

Gutachten zur Rücklösung von Phosphor im Gewässer aus Feststoffen von Kläranlagenabläufen

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG)

Stand: 11.03.2015



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut **IWAR**

Prof. Dr.-Ing. Peter Cornel
Dr.-Ing. Christian Schaum
Dipl.-Ing Robert Lutze

Franziska-Braun-Str. 7
D-64287 Darmstadt
Germany

www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	2
1. Einleitung und Zielsetzung	3
2. Material und Methoden	5
Versuchsaufbau und -durchführung zur Untersuchung der P-Rücklösung	5
Analytik	6
Feststoffprobenahme	7
Fließgewässerprobe/Nullprobe	8
3. Ergebnisse.....	9
Charakterisierung der Feststoffproben	9
Darstellung der Messergebnisse zur Phosphorrücklösung.....	9
Einfluss der Reaktionsdauer auf die Phosphorrücklösung.....	10
Einfluss der Temperatur auf die Phosphorrücklösung	11
Einfluss der untersuchten Feststoffproben	12
Einfluss der Feststoffkonzentration auf die Phosphorrücklösung.....	13
4. Zusammenfassung und Schlussfolgerung	15
5. Literatur	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen P-Konzentration und TS im Kläranlagenablauf	4
Abbildung 2: Phosphor-Rücklösung in Abhängigkeit der Zeit, der Temperatur, der Pges-Konzentration für die beiden untersuchten Feststoffproben	10
Abbildung 3: Phosphorrücklösung aus der Feststoffprobe A+B mit Pges = 0,4 mg/L bei verschiedenen Temperaturen	12
Abbildung 4: Phosphorrücklösung in allen Ansätzen der Feststoffproben A + B.....	12
Abbildung 5: Darstellung der Phosphorrücklösung aus Feststoffprobe B und einer Belebtschlammprobe dieser Kläranlage bei einer Startkonzentration von Pges = 0,4 mg/L und T = 25°C	13
Abbildung 6: PO ₄ -P-Konzentrationen nach 7 bzw. 14 Tagen in Ansätzen der Feststoffprobe B (Pges = 0,2 - 0,4 mg/L) resp. Belebtschlamm (Pges = 0,4 - 40 mg/L) bei T = 25°C..	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsaufbau und Versuchsablauf	6
Tabelle 2: Zusammensetzung der Feststoffproben	9

1. Einleitung und Zielsetzung

Im Jahresbericht des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie (HLUG) heißt es im Beitrag „Wasserrahmenrichtlinie – Die Entwicklung des hessischen Bewirtschaftungsplans und Maßnahmenprogramms“, dass zur Verminderung der Nährstoffbelastung die Emissionen von Kläranlagen bezüglich ortho-Phosphat und Gesamtphosphor durch „Optimierung der P-Elimination an kommunalen Kläranlagen“ sowie durch weitere Maßnahmen minimiert werden sollen. Hintergrund der Maßnahmen ist, dass die Phosphoreinträge aus Kläranlagen ein bedeutender Faktor für die Eutrophierung ist, die das mit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) im Jahr 2000 erklärte Ziel der „Erreichung des guten Zustands“ bzw. des „guten Potenzials“ in allen Gewässern bis 2015 in Frage stellen, wie in einer vom HLUG beauftragten Studie zur Umsetzung der WRRL einleitend festgehalten wird, vgl. Dahlem (2008).

Die eutrophierende Wirkung geht in aller Regel von gelösten Phosphorkonzentrationen in Form von ortho-Phosphat ($\text{PO}_4\text{-P}$) aus (Bezeichnung in der Wasserwirtschaft als SRP = soluble reactive phosphorus). Partikulär gebundene Phosphoreinträge (Bezeichnung in der Wasserwirtschaft als PP = particulate phosphorus) in Gewässern können jedoch durch chemische, physikalische und biologische Prozesse mit der Zeit in ortho-Phosphat umgewandelt bzw. rückgelöst werden und tragen somit zur Eutrophierung bei.

Phosphorgrenzwerte im Ablauf von Kläranlagen beziehen sich gemäß Abwasserverordnung [AbwV 1997] auf die gesamte Phosphorkonzentration, also gelöste und partikulär gebundene Phosphorverbindungen. Die einzuhaltenden Konzentrationen und Frachten von Phosphor im Ablauf von Kläranlagen sind abhängig von der Kläranlagengröße.

Die Phosphorkonzentrationen im Ablauf teilen sich in die Fraktionen der gelösten Phosphate, gelöster anderer Phosphorverbindungen (z.B. organische Phosphorverbindungen, Phosphonate; normalerweise bzgl. Phosphor in geringen Konzentrationen) und ungelöste partikuläre Phosphorverbindungen infolge von Feststoffabtrieb, erfasst als Trockensubstanz (TS). Abbildung 1 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem partikulär gebundenen Phosphor (P_{ges}) und der TS-Konzentration. Kläranlagen mit funktionierender Feststoffabscheidung erreichen ca. 10 mg/L Abtrieb an Feststoffen [eawag 2008]. Bei 3 % P-Gehalt entspricht dieser Feststoffabtrieb einer Konzentration von 0,3 mg P_{ges} /L im Ablauf der Kläranlage. Für die Einhaltung eines Grenzwertes von 0,5 mg/L müsste dem entsprechend eine $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentration von < 0,2 mg/L eingehalten werden.

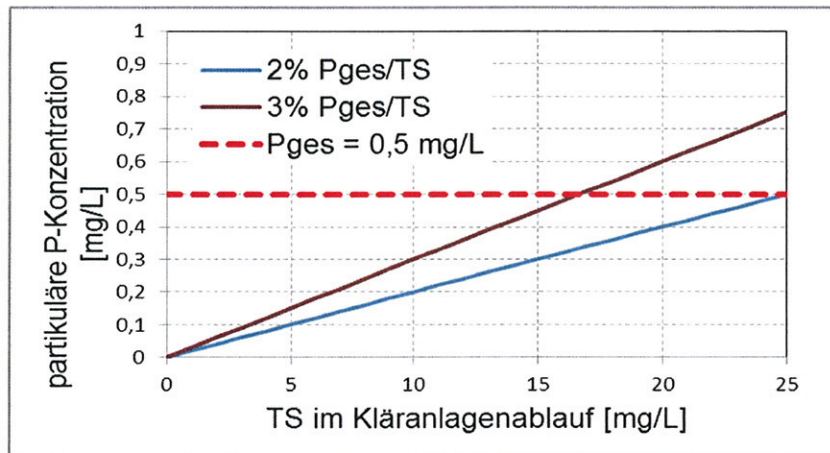


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen P-Konzentration und TS im Kläranlagenablauf

Für das Fließgewässer ist es dabei entscheidend, ob und wie schnell es zu einer Rücklösung von Phosphor aus den Feststoffen im Ablauf von Kläranlagen kommt und somit neben Phosphateinleitungen auch diese Stoffe „direkt“ zur Eutrophierung beitragen. Ziel der Untersuchungen ist die Analyse der Phosphorrücklösung aus Feststoffen kommunaler Kläranlagenabläufe unter aeroben Bedingungen. Vereinfacht wird hierbei angenommen, dass die Schwebstoffe im Wasserstrom verbleiben und nicht in das Sediment absinken. Beispielhaft wurden Feststoffe aus zwei kommunalen Kläranlagen untersucht.

2. Material und Methoden

Versuchsaufbau und -durchführung zur Untersuchung der P-Rücklösung

Der Versuchsaufbau wird zusammenfassend in Tabelle 1 dargestellt. Die Versuchsdurchführung gliedert sich in zwei zeitlich nacheinander ablaufende Untersuchungen durch die Beprobung der Abläufe an zwei Kläranlagen, wobei der Versuchsaufbau und die -durchführung identisch sind.


Aus den Feststoff- und Gewässerproben wurden zunächst die $\text{PO}_4\text{-P}$ - und P_{ges} -Konzentration bestimmt, um aus beiden Proben eine Stammlösung mit einer Gesamtposphorkonzentration von $0,4 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ zu erstellen. Aus dieser Stammlösung wurden dann drei verschiedene Ansätze mit variierenden P_{ges} -Konzentrationen als Startkonzentration von $0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$, $0,2 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ und $0,4 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ erstellt. Die Startkonzentrationen entsprechen somit der augenblicklichen Problematik hinsichtlich P_{ges} -Konzentrationen in Fließgewässern.

Diese Ansätze wurden zudem bei unterschiedlichen Temperaturen von $T = 15^\circ\text{C}$, 20°C und 25°C untersucht. Die Nullproben bestanden ausschließlich aus der filtrierten Gewässerprobe. Die Ansätze mit einer Startkonzentration von $0,2 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ wurden mit 500 ml Stammlösung und 500 ml Flussprobe erstellt. Die Ansätze mit einer Startkonzentration von $0,4 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ wurden mit 1000 ml Stammlösung angesetzt. Die Erstellung der Stammlösung und der Ansätze erfolgte am Tag der Feststoffprobenahme bei Raumtemperatur. Nach Herstellung der Ansätze erfolgte die erste Probenahme mit einem Volumen von 25 ml zur anschließenden Analytik.

Alle Ansätze wurden während des Versuchs in Sapromaten bei konstanter Temperatur mittels Rührfisch durchmischt und zur Verhinderung von Algenwachstum unter Lichtausschluss gelagert.

Parallel zu den Untersuchungen wurden für den Standort B weitere Ansätze mit Belebtschlamm als Feststoffquelle mit P_{ges} -Konzentrationen von $0,4 \text{ mg/L}$, $4,0 \text{ mg/l}$ und 40 mg/L erstellt mit dem Ziel auch höhere Konzentrationen abdecken zu können.

Tabelle 1: Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Gewässerprobe	gering belastetes Fließgewässer als "Verdünnungswasser" mit $P_{ges} \sim 0,05 \text{ mg/L}$								
Feststoffprobe nach Zentrifugation	TR ~ 10 %								
Herkunft des Feststoffeintrags	Standort A: Ablauf einer Kläranlage mit Al-Fällung zur P-Elimination Standort B: Ablauf einer Kläranlage mit Fe-Fällung zur P-Elimination								
P_{ges}-Konzentration in Ansatz zum Start des Versuchs	0,05 mg/L (Nullprobe)			0,2 mg/L			0,4 mg/L		
Variation der Temperatur	15 °C	20 °C	25 °C	15 °C	20 °C	25 °C	15 °C	20 °C	25 °C
Anzahl der Ansätze	1x	1x	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x
Gesamtanzahl der Ansätze	15								
Probenahme und Analytik	täglich: Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffkonzentration 2-/3-tägig: P_{ges} und $PO_4\text{-P}$ 2-/3-tägig: Gewichtsbestimmung der Ansätze zur Erfassung der Verdunstung								
Versuchsaufbau & Versuchsbedingungen	<ol style="list-style-type: none"> 1. Herstellung einer Stammlösung aus Feststoff- und Gewässerprobe mit einer P_{ges}-Konzentration von 0,4 mg/l 2. Gewässerprobe in 1L-Enghalsflasche aus Glas 3. Zudosierung der Stammlösung zum Erhalt der festgelegten P_{ges}-Startkonzentration; 4. Temperierung und Mischung jedes Ansatzes über die Versuchsdauer (O_2-Konzentration > 5,0 mg/L); 5. Versuchsdauer ca. 2 Wochen 								
									

Analytik

Die Analytik der Phosphorkonzentrationen erfolgte sowohl im Umweltlabor des Instituts IWAR der TU Darmstadt als auch im Labor des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie. Eine Kontrolle der Analytik erfolgte durch diese Parallelmessung sowie durch Doppelbestimmung der untersuchten Ansätze.

$PO_4\text{-P}$

Für die Bestimmung von $PO_4\text{-P}$ wurden die Proben zunächst mit einem Spritzenvorsatzfilter mit einer Porengröße von $d_p = 0,45 \mu\text{m}$ der Firma VWR filtriert. Anschließend erfolgte die Bestimmung analog zur DIN EN ISO 6678 (2004) mittels Spektralphotometers DR 2800 der Firma Hach Lange GmbH.

Gesamt-Phosphor (P_{ges})

Der P_{ges} wurde sowohl gemäß DIN EN ISO 6678 (2004) als auch mittels Küvettentest LCK 349 der Firma Hach Lange analysiert.

Trockenrückstand und Glühverlust

Die Bestimmungen des Trockenrückstands (TR) erfolgte nach DIN EN 12879 (2001). Die Bestimmung des Glühverlusts (GV) erfolgte nach DIN EN 12880 (2001).

pH-Wert, Temperatur und Sauerstoffkonzentration

pH-Wert und Temperatur wurden mit dem transportablen Gerät pH107 mit der dazugehörigen Elektrode SenTix 81 der Firma WTW gemessen. Sauerstoffkonzentration wurden mit dem transportablen Gerät OXI197-S mit der zugehörigen Elektrode CellOx325 der Firma WTW gemessen.

Gewicht

Das Gewicht der Ansätze wurde alle 2 - 3 Tage mittels Waage des Typs LA6200S mit einer Genauigkeit von $d = 0,01g$ der Firma Sartorius gemessen.

Untersuchung der Feststoffproben

Die getrockneten und gemahlene Feststoffproben wurden an ein externes Labor gegeben und dort nach Königswasseraufschluss [DIN EN 13346 2001] mittels ICP-OES entsprechend der DIN EN ISO 11885 (2009) auf die Elemente Aluminium, Calcium, Eisen, Magnesium und Phosphor analysiert.

Feststoffprobenahme

Die Probennahme der Feststoffproben erfolgte im Ablauf von zwei kommunalen Kläranlagen. Kläranlage A hat dabei eine Ausbaugröße von 50.000 und Kläranlage B von 240.000 Einwohnerwerten. Neben dem Unterschied der Größenklasse der Kläranlagen unterscheiden sich beide Anlagen im Einsatz des Fällmittels für die Phosphorelimination. Kläranlage A setzt hierbei überwiegend Aluminium- und Kläranlage B überwiegend Eisensalze ein.

Die Feststoffprobe aus dem Ablauf der Kläranlage wurde mit Hilfe einer Tauchmotorpumpe zu einer hochdrehenden Röhrenzentrifuge des Typs Produktions-Zentrifuge Z der Firma Carl Padberg Zentrifugenbau GmbH gepumpt. Der Durchsatz der Zentrifuge beträgt $1 \text{ m}^3/\text{h}$ mit einer Drehzahl von ca. 17.000 min^{-1} . Die Fest-/ Schwebstoffe im Ablauf der Kläranlagen können somit auf einen Trockenrückstand (TR) bis $\text{TR} = 10 \%$ eingedickt werden, wobei der Abscheidegrad der Zentrifuge nicht bei 100 % liegt. Die Probenahme fand zu Zeitpunkten von Trockenwetterereignissen statt. Während der Probenahme wurden zudem $\text{PO}_4\text{-P}$ im Zu- und Ablauf der Zentrifuge gemessen, wobei keine Reduzierung und folglich keine zusätzliche Adsorption an den abgeschiedenen Feststoffen festgestellt werden konnte.

Nach Probenahme erfolgte die Ansetzung der Versuche innerhalb von 4 Stunden, um längere, anaerobe Phasen zu vermeiden.

Fließgewässerprobe/Nullprobe

Die Fließgewässerprobe bzw. Nullprobe wurde dem hessischen Rheinabschnitt entnommen. Der Standort wurde aufgrund seiner geringen Hintergrundbelastung an Phosphor ausgewählt. Die Probe wurde am Vortag des Versuchsstarts genommen und vor Verwendung mit einem Faltenfilter des Typs 597 ½ der Firma Whatman mit einer Partikelretention von 4 - 7 µm filtriert und ungekühlt bei ca. 20 °C gelagert.

Die Fließgewässerprobe hatte in beiden Versuchsreihen eine P_{ges} -Konzentration von $P_{\text{ges}} = 0,05 \text{ mg/L}$. In der Versuchsreihe zur Untersuchung von Feststoffen im Ablauf einer Kläranlage mit Al-Fällung lag eine $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentration von $\text{PO}_4\text{-P} = 0,04 \text{ mg/L}$ vor, während diese in der Versuchsreihe mit Feststoffen im Ablauf einer Kläranlage mit Fe-Fällung bei $\text{PO}_4\text{-P} = 0,025 \text{ mg/L}$ lag.

3. Ergebnisse

Charakterisierung der Feststoffproben

Die Zusammensetzung der Feststoffproben aus dem Ablauf der untersuchten Kläranlagen können Tabelle 2 entnommen werden. Es zeigt sich ein P_{ges} -Anteil in den Feststoffen von 2,6 bzw. 3,1 %. Diese Werte sind vergleichbar mit Untersuchungen von Durth et al. (2005). Des Weiteren ist der Einsatz des Fällmittels durch die Konzentrationen an Aluminium bzw. Eisen im Feststoff deutlich zu erkennen.

Tabelle 2: Zusammensetzung der Feststoffproben

Parameter	Einheit	Feststoffprobe A	Feststoffprobe B
TR	%	10,1	6,8
GV	%	72,5	73,1
P_{ges}	g/kg TR	30,7	26,4
Eisen	g/kg TR	6,4	23,4
Aluminium	g/kg TR	18,2	8,7
Calcium	g/kg TR	22,3	22,8
Magnesium	g/kg TR	4,5	4,9
Fe/P_{ges}	mol/mol	0,12	0,49
Al/P_{ges}	mol/mol	0,68	0,38

Darstellung der Messergebnisse zur Phosphorrücklösung

Die Phosphorrücklösung als Verhältnis aus $\text{PO}_4\text{-P}$ und P_{ges} über den Versuchszeitraum in allen Ansätzen der beiden Feststoffproben zeigt Abbildung 2. Die Sauerstoffkonzentration lag bei allen Versuchen über $c_{\text{O}_2} > 5,0 \text{ mg/L}$ und der pH-Wert zwischen 8,0 und 8,5. Phosphoreinträge durch die Verwendung der Gewässerprobe zur Verdünnung wurden im Rahmen der Datenauswertung berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass in allen Ansätzen die Phosphorrücklösung respektive Phosphatfreisetzung mit der Versuchsdauer stetig ansteigt, siehe Abbildung 2. Abhängig von der Temperatur der Feststoffkonzentration und/oder der Feststoffcharakteristik werden Rücklöseraten zwischen 35 und 85 % erreicht. Im Folgenden werden die Abhängigkeiten diskutiert.

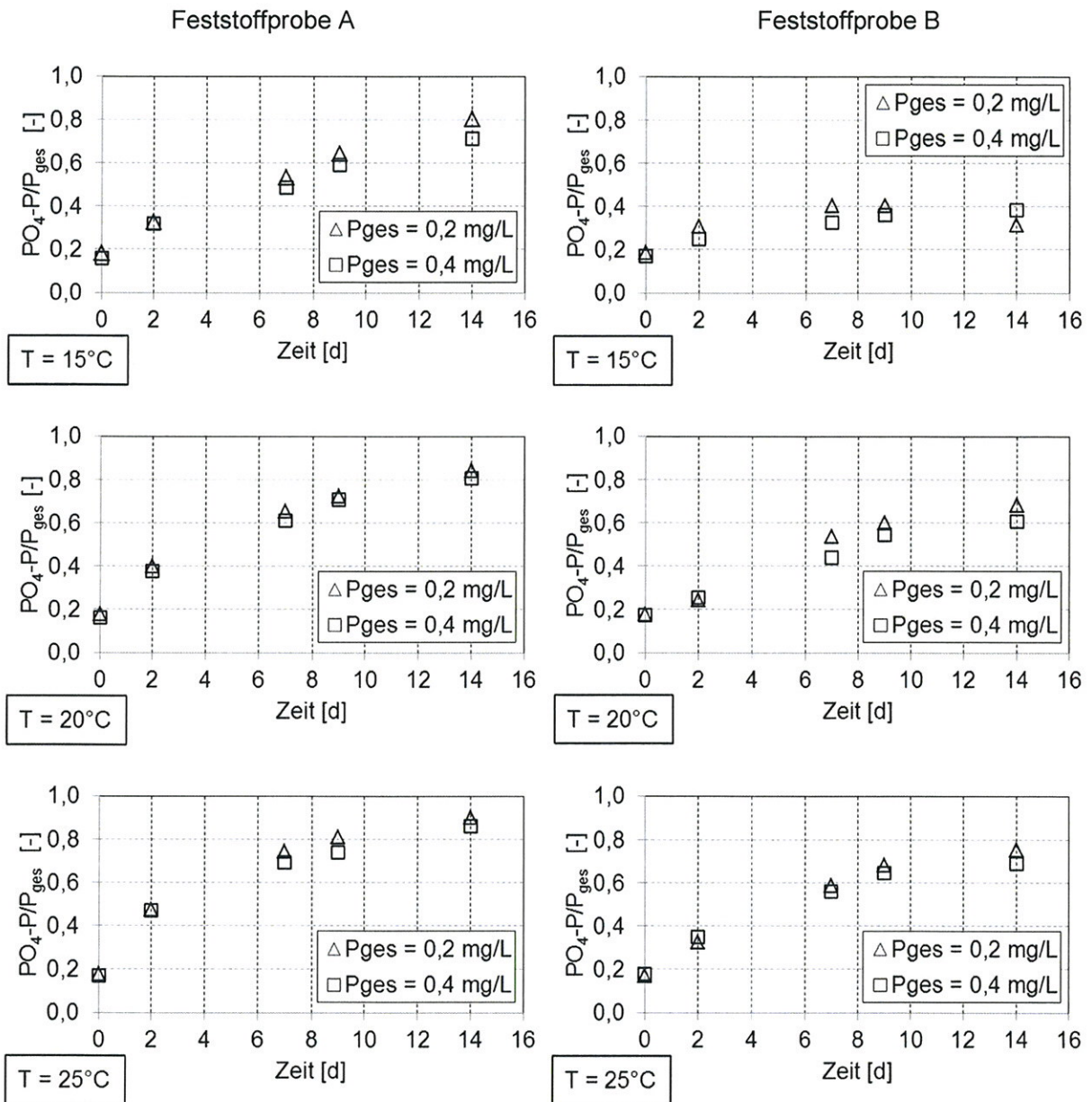


Abbildung 2: Phosphor-Rücklösung in Abhängigkeit der Zeit, der Temperatur, der P_{ges} -Konzentration für die beiden untersuchten Feststoffproben

Einfluss der Reaktionsdauer auf die Phosphorrücklösung

Alle Ansätze zeigen zum Startpunkt $t = 0 \text{ h}$ bereits ein Verhältnis von $PO_4\text{-P}/P_{ges}$ von 0,2. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass bereits während der Versuchsvorbereitung adsorbiertes Phosphat desorbiert und sich nach Verdünnung mit der Gewässerprobe ein neues Gleichgewicht zwischen Adsorption an Feststoff und der Flüssigphase einstellt. Diese Desorption könnte

während des Ansetzens der Stammlösung bzw. der Ansätze in einem Zeitraum von < 1 Stunde stattgefunden haben.

Nach 2 Tagen Versuchsdauer variieren die Rücklösungsverhältnisse bereits deutlich in den Ansätzen, was auf eine Überlagerung der „reinen“ Desorptionsprozesse durch Transformationsprozesse von partikulären Substanzen oder Freisetzungen aus Biomasse oder Zellysis hindeutet. Innerhalb der ersten 2 Tage findet bereits rund 50 % der maximal erreichten Phosphorrücklösung statt. Grundsätzlich folgen die Rücklösungskurven über die Versuchsdauer einen eher logarithmischen Verlauf und nähern sich nach 8 Tagen der maximal erreichten Phosphorrücklösung bzw. Phosphatbildung weitgehend an.

In zukünftigen Versuchen sollten diese Mechanismen weiter untersucht werden.

Einfluss der Temperatur auf die Phosphorrücklösung

Bei beiden untersuchten Feststoffproben führen höhere Temperaturen bei gleichen P_{ges} -Konzentrationen zu erhöhten Phosphorrücklösungen im gleichen Zeitraum (siehe Abbildung 3).

Bei den Untersuchungen mit der Feststoffprobe A (Aluminiumsalze als Fällungsmittel) ist der Temperatureinfluss vor allem in den ersten Tagen am größten. Hier sorgt ein Temperaturunterschied von 10 °C für eine Verdopplung der Phosphorrücklösung, vgl. $PO_4\text{-P}/P_{\text{ges}} = 0,2$ bei $T = 15\text{ °C}$ und $PO_4\text{-P}/P_{\text{ges}} = 0,4$ bei $T = 25\text{ °C}$. Der weitere Kurvenverlauf in Bezug auf die Steigung der Kurven ist ab Tag 2 weitgehend identisch, weshalb hier keine Abhängigkeit der Transformationsprozesse von der Temperatur festgestellt werden kann. Demzufolge sind die Unterschiede der Phosphorrücklösung nach 14 Tagen in den Ansätzen unterschiedlicher Temperatur identisch mit den Unterschieden in der Phosphorrücklösung nach 2 Tagen.

Bei den Untersuchungen mit der Feststoffprobe B (Eisensalze als Fällungsmittel) ist der Temperatureinfluss der Untersuchungen bei $T = 20\text{ °C}$ und $T = 25\text{ °C}$ in Bezug auf Untersuchungen bei $T = 15\text{ °C}$ viel stärker ausgeprägt. Hier erhöhte sich die Phosphorrücklösung nach 14 Tagen um 20 bis 30 %. Allerdings fällt im Vergleich zu den Untersuchungen mit der Feststoffprobe A der Einfluss nach 2 Tagen deutlich geringer aus.

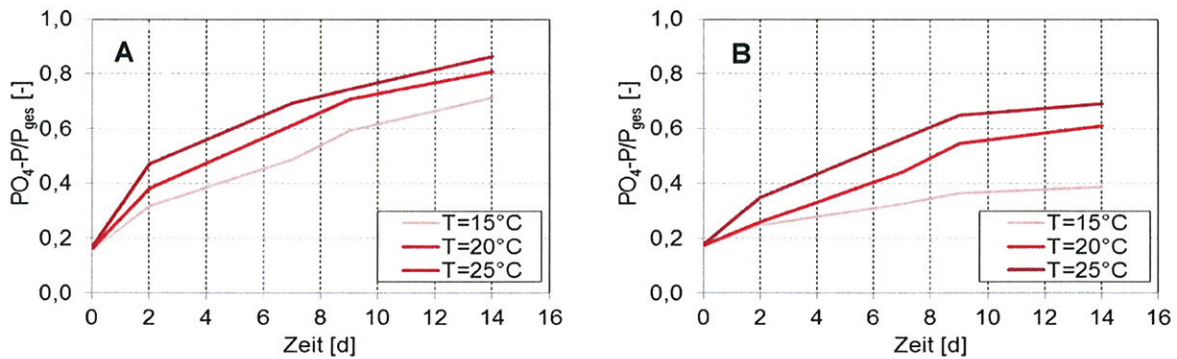


Abbildung 3: Phosphorrücklösung aus der Feststoffprobe A+B mit $P_{\text{ges}} = 0,4 \text{ mg/L}$ bei verschiedenen Temperaturen

Einfluss der untersuchten Feststoffproben

Die Phosphorrücklösung in Abhängigkeit der untersuchten Feststoffproben bei allen hier untersuchten Einflussgrößen (P_{ges} -Konzentrationen, pH-Wert, Temperatur und O_2 -Konzentration) über den Versuchszeitraum veranschaulicht Abbildung 4 und zeigt zudem die Varianz der Phosphorrücklösung der verschiedenen Ansätze in Abhängigkeit der Versuchsdauer.

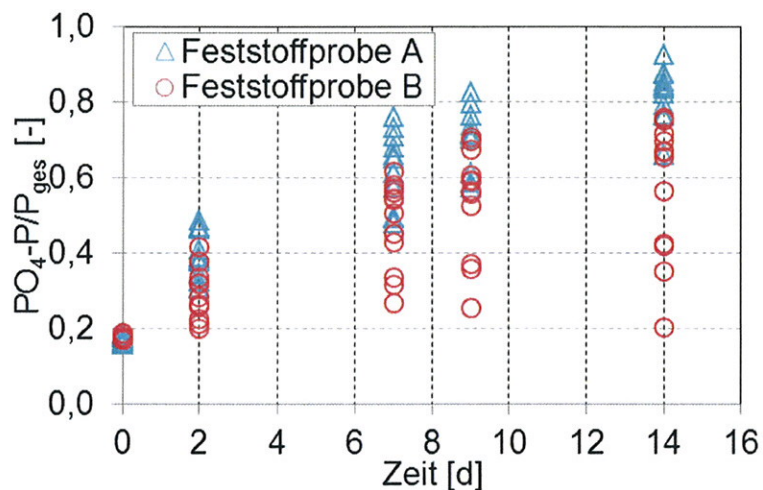


Abbildung 4: Phosphorrücklösung in allen Ansätzen der Feststoffproben A + B

Die Phosphorrücklösung in den Ansätzen der Feststoffprobe A erreicht eine maximale Phosphorrücklösung nach 14 Tagen größer 0,9, während in den Ansätzen der Feststoffprobe B lediglich eine maximale Phosphorrücklösung von 0,8 erfolgt. Die Feststoffproben A wurden dem Ablauf einer Kläranlage entnommen, in der Phosphor mit Aluminiumsalzen gefällt wird. Diese Bindungsform des Phosphors ist offensichtlich weniger stark als die Bindungsform im Falle der Eisenfällung. Interessanterweise finden große Differenzen in der Phosphorrücklösung bereits in den ersten beiden

Tagen statt. Hier wird bereits eine Differenz in der Phosphorrücklösung als $PO_4\text{-P}/P_{\text{ges}}$ -Verhältnis von fast 0,2 erreicht. Die weiteren Verläufe der Phosphorrücklösung nach 2 Tagen sind weitgehend ähnlich. Des weiteren wird deutlich, dass die Varianz bezüglich der Phosphorrücklösungen aus der Feststoffprobe B wesentlich größer ist, was auf einen höheren Einfluss der untersuchten Prozessparameter hindeutet.

Da prinzipiell nur zwei unterschiedliche Feststoffproben untersucht wurden, sind die Ergebnisse mit weiteren Proben zu validieren.

Das Verhalten der Feststoffe im Ablauf bezüglich der Phosphorrücklösung konnte grundsätzlich mit Untersuchungen zur Phosphorrücklösung aus Belebtschlammproben der gleichen Kläranlage abgeglichen werden (hier: Kläranlage A und Feststoffprobe A), vgl. Abbildung 5.

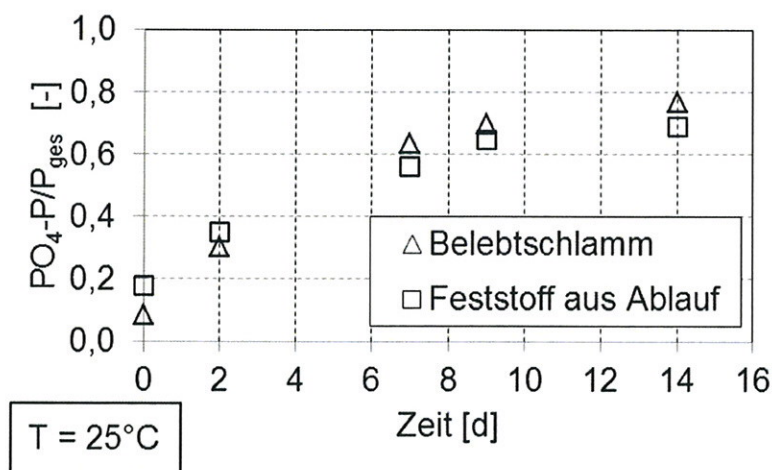


Abbildung 5: Darstellung der Phosphorrücklösung aus Feststoffprobe B und einer Belebtschlammprobe dieser Kläranlage bei einer Startkonzentration von $P_{\text{ges}} = 0,4 \text{ mg/L}$ und $T = 25^\circ\text{C}$

Einfluss der Feststoffkonzentration auf die Phosphorrücklösung

Bei Erreichung eines vollständigen Gleichgewichts zwischen Feststoff und Flüssigphase sollten prinzipiell höhere Feststoffkonzentrationen höhere Konzentrationen in der wässrigen Phase zur Folge haben. Die Phosphorrücklösung der unterschiedlichen Ansätze zeigt in Abbildung 2, dass höhere Feststoffkonzentrationen eine etwas geringere Phosphorrücklösung um maximal 0,1 zur Folge haben.

Für die Feststoffprobe A sind die Phosphatkonzentrationen nach 7 und 14 Tagen über die unterschiedliche Feststoffkonzentration als P_{ges} der erstellten Ansätze in Abbildung 6 aufgetragen. Die Abhängigkeit zwischen P_{ges} und $PO_4\text{-P}$ folgt einem linearen Verlauf, was im Falle einer Phosphorrücklösung durch Desorption adsorbierter Phosphate ohne Erreichung einer Sättigungskonzentra-

tion zu erwarten ist. Daher lässt sich vermuten, dass neben der Desorption adsorbierter Phosphate die Phosphatfreisetzung durch Transformationsprozesse partikulärer Phosphorverbindungen und/oder Zellysis ebenfalls einem linearen Verlauf folgt. Allerdings sind hier die wenigen Messpunkte zu beachten, was eine Weiterführung der Untersuchungen erfordert.

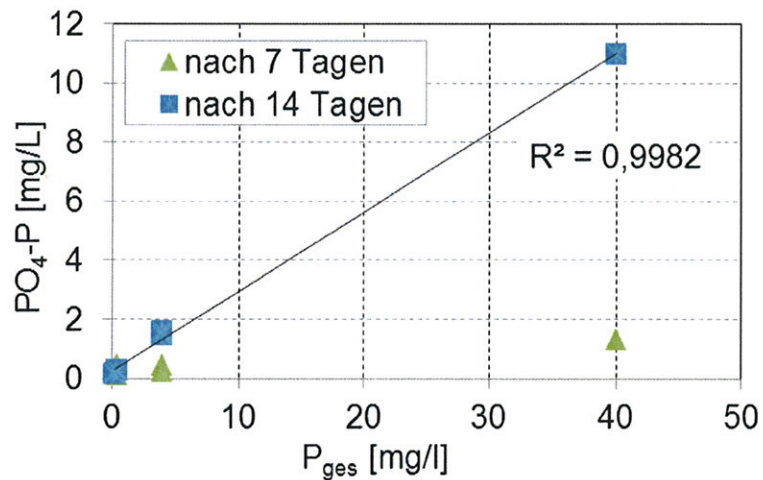


Abbildung 6: PO₄-P-Konzentrationen nach 7 bzw. 14 Tagen in Ansätzen der Feststoffprobe B (P_{ges} = 0,2 - 0,4 mg/L) resp. Belebtschlamm (P_{ges} = 0,4 - 40 mg/L) bei T = 25°C

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich für die Phosphorrücklösung aus Feststoffen im Ablauf der untersuchten Kläranlagen mit einem Phosphoranteil im Feststoff um 3% unter aeroben Bedingungen eine maximale Phosphorrücklösung als Verhältnis aus $PO_4\text{-P}/P_{\text{ges}}$ zwischen 0,35 und 0,85 nach 14 Tagen feststellen. Die Phosphorrücklösung ist dabei abhängig von der Feststoffprobe und ggf. vom auf der Kläranlage eingesetzten Fällmittel zur Phosphorreduzierung.

Unabhängig davon fand innerhalb der ersten Stunde nach Probenahme der Feststoffe bis zum Versuchsansatz bereits eine Phosphorrücklösung von $PO_4\text{-P}/P_{\text{ges}}$ von 0,2 infolge einer möglichen Desorption von an Feststoffen adsorbierten Phosphaten statt. Ca. 50 % der maximalen Phosphorrücklösung wurden nach 2 Tagen erreicht.

Für das Fließgewässer bedeutet dies, dass bei punktueller Einleitung in das Gewässer rund 20% des durch Feststoffabtrieb eingeleiteten Phosphors bereits nach sehr kurzer Zeit bioverfügbar sind und somit eutrophierend wirken können.


Höhere Temperaturen bewirken zudem höhere Phosphorrücklösungen. So konnte eine Erhöhung der Rücklösung als $PO_4\text{-P}/P_{\text{ges}}$ um 0,2 (bei Einsatz der Feststoffprobe A) bzw. eine Rücklösung als $PO_4\text{-P}/P_{\text{ges}}$ um 0,3 (bei Einsatz der Feststoffprobe B) bei einer Temperaturerhöhung von 10 °C (von 15 °C auf 25 °C) festgestellt werden.


Das Gutachten zeigt somit beispielhaft für Feststoffproben zweier untersuchter Kläranlagen, dass eine Phosphorrücklösung stattfindet und stellt mögliche Prozesseinflüsse dar. Dennoch ist die Validierung dieser Ergebnisse anhand weiterer Kläranlagen zu empfehlen. Im Fokus sollten dabei die Erweiterung der Untersuchungen auf saisonale Schwankungen und die Untersuchung der Rücklösekinetik und Einflussfaktoren stehen. Auf Grundlage der Vergleichbarkeit der Phosphorrücklösung aus Feststoffen im Ablauf und einer Belebtschlammprobe einer untersuchten Kläranlage sollte zudem die Lysis von Biomasse (Absterben von „Biomasse“) durch Miterfassung der Veränderung von Trockenrückstand und Glühverlust untersucht werden.

Zur Untersuchung der („spontanen“) Rücklösung bei Eintritt in Fließgewässer („20%-Rücklösung“ nach wenigen Minuten) werden weitergehende Laborversuche mit Modellschubstanzen (z.B. von Fällprodukten) zur Charakterisierung der Bindungsform empfohlen.

Darmstadt, im März 2015


Prof. Dr.-Ing. P. Cornel


Dr.-Ing. C. Schaum


Dipl.-Ing. R. Lutze

5. Literatur

- Dahlem (2008): Umsetzung der WRRL - Herstellung des guten stofflichen Zustandes - Szenario Phosphor. Studie von Dahlem Beratende Ingenieure GmbH & Co. Wasserwirtschaft KG für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), Bericht.
- Durth, A.; Schaum, C.; Meda, A.; Wagner, M.; Hartmann, K.H.; Jardin, N.; Kopp, J.; Otte-Witte, R. (2005): Ergebnisse der DWA-Klärschlammhebung. KA – Abwasser, Abfall, 52, Nr.10, Hennef.
- eawag (2008): Möglichkeiten zur Optimierung der chemischen Phosphorfällung an hessischen Kläranlagen. Gutachten im Auftrag der Europa Fachhochschule Fresenius und des hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dübendorf, 2008.