berkel vor und soll dabei als Alternative zum vorgestellten Konzept der Gelsenwasser AG dienen. Die Erreichung des guten ökologischen Potentials wird bei dieser Betrachtung durch eine Neutrassierung der Berkel sowie durch strukturverbessernde Maßnahmen erreicht.

Die Neutrassierung sieht einen bis zu 35 m breiten Entwicklungskorridor oberhalb und unterhalb der Einleitstelle vor. Die zu überplanenden Gewässerabschnitte weisen dabei eine Gesamtlänge von rund 605 Metern auf. Zudem soll die durch die Wirtschaftsbetriebe Kreis Coesfeld GmbH verwaltete rund 750 Meter lange Ausgleichsfläche Mersmannsbach mit in das Konzept einbezogen werden.

Aktuell wird die Strukturgüte dieser Abschnitte als stark bis vollständig stark verändert bewertet. Schlüsselfaktoren zur Erreichung des GÖP sind naturnahes Substrat und Tiefenvarianz, wenig Verbau und Anbindung der (Sekundär-)Aue.

Im Bereich der Kläranlageneinleitstelle soll die Berkel auf einer Länge von 605 m durch einen geschwungenen bis mäandrierenden Verlauf auf eine Lauflänge von rd. 700 m verlängert werden. Des Weiteren sollen strukturverbessernde Maßnahmen wie Böschungsabflachungen, Sekundärauen und die Einbringung von Totholz zur Verbesserung der Strukturvielfalt sowie Tiefen- und Breitenvarianz durchgeführt werden.

Um die geforderten P_{ges} und NH_4-N Orientierungswerte zu erreichen, werden einige Bermen zusätzlich mit Schilf bepflanzt. Das Phosphat sowie ein Teil des Stickstoffs sollen durch die Pflanzen aufgenommen werden. Zusätzlich wird erwartet, dass ähnlich wie bei Pflanzenkläranlagen, eine weitere Nitrifikation des Ammoniums an den Wurzeln des Schilfs erfolgt. Eine regelmäßige Pflege der Gewässerabschnitte inkl. Beschnitt soll der Entfernung der inkorporierten Stoffe dienen. Die zu bepflanzen Fläche wird mit 2.160 m² angesetzt.

Die vorgestellten Maßnahmen nach Wiehager entsprechen den Schlüsselfaktoren zur Erreichung des GÖP und bewirken eine deutliche Verbesserung der Gewässerstrukturgüte, wodurch das gute ökologische Potential erreicht werden kann.

Gesamtfazit und weiteres Vorgehen

Auf Grund der Zwischenergebnisse der verfahrenstechnischen Konzepte, wurde die Auswahl möglicher Konzepte auf die betrieblichen Anpassungen, den Einsatz einer Tuchfiltration und die ökologische Umgestaltung des Gewässers beschränkt. Der Jahreskostenvergleich der ermittelten Vorzugsvarianten zeigt auf, dass die betrieblichen Anpassungen auf der Kläranlage vorerst die geringsten Folgekosten aufweisen. Die höchsten Jahreskosten werden innerhalb der Variante der Tuchfiltration erzielt.

Die Ergebnisse der Bewertungsmatrix ergeben ein ähnliches Fazit. Die geringen Investitionskosten, die Ergebnisse der Laborversuche und Simulationen, sowie die Auswertung älterer Betriebsdaten deuten darauf hin, dass zumindest der NH_4-N Betriebsmittelwert durch die betrieblichen Anpassungen eingehalten werden kann. Durch eine moderate Erhöhung der Fällmittelmenge und eine Optimierung des Einlaufbauwerkes der Nachklärung kann zusätzlich die P_{ges} -Ablaufkonzentration weiter gesenkt werden.

Reichen diese Maßnahmen nicht aus, sollten die strukturverbessernden Maßnahmen der Berkel in Betracht gezogen werden. Neben der weiteren Reduktion der Zielparameter kann durch diese Variante zusätzlich das gute ökologische Potential erreicht werden.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse empfehlen wir folgende sukzessive Vorgehensweise:

- 1) Durchführung der betrieblichen Maßnahmen und Optimierung des Nachklärbeckens
 - Erhöhung des Schlammalters im Winter, sowie eine moderate Erhöhung des Sauerstoffsollwertes und der Fällmittelmenge
 - Optimierung des Einlaufbauwerks der Nachklärung

- 2) Umsetzung der Maßnahmen zur ökologischen Verbesserung der Berkel im Bereich der Kläranlageneinleitung

Die betrieblichen Anpassungen sollen besonders im Winter getestet werden, da wie in Kapitel 5.2 zu sehen, die $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufwerte im Sommer dem geforderten Betriebsmittelwert erreichen. Ebenso sollte die Optimierung des Einlaufbauwerks zeitnah durchgeführt werden. Im Falle, dass diese Maßnahmen nicht ausreichen, empfehlen wir, dass durch das Ingenieurbüro Wiehager vorgeschlagene Konzept zur Umsetzung der strukturverbessernden Maßnahmen umzusetzen. Es wird davon ausgegangen, dass eine Kombination dieser beiden Ansätze zu einer deutlichen Reduzierung der $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{PO}_4\text{-P}$ Orientierungswerte führen und das gute ökologische Potential der Berkel zu erreichen ist.

11. Anhang

- A Phosphatelimination - Investitionskostenschätzung
- B Phosphatelimination - Betriebskostenschätzung
- C Phosphatelimination - Jahreskostenschätzung
- D Phosphatelimination - Bewertungsmatrix
- E Stickstoffelimination - Investitionskostenschätzung
- F Stickstoffelimination - Betriebskostenschätzung
- G Stickstoffelimination - Jahreskostenschätzung
- H Stickstoffelimination - Bewertungsmatrix
- I Vorzugsvarianten - Investitionskostenschätzung
- J Vorzugsvarianten - Betriebskostenschätzung
- K Vorzugsvarianten - Jahreskostenschätzung
- L Vorzugsvarianten - Bewertungsmatrix

12. Literaturverzeichnis

- Beier, M. D.-I. (2018). Vorstellung des Merkblatts "Biologische Prozesswasserbehandlung". *Stickstoffrückbelastung - Stand der Technik 2018*, (S. 8). Leverkusen.
- Böhler, M., & Siegrist, H. (2008). *Möglichkeiten zur Optimierung der chemischen Phosphorfällung an hessischen Kläranlagen*. Dübendorf, Schweiz: EAWAG.
- BRMS. (2018a). *Entwurf - Abwasserbeseitigung der Stadt Billerbeck Erlaubnis gemäß § 8 (1) WHG i. V. m. § 10 WHG für die Kläranlage Billerbeck*. Münster: Bezirksregierung Münster.
- BRMS. (2018b). *Auswertung Intensivmessprogramm 2016/2017 Kläranlage Billerbeck*. 2017: Bezirksregierung Münster.
- Ceasperlein, G. (2018). *Unterhaltungskonzept für die Berkel zwischen den Stationen 106+850 und 107+500 zur ökologischen Aufwertung und Stabilisierung der Gewässerstruktur unterhalb von Billerbeck Begründung und Erläuterung der Maßnahmen*. Dortmund: U Plan GmbH.
- Cornel, P., Schaum, C., & Fundneider, T. (2016). *Filtration des Kläranlagenablaufs: Verfahrensschritt einer zukünftigen*. Regierungspräsidium Darmstadt: IWAR.
- Destatis. (2018a). *Preisindizes für die Bauwirtschaft*. Fachserie 17 Reihe 4, 2. Vierteljahresausgabe, Statistisches Bundesamt.
- Destatis. (2018b). *Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandabsatz) nach dem Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken*. Lange Reihen der Fachserie 17, Reihe 2 von Januar 2000 bis Mai 2018, Statistisches Bundesamt.
- DWA. (2011). *Betrieb von Abwasseranlagen: Die Phosphorbilanz im kommunalen Abwasser. Leitfaden Nr. 2-13*.
- Fimml, C. (Oktober 4/2010). *Ost ein Sorgenkind bei der Abwasserreinigung: Die Schlammwässer. KA Betriebs-Info*, S. 1796-1801.

-
- Gujer, W., & Boller, M. (1979). *Der Einfluss der chemischen Flockung und Fällung auf das Belebtschlammverfahren*. Karlsruhe: in 2. Verfahrenstewchnisches Seminar, Inst. für Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe.
- Jardin, N. (kein Datum). *Rückbelastung aus der Schlammbehandlung . Verfahren zur Schlammwasserbehandlung*. Essen: Ruhrverband.
- Langergraber, G., Alex, J., Weissenbacher, N., Woerner, D., Ahnert, M., Frehmann, T., . . . Winkler, S. (2007). Generation of diurnal variation for influent data for dynamic simulation. (S. 61-64). 10th IWA Specialised Conference on Design, Operation and Economics of large Wastewater Treatment Plants: IWA.
- Pinnekamp, J. (2012). *Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle*. Aachen: RWTH Aachen.
- Rummler, M. (2015). *Möglichkeiten der Elimination anthropogener Mikroschadstoffe in der Kläranlage Saerbeck*. Havixbeck: Ingenieurburü Rummler + Hartmann.
- Wassermann, C. (07. 09 2016). *Moderne Techniken der heutigen Phosphatfällung*. KRONOS ecochem, S. Kandel.



i. A. Arne Steinkamp
(Abteilung AWA Kläranlagenprojekte)