

Phosphorrückgewinnung bei der kommunalen Abwasserreinigung



gefördert durch das



Ministerium für
Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und
Verbraucherschutz
des Landes
Nordrhein-Westfalen

-Abschlussbericht-

Wissenschaftlicher Leiter: Prof. Dr.-Ing. M. Lohse

Bearbeiter: Dipl.-Ing. M. Gieske
Dr.-Ing. G. Becker
Dipl.-Ing. T. Böning

Februar 2005

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1	Einleitung 11
2	Zielsetzung 17
3	Grundlagen der Phosphor-Rückgewinnung 18
3.1	Biologische Phosphat-Rücklösung 18
3.2	Ultraschalldesintegration 19
3.3	P-Elimination aus dem Schlammwasser durch Fällungsprozesse 22
4	Versuchsaufbau 25
4.1	Beschreibung der halbtechnischen Versuchsanlage 26
4.2	Beschreibung der Abwasserreinigungsanlagen 29
4.3	Schlammqualitäten des eingesetzten Überschussschlammes 33
4.4	Versuchsbegleitende Analytik 33
5	Darstellung der Ergebnisse 35
5.1	Ergebnisse der biologischen P-Rücklösung 35
5.1.1	Einfluss der Verweilzeit 36
5.1.2	Einfluss der Temperatur 36
5.1.3	Einfluss einer Substratzugabe 41
5.1.4	Einfluss des TS-Gehaltes 46
5.1.5	Einfluss einer Simultanfällung 49
5.2	Ergebnisse der Ultraschalldesintegration 50
5.2.1	Einfluss der Beschallungsdauer 52
5.2.2	Einfluss der Ultraschallintensität 55
5.2.3	Einfluss des TS- Gehaltes 60
5.2.4	Einfluss einer Simultanfällung 64
5.3	Ergebnisse einer aus biologischer Rücklösung und Ultraschalldesintegration kombinierten Anlage 65
5.3.1	Biologische Rücklösung vor der Desintegration 66
5.3.2	Betrieb der Desintegration vor der biologischen Rücklösung 69

5.3.3	Kombination von Desintegration und biologischer Rücklösung durch Kreislaufbetrieb	73
5.4	Auswirkungen der Desintegration auf den Reinigungsprozess und die Schlammeigenschaften	76
5.4.1	Reinigungsprozess	76
5.4.2	Schlammeigenschaften	79
6	Vergleich der P-Rückgewinnung der untersuchten Verfahren	82
7	Konzeptentwicklung und Kostenschätzung	84
7.1	Biologische Rücklösung	84
7.2	Ultraschalldesintegration	87
7.3	Rücklösung mit vorgeschalteter Ultraschalldesintegration.....	88
7.4	Darstellung der spezifischen Kosten	90
8	Zusammenfassung und Fazit	92
9	Literaturverzeichnis	97

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 1: Schematische Darstellung der wesentlichen Phosphorströme bei Anlagen mit biologischer P-Elimination (Durchschnittswerte).....	12
Abb. 2: Rückgewinnungspotential in Abhängigkeit des Einsatzortes einer Phosphorrückgewinnung	14
Abb. 3: Vereinfachtes Schema der anaeroben und aeroben Stoffwechselforgänge	18
Abb. 4: Ultraschall und Kavitation	20
Abb. 5: Notwendiger Energieeintrag.....	21
Abb. 6: Mögliche Einsatzorte einer Fällungsstufe	23
Abb. 7: Versuchsaufbau	27
Abb. 8: Ultraschalldesintegrator UIP 2000	28
Abb. 9: Fließbild der ARA ohne Simultanfällung	30
Abb. 10: Fließbild der ARA mit Simultanfällung	31
Abb. 11: Verlauf der P_{gel}-Konzentrationen bei unterschiedlichen Temperaturen (ARA ohne Simultanfällung)	37
Abb. 12: Maximales P-Rückgewinnungspotential in Abhängigkeit von der Temperatur (ARA ohne Simultanfällung)	37
Abb. 13: Verlauf der P_{gel}-Konzentrationen bei unterschiedlichen Temperaturen (ARA ohne Simultanfällung), Technikumsversuch.....	38
Abb. 14: Verlauf der P_{gel}-Konzentrationen bei unterschiedlichen Temperaturen (ARA mit Simultanfällung).....	39
Abb. 15: Maximales P-Rückgewinnungspotential in Abhängigkeit von der Temperatur (ARA mit Simultanfällung)	40

Abb. 16: Verlauf der P_{gel}-Konzentrationen bei unterschiedlicher Primärschlammzugabe (ARA ohne Simultanfällung)	42
Abb. 17: Maximale P-Rückgewinnung in Abhängigkeit der Substratzugabe (ARA ohne Simultanfällung).....	43
Abb. 18: Verlauf der P_{gel}-Konzentrationen bei unterschiedlicher Primärschlammzugabe (ARA mit Simultanfällung).....	44
Abb. 19: Maximale P-Rückgewinnung in Abhängigkeit der Substratzugabe (ARA mit Simultanfällung).....	45
Abb. 20: Verlauf der P_{gel}-Konzentrationen bei unterschiedlichen TS-Gehalten (ARA ohne Simultanfällung)	46
Abb. 21: Maximale P-Rückgewinnung in Abhängigkeit des TS-Gehaltes (ARA ohne Simultanfällung)	48
Abb. 22: Maximale P-Rückgewinnung durch biologische Rücklösung in Abhängigkeit einer durchgeführten Simultanfällung.....	50
Abb. 23: Verlauf der P_{gel}-Konzentration sowie des CSB-Wertes bei unterschiedlicher Beschallungsdauer ARA ohne Simultanfällung	53
Abb. 24: Verlauf der P_{gel}-Konzentration sowie des CSB-Wertes bei unterschiedlicher Beschallungsdauer (ARA mit Simultanfällung)	54
Abb. 25: Verlauf der P_{gel}-Konzentrationen bei unterschiedlichen Amplitudenhöhen (ARA ohne Simultanfällung)	56
Abb. 26: Verlauf der CSB-Werte bei unterschiedlichen Amplitudenhöhen (ARA ohne Simultanfällung)	57
Abb. 27: Verlauf der P_{gel}-Konzentrationen bei unterschiedlichen Amplitudenhöhen (ARA mit Simultanfällung)	58
Abb. 28: Verlauf der CSB-Werte bei unterschiedlichen Amplitudenhöhen (ARA mit Simultanfällung)	59

Abb. 29: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$-Konzentration bei unterschiedlichem TS-Gehalt (ARA ohne Simultanfällung)	60
Abb. 30: Phosphatrücklösung durch Desintegration in Abhängigkeit des TS-spezifischen Energieeintrages (ARA ohne Simultanfällung)	61
Abb. 31: Maximale P-Rückgewinnung in Abhängigkeit des TS-Gehaltes (ARA ohne Simultanfällung)	62
Abb. 32: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$-Konzentration bei unterschiedlichem TS-Gehalt (ARA ohne Simultanfällung)	63
Abb. 33: P-Rückgewinnung durch Ultraschalldesintegration in Abhängigkeit einer durchgeführten Simultanfällung.....	65
Abb. 34: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$-Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration nach biologischer Rücklösung (ARA ohne Simultanfällung)	66
Abb. 35: Phosphat-Rückgewinnungspotential und Konzentrationen nach den unterschiedlichen Anlagenstufen, ARA ohne Simultanfällung	67
Abb. 36: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$-Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration nach biologischer Rücklösung (ARA mit Simultanfällung)	68
Abb. 37: Max. Phosphat-Rückgewinnungspotential und Konzentrationen nach den unterschiedlichen Anlagenstufen (ARA mit Simultanfällung)	69
Abb. 38: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$-Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration vor biologischer Rücklösung (ARA ohne Simultanfällung)	70
Abb. 39: Max. Phosphat-Rückgewinnung und Konzentrationen nach den unterschiedlichen Anlagenstufen (ARA ohne Simultanfällung)	71

Abb. 40: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$-Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration vor biologischer Rücklösung (ARA mit Simultanfällung)	72
Abb. 41: Max. Phosphat-Rückgewinnungspotential und Konzentrationen nach den unterschiedlichen Anlagenstufen (ARA mit Simultanfällung)	73
Abb. 42: Fließbild der Kombination von Desintegration und biologischer Rücklösung durch Kreislaufbetrieb	74
Abb. 43: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$-Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration im Kreislauf mit biologischer Rücklösung (ARA ohne Simultanfällung)	74
Abb. 44: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$-Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration im Kreislauf mit biologischer Rücklösung (ARA mit Simultanfällung)	75
Abb. 45: Vergleich der Verfahrensordnung.....	82
Abb. 46: Integration einer Verfahrensstufe zur biologischen P-Rücklösung.....	85
Abb. 47: Verfahrensschema für eine biologische Rücklösung mit vorgeschalteter Desintegration	89

Tabellenverzeichnis

	<u>Seite</u>
Tab. 1: Verfahren zur P-Rückgewinnung.....	16
Tab. 2: Zellaufschlussverfahren.....	19
Tab. 3: Überblick über die durchgeführten Versuche.....	26
Tab. 4: Wesentliche Kenngrößen der Abwasserreinigungsanlagen	32
Tab. 5: Schlammqualität des eingesetzten Überschussschlammes	33
Tab. 6: Versuchsbegleitende Analytik	34
Tab. 7: Primärschlamm dosierung bei der Substratzugabe.....	41
Tab. 8: TS-spezifische Rückgewinnungspotentiale.....	47
Tab. 9: A_{CSB} -Aufschlussgrade bei unterschiedlichem Energieeintrag t	51
Tab. 10: Einfluss der Desintegration auf die Rückbelastung nach einer anaeroben Stabilisierung.....	77
Tab. 11: Mögliche Rückbelastungen zur ARA.....	78
Tab. 12: Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zur Verbesserung des Absetzverhaltens.....	80
Tab. 13: Entwässerungsverhalten.....	81
Tab. 14: Zusätzliche Investitionskosten für eine Anlage zur biologischen Rücklösung (ARA mit ca. 25.000 E).....	86
Tab. 15: Betriebskosten für eine Anlage zur biologischen Rücklösung (ARA mit ca. 25.000 E).....	86
Tab. 16: Betriebskostenkosten für eine Ultraschall desintegrationsanlage (160 kW)	88
Tab. 17: Investitionskosten für eine Anlage zur biologischen Rücklösung mit vorgeschalteter Desintegration (ARA mit ca. 25.000 E).....	89

Tab. 18: Betriebskosten für eine Anlage zur biologischen Rücklösung mit vorgeschalteter Desintegration (ARA mit ca. 25.000 E).....	90
Tab. 19: Phosphor-Rückgewinnungskosten und spezifische Einwohnerkosten.....	90

1 Einleitung

Phosphor ist ein Nährstoff, der im kommunalen Klärschlamm in Konzentrationen von 1 bis 5 % TS vorkommen kann. Nach WERNER (zit. in LOLL et al., 2001) werden die Rohphosphatvorräte in der Welt nur noch ca. 30 Jahre reichen. Der wirtschaftliche Abbau von Phosphorgesteinen wird zudem erheblich erschwert werden. Probleme bereiten der ansteigende Grad an Verunreinigungen in den Erzen, z. B. an Cadmium oder anderen Schwermetallen [CORNEL, 2002] und steigende Gewinnungskosten aufgrund niedrigerer P_2O_5 -Gehalte in den zudem tiefer liegenden Gesteinen. Die Düngemittelindustrie hat mehrfach erklärt, dass sie den hohen Cd-Gehalt der Rohphosphatvorräte kostengünstig nicht einfach vermindern kann.

Mit dem bundesweit im Klärschlamm anfallenden Phosphor (2,7 Mio. t TS Klärschlamm) könnten rund 30 % des jährlichen P-Mineraldüngers ersetzt werden (LOLL et al., 2001). Dementsprechend fordert das Umweltbundesamt (2001), die Rückgewinnung von schadstofffreiem Phosphor als Düngemittel aus Klärschlamm und Abwasser zu forcieren. „Die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Abwasser ist notwendig, weil die Phosphatvorkommen weltweit begrenzt und Phosphate als Düngemittel nicht ersetzbar sind.“

Daneben bestehen bei der Rückführung von Nährstoffen, darunter Phosphaten, über die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung Bedenken seitens der Landwirtschaft, der Politik und der Öffentlichkeit. Neben den Einträgen von Schwermetallen und organischen Schadstoffen, wie z. B. PCB, über den Klärschlamm wird die Verbreitung von Erregern diskutiert. Ferner besteht die Gefahr, dass bisher nicht alle ökotoxikologischen Schlamminhaltsstoffe erkannt worden sind [BUER et al., 2001]. Aktuelle Untersuchungen belegen zudem die Anwesenheit endokriner und persistenter Stoffe im Klärschlamm [BAUMANN, 2003].

Im Zuge der sich derzeit in der Diskussion befindlichen Anpassung von Bodenschutz-, Düngemittel- und Abfallrecht ist eine Verschärfung der Anforderungen an eine landwirtschaftliche, landbauliche sowie landschaftsbauliche Klärschlammverwertung zu erwarten. ESCH UND LOLL [2001] gehen davon aus, dass ab 2002 lediglich 30 % der anfallenden Klärschlämme stofflich verwertet werden. Zukünftig wird Klärschlamm verstärkt der thermischen Entsorgung zugeführt werden.

Somit wird der Phosphorkreislauf unterbrochen und eine große Menge an Phosphor dem System entzogen. Da dieser Verlust ausgeglichen werden muss und eine Versorgung der Landwirtschaft durch Mineraldünger in absehbarer Zeit zunehmend unwirtschaftlicher wird, liegt die Betrachtung einer P-Rückgewinnung auf Abwasserreinigungsanlagen (ARA) nahe.

Als eine Folge der Phosphathöchstmengenverordnung [BGBl I] und der gleichzeitig gestiegenen Sensibilität der Bevölkerung im Hinblick auf die Verwendung phosphatfreier Wasch- und Reinigungsmittel ist die Phosphorfracht im kommunalen Abwasser in den letzten Jahren kontinuierlich zurückgegangen. Heute kann man davon ausgehen, dass nahezu kein Phosphor mehr über Wasch-, Spül- und Reinigungsmittel in das Abwasser eingetragen wird, so dass unter Vernachlässigung von industriellen Einleitungen letztlich lediglich der Anteil aus menschlichen Ausscheidungen für die Belastung des Abwassers mit Phosphor zu berücksichtigen ist. Hierfür kann ein Wert von 1,6 bis 2,0 g P/(E·d) angesetzt werden.

Der Phosphor wird bei der biologischen Abwasserreinigung im Wesentlichen über den Primär- und den Überschussschlamm dem Abwasserstrom entnommen. In der nachfolgenden Abbildung sind die Phosphorströme für übliche Überschuss- zu Primärschlammverhältnisse von 0,6 bis 1,3 und Phosphorgehalte im Überschussschlamm von 25 bis 35 mg/g TS (üblicher Wert für Anlagen mit biologischer Phosphorelimination) dargestellt.

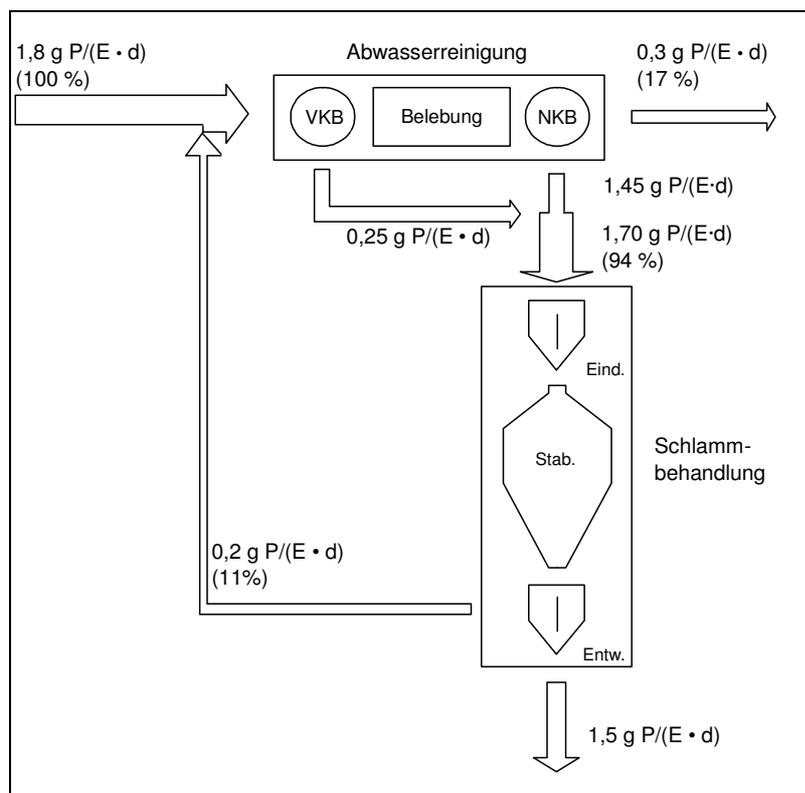


Abb. 1: Schematische Darstellung der wesentlichen Phosphorströme bei Anlagen mit biologischer P-Elimination (Durchschnittswerte) (verändert nach JARDIN, 1995)

Für die Rückgewinnung von Phosphor bei der kommunalen Abwasserbehandlung bieten sich grundsätzlich drei Möglichkeiten:

- Entnahme von Phosphor aus dem Abwasser- bzw. Rücklaufschlammstrom
- Entzug von Phosphor aus dem Klärschlamm
- Rückgewinnung des Phosphors aus der bei der Klärschlammverbrennung entstehenden Asche.

Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser- bzw. Rücklaufschlammstrom

Die aus dem Abwasser zu entnehmende Phosphorfracht ergibt sich auf Grundlage von Durchschnittswerten wie folgt:

spezifische Zulauf Fracht	1,8 g P/(E•d)
P-Elimination aus der Vorklärung	- 0,25 g P/(E•d)
P-Elimination durch ÜSS-Produktion	- 0,75 g P/(E•d)
erlaubte P-Fracht im Ablauf	<u>- 0,3 g P/(E•d)</u>
Mögliche Entnahme von P aus Abwasser	0,5 g P/(E•d)

Für die Entnahme von Phosphor aus dem Abwasserstrom haben sich in den letzten Jahren neben chemischen Verfahren insbesondere biologische Verfahren (Bio-P) bewährt. Aufgrund der hohen Abwassermengen und der insbesondere bei Mischwassersystemen vergleichsweise sehr geringen Konzentrationen erscheint eine Entnahme von Phosphor aus dem Abwasserstrom in Form einer Vor- oder Nachfällung nur wenig geeignet. Eine sinnvolle Variante zur P-Entnahme ist die biologische P-Elimination über das Phostrip-Verfahren. Dieses Nebenstrom-Verfahren ist im Wesentlichen durch ein Rücklaufschlammabsetzbecken gekennzeichnet, welches als Stripper bezeichnet wird. Die Anaerobie des Beckens bewirkt eine intensive Phosphor-Rücklösung, darüber hinaus erfolgt eine Trennung des phosphatarmen Schlammes vom phosphatreichen Überstandswasser. Der phosphatarme Schlamm wird der Belebung wieder zugegeben, dem phosphatreichen Überstandswasser in einer Fällungsstufe das Phosphat entzogen.

Phosphorrückgewinnung aus Asche der Klärschlammverbrennung

Bei der Rückgewinnung des Phosphors aus der Verbrennungsasche des Klärschlammes (z. B. BioCon-Verfahren) ist die Effektivität maßgeblich von der vorangegangenen P-Elimination der Abwasserreinigungsanlage abhängig. Der Phosphor wird in einem Lösungsbecken unter Zugabe von chemischen Zusatzstoffen (bei chemischer P-Fällung der Abwasserreinigungsanlage) aus der Asche rückgelöst. Bei vorheriger bio-

logischer P-Elimination ist evtl. auch Heißdampf ausreichend, um eine Rücklösung zu erzielen. In jedem Fall ist eine Klärschlamm-Mono-Verbrennung und eine P-Fällungsstufe des anfallenden Prozesswassers erforderlich. Darüber hinaus sollte der Klärschlamm aus einer Abwasserreinigungsanlage mit biologischer P-Elimination stammen. Gegebenenfalls wird auch eine vorhergehende Ascheaufbereitung benötigt.

Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Ein anderer Weg der Rückgewinnung von Phosphor bei der kommunalen Abwasserreinigung ist die Entnahme von Phosphor aus dem Klärschlamm. Dabei soll zunutze gemacht werden, dass es bei der Schlammbehandlung (Eindickung, anaerobe Stabilisierung, Entwässerung) zu einer Phosphor-Rückbelastung (ca. 0,25 g P/(E·d)) des Abwasserreinigungsprozesses über das Schlammwasser kommt (siehe Abb. 1). Strategie einer P-Rückgewinnung kann es deshalb sein, das Rücklöseverhalten von Phosphor im Rahmen der Schlammbehandlung gezielt zu fördern, um den gelösten Phosphor aus dem Schlammwasser durch Fällungsreaktionen entnehmen zu können.

Auf Grundlage der allgemeinen Phosphorbilanz einer Abwasserreinigungsanlage können die in der folgenden Abbildung dargestellten Rückgewinnungspotentiale angenommen werden.

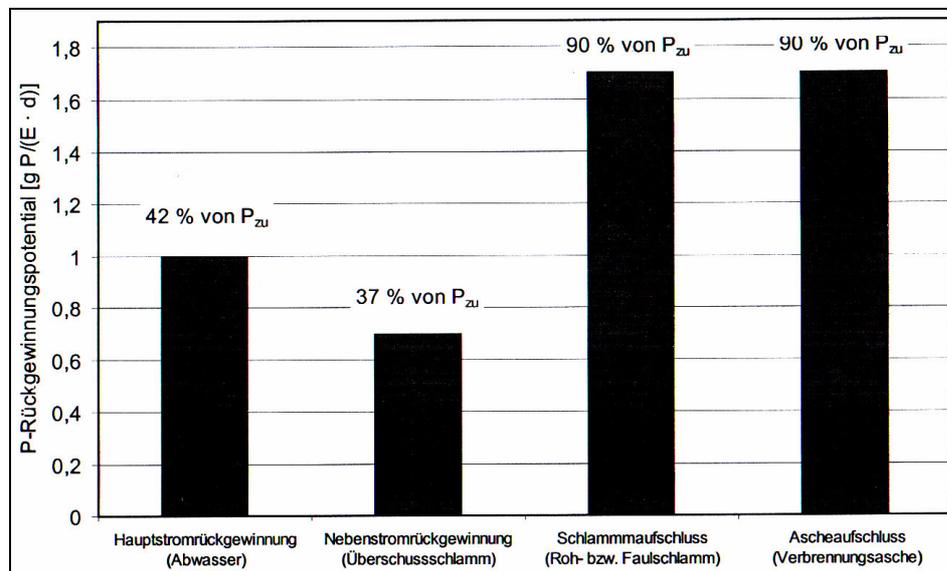


Abb. 2: Rückgewinnungspotential in Abhängigkeit des Einsatzortes einer Phosphorrückgewinnung [JARDIN, 2003]

Das anschließend gewonnene Produkt sollte in jedem Fall in hoher Qualität als Düngemittel und für Industriezwecke einsetzbar sein.

Die oben dargestellten Verfahren zur P-Rückgewinnung werden neben dem vom INFA durchgeführten Vorhaben derzeit durch drei weitere vom MUNLV geförderten Projekte untersucht:

- Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Machbarkeit in NRW und Untersuchungen zu zentralen und dezentralen Verfahren [RWTH Aachen]
- Phosphorrecycling - Rückgewinnung von industriell bzw. landwirtschaftlich verwertbaren Phosphorverbindungen aus Abwasser und Klärschlamm [RWTH Aachen]
- Rückgewinnung von Phosphor aus Aschen der Klärschlammverbrennung – Konzepte, Strategien, Wirtschaftlichkeit [TU Darmstadt, Ruhrverband]

Tabelle 1 stellt die derzeit bekannten bereits erprobten Verfahren zur P-Rückgewinnung sowie die Vor- und Nachteile dar.

Insbesondere für kleinere kommunale Abwasserreinigungsanlagen erscheint es sinnvoll, eine Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm anzustreben, da abwasserseitig relativ große Volumenströme mit kleinen Konzentrationen, schlammseitig jedoch relativ kleine Schlammengen mit wesentlich höheren Konzentrationen an Phosphor vorliegen. Weiterhin ist eine Rückgewinnung aus der Asche oft nicht möglich, da der Klärschlamm i. d. R. nicht in einer Klärschlamm-Monoverbrennung entsorgt wird.

Der vorliegende Bericht behandelt daher die **Phosphorrückgewinnung aus der Schlammphase**, insbesondere aus dem Überschussschlamm.

Tab. 1: Verfahren zur P-Rückgewinnung [ATV, 2003]

Verfahren	Pro	Contra
alle Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere zu entsorgende Klärschlamm-mengen • Erlöse für zurückgewonnenen Phosphor 	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionskosten für zusätzliche Ver-fahrensstufen • Kosten für den Betrieb der zusätzlichen Prozesse • Logistikkosten für die Verwertung von zurückgewonnenem Phosphor
Rückgewinnung aus dem Nebenstrom		
Phostrip-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • gegebenenfalls Einsparung an Fällmitteln 	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten für Verfahrensumstellung auf Bio-P • betrieblicher Mehraufwand (Prozess-technik, gegebenenfalls Inkrustationen)
Rückgewinnung aus dem Klärschlamm		
Krepro- Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Rückgewinnung von Fällmittel • mögliche Substitution externer C-Quellen • deutliche Verminderung der zu entsorgenden Klärschlamm-menge • verbesserte Entwässerbarkeit des Klärschlammes 	<ul style="list-style-type: none"> • Chemikalieneinsatz zur Phos-phorrückgewinnung • thermische Energie zur Aufheizung des Schlammes
Seaborne-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Produktion von Düngemitteln oder Düngemittel-Vorprodukten • Gewinnung von Biogas, teilweise mit Stadtgasqualität • verminderte N-Rück-belastung • deutliche Verminderung der zu entsorgenden Klärschlamm-menge 	<ul style="list-style-type: none"> • Chemikalieneinsatz zur Phosphorrück-gewinnung • sehr komplexe Verfahrensführung
Aqua-Reci-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • kein organischer Restschlamman-fall 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Oxidationamittelverbrauch • sehr hohe Werkstoffanforderung
Rückgewinnung aus der Klärschlamm- asche		
BioCon-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Produktion von Düngemittel-Vorprodukten • Rückgewinnung von Fällmitteln • Verminderung des Ascheanfalls 	<ul style="list-style-type: none"> • Chemikalieneinsatz zur Phosphorrück-gewinnung • Aufarbeitung der Regeneratlösungen der Ionenaustauscher • ggf. anteilige Mehrkosten der Mono- ge-genüber der Mitverbrennung

2 Zielsetzung

Im Hinblick auf eine Phosphorrückgewinnung soll eine gezielte Rücklösung des im Schlamm gebundenen Phosphors und damit eine Aufkonzentrierung des Phosphatgehaltes im Schlammwasser erreicht werden. Der in Lösung gebrachte Phosphor kann anschließend durch Fällung gewonnen werden, um ihn als Düngemittel und für Industriezwecke einzusetzen.

Für die Rücklösung wurden zwei Verfahrensansätze geprüft:

- gezielte Hydrolyse der Polyphosphate aus dem Bio-P-Prozess
- Zellaufschluss mittels Ultraschall.

Die Erarbeitung ist in folgenden Projektstufen vorgesehen:

1. Untersuchungen an halbtechnischer Anlage (hier behandelt)
2. Untersuchungen an Container-Anlage (im Anschluss an Stufe 1)
3. Großtechnische Umsetzung (im Anschluss an Stufe 2).

In der hier dargestellten Projektstufe 1 wurde die Effektivität beider Verfahren unter verschiedenen Randbedingungen und in Abhängigkeit unterschiedlicher Einflussfaktoren untersucht. Darüber hinaus wurden Abschätzungen der Auswirkungen auf den Reinigungsprozess, das Entwässerungsverhalten und die Schlammeigenschaften sowie der Kosten vorgenommen.

Die ursprünglich im Projektantrag darüber hinaus vorgesehenen Versuche zur Fällung des rückgelösten Phosphates sowie die Auswirkungen auf das Faulverhalten wurden zu Gunsten einer wesentlichen Fragestellung, die sich im Verlauf der Projektbearbeitung ergab, zurückgestellt. Auf Grund des starken Einflusses der in den Abwasserreinigungsanlagen in der Praxis i. d. R. zusätzlich zur Bio-P-Stufe eingesetzten Simultanfällung wurde das komplette, zunächst für eine Anlage vorgesehene Versuchsprogramm zur P-Rücklösung statt an einer Anlage mit Schlamm zweier unterschiedlicher Anlagen (mit und ohne Simultanfällung) durchgeführt. Die zurückgestellten Versuche wurden für die zweite Projektstufe vorgesehen. Die Fällung wurde theoretisch betrachtet und stellt darüber hinaus den Schwerpunkt des parallel laufenden MUNLV-Vorhabens der RWTH Aachen dar.

3 Grundlagen der Phosphor-Rückgewinnung

In dem nachfolgenden Kapitel erfolgt zunächst eine kurze Darstellung der Grundlagen für die gewählten Verfahrensansätze.

3.1 Biologische Phosphat-Rücklösung

Das Prinzip der biologischen Phosphat-Rücklösung beruht im Wesentlichen auf den in einer Bio-P-Stufe einer ARA genutzten Vorgängen der Abgabe und vermehrten Aufnahme von Phosphaten durch einen Wechsel zwischen anaerober und aerober Stufe. Dabei kommt es in der anaeroben Phase zu einer Freisetzung von Phosphat. Diese Rücklösung aus dem Klärschlamm geschieht hauptsächlich über die PO_4^{3-} -Abgabe von phosphatspeichernden Mikroorganismen, z. B. der Gattung *Acinetobacter*. Diese obligat aeroben Organismen sind in anaeroben Phasen in der Lage, leicht abbaubare organische Abwasserinhaltsstoffe, die durch säurebildende, fakultativ anaerobe Bakterien gebildet werden (z. B. Acetat), in Lipidspeicherstoffe umzuwandeln.

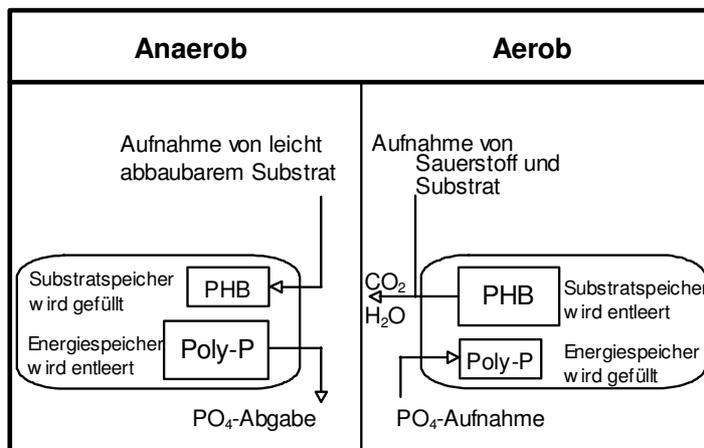


Abb. 3: Vereinfachtes Schema der anaeroben und aeroben Stoffwechselvorgänge [KLEE, 1991]

Die zur Fettsäurespeicherung nötige Energie wird durch die Spaltung von eingelagerten Polyphosphaten geliefert, wobei PO_4^{3-} in das umgebende Medium freigesetzt wird [ATV, 1996]. In der aeroben Phase wird der Polyphosphatspeicher wieder aufgefüllt, was zur P-Elimination genutzt wird (Abb. 3).

Biologische Rücklösevorgänge sind aus der Praxis insbesondere bei statischen Eindickvorgängen von Überschussschlamm bekannt. Hier gilt es jedoch zur Vermeidung von erhöhten P-Rückbelastungen die Rücklösevorgänge zu unterbinden.

Dazu wird empfohlen [ATV, 1996], die Aufenthaltszeit in statischen Voreindickern (anaerobes Milieu) auf weniger als einen Tag zu begrenzen.

Im Rahmen der Untersuchungen zur biologischen Rücklösung wurde diese Aufenthaltszeit gezielt verlängert, um maximale P-Rücklösungen zu erhalten und auszunutzen.

3.2 Ultraschallintegration

Klärschlammintegration bedeutet „Zerkleinerung“ von Klärschlamm durch die Einwirkung äußerer Kräfte, die physikalischer, chemischer oder biologischer Herkunft sein können. Durch die Einwirkung dieser Kräfte kommt es zu einer Auflösung der Flockenstruktur des Schlammes, bei ausreichendem Energieeintrag zu einem Aufschluss der im Schlamm enthaltenen Mikroorganismen [ATV, 1996].

Das Ziel einer Desintegration im Hinblick auf die Phosphorrücklösung liegt im Zellaufschluss. Dabei werden die Zellwände der Mikroorganismen zerstört, so dass ein Ausreten des Cytoplasmas in die umgebende Flüssigkeit ermöglicht wird und die intrazellulären Stoffe freigesetzt werden [CORNEL, 2002]. Tabelle 2 zeigt die verschiedenen Verfahren der Desintegration:

Tab. 2: Zellaufschlussverfahren

Physikalische Verfahren	
nicht mechanisch	mechanisch
Gefrieren	Rührwerkskugelmühle
Wärmebehandlung	Ultraschallhomogenisator
Dekompression	Hochdruckhomogenisator
osmotischer Schock	Prallstrahlverfahren
	Schwingmühle
	Strahlmühle
Chemische Verfahren	Biologische Verfahren
Behandlung mit Säuren	enzymatische Lyse
Behandlung mit Laugen	Autolyse
Zugabe von Detergentien	

Vor allem die mechanische Desintegration wird für ARA'n im Hinblick auf eine Reduzierung der Schlammmenge sowie eine höhere Gasausbeute diskutiert und teilweise bereits eingesetzt.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Desintegrationsverfahren mittels Ultraschall untersucht, das sich insbesondere wegen der sehr einfachen Handhabung für einen Einsatz auf ARA'n eignet.

Als Ultraschall wird der nicht mehr hörbare, hochfrequente Bereich ab 20 kHz bezeichnet (Abb. 4). Als wichtige Eigenschaften des Ultraschalls sind hohe Schallintensitäten, Energiedichten sowie hohe Wechseldrücke zu nennen. Für den Zellaufschluss in flüssigen Medien ist die Kavitation von hoher Bedeutung. Kavitation zeichnet sich durch die Bildung von Unterdrücken aus, die bei 20 bis 50 kHz zu Hohlräumen in der Flüssigkeit, auch Kavitationsblasen genannt, führen. Diese Kavitationsblasen wachsen an und fallen aufgrund der Einwirkung des äußeren Druckes in sich zusammen. Dieser Vorgang ist als Blasenimplosion oder auch Blasenkollaps bekannt und in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

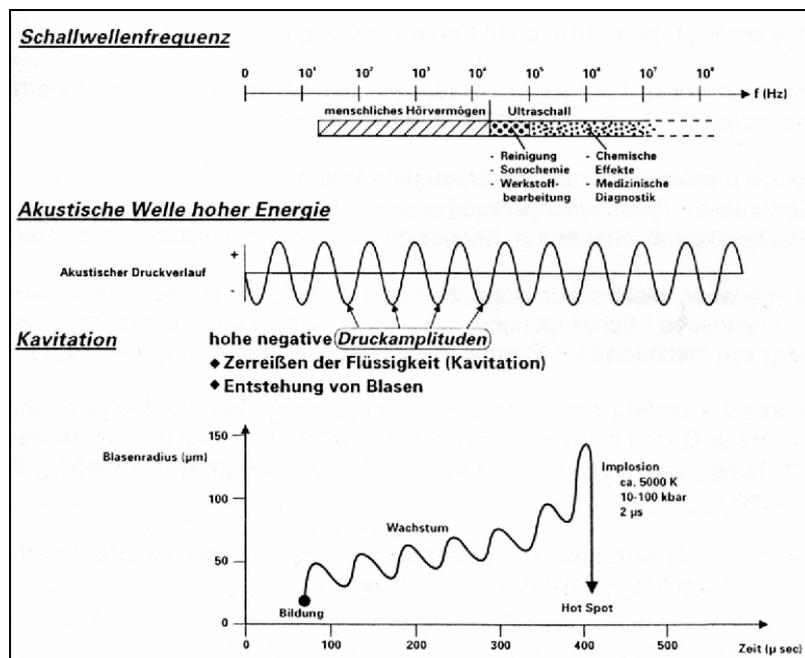


Abb. 4: Ultraschall und Kavitation [SCHNEIDER, 1998]

Diese Implosionen verursachen Temperaturspitzen, hohe Drücke und können Flüssigkeitsströme, so genannte „Jet-Streams“ erzeugen. Durch das Einwirken dieser Kräfte können die Zellmembranen der Mikroorganismen durch Scherkräfte zerstört werden.

Mit dem Freisetzen der Zellinhalte kommt es auch zur Freisetzung der gespeicherten P-Verbindungen sowie organischen und Stickstoff-Verbindungen.

Auf die Wirkung einer Ultraschall-Desintegration haben verschiedene Parameter Einfluss:

- *Höhe des Energieeintrages:* in Form der spezifischen Energie ($E_{\text{spez.}}$) [kWh/kg]. Mit steigendem Energieeintrag ist eine Erhöhung des Aufschlussgrades zu beobachten.
- *Höhe der Energie-Intensität* [W/cm^2]: definiert als das Verhältnis der Leistung des Ultraschall-Gerätes zur wirksamen Oberfläche der Sonotrode. Erhöhte Intensitäten bedeuten nicht unbedingt höhere Aufschlussgrade. Nach MÜLLER UND LEHNE gibt es für Ultraschall-Geräte ein Intensitätsoptimum, welches individuell bestimmt werden muss. Werte für die Intensität reichen in der Literatur von 1,2 über 130 bis $520 \text{ W}/\text{cm}^2$ [MÜLLER, 2000].
- *Schwingungsfrequenz:* die höchste Effizienz in Bezug auf den Zellaufschluss kann mit einer Frequenz von 20 bis 50 kHz erreicht werden [MÜLLER, 2000].

Als Maß für den Aufschlussgrad wird die CSB-Freisetzung herangezogen. Der Aufschlussgrad (A_{CSB} bzw. A_s in %) ist nahezu linear abhängig von der eingesetzten Energie (Abb. 5).

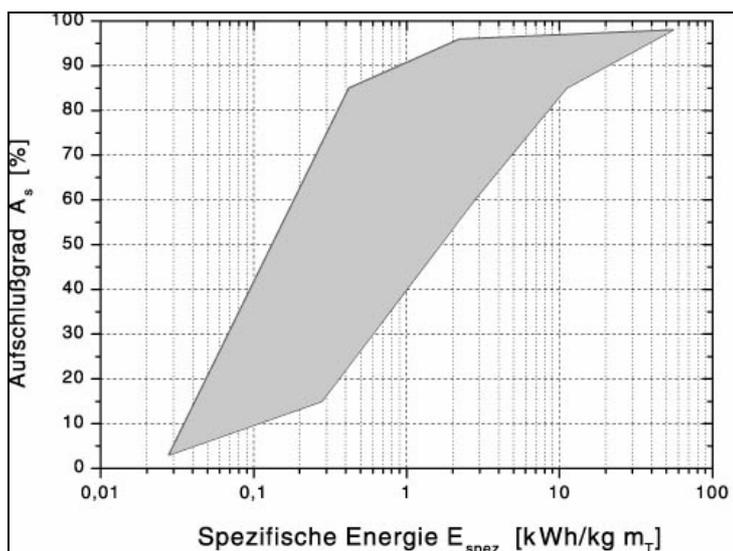


Abb. 5: Notwendiger Energieeintrag [ATV, 1996]

Der Energieeintrag im Rahmen des Projektes wurde in einem Bereich von 1,8 bis ca. 25 kWh/kg m_T variiert.

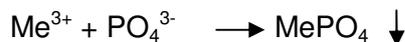
3.3 P-Elimination aus dem Schlammwasser durch Fällungsprozesse

Im Rahmen der hier vorgestellten Projektstufe wurde die Fällung des gelösten Phosphates theoretisch betrachtet, aber nicht in der Praxis getestet.

Bei der chemischen P-Fällung wird Phosphat durch eine chemische Reaktion in einen unlöslichen Stoff (z. B. Eisen(III)Phosphat) überführt, der dann ausfällt. Organische Phosphorverbindungen sowie Polyphosphate können nicht gefällt werden. Diese Stoffe werden jedoch z. T. durch physikalische Flockungsvorgänge (Adsorptionsprozesse) aus dem Abwasser mit entfernt.

Als Fällungskemikalien werden im Wesentlichen Metallsalze (z. B. Eisen(III)-chlorid, Eisen(II)-chlorid, Aluminiumchlorid oder Aluminiumsulfat) bzw. Kalkprodukte (z. B. Kalkstein¹, Weißfeinkalk¹, Wasserfeinkalk¹ oder Kalkmilch) verwendet.

Durch Zudosierung der Metallsalze erfolgt ein Anionenaustausch. PO_4^{3-} lagert sich an das Metall-Kation nach folgender Reaktionsgleichung an:



Die Metallsalz-Anionen, wie beispielsweise Cl^- oder SO_4^{2-} , gehen in Lösung. Fe^{2+} erlangt seine Wirkung nur bei Zugabe in sauerstoffreiches Abwasser, so dass eine Oxidation zu dreiwertigem Eisen stattfinden kann. In der Praxis wird es in den belüfteten Sandfang oder in das Belebungsbecken dosiert. Somit werden vergleichbare Resultate wie mit Fe^{3+} erreicht.

Die Löslichkeit des Metallphosphates ist vom pH-Wert abhängig. Bei Eisenphosphaten liegt die geringste Löslichkeit im pH-Bereich zwischen pH 5,0 und 5,5, bei AlPO_4 im Bereich von pH 6,0 bis 7,0.

Bei der Fällung mit Calcium sind verschiedene Reaktionen bekannt. Als wichtigste Fällungsprodukte sind zu nennen:

- Hydroxylapatit
 $5\text{Ca}^{2+} + 3\text{PO}_4^{3-} + \text{OH}^- \rightarrow \text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$
- Calciumcarbonat
 $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$

Da Calcium in den meisten Abwässern ausreichend vorhanden ist, wird durch die Zudosierung von Kalkhydrat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ keine Aufkonzentrierung von Ca^{2+} beabsichtigt, sondern vielmehr eine Erhöhung des pH-Wertes. Die Kalkhydratfällung verläuft bei einem pH-Wert um 12; eine Neutralisierung des Ablaufs ist daher notwendig.

Je nach Ort und Stelle der Zudosierung werden folgende Verfahren unterschieden:

- Vorfällung:
Zudosierung vor dem Vorklärbecken (VKB), P-Entfernung ca. 70 %
- Simultanfällung:
Zudosierung in die biologische Stufe (vor dem Belebungsbecken, vor dem Nachklärbecken oder in den Rücklaufschlammstrom); P-Entfernung ca. 80 %
- Nachfällung:
Zugabe nach dem Nachklärbecken (NKB) in einem separaten Becken; P-Entfernung über 80 %
- Flockungsfiltration:
als Sonderform der Nachfällung; P-Entfernung über 95 % [HOSANG, BISCHOF, 1998].

Die folgende Abbildung zeigt die Möglichkeiten der Phosphatfällung in der Verfahrenstechnik einer kommunalen Abwasserreinigungsanlage.

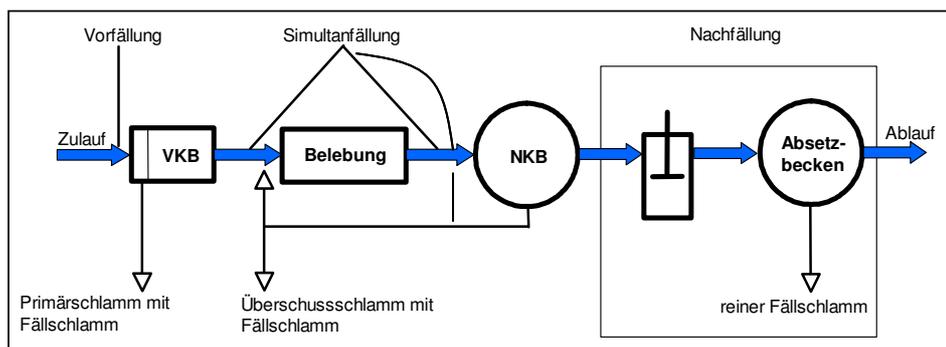


Abb. 6: Mögliche Einsatzorte einer Fällungsstufe

Die Simultanfällung stellt die am weitesten verbreitete Verfahrenstechnik zur chemischen Phosphorelimination dar.

¹ wird jeweils auf der ARA zu Kalkmilch aufgelöst

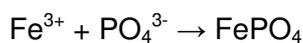
Das gefällte Phosphat kann für eine Wiederverwertung als Düngemittel oder zur Weiterverarbeitung in der Phosphorindustrie dienen. Beide Verwendungszwecke stellen unterschiedliche Bedingungen an den Nährstoff. Hinsichtlich des Reinheitsgrades sind beispielsweise die Anforderungen beim Einsatz in der Lebensmittelindustrie höher (> 99 %) als bei der Verwendung als Düngemittel.

Um z. B. als Düngemittel verarbeitet zu werden, werden folgende Ansprüche erhoben:

- Der P-Gehalt des Produktes muss mindestens 5 % betragen,
- das Produkt muss in pflanzenverfügbarer Form vorliegen,
- die Grenzwerte für Schwermetallgehalte und sonstige Schadstoffe müssen eingehalten werden.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Fällschlämme aufgelistet und deren Verwertbarkeit für Landwirtschaft und Industrie dargestellt.

- *Eisenphosphate*



Eisenphosphate finden in der Phosphorindustrie kaum Verwendung. Der Nutzen als Düngemittel ist in der Literatur umstritten [BUER, RECKTENWALD, 2001].

- *Aluminiumphosphat*

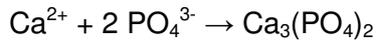
AlPO_4 kann nur durch den Einsatz thermischer Verfahren in der Phosphorindustrie verwendet werden [JASINSKI, 2002].

- *Struvit (MAP)*



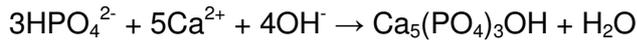
Struvit findet in der P-Industrie kaum Verwendung, wohl aber als sich langsam lösendes Düngemittel [BRETT, 1997, ROELEVELD, 2001, JEANMAIRE, 2001]. Die Kristallisation von MAP kann unter bestimmten Voraussetzungen auf natürliche Weise in der Abwasserreinigungsanlage ablaufen. Vor allem in Anlagen, in denen biologische und chemische P-Elimination gemeinsam stattfindet, können durch hohe P- und Mg-Konzentrationen im Schlamm, in Verbindung mit hohen NH_4 -Konzentrationen im System, Ausfällungen auftreten; dieser kann zu Verkrustungen in Leitungen und Wärmetauschern führen.

- *Calciumphosphat*



Calciumphosphat ist nahezu wasserunlöslich und ist als Dünger ohne Weiterbehandlung höchstens für sehr saure Böden verwendbar. Es ist aber nahezu identisch mit den beim Erzabbau gewonnenen Phosphaten; eine Verwendung in der P-Industrie ist daher möglich [ROELEVELD, 2001].

- *HAP (Hydroxylapatit)*



HAP ist schwer wasserlöslich. Es kann nach anschließender Behandlung, solange die Grenzwerte für Schwermetall- und Schadstoffgehalte nicht überschritten werden, als Düngemittel eingesetzt werden [BRETT, 1997].

- *Phosphorsäure (H_3PO_4)*

Phosphorsäure ist je nach Konzentration in der Industrie wieder verwendbar [SCHAUM, 2002].

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich Kalkhydrat als Fällmittel zur P-Rückgewinnung eignet, da der anfallende Schlamm als Düngemittel oder als industrieller Rohstoff verwertet werden kann. Metallsalze eignen sich dagegen nur bedingt zur Wiederverwertung, wobei Aluminiumphosphat zur weiteren Nutzung aufbereitet werden muss und Eisenphosphate als Düngemittel bisher umstritten sind. Ein Einsatz von Magnesiumoxid wird an der RWTH Aachen erforscht.

4 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen wurden im halbtechnischen Maßstab über einen Zeitraum von zwölf Monaten am Standort einer kommunalen ARA durchgeführt. Da die zu testenden Verfahren i. W. auf den in den Zellen vorliegenden Phosphor ausgerichtet sind, bei Bio-P-Anlagen aber in der Praxis i. d. R. zusätzlich eine Simultanfällung praktiziert wird, wurden bei den Versuchen Schlämme aus zwei unterschiedlichen Abwasserreinigungsanlagen (Anlagen mit und ohne Simultanfällung) eingesetzt. Die wesentlichen Kenngrößen der betreffenden Anlagen sind in Kap. 4.2 dargestellt.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen.

Tab. 3: Überblick über die durchgeführten Versuche

Untersuchungen:	Einflüsse:
biologische Rücklösung	Verweilzeit
	Temperatur
	Substratzugabe
	TS-Gehalt
	Simultanfällung
Ultraschall- desintegration	Beschallungsdauer
	Intensität
	TS-Gehalt
	Simultanfällung
Verfahrens- kombinationen	Biologische Rücklösung vor Desintegration
	Desintegration vor biologischer Rücklösung
	Desintegration und biologische Rücklösung im Kreislaufbetrieb

4.1 Beschreibung der halbtechnischen Versuchsanlage

Für die biologische Rücklösung wurden zwei beheizbare, mit einem Rührwerk ausgestattete Reaktoren aus nichtrostendem Stahl (Fassungsvermögen 120 Liter) als Rücklösereaktoren eingesetzt (Abb. 7). Zusätzlich wurden einige Versuchsreihen im Technikummaßstab in vergleichbaren Reaktoren mit 10 Liter Fassungsvermögen ergänzt.

Der Überschussschlamm wurde jeweils über die Verweildauer von ca. 1 Woche unter anaeroben Bedingungen gehalten und die induzierte Rücklösung über den zeitlichen Verlauf ermittelt. Während der Standzeit erfolgte keine Durchmischung der Reaktoren, da Vorversuche ergaben, dass dadurch keine Steigerung der Rücklösung erzielt werden kann. Lediglich vor einer Probenahme wurde der Reaktorinhalt zwei Minuten durchmischt, da sich durch das Absetzen des Schlamms ein Feststoff- und P-Profil ausbildet [JARDIN, 1995].

Als mögliche Einflussgrößen der biologischen Rücklösung wurden folgende Parameter getestet und variiert:

- Verweilzeit
- Temperatur
- Zugabe einer externen Kohlenstoffquelle
- TS-Gehalt
- Simultanfällung.



Abb. 7: Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen zur Behandlung der Schlämme durch Ultraschall wurde der Ultraschalldesintegrator UIP 2000 der Firma Dr. Hielscher GmbH eingesetzt (Abb. 8).



Abb. 8: Ultraschalldesintegrator UIP 2000

Er besteht i. W. aus einem Schallwandler inkl. Sonotrode und einem Generator, die räumlich getrennt und über Kabel miteinander verbunden sind. Der Schallwandler hat eine Leistung von 2.000 W. Eine Leistungsregelung kann über die Amplitudenmodulation im Bereich von 50 bis 100 % erfolgen. Die Frequenz der eingesetzten Desintegration liegt bei 20 kHz, wodurch besonders starke Kavitationen hervorgerufen werden können. Als Sonotrode wurde eine Blocksonotrode mit einem Durchmesser von 55 mm gewählt, da bei kleineren Abstrahlflächen und gleicher Leistung der Desintegrationsstufe die Intensität der Desintegration (Leistung pro Fläche) ansteigt. Das Durchflussgefäß war schalldämmend und ohne Kühlung ausgestattet.

Die Beschallung erfolgte im Durchfluss bei unterschiedlichen Durchflussraten, wobei eine erhöhte Beschallungsdauer durch Kreislaufbetrieb simuliert wurde.

Für die Versuche zur Ultraschall-desintegration wurden folgende Einflussgrößen untersucht:

- Beschallungsdauer
- Ultraschallintensität (Amplitude von 50 % bis 100 % stufenlos einstellbar)
- TS-Gehalt
- Simultanfällung.

Neben der getrennten Betrachtung der beiden Verfahren wurde als erweitertes Verfahrenskonzept zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm eine Kombination aus anaerober Phosphor-Rücklösung in Verbindung mit kurzzeitiger Desintegration untersucht.

Zusätzlich erfolgten Versuche zum Einfluss auf die Rückbelastung der ARA sowie zum Einfluss der Beschallungsdauer auf das Absetzverhalten des Überschussschlammes.

4.2 Beschreibung der Abwasserreinigungsanlagen

ARA ohne Simultanfällung

Bei der ARA ohne Simultanfällung handelt es sich um eine Anlage mit einem Einwohnerwert von etwa 25.000 Einwohnern mit intermittierender Nitrifikation / Denitrifikation, biologischer P-Elimination im Hauptstrom.

Die derzeitige Schlammbehandlung basiert auf einer anaeroben Schlammstabilisierung. Der in der Vor- bzw. Nachklärung anfallenden Primär- bzw. Überschussschlamm wird maschinell voreingedickt. Im Faulbehälter erfolgt die Stabilisierung des Rohschlammes bei mesophiler Betriebsweise. Der stabilisierte Schlamm wird anschließend naheingedickt und in einer Zentrifuge entwässert. Das anfallende Schlammwasser wird dosiert der Abwasserbehandlung wieder zugeführt.

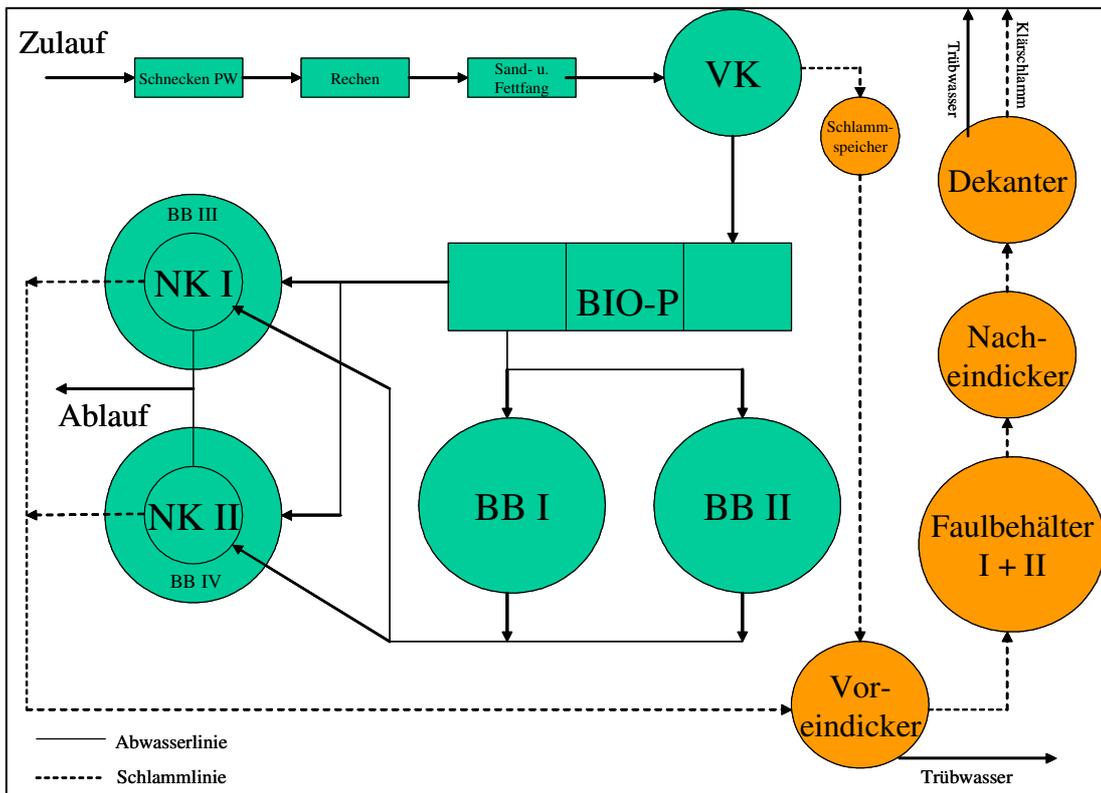


Abb. 10: Fließbild der ARA mit Simultanfällung

Die ARA mit Simultanfällung ist bezogen auf den Einwohnerwert doppelt so groß wie die ARA ohne Simultanfällung, kann aber dennoch als überwiegend kommunale ARA (ohne wesentlichen industriellen Anteil) angesehen werden. Die Abwasserzusammensetzungen beider Anlagen sind damit vergleichbar. Deutliche Unterschiede bestehen insbesondere im Überschussschlammabzug. Bei der ARA ohne Simultanfällung wird der ÜSS direkt aus dem Nachklärbecken, bei der ARA mit Simultanfällung zusammen mit dem Primärschlamm aus dem Vorklärbecken abgezogen. Die TS-Gehalte des ÜSS beider Anlagen sind jedoch mit 0,5 bis 0,6 % vergleichbar. Bei beiden Anlagen erfolgte die Probenahme direkt im Ablauf des NKB.

Da sich der Standort der Versuchsanlage auf der ARA mit Simultanfällung befand, wurde der ÜSS der ARA ohne Simultanfällung zu dieser Anlage transportiert. Während des Transportes von ca. ein bis zwei Stunden war eine biologische Reaktion des Schlammes (insbesondere eintretende Rücklösevorgänge) nicht auszuschließen (siehe Kap. 5).

Die folgende Tabelle stellt die wesentlichen Kenngrößen beider Abwasserreinigungsanlagen gegenüber.

Tab. 4: Wesentliche Kenngrößen der Abwasserreinigungsanlagen

Parameter	ARA ohne Simultanfällung	ARA mit Simultanfällung	Einheit
Einwohnerwert	25.000	50.000	E
Zulaufmenge (ggf. Ablauf)	1.277.500	3.360.000	m ³ /a
Primärschlammmenge ²	5.500	28.000	m ³ /d
Rücklaufschlammmenge	1.892.160	5.560.000	m ³ /a
Überschussschlammmenge	63.900	72.000	m ³ /a
Überschussschlammabzug aus Vorklärung	nein	ja	-
Denitrifikation	vorgeschaltet	intermittierend	-
Schlammalter	15	12	d
BSB ₅ - Raumbelastung	0,27	0,16	kg/(m ³ ·d)
BSB ₅ - Schlammbelastung	0,08	0,05	kg/(kg·d)
Schlammvolumen	500	470	ml/l
TS-Gehalt Belebung	3,4	3,2	g/l
TS-Gehalt ÜSS	0,6	0,5	%
Anzahl Vorklärbecken ³	1	1	-
Volumen Vorklärbecken	250	740	m ³
Anzahl Bio-P-Becken	1	2	-
Volumen Bio-P-Becken	325	1.830	m ³
Anzahl Belebungsbecken	4	4	-
Volumen Belebung	4.900	11.000	m ³
Anzahl Nachklärbecken	1	2	-
Volumen Nachklärung	3.310	3.190	m ³
Oberfläche Nachklärung	k. A.	700	m ²
Art der Voreindickung	maschinell	statisch	
Art der Nacheindickung	statisch	statisch	
Anzahl Voreindicker	0	1	-
Volumen Voreindicker	0	190	m ³
Anzahl Nacheindicker	1	1	-
Volumen Nacheindicker	85	190	m ³
TS-Gehalt nach Voreindickung	-	3,5	%
P _{ges.} -Konzentration Trübwasser	-	15	mg/l
P _{ges.} -Konzentration Zulauf	9,0	9,0	mg/l
P _{ges.} -Konzentration Ablauf	0,3	0,3	mg/l

² Gemisch aus Primär- und Sekundärschlamm, da Überschussschlamm in die Vorklärung eingeleitet wird

³ Ein zusätzliches Vorklärbecken wird derzeit nicht genutzt

4.3 Schlammqualitäten des eingesetzten Überschussschlammes

Die Schlammqualitäten der eingesetzten Überschussschlämme unterscheiden sich in den betrachteten Summenparametern sowie Ammonium und Nitrat ebenfalls nur unwesentlich. In Tabelle 5 sind die Mittelwerte der wesentlichen Parameter sowie die Schwankungsbereiche aus den Versuchsreihen dargestellt.

Tab. 5: Schlammqualität des eingesetzten Überschussschlammes

Parameter		ARA ohne Simultanfällung	ARA mit Simultanfällung
Überschussschlamm			
TS [%]	min:	0,5	0,4
	mittel:	0,6	0,5
	max:	0,7	0,7
CSB [g/kg TS]	min:	200	537
	mittel:	560	840
	max:	1.000	1.300
P _{ges.} [g/kg TS]	min:	28	30
	mittel:	35	35
	max:	39	42
Überschussschlamm, filtrierte Probe			
CSB [mg/l]	min:	51	26
	mittel:	67	46
	max:	85	59
P _{gel.} [mg/l]	min:	0,51	0,02
	mittel:	2,2	0,74
	max:	5,0	4,1
N _{ges.} [mg/l]	min:	-	2,30
	mittel:	<20	2,35
	max:	-	2,40
NH ₄ -N [mg/l]	min:	-	0,43
	mittel:	<2	0,69
	max:	-	0,95
NO ₃ -N [mg/l]	min:	-	-
	mittel:	<5	<5
	max:	-	-

Unterschiede bestehen insbesondere in der Bindungsform des vorliegenden Phosphates. Während bei der ARA ohne Simultanfällungsstufe das Phosphat zum größten Teil als in der Zelle eingelagertes Polyphosphat vorliegt, ist es im Überschussschlamm der ARA mit Simultanfällung zusätzlich chemisch über das Fällmittel gebunden.

4.4 Versuchsbegleitende Analytik

Während der Untersuchungen wurden folgende Parameter der Originalprobe (unfiltrierter, der biologischen Rücklösung bzw. der Desintegration zugeleiteter Überschuss- o-

der Primärschlamm) sowie der filtrierten Probe (0,45 µm) vor und nach der jeweiligen Behandlung bestimmt.

Tab. 6: Versuchsbegleitende Analytik

Parameter	Dim.	Verfahren
Temperatur	°C	In-situ
pH-Wert	-	In-situ
Sauerstoff _{gelöst}	mg/l	In-situ
TS	g/l oder %	DIN 38409 H 1-1
CSB	mg/kg mg/l	DIN 38409 H 41-1 photometrisch
CSB _{Laugenaufschluss}	mg/l	ATV-Arbeitsbericht AK 1.6 ⁴ photometrisch
N _{ges}	mg/kg mg/l	DIN ISO 11261 photometrisch
NH ₄ -N	mg/l	photometrisch
NO ₃ -N	mg/l	photometrisch
P _{ges.}	mg/kg mg/l	DIN EN 1189 Pkt. 6/7 photometrisch
PO ₄ -P	mg/l	photometrisch

Die Beprobung des unbehandelten Schlammes erfolgte bei biologischer Rücklösung ein mal vor Versuchsbeginn, bei Desintegrationsversuchen angepasst an die Beschallungsdauer ein bis vier mal pro Versuchsdurchführung.

Die Beprobung des behandelten Schlammes erfolgte bei biologischer Rücklösung täglich, bei Desintegrationsversuchen jeweils nach der zu untersuchenden Beschallungsdauer.

⁴ Verfahren und Anwendungsgebiete der mechanischen Klärschlammesintegration [KA 4/00]

5 Darstellung der Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der biologischen P-Rücklösung

Die in Kapitel 5.1 dargestellten Untersuchungen konzentrieren sich auf das biologische Rücklöseverhalten in einem Rücklösereaktor. Hierbei soll der in Form von Polyphosphat in den Zellen des ÜSS gebundene Phosphor (erhöhte P-Aufnahme erfolgt durch Bio-P-Stufen der jeweiligen ARA´n) wieder in Lösung gebracht werden, indem der ÜSS anaeroben Bedingungen ausgesetzt wird.

Die nachfolgende Darstellung der erzielten P-Rücklösung unterteilt sich anhand folgender Einflussfaktoren:

- Verweilzeit
- Temperatur
- Substratzugabe
- TS-Gehalt
- Simultanfällung

Die Ergebnisse werden jeweils für die untersuchten Schlammarten (ÜSS der ARA ohne und mit Simultanfällung) dargestellt.

Im ÜSS der beiden untersuchten ARA´n lag die Nitrat-Konzentration in allen untersuchten Proben in einem niedrigen Bereich (siehe Tab. 5), so dass eine hemmende Wirkung ausgeschlossen werden konnte (Voraussetzung für biologische Rücklösung: kein Sauerstoff, auch nicht in gebundener Form als NO_3^-).

Der Erfolg der Behandlung im Hinblick auf eine möglichst umfangreiche P-Rückgewinnung wird im Folgenden an Hand folgender Kriterien dargestellt:

- Konzentration an gelöstem Phosphat: $P_{\text{gel.}}$ [mg/l] (ermittelt als $P_{\text{ges.}}$ der filtrierten Probe)
- max. P-Rückgewinnungspotential: $P_{\text{gel.}}$ [%] von $P_{\text{ges.}}$ (Anteil der maximal in Lösung gebrachten $P_{\text{gel.}}$ -Konzentration bezogen auf den $P_{\text{ges.}}$ -Gehalt des Schlammes)

Die Verläufe der Konzentrationen beschreiben hierbei die tatsächlichen, nach einer bestimmten Verweilzeit in den Rücklösereaktoren gemessenen gelösten Konzentrationen.

Das maximale Rückgewinnungspotential beschreibt damit das gesamte in Lösung gebrachte Phosphat. Die nachfolgenden Verfahrensschritte, wie die anschließende Entwässerung sowie die zur Rückgewinnung des Phosphors notwendige Fällungsstufe (z. B. MAP-Fällung, Wirkungsgrad ca. 70 %) sind mit Verlusten verbunden, so dass die in der Praxis erreichbare Phosphorrückgewinnung um etwa 35 bis 40 % niedriger als die dargestellten Rückgewinnungspotentiale liegen.

5.1.1 Einfluss der Verweilzeit

Die biologische P-Rücklösung ist als biologischer Prozess u. a. abhängig von der Verweilzeit des ÜSS unter anaeroben Bedingungen. Die festgestellten optimalen Verweilzeiten (Dauer bis zur maximalen $P_{\text{gel.}}$ -Konzentration) lagen im Mittel im Bereich von drei bis vier Tagen, wobei sich aufgrund der o. g. vielfältigen Einflussfaktoren Abweichungen zum Durchschnittswert ergaben. Geringere Verweilzeiten von etwa zwei Tagen wurden vereinzelt bei ÜSS der ARA mit Simultanfällung festgestellt. Eine Verkürzung ergab sich insbesondere bei vorhergehender Ultraschallbehandlung. Im Folgenden wird auf die Verweilzeit unter den jeweiligen Randbedingungen noch mal eingegangen.

5.1.2 Einfluss der Temperatur

Da bei biologischen Prozessen häufig eine Temperaturabhängigkeit vorliegt, wurden die Rücklöseversuche unter folgenden Temperaturbedingungen durchgeführt:

- psychrophil (untemperiert)
- mesophil (35 °C, im Hinblick auf mögliche Faulraumtemperatur)
- thermophil (55 °C, im Technikumsmaßstab)

ARA ohne Simultanfällung

Das folgende Diagramm stellt den Verlauf der biologischen Rücklösung von Phosphat im ÜSS der ARA ohne Simultanfällung in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit bei mesophiler Betriebsweise im Vergleich zur untemperierten Variante dar.

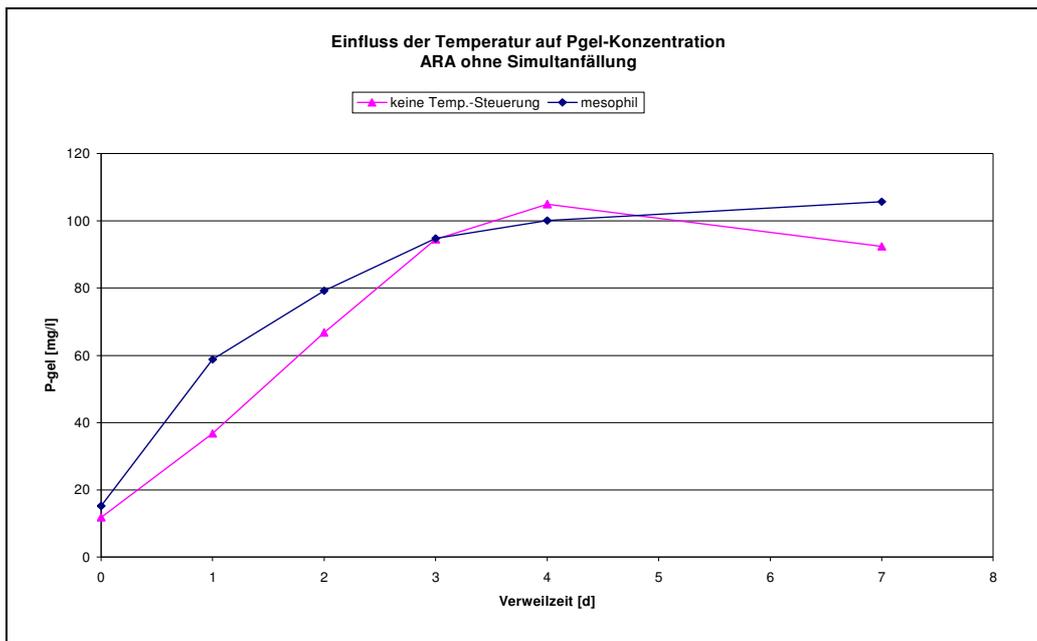


Abb. 11: Verlauf der P_{gel}-Konzentrationen bei unterschiedlichen Temperaturen (ARA ohne Simultanfällung)

Mit zunehmender Verweildauer stieg die Phosphat-Konzentration auf ca. 100 mg/l an, wobei das Maximum nach ca. vier Tagen erreicht wurde. Bei mesophiler Betriebsweise erfolgte zu Beginn eine schnellere Rücklösung, die Endkonzentrationen lagen jedoch im gleichen Bereich.

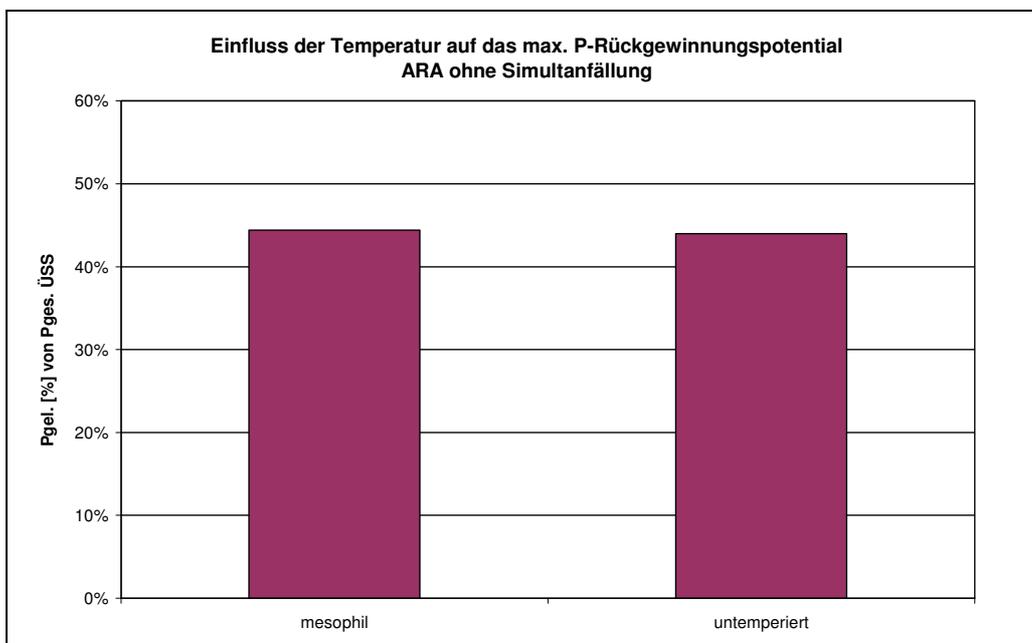


Abb. 12: Maximales P-Rückgewichtungspotential in Abhängigkeit von der Temperatur (ARA ohne Simultanfällung)

Das maximale Rückgewinnungspotential, berechnet mit der max. P_{gel} -Konzentration von 10 mg/l und bezogen auf den P-Gehalt des Schlammes, lag bei den Betriebsweisen im Bereich von 44 %, was nach einer Eindickung auf einen TS-Gehalt von 5 % etwa 0,23 kg P/(E•a) entspricht. Bezieht man die Rückgewinnung auf den TS-Gehalt des ÜSS, lag die P-Rückgewinnung bei ca. 12,9 g P/kg TS.

Aufgrund der vergleichbaren Rücklösekonzentrationen bei Betrieb der Reaktoren ohne Temperatursteuerung (die Temperatur des ÜSS lag hier bei etwa 15°C) sowie bei mesophilen Betrieb wurde im Technikum des INFA als Vergleich neben einem Reaktor ohne Temperatursteuerung und einem mesophil betriebenen Reaktor zusätzlich ein thermophiler Rücklösereaktor betrieben. Die Versuche erfolgten parallel in drei 10-Liter-Reaktoren.

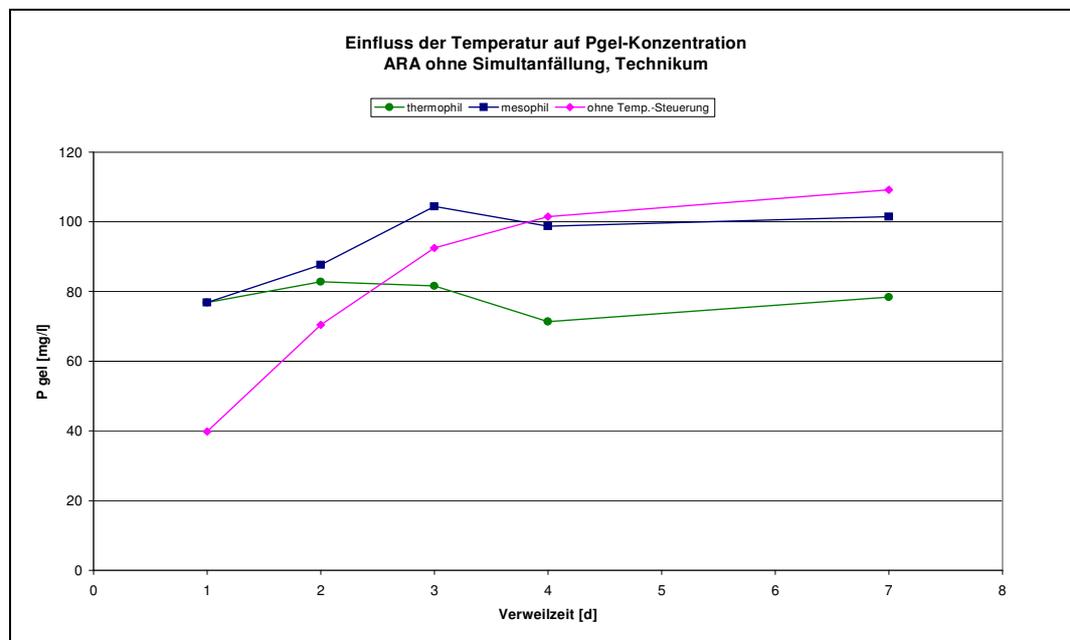


Abb. 13: Verlauf der P_{gel} -Konzentrationen bei unterschiedlichen Temperaturen (ARA ohne Simultanfällung), Technikumsversuch

Die Versuchsergebnisse bestätigten die im halbtechnischen Maßstab gewonnenen Erkenntnisse. Sowohl die Konzentrationen des Filtrats des untemperierten als auch des mesophilen Reaktors lagen nach einer Verweilzeit von etwa vier Tagen mit ca. 100 mg/l auf einem Niveau (vgl. Abb. 11). Die in den Proben des thermophilen Reaktors gemessenen Konzentrationen blieben mit ca. 80 mg/l i. W. konstant. Die hohen Anfangsgehalte der temperierten Variante sind auf bereits während des Transportes sowie der Erwärmungsphase stattfindende Rücklöseprozesse zurückzuführen.

ARA mit Simultanfällung

Abbildung 14 stellt analog zur Abbildung 11 den Verlauf der biologischen Rücklösung in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit mit ÜSS der ARA mit Simultanfällung dar.

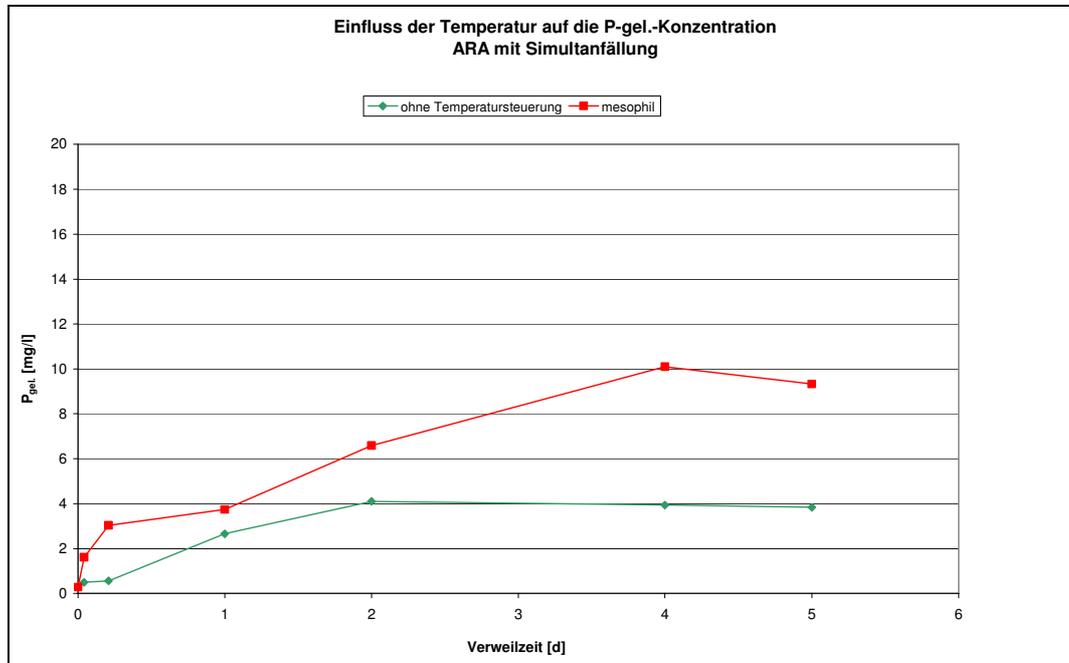


Abb. 14: Verlauf der P_{gel} -Konzentrationen bei unterschiedlichen Temperaturen (ARA mit Simultanfällung)

Bei mesophiler Betriebsweise des Rücklösereaktors lag die Phosphat-Konzentration im Vergleich zur untemperierten Betriebsweise nach einer Verweilzeit von ca. vier Tagen mit ca. 10 mg/l um den Faktor 2,5 über dem Vergleichswert von ca. 4 mg/l. Analog zum ÜSS der ARA ohne Simultanfällung war ein schnellerer Anstieg der Konzentration bei mesophiler Betriebsweise zu verzeichnen.

Die im Filtrat gemessenen Phosphat-Konzentrationen lagen jedoch – wie auch in den nachfolgenden Versuchsreihen - deutlich unterhalb der bei der ARA ohne Simultanfällung festgestellten Konzentrationen. Dies spiegelt sich insbesondere bei einem Vergleich des Rückgewinnungspotentials wider. Vergleich man Abbildung 15 mit Abbildung 12 wird deutlich, dass das P-Rückgewinnungspotential bei nur etwa 10 % einer vergleichbaren Anlage ohne Simultanfällung und mit ca. 650 kg P/a bei etwa 2 % der jährlichen Phosphat-Zulaufkraft lag (ca. 30.250 kg/a). Auf den direkten Vergleich in Bezug auf die beiden Schlammarten (mit / ohne P-Fällung) wird in Kap. 6 nochmals eingegangen.

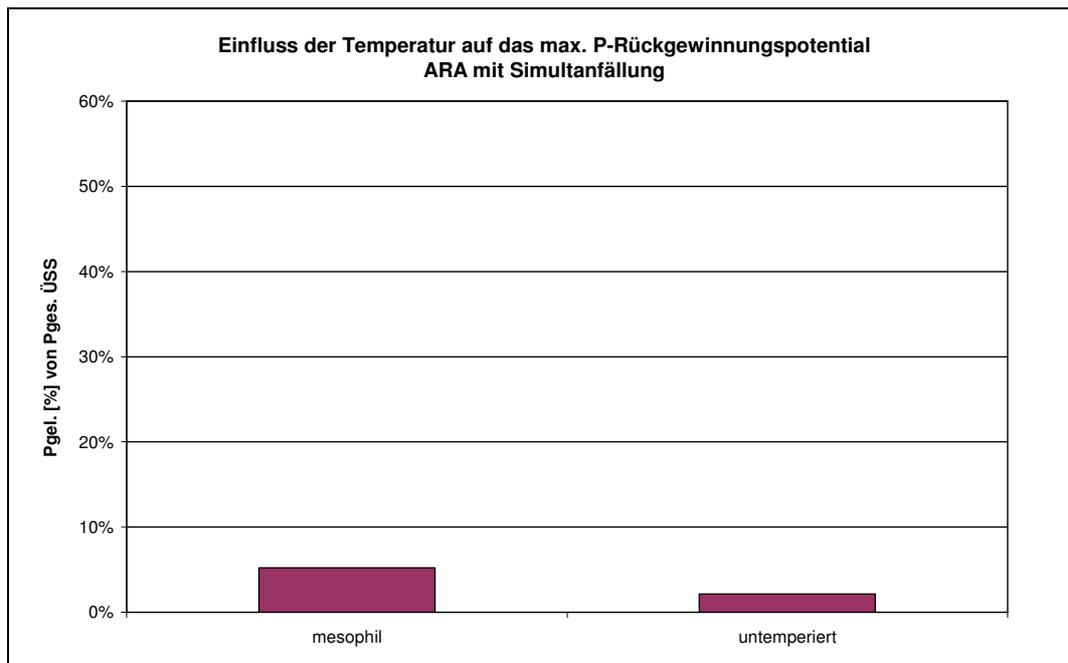


Abb. 15: Maximales P-Rückgewinnungspotential in Abhängigkeit von der Temperatur (ARA mit Simultanfällung)

Bei der Betriebsweise der Reaktoren ohne Temperatur-Steuerung lagen sowohl die absoluten Konzentrationen als auch Rückgewinnungspotential unter 50 % der bei mesophiler Betriebsweise erzielten Werte.

Zum Einfluss der Temperatur auf die biologische Rücklösung kann abschließend festgehalten werden, dass

1. bei mesophilen Verhältnissen ein schnellerer Umsatz des in den Zellen gespeicherten Phosphors erfolgte,
2. in Bezug auf die erreichten Maximalwerte der Rücklösung nur teilweise (hier insbesondere bei der ARA mit Simultanfällung) eine Steigerung bewirkt wurde.

Die nachfolgenden Untersuchungen erfolgten alle unter mesophilen Bedingungen, wodurch gleichzeitig eine erhöhte Vergleichbarkeit auf Grund auszuschließender Temperaturschwankungen gewährleistet wurde.

5.1.3 Einfluss einer Substratzugabe

Gemäß der biologischen Vorgänge (vgl. Kap. 3) sind die Prozesse der P-Bindung und –Freisetzung substratabhängig. In der Literatur [JARDIN, 1995] wird auch eine durch Zugabe von externen Kohlenstoffquellen gesteigerte Rücklösegeschwindigkeit als auch eine gesteigerte Rücklöserate von Phosphor erwähnt. In verschiedenen Versuchsreihen wurde daher auch dieser Möglichkeit der Einflussnahme auf die P-Rückgewinnung nachgegangen.

In Technikumsversuchen konnte durch Zugabe von Natriumacetat als zusätzliche C-Quelle eine Steigerung der P-Rücklösung nachgewiesen werden.

Im halbtechnischen Maßstab wurde ausschließlich jeweils der in der jeweiligen ARA anfallende Primärschlamm als zusätzliche Substratquelle eingesetzt, wobei es sich bei dem Schlamm der ARA mit Simultanfällung um eine Mischung aus Überschussschlamm und klassischem Primärschlamm handelt, da der Schlammabzug gemeinsam im Vorklärbecken stattfindet.

ARA ohne Simultanfällung

Um den Effekt einer Substratzugabe zu verdeutlichen, wurden für die ARA ohne Simultanfällung Rücklöseprozesse mit einem zudosierten Primärschlammanteil von 0 %, 25 % und 50 % untersucht. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei Umsetzung der Versuchsanlage in die Großtechnik auf der betrachteten ARA aufgrund der anfallenden Primär- und Sekundärschlammengen (vgl. Tab. 4) ein maximaler Primärschlammanteil von etwa 8 % erreicht werden kann. Dieser Wert liegt im Bereich von Literaturangaben.

Folgende Anteile an Primär- und Sekundärschlamm wurden eingesetzt:

Tab. 7: Primärschlamm dosierung bei der Substratzugabe

Primärschlamm dosierung	Überschussschlamm	Primärschlamm
	[% → Liter pro 120 l]	[% → Liter pro 120 l]
0 %	100 % → 120 l	0 % → 0 l
25 %	75 % → 90 l	25 % → 30 l
50 %	50 % → 60 l	50 % → 60 l

Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Versuchsreihe ohne Substratzugabe (0 % Primärschlamm) aufgrund der Reaktorenanzahl mit einer Zeitverzögerung von einer

Woche durchgeführt wurde. Die mögliche unterschiedliche ÜSS-Zusammensetzung bei beiden Versuchsansätzen kann ggf. Unterschiede in der biologischen Rücklösung bedingen.

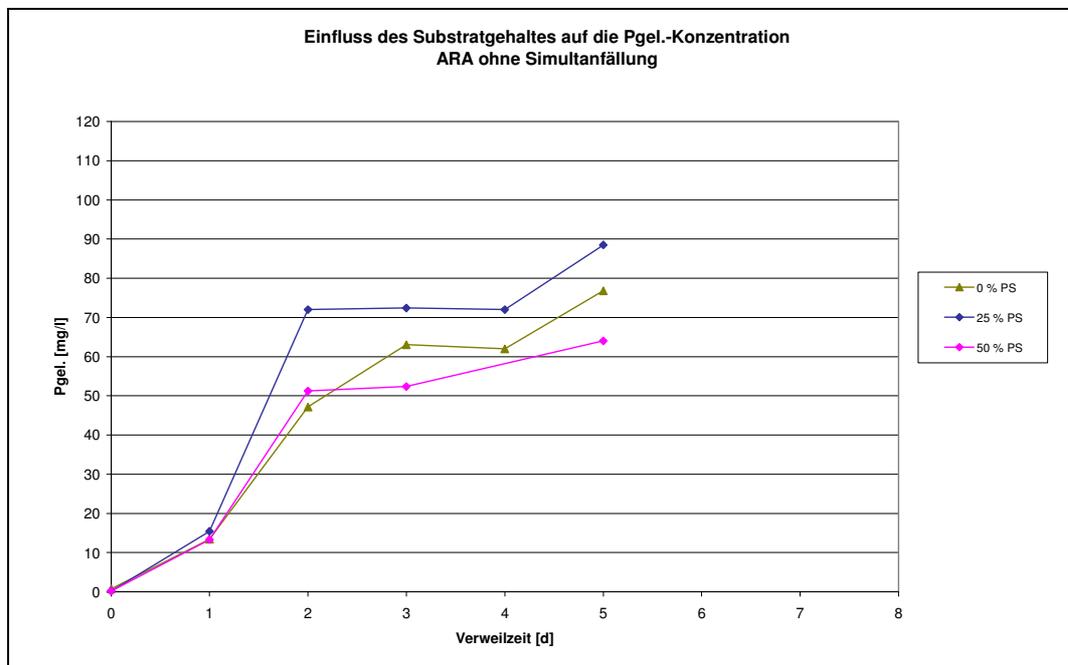


Abb. 16: Verlauf der P_{gel} -Konzentrationen bei unterschiedlicher Primärschlammzugabe (ARA ohne Simultanfällung)

Die maximal gelösten Phosphat-Konzentrationen lagen in allen drei Versuchsansätzen im Bereich von 75 bis 90 mg/l, wobei die Phosphatkonzentration bei einer Primärschlammzugabe von 25 % schneller anstieg und auch die höchste Maximalkonzentration aufwies.

Der im Primärschlamm enthaltene Phosphor ist überwiegend organisch gebunden bzw. liegt partikulär vor und steht damit nicht für eine biologische Rücklösung zur Verfügung. Bei Zugabe von Primärschlamm als Substrat ist damit in den hier getesteten Versuchsansätzen im Verhältnis weniger Überschussschlamm und damit weniger in Form von Polyphosphat gebundenes P für eine Rücklösung vorhanden. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass bei gleicher gelöster Phosphatkonzentration (siehe Abb. 16) die rückgelöste Phosphat-Menge pro TS des ÜSS aufgrund der unterschiedlichen Menge an eingesetztem ÜSS mit dem Anteil des zugegebenen Substrates gestiegen ist. Dieser Umstand wurde bei der anschließenden Berechnung des P-Rückgewinnungspotentials berücksichtigt, indem das in Lösung gegangene Phosphat ausschließlich auf den im Überschussschlamm enthaltenen Phosphor bezogen wurde (Abb. 17).

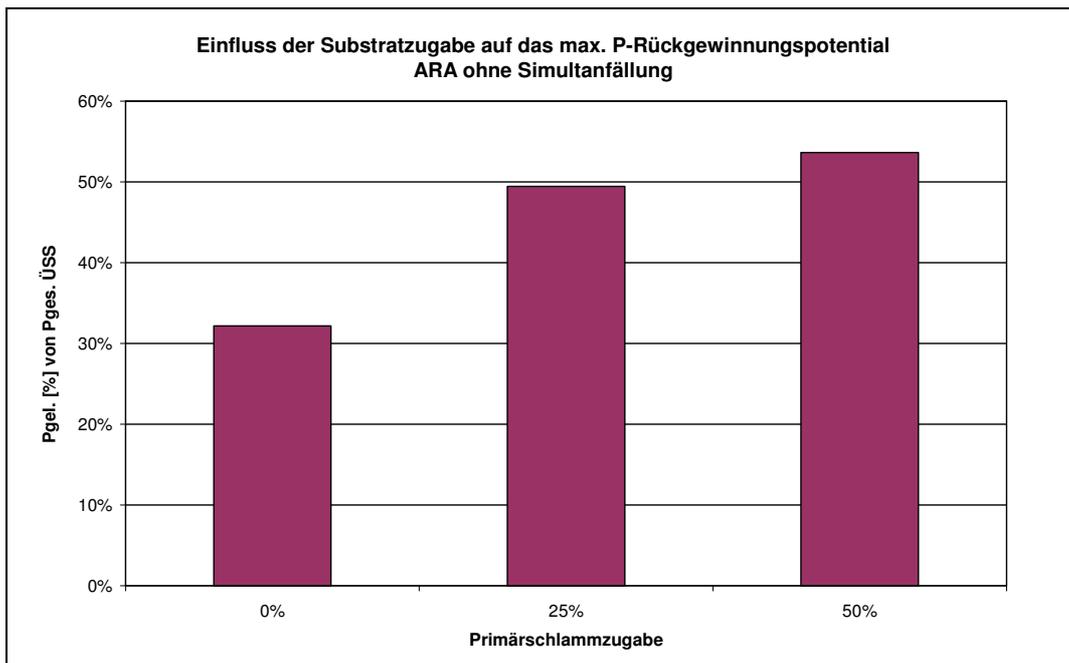


Abb. 17: Maximales P-Rückgewinnungspotential in Abhängigkeit der Substratzugabe (ARA ohne Simultanfällung)

Danach steigt das Rückgewinnungspotential mit der Zugabe von Primärschlamm als Substrat an. Bei Zugabe von 50 % Primärschlamm konnten ca. 54 % des im Überschussschlamm enthaltenen Phosphors (entspricht ca. 0,22 kg P/(E•a)) rückgelöst werden. Dies bedeutet gegenüber der Rücklösung ohne Substratzugabe eine Steigerung von ca. 20 %.

Darüber hinaus wirkt sich der höhere TS-Gehalt in Zusammenhang mit Schlamm-Wasser-Phasentrennung in der sich an die biologische Rücklösung anschließenden maschinellen Eindickung aus, was anhand der in Kap. 5.1.4 dargestellten Beispielrechnung verdeutlicht wird.

ARA mit Simultanfällung

Bei der Darstellung des Einflusses der Substratzugabe für die ARA mit Simultanfällung muss zunächst berücksichtigt werden, dass sich der eingesetzte Vorklärschlamm aufgrund der Verfahrenstechnik der ARA (Rückführung des Sekundärschlammes in das Vorklärbecken) eine Mischung aus Primärschlamm und rückgeführtem ÜSS (Anteil ca. 75 %) darstellt (siehe Kap. 4.2). Ein direkter Vergleich der Ergebnisse der ARA mit und ohne Simultanfällung ist deshalb nicht möglich, da im Vorklärschlamm-Gemisch der ARA mit Simultanfällung ggf. auch in den Zellen eingelagertes rücklösbares Phosphat enthalten war.

Daher erfolgte bei den durchgeführten Untersuchungen eine Substratdosierung bis zu 100 % (Bezugsgröße ist das Gemisch). Die Versuchsreihe ohne Substratzugabe (0 % PS) wurde aufgrund der Reaktorenanzahl mit einer Zeitverzögerung von einer Woche durchgeführt.

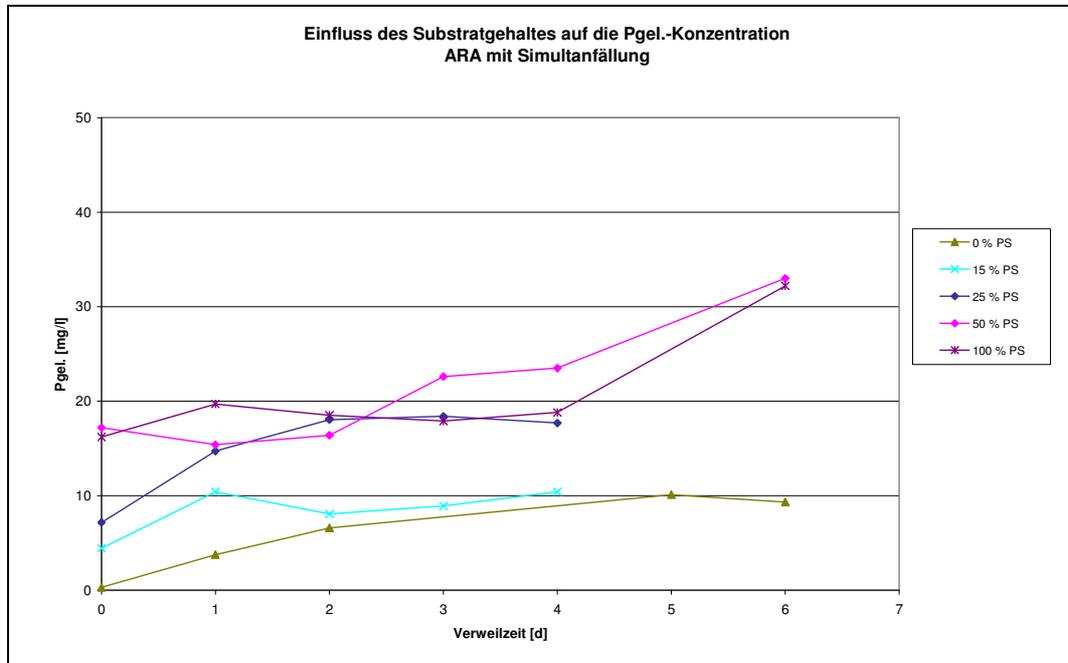


Abb. 18: Verlauf der P_{gel} -Konzentrationen bei unterschiedlicher Primärschlammzugabe (ARA mit Simultanfällung)

Durch die Substratzugabe bei den Rücklöseuntersuchungen mit ÜSS der ARA mit Simultanfällung wurde eine Steigerung der maximalen gelösten Phosphat-Konzentrationen bis ca. 20 mg/l erreicht. Über die Versuchsdauer von bis zu sechs Tagen konnte im Weiteren jedoch kein relevanter Anstieg der gelösten Phosphat-Konzentrationen festgestellt werden. Auffällig sind die bereits zu Anfang vorliegenden erhöhten gelösten Phosphatanteile, die auf erhöhte Konzentrationen an P_{gel} im Vorklärschlamm zurückzuführen sind. Da innerhalb des Vorklärsbeckens anaerobe Verhältnisse herrschten, ist davon auszugehen, dass hier bereits biologische Rücklösevorgänge aus dem zurückgeführten Sekundärschlamm stattfanden. Eine Steigerung der Umsatzgeschwindigkeit konnte nicht signifikant erzielt werden.

Bei der Berechnung der P-Rückgewinnungspotentiale wurde der Primärschlammanteil analog zu den Untersuchungen mit Schlamm der ARA ohne Simultanfällung berücksichtigt. Eine direkte Vergleichbarkeit der Versuchsansätze ist aber aus den genannten Gründen nicht möglich.

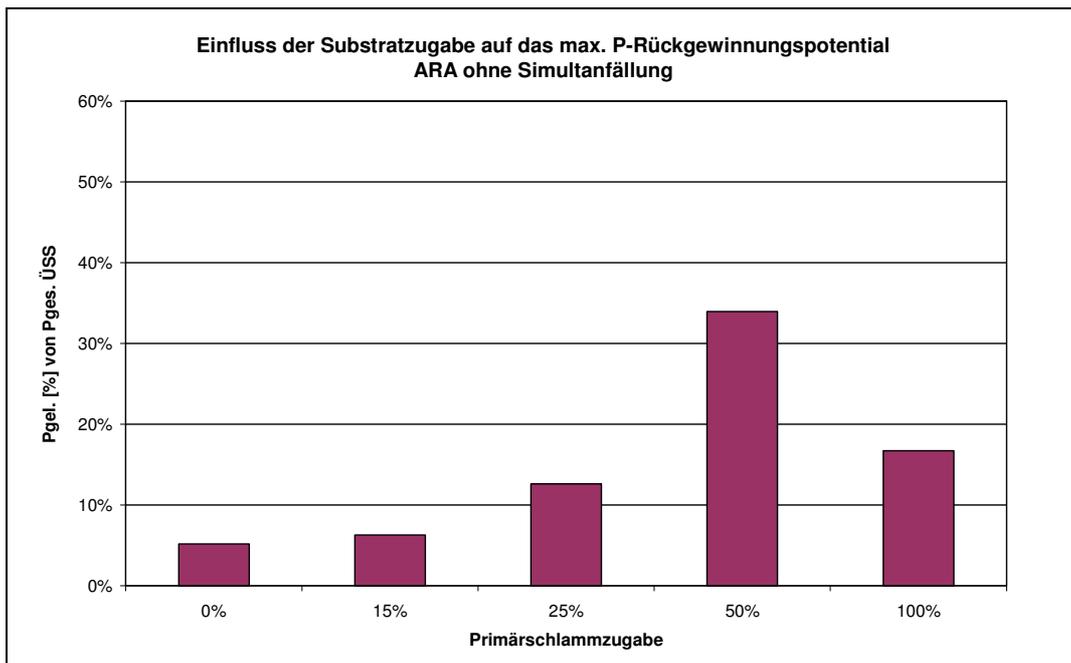


Abb. 19: Maximales P-Rückgewinnungspotential in Abhängigkeit der Substratzugabe (ARA mit Simultanfällung)

Durch den bei der Versuchsdurchführung hohen gelösten Anfangsgehalt an Phosphat (siehe Abb. 18) lag das hierdurch verursachte P-Rückgewinnungspotential z. T. im Bereich von 50 %. Die maximale P-Rückgewinnung wurde bei Zudosierung von 50 % Substrat mit ca. 34 % erreicht (ca. 0,067 kg/(E•a)). Dies entspricht einer P-Fracht von ca. 3.350 kg/a. Praktisch kann dieser Wert nicht erreicht werden, da ein hoher Anteil des rückgelösten Phosphates aus der ÜSS-Rückführung resultiert.

Eine Wiederholungsreihe lieferte in der Tendenz ähnliche Ergebnisse, allerdings lagen schlammbedingt etwa 20 % niedrigere absolute Konzentrationen im ÜSS vor.

Zur Steigerung der biologischen Rücklösung durch Zugabe von Substrat als externe Kohlenstoffquelle kann abschließend festgehalten werden, dass:

1. die absoluten Konzentrationen in den Rücklösereaktoren nicht erhöht werden konnten,
2. eine Steigerung der TS-spezifischen Rücklösung aus dem ÜSS und damit der max. P- Rückgewinnung bewirkt wurde,
3. ein geringfügig schnellerer Umsatz des in den Zellen des ÜSS eingelagerten Phosphates erfolgte.

5.1.4 Einfluss des TS-Gehaltes

Durch eine Steigerung des TS-Gehaltes ließe sich bei einer biologischen Rücklösung bei einer Anlagendimensionierung das zu errichtende Beckenvolumen entsprechend verringern. In wie weit sich der TS-Gehalt auf die Rücklöserate auswirkt, wurde mit Schlamm aus der ARA ohne Simultanfällung überprüft.

Es wurden zwei Versuchsvarianten jeweils mesophil mit einem TS-Gehalt von 0,5 % (ÜSS aus Belebungsbecken) bzw. 3,8 % (eingedickter ÜSS) betrieben. Die Eindickung des ÜSS erfolgte auf der ARA ohne Simultanfällung mechanisch; wegen der relativ kurzen Standzeit im maschinellen Eindicker der Anlage waren keine Einflüsse aufgrund im Vorfeld ablaufender Rücklöseprozesse zu erwarten.

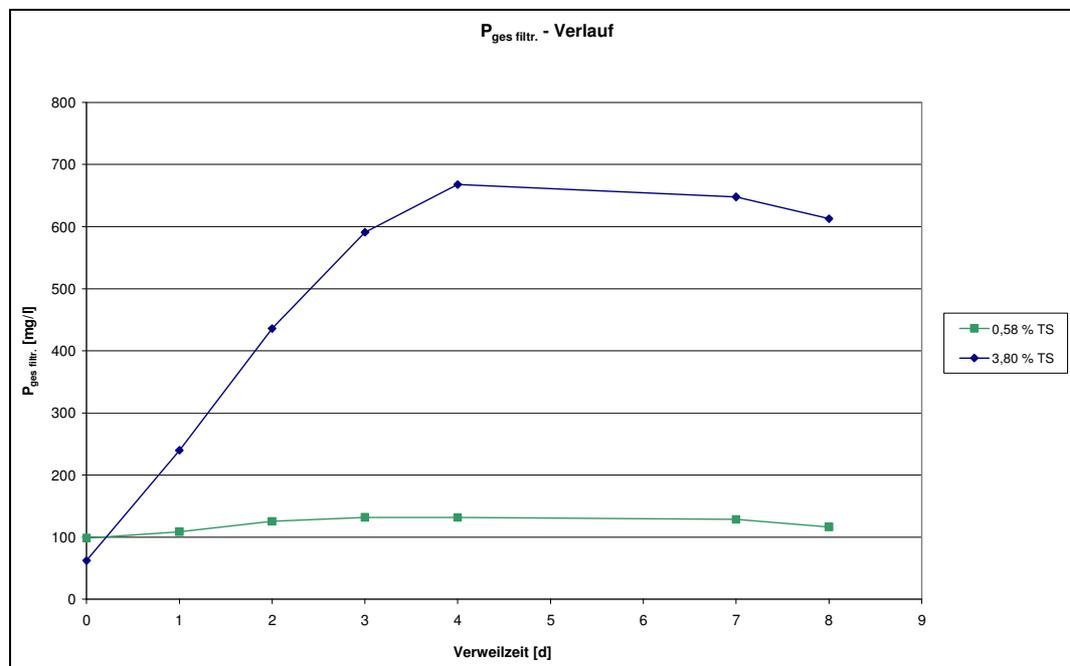


Abb. 20: Verlauf der P_{gel} -Konzentrationen bei unterschiedlichen TS-Gehalten (ARA ohne Simultanfällung)

Die Untersuchungen bzgl. des Einflusses des TS-Gehaltes auf die biologische Rücklösung ergaben, dass die maximale Phosphat-Konzentration bei einem TS-Gehalt von 3,8 % etwa um den Faktor 5 höher wäre als bei ÜSS mit einem TS-Gehalt von 0,5 %. Theoretisch wäre aufgrund des höheren TS-Gehaltes (P-Potentials) ein Anstieg etwa um den Faktor 7 zu erwarten. Im Folgenden erfolgt neben der Betrachtung des P-Rückgewinnungspotentials auch eine TS-spezifische Betrachtung der Rückgewinnung anhand von zwei Versuchsreihen (mit unterschiedlichen Anfangskonzentrationen).

Bezieht man die festgestellten Konzentrationen auf den TS-Gehalt des ÜSS, so ergeben sich die in der folgenden Tabelle dargestellten TS-spezifischen Rückgewinnungspotentiale mit gleichem Effekt:

Tab. 8: TS-spezifische Rückgewinnungspotentiale

Versuchsansatz	Maximales P-Rückgewinnungspotential in g P/(kg TS)
ÜSS TS 0,5 %	26,4
<i>ÜSS TS 3,8 %</i>	<i>17,6</i>
ÜSS TS 0,6 % (Wiederh.)⁵	12,8
<i>ÜSS TS 4,0 % (Wiederh.)⁵</i>	<i>1,92</i>

Das TS-spezifische Rückgewinnungspotential bei Behandlung von ÜSS mit einem TS-Gehalt von 0,5 % liegt im Bereich von 20 bis 30 g P/kg TS. Durch Steigerung des TS-Wertes auf 3,8 % sinkt das maximale TS-spezifische Rückgewinnungspotential auf unter 20 g P/(kg TS). Das bedeutet, dass durch die Steigerung des TS-Gehaltes der biologische Umsatz pro Schlammzelle reduziert wird (siehe auch Abb. 21).

Die folgende Abbildung stellt den Einfluss des TS-Gehaltes auf das P-Rückgewinnungspotential dar. Aufgrund der bei höherem TS-Gehalt im Schlamm geringeren abziehbaren Wassermenge zur Fällung wird in der nachfolgenden Abbildung sowohl das Rückgewinnungspotential in Bezug auf die gesamte Überschussschlammmenge als auch in Bezug zur abziehbaren Wassermenge dargestellt. Es ergibt sich folgendes Bild.

⁵ Der Rücklösevorgang im Wiederholungsversuch war bei Abbruch der Versuchsreihe noch nicht vollständig abgeschlossen.

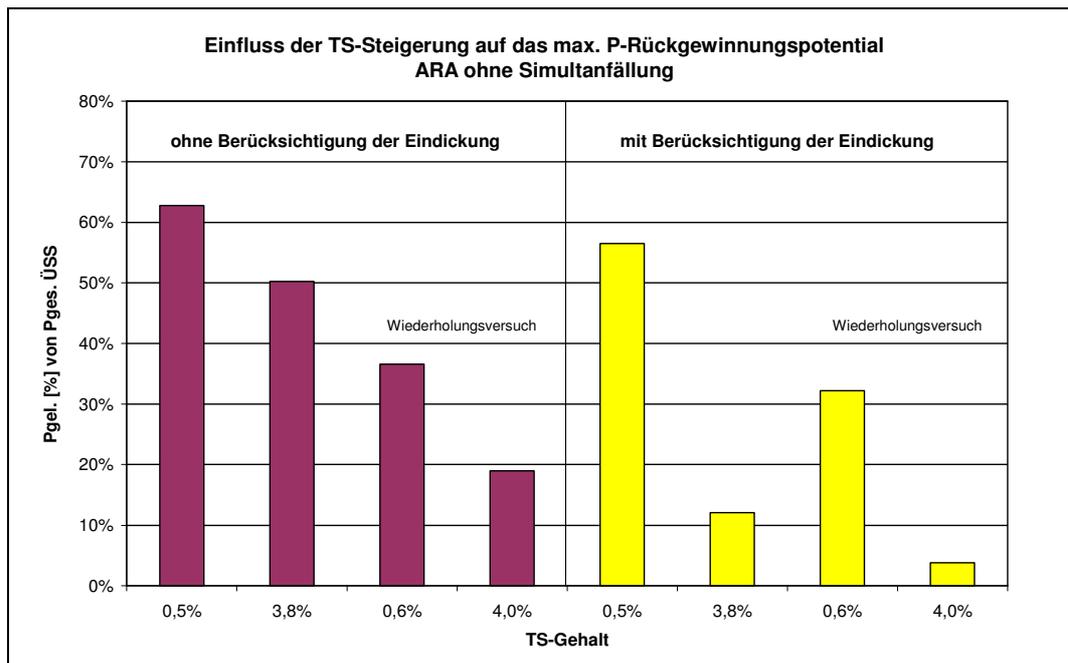


Abb. 21: Maximales P-Rückgewinnungspotential in Abhängigkeit des TS-Gehaltes (ARA ohne Simultanfällung)

Bei höheren TS-Gehalten wurden geringere Rückgewinnungspotentiale ermittelt.

Dieser Effekt ist damit offensichtlich auf zwei Ursachen zurückzuführen:

- bei höheren TS-Gehalten erfolgt (evtl. auch beeinflusst durch höhere Phosphat-Konzentrationen in dem umgebenden Medium) eine geringere Phosphatfreisetzung durch die P-speichernden Mikroorganismen
- bei hohen Phosphat-Konzentrationen im Schlammwasser ist die nach einer Nacheindickung im Schlamm verbleibende Phosphat-Fracht deutlich höher

Letztere lässt sich folgendermaßen herleiten. Da der mechanisch eingedickte ÜSS bereits einen TS-Gehalt von ca. 4 % besitzt und vor einer anschließenden Fällstufe zur Gewinnung des Phosphates eine Eindickung auf ca. 5 % TS erfolgen würde, ist die zur Fällungsstufe abgeleitete Wassermenge mit etwa 2.000 m³/a deutlich geringer als bei Behandlung des ÜSS mit einem TS-Gehalt von 0,5 % (abgeleitete Wassermenge ca. 57.500 m³/a). Ein relativ großer Anteil an phosphatreichem Schlammwasser (deutlich höhere Phosphat-Konzentrationen als bei ÜSS mit 0,5 % TS) verbleibt damit im Schlamm. Die gesamte rückgewinnbare Phosphatfracht bei einem TS-Gehalt von 3,8 % liegt damit im Bereich von 1.350 kg/a, was bezogen auf den Phosphorgehalt im Überschussschlamm einen Anteil von ca. 12 % (bei Berücksichtigung der Eindickung)

entspricht. Bei Behandlung des ÜSS mit 0,5 % kann als Vergleich eine P-Fracht von ca. 7.500 kg/a zurückgewonnen werden.

Damit kann sogar der Effekt eintreten, dass trotz höherer $P_{\text{gel.}}$ -Konzentrationen bei höherem TS-Gehalt die P-Rückgewinnung geringer ist, was insbesondere ab einem TS-Gehalt des Primärschlammes von 5 % der Fall wäre.

Eine Erhöhung des TS-Gehaltes hätte demnach folgende Auswirkungen:

1. Reduzierung der für eine Auslegung relevanten Beckengrößen (biologisches Rücklösebecken, Fällungsbecken),
2. deutliche Steigerung der absoluten Phosphat-Konzentration,
3. Reduzierung des maximalen TS-spezifischen Rückgewinnungspotentials

5.1.5 Einfluss einer Simultanfällung

Alle Untersuchungen wurden mit zwei unterschiedlichen Schlämmen (ARA mit und ohne Simultanfällung) durchgeführt, da davon ausgegangen wurde, dass die Zugabe von Phosphat-Fällmittel in Form von Eisen(III)-Chlorid starke Auswirkungen auf das biologische Rücklöseverhalten hat, da:

- das an das Fällungsmittel chemisch gebundene Phosphat nicht für die biologische Rücklösung zur Verfügung steht
- rückgelöstes Phosphat ggf. durch freies im ÜSS enthaltenes Eisen chemisch wieder gebunden wird und ausfällt

Die Anteile an chemisch- bzw. biologisch gebundenem Phosphat bei dem Schlamm der ARA mit Simultanfällung sind nicht bekannt. Eine weitergehende Differenzierung der P-Bindungsform wurde im Rahmen des Projektes nicht vorgenommen, da die Anteile messtechnisch äußerst schwer zu erfassen sind.

Um den Einfluss des Fällmittels im direkten Vergleich darzustellen, wurden Untersuchungen für die ARA mit Simultanfällung mit unterschiedlichen Fällmitteldosierungen durchgeführt und den Ergebnissen der ARA ohne Simultanfällung gegenübergestellt.

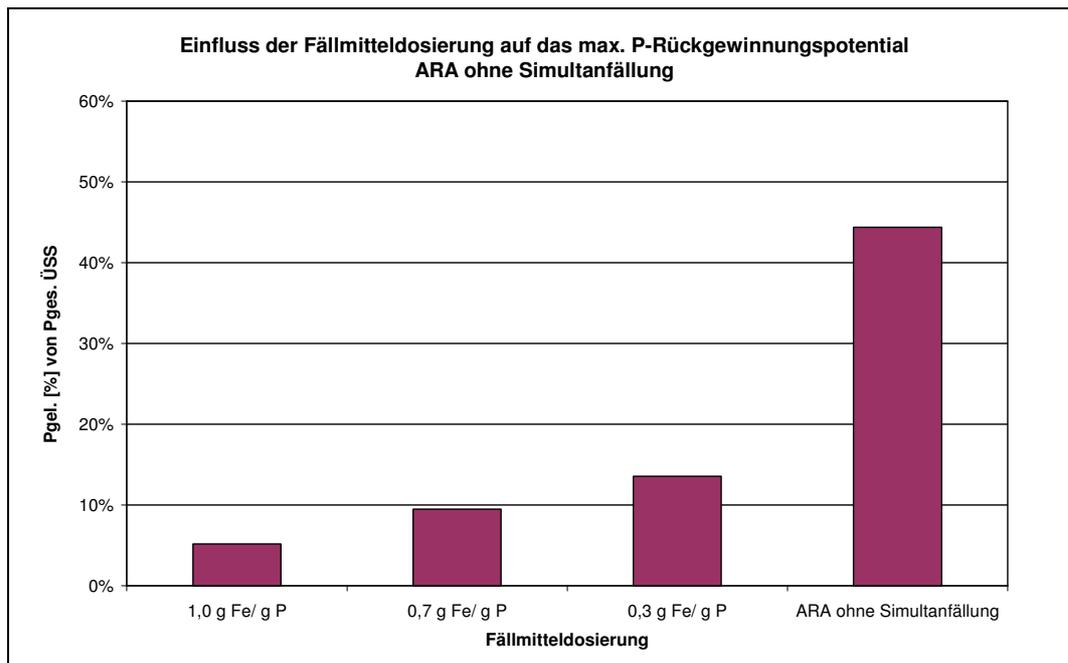


Abb. 22: Maximales P-Rückgewinnungspotential durch biologische Rücklösung in Abhängigkeit einer durchgeführten Simultanfällung (ARA ohne Simultanfällung)

Anhand Abb. 22 kann ein deutlicher Einfluss der Fällmitteldosierung festgestellt werden. Bei Dosierung von Fällmittel von 0,3 bis 1,0 g Fe/g P (entspricht in der Anlage 100 bis 300 Liter einer 30 bis 45 %-igen Fällmittel-Lösung am Tag) liegt das Phosphat-Rückgewinnungspotential im Bereich von 5 bis 10 %, wobei allerdings eine leichte Steigerung des Potentials bei Drosselung der Fällmitteldosierung festgestellt werden konnte. Stellt man diesen Werten das Rückgewinnungspotential der ARA ohne Simultanfällung von ca. 45 % gegenüber wird deutlich, dass selbst durch geringe Fällmitteldosierungen die biologische Rücklösung sehr stark eingeschränkt wird (Faktor 5 bis 10 geringer).

Eine effektive P-Rückgewinnung aus der Schlammphase kann somit nur bei einem Anlagenbetrieb ohne Simultanfällung erreicht werden.

5.2 Ergebnisse der Ultraschallintegration

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur P-Rückgewinnung durch mechanischen Zellaufschluss in Form einer Ultraschallintegration dargestellt. Hierbei soll der in den Zellen eingelagerte Phosphor durch Aufschluss der Zellwände wieder in Lösung gebracht werden. Durch die Desintegration heizt sich zusätzlich der behandelte Schlamm auf (z. B. bei einer Beschallungsdauer von ca. 5 min auf eine

Temperatur von ca. 55 °C). Durch gezielte Versuche zum Einfluss der Temperatur (Kühlung der Durchflusszelle) kann eine zusätzlich zellaufschließende Wirkung durch die Temperatur jedoch ausgeschlossen werden.

Die nachfolgende Darstellung der bisher erzielten mechanischen P-Rücklösung unterteilt sich anhand folgender Einflussfaktoren:

- Beschallungsdauer
- Ultraschallintensität
- TS-Gehalt
- Simultanfällung

Der mechanische Aufschlussgrad (A_{CSB}) der Zellen wird i. A. durch die Freisetzung von CSB beurteilt. Dabei wird die erreichte CSB-Freisetzung in Bezug gesetzt zu einer maximal möglichen Freisetzung mittels Laugenaufschluss [LEHNE, 1998].

In den im Folgenden dargestellten Untersuchungen wurden folgende mittlere CSB-Aufschlussgrade im behandelten ÜSS gemessen, wobei bereits die CSB-Werte nach dem Laugenaufschluss relativ große Schwankungen aufwiesen.

Tab. 9: A_{CSB} -Aufschlussgrade bei unterschiedlichem Energieeintrag

Energieeintrag	10 bis 20 kWh/m³	70 bis 110 kWh/m³	110 bis 140 kWh/m³
A_{CSB}	2 bis 10 %	30 bis 50 %	bis 80 %

Vergleich man die erreichten Aufschlussgrade mit Literaturangaben [ATV, 1996, NEIS, 2001, EDER, 2003, NICKEL, 2001] liegen die erzielten Aufschlussgrade im gleichen Bereich bzw. teilweise leicht darunter. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die angegebenen Aufschlussgrade z. T. auf der Sauerstoffverbrauchsrate (A_S) und damit auf einer anderen Bezugsgröße beruhen (A_{CSB}/A_S ca. 0,4 bis 0,5). Weiterhin ist ein Vergleich aufgrund sehr unterschiedlicher Angaben zu den Energieeinträgen schwierig.

Zur Beurteilung der durch den Zellaufschluss entstehenden Rückbelastungen wurden außerdem CSB- und Stickstoffparameter gemessen (siehe Kap. 7).

Zur besseren Einschätzung der Ergebnisse der Untersuchungen zur Ultraschallintegration von Schlamm wurden zunächst Versuche zur Streuung der Analyseergebnisse bei annähernd gleichen Ausgangsbedingungen durchgeführt. Eingesetzt wurde

ÜSS der ARA ohne Simultanfällung, da hier höhere $P_{\text{gel.}}$ -Konzentrationen zu erwarten waren. Der aus einem durchmischten 120 Liter Vorlagebehälter abgezogene ÜSS wurde in der Ultraschalldesintegration 20 Sekunden bei einer Leistung von 450 W (entspricht einem Energieeintrag von 9 kWh/m^3) im Durchfluss beschallt und die $\frac{1}{4}$ stündlich gezogene Proben anschließend auf die $P_{\text{gel.}}$ -Konzentration analysiert.

Die Messergebnisse lagen in einem Schwankungsbereich von 42,4 bis 52,4 mg/l Phosphat. Die CSB-Werte lagen im Bereich von 296 mg/l bis 352 mg/l. Beide gemessenen Schwankungsbereiche werden insbesondere durch die Inhomogenität des behandelten Schlammes verursacht.

Im Gegensatz zur biologischen P-Rücklösung, bei der $\text{PO}_4\text{-P}$ freigesetzt wird, könnte bei der Desintegration durch den Zellaufschluss Phosphor möglicherweise in unterschiedlichen Formen in Lösung gehen:

- $\text{PO}_4\text{-P}$, kann durch herkömmliche Fällmittel dem Wasser entzogen werden.
- organisch gebundener Phosphor, kann ggf. durch herkömmliche Fällmittel dem Wasser nicht bzw. nur in einem geringen Anteil entzogen werden.

Vergleichsmessungen von $P_{\text{ges.}}$ und $\text{PO}_4\text{-P}$ der filtrierten Probe ergaben, dass der Anteil an $\text{PO}_4\text{-P}$ i. d. R. 80 bis 100 % betrug, so dass im Weiteren diesbezüglich keine weitere Differenzierung vorgenommen wird.

5.2.1 Einfluss der Beschallungsdauer

Die Einstellung der unterschiedlichen Beschallungsdauern erfolgte durch Kreislaufführung des Schlammes, wobei ein Behälter mit zwei Liter Volumen als Pumpenvorlagebehälter diente. Die Beschallungsdauer beschreibt dabei die tatsächliche Zeit, in der während einer Versuchsdurchführung der ÜSS dem Ultraschallfeld ausgesetzt ist. Als Bezugsgröße wird z. T. der volumenspezifische Energieeintrag (kWh/m^3) herangezogen, der im gleichen Verhältnis mit der Beschallungsdauer ansteigt. Durch den Bezug auf den Energieeintrag ist eine Vergleichbarkeit zu anderen Desintegrationsanlagen bzw. Literaturwerten zumindest bedingt gegeben.

Analog zur biologischen Rücklösung (Kap. 5.1) wird zunächst die durch Behandlung mittels Ultraschalldesintegration erreichte Konzentration an $P_{\text{gel.}}$ dargestellt. Die maximal mögliche Phosphat-Rückgewinnung wird exemplarisch in Kap. 5.2.4 berechnet.

ARA ohne Simultanfällung

Bei Behandlung des Überschussschlammes der ARA ohne Simultanfällung wurde davon ausgegangen, dass der Großteil des im Schlamm enthaltenen Phosphates als Polyphosphat innerhalb der Zellen eingelagert ist und so durch den Zellaufschluss das gespeicherte Phosphat in Lösung geht.

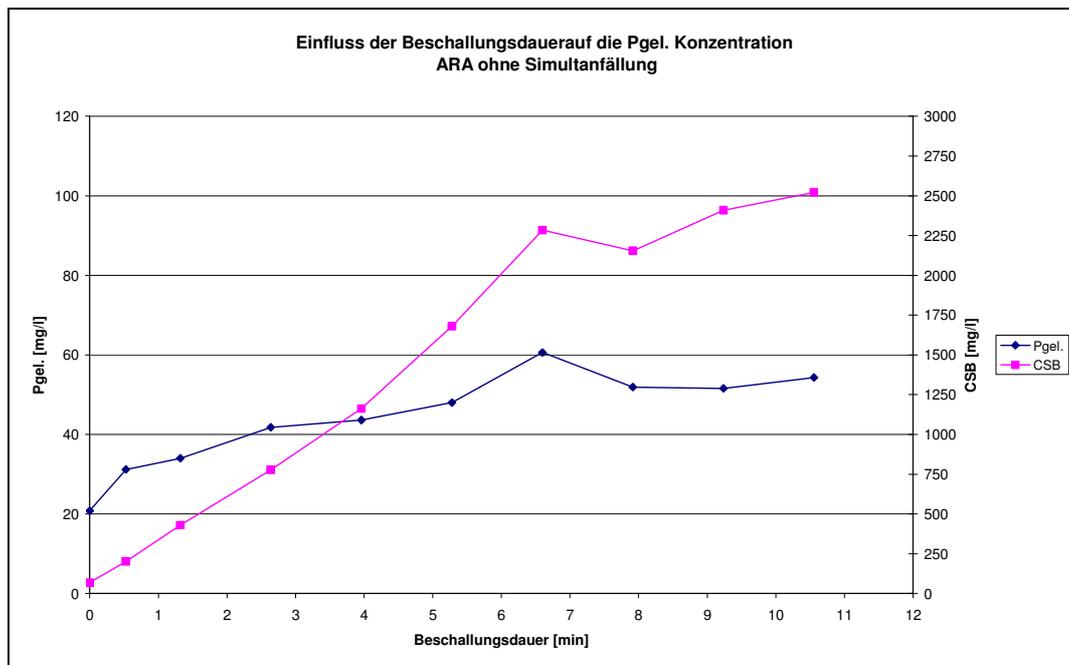


Abb. 23: Verlauf der P_{gel} -Konzentration sowie des CSB-Wertes bei unterschiedlicher Beschallungsdauer (ARA ohne Simultanfällung)

Die maximale Phosphat-Konzentration wurde mit 50 bis 60 mg/l bei einer Beschallungsdauer von mindestens 6 bis 7 Minuten (Energieeintrag von ca. 110 kWh/m³) erreicht. Ein abflachender Anstieg der Phosphat-Konzentrationen wurde auch durch MÜLLER et al. [1998] bei Versuchen mit einer Rührwerkskugelmühle festgestellt. Dass tatsächlich ein Zellaufschluss bewirkt wurde, wird anhand des CSB-Wertes der filtrierten Probe belegt. Dieser stieg deutlich auf ca. 2.500 mg/l, was bei einem CSB-Wert in der Ausgangsprobe von ca. 70 mg/l einer Steigerung von mehr als 90 % entspricht.

ARA mit Simultanfällung

Bei Behandlung des Überschussschlammes der ARA mit Simultanfällung liegt der im Schlamm enthaltene Phosphor z. T. als Eisen(III)Phosphat vor. Es steht in Frage, ob die durch die Ultraschall-desintegration eingetragene Energie ausreicht, um die vorhandenen Ionenbindungen zu lösen und so auch chemisch gebundenes Phosphat für eine Phosphor-Rückgewinnung verfügbar zu machen.

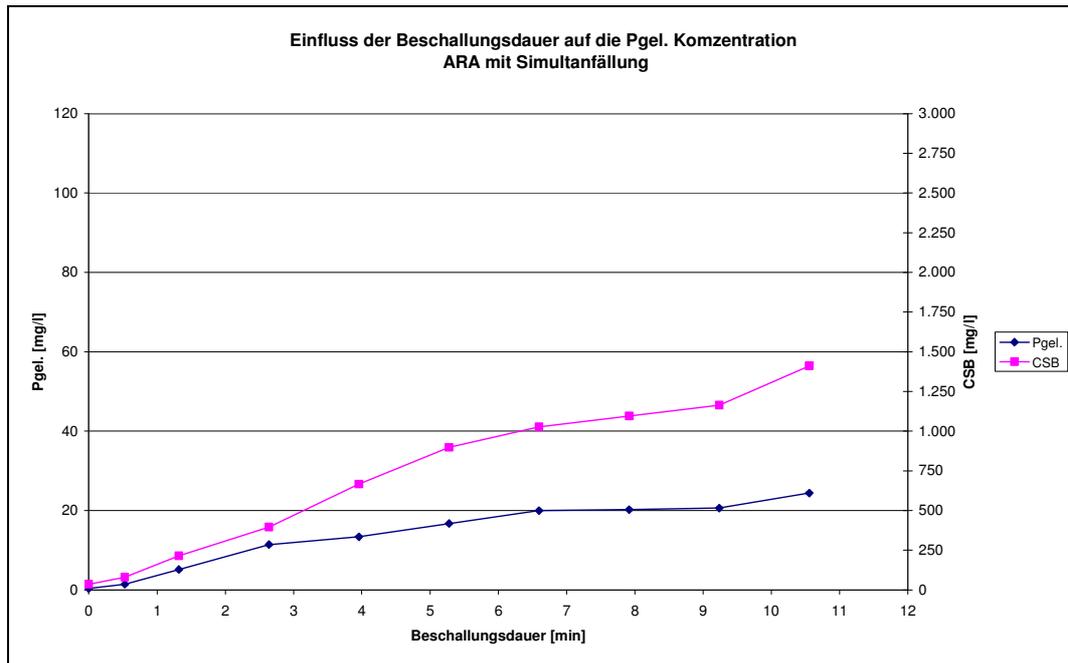


Abb. 24: Verlauf der P_{gel} -Konzentration sowie des CSB-Wertes bei unterschiedlicher Beschallungsdauer (ARA mit Simultanfällung)

Analog zu den Untersuchungen mit Schlamm ohne gefällte Anteile wurde ein nahezu linearer, jedoch langsamerer Anstieg des gelösten CSB-Wertes bis auf ca. 1.400 mg/l beobachtet. Bei einem CSB-Wert in der Ausgangsprobe von ca. 35 mg/l entspricht dies im Maximum (Energieeintrag 140 kWh/m^3) einem CSB-Aufschlussgrad von ca. 78 %. Die gelöste Phosphat-Konzentration stagniert wiederum scheinbar ab einer Beschallungsdauer von ca. 7 Minuten bei ca. 20 mg/l. Dieser Wert liegt oberhalb der durch die biologische Rücklösung bei diesem Schlamm erreichten Konzentration, jedoch deutlich unterhalb der Maximalkonzentrationen, die beim ÜSS der ARA ohne Simultanfällung mit Ultraschall-desintegration als auch mit biologischer Rücklösung erreicht wurden. Der Effekt der Beschallungsdauer wird auch bei den nachfolgend dargestellten Abbildungen jeweils immer mit betrachtet.

Die durch eine Steigerung des Energieeintrages der Ultraschalldesintegration mittels Erhöhung der Beschallungsdauer erzielten Effekt lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Mit zunehmender Beschallungsdauer steigen sowohl die $P_{\text{gel.}}$ -Konzentrationen als auch die CSB-Werte der gelösten Probe zunächst an, die $P_{\text{gel.}}$ -Konzentrationen flachen nach 4 bis 6 Minuten ab, während die CSB-Werte nahezu linear steigen. Möglicherweise ist dieser Unterschied auf Reaktionen des in Lösung gebrachten Phosphors mit im Abwasser enthaltenen Metallionen (Na, Ca, Fe, Al) zurückzuführen.
2. Beim ÜSS ohne Fällmittelanteil werden bei gleichem Energieeintrag höhere $P_{\text{gel.}}$ -Konzentrationen erreicht.
3. Die erreichten maximalen $P_{\text{gel.}}$ -Konzentration der filtrierten Probe liegen mit ca. 55 mg/l bei der ARA ohne Simultanfällung deutlich unterhalb und mit ca. 25 mg/l bei der ARA mit Simultanfällung leicht oberhalb der durch die biologische Rücklösung erzielten Konzentrationen.
4. Bei einem Energieeintrag von 140 kWh/m^3 konnte ein CSB-Aufschlussgrad von 78 % erzielt werden.

5.2.2 Einfluss der Ultraschallintensität

Die Intensität des verwendeten Ultraschalls, die die pro Fläche abgegebene Leistung beschreibt, kann über seine Amplitude im Bereich von 50 bis 100 % gesteuert werden. Bei einer Amplitude von 100 % beträgt die Auslenkung der Sonotrode (peak to peak) ca. 20 bis 23 μm .

In den folgenden beiden Diagrammen wird der Einfluss der Amplitudenhöhe auf die Rücklösung bzw. Freisetzung von Phosphor und CSB dargestellt. Die Desintegrationsstufe wurde jeweils mit den Amplitudenhöhen von 50 %, 75 % und 100 % betrieben.

ARA ohne Simultanfällung

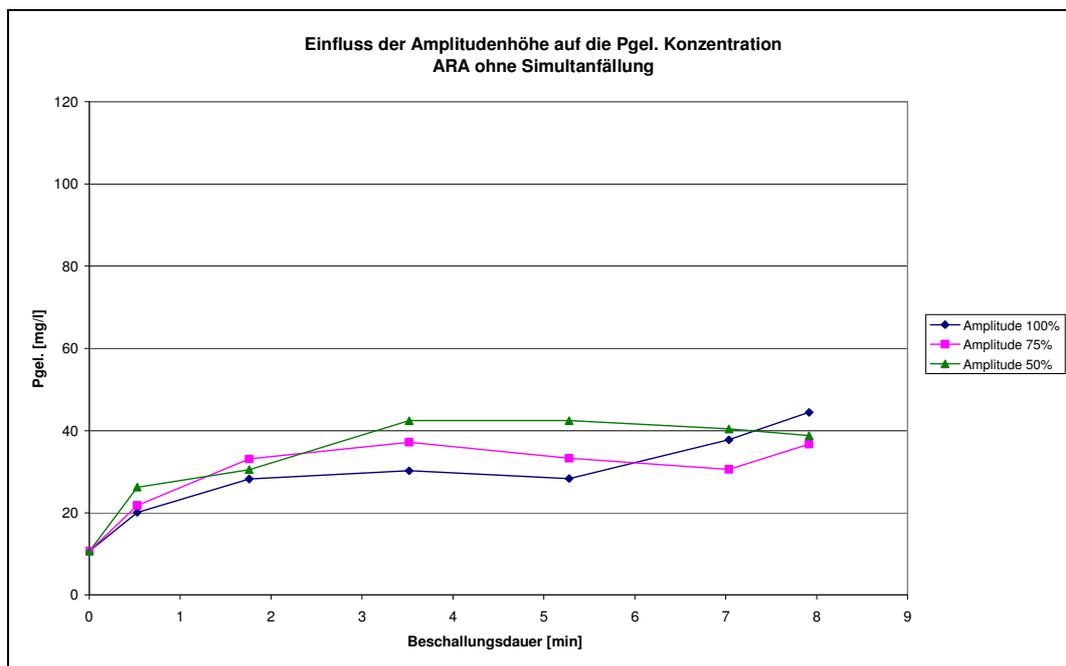


Abb. 25: Verlauf der P_{gel} -Konzentrationen bei unterschiedlichen Amplitudenhöhen (ARA ohne Simultanfällung)

Die P_{gel} -Konzentrationen zeigen mit zunehmender Beschallungsdauer den bereits zuvor dargestellten Verlauf, wobei hier bereits ab einer Dauer von 2 bis 4 Minuten (20 bis 40 kWh/m^3) kein weiterer Anstieg mehr erfolgt. Die erzielten Konzentrationen von 30 bis 40 mg/l lagen alle leicht unterhalb der zuvor gemessenen Werte. Dabei zeigte sich kein eindeutiger Einfluss der eingestellten Amplitudenhöhe. Die Werte bei 100 % lagen bis 5 Minuten (70 kWh/m^3) sogar unterhalb der übrigen Einstellungen.

Bei Betrachtung des freigesetzten CSB-Wertes (Abb. 26) bietet sich ein etwas anderes Bild.

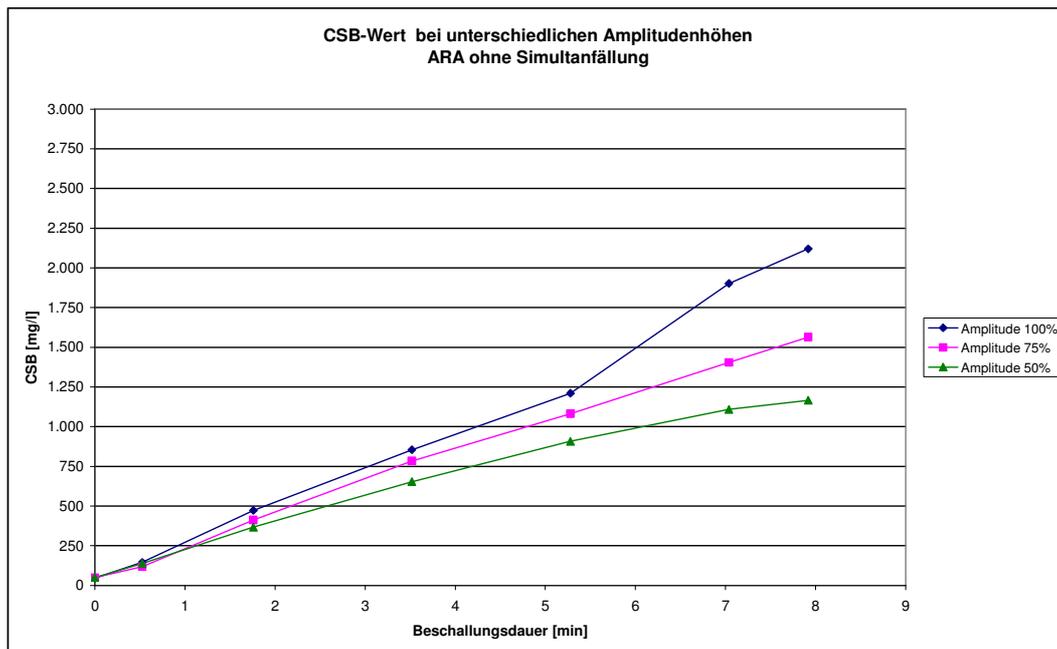


Abb. 26: Verlauf der CSB-Werte bei unterschiedlichen Amplitudenhöhen (ARA ohne Simultanfällung)

Der CSB-Wert der gelösten Probe zeigt zunächst analog zu den bisher dargestellten Versuchsdurchführungen bei allen Amplitudenhöhen einen linearen Anstieg. Im Gegensatz zur Phosphat-Konzentration ist hier aber erkennbar, dass bei Behandlung mit einer Amplitude von 100 % der höchste Aufschlussgrad erreicht wird. Der maximale CSB-Wert lag bei einer Beschallungsdauer von ca. 8 Minuten (110 kWh/m³) und einer Amplitude von 100 % bei ca. 2.200 mg/l (der CSB-Wert bestätigt die zuvor erzielten Ergebnisse), bei einer Amplitude von 75 % bei ca. 1.600 mg/l und bei einer Amplitude von 50 % bei ca. 1.200 mg/l.

Bei einer Steigerung der Amplitudenhöhe von 50 % auf 100 % konnte der CSB-Wert der gelösten Probe jedoch nicht um den Faktor 2 erhöht werden. Der Aufschlussgrad steht damit scheinbar in direkter Abhängigkeit zu der eingesetzten Amplitudenhöhe, verläuft jedoch nicht proportional zu dieser.

ARA mit Simultanfällung

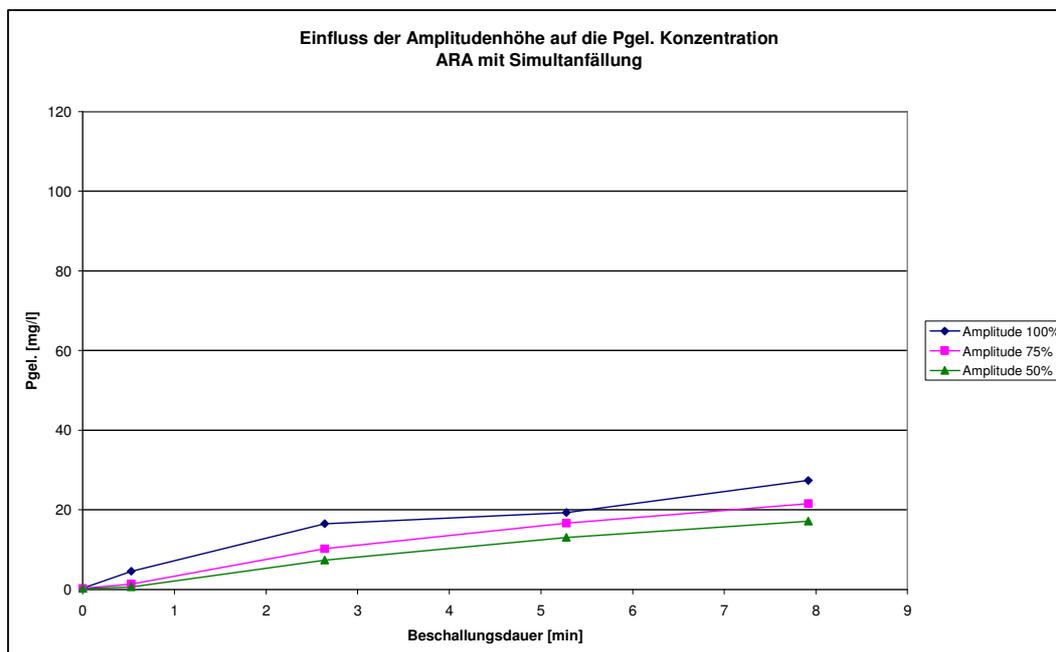


Abb. 27: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$ -Konzentrationen bei unterschiedlichen Amplitudenhöhen (ARA mit Simultanfällung)

Bei Behandlung von ÜSS der ARA mit Simultanfällung war zumindest tendenziell, wenn auch nur in geringem Ausmaß, auch bei $P_{\text{gel.}}$ ein Einfluss der eingesetzten Amplitudenhöhe erkennbar. Bei einer Amplitudenhöhe von 100 % lag die maximal gelöste Phosphat-Konzentration bei knapp 30 mg/l und bestätigte damit die vorherigen Versuchsergebnisse. Bei den Amplitudenhöhen 75 % und 50 % konnten maximal gelöste Phosphatgehalte von etwa 20 mg/l nachgewiesen werden.

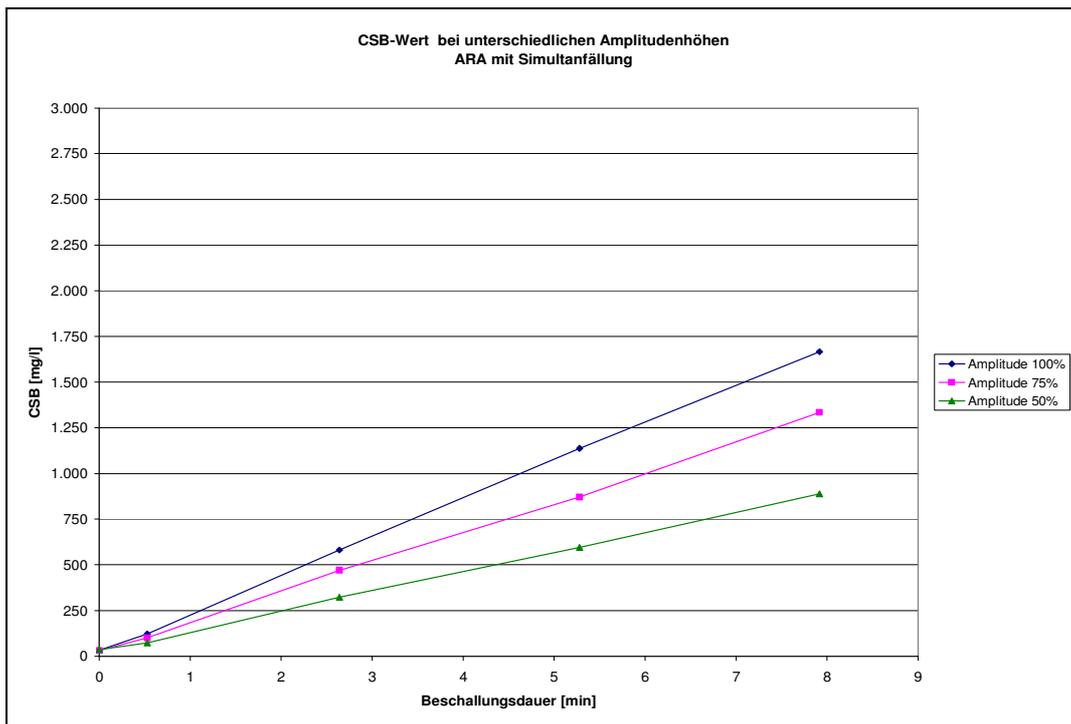


Abb. 28: Verlauf der CSB-Werte bei unterschiedlichen Amplitudenhöhen (ARA mit Simultanfällung)

Beim CSB-Wert wird auch hier der Effekt der Amplitudenhöhe bestätigt, wobei bei allen drei Varianten die Konzentrationen bis zum maximal getesteten Energieeintrag linear ansteigt.

Durch Variation der in den Untersuchungen eingesetzten Amplitudenhöhe der Ultraschalldesintegration konnten grundsätzlich folgende Ergebnisse erzielt werden:

1. Es wurde eine definitive Abhängigkeit zwischen CSB-Wert der gelösten Probe und damit dem Aufschlussgrad der Zellen und der Amplitudenhöhe der Ultraschalldesintegration nachgewiesen. Die Analysenergebnisse lassen auf eine lineare Abhängigkeit zwischen Amplitudenhöhe und CSB-Aufschlussgrad schließen.
2. Bei der P-Freisetzung war der Effekt der Amplitudenhöhe geringer und auch eindeutig nur beim Schlamm aus der ARA mit Simultanfällung nachweisbar.

5.2.3 Einfluss des TS- Gehaltes

Auch bei der Desintegration kann durch eine Steigerung des TS-Gehaltes des zu behandelnden Schlammes die Anlagendimensionierung der Desintegrationsstufe entsprechend geringer ausfallen und damit Kosten gespart werden. Eine Steigerung des TS-Gehaltes des Schlammes muss allerdings in Grenzen geschehen, da bei hohen TS-Gehalten aufgrund der höheren Viskosität Verstopfungserscheinungen auftreten können.

ARA ohne Simultanfällung

Bei den Untersuchungen zum Einfluss des TS-Gehaltes mit ÜSS der ARA ohne Simultanfällung wurde der ÜSS mit dem TS-Gehalt von 0,5 % direkt dem ÜSS-Pumpwerk entnommen. Zusätzlich wurde ÜSS mit einem TS-Gehalt von 8,0 % im Ablauf der maschinellen Eindickung entnommen. Der Schlamm mit dem TS-Gehalt von 4,0 % wurde durch Mischung des hoch- und niedrig-konzentrierten ÜSS erzeugt.

Aufgrund der während des Transportes des Schlammes bereits einsetzenden biologischen P-Rücklösung war der Anfangswert der gelösten Phosphat-Konzentration zu Versuchsbeginn insbesondere bei den höheren TS-Gehalten erhöht (Abb. 29).

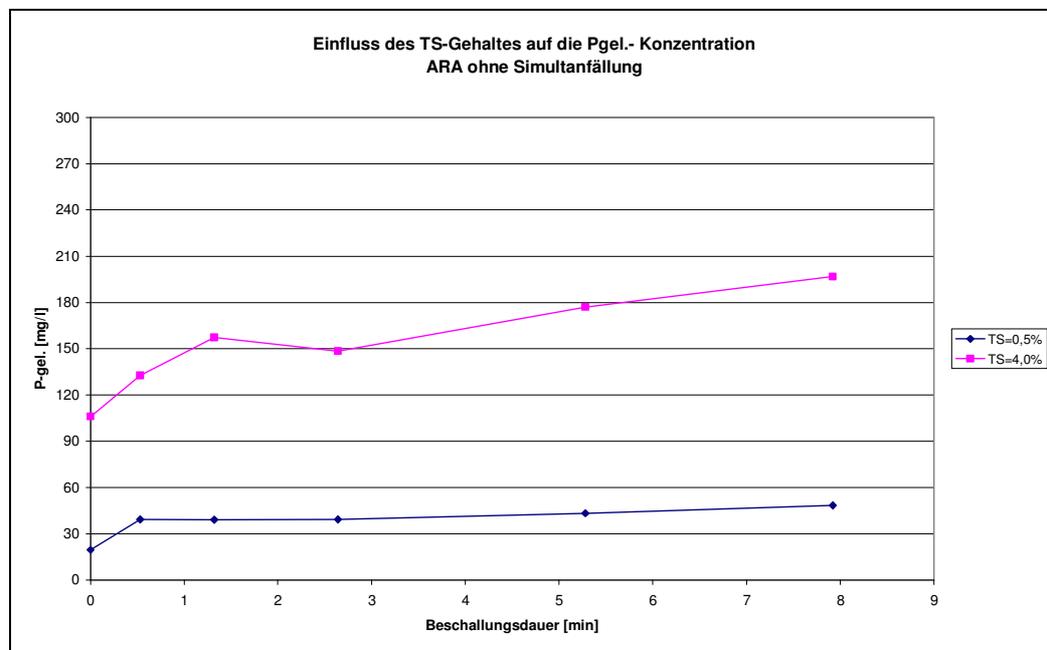


Abb. 29: Verlauf der P_{gel.}-Konzentration bei unterschiedlichem TS-Gehalt (ARA ohne Simultanfällung)

Die $P_{\text{gel.}}$ -Konzentrationen steigen bei ÜSS mit 0,5 % TS von ca. 20 mg/l auf ca. 50 mg/l an. Die rein durch die Desintegration bewirkte P-Rücklösung lag demnach bei etwa 30 mg/l. Beim Schlamm mit dem TS-Gehalt von 4 % steigt die $P_{\text{gel.}}$ -Konzentration von ca. 100 auf ca. 200 mg/l an (durch Desintegration ca. 100 mg/l).

Die ermittelte maximale Phosphat-Konzentration lag damit beim konzentrierteren ÜSS um den Faktor 4 höher, obwohl die 8-fache Menge an Trockensubstanz enthalten war, d. h. die TS-bezogene P-Freisetzung war somit bei hohem TS-Gehalt geringer. Bei diesem Vergleich (gleiche Beschallungsdauer bezogen auf das Volumen) ist aber auch zu berücksichtigen, dass der TS-spezifische Energieeintrag bei hohem TS-Gehalt deutlich niedriger ist.

Betrachtet man die TS-bezogene P-Freisetzung jeweils bei gleichem TS-spezifischen Energieeintrag und geht damit von gleichem Gesamtenergieeintrag bezogen auf die Abwasserreinigungsanlage aus (gesamt TS-Menge des ÜSS bleibt im Gegensatz zum Volumen bei unterschiedlichem Feststoffanteil konstant), so ergibt sich das in Abb. 30 dargestellte Bild. Daraus ist abzuleiten, dass auch bei gleichem TS-spezifischen Energieeintrag die freigesetzte P-Menge bei größerem TS-Gehalt geringer ist. Ausgehend von einer maximalen R-Rückgewinnung kann somit durch eine Voreindickung des ÜSS kein aus energetischer Sicht effektiverer Einsatz der Desintegrationsstufe erreicht werden.

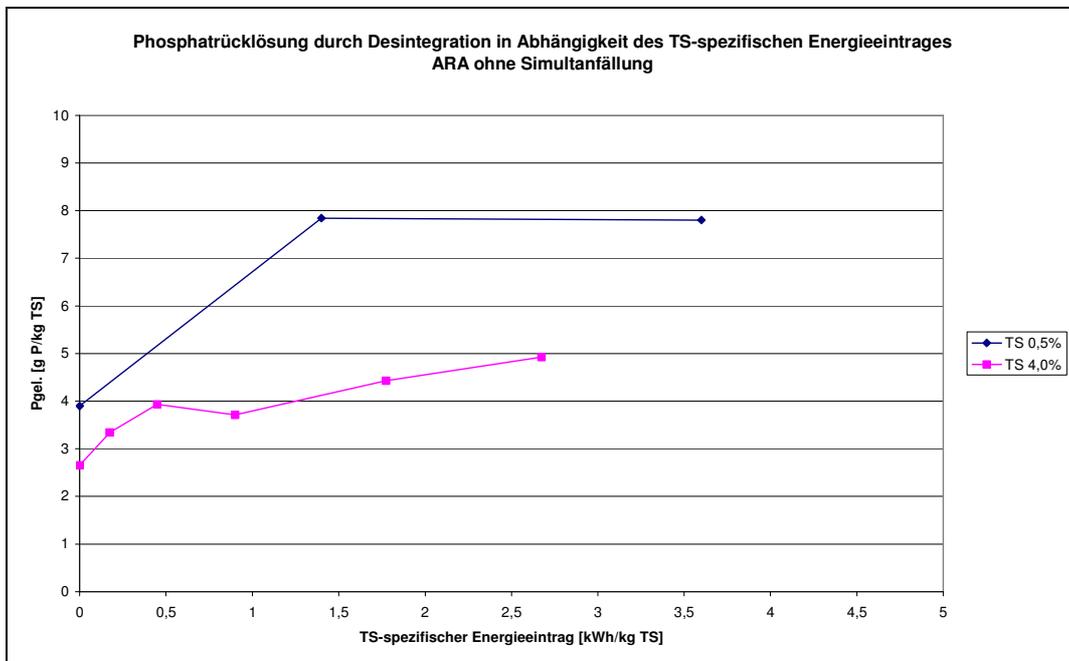


Abb. 30: Phosphatrücklösung durch Desintegration in Abhängigkeit des TS-spezifischen Energieeintrages (ARA ohne Simultanfällung)

Im folgenden Diagramm wird exemplarisch das Phosphat-Rückgewinnungspotential ausgewiesen.

Da während des Transportes bereits Phosphat durch die biologische Rücklösung rückgelöst wurde, was insbesondere bei hohen TS-Gehalten an dem hohen Phosphat-Anfangsgehalt zu erkennen ist (siehe Abb. 29), erfolgt eine Darstellung auf Grundlage des maximal gelösten Phosphates sowie des während der Desintegration freigesetzten Phosphates. Es kann an dieser Stelle keine Aussage zur tatsächlich über Desintegration zu gewinnenden Menge an gelösten Phosphat getroffen werden. Es ist allerdings zu vermuten, dass der Anteil höher als die während der Versuchsdauer aufgetretenen Differenz und niedriger als die während der Versuchsdauer festgestellte maximale P-Rückgewinnung liegt.

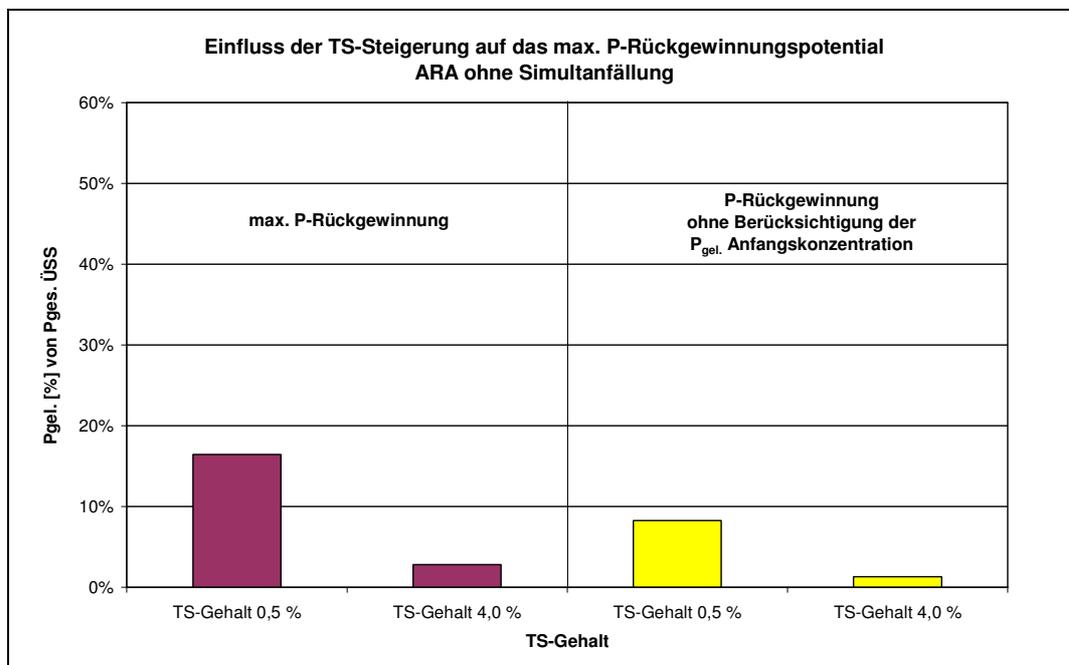


Abb. 31: Maximales P-Rückgewinnungspotential in Abhängigkeit des TS-Gehaltes (ARA ohne Simultanfällung)

Das max. P-Rückgewinnungspotential lag bei 0,5 % TS im Bereich von 8 bis 18 %, bei 4 % TS deutlich niedriger (1 bis 2 %). Bei einer anschließenden Fällungsstufe wird sich neben der geringeren TS-spezifischen Freisetzung zusätzlich der schon beschriebene Eindickungs-Effekt auswirken (ein größerer Anteil der Phosphor-Fracht verbleibt im Schlamm) (siehe Kap. 5.1.4).

ARA mit Simultanfällung

Bei den TS-Untersuchungen mit ÜSS der ARA mit Simultanfällung wurden folgende Varianten verglichen:

- TS = 0,5 % (ÜSS-Pumpwerk)
- TS = 2,7 % (aufkonzentrierter Schlamm)

Der ÜSS aus dem ÜSS-Pumpwerk (0,5 % TS) wurde durch Filtration mit einem sehr groben Filter bis auf einen TS-Gehalt von 2,7 % aufkonzentriert, da anlagenspezifisch eine statische Voreindickung des ÜSS vorhanden war und damit biologische Rücklöseprozesse bei der Eindickung nicht auszuschließen waren.

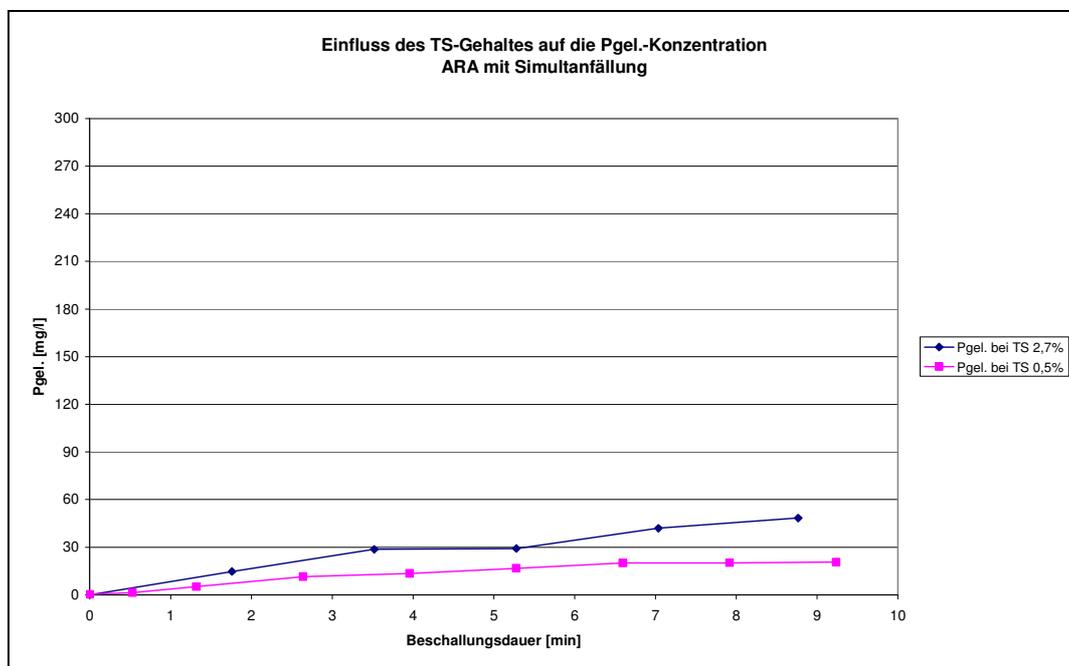


Abb. 32: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$ -Konzentration bei unterschiedlichem TS-Gehalt (ARA ohne Simultanfällung)

Die Ergebnisse mit Schlamm der ARA mit Simultanfällung bestätigen die zuvor gezogenen Erkenntnisse. Auch hier kann bei Schlämmen mit höheren TS-Gehalten durch Desintegration eine höhere Konzentration an gelöstem Phosphat erreicht werden. Die erzielten Ergebnisse lagen jedoch deutlich unterhalb der mit Schlamm der ARA ohne Simultanfällung erreichten Konzentrationen.

Eine Erhöhung des TS-Gehaltes bei der Ultraschalldesintegration hat zusammenfassend folgende Auswirkungen:

1. deutliche Steigerung der absoluten Phosphat-Konzentration
2. keine Steigerung der TS-spezifischen P-Rücklösung bei gleichem Energieeintrag (siehe Abb. 30)
3. Reduzierung der P-Rückgewinnung (siehe Abb. 31)

5.2.4 Einfluss einer Simultanfällung

Auch bei Behandlung des ÜSS mit Hilfe von Ultraschalldesintegration kann sich eine auf der ARA vorhandene Simultanfällung auswirken. Zum einen ist davon auszugehen, dass weniger Phosphat in der Zelle eingelagert ist, welches durch den Zellaufschluss verfügbar zu machen ist. Darüber hinaus können Fällungsreaktionen des bereits rückgelösten Phosphates auftreten. Für den gefällten Phosphat-Anteil kann angenommen werden, dass eine Lösung der chemischen Verbindung nicht oder nur unter hohem Energieeinsatz zu erreichen ist.

Die mit beiden Schlämmen ermittelten Ergebnisse (ARA ohne und mit Simultanfällung) werden im Folgenden daher direkt gegenübergestellt und miteinander verglichen. Eine Untersuchung bei unterschiedlichen Fällmitteldosierungen war nicht möglich.

Die erreichbaren P-Rückgewinnungspotentiale sind für eine Beschallungsdauer von 9 Minuten (Energieeintrag von 140 kWh/a) in Abbildung 33 dargestellt. Beide Schlämme hatten vor der Desintegration einen TS-Gehalt von 0,5 %.

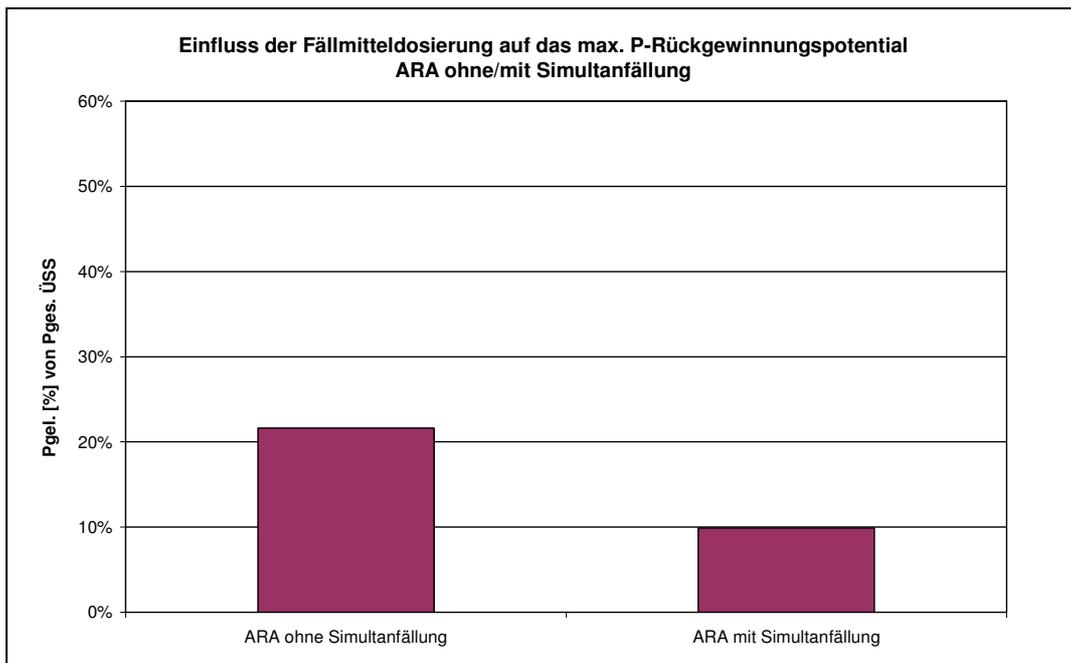


Abb. 33: Maximales P-Rückgewinnungspotential durch Ultraschallintegration in Abhängigkeit einer durchgeführten Simultanfällung

Es wird deutlich, dass sich die oben genannten Effekte der Simultanfällung entsprechend nachteilig auf die P-Rückgewinnung auswirken. Das max. P-Rückgewinnungspotential lag ohne Simultanfällung im Bereich von 20 %, mit Simultanfällung bei 10 % des im Schlamm vorhandenen Phosphors.

5.3 Ergebnisse einer aus biologischer Rücklösung und Ultraschallintegration kombinierten Anlage

Zusätzlich zur separaten Betrachtung der beiden Verfahrensansätze wurde auch ein kombinierter Betrieb der Verfahrensstufen untersucht:

- Biologische Rücklösung vor der Desintegration
- Desintegration vor der biologischen Rücklösung
- Kombination von Desintegration und biologischer Rücklösung durch Kreislaufbetrieb

Auch diese Versuche wurden mit ÜSS beider Anlagen (TS-Gehalt = 0,5 %) durchgeführt.

5.3.1 Biologische Rücklösung vor der Desintegration

Während des kombinierten Betriebs des Rücklösereaktors mit anschließender Desintegrationsstufe galt es u. a. die Aufenthaltszeit des Reaktors mit dem Durchfluss der Desintegration abzustimmen. In den durchgeführten Versuchen wurde aus der biologischen Rücklösung bei erreichter Maximalkonzentration an $P_{gel.}$ eine definierte Menge ÜSS entnommen und in der Desintegrationsstufe im Kreislauf beschallt. So konnte zusätzlich die Auswirkung der Beschallungsdauer mit erfasst werden.

Durch den Betrieb der Desintegrationsstufe nach der biologischen Rücklösung sollte das biologisch nicht zurückgelöste Phosphat durch einen mechanischen Zellaufschluss verfügbar gemacht werden bzw. in Lösung gehen.

ARA ohne Simultanfällung

Bei der ARA ohne Simultanfällung konnte davon ausgegangen werden, dass ein relativ großer Anteil des gesamten Phosphors bereits biologisch umgesetzt wird. Die mit Ultraschall behandelte Probe wurde nach biologischer Rücklösung von vier Tagen dem Rücklösereaktor nach Durchmischung entnommen und der Desintegration zugeführt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die $P_{gel.}$ -Konzentration sowie den gelösten CSB-Wert in Abhängigkeit von der Beschallungsdauer.

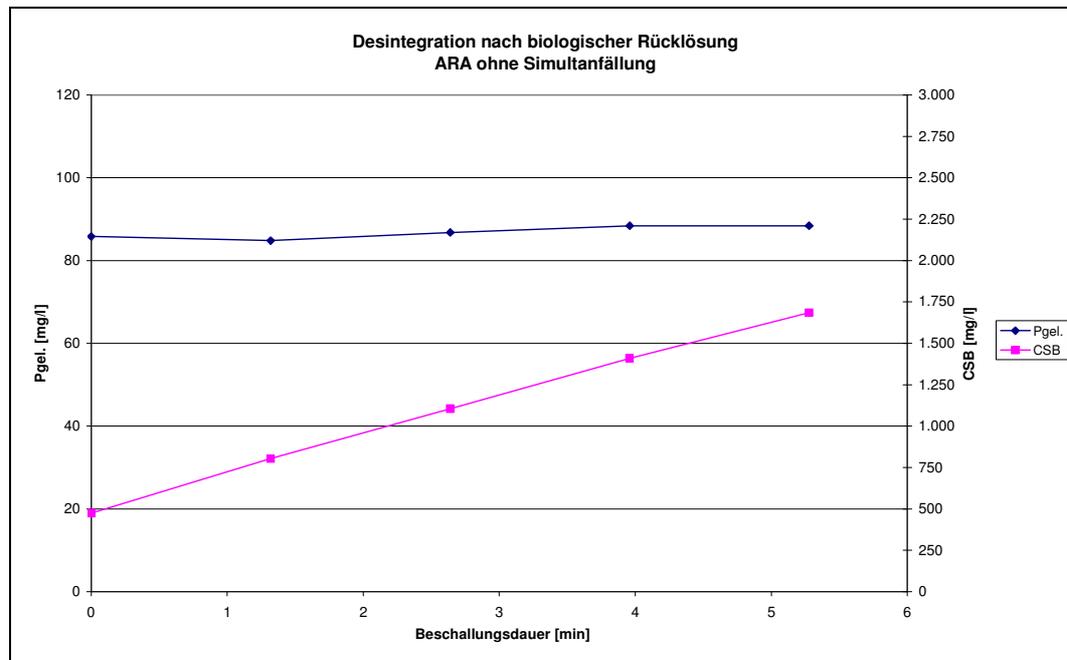


Abb. 34: Verlauf der $P_{gel.}$ -Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration nach biologischer Rücklösung (ARA ohne Simultanfällung)

Durch die biologischen Rücklösung von vier Tagen wurde eine gelöste Phosphat-Konzentration von ca. 85 mg/l erreicht. Diese Werte entsprechen in etwa den in den Versuchen zur biologische Rücklösung erreichten Ergebnissen. Durch die anschließende Ultraschalldesintegration mit einer Beschallungsdauer von bis zu 5 Minuten (Energieeintrag von maximal 70 kWh/m³) konnte keine Steigerung der Phosphat-Konzentration erreicht werden. Ein Zellaufschluss fand jedoch im gleichen Umfang wie in den Versuchen zur Ultraschalldesintegration statt; dieses verdeutlicht der CSB-Wert der gelösten Probe, der von 20 mg/l bis auf ca. 1.700 mg/l linear ansteigt.

Die folgende Abbildung stellt das max. Phosphor-Rückgewinnungspotential sowie die Phosphat-Konzentrationen und CSB-Werte nach den verschiedenen Anlagenstufen dar.

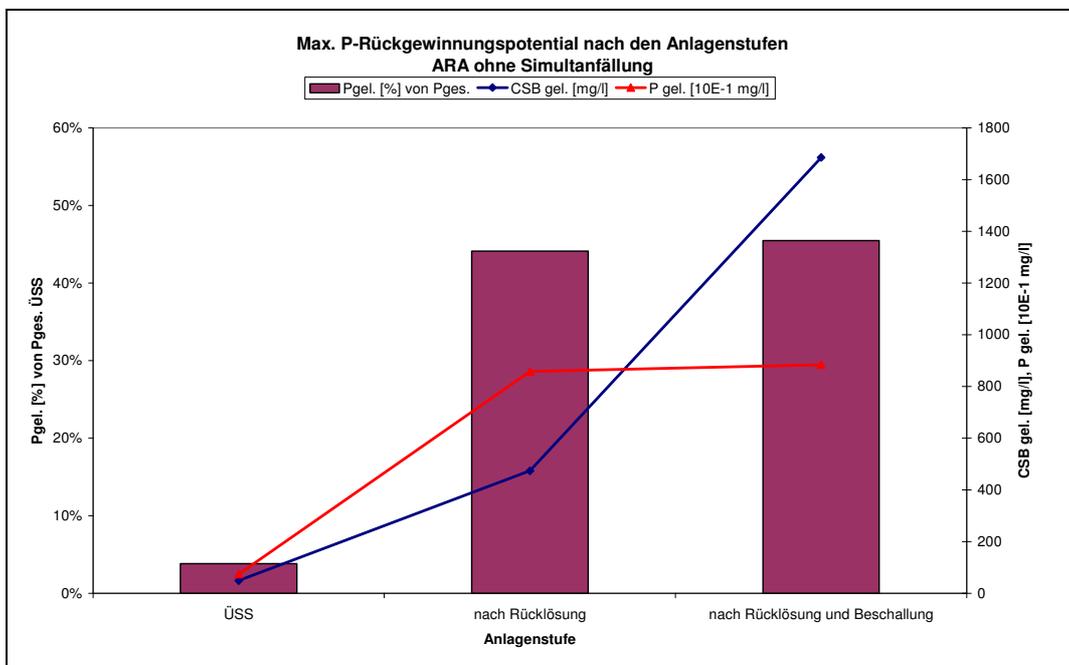


Abb. 35: Phosphat-Rückgewinnungspotential und Konzentrationen nach den unterschiedlichen Anlagenstufen (ARA ohne Simultanfällung)

In dieser Übersicht wird deutlich, dass P-Rückgewinnungspotential von ca. 3 % im ÜSS nach biologischer Rücklösung auf ca. 40 % ansteigt, eine weitere Steigerung durch die Ultraschalldesintegrationsstufe jedoch trotz Zellaufschluss nicht erfolgt.

ARA mit Simultanfällung

Bei der ARA mit Simultanfällung konnte davon ausgegangen werden, dass ein relativ geringer Anteil des gesamten Phosphors bereits biologisch umgesetzt wird. Es wurde geprüft, ob und in welchem Maße eine Steigerung der in der Lösung enthaltenen Phosphat-Konzentration mit Hilfe der Ultraschallbehandlung möglich ist. Auch hier wurde die Probe aus der biologischer Rücklösung nach vier Tagen entnommen und der Desintegration zugeführt.

Durch die vor der Desintegration stattfindende biologische Rücklösung wurde eine $P_{\text{gel.}}$ -Konzentration von ca. 20 mg/l erreicht, was den bisher mit diesem Schlamm erreichten Ergebnissen entspricht. Durch die anschließende Ultraschalldesintegration mit einer Beschallungsdauer von bis zu 5 Minuten (Energieeintrag bis zu 70 kWh/m³) erfolgte hier sogar eine Verminderung des gelösten Phosphates bis auf 10 mg/l, was vermutlich auf physikalische Refixierungsvorgänge zurückzuführen ist. Der CSB-Wert verdeutlicht, dass zumindest ein geringer Zellaufschluss bewirkt wurde.

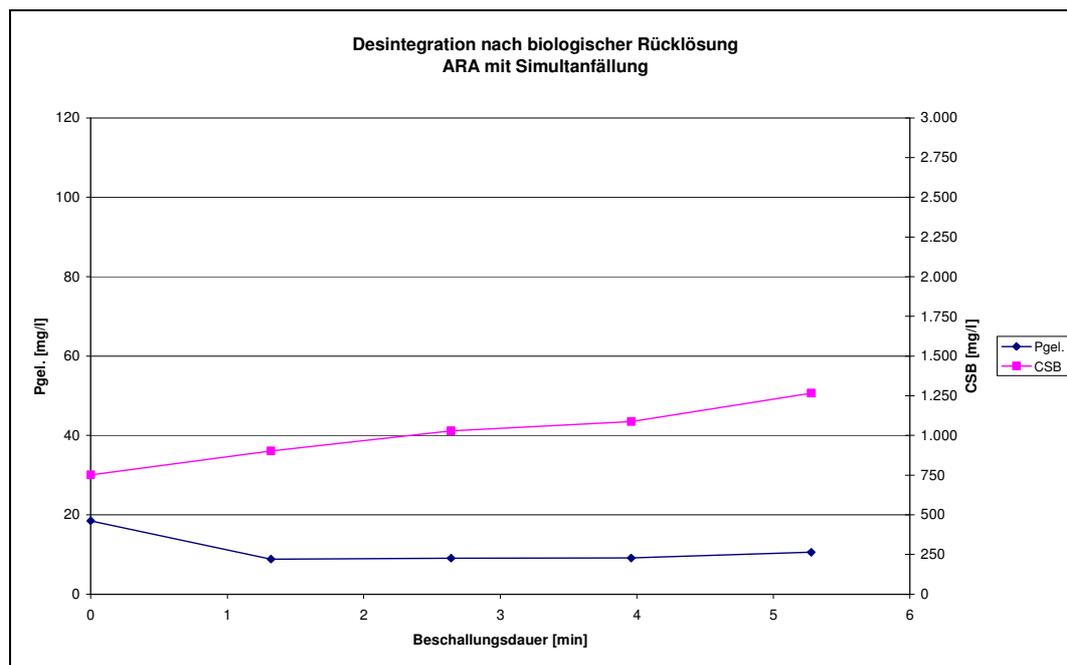


Abb. 36: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$ -Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration nach biologischer Rücklösung (ARA mit Simultanfällung)

Die folgende Abbildung stellt für die ARA mit Simultanfällung das max. Phosphor-Rückgewinnungspotential sowie die Phosphat-Konzentrationen und CSB-Werte im Ablauf der Anlagenstufen dar und verdeutlicht nochmals die bereits anhand der Konzentrationen erkennbaren Effekte.

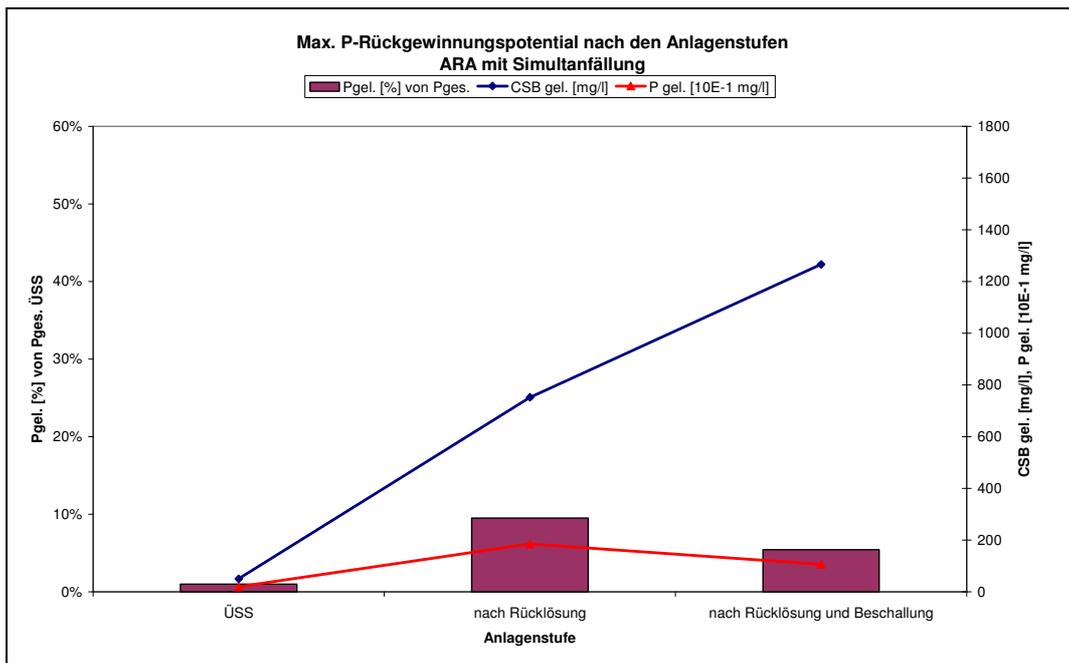


Abb. 37: Max. Phosphat-Rückgewinnungspotential und Konzentrationen nach den unterschiedlichen Anlagenstufen (ARA mit Simultanfällung)

Analog zu den vorherigen Untersuchungen mit ÜSS der ARA ohne Simultanfällung steigt das P-Rückgewinnungspotential nach biologischer Rücklösung bis auf ca. 10 % (entspricht ca. 21,5 g/(E•a)) an. Durch eine weitere Behandlung mit Ultraschall wurden die im Schlamm vorhandenen Zellen zwar aufgeschlossen, eine Steigerung der in Lösung gehenden Phosphat-Konzentration konnte jedoch nicht erreicht werden.

Damit kann folgende Schlussfolgerung bzgl. der Verfahrensanordnung „Biologische Rücklösung vor Ultraschall-Desintegration“ gezogen werden:

- Eine im Anschluss an eine biologische Rücklösung durchgeführte Ultraschall-Desintegration bewirkt keine weitere Phosphat-Freisetzung. Die CSB-Werte steigen jedoch an, was einen stattfindenden Zellaufschluss belegt.

5.3.2 Betrieb der Desintegration vor der biologischen Rücklösung

Im Folgenden wird der kombinierte Betrieb des Rücklösereaktors mit vorgeschalteter Desintegrationsstufe dargestellt. In den durchgeführten Versuchen wurde der biologische Rücklösereaktor mit in der Desintegrationsstufe beschalltem ÜSS beschickt. Durch den vorgeschalteten Betrieb der Desintegrationsstufe sollte der CSB-Gehalt durch einen mechanischen Zellaufschluss verfügbar gemacht werden und in der biologischen Rücklösestufe als Substrat dienen. Durch einen gesteigerten Anteil an exter-

nen Kohlenstoffquellen konnte wie in Kap. 5.1.3 beschrieben eine leicht gesteigerte biologische Rücklösung erreicht werden. In wie weit sich ein Zellaufschluss zusätzlich bemerkbar machen würde, wurde in zwei Versuchsreihen mit Schlamm der ARA ohne und mit Simultanfällung untersucht.

ARA ohne Simultanfällung

Die nachfolgende Abbildung zeigt die $P_{\text{gel.}}$ -Konzentration sowie den gelösten CSB-Wert im Verlauf über die Rücklösedauer. Der eingesetzte ÜSS wurde im Vorfeld zur Rücklösung in der Desintegrationsstufe mit einer Dauer von 20 Sekunden (ca. 9 kWh/m^3) beschallt.

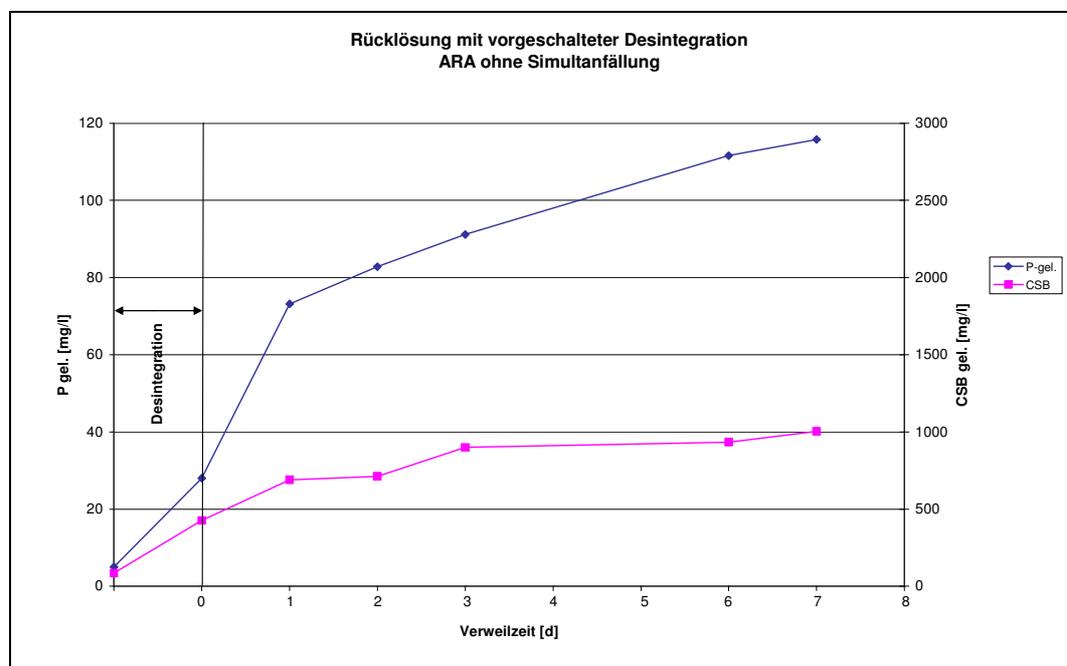


Abb. 38: Verlauf der $P_{\text{gel.}}$ -Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration vor biologischer Rücklösung (ARA ohne Simultanfällung)

Durch die Beschallung wurde eine Steigerung des CSB-Wertes von ca. 85 mg/l auf ca. 430 mg/l erreicht. Es stand somit die 5-fache Menge an Kohlenstoff für die anschließende biologische Rücklösung zur Verfügung. Zusätzlich wurde eine leichte P-Rücklösung bewirkt. Während der biologischen Rücklösung stieg die Phosphat-Konzentration während der biologischen Rücklösung von 28 mg/l auf ca. 115 mg/l und lag damit 15 bis 20 % oberhalb der im Durchschnitt bei Vergleichsversuchen (ohne vorherige Desintegration bzw. Substratzugabe) erzielten Konzentrationen.

Aus den gemessenen Konzentrationen ergeben sich die in Abb. 39 dargestellten max. Rückgewinnungspotentiale.

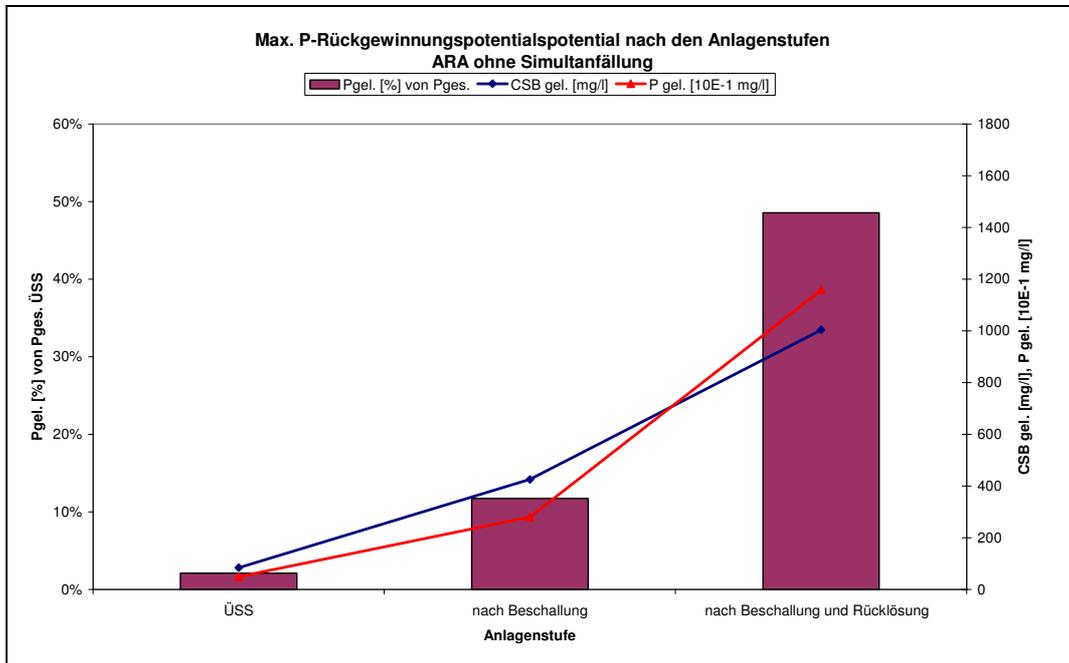


Abb. 39: Max. Phosphat-Rückgewinnungspotential und Konzentrationen nach den unterschiedlichen Anlagenstufen (ARA ohne Simultanfällung)

Dabei zeigt sich ein anderes Bild als bei einer auf die biologische Rücklösung folgenden Desintegration (siehe Abb. 35). Das P-Rückgewinnungspotential steigt von ca. 2 % im ÜSS auf ca. 12 % (entspricht ca. 64 g/(E•a)) nach der Desintegration und auf etwa 50 % (270 g/(E•a)) nach der anschließenden biologischen Rücklösung an.

ARA mit Simultanfällung

Analog zum zuvor beschriebenen Versuch wurde der eingesetzte ÜSS vor der Beschickung des Rücklösereaktors in der Desintegrationsstufe mit einem Energieeintrag von 10 kWh/m³ beschallt.

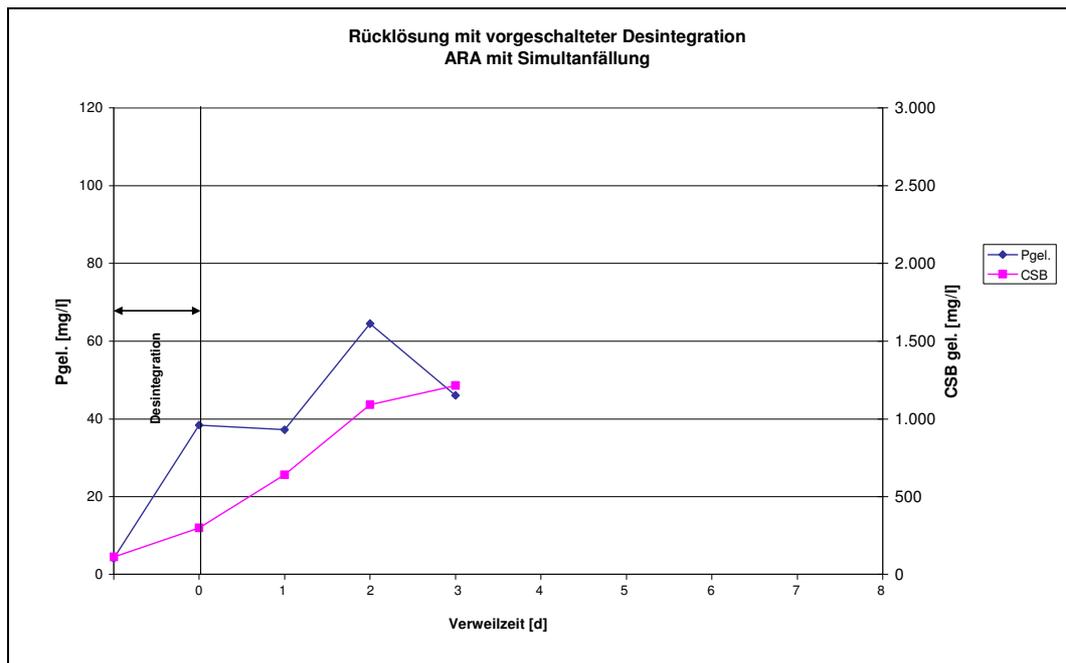


Abb. 40: Verlauf der P_{gel.}-Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration vor biologischer Rücklösung (ARA mit Simultanfällung)

Durch die Beschallung wurde eine Steigerung des CSB-Wertes von ca. 115 mg/l auf ca. 300 mg/l erreicht. Es stand somit etwa die 2,5-fache Menge an Kohlenstoff für die anschließende biologische Rücklösung zur Verfügung. Während der Verweilzeit im Rücklösereaktor stieg der CSB-Wert weiter auf einen Wert von ca. 1.215 mg/l. Die Phosphat-Konzentration stieg durch die Desintegration auf ca. 40 mg/l, durch die anschließende Rücklösestufe auf ca. 65 mg/l. Dieser Wert lag damit ca. 40 bis 50 mg/l oberhalb der im Durchschnitt bei Vergleichsversuchen festgestellten Konzentrationen. Eine Steigerung der biologischen Rücklösung durch vorherige Desintegration konnte demnach insbesondere bei ÜSS der ARA mit Simultanfällung festgestellt werden. Das max. Rückgewinnungspotential (Abb. 41) lag mit etwa 20 % (entspricht ca. 50 g/(E•a)) oberhalb der mit biologischer Rücklösung erzielten Potentiale anderer Versuchsreihen.

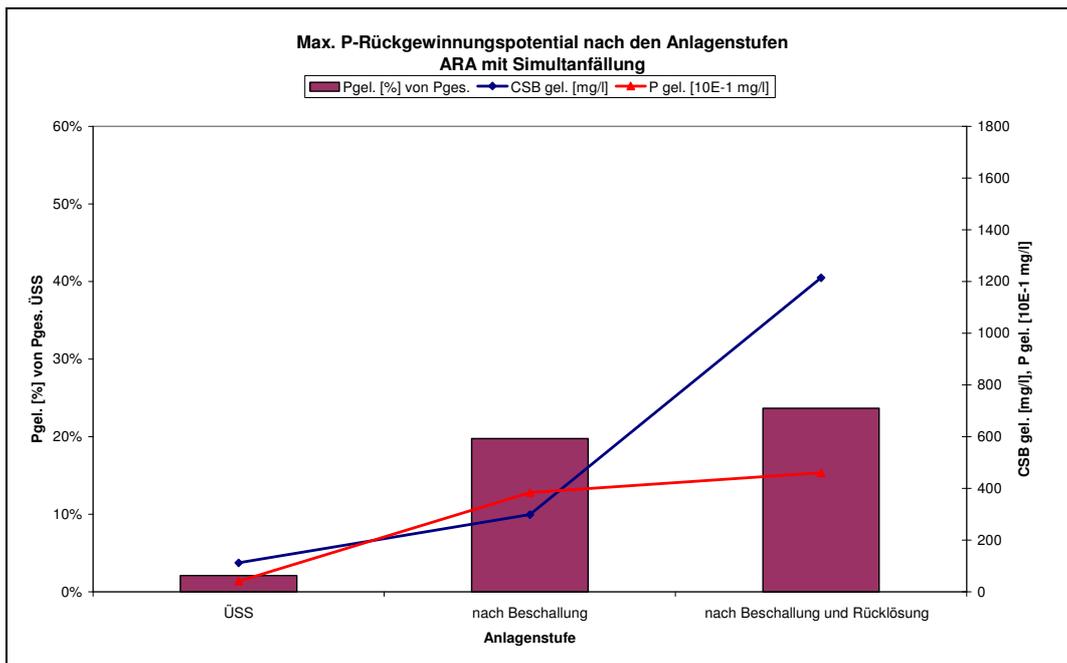


Abb. 41: Max. Phosphat-Rückgewinnungspotential und Konzentrationen nach den unterschiedlichen Anlagenstufen (ARA mit Simultanfällung)

Zur Verfahrenskombination mit vorgeschalteter biologischer Rücklösung und anschließender Ultraschalldesintegration kann abschließend festgehalten werden:

1. Durch vorhergehende Ultraschalldesintegration wurde eine Steigerung der biologischen Rücklösung bei ÜSS der ARA ohne Simultanfällung um bis zu 20 %, bei ÜSS der ARA mit Schlammbehandlung um bis zu 50 % erreicht. Das Rückgewinnungspotential bei Schlamm der ARA mit Simultanfällung lag mit ca. 20 % dennoch sehr niedrig.
2. Eine Beschleunigung der biologischen Rücklösung konnte nicht festgestellt werden.

5.3.3 Kombination von Desintegration und biologischer Rücklösung durch Kreislaufbetrieb

Als dritte Variante einer Verfahrenskombination wurde die biologische Rücklösung und die Ultraschalldesintegration im Kreislauf gefahren (Beginn mit Desintegration). Bei dieser Versuchsreihe wurde der gesamte Inhalt der Rücklösebehälter täglich einmal durch die Desintegrationsstufe geleitet.

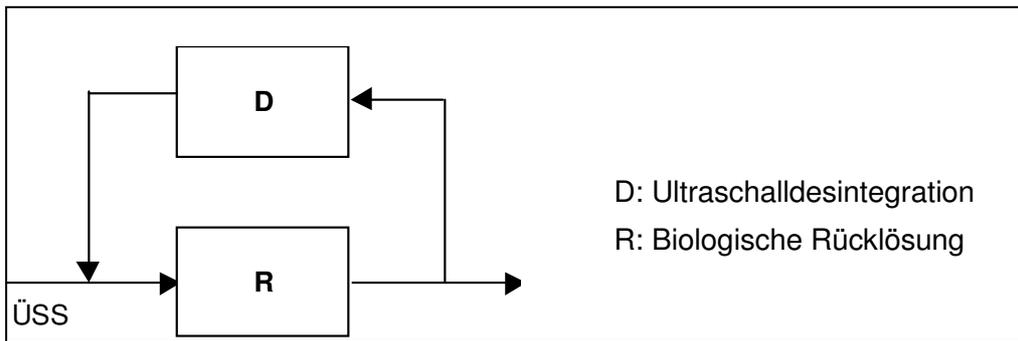


Abb. 42: Fließbild der Kombination von Desintegration und biologischer Rücklösung durch Kreislaufbetrieb

Die Beprobung der Anlage erfolgte aus dem Rücklösereaktor jeweils nach Durchmischung.

ARA ohne Simultanfällung

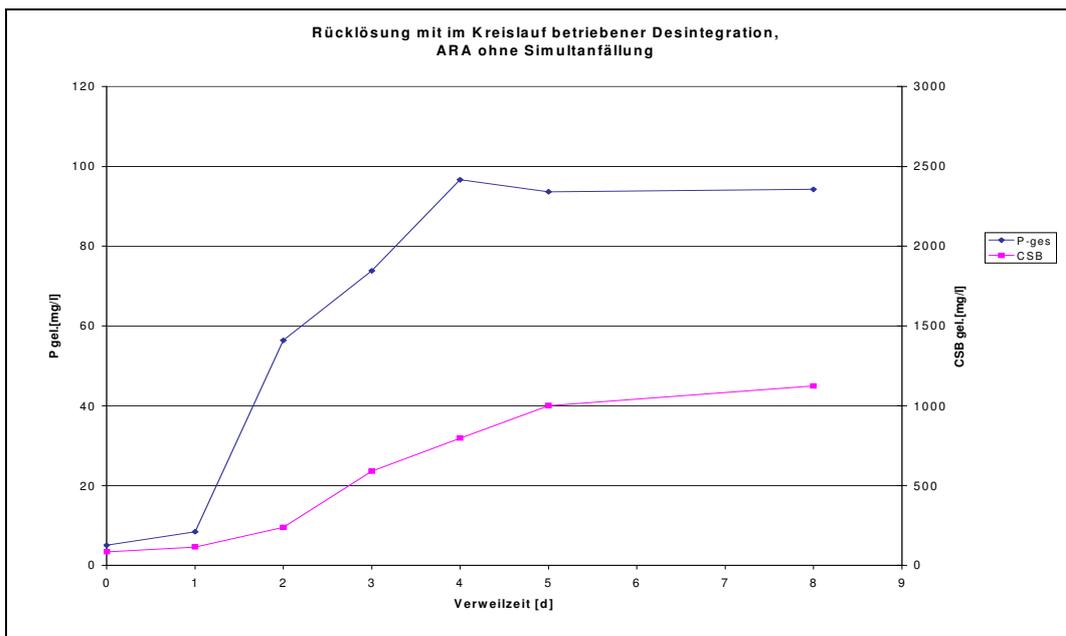


Abb. 43: Verlauf der $P_{gel.}$ -Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration im Kreislauf mit biologischer Rücklösung (ARA ohne Simultanfällung)

Gegenüber der einmaligen Desintegration des Schlammes vor Befüllung des Rücklösereaktors (vgl. Abb. 38) konnte damit keine relevante Steigerung erreicht werden. Die maximale Phosphat-Konzentration wurde nach vier Tagen mit knapp 100 mg/l gemessen (Abb. 43).

Aufgrund der geringfügigen Unterschiede wird an dieser Stelle auf Darstellung des Rückgewinnungspotentials verzichtet und auf Abb. 45 verwiesen.

ARA mit Simultanfällung

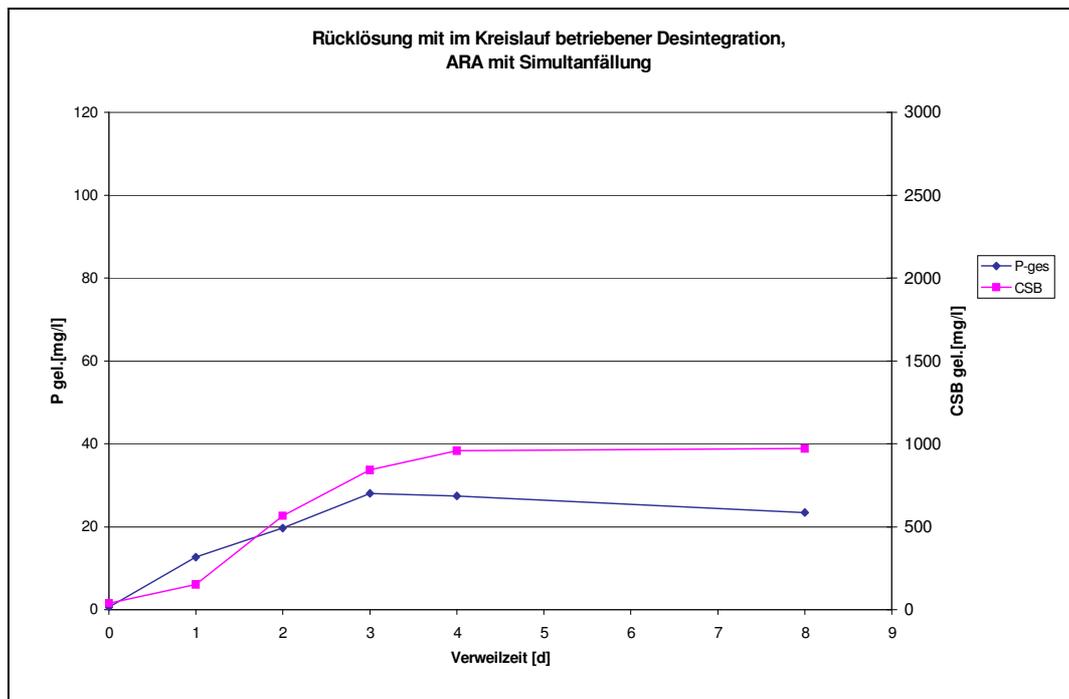


Abb. 44: Verlauf der P_{gel}-Konzentration und des CSB-Wertes bei Desintegration im Kreislauf mit biologischer Rücklösung (ARA mit Simultanfällung)

Bei analoger Behandlung des ÜSS der ARA mit Simultanfällung lag die in der filtrierten Probe gemessene Phosphat-Konzentration sogar deutlich unterhalb des Vergleichswertes bei einmaliger Desintegration vor der Rücklösung. Die maximale Phosphat-Konzentration wurde bereits nach drei Tagen mit knapp 30 mg/l gemessen und lag damit ca. 20 mg/l unterhalb der Vergleichskonzentration.

Die bei der Kreislaufführung beider Verfahrensstufen gewonnenen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei Kreislaufführung des ÜSS durch Desintegration und biologische Rücklösung lag die Endkonzentration des gelösten Phosphates im Bereich der biologischen Rücklösung mit einmaliger vorheriger Desintegration. Eine wiederholte Desintegration bringt keine weitere Steigerung der P-Rückgewinnung.

5.4 Auswirkungen der Desintegration auf den Reinigungsprozess und die Schlammeigenschaften

Durch den Aufschluss des Überschussschlammes werden dessen Eigenschaften signifikant verändert. Folgende Auswirkungen einer Ultraschalldesintegration sind bekannt und wurden in unterschiedlichen Untersuchungen bereits nachgewiesen:

- Rückbelastung der Abwasserreinigungsanlage mit Stickstoff, CSB und Phosphor⁶
- Positive als auch negative Beeinflussung des Entwässerungsverhaltens
- Erhöhung der spezifischen Konditionierungsmittelmengen
- Mögliche Freisetzung und Aufkonzentrierung von bislang gebundenen Schadstoffen, wie z. B. Schwermetalle
- Verringerung der Schlammviskosität

Im vorliegenden Vorhaben wurde zu einigen der genannten Aspekte erste Daten ermittelt, andere nur theoretisch betrachtet. Insgesamt sind die Aspekte aber in der praktischen Umsetzung noch zu untersuchen.

5.4.1 Reinigungsprozess

Da das untersuchte Verfahren auf der Behandlung von Überschussschlamm beruht, ist ein direkter Einfluss auf den Reinigungsprozess infolge des Phosphat-Entzugs nicht gegeben, da der Überschussschlamm dem Reinigungsprozess entzogen wird. Indirekte Einflüsse bestehen jedoch aufgrund der Rückführung des bei der Eindickung des Überschussschlammes abgezogenen Schlammwassers. Dieses Schlammwasser wird i. d. R. dem Zulauf der Abwasserreinigungsanlage zugeleitet und ist aufgrund von Rücklösungen von organischen Verbindungen sowie Stickstoffverbindungen höher belastet als der Zulauf der Anlage. Die folgende Tabelle stellt mittlere prozentuale Veränderungen der Rückbelastung bei ARA`n mit Desintegration vor der Faulung dar.

⁶ Die Rückbelastung mit Phosphor scheidet aus, da nach der Desintegrationsstufe eine Phosphat- Fällung erfolgt

Tab. 10: Einfluss der Desintegration auf die Rückbelastung nach einer anaeroben Stabilisierung [ATV, 2001]

Probe	nicht desintegriert	mech. desintegriert	mittlere relative Abweichung
TKN [mg/l]	156-680	204-822	+28 %
CSB _{filtriert} [mg/l]	35-253	46-283	+38 %
PO ₄ -P [mg/l]	24-251	20-208	-9 %

Durch die Desintegration erhöht sich der Anteil an feinpartikulären Substanzen innerhalb des Schlammwassers, wodurch eine Abtrennung z. B. durch Kammerfilterpressen deutlich erschwert wird. Dies hat einen höheren Feststoffanteil im Trübwasser (aus der Schlammbehandlung abgezogenes Wasser) und somit eine erhöhte Rückbelastung an CSB und Stickstoff zur Folge. Beim Phosphat ist auch nach bisherigen Erfahrungen von keiner erhöhten Rückbelastung auszugehen (vgl. Tab. 10), was vermutlich auf Refixierungsvorgänge (physikalische Adsorptionsprozesse) in der Faulung bzw. Reaktion mit überschüssigem Fällmittel zurückzuführen sein dürfte.

Im vorliegenden Fall des gezielten Einsatzes der Desintegration zur P-Rückgewinnung wird das durch die Desintegration freigesetzte Phosphat anschließend sofort dem Wasser durch eine Fällung entzogen. Inwieweit ein Einfluss auf die Fermentation infolge des Einsatzes von phosphatarmen Überschussschlamm z. B. in Form verringerter Abbautätigkeit gegeben ist, wäre zu prüfen.

Die folgende Tabelle zeigt die im Ablauf der unterschiedlichen Verfahrensstufen gemessenen Konzentrationen in der filtrierten Probe. Es wurden neben dem CSB-Wert als organischen Parameter die Stickstoffparameter N_{ges.}, NH₄-N und NO₃-N bestimmt.

Tab. 11: Mögliche Rückbelastungen zur ARA

Verfahren	Parameter	Werte	ARA mit Simultanfällung	ARA ohne Simultanfällung	Verfahren	Parameter	Werte	ARA mit Simultanfällung	ARA ohne Simultanfällung
Rücklösung	CSB [mg/l]	Anzahl:	4	4	Desintegration nach Rücklösung	CSB [mg/l]	Anzahl:	2	3
		min:	77	307			min:	971	1435
		mittel:	484	2495			mittel:	1119	3413
	max:	1006	5326	max:		1266	7120		
Nges.[mg/l]	Anzahl:	3	2	Nges.[mg/l]	Anzahl:	2	2	2	
	min:	56	67		min:	84	94		
	mittel:	86	137		mittel:	99	94		
NH4-N [mg/l]	Anzahl:	4	2	NH4-N [mg/l]	Anzahl:	2	2	45	
	min:	5,53	13		min:	62	48		
	mittel:	52	87		mittel:	77	51		
NO3-N [mg/l]	Anzahl:	4	2	NO3-N [mg/l]	Anzahl:	2	3	5,3	
	min:	alle Werte	5,3		min:	alle Werte	5,3		
	mittel:	<5	5,3		mittel:	<5	5,3		
Desintegration	CSB [mg/l]	Anzahl:	13	10	Desintegration vor Rücklösung	CSB [mg/l]	Anzahl:	1	3
		min:	86	352			min:	-	717
		mittel:	797	3671			mittel:	1214	2889
	max:	2303	13418	max:		-	7080		
Nges.[mg/l]	Anzahl:	4	2	Nges.[mg/l]	Anzahl:	1	2	<20	
	min:	5,1	81		min:	-	22		
	mittel:	90	123		mittel:	139	43		
NH4-N [mg/l]	Anzahl:	4	3	NH4-N [mg/l]	Anzahl:	1	2	2,1	
	min:	0,24	4,3		min:	-	18		
	mittel:	7,4	17		mittel:	128	33		
NO3-N [mg/l]	Anzahl:	3	4	NO3-N [mg/l]	Anzahl:	1	2	<5	
	min:	alle Werte	2,0		min:	-	4,1		
	mittel:	<5	5,7		mittel:	<5	8,1		
		max:		max:	-				

Die oben dargestellten Untersuchungsergebnisse zur Rückbelastung beziehen sich auf das bei der Voreindickung abgezogene Schlammwasser. Die bei der Voreindickung abgezogene und dem Zulauf zugeleitete Wassermenge liegt im Bereich von 92 % der Gesamtschlammwassermenge (ausgehend von einer Voreindickung auf TS=5% und einer Entwässerung auf TS=30%) und ist damit der relevante Anteil des Gesamtschlammwassers. Die Rückbelastungen aus dem Schlammwasser der Voreindickung liegen in Bezug auf die Zulauffrachten einer ARA in folgenden Bereichen:

- CSB- Rückbelastung 13 bis 19 % der CSB- Zulauffracht
- N_{ges.}- Rückbelastung 28 bis 44 % der N_{ges.}- Zulauffracht

Die organische- und die Stickstoff- Rückbelastung lagen bei den Versuchen damit deutlich höher als in der Literatur angegebene Werte (ATV-Arbeitsblatt A 131, Literaturwerte für gesteigerte Rückbelastungen durch Desintegrationen beruhen i. W. auf einem Anlagenbetrieb im Nebenstrom) und müssen grundsätzlich bei einer Dimensionierung der Abwasserreinigungsanlage bzw. bei einer Erweiterung um eine Phosphorrückgewinnungsstufe berücksichtigt werden.

Für eine Anlage zur P-Rückgewinnung ist weiterhin zu berücksichtigen, dass durch die P-Fällung des phosphatreichen Schlammwassers ggf. eine Rückführung an überschüssigen Fällmittel in den Zulauf der ARA erfolgen kann. Dadurch würde eine P-

Rückgewinnung wiederum beeinträchtigt werden. Es ist daher darauf zu achten, einen möglichst geringen β -Wert ($\text{mol Me/ mol P}_{\text{ges.}}$) bei der Fällmitteldosierung nach einer P-Rückgewinnungsstufe zu wählen. Die Einstellung der Dosierung sollte während des Einfahrbetriebes einer Verfahrensstufe zur P-Rückgewinnung erfolgen.

5.4.2 Schlammeigenschaften

Ein Einfluss der mechanischen Desintegration auf die Schlammeigenschaften des Überschussschlammes ist u. a. in folgenden Punkten gegeben:

- Stabilisierungsverhalten
- Absetzeigenschaften
- Entwässerungsverhalten

Die durch die mechanische Vorbehandlung verursachte erhöhte Bioverfügbarkeit organischer Stoffe im Klärschlamm führt zu einer Beschleunigung der anaeroben Abbauprozesse (Unterstützung der Hydrolyse) und/oder zu einem weitergehenden Abbau der organischen Inhaltsstoffe im Faulbehälter. Der Umfang dieser Verbesserung hängt neben der hydraulischen Aufenthaltszeit im Faulbehälter vor allem von den Schlammeigenschaften (Schlammalter, Anteil der fakultativ anaeroben Organismen etc.) ab. Je nach Schlamm-eigenschaft kann demnach eine Reduktion der Fauldauer von 3 bis 15 Tagen erreicht werden. Die relative Steigerung des Abbaugrades (bei einer Aufenthaltsdauer von 20 d) liegt im Bereich von 10 bis 30 %. Durch die Steigerung des Abbaugrades des Faulschlammes kann die Faulgasproduktion im Bereich 15 bis 50 % gesteigert werden [ATV, 2001]. Bei sehr hohen Fauldauern über 20 Tagen wurde keine wesentliche Steigerung des Abbaugrades und des Faulgasanfalls festgestellt. Ein mechanischer Zellaufschluss eignet sich daher insbesondere bei geringen Aufenthaltszeiten im Faulbehälter. Im hier untersuchten Verfahrenskonzept wird ein Teil der durch Desintegration in Lösung gegangenen CSB-Verbindungen mit dem Schlammwasser vor der Faulstufe abgetrennt. Die Auswirkungen wären in diesem Fall daher noch gesondert zu untersuchen.

Untersuchungen zum Einfluss von Ultraschall-desintegration auf die Absetzeigenschaften liegen insbesondere in Bezug auf Blähschlammproblematik vor. Hier belegen mehrere Untersuchungen, dass durch die mechanische Desintegration von ÜSS eine Verbesserung des Absetzverhaltens erzielt werden kann.

Tab. 12: Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zur Verbesserung des Absetzverhaltens [ATV,2001]

Schlamm	Energie	Schlammindex [ml/g]			Quelle
	Installierte Leistung; Leistungsdichte; spezifische Energie	Unbehandelt	Desintegriert	Verbesserung	
ARA 1 Überschuss- schlamm	1 kW, Schwinger; ~ 0,35 W/cm ² ; ~ 0,9 kWh/kg _{mt}	120	99	17,50%	Günthert & Osswald, 1999
ARA 2 Überschuss- schlamm	1,1 kW, Schwinger; ~ 0,4 W/cm ² ; ~ 0,7 kWh/kg _{mt}	114	93	18,40%	
ARA 3 Überschuss- schlamm	0,8 kW, Schwinger; ~ 0,34 W/cm ² ; ~ 0,1 kWh/kg _{mt}	151	125	17,20%	
Schwimm- schlamm	0,19 - 0,69 kWh/kg _{mt}	200	125	37,50%	Müller et al., 1999
Blähschlamm	11,6 kWh/m ³ ~ 5,6 kWh/kg _{mt}	233	128	45%	Tiehm et al., 1998
Blähschlamm	nicht bekannt	450 bzw. 600	270 bzw. 240	40 bzw. 60 %	Laube, 1994
Blähschlamm	nicht bekannt	368	116	68,50%	Seydler & Näher, 1978

Eigene Versuche zum Einfluss der Ultraschall-desintegration auf das Absetzverhalten konnten eine Reduzierung des Schlammindex nicht bestätigen. Nach Ultraschall-desintegration des ÜSS der ARA mit Simultanfällung wurde nach einem Energieeintrag von 1,8 kWh/kg_{mt} eine Steigerung des Schlammindex von 20 bis 25 % (Steigerung von ca. 150 ml/g auf ca. 190 ml/g) festgestellt. Nach einem Energieeintrag von 2,8 kWh/kg_{mt} betrug die Steigerung sogar 40 %. Hieraus lässt sich schließen, dass ein sehr hoher Energieeintrag bei „normaler“ Schlammstruktur einen eher negativen Einfluss auf das Absetzverhalten hat.

Wird die mechanische Klärschlamm-desintegration vor dem Hintergrund der Freisetzung von Zellinhaltsstoffen betrieben, verschlechtert sich das Entwässerungsverhalten des Klärschlammes. Die durch den Aufschluss bedingte Erhöhung feinsten Partikeln führt zu einer Erhöhung des Zwischenraumwasseranteils und zu einer Verminderung des Entwässerungsergebnisses. Bei der anaeroben Stabilisierung reagglomerieren diese Partikel an die Schlammmatrix, so dass nach ausreichender anaeroben Stabilisierung der aufgeschlossenen Schlämme keine wesentliche Veränderung des Feststoffaustrages gegenüber unbehandelten Schlämmen zu erwarten ist. In den Untersu-

chungen der ATV [ATV, 2001] wurde ein geringer Rückgang des Entwässerungsergebnisses festgestellt (siehe Tab. 13).

Die untersuchten Schlämme wiesen im Mittel ein um 6 % geringeres Labor-Entwässerungsergebnis ($TR_{\text{Entw.}}$) im Vergleich zu den unbehandelten Schlämmen auf.

Tab. 13: Entwässerungsverhalten [ATV, 2001]

Probe	nicht aufgeschlossen	mechanisch aufgeschlossen	Mittelwerte/mittlere relative Veränderung in +- %
Aufschlussgrad AS [%]	0	43-57	53 %
Fauldauer [d]	13-21	13-20	17 d
Abbaugrad η oTR [%]	28-34	33-49	19 %
Polymerbedarf [g/kg]	5,0-6,5	6,7-9,0	42%
Trockenrückstand $TR_{\text{entw.}}$ [g/kg]	5,8-15,4	6,1-14,5	-6 %

Mit dem mechanischen Zellaufschluss verändert sich damit auch das Konditionierungsverhalten der Klärschlämme. In Abhängigkeit vom Aufschlussgrad wurden in der Praxis ca. 40 % höhere Polymermengen zur Konditionierung der ausgefaulten Schlämme benötigt (Tab. 13), was auf die bei einem mechanischen Zellaufschluss freigesetzten schwer abbaubare polymere Substanzen zurückzuführen ist. Diese umgeben die negativ geladenen Schlammpartikel. Durch die entstehende geringere Polarität der Schlammflocken ist ein erhöhter Einsatz an Flockungshilfsmitteln erforderlich.

6 Vergleich der P-Rückgewinnung der untersuchten Verfahren

In den folgenden beiden Diagrammen erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse für die beiden betrachteten Abwasserreinigungsanlagen. Die Diagramme stellen die durch die unterschiedlichen Verfahrensstufen maximal erreichbaren P-Rückgewinnungspotentiale direkt gegenüber. Sie wurden mit den in den Versuchen jeweils maximal erreichten $P_{\text{gel.}}$ -Konzentrationen im Verhältnis zum P-Gehalt des Schlammes berechnet.

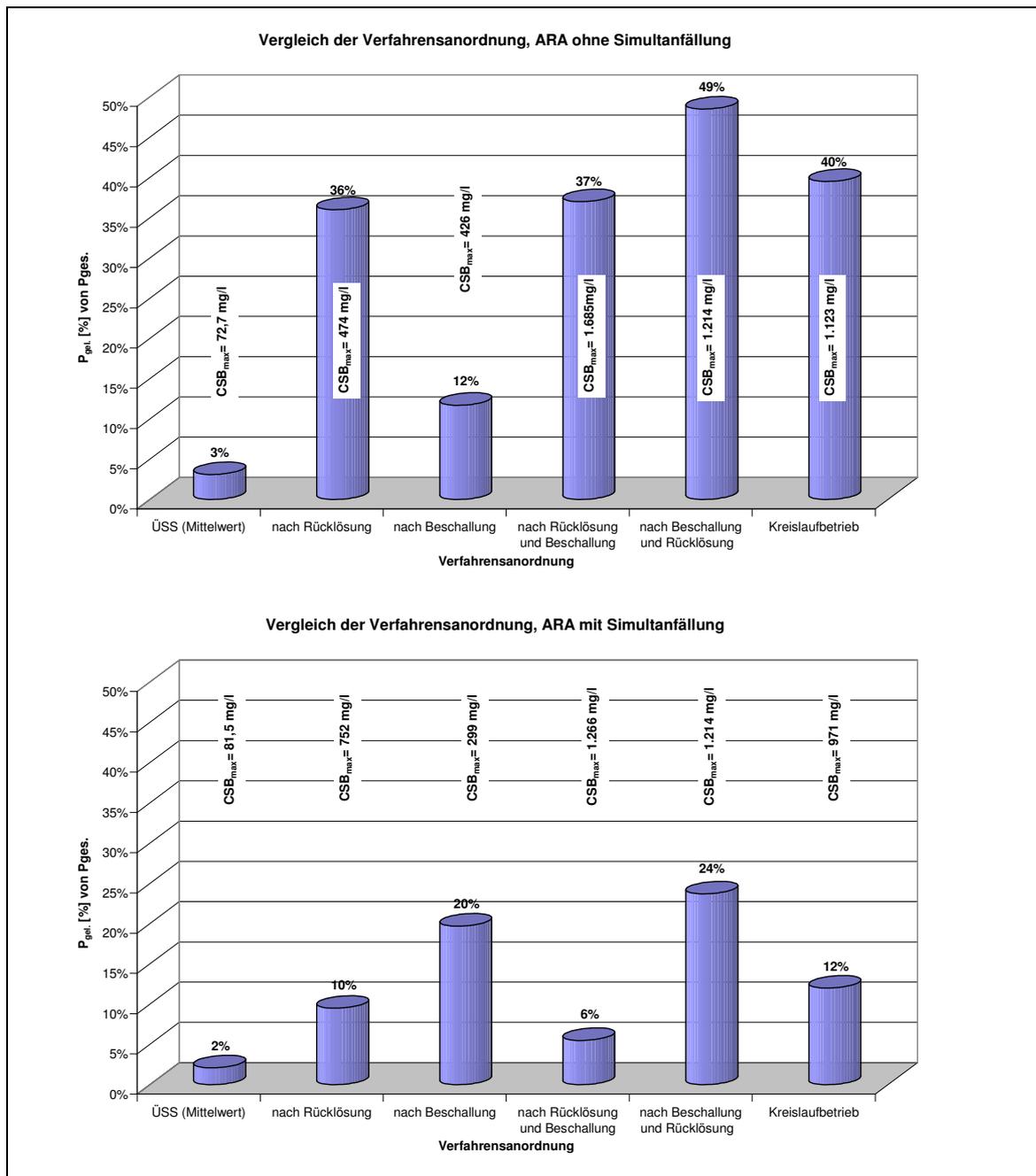


Abb. 45: Vergleich der Verfahrensanordnung

Das höchste Rückgewinnungspotential wurde bei beiden ARA'n durch eine biologische Rücklösung mit vorgeschalteter Desintegration erreicht. Folgende maximale P-Rückgewinnungspotentiale konnten erreicht werden:

- ARA ohne Simultanfällung: bis zu 50 %
- ARA mit Simultanfällung: bis zu 25 %

Generell kann festgehalten werden, dass durch die biologische Rücklösung deutlich mehr Phosphat freigesetzt wird als durch die Behandlung mit einer Ultraschall-desintegration. Bei Anlagen mit Simultanfällung ist das P-Rückgewinnungspotential mit den untersuchten Verfahren deutlich geringer, hier wurden jedoch höhere Werte mit Beschallung erreicht. Günstig wirkt sich der Einsatz einer Ultraschall-desintegration bei der Beschickung der Reaktoren aus. Durch die Erhöhung der gelösten organischen Verbindungen kann in diesem Fall scheinbar eine gesteigerte biologische Rücklösung erreicht werden. Ein Kreislaufbetrieb brachte demgegenüber keinen zusätzlichen Effekt.

Setzt man die spezifischen ÜSS-Menge bei beiden Anlagen im Sinne einer Modellanlage als konstant an und berücksichtigt darüber hinaus die Eindickung, so stellt sich der Vergleich bezogen auf die Maximalausbeute folgendermaßen dar:

- ARA ohne Simultanfällung: 266 g/(E•a)
- ARA mit Simultanfällung: 106 g/(E•a)

Die erzielbare P-Rücklösung kann damit bei Verzicht auf eine Simultanfällung und ggf. Umstellung auf Nachfällung um 100 bis 150 % gesteigert werden.

Das ermittelte max. P-Rückgewinnungspotential gibt damit aber nur den in Lösung gebrachten Phosphor wieder. Bei einer anschließenden Fällung zur P-Rückgewinnung ist mit einer Ausbeute von ca. 70 % zu rechnen, so dass sich die tatsächliche Rückgewinnung auf etwa 30 % reduzieren würde (vgl. Kap. 3.3). Neben der tatsächlichen Ausbeute ist für die Eignung des Verfahrens darüber hinaus die Qualität des nach der Fällung erzielten Produktes von Bedeutung. So ist im großtechnischen Maßstab davon auszugehen, dass nach der Schlammabtrennung auch noch partikuläre Stoffe enthalten sind, die bei der anschließenden Fällstufe ggf. mit erfasst und in das Produkt eingetragen werden, was die Reinheit nachteilig beeinträchtigen kann.

Darüber hinaus ist noch zu prüfen, ob für das Produkt für den Einsatz als Düngemittel eine ausreichende Pflanzenverfügbarkeit vorliegt.

7 Konzeptentwicklung und Kostenschätzung

In den folgenden Unterkapiteln wird dargestellt, wie sich die zuvor beschriebenen Verfahrensstufen zu P-Rückgewinnung in das Konzept einer ARA integrieren lassen. Darüber hinaus wird eine erste Kostenschätzung vorgenommen.

Für die Auslegung der einzelnen Verfahrensstufen werden beispielhaft die Daten der ARA ohne Simultanfällung angenommen. Darüber hinaus erfolgt eine einwohnerspezifische Darstellung der entstehenden Kosten. Die entstehenden Gewinne durch den Absatz des gewonnenen Phosphors sind bei den rückgewonnen P-Frachten mit etwa 2.000 bis 2.500 €/a sehr gering und wurden deshalb zunächst nicht berücksichtigt. Die Berechnung der Jahreskosten erfolgte nach LAWA „Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen“ [LAWA, 1998].

7.1 Biologische Rücklösung

Bei Erweiterung einer ARA um eine biologische Rücklösungsstufe im Hauptstromverfahren müssen neben den üblichen Anlagenstufen folgende Anlagenteile vorhanden sein bzw. ergänzt werden:

- Nachfällungsbecken
- Nachklärbecken zur Nachfällungsstufe
- Rücklösebecken inkl. Rührwerk⁷
- mechanische Eindickung
- Nachfällungsbecken zum Rücklösebecken
- Nachklärbecken zum Rücklösebecken
- MSR-Technik

Die Verfahrensstufe versteht sich inklusive Maschinentechnik sowie den Rohrleitungen.

Die folgende Abbildung zeigt das vorgesehene Verfahrensschema:

⁷ JARDIN [1995] stellte bei Rücklösevorgängen ein Tiefenprofil der P_{gel} -Konzentrationen fest. Die Ergebnisse konnten in eigenen Versuchen verifiziert werden. Um eine optimale Verteilung des gelösten Phosphates zu erhalten ist demnach eine Durchmischung des Rücklösebeckens insbesondere bei Abzug des Schlammwassers erforderlich

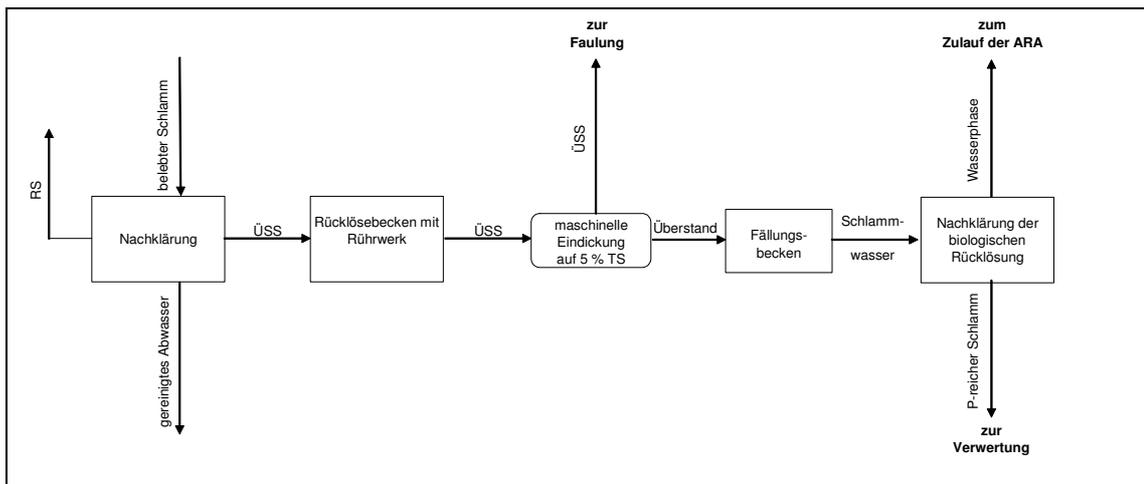


Abb. 46: Integration einer Verfahrensstufe zur biologischen P-Rücklösung

Bei der Dosierung des Fällmittels ist darauf zu achten, dass keine Überdosierung erfolgt, da die Wasserphase der Nachklärung der biologischen Rücklösung dem Zulauf der ARA zugeführt werden muss. Bei Überdosierung würde freies Fällmittel den biologischen Rücklösevorgang hemmen.

Bei einer Erweiterung einer ARA mit Simultanfällung sind Kosten für eine Nachfällstufe zu berücksichtigen. Die hiermit verbundenen Investitionskosten werden im Folgenden wie folgt abgeschätzt:

• Sedimentationsbecken, inkl. Mischreaktor:	200.000 €
• Maschinenteknik:	50.000 €
• MSR-Technik:	50.000 €
• Rohrleitung:	50.000 €
• Sonstiges:	50.000 €
<hr/>	
• Summe	400.000 €

Die in der folgenden Tabelle dargestellten Kosten verstehen sich inkl. Bau, Lieferung, Montage und Inbetriebnahme der Anlage.

Tab. 14: Zusätzliche Investitionskosten für eine Anlage zur biologischen Rücklösung
(ARA mit ca. 25.000 E)

Pos.	Bezeichnung	Größe/ Anzahl	Investitionskosten
1	Nachfällung	1.000 m ³	400.000 €
2	Rüchlösebecken	720 m ³	220.000 €
2	Maschinenteknik Fällung	25.000 E	50.000 €
4	Fällungsbecken	10 m ³ /h	50.000 €
5	Rohrleitungen	500 m	75.000 €
6	Siebtrommel (inkl. Steuerung, Pumpen)	10 m ³ /h	120.000 €
7	MSR-Technik	1 Stck.	100.000 €
-	Summe	-	1.015.000 €
8	Sonstiges	10 %	101.500 €
-	Summe	-	1.116.500 €
9	Ingenieur-Leistungen	15 %	111.650 €
-	Summe	-	1.228.150 €

Für die Dimensionierung des Rücklösebeckens wurde von einer täglichen ÜSS-Menge von 180 m³ ausgegangen. Die Aufenthaltszeit im Rücklösebehälter soll vier Tage betragen.

Für die Berechnung der Jahreskosten wurden Investitionskosten von 1.230.000 € angesetzt. Bei einer Nutzungsdauer von 15 Jahren und einem effektiven Zinssatz von 3 % errechnen sich aus den Investitionskosten die Jahreskosten von **165.000 €/a**. Enthalten sind die Betriebskosten mit 62.000 €/a.

Die angesetzten geschätzten Betriebskosten setzen sich wie folgt zusammen:

Tab. 15: Betriebskosten für eine Anlage zur biologischen Rücklösung (ARA mit ca. 25.000 E)

Strombedarf	70.000 kWh/a	10.000	€/a
Fällmittelbedarf	3.000 kg/a	12.000	€/a
Wartungs- und Instandhaltungskosten (5 % der Investitionskosten)	5 % der Investitionskosten	40.000	€/a
Summe	-	62.000	€/a

Auf der untersuchten ARA ohne Simultanfällung ist derzeit ein Voreindicker mit einem Volumen von 85 m^3 in Betrieb. Die angeführten Kosten könnten bei Nutzung der bereits vorhandenen Beckenvolumen gesenkt werden. Falls auf der betreffenden ARA eine mechanische Eindickung vorhanden ist, könnte bei Nutzung weiterhin ein großer Teil der Kosten eingespart werden. Im Fall der Nutzung einer bereits vorhandenen Zentrifuge sowie eines statischen Eindickers können die Jahreskosten auf schätzungsweise 140.000 €/a reduziert werden.

7.2 Ultraschallintegration

Im Unterschied zu üblichen Verfahren der Überschussschlammbehandlung mit Ultraschall (vor dem Hintergrund einer verkürzten Fauldauer bzw. einer erhöhten Faulgasproduktion) basiert der hier betrachtete Verfahrensansatz auf einer Behandlung im Hauptstrom, da nur so die gesamte P-Fracht im ÜSS für eine Rückgewinnung zur Verfügung steht. Die elektrische Leistung einer Ultraschallanlage muss daher bei einer Dimensionierung entsprechend erhöht werden, was z. T. erhebliche Investitionskosten zur Folge haben kann. Da Versuche zur Steigerung des TS-Gehaltes negativen Einfluss auf die gewinnbare P-Fracht hat, ist eine Reduzierung der Anlagengröße durch die Steigerung des TS-Gehaltes nicht zu empfehlen. Ein wirtschaftlicher Betrieb einer Ultraschallanlage zur P-Rückgewinnung ist daher kaum möglich.

Bei einer jährlichen ÜSS-Menge von 63.900 m^3 wäre eine 1.600 kW -Anlage zur Behandlung des ÜSS im Hauptstrom erforderlich, um einen Energieeintrag von 110 kWh/m^3 zu erreichen.

Da Anlagen dieser Größenordnung aufgrund der hohen Investitionskosten von ca. $8,5 \text{ Mio. €}$ **nicht realisierbar** sind, werden im Folgenden beispielhaft Jahreskosten für eine 160 kW -Anlage dargestellt. Eine Anlage dieser Größenordnung ist jedoch ausschließlich in der Lage, den gesamten ÜSS im Hauptstrom mit einem Energieeintrag von ca. 10 kWh/m^3 zu beschallen. Mit dem geringeren Energieeintrag ist jedoch ein deutlich reduziertes P-Rückgewinnungspotential verbunden. Die betrachtete Anlage ist analog der Anlage zur biologischen Rücklösung aufgebaut (Abb. 46), verfügt anstelle des Rücklösebeckens jedoch über eine Ultraschallintegration.

Bei Investitionskosten von ca. $1.000.000 \text{ €}$, einer Nutzungsdauer von 15 Jahren und einem effektiven Zinssatz von 3% errechnen sich die Jahreskosten zu **395.000 €/a** . Enthalten sind die Betriebskosten mit 310.000 €/a , die Strombedarf sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten beinhalten.

Die angesetzten Betriebskosten für eine 160 kW-Ultraschalldesintegration setzen sich wie folgt zusammen:

Tab. 16: Betriebskosten für eine Ultraschalldesintegrationsanlage (160 kW)

Strombedarf	1.050.000 kWh/a	160.000	€/a
Sonotrodenaustausch	1/a, 10 Sonotroden, inkl. Personal	100.000	€/a
Wartungs- und Instandhaltungskosten	1 MA/a	50.000	€/a
Summe	-	310.000	€/a

Die Jahres- und insbesondere die Betriebskosten der Ultraschalldesintegration übersteigen damit die Kosten der biologischen Rücklösung um ein Vielfaches.

7.3 Rücklösung mit vorgeschalteter Ultraschalldesintegration

Bei Erweiterung einer ARA um biologische Rücklösung mit vorgeschalteter Ultraschall-desintegration im Hauptstromverfahren muss neben den in Kap. 8.1 genannten Anlagenstufen eine Ultraschalldesintegrationsstufe installiert werden. Bei der zu installierenden Ultraschallanlage würde es sich um die in Kap. 8.2 dargestellte Anlage handeln.

Die in Abb. 47 sowie in der anschließenden Kostenbetrachtung dargestellte Verfahrensvariante beinhaltet die Behandlung des ÜSS im Hauptstrom. Vor dem Hintergrund, dass die Desintegration eine Steigerung des für eine biologische Rücklösung verwertbaren Substrates zum Ziel hat, kann ebenfalls eine Behandlung im Nebenstrom erfolgen, wodurch Kosten eingespart werden könnten. In wie weit eine Verringerung des verwertbaren Substrates Einfluss auf den Rücklöseprozess hat, müsste in Versuchen ermittelt werden.

Die Anordnung der einzelnen Verfahrensstufen im Hauptstrom werden im folgenden Verfahrensschema dargestellt:

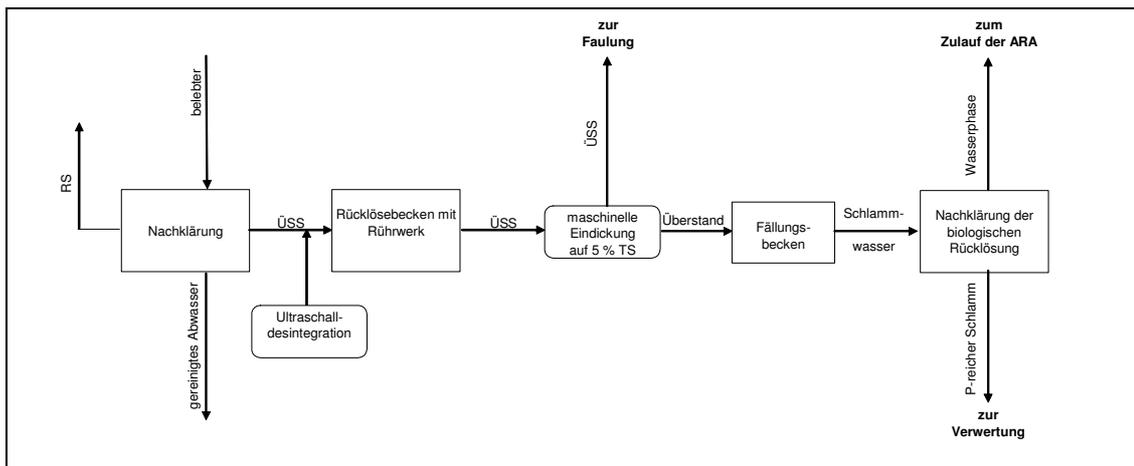


Abb. 47: Verfahrensschema für eine biologische Rücklösung mit vorgeschalteter Desintegration

Die Investitionskosten setzen sich aus den in Kap. 8.1 und 8.2 genannten Kotten zusammen und betragen inklusive Lieferung, Bau und Inbetriebnahme:

Tab. 17: Investitionskosten für eine Anlage zur biologischen Rücklösung mit vorgeschalteter Desintegration (ARA mit ca. 25.000 E)

Pos.	Bezeichnung	Anzahl/ Größe	Investitionskosten
1	Nachfällung	1.000 m ³	400.000 €
1	Ultraschall-desintegration	160 kW	1.000.000 €
2	Rüchlösebecken	720 m ³	220.000 €
3	Maschinenteknik Fällung	25.000 E	50.000 €
4	Fällungsbecken	10 m ³ /h	50.000 €
5	Rohrleitungen	500 m	75.000 €
6	Siebtrommel (inkl. Steuerung, Pumpen)	10 m ³ /h	120.000 €
7	MSR-Technik	1 Stck.	100.000 €
-	Summe	-	2.015.000 €
7	Sonstiges	10 %	201.500 €
-	Summe	-	2.216.500 €
8	Ingenieur-Leistungen	15 %	332.475 €
-	Summe	-	2.548.975 €

Bei einer Nutzungsdauer von 15 Jahren und einem effektiven Zinssatz von 3 % er rechnen sich aus den Investitionskosten von ca. 2.550.000 € die Jahreskosten von ca.

585.000 €/a. Enthalten sind die Betriebskosten angesetzt mit 372.000 €/a, die Strombedarf, Fällmittelbedarf sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten beinhalten.

Die angesetzten geschätzten Betriebskosten setzen sich wie folgt zusammen:

Tab. 18: Betriebskosten für eine Anlage zur biologischen Rücklösung mit vorgeschalteter Desintegration (ARA mit ca. 25.000 E)

Strombedarf	1.070.000 kWh/a	170.000	€/a
Fällmittelbedarf	3.000 kg/a	12.000	€/a
Wartungs- und Instandhaltungskosten (inkl. Desintegration)	Summe Kap. 8.2 u. 8.3	190.000	€/a
Summe	-	372.000	€/a

Aus dem Einsatz der Ultraschall-desintegration ergeben sich auch Einsparpotentiale in Form einer höheren Faulgasproduktion bzw. eine Reduzierung der Fauldauer (siehe Kap. 6.1.3). Diese wurden in der Kostenschätzung nicht berücksichtigt.

7.4 Darstellung der spezifischen Kosten

Geht man von den für die unterschiedlichen Verfahren ermittelten Phosphat-Rückgewinnungsfrachten aus, ergeben sich folgende Tonnage- und einwohnerspezifische Kosten:

Tab. 19: Phosphor-Rückgewinnungskosten und spezifische Einwohnerkosten

Verfahren	P-Fracht	Kosten/kg P	Kosten/E
Biologische P-Rückgewinnung	4.925 kg/a	ca. 30 bis 35 €/kg	7 €/E
P-Rückgewinnung durch Desintegration und anschließender biologischer Rücklösung	6.650 kg/a	85 bis 90 €/kg	23 €/E

Die Kosten für die Gewinnung von Phosphor aus Phosphat-Erz liegen in Europa bei ca. 0,4 €/kg. Die derzeitigen Kosten für eine Rückgewinnung von Phosphor mit den untersuchten Verfahren liegen etwa bei dem 100 bis 200-fachen des derzeitigen Marktpreises.

Neben den dargestellten Kosten für die Phosphorrückgewinnung fallen je nach erreichter Produktqualität und Verwertungsart ggf. zusätzliche Kosten für die Produktaufbereitung an. Eine Wirtschaftlichkeit der untersuchten Verfahren ist damit derzeit nicht gegeben. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Preise für Phosphor-Dünger künftig ansteigen werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass eine Wirtschaftlichkeit des Verfahrens langfristig nur durch eine Änderung der politischen Rahmenbedingungen erreicht werden kann.

8 Zusammenfassung und Fazit

Vor dem Hintergrund endlicher Phosphorvorräte und dem künftig aufgrund der erhöhten Qualitätsanforderungen verminderten Einsatz von Klärschlämmen in der Landwirtschaft werden derzeit die technischen Möglichkeiten einer Phosphor-Rückgewinnung diskutiert und geprüft. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde die P-Rückgewinnung aus der Schlammphase untersucht. Mit zwei unterschiedlichen Verfahrensansätzen soll eine gezielte Erhöhung der P-Rücklösung aus dem Überschussschlamm erreicht werden:

- biologische Rücklösung (Hydrolyse der Polyphosphate)
- Zellaufschluss mittels Ultraschall

Der in Lösung gebrachte Phosphor kann anschließend durch Fällung gewonnen werden, um ihn als Düngemittel und für Industriezwecke einzusetzen.

Die Untersuchungen wurden im halbtechnischen Maßstab mit Überschussschlamm aus zwei unterschiedlichen Abwasserreinigungsanlagen (mit / ohne P-Simultanfällung) durchgeführt. Maßstab für die Beurteilung waren die Konzentrationen an gelöstem Phosphat ($P_{\text{gel.}}$ [mg/l]) sowie die Rückgewinnungspotentiale auf der Basis des maximal in Lösung gebrachten Phosphors bezogen auf den P-Gehalt des Schlammes ($P_{\text{gel.}}$ [%] von $P_{\text{ges.}}$).

Die biologischen Rücklösevorgänge wurden durch Lagerung des Überschussschlammes in einem Rücklösereaktor unter anaeroben Bedingungen induziert. Es wurden folgende Einflussfaktoren untersucht:

- Verweilzeit
- Temperatur
- Substratzugabe
- TS-Gehalt
- Simultanfällung.

Folgende Erkenntnisse konnten im Rahmen der Untersuchungen zur biologische Rücklösung gewonnen werden:

1. Bei den biologischen Rücklösevorgängen stellte sich ein Sättigungsverlauf der gelösten Phosphatkonzentration ein. Der maximale Phosphatgehalt wurde i. d. R. nach ca. vier Tagen erreicht.
2. Bei mesophilen Verhältnissen erfolgte teilweise ein schnellerer Umsatz des in den Zellen gespeicherten Phosphors. Insbesondere bei Schlamm der ARA mit Simultanfällung fand darüber hinaus eine gesteigerte Phosphat-Rücklösung statt.
3. Durch eine Zugabe von Primärschlamm als Substrat konnten die absoluten Konzentrationen in den Rücklösereaktoren nicht erhöht werden. Es konnte jedoch eine Steigerung der TS-spezifische Rücklösung (bezogen auf den TS-Gehalt des ÜSS) und damit auch des max. P-Rückgewinnungspotentials bewirkt werden. Weiterhin wurde ein geringfügig schnellerer Umsatz des in den Zellen des ÜSS eingelagerten Phosphates festgestellt.
4. Bei Erhöhung des TS-Gehaltes (ausgehend von einem ÜSS-TS-Gehalt von 0.5 %), durch die eine Reduzierung der für eine Auslegung relevanten Beckengrößen (biologisches Rücklösebecken, Fällungsbecken) erreicht werden könnte, war zwar eine deutliche Steigerung der absoluten Phosphat-Konzentration zu verzeichnen, das Phosphor-Rückgewinnungspotential war jedoch geringer. Als Ursache wurde sowohl eine reduzierte TS-spezifische biologische Rücklösung festgestellt als auch der Effekt, dass bei einer anschließenden maschinellen Eindickung auf 5 % TS geringere Wassermengen für die P-Rückgewinnung abgetrennt werden und damit ein größerer P-Anteil im Schlamm verbleibt.
5. Bereits durch die Zugabe von geringen Fällmitteldosierungen in Form einer Simultanfällung wird eine P-Rückgewinnung durch biologische Rücklösung eingeschränkt.

Bei den Versuchen zur Ultraschall-desintegration wurde ein Aggregat der FA. Hielscher GmbH (Typ UIP 2000) eingesetzt. Auch diese Versuche wurden mit Schlamm der ARA ohne und mit Simultanfällung durchgeführt.

Die untersuchten Haupteinflussgrößen waren:

- Beschallungsdauer
- Ultraschallintensität
- TS-Gehalt
- Simultanfällung

Folgende Erkenntnisse konnten zur P-Rückgewinnung mittels Ultraschall-desintegration von Klärschlamm gewonnen werden:

1. Mit der Ultraschall-desintegration wurden in Abhängigkeit von der Beschallungsdauer CSB-Aufschlussgrade (A_{CSB}) bis zu 50 % (bei sehr hohem Energieeintrag bis zu 80 %) erzielt.
2. Mit zunehmender Beschallungsdauer (Energieeintrag) steigen die $P_{gel.}$ -Konzentrationen zunächst an und flachen nach einer Beschallungsdauer von ca. 3 bis 5 Minuten ab. Die CSB-Werte der filtrierten Probe steigen nahezu linear an.
3. Eine Abhängigkeit der $P_{gel.}$ -Konzentration von der Amplitudenhöhe konnte nur bei Schlämmen der ARA mit Simultanfällung nachgewiesen werden. Es wurde aber eine definitive Abhängigkeit zwischen CSB-Wert der gelösten Probe und damit dem Aufschlussgrad der Zellen und der Amplitudenhöhe der Ultraschall-desintegration festgestellt.
4. Durch eine Steigerung des TS-Gehaltes des ÜSS konnte kein energetisch effektiverer Einsatz des Ultraschall-desintegrators erreicht werden. Bei höherem Feststoffanteil wurden zwar höhere $P_{gel.}$ -Konzentrationen ermittelt, die TS-bezogene P-Freisetzung war aber selbst bei gleichem TS-spezifischen Energieeintrag geringer. Dadurch wurde bei höherem TS-Gehalt auch ein geringeres P-Rückgewinnungspotential ermittelt, wobei sich hier zusätzlich wiederum die bei einer anschließenden Eindickung auf 5 % TS geringere abgetrennte Wassermenge auswirkt.
5. Auch bei der Ultraschall-desintegration wirkte sich die Simultanfällung in Form von niedrigeren Phosphor-Rückgewinnungspotentialen aus.
6. Im Vergleich zu der durch biologische Rücklösung erzielbaren Rückgewinnung lag die mit Ultraschall erzielte P-Rückgewinnung deutlich niedriger.

Für die untersuchten Verfahrenskombinationen „Ultraschalldesintegration vor der biologischen Rücklösung“, „Ultraschalldesintegration nach der biologischen Rücklösung“ sowie „Kreislaufbetrieb beider Stufen“ kann festgehalten werden, dass ausschließlich durch die Verfahrensanordnung einer Ultraschalldesintegration im Zulauf zu einem biologischen Rücklösebehälter eine Steigerung des Phosphor-Rückgewinnungspotentials erreicht werden kann. Die durch die Beschallung bedingte Steigerung des für die biologische Rücklösung verfügbaren Substrates oder auch die Steigerung der biologischen Aktivität hat eine Erhöhung des Phosphor-Rückgewinnungspotentials im Bereich von ca. 20 % zur Folge. Bei den beiden anderen Verfahrensvarianten wurde kein positiver Einfluss durch die Kombination festgestellt.

Als abschließendes Fazit lässt sich festhalten, dass mit beiden untersuchten Verfahren ausschließlich bei Ausschluss einer Simultanfällung relevante Phosphor-Rückgewinnungspotentiale erreicht werden. Je nach den vorliegenden örtlichen Gegebenheiten wäre eine Umstellung der Verfahrenstechnik der ARA in Form einer Integrierung einer Nachfällungsstufe erforderlich. Im Vergleich beider Verfahren war die Rückgewinnungsrate bei der biologischen Rücklösung höher als mittels Desintegration.

Bei ARA'n mit ausschließlich biologischer P-Elimination konnte durch die Behandlung des ÜSS im Hauptstrom Phosphor von bis zu 50 % für eine Rückgewinnung in Lösung gebracht werden. Das ermittelte max. P-Rückgewinnungspotential gibt damit aber nur den in Lösung gebrachten Phosphor wieder. Es ist jedoch anzumerken, dass in einer Nachfällungsstufe i. d. R. etwa 70 % gefällt werden, so dass sich die tatsächliche Rückgewinnung auf etwa 30 % reduzieren würde. Neben der tatsächlichen Ausbeute ist für die Eignung des Verfahrens die Qualität des nach der Fällung erzielten Produktes von großer Bedeutung. So ist davon auszugehen, dass nach der Schlammabtrennung in großtechnischen Anlagen auch noch partikuläre Stoffe enthalten sind, die bei der anschließenden Fällstufe ggf. mit erfasst und in das Produkt eingetragen werden. Dies beeinträchtigt die Reinheit und damit die Vermarktung des Produktes nachteilig. Darüber hinaus ist noch zu prüfen, ob für das Produkt für den Einsatz als Düngemittel eine ausreichende Pflanzenverfügbarkeit vorliegt.

Die im Rahmen der halbtechnischen Versuche gewonnenen Erkenntnisse müssten im Weiteren in einem größerem Maßstab verifiziert werden. Dabei sollen als weitere Komponenten u. a. ein Fermenter sowie eine Fällungsstufe zur P-Elimination aus dem Schlammwasser ergänzt werden.

Bei Weiterführung des Untersuchungsansatzes sollten im Wesentlichen Untersuchungen erfolgen zu:

- Jahreszeitliche Einflüsse
- Energieverbrauch
- Prozessstabilität
- Wirkungsgrad
- Produktqualität (Phosphatschlamm)
- Auswirkungen auf den Fermentationsprozess
- Rückbelastung der Abwasserreinigungsanlage
- Beeinflussung des Entwässerungsverhaltens
- Auswirkungen auf Konditionierungsmittelmengen
- Freisetzung oder Aufkonzentrierung von Schadstoffen

Des Weiteren sollten Optimierungen sowohl hinsichtlich der Verfahrens- und Prozesstechnik als auch der Mess-, Steuer- und Regeltechnik erfolgen.

Eine Wirtschaftlichkeit der untersuchten Verfahren ist derzeit nicht gegeben. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Preise für Phosphor-Dünger künftig ansteigen werden. Darüber hinaus wäre für die tatsächliche Umsetzung eine politische Weichenstellung erforderlich.

9 Literaturverzeichnis

- ATV-DVWK Arbeitsblatt A-131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, 2000
- ATV-DVWK Grundlagen der vermehrten biologischen Phosphorelimination, ATV-Schriftenreihe 03, 1996
- ATV-DVWK Phosphorrückgewinnung, KA 6/2003
Arbeitsgruppe AK 1.1
- ATV-DVWK Verfahrensvergleich und Ergebnisse der mechanischen Klärschlamm-Integration, KA 03/2001
Arbeitsgruppe AK 1.6
- Baumann, P. Phosphatelimination aus Abwasser, Oldenbourg – Industrieverlag GmbH, München, 2003
- Brett, S. Et al Phosphorus Removal and Recovery Technologies, Centre Européen d'Etudes de Polyphosphates (CEEP), Selper Publications, 1997
- Buer, T Rückgewinnung von Phosphor aus der wässrigen Phase, in: Stepkes, H. Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlamm-Asche, Schriftenreihe WAR, Band 147
Institut WAR, TU Darmstadt, 2002
- Buer, T., Montag, D., Seyfried, A. Gewinnung von Phosphat und anderen Nährstoffen aus Klärschlamm: Techniken und Wirtschaftlichkeit, Institut für Siedlungswasserwirtschaft Aachen (ISA), in BMU/ BMVEL Wissenschaftliche Anhörung, Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes, Bonn, 2001
- Cornel, P., Schaum, C. Phosphor in der Umwelt – Eine Übersicht, in Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlamm-Asche, Schriftenreihe WAR, Band 147, Institut WAR, TU Darmstadt, 2002

- Eder, B.,
Günthert, F., W. Klärschlammminimierung durch Zellaufschluss mit Ultraschall, in: KA Wasserwirtschaft-Abwasser-Abfall, 3/ 2003
- Esch, B.,
Loll, U. Aktuelle Klärschlammengen und -qualitäten sowie Entsorgungswege in Deutschland, in: KA Wasserwirtschaft-Abwasser-Abfall, 11/ 2001
- Hosang, W.,
Bischof, W. Abwassertechnik, 11. Auflage, B.G. Teubner, Stuttgart, 1998
- Jardin, N. Untersuchungen zum Einfluss der erhöhten biologischen Phosphorelimination auf die Phosphordynamik bei der Schlammbehandlung, Schriftenreihe WAR, Band 87, TU Darmstadt, 1995
- Jardin, N. Phosphorbilanz bei der Abwasser- und Klärschlammbehandlung, in Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall, Symposium Berlin, 2003
- Jasinski, S. Phosphate Rock, U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summeries, 2002
- Jeanmaire, N. Recycling of removed phosphorus, Centre Européen d.Etudes de Polyphosphates (CEEP), 2001
- Klee, O. Angewandte Hydrobiologie, Thieme Verlag, Stuttgart, 1991
- Kopp, J. und Dichtl, N. Influence of Surface Charge and Exopolysaccharides on the Conditioning Characteristics of Sewage Sludge. Chemical Water and Wastewater Treatment V, Hahn, H.H.; Hoffmann, E.; Odegaard, H. (Eds.), Proceedings of the 8th Gothenburg Symposium 1998, Sept. 7–8 1998, Prag, Czechoslovakia
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien), Kulturbuchverlag Berlin, 1998

- Lehne, G.
Müller, J.
Schwedde, J.
Battenberg, S.
Näveke, R.
- Beurteilung des Aufschluss Erfolges und Vergleich verschiedener Verfahren des Klärschlammaufschlusses, in Klärschlamm-Integration – Forschung und Anwendung, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig, Heft 61, 1998
- Müller, J.,
Dichtl, N.
- Belastung der Schlammwässer und Möglichkeiten der Gewinnung von Wertstoffen, in Klärschlamm-Integration – Forschung und Anwendung, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig, Heft 61, 1998
- Müller, J.
Schwedde, J.
- Grundlagen und Wirkungen der Klärschlammzerkleinerung, in Klärschlamm-Integration – Forschung und Anwendung, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig, Heft 61, 1998
- Müller, J.,
Lehne, G.
- Klärschlamm-Integration mit Ultraschallhomogenisatoren, in: Bathen, D., .Innovative Energieträger in der Verfahrenstechnik., 1/2000
- Müller, J.,
Lehne, G.
- Verfahren und Anwendungsgebiete der mechanischen Klärschlamm-Integration, in: KA 4/2000
- Neis, U.,,
Nickel, K.,
Thiem, A.
- Ultrasonic Disintegration of sewage sludge for enhanced anaerobic biodegradation in: Advances in sonochemistry, Ultrasonic in environmental protection, Volume 6, 2001
- Nickel, K.,
Thiem, A.,
Neis, U.
- Pilotversuche zur Beschleunigung des anaeroben Abbaus von Klärschlamm durch Ultraschall, in Klärschlamm-Integration – Forschung und Anwendung, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig, Heft 61, 1998

- Recktenwald, M. KREPRO - Ein Verfahren zur Reduktion des Schlammvolumens und Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe, in: Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammasche, Schriftenreihe WAR, Institut WAR, TU Darmstadt, 2002
- Roeleveld, P. Recovery of Phosphate, Dutch Foundation of Applied Water Research, Euro-CASE Workshop, 2001
- Schaum, C. Diskussion der Verfahren zur P-Rückgewinnung, in: Schriftenreihe WAR, Band 147, Institut WAR, TU Darmstadt, 2002
- Schneider, D. Technik des Ultraschallaufschlusses von Klärschlämmen, in Klärschlamm-Desintegration – Forschung und Anwendung, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig, Heft 61, 1998
- n. n. Phosphathöchstmengenverordnung, PHöchstMengV, BGBl I S. 664, 1980