

Diplomarbeit

Optimierung der biologischen Phosphorentfernung in der Hauptkläranlage Wien

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades
eines Diplomingenieurs unter der Leitung von

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Svardal
und
Projektass. Dipl.-Ing. Heidemarie Paula Schaar

Durchgeführt am Institut für
Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
in der Abteilung Biologie und Chemie des Wassers
der Technischen Universität Wien

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Heike Huber-Fauland
Matr. Nr. 0226366
Martinstraße 22-26/3/4
3400 Klosterneuburg

Wien, im April 2009

Danksagungen

Mein Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Miklós Papp, der mir das Thema dieser Arbeit vorgeschlagen und alle dazu notwendigen Bedingungen in der Hauptkläranlage geschaffen hat. Bedanken möchte ich mich auch für die wissenschaftliche Betreuung durch Herrn Ass.Prof. DI. Dr.techn. Karl Svardal.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. Gerald Wandel, der mir alle anfallenden Fragen bezüglich der Kläranlage beantwortet hat. Besonders gilt auch mein Dank Frau Dipl.-Ing. Heidemarie Paula Schaar, die mich bei allen Versuchen und deren Auswertung intensiv betreut hat.

Weiters möchte ich mich bei meiner Mutter, Mag. Friederike Fauland, und bei meinem Mann, Dipl.-Ing. David Huber, für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Meine Diplomarbeit widme ich meinem Vater, Ing. Anton Fauland, der leider deren Fertigstellung nicht mehr erleben konnte.

Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit wird das Thema der biologischen Phosphorentfernung in Kläranlagen behandelt. Zuerst wird der Stand der Technik in diesem Problemfeld dargelegt. Die Hauptkläranlage Wien liefert das Ausgangsmaterial für genauere Untersuchungen. Standversuche mit dem Belebtschlamm der Anlage werden durchgeführt, bei denen optimale anaerobe und aerobe Bedingungen simuliert werden. Durch die in der Folge erhaltenen Messergebnisse können Rückschlüsse auf die vermehrte biologische Phosphorentfernung gezogen werden. Weiter fließt in die Betrachtung ein, in welchem Betriebszustand, Hybrid oder Bypass, die Kläranlage zum Zeitpunkt der Probenentnahme gefahren wird.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen deutlich ein Potential - unter optimalen Bedienungen - für vermehrte biologische Phosphoraufnahme in der ersten Stufe. In der zweiten Stufe ist kein Potential zur vermehrten biologischen Phosphoraufnahme vorhanden. Unter einer normierten Betrachtung, die sich durch die unterschiedlichen Probenzeiträume ergibt, ist kein Unterschied festzustellen, in welchem Betriebszustand sich die Anlage befindet.

Unter Einbeziehung einer Bilanz werden auch Zeiträume ermittelt, in denen es zu einer vermehrten biologischen Phosphoraufnahme kam. Dabei werden auch mögliche Einflüsse in Betracht gezogen.

Für die Hauptkläranlage Wien ist zu sagen, dass es Zeiträume der vermehrten biologischen Phosphoraufnahme gab und dass in der ersten Stufe Potential zur vermehrten biologischen Phosphoraufnahme vorhanden ist.

Abstract

This master thesis deals with the phosphorus luxury uptake in the wastewater treatment plant of Vienna. First the state of the art of wastewater treatment plants (wwtp) is explained. The main wastewater treatment plant of Vienna supplies the raw material for more exact investigations. Batch experiments with activated sludge of the plant are accomplished. In these experiments, optimal anaerobic and aerobic conditions are realized. Moreover, it is considered whether the treatment plant is operated in bypass or hybrid mode during the sampling campaign.

The results show clear potential for enhanced biological phosphorus removal (EBPR). In the second stage no EBPR could be observed. Under a standardized view, which arises as a result of the different sampling periods, no significant difference can be determined between the two operating mode of the plant.

On the basis of mass balances periods with EBPR could be determined. Periods with relevant EBPR were investigated in more detail to determine the decisive parameters.

Overall it can be concluded that there is a potential for EBPR in the first stage of the main wastewater treatment plant of Vienna.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	iii
1. Einführung	1
1.1. Herkunft des Phosphors im Abwasser	1
1.2. Grund für die Phosphorentfernung aus dem Abwasser	1
1.3. Phosphorentfernung in Kläranlagen	2
1.3.1. Chemische Fällung	2
1.3.2. Biologische Phosphorentfernung	3
1.4. Hauptkläranlage Wien	6
1.4.1. Auslegungsdaten	6
1.4.2. Technische Daten	6
1.4.3. Betriebsverfahren	9
1.4.4. Reinigungsleistung	10
1.5. Zielsetzung und Fragestellung	11
2. Methodik	12
2.1. Vorversuch	12
2.2. Batchversuch	14
2.2.1. P-Rücklösungsversuch	14
2.2.2. P-Wiederaufnahmeversuch	14
2.2.3. P-Aufstockungsversuch	14
2.3. Phosphorverlauf - hydraulische Aufenthaltszeit	15
2.4. Probenahmezeiträume	16
2.5. Analytische Messmethoden	16
2.5.1. Trockensubstanz und organische Trockensubstanz	16
2.5.2. Einzelsubstanzen	17
2.6. Analytische Auswertung	18

2.6.1.	Ermittlung der Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten	18
2.6.2.	Abschätzung des Bio-P - Potentials	18
2.6.3.	Bilanzierung	19
3.	Ergebnisse und Diskussion	21
3.1.	Vorversuch	21
3.1.1.	1.Stufe	21
3.1.2.	2.Stufe	25
3.2.	Batchversuch	26
3.2.1.	1. Versuch - Hybridbetrieb	26
3.2.2.	2. Versuch - Bypassbetrieb	29
3.2.3.	3. Versuch Bypassbetrieb mit Revision	31
3.2.4.	Vergleich der Batchversuche	32
3.2.5.	Ermittlung der Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten	35
3.2.6.	Abschätzung des Bio-P Potentials	37
3.3.	Phosphorverlauf - hydraulische Aufenthaltszeit	38
3.4.	Bilanz	39
3.4.1.	Berechnung des β -Werts	40
3.4.2.	Abschätzung der biologisch entfernten Mengen des Phosphor	47
4.	Schlussfolgerung	50
	Literaturverzeichnis	51
A.	Anhang	52

Abbildungsverzeichnis

1.1. Fällmittelzugabe [Kroiss, 2007]	3
1.2. Modellvorstellung zur Erklärung des Phänomens der vermehrten biologischen Phosphoraufnahme [Schönberger; 1990]	4
1.3. Phosphorkonzentration während des Rücklöse- und Wiederaufnahmeverganges [Schönberger; 1990]	5
1.4. Hauptkläranlage gesamt, [EBS, 2005]	8
1.5. Betriebsart Bypassverfahren, [EBS, 2005]	9
1.6. Betriebsart Hybridverfahren, [EBS, 2005]	10
2.1. Belegung 1.Stufe, Probeentnahmestellen, [EBS, 2005]	13
2.2. Anteile des entfernten Phosphors	20
3.1. 1. Vorversuch, BB1/1, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	22
3.2. 2. Vorversuch, BB1/1, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	22
3.3. 1. Vorversuch, BB1/4, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	23
3.4. 2. Vorversuch, BB1/4, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	24
3.5. 1. Vorversuch, BB2/1, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	25
3.6. 1. Vorversuch, Nachklärbecken	26
3.7. 6.3.2008, Batchversuch, Hybridbetrieb, 1. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	27
3.8. 6.3.2008, Batchversuch, Hybridbetrieb, 2. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	28
3.9. 18.6.2008, Batchversuch, Bypassbetrieb, 1. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	29
3.10. 18.6.2008, Batchversuch, Bypassbetrieb, 2. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	30
3.11. 3.7.2008, Batchversuch, Bypassbetrieb mit Revision, 1. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	31
3.12. 3.7.2008, Batchversuch, Bypassbetrieb mit Revision, 2. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$	32
3.13. Vergleich - Batchversuch, 1. Stufe, Fällmittelmengen	33
3.14. Vergleich - Batchversuch, 2. Stufe	34
3.15. Vergleich - Batchversuch, 1. Stufe, Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten	35

3.16. PO ₄ -P Verlauf in der Anlage, 1. Stufe - Nord	39
3.17. β -Wert für die 1. Stufe mit den entsprechenden Phosphorfrachten	40
3.18. β -Wert für die 2. Stufe mit den entsprechenden Phosphorfrachten	41
3.19. β -Wert für die gesamte HKA mit den entsprechenden Phosphorfrachten	42
3.20. Vergleich der β -Werte	43
3.21. β -Wert für die 1. Stufe mit Entfernungsgrad	44
3.22. β -Wert für die 2. Stufe mit Entfernungsgrad	45
3.23. β -Wert für die gesamte HKA mit Entfernungsgrad	46
3.24. Anteilsabschätzung für BB1, β -Wert=1 und spezifischer Energieverbrauch	47
3.25. Anteilsabschätzung für BB2, β -Wert=1 und spezifischer Energieverbrauch	48
3.26. Anteilsabschätzung für HKA, β -Wert=1 und spezifischer Energieverbrauch	49

Tabellenverzeichnis

1.1. Auslegungsdaten, [EBS, 2009]	6
1.2. Reinigungsleistung, [EBS, 2009]	10
2.1. Versuchstage mit jeweiligen Betriebszuständen und durchgeführten Versu- chen	16
2.2. Einzelsubstanzen und deren Bestimmungsmethoden	18
3.1. Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten der einzelnen Versuche	35
3.2. Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten normiert	36
3.3. anaerobes und aerobes Belebungsbeckenvolumen der ersten Stufe	37
3.4. Potential - entfernte Menge durch Bio-P	37
3.5. Beckenvolumen und hydraulische Aufenthaltszeit, 1. Stufe	38
3.6. Probenentnahmezeiten	38
A.1. Messdaten 1. Vorversuch 1. Stufe	53
A.2. Messdaten 2. Vorversuch 1. Stufe	54
A.3. Messdaten Vorversuch 2. Stufe	55
A.4. Messdaten 1. Batchversuch 1. Stufe	56
A.5. Messdaten 1. Batchversuch 2. Stufe	57
A.6. Messdaten 2. Batchversuch 1. Stufe	58
A.7. Messdaten 2. Batchversuch 2. Stufe	59
A.8. Messdaten 3. Batchversuch 1. Stufe	60
A.9. Messdaten 3. Batchversuch 2. Stufe	61
A.10. Messdaten Phosphorverlauf	62

1. Einführung

1.1. Herkunft des Phosphors im Abwasser

1,7 g Phosphor kommen pro Tag und Einwohner in das Abwasser, davon sind 1,4 g Phosphor von menschlichen Ausscheidungen und 0,3 g von Speiseresten und Waschmitteln [Zessner, 1999]. Diese Werte haben sich seit den 90iger Jahren nicht mehr verändert, da es zu dieser Zeit durch den Gesetzgeber im BGBL Nr.239/1987 eine Einschränkung des Phosphorgehalts in Waschmitteln gab. In den letzten Jahren ist jedoch wieder ein ansteigender Trend zu erkennen, z.B.: durch den Einsatz von Phosphor in Geschirrspültaps.

1.2. Grund für die Phosphorentfernung aus dem Abwasser

Phosphor ist, genauso wie Stickstoff, ein Nährstoff, den Pflanzen brauchen. Liegt zuviel von diesen Nährstoffen im Gewässer vor, kommt es zu vermehrtem Algenwachstum. Die Nährstoffanreicherung im Gewässer heißt Eutrophierung. Durch vermehrtes Algenvorkommen kommt es zu einer Sauerstoffzehrung in der Nacht und in weiterer Folge zu zunehmendem Absterben der Pflanzen, dies nennt man Sekundärverschmutzung. Für den Abbau der abgestorbenen Biomasse wird Sauerstoff benötigt, wodurch es zu Sauerstoffmangel für Tiere im Gewässer kommt. Diesem Vorgang will man mit der Entfernung von Phosphor und Stickstoff entgegenwirken. Im BGBL Nr.210/1996 werden die Grenzwerte dieser Substanzen für die Einleitung in ein Gewässer festgelegt. Darin sind 1 mg/l für Gesamt-Phosphor für die Größe der Wiener Kläranlage festgelegt.

1.3. Phosphorentfernung in Kläranlagen

Phosphor wird in den meisten Kläranlagen chemisch entfernt. Ein gewisser Anteil wird jedoch beim Zellaufbau in die Biomasse eingebaut, dabei handelt es sich um ca. 0,5% des abbaubaren CSB. Bestimmte Mikroorganismen besitzen die Fähigkeit vermehrt Phosphor einzulagern. Im Weiteren werden die beiden Möglichkeiten der Phosphorentfernung erklärt:

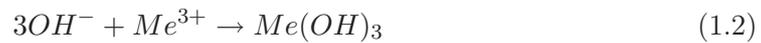
- chemische Fällung
- biologische Phosphorentfernung

1.3.1. Chemische Fällung

Bei der chemischen Fällung wird mit Hilfe eines Fällmittels, meist einem dreiwertigen Metallsalz (Fe oder Al), das Ortho-Phosphat in eine unlösliche Verbindung übergeführt, siehe Gleichung 1.1



In einer Nebenreaktion kann jedoch auch Metallhydroxid entstehen, siehe Gleichung 1.2:



PO_4^{3-}	...	ortho Phosphat
Me^{3+}	...	Metallsalz
$MePO_4$	...	Fällungsprodukt
$Me(OH)_3$	...	Metallhydroxid

Wie aus der Gleichung 1.1 ersichtlich, ist für die Fällung von 1 mol PO_4 -P theoretisch 1 mol Metallsalz notwendig. Durch unerwünschte Nebenreaktionen wird in der Praxis jedoch mehr Fällmittel dosiert. Ein wichtiger Wert für die Fällung ist der β -Wert, der in Gleichung 1.3 beschrieben wird.

$$\beta = \frac{1 \text{ mol } Me^{3+}}{1 \text{ mol } PO_4^{3-}} \quad (1.3)$$

Der β -Wert gibt Auskunft über das molare Verhältnis von Fällmitteleinsatz zu vorhandener löslicher Phosphorfracht. Damit sichergestellt ist, dass es zu einer vollständigen Fällung kommt, wird als Standard ein β -Wert von 1,5 [Matsché, 1991] angenommen, jedoch den Gegebenheiten der jeweiligen Anlage angepasst. Die Fällmittelzugabe kann als Vor-, Simultan- und Nachfällung ausgeführt werden, siehe Abbildung 1.1.

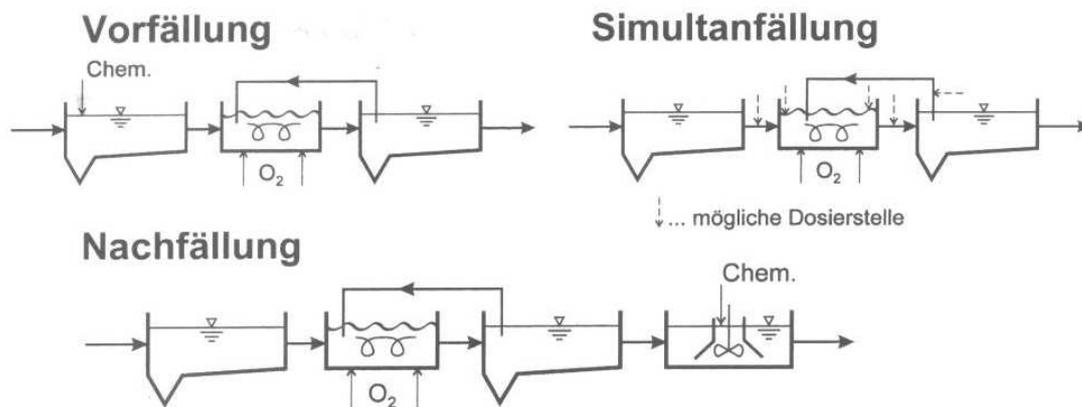


Abbildung 1.1.: Fällmittelzugabe [Kroiss, 2007]

Bei der Vorfällung wird das Fällmittel in der Vorklärung dazugeben. Dadurch kommt es zu vermehrtem Schlammanfall im Vorklärbecken. Bei der Simultanfällung gibt es mehrere Möglichkeiten der Fällmittelzugabe, siehe Abbildung 1.1. Meistens wird das Fällmittel im Zulauf zur Nachklärung zudosiert. Bei der Nachfällung ist ein eigenes Becken notwendig. Dort findet die Fällmittelzugabe und die Sedimentation des Fällungsproduktes statt. An welchem Ort die Fällmittelzugabe geschieht, ist anlagenspezifisch.

1.3.2. Biologische Phosphorentfernung

Bezüglich der Inkorporation von Phosphor in die Biomasse werden zwei verschiedene Arten des Einbaus von Phosphor in die Biomasse unterschieden, [Röske, 1998].

Die Menge des Einbaus, die von jedem Mikroorganismus für das Zellwachstum benötigt wird, macht ca. 1-2% der Trockensubstanz aus. Diese Inkorporation ist immer vorhanden, jedoch erzielt man mit dieser Art nicht den gewünschte Entfernungsgrad. Es handelt sich dabei um ca. 30% des Phosphors, der eingebaut wird.

Mit vermehrter biologischer Phosphoraufnahme, kurz Bio-P oder Luxury Up Take, kann bis zu 90% des Phosphors in die Biomasse eingebaut werden. Dabei steigt der Gehalt bis zu 8% Phosphor in der Trockensubstanz. Dafür müssen spezielle Bakterien vorhanden sein. Diese bilden sich, wenn wechselnde anaerobe und aerobe Bedingungen vorliegen. Weiters muss auch leicht abbaubares Substrat vorhanden sein. In Folge wird der Mechanismus der vermehrten Phosphoraufnahme beschrieben.

Unter anaeroben Bedingungen:

Die Bakterien lösen unter anaeroben Bedingungen als Energiequelle ihre Poly-Phosphat (PP) Speicher auf, indem sie das Poly-Phosphat in Ortho-Phosphat umwandeln. Diesen Vorgang nennt man Rücklösen. Dies ist notwendig, damit die Energie für die Umwandlung des leicht abbaubaren Substrats zu Poly- β -Hydroxy Buttersäure (PHB) und in Folge für die Einlagerung in den Substratspeicher vorhanden ist. Bei dem Rücklösvorgang steigt die Konzentration von Phosphor im Wasser deutlich an.

Weiters ist wichtig, dass anaeroben Bedingungen vorliegen. Unter anoxische Bedingen wäre eine Rücklösung wegen des, um das gleiche Substrat konkurrierenden, Denitrifikation erschwert [Röske, 1998].

Im der Abbildung 1.2 wird diese Modellvorstellung schematisch dargestellt.

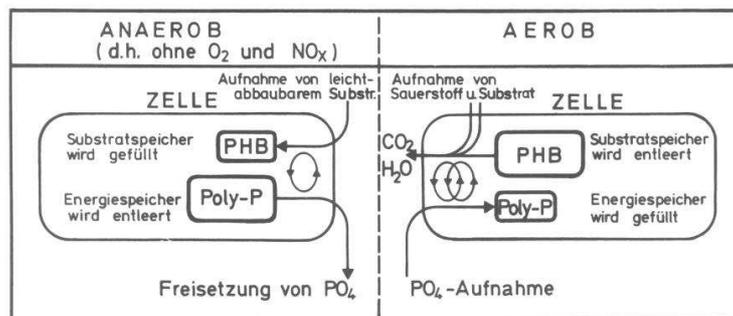


Abbildung 1.2.: Modellvorstellung zur Erklärung des Phänomens der vermehrten biologischen Phosphoraufnahme [Schönberger; 1990]

Unter aeroben Bedingungen:

Aufgrund ihrer gefüllten Substratspeicher haben die Bio-P Bakterien einen Vorteil gegenüber Mikroorganismen, die kein Substrat im anaeroben Bereich aufnehmen können. Durch diesen Vorteil sind die Bio-P Bakterien nicht auf die gelösten Substrate angewiesen. Es kommt zu vermehrtem Wachstum dieser Bakterien, wobei der vorher, im anaeroben Milieu, geleerte Phosphorspeicher wieder aufgefüllt wird. Die Aufnahme des Phosphors übersteigt die vorher rückgelöste Menge, siehe Abbildung 1.3.

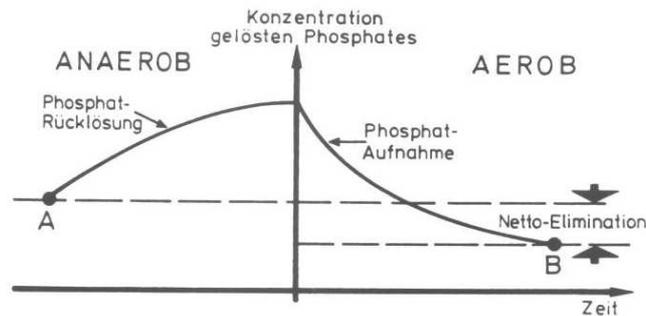


Abbildung 1.3.: Phosphorkonzentration während des Rücklöse- und Wiederaufnahmeverganges [Schönberger; 1990]

Inwieweit diese Aktivität der Bakterien temperaturabhängig ist, geht aus der Literatur nicht klar hervor [Schönberger; 1990]. Im Laborversuch wurde eine klare Abhängigkeit der vermehrten biologischen Phosphoraufnahme von der Temperatur beobachtet. In der Praxis sind die Ergebnisse jedoch widersprüchlich. Zu einer eindeutigen Einschränkung bei niedriger Temperatur kommt es dann, wenn der aerobe Bereich auf Kosten des anaeroben Bereiches vergrößert werden muss, um die Nitrifikation zu gewährleisten.

1.4. Hauptkläranlage Wien

Die Hauptkläranlage, kurz HKA, in Wien wurde 1980 als Hochlastanlage, in der nur Kohlenstoff entfernt wurde, eröffnet. Mit der Novelle des Wasserrechtsgesetz BGBL. Nr.252/1990 wurde die Stickstoffentfernung gefordert. Deswegen wurde die Anlage auf den Stand der Technik gebracht. 2005 wurde die zweite Belebungsstufe in Betrieb genommen. Für die Phosphorentfernung wird momentan auf Eisensulfat zurückgegriffen. Zu dem Einzugsgebiet gehört ganz Wien, auch umliegende Gemeinden und Industriegebiete.

1.4.1. Auslegungsdaten

In der Tabelle 1.1 sind alle Auslegungsdaten der erweiterten HKA zusammen gefasst.

Tabelle 1.1.: Auslegungsdaten, [EBS, 2009]

Einwohnerwerte	EW	4	Mio.
Abwassermenge	Q_{TW}	6	m^3/s
	Q_{RW}	18	m^3/s
Hydraulische Aufenthaltszeit	HRT	20	h

1.4.2. Technische Daten

Im Folgenden werden die technischen Daten der HKA dargestellt, [EBS, 2009]. Ein Schema der Anlage mit den im Folge beschriebenen Anlagenteilen ist in der Abbildung 1.4 dargestellt.

1 - Schotterfang: 2 Becken, Beckenlänge 12 m, Beckenbreite 5 m,

Sohlenvertiefung 1,2 m.

2 - Hebewerk: 6 Schneckenpumpen, Förderleistung je 3 - 4,5 m^3/s , Förderhöhe 5,2 m, Schneckenlänge 13 m, Durchmesser 3,25 m.

3 - Rechen: 6 Rechen, Rechenbreite von je 3 m, Stababstand 6 mm.

4 - Sandfang: 6 Becken, Beckenlänge 48 m, Beckenbreite 4 m, Gesamtvolumen 4.320 m³, Beckentiefe 3,6 m.

5 - Vorklärung (VK): 8 Becken, Gesamtvolumen 28.416m³ , Beckentieftiefe 3 m, Primärschlammräumung mit Schildräumer.

6 - Belebung 1.Stufe (BB1): 4 Becken, Gesamtvolumen 42.000 m³, Beckentiefe 2,6 m, Sauerstoffzufuhr durch 32 Kreiselbelüfter, max. Sauerstofftrag im Reinwasser 1,8 kgO₂/kWh.

7 - Zwischenklärung (ZK): 16 Becken, Gesamtvolumen 65.360 m³, Beckentiefe von 2,3 m Räumung des eingedickten Schlammes mit Schildräumern.

8 - Zwischenpumpwerk (ZWPK): 8 Abwasser-Propellerpumpen mit je 2,6 m³/s, 6 Rücklaufschlamm-Propellerpumpen mit je 2,7 m³/s.

9 - Belebung 2.Stufe (BB2): 15 Becken mit je 4 Kaskaden. Sauerstoffzufuhr über Tellerbelüfter, Max Sauerstofftrag im Reinwasser 4,88 kg O₂/kWh , Gesamtvolumen 171.000 m³, Beckentiefe 5,5 m.

10 - Nachklärbecken (NKB): 15 Becken, Gesamtvolumen 200.000 m³, Beckentiefe in der Mitte 9 m, am Rand 3 m. Wasserabzug erfolgt über getauchte Rohre. Die Räumung des eingedickten Schlammes erfolgt mit einem Räumschild am Beckenboden.

11 - Auslaufbauwerk: 3 Propellerpumpen, Förderleistung je Pumpe 8 m³/s bei Hochwasser in den Donaukanal, bei Trockenwetter 2,5 m Fallhöhe in den Auslaufkanal.

12 - Verdichterstation: 5 Verdichter mit je 1.250 kW.

13 - Klärschlammeindicker: 4 Schlammeindicker, Gesamtvolumen 13.500 m³, eingedicktes Schlammvolumen 4.000 - 12.000 m³/d, Schlammmasse 180 t/d, Trockensubstanzgehalt 3 - 5%.

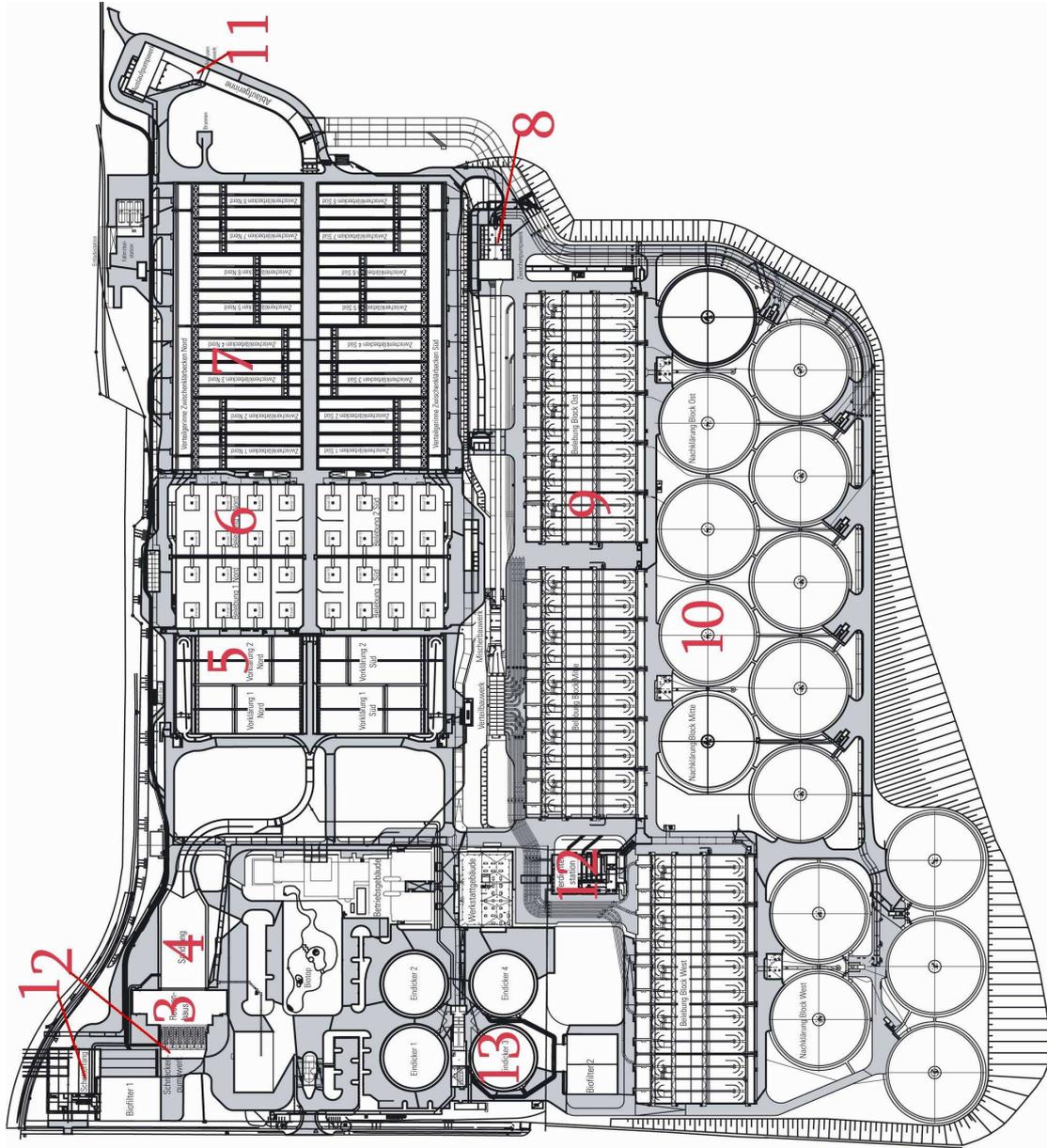


Abbildung 1.4.: Hauptkläranlage gesamt, [EBS, 2005]

1.4.3. Betriebsverfahren

Die Stickstoffentfernung ist der limitierende Faktor in zweistufigen Belebungsanlagen, da es zu einer räumlichen Trennung der Kohlenstoff- und Stickstoffentfernung kommt. Der Kohlenstoff, der schon in der ersten Stufe entfernt wird, fehlt in der zweiten Stufe für die Stickstoffentfernung. Je nach Kohlenstoffbedarf der zweiten Stufe, kann die Anlage im Bypass- oder Hybridbetrieb gefahren werden. Dies ist davon abhängig, welche Schmutzbelastung in die Anlage kommt.

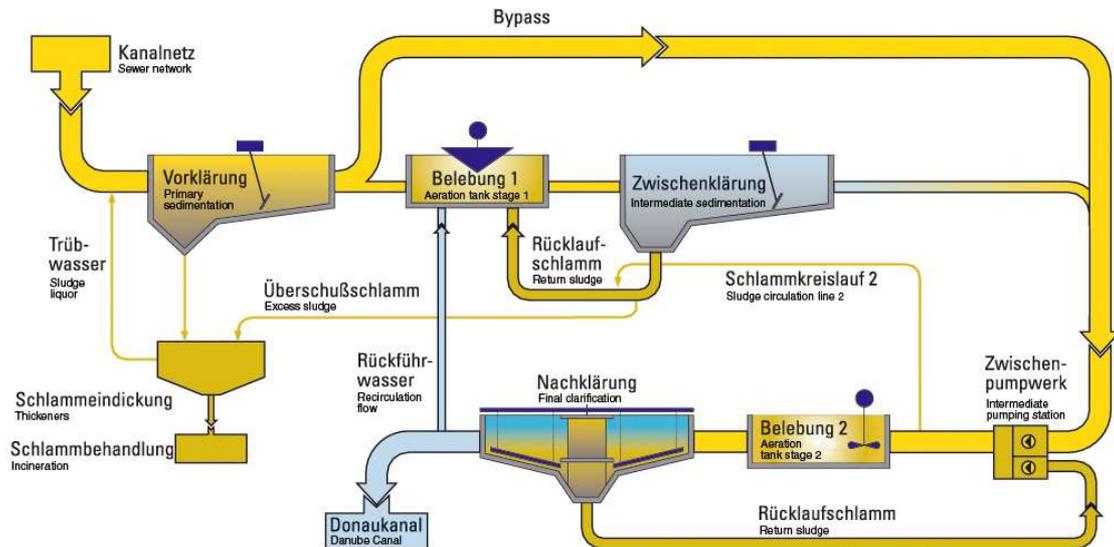


Abbildung 1.5.: Betriebsart Bypassverfahren, [EBS, 2005]

Bei Bypassbetrieb wird ein Teil des Abwassers nach der mechanischen Reinigung in die zweite Stufe geleitet. Dadurch gelangt leicht abbaubares Substrat in die zweite Stufe.

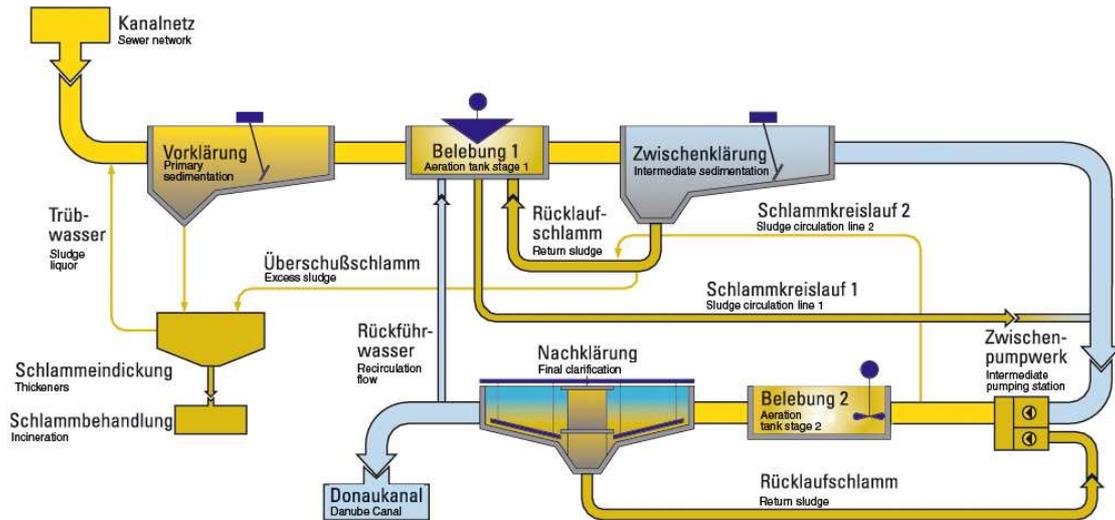


Abbildung 1.6.: Betriebsart Hybridverfahren, [EBS, 2005]

Bei Hybridbetrieb wird die gesamte Abwassermenge zuerst über die erste und danach über die zweite Stufe geleitet. Wesentlich bei diesem Betriebszustand ist, dass ein Teil des Belebtschlammes der ersten Stufe als Denitrifikationssubstrat in die zweite Stufe geleitet wird (Hybridschlamm, Schlammkreislauf 1).

1.4.4. Reinigungsleistung

In Tabelle 1.2 sind die Daten der Reinigungsleistung für den Zeitraum von Jänner 2008 bis Dezember 2008 zusammengefasst. Es sind zum Vergleich die jeweiligen Grenzwerte der ersten Abwasseremissionsverordnung für kommunales Abwasser, 1.AEV, angeführt.

Tabelle 1.2.: Reinigungsleistung, [EBS, 2009]

Parameter	Wirkungsgrad [%]		Ablaufkonzentrationen [mg/l]	
	HKA	min. gemäß 1.AEV	HKA	max. gemäß 1.AEV
BSB_5	98,5	95	5	15
CSB	94,6	85	34	75
TOC	93,4	85	12	25
N_{ges}	81,9	70	-	-
$NH_4 - N$	-	-	0,6	5
P_{ges}	-	-	0,9	1

1.5. Zielsetzung und Fragestellung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der biologischen Phosphorentfernung in der Hauptkläranlage Wien.

Folgende Fragestellungen werden bearbeitet:

- Sind Bio-P Mikroorganismen vorhanden bzw. wird Phosphor biologisch entfernt?
- Welches Potential liegt in den einzelnen Stufen vor?
- Gibt es einen Unterschied zwischen Hybrid- und Bypassverfahren bei der Bio-P?

Durch die vermehrte biologische Phosphoraufnahme kann die Fällmittelmenge reduziert werden. Eine Förderung des Luxury Up Take würde in einer Fällmittelreduktion resultieren. Dies wäre ein nicht zu vernachlässigendes Einsparungspotential.

2. Methodik

In diesem Kapitel werden die Versuchsabläufe, genauso wie die Messverfahren, die angewandt werden, beschrieben. Weiters wird auch der Vorgang der Auswertung dargestellt.

2.1. Vorversuch

Der Vorversuch dient dazu, nachzuweisen, ob Bio-P vorhanden ist. Außerdem soll dabei festgestellt werden, ob es einen Unterschied gibt, abhängig davon, an welcher Stelle die Proben an der Anlage entnommen werden. Folgende Probennahmestellen werden untersucht:

- Belebung 1. Stufe, 1. Kaskade, Mischung nach Gleichung 2.1 - BB1/1
- Belebung 1. Stufe, 4. Kaskade - BB1/4
- Belebung 2. Stufe, Mischung (Rücklaufschlamm 2+ Zulauf 2. Stufe) - BB2/1
- Nachklärbecken, Mischung (Rücklaufschlamm 2 + Ablauf) - NKB

Mischungen werden im jeweiligen Rücklaufverhältnis angefertigt. Die Mischung für die erste Kaskade wurde wie folgt berechnet:

$$RV = \frac{Q_{RS}}{Q_{VK_{ab}} + Q_{RF} + Q_{SK2}} \quad (2.1)$$

RV	...	Rücklaufverhältnis	...	$[-]$
Q_{RS}	...	Volumenstrom des Rücklaufschlammes	...	$[m^3/s]$
$Q_{VK_{ab}}$	...	Volumenstrom des Ablaufes der Vorklärung	...	$[m^3/s]$
Q_{RF}	...	Volumenstrom der Rückführung von gereinigtem Ablauf	...	$[m^3/s]$
Q_{SK2}	...	Volumenstrom des Überschussschlammes der 2. Stufe	...	$[m^3/s]$

Da die Menge des Q_{SK2} um mehrere Größenordnungen unter den anderen Volumenströmen liegt, kann Q_{SK2} vernachlässigt werden. Die Mischungen werden erstellt, damit keine Verfälschungen der Messwerte zwischen der Entnahme und dem Start der Versuchsdurchführung zustande kommen. Bei den Proben, die direkt verwendet werden bzw. dann, wenn die Mischungen fertig gestellt sind, wird über einen Faltenfilter in eine Eprovette filtriert, damit man unverfälscht den Startwert für die weitere Auswertung hat.

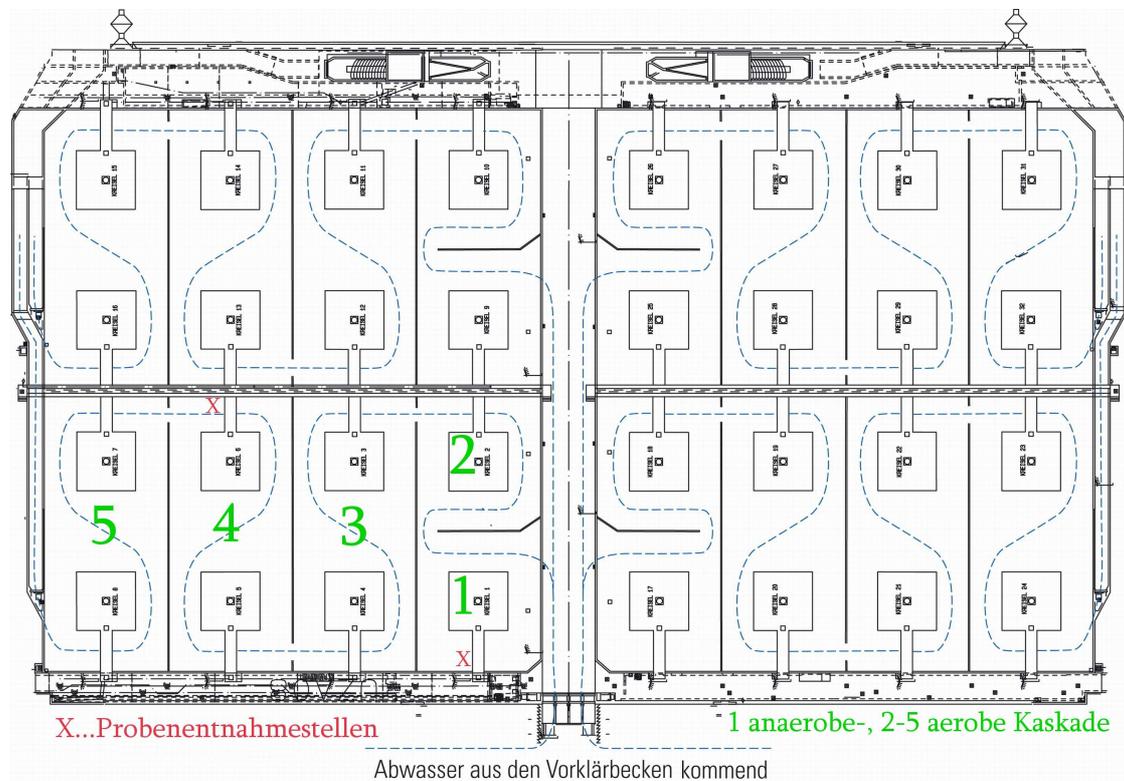


Abbildung 2.1.: Belegung 1.Stufe, Probeentnahmestellen, [EBS, 2005]

Versuchsdurchführung

Der Versuch wird, wie in den Abschnitten 2.2.1 und 2.2.2 beschrieben, durchgeführt.

2.2. Batchversuch

Im Batchversuch werden die anaerobe und im Anschluss die aerobe Phase untersucht, um Aufschluss über das Rücklöse- und Wiederaufnahmevermögen zu gewinnen.

2.2.1. P-Rücklösungsversuch

Vier Liter des zu untersuchenden Belebtschlammes werden in ein Gefäß mit Deckel gefüllt. Dort wird dieser für die Versuchsdauer unter anaeroben Bedingungen mit einem Deckel abgedichtet und mittels eines Magnetrührers in Bewegung gehalten (ca. 100 U/min), damit er nicht absinkt. In Intervallen von 5-10 Minuten werden Proben mittels einer Spritze ca. 50 ml gezogen. Bei der Probennahme ist zu beachten, dass der anaerobe Zustand immer gewährleistet ist. Zur jeweiligen Probennummer wird stichprobenartig die Temperatur, die Sauerstoffkonzentration und der pH-Wert gemessen. Die Proben werden mittels Faltenfilter in bereitgestellte 10 ml Eprouvetten filtriert. Die gefüllten und verschlossenen Eprouvetten werden bis zur Analyse gekühlt (4 °C) gelagert.

2.2.2. P-Wiederaufnahmeversuch

In weiterer Folge wird der Belebtschlamm, der zuvor anaeroben Bedingungen ausgesetzt war, um die Rücklösung zu bestimmen, für den Wiederaufnahmeversuch weiter genutzt. Nun wird die Probe belüftet, um den aeroben Zustand zu simulieren. Dazu wird ein Aquariumbelüfter verwendet. Wieder werden in Intervallen von 5-10 Minuten Proben gezogen. Das Filtrat wird ebenfalls in Eprouvetten abgefüllt und für die weitere Analyse kalt gestellt. Temperatur und pH-Wert werden stichprobenartig gemessen.

2.2.3. P-Aufstockungsversuch

Um festzustellen, ob es zu einer vermehrten Phosphoraufnahme kommt, muss der Phosphor aufgestockt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass es keine Fällung mit überschüssigem Eisen aus dem Belebtschlamm gibt. Weiters wird durch das Aufstocken vermieden, dass die Bakterien ab Beginn der Messung Phosphor-limitiert sind. Mittels einer

Spritze werden 10 ml einer Stammlösung von 1 g $PO_4 - P$ /l dazu gegeben. 3-5 Minuten nach der Aufstockung wird eine Probe gezogen und danach wieder in regelmäßigen Abständen von 5-10 Minuten. Mit den Proben wird, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, weiter verfahren. Während der ganzen Zeit wird weiter belüftet. Dieser Versuch wird im Anschluss an den Wiederaufnahmeversuch gemacht.

Die Proben für den Batchversuch werden an folgenden Stellen entnommen:

- BB1/4
- BB2/1 (Rücklaufschlamm + Zulauf 2. Stufe)

2.3. Phosphorverlauf - hydraulische Aufenthaltszeit

Durch diesen Versuch kann man den tatsächlichen Verlauf des Phosphors in der ersten Stufe darstellen. Die theoretische Aufenthaltszeit des Wassers in den einzelnen Becken bzw. Kaskaden wird anhand des Zulaufs errechnet. Die Proben für diesen Versuch stammen aus der ersten Stufe Nord und werden an folgenden Stellen entnommen:

- Ablauf VK
- BB1/1
- BB1/4
- Ablauf ZK

Es wurden die Aufenthaltszeiten wie folgt berechnet:

$$HRT = \frac{V_{Becken}}{Q_{zu}} \quad (2.2)$$

HRT	...	hydraulische Aufenthaltszeit	...	[s]
V_{Becken}	...	Beckenvolumen	...	[m ³]
Q_{zu}	...	Volumenstrom	...	[m ³ /s]

Mit diesem Wissen werden nach den errechneten Aufenthaltszeiten die Proben gezogen. Die Proben werden direkt vor Ort aus den Becken genommen und dann gleich über einen Faltenfilter in eine beschriftete Epruvette gefüllt.

2.4. Probenahmezeiträume

Die Versuchstage werden so gewählt, dass der Einfluss von Hybrid- oder Bypassverfahren untersucht werden kann. Die Tage werden außerdem so ausgesucht, dass unterschiedliche Temperaturbedingungen untersucht werden können. Die Belastungszeiträume mit den Versuchstagen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst:

Tabelle 2.1.: Versuchstage mit jeweiligen Betriebszuständen und durchgeführten Versuchen

Betriebszustand	Datum	Versuchsart
Hybridbetrieb	27.2.2008	Vorversuch, Phosphorverlauf
Hybridbetrieb	6.3.2008	Batchversuch
Bypassbetrieb	18.6.2008	Batchversuch
Bypassbetrieb	3.7.2008	Batchversuch
1.Stufe Süd in Revision		

2.5. Analytische Messmethoden

2.5.1. Trockensubstanz und organische Trockensubstanz

Die Trockensubstanz und die organische Trockensubstanz werden nach DIN 38409 Teil 1 (DEV HI) bestimmt.

Trockensubstanz - TS

Zur Bestimmung der Trockensubstanz wird ein vorher abgewogener Faltenfilter verwendet. 100 ml einer Probe werden filtiert, danach bei 105° C im Trockenschrank getrocknet und im Exsikkator abgekühlt. Durch nochmaliges Abwiegen kann auf die Trockensubstanz

rückgerechnet werden, siehe Gleichung 2.4.

$$m_{TS} = m_{Probe} - m_{FF} \quad (2.3)$$

$$TS = \frac{m_{TS}}{V_{Probe}} \quad (2.4)$$

Organische Trockensubstanz - oTS

Der getrocknete Faltenfilter wird in einem Ofen bei 550°C verbrannt, sodass sich alle organischen Substanzen verflüchtigen. Die zurückbleibende Menge ist der Glührückstand. Die Differenz zwischen Trockensubstanz und Glührückstand ist die organische Trockensubstanz, siehe Gleichung 2.6.

$$m_{oTS} = m_{TS} - m_G \quad (2.5)$$

$$oTS = \frac{m_{oTS}}{V_{Probe}} \quad (2.6)$$

m_{oTS}	...	Masse der organischen Trockensubstanz	...	[g]
m_{TS}	...	Masse der Trockensubstanz	...	[g]
m_G	...	Masse der verbrannten Probe	...	[g]
V_{Probe}	...	Volumen der Probe	...	[ml]
m_{FF}	...	Masse des Faltenfilters	...	[g]
oTS	...	organische Trockensubstanz des Belebtschlamm	...	[g/l]
TS	...	Trockensubstanz des Belebtschlamm	...	[g/l]

2.5.2. Einzelsubstanzen

In den faltenfiltrierten Proben der Versuche werden PO_4 -P, NO_2 -N und NO_x -N- mittels Autoanalyser analysiert. Die Analyse basiert auf der photometrischen Methode. Ein Teil jede Probe wird mit einem Reagenz vermischt, das mit der jeweiligen Einzelsubstanz reagiert und somit den Vergleich mit einer Referenz möglich macht.

Tabelle 2.2.: Einzelsubstanzen und deren Bestimmungsmethoden

Einzelsubstanz	Methode
PO ₄ -P	... Molybdänblau
NO ₂ -N	... Bildung eines Azofarbstoffs mit Sulfanilamid
NO _x -N	... Reduktion mit Cd als NO ₂

2.6. Analytische Auswertung

2.6.1. Ermittlung der Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten

Die gemäß 2.2.1, 2.2.2 und 2.2.3 ermittelten Analysewerte werden für die Ermittlung der Raten herangezogen. Dazu werden die Messpunkte in ein Zeit-Konzentrations Diagramm eingezeichnet. Durch Hinzufügen einer Trendlinie bei jedem Konzentrationsverlauf wird die Rücklöse- und Wiederaufnahmerate ersichtlich.

Damit man die einzelnen Raten an den verschiedenen Tagen vergleichen kann, werden sie mittels TS, oTS und über die Temperatur normiert. Die Normierung auf 20° C erfolgt mit der Gleichung 2.7 [Ludwig, 1982].

$$f = 1,066^{(20-T)} \quad (2.7)$$

f	...	Normierungsfaktor	...	[-]
T	...	Temperatur	...	[°C]

2.6.2. Abschätzung des Bio-P - Potentials

Durch die Bestimmung der einzelnen Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten wird rückgerechnet, wie viel Phosphor theoretisch rückgelöst werden kann und wie viel Luxury Up Take möglich wäre. Weiters wird das theoretische Potential der biologischen Phosphorentfernung der Anlage nach Gleichung 2.8 berechnet. Dazu dient die Annahme, dass die erste Kaskade anaerob ist und Kaskaden 4-5 aerob sind.

$$\Delta P = WR \cdot V_{aerob} - RR \cdot V_{anaerob} \quad (2.8)$$

ΔP	...	Nettoelimination Phosphor	...	$[mg/h]$
WR	...	Wiederaufnahmerate	...	$[mg/(lh)]$
RR	...	Rücklöserate	...	$[mg/(lh)]$
V_{aerob}	...	Beckenvolumen aerob	...	$[l]$
$V_{anaerob}$	...	Beckenvolumen anaerob	...	$[l]$

2.6.3. Bilanzierung

Für Phosphor wird eine Massenbilanz aus den Monatsprotokollen der HKA erstellt. Als Bilanzgrenzen dienen für die gesamte HKA: Zulauf Belebung und Ablauf der Anlage. Für die einzelnen Stufen ist es immer der entsprechende Zu- und Ablauf. Die Phosphorkonzentrationen werden aus den Tagesmischproben ermittelt. Die Daten von Juni 2005 bis September 2008 werden zuerst auf deren Plausibilität geprüft. Die für die Bilanzierung verwendeten Frachten werden aus den Konzentrationen und den Volumenströmen errechnet. Dabei wird berücksichtigt, ob Bypass- oder Hybridbetrieb gefahren wurde. Die Bilanzierung erfolgt nach [Svardal, 1998]. Die entfernte Phosphorfracht ergibt sich aus Eingangsfracht - Ausgangsfracht, da Phosphor nur über den Schlamm entfernt wird.

Berechnung des β -Wertes

Durch die aufbereitete Bilanz kann man den β -Wert für die einzelnen Stufen bzw. für die Gesamtanlage nach Gleichung 1.3 ermitteln. Dabei wird schon vor der β -Wert Berechnung der inkorporierte Phosphor durch das Zellwachstum von der gesamt entfernten Phosphorfracht abgezogen. Es handelt sich dabei um 0,5% des CSB.

Abschätzung der biologisch entfernten Mengen des Phosphors

Aufgrund der Bilanz und unter der Annahme, dass ein bestimmter β -Wert vorliegt, wird rückgerechnet, wann ein Bio-P möglich gewesen ist. Anhand dieser Auswertung ergeben sich Zeiten, in denen biologische Aufnahme möglich gewesen ist. Um abzuschätzen, wie viel davon chemisch gefällt und wie viel in die Biomasse eingebaut wurde, wird folgendermaßen vorgegangen:

Die entfernte Phosphorfracht wird berechnet. Mittels der verbrauchten Fällmittelmenge

unter der Annahme eines bestimmten β -Werts wird errechnet, wie viel Phosphor gefällt wird. Weiters wird die Menge an Phosphor berechnet, die für das Zellwachstum generell verbraucht wird. Es wird die Annahme getroffen, dass 0,5g P für 100g CSB Abbau notwendig ist. Die Berechnung der Bio-P erfolgt nach Gleichung 2.9.

$$m_{Bio-P} = m_{P_{entf.}} - m_{P_{0,5\%CSB}} - m_{P_{gef}} \quad (2.9)$$

m_{Bio-P}	...	Masse des vermehrt biologisch aufgenommenen Phosphors	...	[kg]
$m_{P_{entf.}}$	...	Masse des entfernten Phosphors aus der Bilanz	...	[kg]
$m_{P_{0,5\%CSB}}$	...	Masse des eingebauten Phosphors durch den CSB Abbau	...	[kg]
$m_{P_{gef}}$	...	Masse des gefällten Phosphors mit einem bestimmten β -Wert	...	[kg]

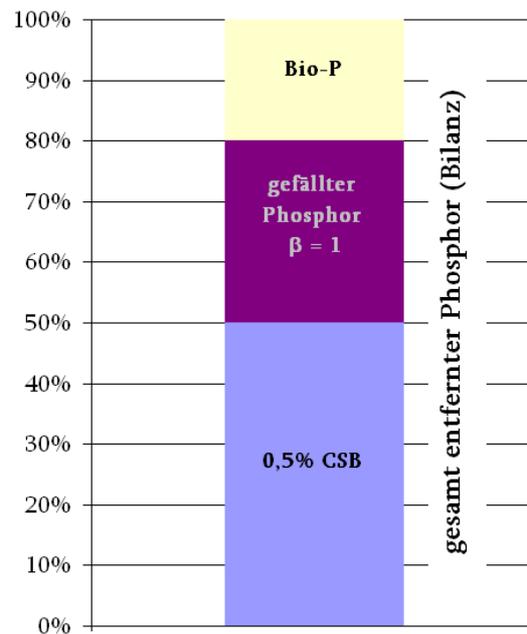


Abbildung 2.2.: Anteile des entfernten Phosphors

3. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse und die weitere Auswertung dargestellt.

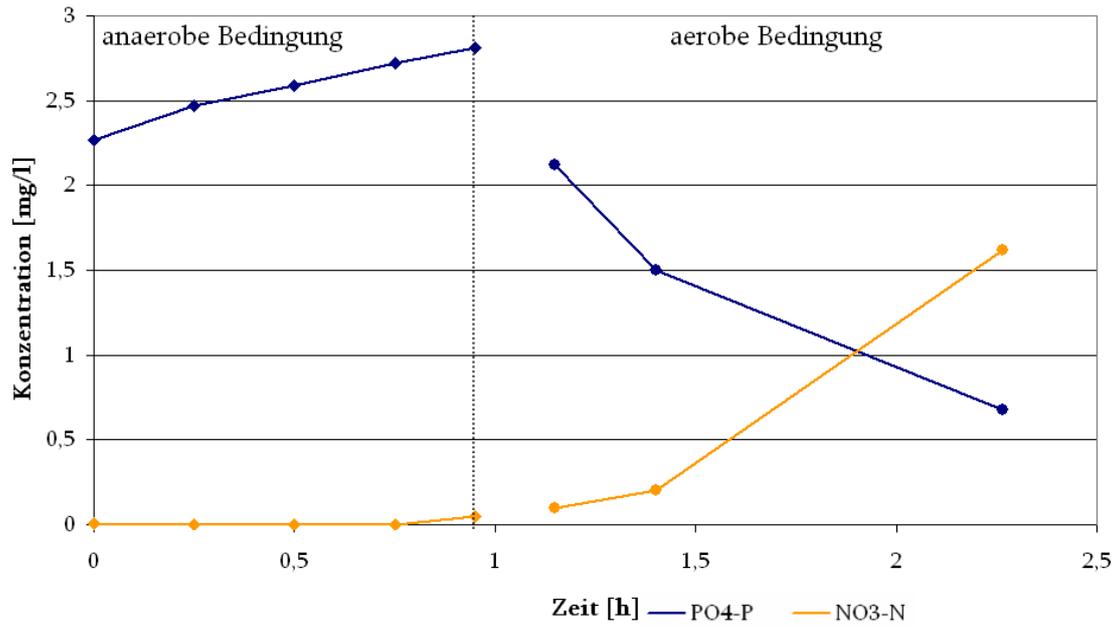
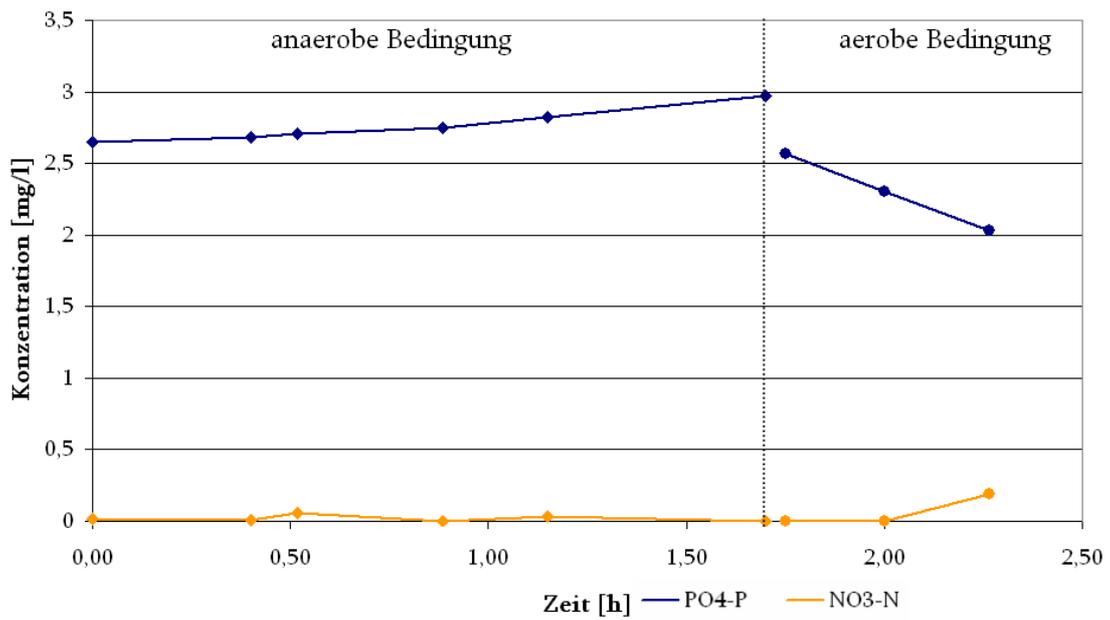
3.1. Vorversuch

Anhand der folgenden Abbildungen kann man erkennen, ob Bio-P vorhanden ist und welche Rolle der Probeentnahmeort spielt. Der Rücklöse- und Wiederaufnahmeversuch sind in den folgenden Abbildungen immer in einem Diagramm dargestellt. Weiters ist neben dem Ortho-Phosphat auch das Nitrat aufgetragen.

3.1.1. 1.Stufe

1. Kaskade

Abbildung 3.1 und 3.2 zeigen das Ortho-Phosphat- und die Nitratkonzentration während der Rücklösung und der anschließend Wiederaufnahme in der ersten Kaskade.

Abbildung 3.1.: 1. Vorversuch, BB1/1, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$ Abbildung 3.2.: 2. Vorversuch, BB1/1, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$

Wie aus den Bildern 3.1 und 3.2 ersichtlich ist, kommt es zu einer eindeutigen Rücklösung

des Phosphors unter anaeroben Bedingungen. Unter diesen Bedingungen ist so gut wie kein Nitrat vorhanden. Die Wiederaufnahme des Phosphors zeigt sich in einer Konzentrationsabnahme dessen. Unter den aeroben Bedingungen steigt die Nitrat-Konzentration, aufgrund der Nitrifikation, an.

4. Kaskade

Abbildungen 3.3 und 3.4 stellen die Konzentrationsverläufe von Ortho-Phosphat und Nitrat in der vierten Kaskade dar.

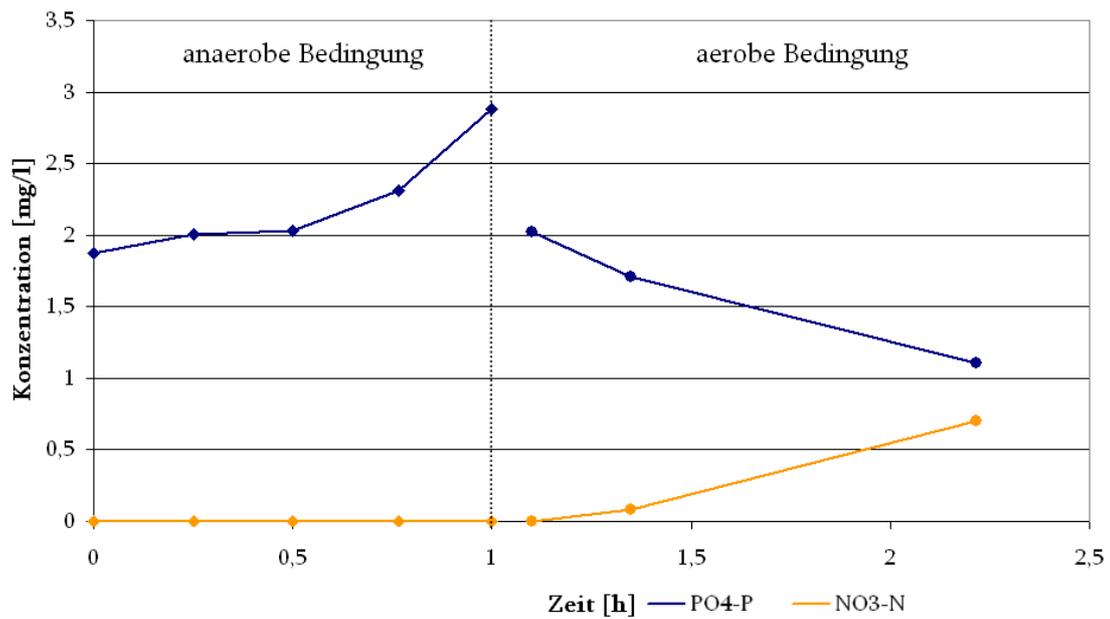
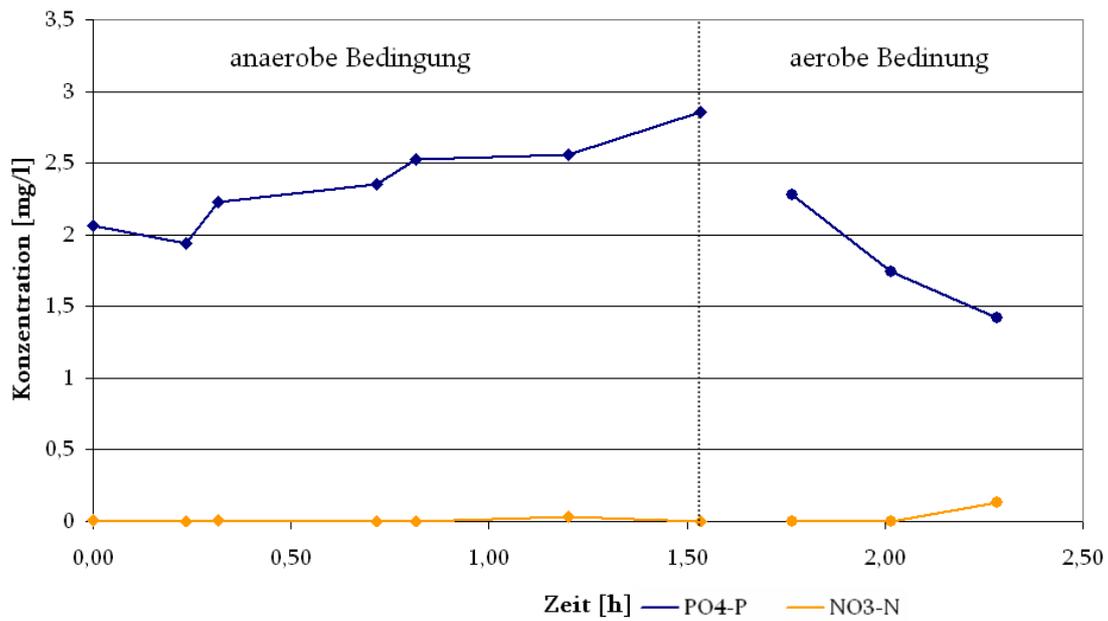


Abbildung 3.3.: 1. Vorversuch, BB1/4, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$

Abbildung 3.4.: 2. Vorversuch, BB1/4, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$

Auch bei dem Vorversuch mit dem Belebtschlamm aus der vierten Kaskade sind die Trends zum Rücklösen und zur Wiederaufnahme eindeutig zu erkennen. Unter diesen idealen Bedingungen ist kein Unterschied bemerkbar, ob die Probe aus der ersten (Mischung) oder der vierten Kaskade stammt. Die Phosphat-Anfangskonzentrationen liegen bei beiden Entnahmestellen in einem vergleichbaren Bereich. Aus den Abbildungen wird ersichtlich, dass die Rücklösung bei den unterschiedlichen Entnahmestellen die selbe Größenordnung haben.

Der unmittelbare Einfluss des Zulaufs spielt in der vierten Kaskade keine Rolle (gleichmäßigere Bedingungen). Da sich die Verläufe der beiden Kaskaden ähnlich verhalten, wird für die weiteren Versuche die vierte Kaskade beprobt.

3.1.2. 2.Stufe

Bei der zweiten Stufe ist in den Abbildungen 3.5 und 3.6 die wenig vorhandene Rücklösung bzw. Wiederaufnahme des Phosphors zu erkennen. Hier wird ersichtlich, dass das vorhandene Potential nicht so groß wie in der ersten Stufe ist. Durch die niedrige Rücklösung kann es auch nicht zu einer großen vermehrten Phosphoraufnahme kommen. Daraus kann man schließen, dass die Biozönose Phosphor aufnehmen könnte, da jedoch das leicht abbaubare Substrat fehlt, ist das Potential nicht vorhanden. In weiterer Folge wird die zweite Stufe der Vollständigkeit halber angeführt.

1. Kaskade

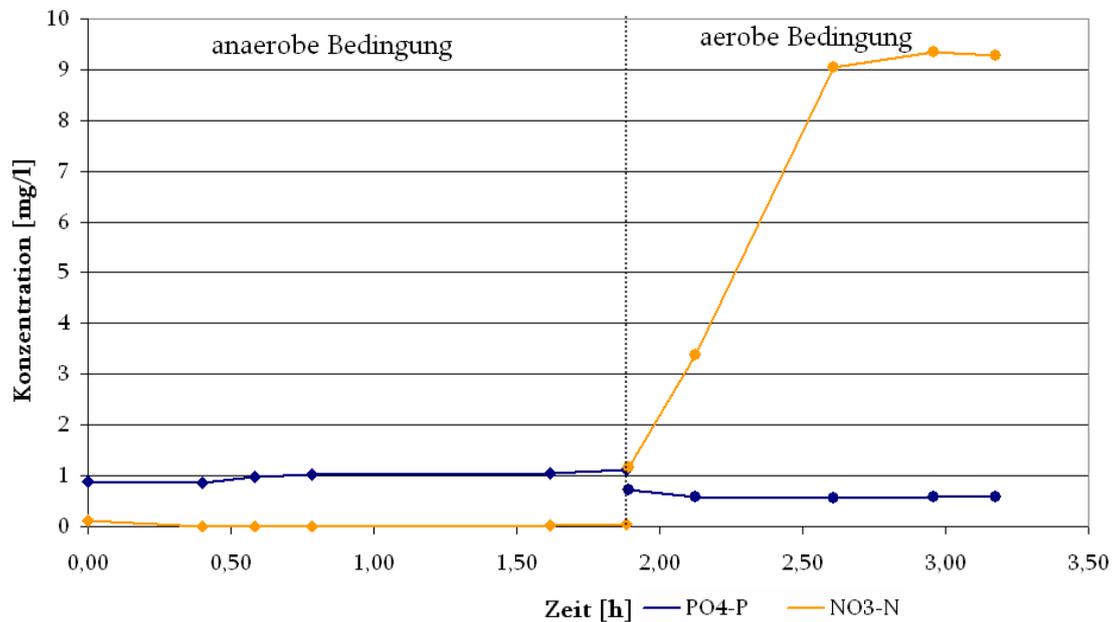


Abbildung 3.5.: 1. Vorversuch, BB2/1, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$

Nachklärbecken

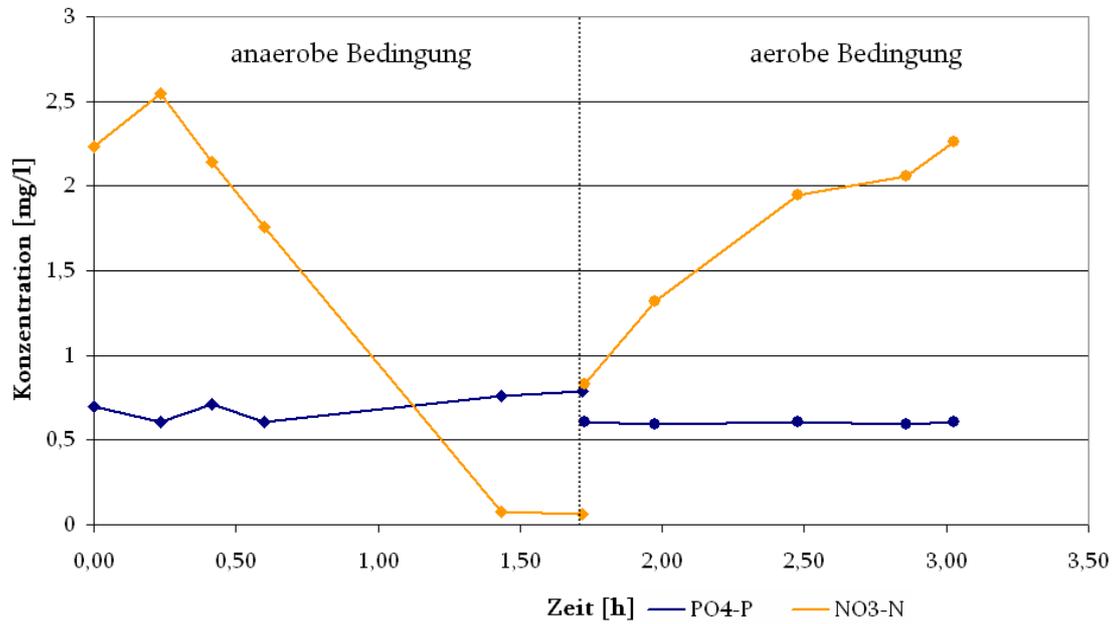


Abbildung 3.6.: 1. Vorversuch, Nachklärbecken

3.2. Batchversuch

In den folgenden Diagrammen sind die Messergebnisse aus den Rücklöse-, Wiederaufnahme- und Aufstockversuch in einem dargestellt.

3.2.1. 1. Versuch - Hybridbetrieb

Die Versuche wurden am 6.3.2008 durchgeführt, an diesem Tag war die Anlage in Hybridbetrieb.

1. Stufe

Abbildung 3.7 zeigt die Ortho-Phosphat- und die Nitratkonzentration der Versuchsreihe am 6.3.2008.

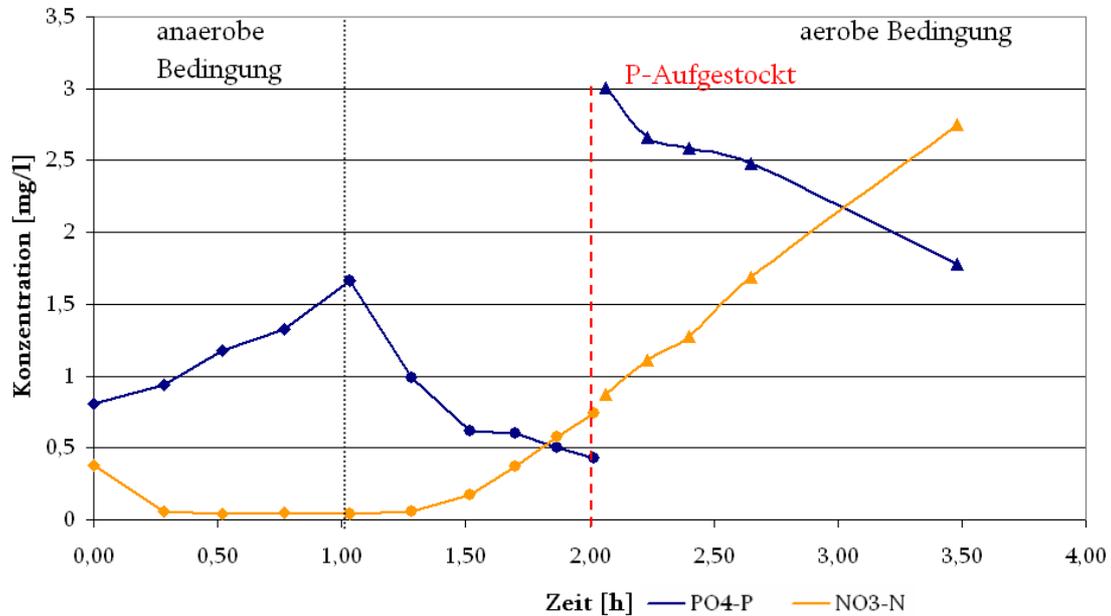


Abbildung 3.7.: 6.3.2008, Batchversuch, Hybridbetrieb, 1. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$

In Abbildung 3.7 ist eindeutig zu erkennen, dass im anaeroben Betrieb Phosphor rückgelöst wird. Nach einer Stunde anaerober Bedingungen wurde auf aeroben Betrieb umgestellt. Die Wiederaufnahme von Phosphor ist dabei zu sehen. Die Phosphat-Kurve des Wiederaufnahmeversuchs flacht nach ca. eineinhalb Stunden ab, da die Bio-P Bakterien in ihren limitierenden Bereich kommen. Nach der Zugabe von der Phosphorlösung steigt die Konzentration auf ca. 3 mg/l. Eine weitere Aufnahme des Phosphors durch die Mikroorganismen und die damit verbundene Abnahme des Phosphors in der Probe ist zu erkennen. Der Nitratverlauf unter diesen Bedingungen ist schon aus dem Vorversuch bekannt.

2. Stufe

Wie schon beim Vorversuch 3.1.2 beschrieben, ist durch das Aufstocken des Phosphors nochmal eindeutiger zu erkennen, dass die Nettoelimination sehr gering bzw. gar nicht vorhanden ist.

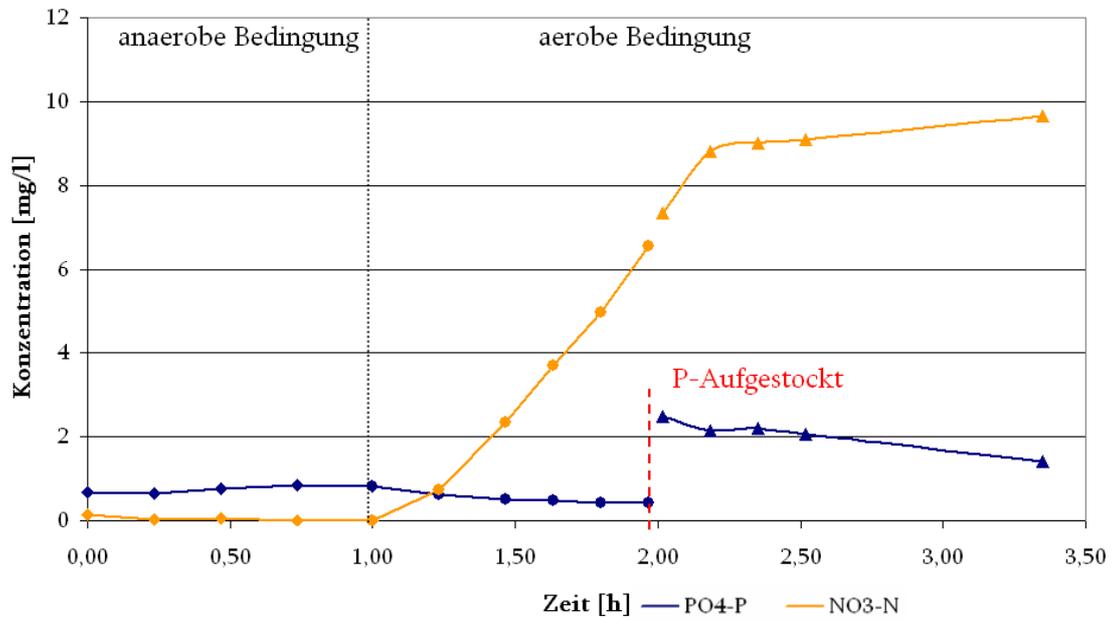


Abbildung 3.8.: 6.3.2008, Batchversuch, Hybridbetrieb, 2. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$

3.2.2. 2. Versuch - Bypassbetrieb

Am 18.6.2008 wurden diese Versuche durchgeführt, die Anlage befand sich im Bypassbetrieb.

1. Stufe

In der Abbildung 3.9 sind die Konzentrationsverläufe von Ortho-Phosphat- und Nitrat der ersten Stufe zu sehen.

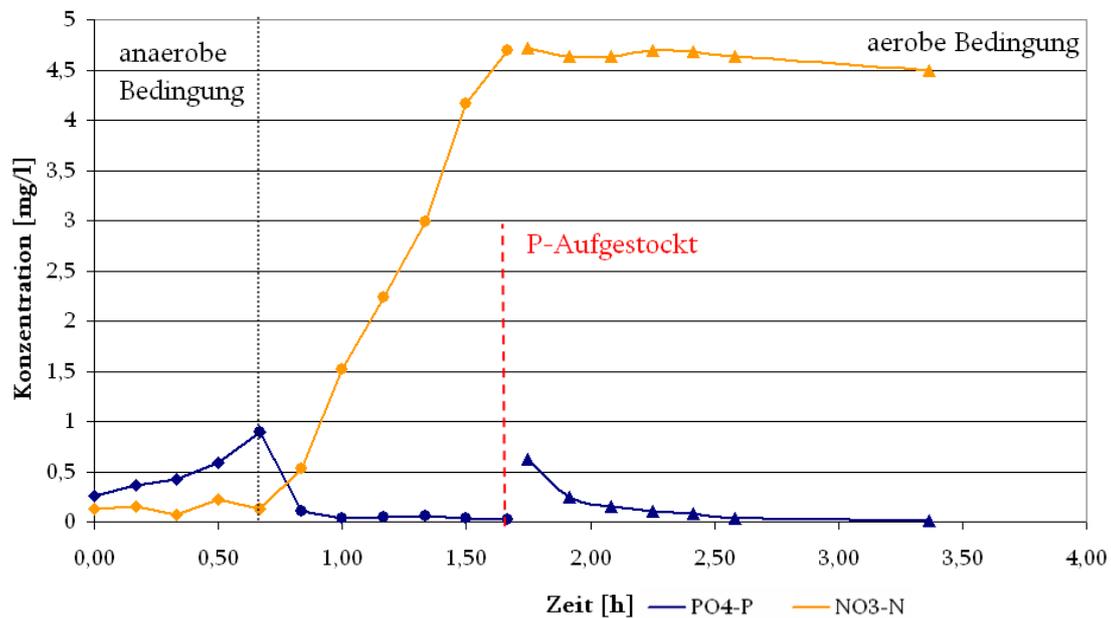


Abbildung 3.9.: 18.6.2008, Batchversuch, Bypassbetrieb, 1. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$

Die Phosphat-Ausgangskonzentration ist geringer als im Versuch vom 6.3.2008. Nach der Aufstockung sollte die Phosphorkonzentration eigentlich wieder bei 3 mg/l liegen. Die Phosphor-Aufnahme geschieht aber so rasch, dass das Messintervall von 3 Minuten nach der Injektion zu lange war und dieser Punkt somit nicht erfasst werden konnte. Die Bakterien gelangen nach kurzer Zeit in einen limitierenden Bereich.

2. Stufe

Analog zu den Messungen vom 6.3.2008 und dem Vorversuch ist kein Bio-P feststellbar, siehe Abbildung 3.10

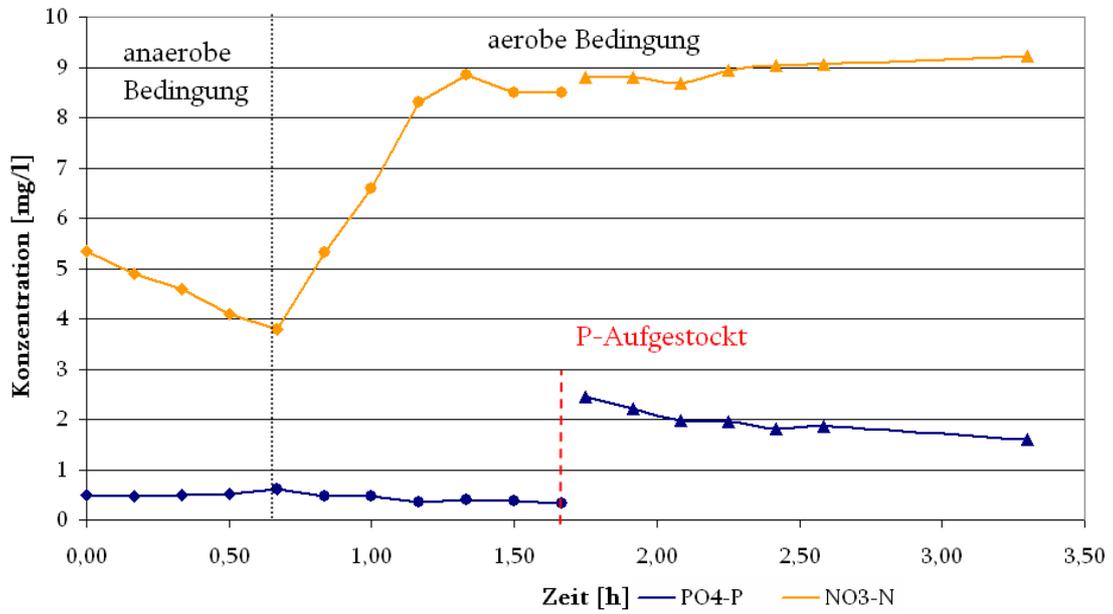


Abbildung 3.10.: 18.6.2008, Batchversuch, Bypassbetrieb, 2. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$

3.2.3. 3. Versuch Bypassbetrieb mit Revision

Die Versuche wurden am 3.7.2008 durchgeführt. Die Anlage befand sich im Bypassbetrieb und die Linie Süd der ersten Stufe war in Revision.

1. Stufe

Abbildung 3.11 zeigt die Messergebnisse der ersten Stufe.

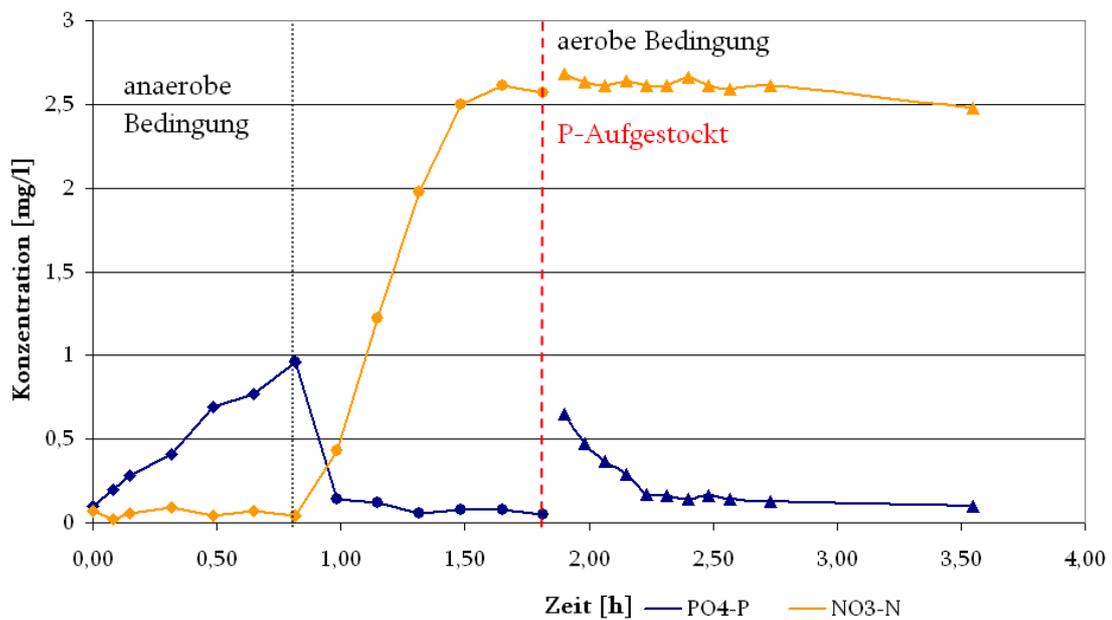


Abbildung 3.11.: 3.7.2008, Batchversuch, Bypassbetrieb mit Revision, 1. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$

In Abbildung 3.11 sieht man die Rücklösung und die Wiederaufnahme des Phosphors deutlich. Die Bakterien kommen sehr schnell an die Phosphor-Limitierung. Die Kurven verhalten sich sehr ähnlich dem Versuch vom 18.6.2008.

2. Stufe

In Abbildung 3.12 ist in diesem Versuch eine etwas größere Rücklösung zu erkennen. Dies hängt mit der erhöhten Substratmenge in der zweiten Stufe, durch die Revision hervorgerufen, zusammen.

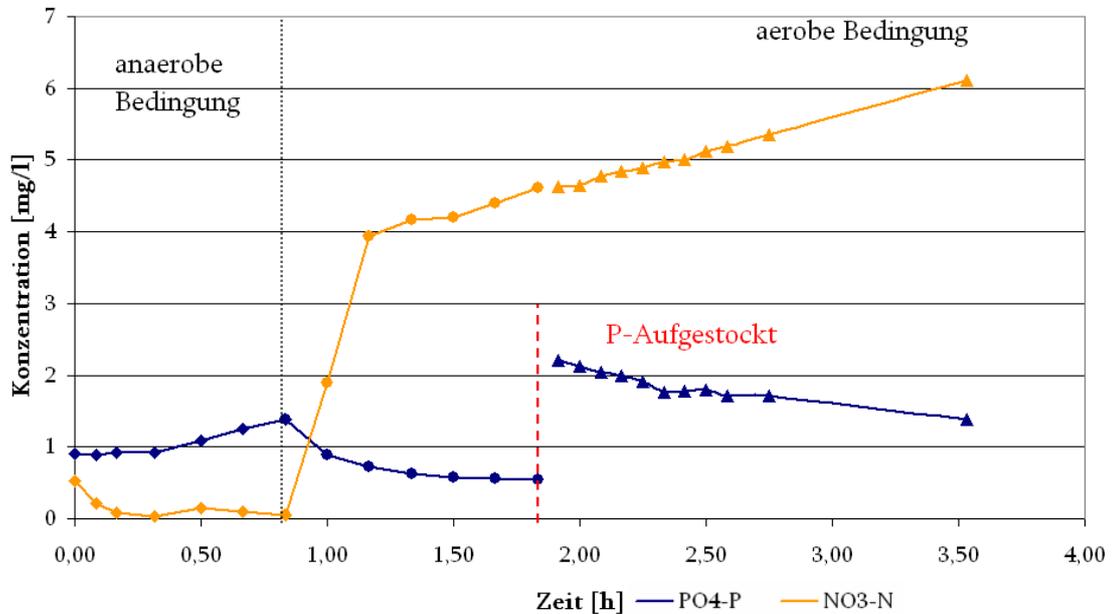


Abbildung 3.12.: 3.7.2008, Batchversuch, Bypassbetrieb mit Revision, 2. Stufe, $PO_4 - P$ & $NO_3 - N$

3.2.4. Vergleich der Batchversuche

In den folgenden Abbildungen sind die Phosphatkonzentrationen während der Beprobungen von 6.3.2008, 18.6.2008 und 3.7.2008 in einer Abbildung dargestellt.

1. Stufe

Abbildung 3.13 zeigt die Messergebnisse des Batchversuchs der ersten Stufe zusammengefasst.

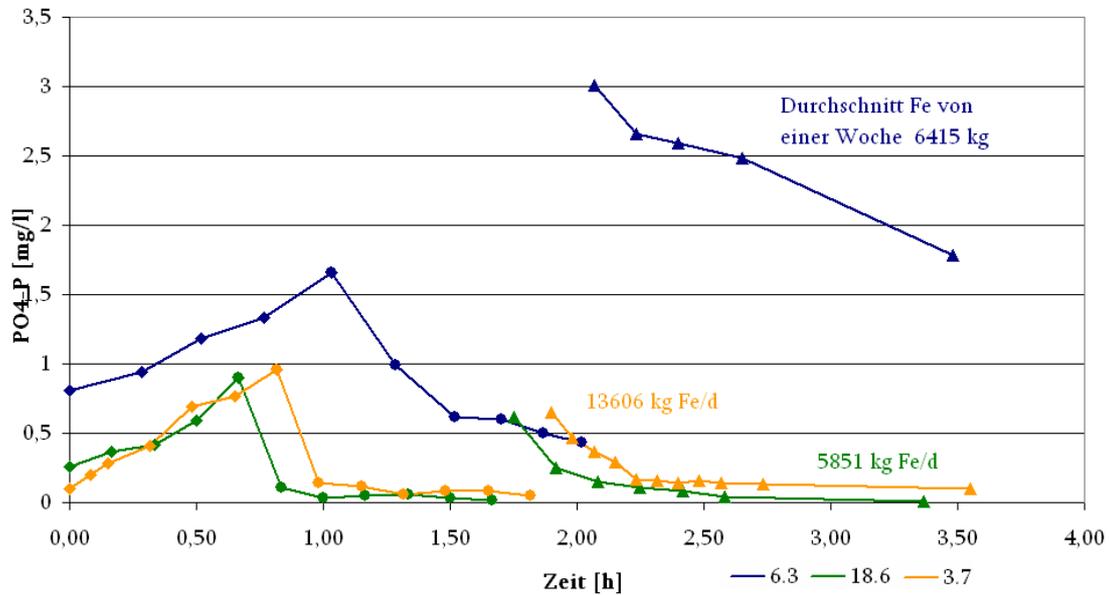


Abbildung 3.13.: Vergleich - Batchversuch, 1. Stufe, Fällmittelmengen

In der Abbildung 3.13 sind neben den drei Versuchen auch der durchschnittliche Tagesverbrauch an Fällmittel, gemittelt über eine Woche vor der Beprobung, eingetragen. Diese dient dem Vergleich, ob das überschüssige Fällungsmittel eine Rolle spielt.

Ersichtlich wird, dass im beprobten Hybridbetrieb die Phosphorbelastung generell höher als im Bypassbetrieb ist. Die Rücklösung hat bei allen drei annähernd die gleiche Steigung. Bei der Wiederaufnahme - nach der Rücklösung und nach der Aufstockung - in den beiden Versuchen mit Bypassbetrieb kommen die Mikroorganismen wegen der geringeren Ausgangskonzentration an die Phosphorlimitierung.

2. Stufe

In der Abbildung 3.14 werden die Ergebnisse der zweiten Stufe an den drei Versuchstagen dargestellt.

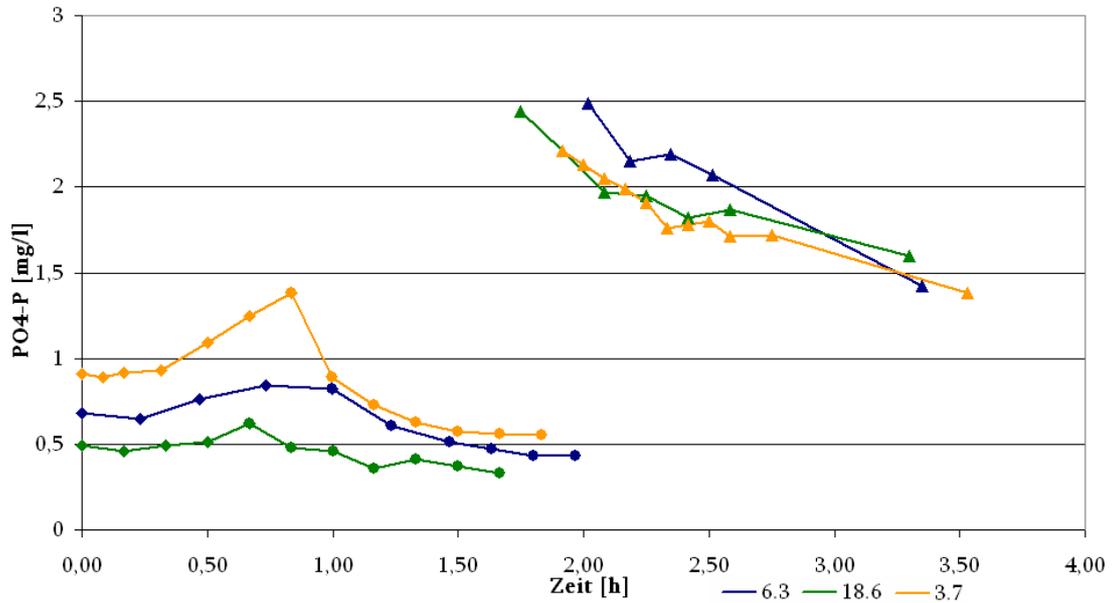


Abbildung 3.14.: Vergleich - Batchversuch, 2. Stufe

Durch die unterschiedliche Betriebsweise ist kein merklicher Unterschied zu sehen, einzig die Rücklösung im Revisionszeitraum ist etwas größer als die anderen beiden. Die Rücklösung der andern beiden Versuche und die Wiederaufnahme von allen drei Beprobungstagen haben jeweils die gleiche Größenordnung. Eine Nettoelimination nach Abbildung 1.3 ist nicht festzustellen.

3.2.5. Ermittlung der Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten

In Abbildung 3.15 wurden die jeweiligen Trendlinien eingezeichnet.

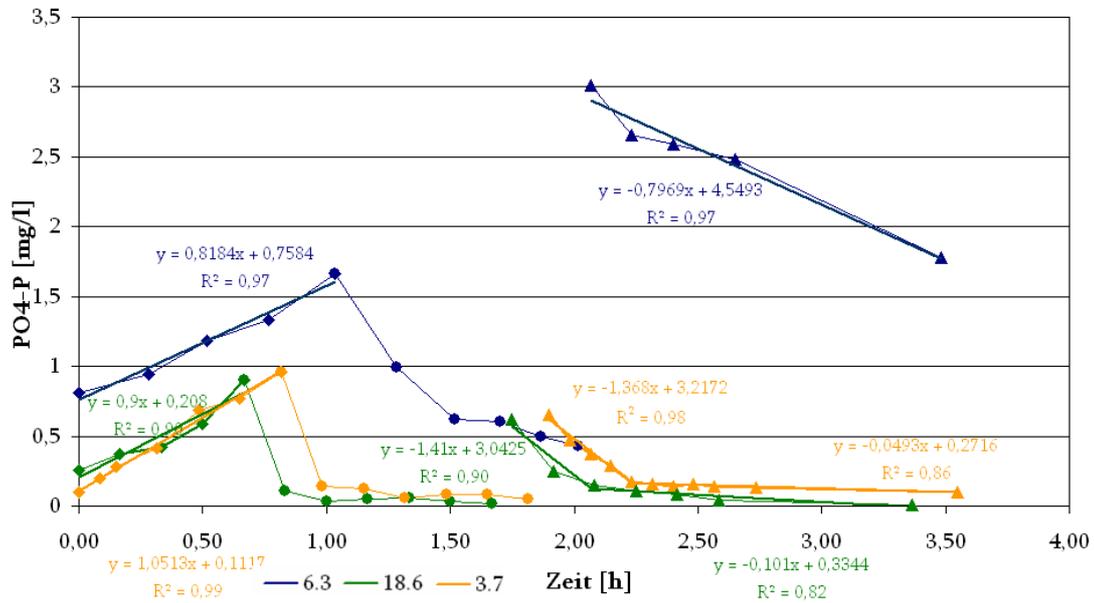


Abbildung 3.15.: Vergleich - Batchversuch, 1. Stufe, Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten

Die Raten, die sich durch die Trendlinien ergeben, sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die unterschiedlichen Wiederaufnahmeraten werden in Folge als I und II bezeichnet.

Tabelle 3.1.: Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten der einzelnen Versuche

Datum	Rücklöserate RR [mg/(lh)]	Wiederaufnahmerate I WR I [mg/(lh)]	Wiederaufnahmerate II WR II [mg/(lh)]
06.03.2008	0,8184	-0,7969	
18.06.2008	0,9	-1,41	-0,101
03.07.2008	1,0513	-1,368	-0,0493

Die Wiederaufnahmerate I beschreibt die biologische Aufnahme. Die Rate II ist schon im Bereich der Limitierung der Mikroorganismen und daher für die weitere Betrachtung nicht mehr relevant. Damit die Raten vergleichbar sind, wird auf TS, oTS und auf die Temperatur mittels Gleichung 2.7 bezogen, siehe Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2.: Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten normiert

Datum	Rate normiert		
	Bezug	RR	WR I
	oTS		
	[g/l]	[mg/(g oTS h)]	[mg/(g oTS h)]
06.03.2008	2,32	0,35	-0,34
18.06.2008	3,36	0,27	-0,42
03.07.2008	2,8	0,31	-0,41
Rate/TS			
	TS	RR	WR I
	[g/l]	[mg/(g TS h)]	[mg/(g TS h)]
06.03.2008	2,76	0,29	-0,28
18.06.2008	4,32	0,21	-0,33
03.07.2008	3,61	0,29	-0,37
Rate T			
	T	RR	WR I
	[°C]	[mg/(lh)]*	[mg/(lh)]*
06.03.2008	14	1,23	-1,19
18.06.2008	21	0,84	-1,32
03.07.2008	23	0,86	-1,12
Rate/oTS T			
		RR	WR I
		[mg/(h g oTS)]*	[mg/(h g oTS)]*
06.03.2008		0,53	-0,52
18.06.2008		0,25	-0,39
03.07.2008		0,26	-0,33

*auf 20° C bezogen

Wie aus der Tabelle 3.2 hervorgeht, haben die Raten immer die gleiche Größenordnung bei den gemessenen Temperaturen. Die Rücklöse- und die Wiederaufnahmerate im Hybridversuch ist gleich groß und somit scheint es keine Nettoelimination zu geben.

3.2.6. Abschätzung des Bio-P Potentials

Wie im Abschnitt 2.6.2 wird das Potential der vermehrten biologischen Phosphoraufnahme der ersten Stufe errechnet. Dabei werden folgende Daten für die Ermittlung herangezogen:

Tabelle 3.3.: anaerobes und aerobes Belebungsbeckenvolumen der ersten Stufe

	Beckenvolumen	
	$[m^3]$	[l]
gesamt	42000	42000000
anaerob	5250	5250000
aerob	36750	36750000

Mit den Daten aus 3.3 und den Rücklöse- und Wiederaufnahmeraten aus 3.1 und 3.2 wird mittels der Gleichung 2.8 die theoretisch mögliche Menge errechnet, die durch vermehrte biologische Phosphoraufnahme entfernt werden kann.

Das Potential wird in Tabelle 3.4 ausgewiesen. Im ersten Tabellenabschnitt ist die Menge errechnet, die an den Versuchstagen unter optimalen Bedingungen entfernt worden wäre. In dem weiteren Tabellenabschnitt wird die Menge berechnet, die unter Einbeziehung der Temperaturnormierung entfernt worden wäre.

Tabelle 3.4.: Potential - entfernte Menge durch Bio-P ...

Datum	Rückgelöst	Wiederaufnahme	Potential		
	RG [mg/h]	WA I [mg/h]	ΔP [mg/h]	ΔP [kg/h]	ΔP [kg/d]
... am Versuchstag; nach Tabelle 3.1					
06.03.2008	4296600	29286075	24989475	24,99	600
18.06.2008	4725000	51817500	47092500	47,09	1130
03.07.2008	5519325	50274000	44754675	44,75	1074
... auf Temperatur bezogen; nach Tabelle 3.2					
06.03.2008	6448038	43950502	37502464	37,50	900
18.06.2008	4415888	48427570	44011682	44,01	1056
03.07.2008	4505413	41038559	36533146	36,53	877

3.3. Phosphorverlauf - hydraulische Aufenthaltszeit

Am Messtag, 27.2.2008, gab es einen Volumenstrom im Zulauf Q_{zu} von $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Mit diesem Volumenstrom und den jeweiligen Beckenvolumen aus Tabelle 3.5 wurden mittels Gleichung 2.2 die Aufenthaltszeiten in den einzelnen Becken bzw. Kaskaden bestimmt.

Tabelle 3.5.: Beckenvolumen und hydraulische Aufenthaltszeit, 1. Stufe

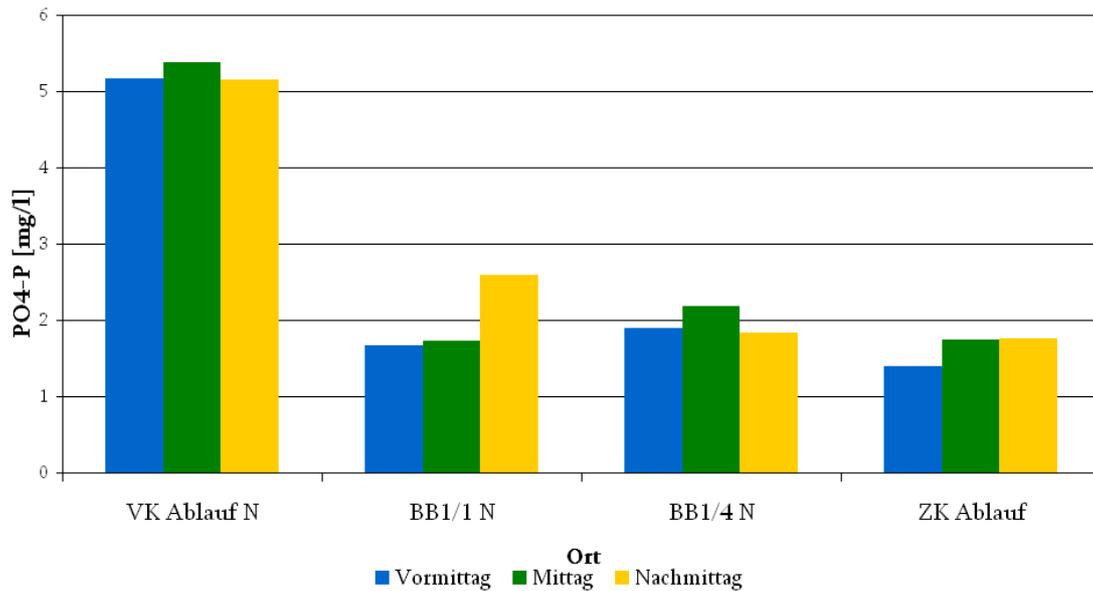
Vorklärbecken	$V_{VK}: 28500 \text{ m}^3$	
Belebungsbecken 1.Stufe	$V_{BB1}: 42000 \text{ m}^3$	HRT: 1 h
Zwischenklärung	$V_{ZK}: 65400 \text{ m}^3$	HRT: 1,5 h

In Tabelle 3.6 sind die Probenahmezeiten angeführt.

Tabelle 3.6.: Probenentnahmezeiten

Versuchsreihe	VK	BB1/1	BB1/4	ZK Ablauf
Vormittag	09:45	09:45	10:45	12:32
Mittag	12:38	12:38	13:33	15:00
Nachmittag	14:32	14:34	15:31	17:32

Abbildung 3.16 zeigt den zeitlichen Verlauf der Phosphorkonzentration direkt in der Anlage.

Abbildung 3.16.: PO₄-P Verlauf in der Anlage, 1. Stufe - Nord

Die erste Kaskade ist eigentlich eine anaerobe Zone, dort sollte die Phosphorkonzentration höher sein als in den nachfolgenden Becken. Dabei ist zu erkennen, dass eine deutliche Reduktion der Konzentration zwischen Ablauf Vorklärung und der ersten Kaskade im Belebungsbecken stattgefunden hat.

Diese Reduktion beruht einerseits auf dem Fällmittelüberschuss, der mit dem Rücklaufschlamm wieder in der ersten Kaskade eingebracht wird. Durch den Fällmittelüberschuss kommt es schon in der ersten Kaskade zu einer Fällung des Phosphors. Andererseits kommt es zu einer Verdünnung durch den Rücklaufschlamm und dadurch zu einer Konzentrationsabnahme. Im weiteren Verlauf ist keine deutliche Änderung der Phosphorkonzentration zu erkennen. Aufgrund dieses Versuches kann man keine Rücklösung bzw. Wiederaufnahme erkennen.

3.4. Bilanz

Die meiste Zeit wurde die HKA in Bypassbetrieb gefahren, Hybridbetrieb als auch Revisionszeiten sind in allen folgenden Abbildungen farblich markiert.

3.4.1. Berechnung des β -Werts

Aus der Bilanz wird als erstes der β -Wert, wie in Gleichung 1.3 angegeben, errechnet. Dafür wird die entfernten Phosphorfracht und die zugeführte Fällmittelmenge herangezogen, wobei der theoretisch in die Biomasse eingebaute Phosphor (0,5% CSB) von der entfernten Fracht abgezogen wird.

1. Stufe

In Abbildung 3.17 sind die Zulauf- und Abflussfrachten der erste Stufe, sowie die entfernte Phosphorfracht und der β -Wert dargestellt.

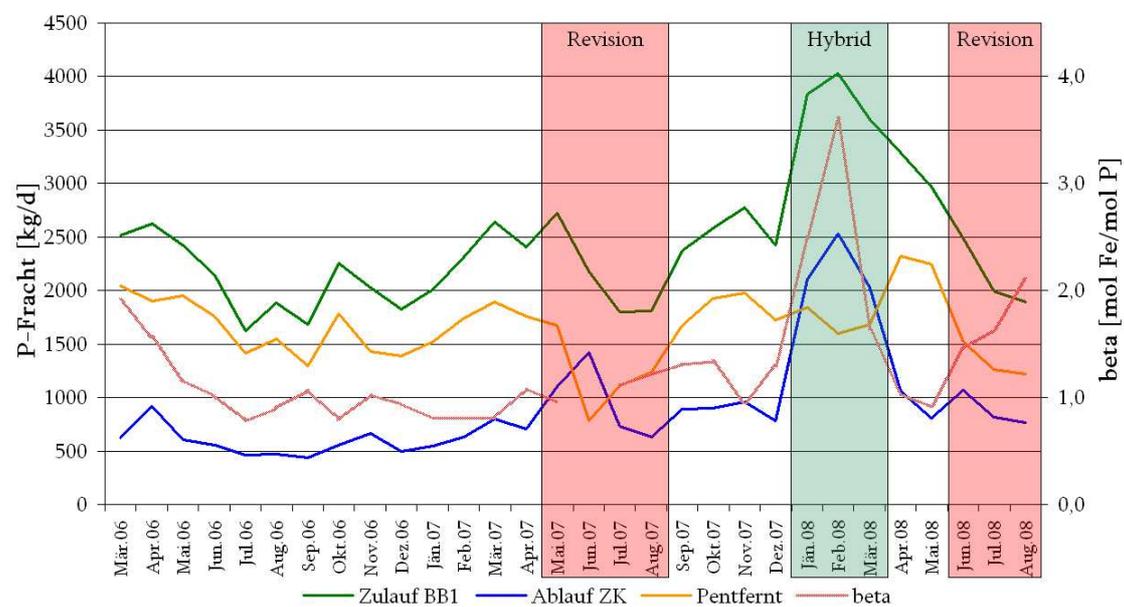


Abbildung 3.17.: β -Wert für die 1. Stufe mit den entsprechenden Phosphorfrachten

Der β -Wert unterliegt Schwankungen, die Spitze ist im Februar bei 3,6. Generell ist der β -Wert während des Hybridbetriebes höher als im Bypassbetrieb. Die Datenmenge für die β -Wert Berechnung im Juni 2007 ist nicht ausreichend. Fraglich ist auch der β -Wert während des Hybridbetriebs, da der Datensatz mehrere Lücken aufweist. Dies kommt bei den wenigen Hybriddaten viel stärker zum Tragen als bei der großen Datenmenge im Bypassbetrieb.

2. Stufe

In Abbildung 3.18 sind die Zu- und Abfahrfracht und entfernten Phosphorfrachten mit dem β -Wert der zweiten Stufe eingezeichnet.

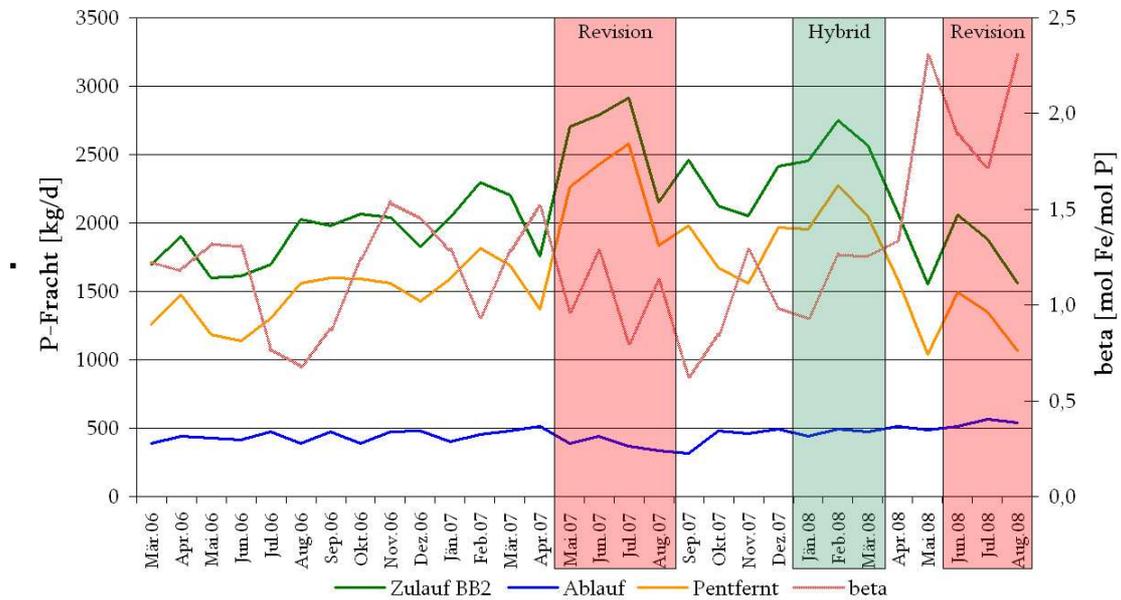


Abbildung 3.18.: β -Wert für die 2. Stufe mit den entsprechenden Phosphorfrachten

Zu erkennen ist eine deutliche Schwankung der Zulauffracht. Die Phosphorfracht ist in den Zeiträumen der Revision deutlich höher als im normalen Betrieb. Der β -Wert beginnt im April 2008 zu steigen und diese Tendenz ist bis August 2008 zu erkennen.

Gesamte HKA

Bei Abbildung 3.19 wurde der β -Wert der gesamten HKA berechnet. Hierzu wurden der Zulauf zu Belebung und der Ablauf verwendet.

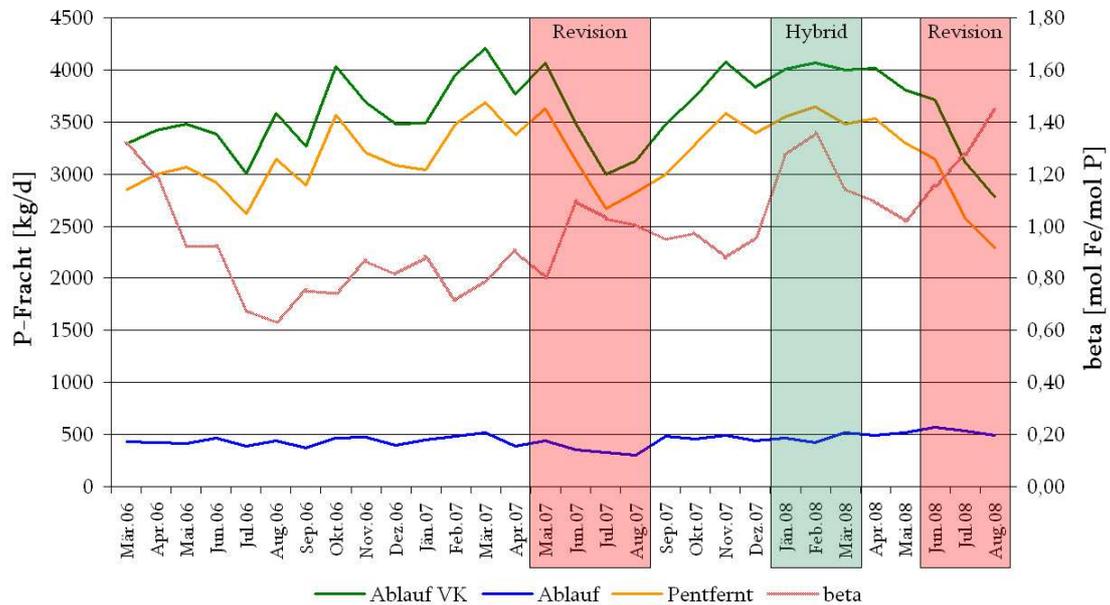


Abbildung 3.19.: β -Wert für die gesamte HKA mit den entsprechenden Phosphorfrachten

In den Sommermonaten 2006 ist ein geringer β -Wert zu erkennen, danach ist die Tendenz bis Ende des Bilanzzeitraums steigend. Die Zulaufkraft weist Schwankungen auf, die sind auch in der entfernten Fracht wieder zu finden. Die Fällmittelzugabe erfolgt aufgrund des Ablaufgrenzwertes von 1 mg/l, deswegen kommt es zu den β -Wert Schwankungen von 0,6-1,5. Diese Regelung führt zu den parallelen Kurven der Phosphorzulaufkraft und der entfernten Phosphorkraft.

β -Werte im Vergleich

In Abbildung 3.20 sind alle errechneten β -Werte in einem Diagramm dargestellt.

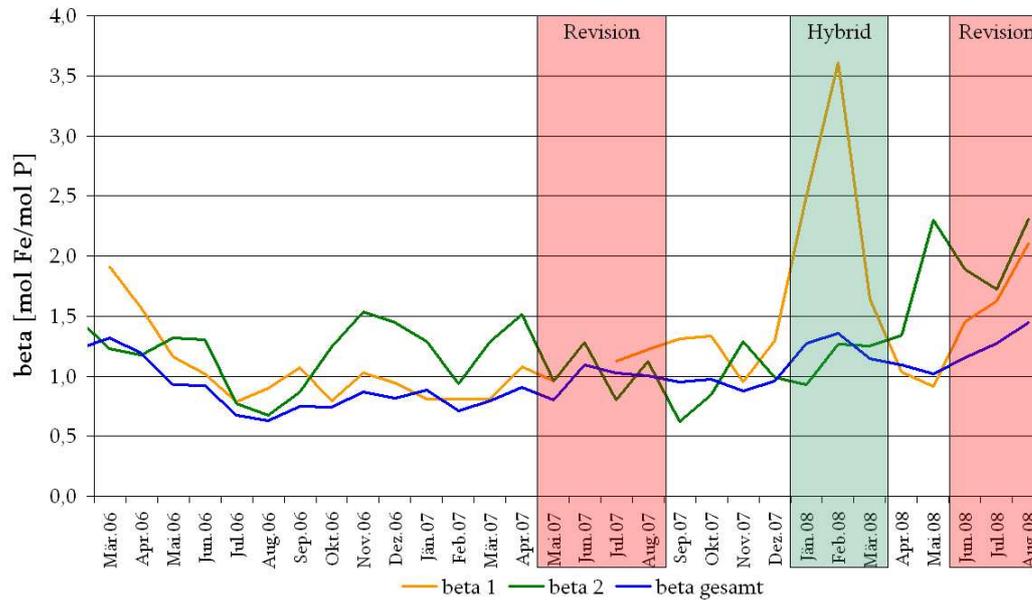


Abbildung 3.20.: Vergleich der β -Werte

Nur in der ersten Stufe ist während des Hybridbetriebs ein Steigen des β -Werts zu erkennen. Die β -Werte der zweiten Stufe, sowie der gesamten Anlage sind in diesem Zeitraum nicht auffällig. Ab April 2008 ist bei allen β -Werten ein deutlicher Anstieg zu erkennen.

1. Stufe eta%

In Abbildung 3.21 ist der β -Wert über die entfernten Phosphorfrachten der ersten Stufe abgebildet.

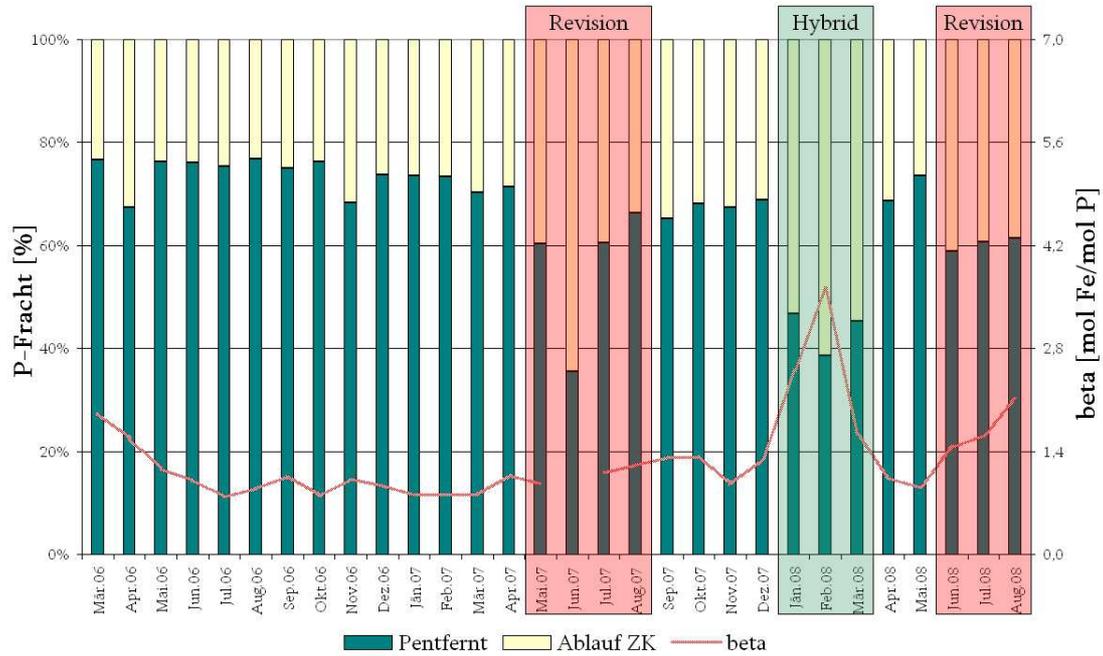


Abbildung 3.21.: β -Wert für die 1. Stufe mit Entfernungsgrad

Der Phosphorzulauf ist als 100% dargestellt, in Folge kann man die entfernte und die, im Ablauf noch befindliche, Phosphorfracht dementsprechend als Prozentanteil darstellen. Dadurch ergibt sich ein Entfernungsgrad. Die erste Stufe entfernt den Phosphor um ca. 70%. Mit einem niedrigeren Entfernungsgrad sticht der Zeitraum des Hybridbetriebes hervor.

2. Stufe eta%

In Abbildung 3.22 wird deutlich, dass um die 80% des Phosphors der Zulauf fracht der zweiten Stufe entfernt werden.

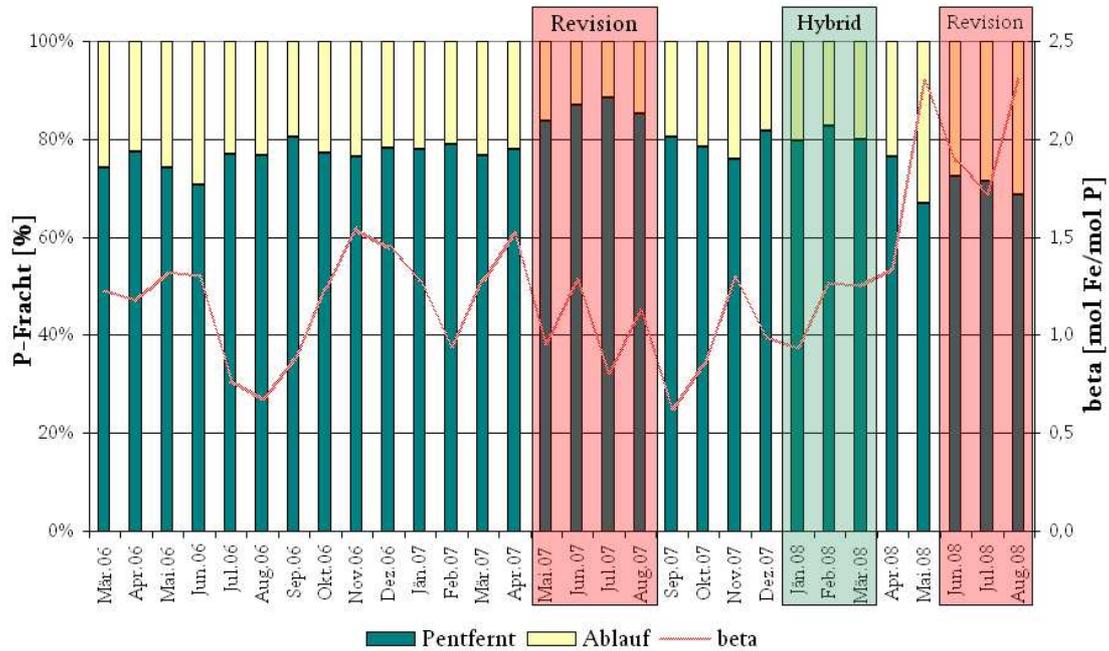


Abbildung 3.22.: β -Wert für die 2. Stufe mit Entfernungsgrad

Ersichtlich sind die β -Wert Schwankungen, die sich durch die absoluten Zulaufmengen ergeben und in Abbildung 3.18 besser zu erkennen sind.

Gesamte HKA eta%

In Abbildung 3.23 kann der Entfernungsgrad für die gesamte Anlage abgelesen werden, dieser liegt über 80%.

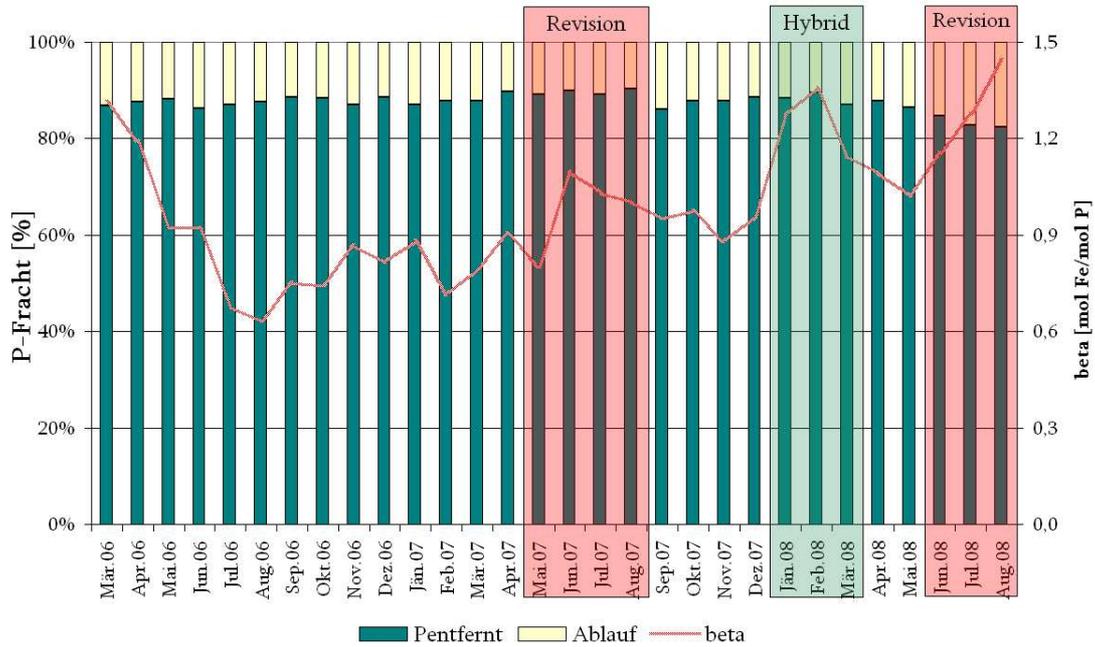


Abbildung 3.23.: β -Wert für die gesamte HKA mit Entfernungsgrad

Die β -Wertschwankungen sind hier auch zu erkennen. Aus der Abbildung 3.19 ist jedoch ersichtlich, dass die Abweichung mit der Phosphorfracht im Zulauf zu tun hat. Die gesamte Anlage entfernt ca. 80% des Phosphors.

3.4.2. Abschätzung der biologisch entfernten Mengen des Phosphor

In den Abbildungen 3.24, 3.25 und 3.26 sind die Anteile an gefällttem (β -Wert=1), inkorporiertem und vermehrt biologisch aufgenommenem Phosphor aufgetragen. Die Berechnung der Anteile erfolgt nach Gleichung 2.9. Die Anteile der Bio-P, die negativ sind, ergeben sich aus Mess- und Rechenungenauigkeiten. In diesen Fällen besteht sicher keine vermehrte biologische Aufnahme.

Abschätzung 1. Stufe

Abbildung 3.24 zeigt die entfernten Phosphoranteile für die erste Stufe.

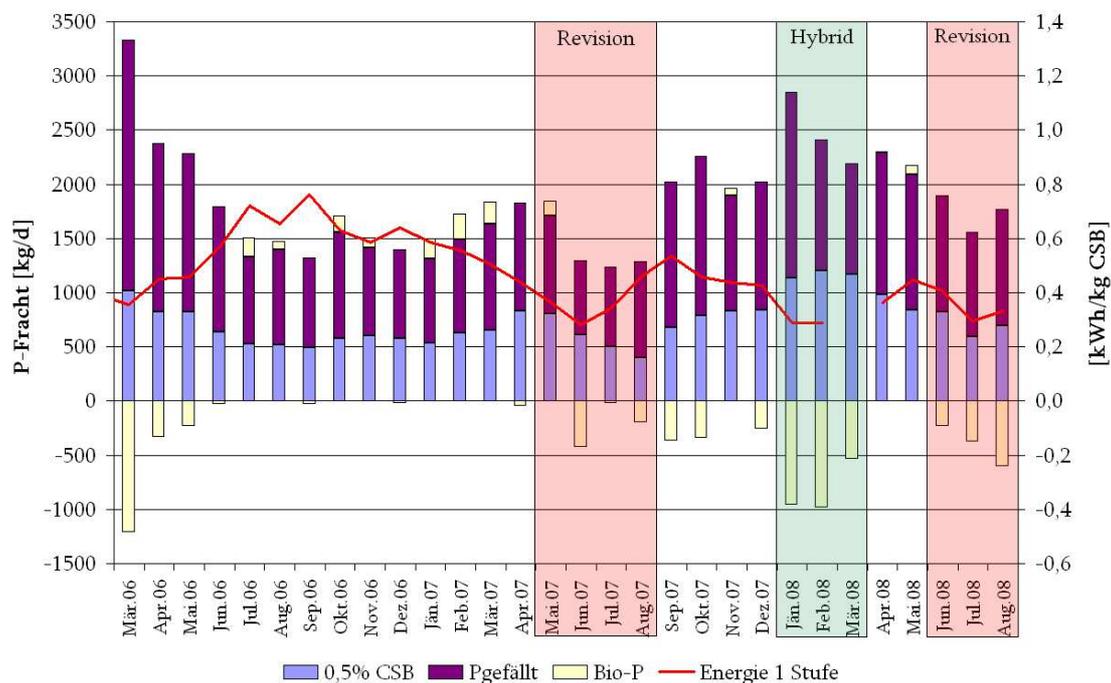


Abbildung 3.24.: Anteilsabschätzung für BB1, β -Wert=1 und spezifischer Energieverbrauch

Beginnend mit Juli 2006 ist theoretisch eine vermehrte biologische Phosphoraufnahme möglich gewesen, diese hält bis Mai 2007, mit zeitweisen Unterbrechungen, an. Nach dieser Periode ist kein Bio-P mehr zu erkennen, bis auf November 2007 und April 2008. Die Perioden mit positiven Bio-P Anteil gehen mit einem erhöhten spezifischen Energieeintrag einher. Durch die vermehrte Energie konnten die aeroben Bedingungen für die

Wiederaufnahme gewährleistet werden.

Abschätzung 2. Stufe

Abbildung 3.25 zeigt die entfernten Phosphoranteile für die zweite Stufe.

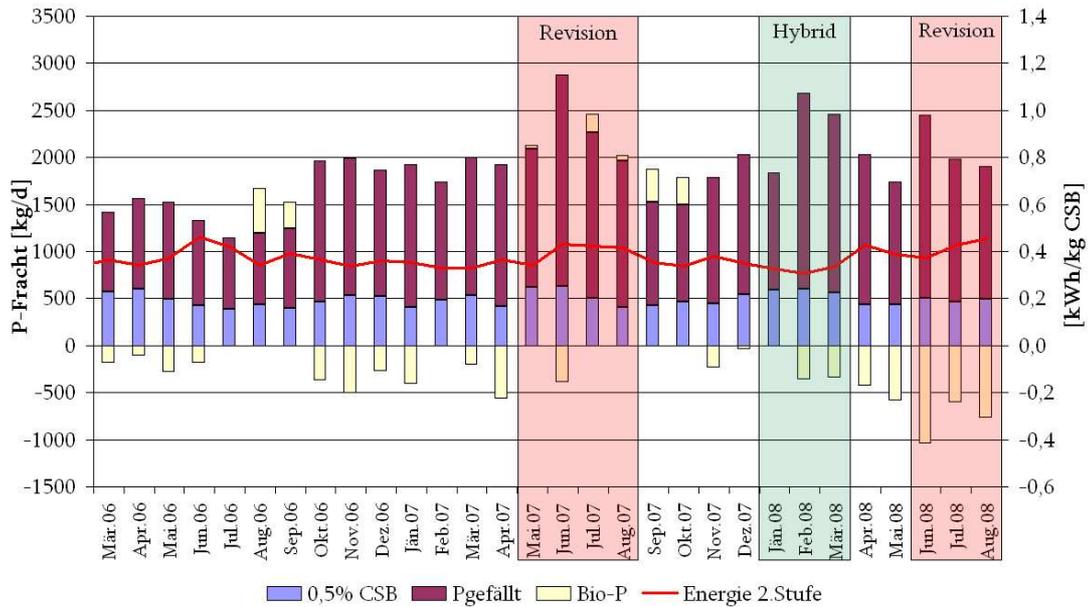


Abbildung 3.25.: Anteilsabschätzung für BB2, β -Wert=1 und spezifischer Energieverbrauch

In einzelnen Monaten wäre in der zweiten Stufe Bio-P möglich gewesen. Im Juli und August 2008 kann es durch die Revision der ersten Stufe zu diesem möglichen Bio-P kommen.

Abschätzung gesamte HKA

Aus Abbildung 3.26 können die theoretischen Zeiträume der vermehrten biologischen Phosphoraufnahme für die gesamte Anlage abgelesen werden.

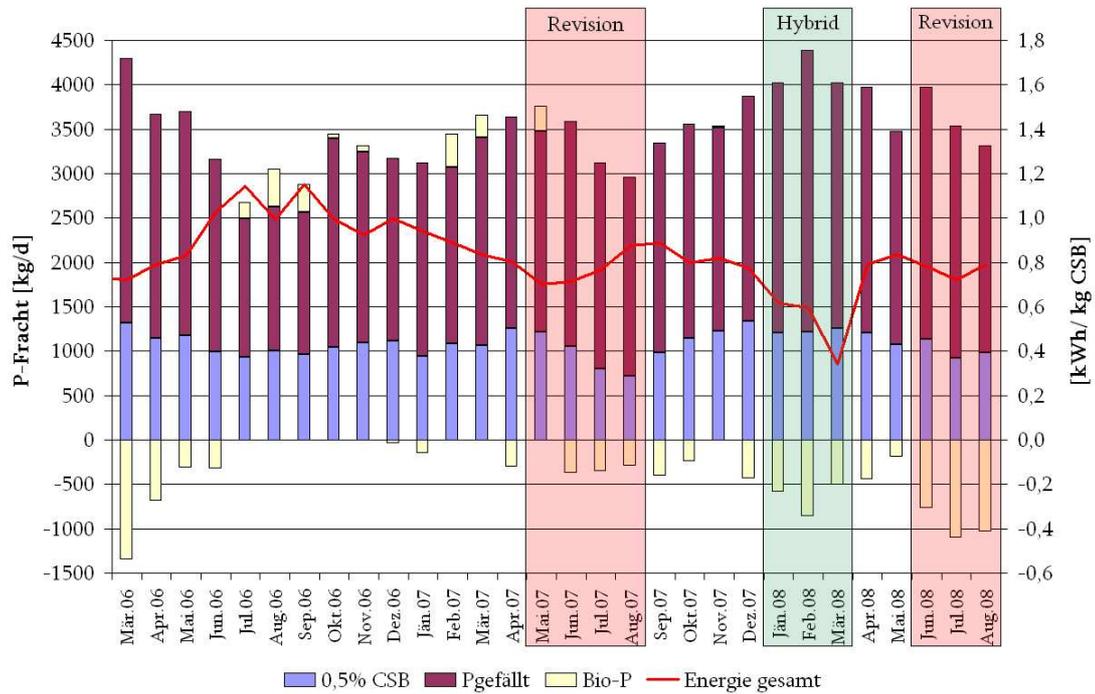


Abbildung 3.26.: Anteilsabschätzung für HKA, β -Wert=1 und spezifischer Energieverbrauch

Zeiträume, in denen es theoretisch Bio-P gab, sind Juli - September 2006, sowie Februar, März und Mai 2007. Einen Zusammenhang zwischen dem erhöhten Energieeintrag und der vermehrten biologischen Phosphoraufnahme ist auch in Abbildung 3.26 zu erkennen.

4. Schlussfolgerung

Durch die Auswertung der Versuche, siehe 2.2, wird die Annahme bestätigt, dass nur in der ersten Stufe ein mögliches Potential vorliegt, da in der ersten Stufe genügend leichtabbaubares Substrat vorhanden ist. Die Berechnung des Potentials gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Betriebsformen zu erkennen. Aus den Untersuchungen konnte abgeschätzt werden, dass im Mittel 1000 kg P /d durch Bio-P aufgenommen werden kann, siehe 3.4. Bei einer durchschnittlichen Zulauffracht von ca. 2500 kg P/d, wobei davon ca. 1250 kg P/d durch den CSB Abbau verbraucht werden, ist dieses Potential nicht zu unterschätzen.

Aus den Vor- und Batchversuchen zeigte sich, dass die zweite Stufe kein nennenswertes Potential besitzt. Dies ist erklärbar, da das meiste leicht abbaubare Substrat schon in der ersten Stufe verbraucht wird. Weiters herrschen in der ersten Kaskade der zweiten Stufe keine anaeroben, sondern anoxische Bedingungen. Dies verhindert die erforderliche Rücklösung, siehe 1.3.2.

Aus der Bilanz ergeben sich Zeiträume, in denen es eine vermehrte biologische Phosphoraufnahme gab, diese gingen mit einem größeren spezifischen Energieeintrag einher. Der erhöhte Energieeintrag lässt auf ein vollständig bzw. ausreichend aerobes Milieu für die Bio-P Bakterien schließen. Die Bio-P Bakterien sind demzufolge nicht bei der Rücklösung gehemmt, sondern bei der Wiederaufnahme.

Allgemein kann man sagen, dass Potential in der Hauptkläranlage in Wien für eine vermehrte biologische Phosphoraufnahme vorhanden ist. Dies müsste durch stärkeres Belüften in der ersten Stufe gefördert werden. Die Berechnung ist dahingehend anzustellen, ob sinnvoller Weise die Belüftung verstärkt und dadurch der Fällmitteleinsatz reduziert wird - allerdings erhöht sich dadurch der Energieverbrauch. Somit ist dies eine Frage der Kosten- und Nutzenrechnung.

Literaturverzeichnis

Entsorgungsbetriebe Simmering, <http://www.ebs.co.at>, 12:00, 1.3.2009.

Entsorgungsbetriebe Simmering, *Alles Klar*, CD, 2005.

Svardal K.: *Datendokumentation und Auswertung - Plausibilitätsanalyse von Messwerten*, Band 147, Wiener Mitteilungen, 1998.

Kroiss, H.: *Abwasserreinigung*, Vorlesungsunterlagen TU Wien IWAG, 2007.

Ludwig, C.: *Biologische Phosphorentfernung der Kläranlage Eisenstadt*, 1982.

Matsché, N.: *Entfernung von Phosphorverbindungen bei der Abwasserreinigung*, Band 97, Wiener Mitteilungen, 1991.

Röske, I. et. All: *Biologie der Wasser und Abwasserbehandlung*, 1. Auflage, UTB, 1998.

Schönberger, R.: *Optimierung der biologischen Phosphorelimination bei der kommunalen Abwasserreinigung*, Bericht aus Wasssergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen Nr. 93, TU München, 1990.

Zessner, M.: *Bedeutung und Steuerung von Nährstoff- und Schwermetallflüssen des Abwassers*, Wiener Mitteilungsblatt, 1999.

A. Anhang

In diesem Kapitel sind alle Messdaten angeführt. Die Daten werden nach den in Kapitel 3 gegliederten Versuchen dargestellt.

Erklärung der Indizes:

ge	...	gerührt	nach 2.2.1
be	...	belüftet	nach 2.2.2
be +P	...	belüftet mit Aufstockung	nach 2.2.3

Tabelle A.1.: Messdaten 1. Vorversuch 1. Stufe

Uhrzeit	Dauer	Nr.	Bezeichnung	O_2	T	pH	PO_4 -P	NH_4 -N	NO_x -N	NO_2 -N	NO_3 -N
[-]	[h]			[mg/l]	[°C]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]

Kaskade 1, Mischung

11:15	0	16	BB1/1 N ge				2,27	21,31	0,03	0,02	0,01
11:30	0,25	18	BB1/1 N ge	0,15		7,2	2,47	22,22	0,02	0,02	0
11:45	0,5	20	BB1/1 N ge	0,1			2,59	22,84	0,02	0,02	0
12:00	0,75	22	BB1/1 N ge	0,09			2,72	22,99	0,03	0,03	0
12:12	0,95	28	BB1/1 N ge	0,1	13,9		2,81	23,07	0,07	0,02	0,05
12:24	1,15	32	BB1/1 N be				2,12	22,69	0,17	0,07	0,1
12:39	1,40	38	BB1/1 N be				1,5	21,21	0,64	0,44	0,2
13:31	2,27	42	BB1/1 N be				0,68	15,73	2,79	1,17	1,62

Kaskade 4

11:19	0	17	BB1/4 N	0,17	13,5	7,22	1,87	20,9	0	0	0
11:34	0,25	19	BB1/4 N	0,11			2,01	20,81	0,04	0,04	0
11:49	0,5	21	BB1/4 N	0,09			2,03	21,31	0,01	0,01	0
12:05	0,77	23	BB1/4 N	0,09			2,31	21,21	0,03	0,03	0
12:19	1,00	29	BB1/4 N	0,08			2,88	21,17	0,02	0,02	0
12:25	1,10	33	BB1/4 N b				2,02	21,07	0,06	0,06	0
12:40	1,35	39	BB1/4 N b				1,71	19,82	0,39	0,31	0,08
13:32	2,22	43	BB1/4 N b				1,11	16,94	1,58	0,88	0,7

Tabelle A.2.: Messdaten 2. Vorversuch 1. Stufe

Uhrzeit	Dauer	Nr.	Bezeichnung	O_2	T	pH	PO_4 -P	NH_4 -N	NO_x -N	NO_2 -N	NO_3 -N
[-]	[h]			[mg/l]	[°C]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Kaskade 1, Mischung											
11:57	0,00	26	BB2/1 ge				0,89	7,43	0,39	0,27	0,12
12:21	0,40	30	BB2/1 ge	0,11			0,87	7,58	0,04	0,04	0
12:32	0,58	34	BB2/1 ge	0,02			0,99	7,98	0,06	0,06	0
12:44	0,78	40	BB2/1 ge	0,07			1,03	7,92	0,05	0,05	0
13:34	1,62	44	BB2/1 ge				1,06	8,07	0,09	0,06	0,03
13:50	1,88	46	BB2/1 ge		15,5	6,88	1,11	8,03	0,11	0,07	0,04
14:04	1,89	50	BB2/1 be		15,6	7,35	0,73	5,78	2,47	1,31	1,16
14:18	2,13	52	BB2/1 be				0,58	2,56	6,08	2,69	3,39
14:47	2,61	54	BB2/1 be				0,55	0,2	9,14	0,1	9,04
15:08	2,96	58	BB2/1 be				0,58	0,73	9,43	0,09	9,34
15:21	3,18	62	BB2/1 be				0,58	1,35	9,4	0,12	9,28
Kaskade 4											
12:09	0,00	27	NKB ge				0,7	1,07	2,52	0,29	2,23
12:23	0,23	31	NKB ge	0,11			0,61	0,7	2,8	0,25	2,55
12:34	0,42	35	NKB ge	0,09			0,71	0,57	2,26	0,12	2,14
12:45	0,60	41	NKB ge	0,1			0,61	0,94	1,84	0,08	1,76
13:35	1,43	45	NKB ge				0,76	1,78	0,11	0,03	0,08
13:52	1,72	47	NKB ge				0,79	1,14	0,1	0,04	0,06
14:05	2,13	51	NKB be		15,4	7,1	0,61	0,55	0,93	0,1	0,83
14:20	2,38	53	NKB be				0,59	0,04	1,43	0,11	1,32
14:50	2,88	55	NKB be				0,61	0,05	2,01	0,06	1,95
15:13	3,27	59	NKB be				0,59	0,48	2,1	0,04	2,06
15:23	3,43	63	NKB be				0,61	1,51	2,33	0,07	2,26

Tabelle A.3.: Messdaten Vorversuch 2. Stufe

Uhrzeit	Dauer	Nr.	Bezeichnung	O_2	T	pH	PO_4 -P	NH_4 -N	NO_x -N	NO_2 -N	NO_3 -N
[-]	[h]			[mg/l]	[°C]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Kaskade 1, Mischung											
11:57	0,00	26	BB2/1 ge				0,89	7,43	0,39	0,27	0,12
12:21	0,40	30	BB2/1 ge	0,11			0,87	7,58	0,04	0,04	0
12:32	0,58	34	BB2/1 ge	0,02			0,99	7,98	0,06	0,06	0
12:44	0,78	40	BB2/1 ge	0,07			1,03	7,92	0,05	0,05	0
13:34	1,62	44	BB2/1 ge				1,06	8,07	0,09	0,06	0,03
13:50	1,88	46	BB2/1 ge		15,5	6,88	1,11	8,03	0,11	0,07	0,04
14:04	1,89	50	BB2/1 be		15,6	7,35	0,73	5,78	2,47	1,31	1,16
14:18	2,13	52	BB2/1 be				0,58	2,56	6,08	2,69	3,39
14:47	2,61	54	BB2/1 be				0,55	0,2	9,14	0,1	9,04
15:08	2,96	58	BB2/1 be				0,58	0,73	9,43	0,09	9,34
15:21	3,18	62	BB2/1 be				0,58	1,35	9,4	0,12	9,28
Nachklärbecken, Mischung											
12:09	0,00	27	NKB ge				0,7	1,07	2,52	0,29	2,23
12:23	0,23	31	NKB ge	0,11			0,61	0,7	2,8	0,25	2,55
12:34	0,42	35	NKB ge	0,09			0,71	0,57	2,26	0,12	2,14
12:45	0,60	41	NKB ge	0,1			0,61	0,94	1,84	0,08	1,76
13:35	1,43	45	NKB ge				0,76	1,78	0,11	0,03	0,08
13:52	1,72	47	NKB ge				0,79	1,14	0,1	0,04	0,06
14:05	1,73	51	NKB be		15,4	7,1	0,61	0,55	0,93	0,1	0,83
14:20	1,98	53	NKB be				0,59	0,04	1,43	0,11	1,32
14:50	2,48	55	NKB be				0,61	0,05	2,01	0,06	1,95
15:13	2,86	59	NKB be				0,59	0,48	2,1	0,04	2,06
15:23	3,03	63	NKB be				0,61	1,51	2,33	0,07	2,26

Tabelle A.4.: Messdaten 1. Batchversuch 1. Stufe

Uhrzeit	Dauer	Nr.	Bezeichnung	o_2	T	pH	PO_4 -P	NH_4 -N	NO_x -N	NO_2 -N	NO_3 -N
[-]	[h]			[mg/l]	[°C]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
09:44	0,00	1	BB1/4 ge				0,81	15,4	0,81	0,43	0,38
10:01	0,28	3	BB1/4 ge	0,18	13,5		0,94	14,3	0,07	0,01	0,06
10:15	0,52	5	BB1/4 ge	0,11	13,5		1,18	14,3	0,05	0,01	0,04
10:30	0,77	7	BB1/4 ge	0,08	13,6		1,33	14,4	0,06	0,01	0,05
10:46	1,03	10	BB1/4 ge		13,7		1,66	14,5	0,05	0,01	0,04
11:01	1,28	12	BB1/4 be		13,9		0,99	13,5	0,27	0,21	0,06
11:15	1,52	14	BB1/4 be		14		0,62	12,4	0,6	0,43	0,17
11:26	1,70	16	BB1/4 be		14		0,6	11,6	0,95	0,58	0,37
11:36	1,87	18	BB1/4 be		14		0,5	12	1,29	0,71	0,58
11:45	2,02	20	BB1/4 be		14		0,43	10,2	1,51	0,77	0,74
11:48	2,07	21	BB1/4 be +P		14		3,01	10,1	1,69	0,82	0,87
11:58	2,23	24	BB1/4 be +P		14		2,66	9,26	1,99	0,88	1,11
12:08	2,40	26	BB1/4 be +P		14,1	7,9	2,59	9,56	2,26	0,98	1,28
12:23	2,65	28	BB1/4 be +P		14		2,48	8,19	2,81	1,12	1,69
13:13	3,48	30	BB1/4 be +P		14,3	8	1,78	4,95	4,42	1,67	2,75

Tabelle A.5.: Messdaten 1. Batchversuch 2. Stufe

Uhrzeit	Dauer	Nr.	Bezeichnung	T	pH	PO_4 -P	NH_4 -N	NO_x -N	NO_2 -N	NO_3 -N
[-]	[h]			[°C]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
09:52	0,00	2	BB2/1 ge	12,3		0,68	7,79	0,41	0,28	0,13
10:06	0,23	4	BB2/1 ge	13,8	6,9	0,65	7,4	0,11	0,07	0,04
10:20	0,47	6	BB2/1 ge	13,8	6,88	0,76	7,58	0,09	0,02	0,07
10:36	0,73	9	BB2/1 ge	13,9		0,84	9,02	0,04	0,03	0,01
10:52	1,00	11	BB2/1 ge	14		0,82	7,59	0,03	0,02	0,01
11:06	1,23	13	BB2/1 be	14		0,61	6,29	1,53	0,8	0,73
11:20	1,47	15	BB2/1 be			0,51	3,93	4,23	1,89	2,34
11:30	1,63	17	BB2/1 be	14,2		0,47	2,5	6,27	2,57	3,7
11:40	1,80	19	BB2/1 be	14,2	7,5	0,43	1,15	7,93	2,97	4,96
11:50	1,97	22	BB2/1 be	14,2		0,43	0,55	8,65	2,1	6,55
11:53	2,02	23	BB2/1 be +P	14,2		2,49	0,26	8,84	1,51	7,33
12:03	2,18	25	BB2/1 be +P	14,3		2,15	1,7	8,99	0,19	8,8
12:13	2,35	27	BB2/1 be +P	14,3		2,19	1,65	9,05	0,05	9
12:23	2,52	29	BB2/1 be +P	14,3		2,07	1	9,17	0,08	9,09
13:13	3,35	31	BB2/1 be +P	14,5	7,8	1,42	0,52	9,7	0,05	9,65

Tabelle A.6.: Messdaten 2. Batchversuch 1. Stufe

Uhrzeit	Dauer	Nr.	Bezeichnung	T	pH	PO_4 -P	NH_4 -N	NO_x -N	NO_2 -N	NO_3 -N
[-]	[h]			[°C]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
9:45	0,00	7	BB1/4 ge			0,26	5,34	0,15	0,02	0,13
9:55	0,17	9	BB1/4 ge	20,1	7,21	0,37	5,43	0,17	0,02	0,15
10:05	0,33	11	BB1/4 ge	20,2	7,20	0,42	5,6	0,1	0,03	0,07
10:15	0,50	13	BB1/4 ge	20,4	7,19	0,59	5,38	0,25	0,03	0,22
10:25	0,67	15	BB1/4 ge	20,5	7,11	0,9	5,31	0,16	0,03	0,13
10:35	0,83	17	BB1/4 be			0,11	4,63	0,65	0,12	0,53
10:45	1,00	19	BB1/4 be			0,03	3,53	1,69	0,17	1,52
10:55	1,17	21	BB1/4 be	21,1		0,05	2,63	2,46	0,22	2,24
11:05	1,33	23	BB1/4 be			0,06	1,58	3,18	0,19	2,99
11:15	1,50	25	BB1/4 be			0,03	0,41	4,35	0,18	4,17
11:25	1,67	27	BB1/4 be			0,02	0,13	4,7	0,01	4,69
11:30	1,75	29	BB1/4 be +P			0,62	0,16	4,73	0,01	4,72
11:40	1,92	31	BB1/4 be +P			0,25	0,12	4,66	0,03	4,63
11:50	2,08	33	BB1/4 be +P	21,9		0,15	0,25	4,65	0,01	4,64
12:00	2,25	35	BB1/4 be +P			0,11	0,87	4,71	0,01	4,7
12:10	2,42	37	BB1/4 be +P	22,1		0,08	0,12	4,68	0	4,68
12:20	2,58	39	BB1/4 be +P		8,00	0,04	0	4,64	0	4,64
13:07	3,37	41	BB1/4 be +P	22,6		0,01	0,2	4,51	0,01	4,5

Tabelle A.7.: Messdaten 2. Batchversuch 2. Stufe

Uhrzeit	Dauer	Nr.	Bezeichnung	T	pH	PO_4 -P	NH_4 -N	NO_x -N	NO_2 -N	NO_3 -N
[-]	[h]			[°C]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
9:50	0,00	8	BB2/1 ge	20,1	7,07	0,49	3,78	5,48	0,13	5,35
10:00	0,17	10	BB2/1 ge	20,2	7,07	0,46	4,01	5,04	0,15	4,89
10:10	0,33	12	BB2/1 ge	20,3	7,07	0,49	3,71	4,76	0,16	4,6
10:20	0,50	14	BB2/1 ge	20,4	7,07	0,51	4,01	4,28	0,18	4,1
10:30	0,67	16	BB2/1 ge	20,5	7,08	0,62	3,8	3,94	0,16	3,78
10:40	0,83	18	BB2/1 be	20,7	7,37	0,48	2,39	5,76	0,45	5,31
10:50	1,00	20	BB2/1 be			0,46	0,75	7,12	0,54	6,58
11:00	1,17	22	BB2/1 be	20,9		0,36	0,5	8,31	0,01	8,3
11:10	1,33	24	BB2/1 be			0,41	0,78	8,92	0,07	8,85
11:20	1,50	26	BB2/1 be			0,37	0,06	8,5	0,01	8,49
11:30	1,67	28	BB2/1 be			0,33	0,13	8,5	0,01	8,49
11:35	1,75	30	BB2/1 be +P			2,44	0,06	8,8	0,01	8,79
11:45	1,92	32	BB2/1 be +P			2,21	0,14	8,81	0,01	8,8
11:55	2,08	34	BB2/1 be +P	21,3		1,97	0,18	8,7	0,01	8,69
12:05	2,25	36	BB2/1 be +P			1,95	0,06	8,96	0,01	8,95
12:15	2,42	38	BB2/1 be +P	21,6	7,80	1,82	0	9,06	0,02	9,04
12:25	2,58	40	BB2/1 be +P	21,7	7,86	1,87	0,03	9,08	0,01	9,07
13:08	3,30	42	BB2/1 be +P	22,60		1,6	1,62	9,23	0,01	9,22

Tabelle A.8.: Messdaten 3. Batchversuch 1. Stufe

Uhrzeit	Dauer	Nr.	Bezeichnung	T	pH	PO_4 -P	NH_4 -N	NO_x -N	NO_2 -N	NO_3 -N
[-]	[h]			[°C]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
09:23	0,00	4	BB1/4 ge	22,3	7,3	0,1	3,85	0,08	0,01	0,07
09:28	0,08	6	BB1/4 ge	22,4	7,25	0,2	4,07	0,04	0,02	0,02
09:32	0,15	8	BB1/4 ge	22,5	7,25	0,28	3,98	0,07	0,01	0,06
09:42	0,32	10	BB1/4 ge	22,6	7,24	0,41	4,26	0,09	0	0,09
09:52	0,48	12	BB1/4 ge	22,8	7,25	0,69	4,2	0,07	0,03	0,04
10:02	0,65	14	BB1/4 ge	23	7,2	0,77	3,99	0,08	0,01	0,07
10:12	0,82	16	BB1/4 ge	23,2	7,24	0,96	4,27	0,05	0,01	0,04
10:22	0,98	18	BB1/4 be	23,5	7,47	0,14	3,33	0,52	0,09	0,43
10:32	1,15	20	BB1/4 be			0,12	2,54	1,36	0,14	1,22
10:42	1,32	22	BB1/4 be			0,06	1,72	2,12	0,14	1,98
10:52	1,48	24	BB1/4 be			0,08	0,65	2,51	0,01	2,5
11:02	1,65	26	BB1/4 be	24,2		0,08	0,46	2,62	0,01	2,61
11:12	1,82	28	BB1/4 be			0,05	0,34	2,58	0,01	2,57
11:17	1,90	30	BB1/4 be +P			0,65	0,47	2,69	0,01	2,68
11:22	1,98	32	BB1/4 be +P	24,6	8,03	0,47	0,67	2,64	0,01	2,63
11:27	2,07	34	BB1/4 be +P			0,37	0,72	2,62	0,01	2,61
11:32	2,15	36	BB1/4 be +P	24,8		0,29	0,61	2,65	0,01	2,64
11:37	2,23	38	BB1/4 be +P	24,9		0,17	0,48	2,62	0,01	2,61
11:42	2,32	40	BB1/4 be +P			0,16	0,52	2,62	0,01	2,61
11:47	2,40	42	BB1/4 be +P	25	8,1	0,14	0,8	2,68	0,02	2,66
11:52	2,48	44	BB1/4 be +P			0,16	0,27	2,62	0,01	2,61
11:57	2,57	46	BB1/4 be +P			0,14	0,19	2,61	0,02	2,59
12:07	2,73	48	BB1/4 be +P			0,13	0,17	2,62	0,01	2,61
12:56	3,55	50	BB1/4 be +P			0,1	0,15	2,5	0,02	2,48

Tabelle A.9.: Messdaten 3. Batchversuch 2. Stufe

Uhrzeit	Dauer	Nr.	Bezeichnung	T	pH	PO_4 -P	NH_4 -N	NO_x -N	NO_2 -N	NO_3 -N
[-]	[h]			[°C]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
09:24	0,00	5	BB2/1 ge	22,1	6,99	0,91	3,42	0,6	0,07	0,53
09:29	0,08	7	BB2/1 ge	21,3	7	0,89	3,45	0,3	0,09	0,21
09:34	0,17	9	BB2/1 ge	22,3	6,99	0,92	3,45	0,11	0,02	0,09
09:43	0,32	11	BB2/1 ge	22,5	7	0,93	3,6	0,04	0,01	0,03
09:54	0,50	13	BB2/1 ge	22,7	6,99	1,09	3,49	0,14	0	0,14
10:04	0,67	15	BB2/1 ge	22,9	7,02	1,25	3,61	0,1	0	0,1
10:14	0,83	17	BB2/1 ge	23,1	6,99	1,38	3,48	0,06	0,01	0,05
10:24	1,00	19	BB2/1 be	23,4	7,22	0,89	1,96	2,08	0,18	1,9
10:34	1,17	21	BB2/1 be			0,73	0,72	3,97	0,03	3,94
10:44	1,33	23	BB2/1 be			0,63	0,83	4,16	0	4,16
10:54	1,50	25	BB2/1 be	24		0,57	0,48	4,21	0,01	4,2
11:04	1,67	27	BB2/1 be	24,2		0,56	0,55	4,41	0,01	4,4
11:14	1,83	29	BB2/1 be			0,55	0,56	4,62	0,01	4,61
11:19	1,92	31	BB2/1 be +P			2,21	0,86	4,64	0,01	4,63
11:24	2,00	33	BB2/1 be +P	24,6	7,3	2,13	0,6	4,67	0,02	4,65
11:29	2,08	35	BB2/1 be +P			2,05	0,48	4,79	0,02	4,77
11:34	2,17	37	BB2/1 be +P	24,8		1,99	0,51	4,86	0,01	4,85
11:39	2,25	39	BB2/1 be +P	24,9		1,91	0,35	4,89	0	4,89
11:44	2,33	41	BB2/1 be +P	25		1,76	0,7	4,98	0,01	4,97
11:49	2,42	43	BB2/1 be +P	25,1		1,78	0,95	5,02	0,02	5
11:54	2,50	45	BB2/1 be +P			1,8	0,28	5,14	0,01	5,13
11:59	2,58	47	BB2/1 be +P			1,71	0,4	5,2	0,01	5,19
12:09	2,75	49	BB2/1 be +P			1,72	0,15	5,38	0,02	5,36
12:58	3,53	51	BB2/1 be +P			1,38	0,26	6,12	0,01	6,11

Tabelle A.10.: Messdaten Phosphorverlauf

Uhrzeit	Versuchsdauer	Nr.	Bezeichnung	PO_4 -P	NH_4 -N	NO_x -N	NO_2 -N	NO_3 -N
[-]	[h]			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
09:55	00:00	1	BB1/1 N	1,67	13,32	1,14	0,07	1,07
09:56	00:01	2	VK Ablauf N	5,16	33,5	0	0	0
11:00	01:05	3	BB1/4 N	1,89	20,58	0,29	0,22	0,07
12:32	02:37	4	ZK Ablauf	1,4	16,46	0,01	0,01	0
12:37	02:42	5	BB1/1 N	1,72	14,2	1,43	0,09	1,34
12:38	02:43	6	VK Ablauf N	5,38	40,6	0	0	0
13:33	03:38	7	BB1/4 N	2,18	27,47	0,33	0,25	0,08
15:00	05:05	8	ZK Ablauf	1,74	24,31	0,02	0,01	0,01
14:33	04:38	9	BB1/1 N	2,59	23,72	0	0	0
14:34	04:39	10	VK Ablauf N	5,15	36,34	0	0	0
15:31	05:36	11	BB1/4 N	1,84	25,52	0,53	0,27	0,26
17:40	07:45	12	ZK Ablauf	1,76	25,13	0,03	0,02	0,01