

Abschlussbericht

Doktorandenprojekt der P-Campus Graduiertenschule

II.1 P-Recycling in der Tierproduktion

Felix Gumpert
Jonathan Schleyken

BetreuerIn:	Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Tränckner Prof. Dr. rer. Nat. Harry W. Palm
Einrichtungen:	P-Campus; Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock
Laufzeit Förderung:	07/2019 – 09/2022
Universität und Fakultät:	Universität Rostock - AUF
Datum der Abgabe:	-Promotion von J. Schleyken abgebrochen
*Datum der Verteidigung:	-
*Datum der Anerkennung:	-

* Erläuterung siehe Bericht

Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Seite
1 Einleitung und Ziele des Projektes	1
2 Material und Methoden	2
3 Ergebnisse	4
4 Diskussion	9
5 Literaturverzeichnis	11
Anhang*	12

* Liste der: Forschungsaufenthalte außerhalb der betreuenden Einrichtungen, Vorträge bzw. Poster auf Konferenzen, Öffentlichkeitsarbeit und/oder Publikationen

1 Einleitung und Ziele des Projektes

Das Projekt „P-Recycling in der Tierproduktion“ war Bestandteil von Cluster II - Suffizienz und Effizienz der P-Nutzung, P-Rückgewinnung des Leibniz Wissenschaftscampus Phosphorforschung Rostock. Mit dem Start im Juli 2019 und dem Ende im September 2022 wurde das Projekt etwas mehr als drei Jahre bearbeitet. Die Bearbeitung fand hauptsächlich an der Professur für Wasserwirtschaft der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock statt und wurde von der Professur für Aquakultur unterstützt. Als Bearbeiter und Promovend wurde Herr Jonathan Schleyken eingestellt.

Als Bearbeiter und Promovend wurde Herr Jonathan Schleyken eingestellt. Trotz guter fachlicher Fortschritte entschied sich Herr Schleyken Ende 2021, die Promotion abzubrechen, um eine für ihn attraktive Position bei einem Wirtschaftsunternehmen anzutreten. Wir beantragten deshalb beim Vorstand des Wissenschaftscampus die Fortsetzung der Arbeiten mit einem neuen Bearbeiter. Diesem Antrag wurde stattgegeben. Als neuer Bearbeiter wurde zum Januar 2022 Herr Felix Gumpert eingestellt. Aufgrund der kurzen verbleibenden Restlaufzeit von ca. 9 Monaten war für ihn das Ziel einer Promotion zu diesem Thema nicht erreichbar. Vielmehr verständigten wir uns darauf die bereits vorliegenden experimentellen Ergebnisse und Stoffstromanalysen systematisch aufzuarbeiten und ein bis zwei gemeinschaftliche Veröffentlichungen beider Bearbeiter zu nutzen.

Ziel des Projektes war die Nutzbarmachung alternativer P-Quellen und einer damit verbundenen P-Rückgewinnungstechnologie aus den Abwässern und Schlämmen von Rezirkulierenden Aquakultursystemen (RAS). Die überschüssigen Nährstoffe sollten zurückgewonnen werden und im Anschluss in ein verdauliches und pflanzenverfügbares Calciumphosphat synthetisiert werden. In der gängigen Praxis wird lediglich ein Teil der zugeführten Nährstoffe (abhängig von Fütterungsstrategie, Fischgröße und der artspezifischen Nährstoffretention) für die Produktion der Organismen verwendet. Die überschüssigen Nährstoffe werden im weiteren Verlauf über regelmäßigen Wasseraustausch und/oder spezielle Filtereinheiten und Absetzbecken reduziert, um Grenzwerte für die Entsorgung des Prozesswasser einzuhalten und artgerechte Haltungsbedingungen für die produzierten Organismen zu gewährleisten.

Für die Nutzung der Reststoffe (Schlamm und Abwasser) gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine Möglichkeit ist die Ausbringung des Schlammes auf landwirtschaftliche Flächen (Brod & Øgaard, 2021; Burducea et al., 2022). Dies erfordert eine entsprechende landwirtschaftliche Nachfrage in der Nähe. Ähnlich wie bei Klärschlamm besteht in Abhängigkeit von Haltungsbedingungen und Fütterungsregime allerdings die Gefahr, dass Schwermetalle und pharmazeutische Stoffe direkt in die Umwelt gelangen. (Kirchmann et al., 2016; Zuloaga et al., 2012). Eine andere Möglichkeit bietet die Aquaponik. Hier können die Restnährstoffe des Abwassers für den Anbau von meist gartenbaulichen Pflanzen genutzt werden (Palm et al., 2018).

Wenn eine direkte stoffliche Nutzung nicht möglich ist, ist die chemische Rückgewinnung von P eine weitere Option. Für den Bereich kommunaler Klärschlämme wurden in den letzten Jahren zahlreiche chemische sowie einige thermische Verfahren zur Rückgewinnung eines P-reichen Rückstands aus organischen Materialien entwickelt. Basierend auf Vorversuchen wurde für die Bearbeitung dieses Projektes das Hauptaugenmerk auf eine Mobilisierung der vorwiegend partikulär gebundenen P-Fraktionen mit anschließender Fällung des gelösten P gelegt.

Ähnliche Verfahren in der Abwassertechnik sind das Gifhorner- (auch bekannt als Seaborne-Verfahren), das Stuttgarter- und das Extraphos-Verfahren (Ohtake & Tsuneda, 2019). Jedoch ist die Stoffmatrix von Aquakulturschlämmen deutlich abweichend zu anaerob stabilisierten Klärschlämmen. Die Übertragung und Weiterentwicklung bekannter Verfahren auf die Abwässer und Schlämme aus Aquakulturanlagen war ein zentraler Bestandteil des Projektes.

Eine parallel zu bearbeitende Fragestellung war die Ermittlung der P-Flüsse in landbasierten rezirkulierenden Aquakultursystemen, um das labortechnisch ermittelte Rückgewinnungspotential in das Gesamtsystem einordnen zu können

2 Material und Methoden

Labortechnische Entwicklung eines nasschemischen Rückgewinnungsverfahrens

Untersuchte Anlagen und Fischarten

Die Proben für die Untersuchungen stammten aus drei Aquakulturanlagen. Zwei Anlagen kultivieren den Afrikanischen Raubwels *Claria gariepinus*. In einer weiteren Anlage werden Garnelen *L. vannamei*, Ostseeschnäpel *C. maraena* und Stör *A. oxyrinchus* gehalten.

In den ersten Versuchen wurden die zwei Anlagen mit den Schlämmen des Afrikanischen Raubwels miteinander verglichen. Für diese Versuche wurden Schlämme aus dem FGH (FischGlasHaus) der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock unter extensiven Produktionsbedingungen (Fischbesatz ~ 50 kg Fisch pro m³ Wasser) und einer kommerziellen RAS unter intensiven Bedingungen (Fischbesatz ~ 200-300 kg Fisch pro m³ Wasser) untersucht. In weiteren Untersuchungen wurden die erzielten Ergebnisse mit den Schlämmen der dritten Anlage mit anderen Fischarten verglichen. Die Ausgangsparameter der untersuchten Schlämme sind in Tabelle 1 gezeigt.

Tabelle 1: Ausgangsparameter der untersuchten Schlämme

Parameter	<i>Claria gariepinus</i>		<i>L. vannamei</i>	<i>C. maraena</i>	<i>A. oxyrinchus</i>
	Extensiv	Intensiv			
pH	7,08	5,19	7,48	6,73	6,14
TR [%]	0,71	2,38	3,71	3,28	5,30
PO ₄ -P [mg/l]	25,65	151,84	4,47	59,71	181,92
TP [mg P/g TR]	23,04	22,81	21,06	55,78	19,98

Analytik der Ausgangsschlämme

Für die Bestimmung des Trockenrückstandes (TR) wurden die Proben bei 105 °C gemäß DIN EN 12880:2000 getrocknet. Für die Bestimmung des Gesamtphosphorgehaltes (TP) wurden 0,1 - 0,5 g der getrockneten Probe mit 10 ml konzentrierter Salpetersäure versetzt und mittels Mikrowellenaufschluss extrahiert.

Der Aufschluss wurde anschließend zentrifugiert und der Überstand nach DIN EN ISO 6878:2004 auf den P-Gehalt analysiert. Das gelöst vorliegende P ohne Aufschluss wurde nach Zentrifugation der Originalprobe nach der gleichen Analytik ermittelt.

Verfahren zur P-Mobilisierung

Für die Entwicklung eines geeigneten Mobilisierungsverfahrens wurden drei unterschiedliche Säuren (Zitronensäure, Salpetersäure und Schwefelsäure) und abgestufte pH-Werte nach einem standardisierten Vorgehen untersucht. Dafür wurden die jeweiligen Proben mit jeweils einmolarer Säure (1 mol l^{-1}) gemischt und innerhalb jeder Säuregruppe unterschiedliche pH-Werte zwischen 2-7 eingestellt. Für eine gleichmäßige Mobilisierung, wurden die Proben auf einem Orbitalschüttler bei 220 U min^{-1} eine Stunde lang konstant gemischt. Nach Abtrennung der flüssigen Phase durch Zentrifugieren (5 min bei 6500 rpm) wurde die gelöste P-Fraktion erneut nach DIN EN ISO 6878:2004 analysiert.

Verfahren der P-Fällung

Aufbauend auf den Ergebnissen der Mobilisierung wurden die Proben der Intensivproduktion auf ihre Fällungseigenschaften untersucht. Vor Beginn der Fällung wurden die Schlämme mit den säurespezifisch noch als wirtschaftlich identifizierten pH-Werten (Zitronensäure: pH 4,0, Schwefelsäure und Salpetersäure: pH 3,0) gemischt und eine Stunde lang auf dem Orbitalschüttler geschüttelt. Dann wurde die P-Konzentration des Überstandes analysiert. Anschließend wurde der pH-Wert gemessen. Für die Fällung wurde eine überstöchiometrische Ca^{2+} -Konzentration mittels gesättigter Calciumhydroxidlösung eingestellt und mit Natriumhydroxid (1 mol l^{-1}) der Fällungs-pH-Wert im Bereich von 7 bis 10 variiert. Die Fällungseffizienz wurde durch die Differenz zwischen dem gelösten P nach der Mobilisierung und dem nach der Fällung bestimmt. Die erhaltenen Ergebnisse der Fällungsuntersuchungen wurden auf die Schlämme der anderen Fischarten transponiert und nicht nochmal durchgeführt.

Für die Absicherung der Untersuchungen (Probenahme nach Erreichen eines stationären Endzustands von Mobilisierung und Fällung) sowie für das angestrebte Up-Scaling wurde für den Schlamm aus der intensiven RAS-Anlage mit Afrikanischem Raubwels zusätzlich die Prozess-Kinetik von Mobilisierung und Fällung untersucht

Stoffflussanalyse im Fischglashaus

Letztlich kann nur der Phosphor zurückgewonnen werden, welcher im Schlamm akkumuliert. Deshalb wurde ein mehrwöchiges Monitoring der Stoffflüsse in der extensiven RAS im Fischglashaus der Universität Rostock durchgeführt. Dazu wurden über den gesamten Prozess der Kreislaufanlage automatische Probenehmer installiert, die Durchflüsse erfasst und zusätzlich die wöchentlich entsorgten Schlämme auf P analysiert. Zusätzlich wurde der P im Input über die zugegebene Futtermenge und das in der Fischmasse eingelagerte P durch Bestimmung des P-Gehalts im Fisch und die Gewichtszunahme der Fische bestimmt. Aus den gewonnenen Ergebnissen wurden die Massenströme an P auf der Input-Seite und den verschiedenen Senken (Fisch, Schlamm, Austauschwasser) berechnet.

3 Ergebnisse

Die P-Mobilisierung in Abhängigkeit des pH-Werts beider RAS-Schlammproben für den Wels sind in Abbildung 1 dargestellt. Nur etwa 15 % (A) und 27 % (B) des gesamten P-Gehalts sind gelöst und somit direkt für die chemische Rückgewinnung verfügbar. Ausgehend von diesem unterschiedlichen Ausgangsverhältnis in beiden Proben gibt es kaum Unterschiede in der P-Mobilisierungseffizienz. Bei einem pH-Wert von 4 werden etwa 50 % des Phosphors gelöst, und dieser Anteil steigt bei pH 3 auf ein Maximum von 75 % (Probe A) bis 85 % (Probe B) an. Bei Zitronensäure ist die Mobilisierung bei pH-Werten unter 4 etwas geringer als bei Salpeter- oder Schwefelsäure. Allerdings steigt der Säurebedarf bei Zitronensäure zur Einstellung von pH-Werten < 4 exponentiell an (Abbildung 2), was eine wirtschaftliche Anwendung für pH<3 faktisch ausschließt.

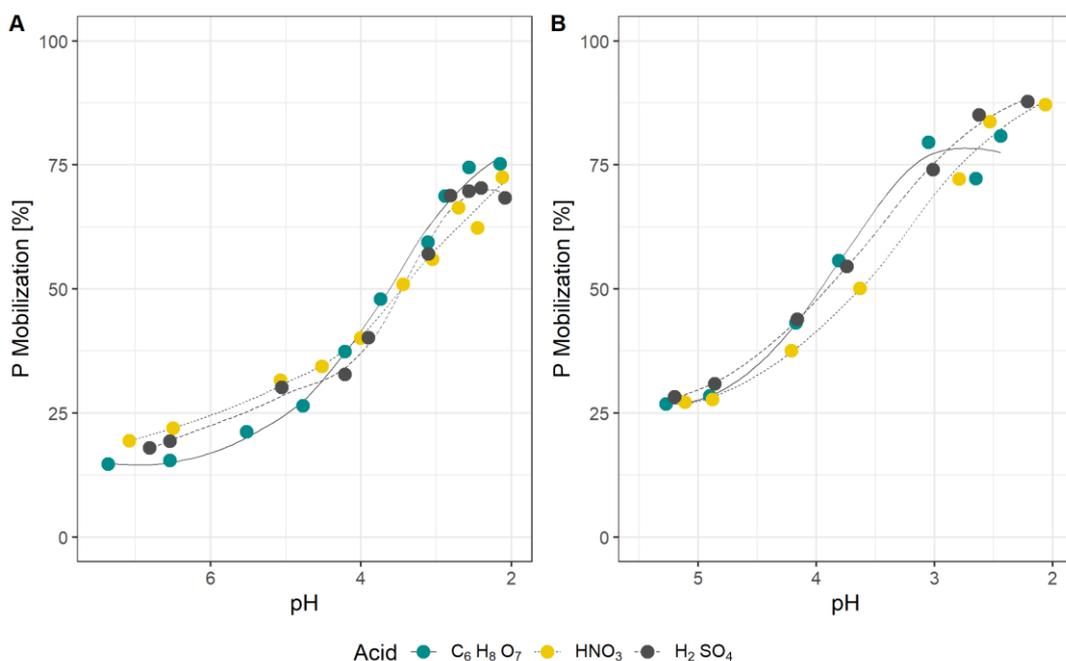


Abbildung 1: P-Mobilisationsrate für die eingestellten pH-Werte durch die unterschiedlichen Säuren der extensiven (A) und intensiven (B) Produktionsbedingungen des Afrikanischen Raubwelses

Salpetersäure weist bei gleicher Mobilisierungseffizienz wie Schwefelsäure einen höheren Verbrauch auf und ist in der Regel teurer, so dass diese Säure keinen wirtschaftlichen Vorteil zu bieten scheint. Der Schwefelsäurebedarf ist bis pH 2 noch moderat, so dass bei ausreichendem Zugewinn an mobilisiertem P ggf. auch sehr niedrige pH-Werte gefahren werden können.

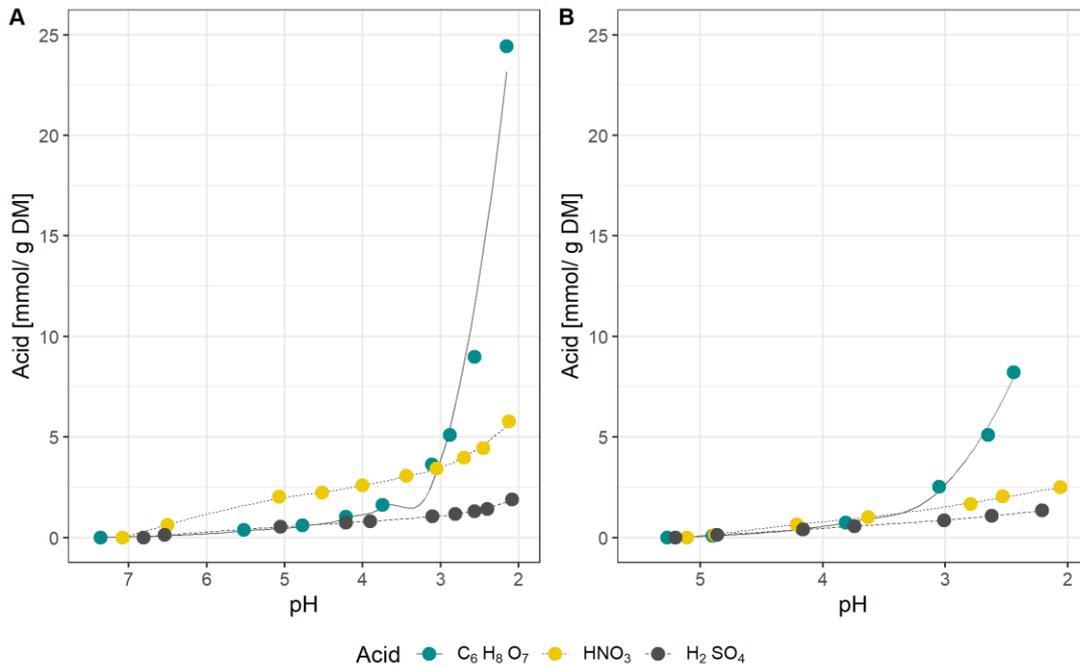


Abbildung 2: Säureverbrauch für die eingestellten pH-Werte durch die unterschiedlichen Säuren der extensiven (A) und intensiven (B) Produktionsbedingungen des Afrikanischen Raubwelses

Neben den Verbrauchsmengen und -preisen der eingesetzten Säuren ist auch die benötigte Prozesszeit und damit die Größe der erforderlichen Reaktoren kostenrelevant. Deshalb wurden ebenfalls Versuche zur Kinetik durchgeführt. Die dafür eingestellten pH-Werte entsprechen denen, die noch als wirtschaftlich hinsichtlich Säurebedarf und P-Mobilisierung gelten. Nach einem ersten Screening mit Prozesszeiten zwischen 1 und 5 Stunden (Abbildung 3), wurden die Versuche mit kleineren Zeitschritten bis eine Stunde (Abbildung 4) wiederholt.

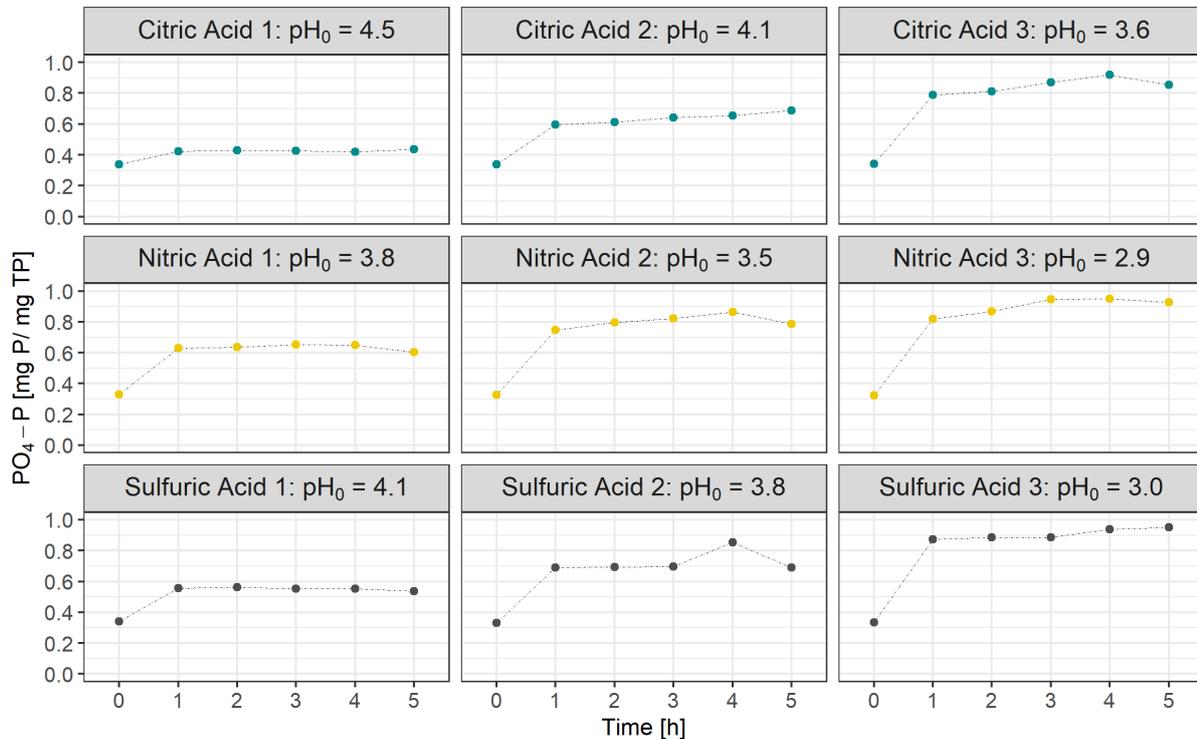


Abbildung 3: Kinetik der ersten fünf Stunden der P-Mobilisierung an spezifischen pH-Werten der unterschiedlichen Säuren des Schlammes vom Afrikanischen Raubwelses unter intensiven Produktionsbedingungen

Es ist zu erkennen, dass in der ersten Stunde das Verhältnis zwischen gelöstem P und Gesamt-P am stärksten ansteigt. Bei den Versuchen mit geringer Säurezugabe und höheren pH-Werten findet nach dem Auflösungsmaximum für den pH-Wert keine Reaktion mehr statt und es folgt eine Plateauphase. In den Experimenten mit niedrigeren pH-Werten nahm die Mobilisierungsrate weiter zu, allerdings mit einer geringeren Steigung. Interessanterweise sinkt der Anteil des gelösten P bei Mobilisierung mit Salpetersäure nach 4 h wieder leicht. Ähnliche Effekte sind für Versuche 3 bei Zitronensäure und Versuch 2 bei Schwefelsäure zu beobachten. Die chemischen Ursachen dafür wurden nicht aufgeklärt.

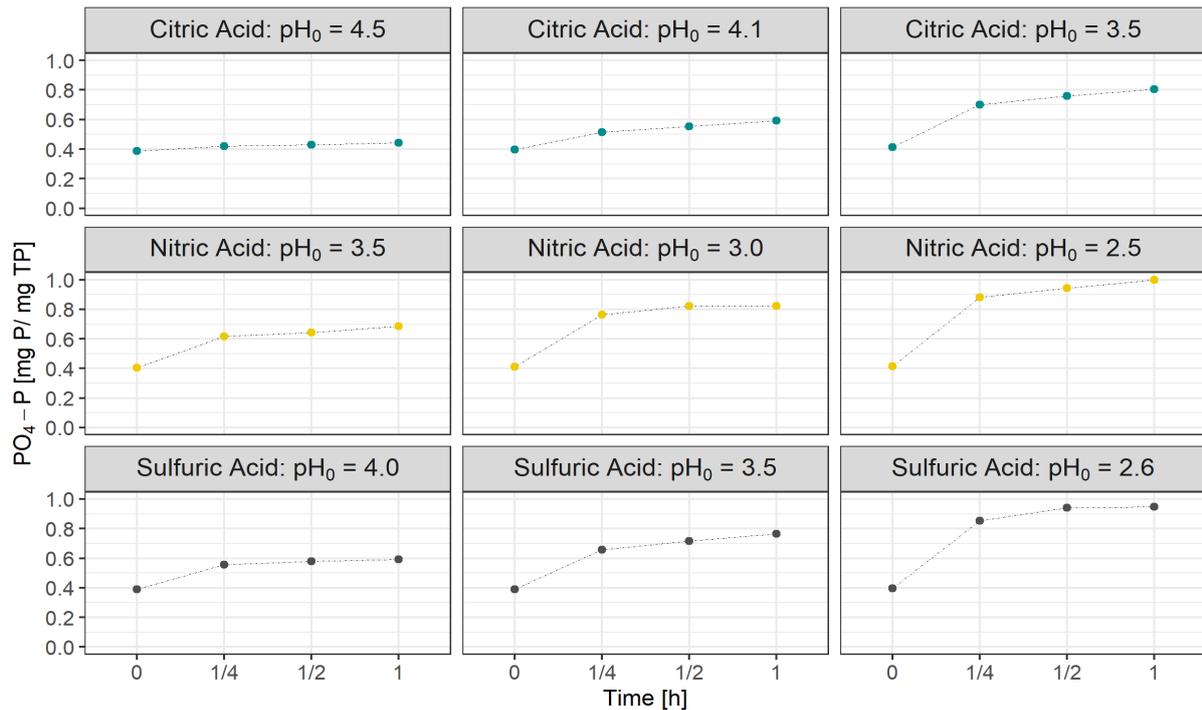


Abbildung 4: Kinetik der ersten Stunde der P-Mobilisierung an spezifischen pH-Werten der unterschiedlichen Säuren des Schlammes vom Afrikanischen Raubwelses unter intensiven Produktionsbedingungen

Analoge Untersuchungen wurden für den Fällungsprozess durchgeführt. Dazu wurde die Fällungsrate über einen pH-Bereich zwischen 7 und 10 und über einen Zeitraum von 20 Stunden mit drei Messpunkten 1) 30 Minuten, 2) 1 Stunde und 3) 20 Stunden nach Beginn der Fällungsreaktion analysiert (Abbildung 5). Dabei wurde deutlich, dass der Fällungsprozess weitgehend unabhängig vom pH-Wert bereits innerhalb der ersten halben Stunden abgeschlossen ist. Eine Ausnahme bilden pH 7 und pH 8 bei der Zitronensäure.

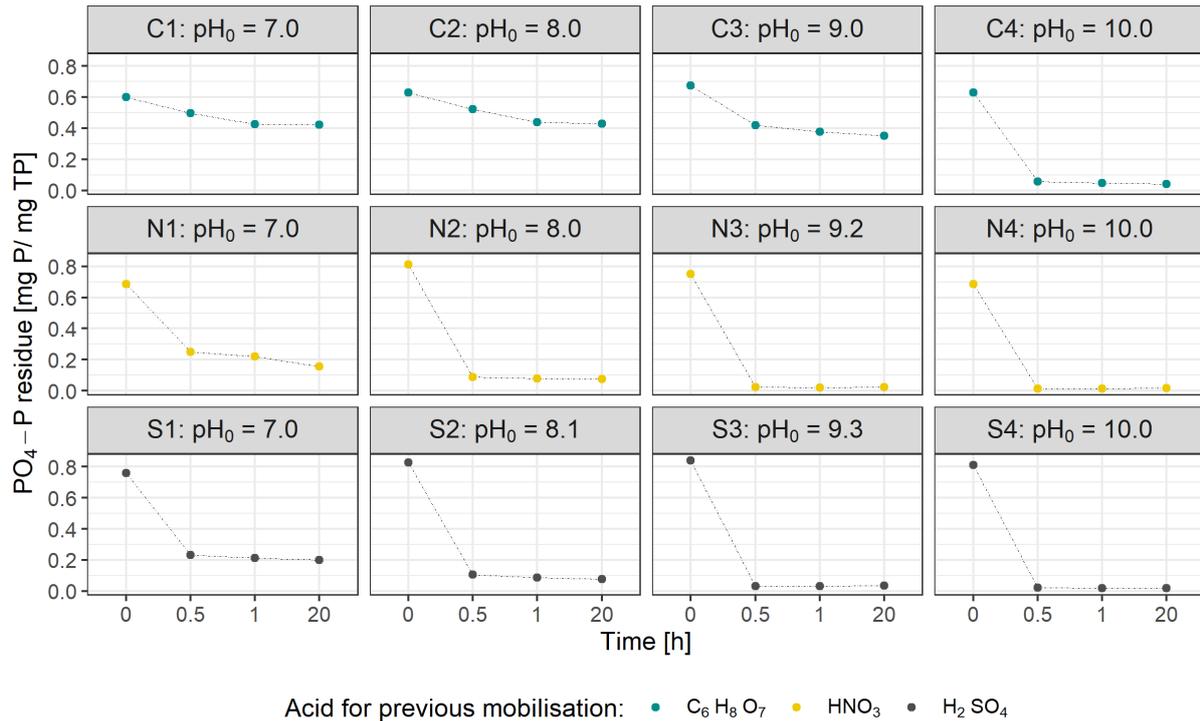


Abbildung 5: Kinetik der Fällung an eingestellten pH-Werten für die verschiedenen Säuremobilisate

Der pH-Wert hat aber erheblichen Einfluss auf die Fällungseffizienz. Bei den Mineralsäuren reicht die Einstellung von pH 9, um eine weitgehende Fällung der gelösten P-Verbindungen zu erzielen (95%). Zitronensäure benötigt hingegen höhere pH-Werte ($\text{pH} > 10$) für eine effektive Fällung.

Vergleich mit Schlämmen anderer Fischarten

Mit dem Ziel einer breiteren Anwendung des untersuchten nasschemischen Rückgewinnungskonzeptes wurden zusätzlich Schlämme einer dritten Anlage hinsichtlich ihres P-Rückgewinnungspotenzials untersucht.

Das wirtschaftlich ggf. noch darstellbare Gesamtrückgewinnungspotenzial von Phosphor für die einzelnen Fischarten ist in Abbildung 6 dargestellt. Für den Afrikanischen Raubwels beträgt die theoretisch gewinnbare P Menge ungefähr 85 % des im Schlamm gebundenen Gesamtphosphors. Für die Garnele können dagegen nur ungefähr 25 % zurückgewonnen werden. Auffallend schlecht war auch die erreichbare Mobilisierung bei der RAS-Anlage mit Ostseeschnäpel. Vergleichsweise gute Ergebnisse wurden für den Stör erzielt.

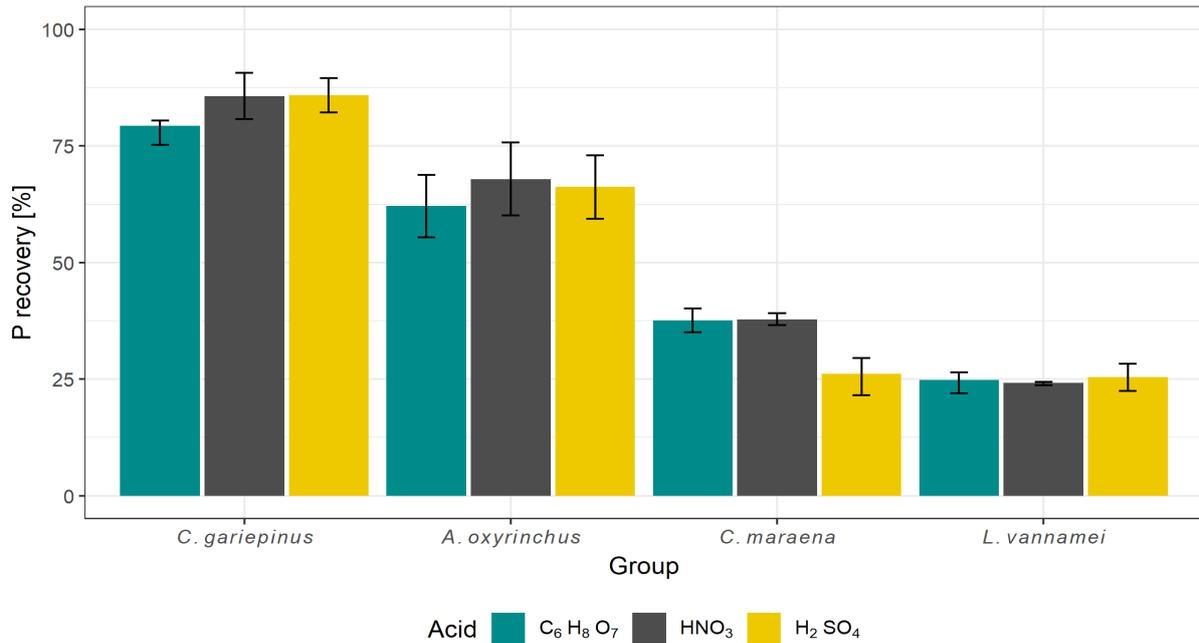


Abbildung 6: Gesamtrückgewinnungspotenzial der untersuchten Schlämme unterschiedlicher Fischarten

Stoffflussanalyse im Fischglashaus

Im untersuchten extensiven RAS-System wird nur ca. ¼ des verfütterten P in die Fischbiomasse eingebaut. Fast die Hälfte wird aufgrund einer hohen Wasseraustauschrate mit dem Prozessabwasser ausgeschwemmt. Damit verbleiben für die Rückgewinnung aus Schlamm im konkreten Beispiel nur 25%. Multipliziert mit der Rückgewinnungsrate von ca. 85% ergäbe sich hier also ein Rückgewinnungspotential von nur 20%. Der Hauptgrund für dieses, auf den ersten Blick enttäuschende Ergebnis, ist aber die nicht optimale Abwasserbehandlungstechnologie mit einem hohen Verlust an Säurekapazität aufgrund fehlender Denitrifikation und einem schlechten Sedimentationswirkungsgrad des Absetzbeckens. Hier besteht ein hohes Optimierungspotential. Die Ergebnisse der Stoffflussanalyse sind in Abbildung 7 dargestellt.

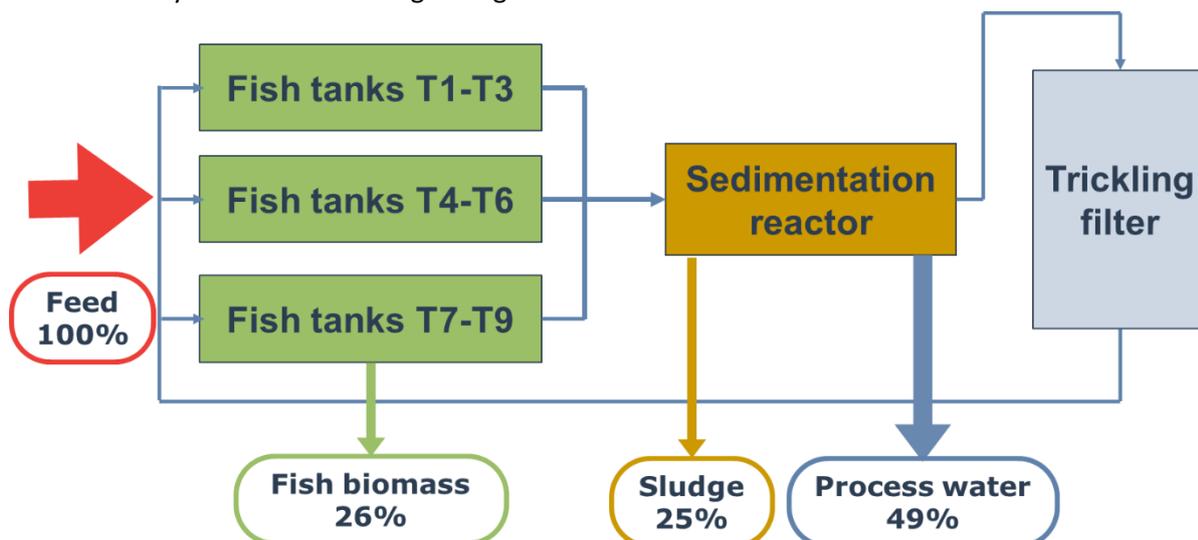


Abbildung 7: Stoffflussanalyse der extensiven RAS (Afrikanischer Raubwels, FGH)

4 Diskussion

Das in diesem Projekt entwickelte nasschemische Verfahren zeigt grundsätzlich ein hohes Potenzial für die effektive Rückgewinnung von P aus Aquakulturschlämmen. Dennoch bestimmen viele verschiedene Faktoren die P-Löslichkeitseffizienz der partikulären P-Fraktion und die absolute Reaktionsgeschwindigkeit, wie zum Beispiel die Stabilität der P-Verbindungen, die Partikelgröße, die Art und Menge der verwendeten Säure und folglich der pH-Wert der Lösung (Schütze et al., 2020; Wopenka & Pasteris, 2005). Aufgrund des geringen Anteils von gelöstem P und damit direkt fällbarem P (15 und 27 %), setzt eine wirksame Rückgewinnung die vorgeschaltete Mobilisierung partikulär gebundenen Phosphor voraus. Dies deckt sich mit Erkenntnissen anderer Autoren (Venkiteshwaran et al., 2018). Mittels Säureaufschluss konnte der Anteil von gelöstem P im Verhältnis zu TP auf bis zu 88 % erhöht werden. Der Grund der unterschiedlichen Ausgangsverhältnisse zwischen gelöstem P und TP dürfte nicht in erster Linie in den unterschiedlichen Fütterungsregimen liegen, sondern vielmehr im unterschiedlichen Ausgangs-pH-Wert und der artspezifischen Verwertung der P-Verbindungen. Wird zum Beispiel der pH-Wert des Schlamms aus der extensiven Produktion des Welses auf pH 5 (AusgangspH-Wert in der Intensivproduktion) abgesenkt, wird ein Verwertungspotenzial von 20 - 30 % (je nach gewählter Säure) erreicht. Dabei liegen die höchsten Mobilisierungsraten jedoch etwa 10 % unter denen des Schlamms aus der Intensivproduktion.

Grundsätzlich verhalten sich die untersuchten Schlämme hinsichtlich ihrer Mobilisierungseigenschaften ähnlich. Bei pH-Werten von 2 erreicht die Mobilisierung ihr Maximum und konnte weder durch weitere Säurezugabe noch durch längere Reaktionszeiten gesteigert werden. Der verbleibende P ist offensichtlich physikalisch-chemisch stärker an die feste Phase gebunden und zumindest mit reinem Säureeinsatz nicht löslich. Ähnliche Ergebnisse wurden auch in anderen Studien mit unterschiedlichen Matrizen berichtet (Xu et al., 2015, McDowell & Sharpley 2002). Die hier verbleibende organische P-Fraktion kann u.a. aus bakteriellem Zellmaterial bestehen (z. B. Phospholipide oder Phosphorproteine) (AWWA, 1970). Obwohl mit allen untersuchten Säuren vergleichsweise hohe potenzielle P-Rückgewinnungsraten erzielt wurden, könnten weitere Untersuchungen lohnenswert sein, um auch den organisch gebundenen P zu mobilisieren.

Der starke Anstieg des Säureverbrauchs bei Zitronensäure ist dem hohen pK_{S1} von 3,1 der schwachen triprotischen organischen Säure zurückzuführen. Die Säurekonstanten von Salpetersäure bzw. Schwefelsäure liegen mit pK_S -Werten von -1,37 und -3,0 um mehrere Zehnerpotenzen niedriger. Aus diesem Grund wurden für die Fällungstests von Salpeter- und Schwefelsäure ein pH-Wert von 3 und für Zitronensäure ein pH-Wert von 4 gewählt. Ein großer Vorteil der Zitronensäure ist jedoch ihr deutlich einfacheres Handling, gerade bei großtechnischer Anwendung in einem Fischzuchtbetrieb. Schwefel- und Salpetersäure bedürfen hoher Sicherheitsstandards bei Transport, Lagerung und Nutzung, während Zitronensäure in kristalliner Form gelagert und bedarfsgerecht angemischt werden könnte. Allerdings ist zu beachten, dass die Ausfällung von CaP-Verbindungen bei vorheriger Zitronensäuremobilisierung zwischen pH 7 und pH 9 teilweise gehemmt wird.

Dafür kann es mehrere Gründe geben: 1) Citrat als Produkt der Zitronensäure-Dissoziation reagiert mit den hydratisierten Ca^{2+} -Ionen und bildet Calcium-Citrat-Kristalle oder 2) die COOH-Gruppe der Zitronensäure, die bei niedrigeren pH-Werten dissoziiert, reagiert mit den Ca^{2+} -Ionen, was zu einer Komplexierung von Citrat mit Ca^{2+} und einer Hemmung des CaP-Kristallwachstums führt (Berg & Tiselius, 1989; Grossl & Inskeep, 1991, 1992). Dies erfordert höhere Mengen an Natriumhydroxid und Calcium, um den pH-Wert zu erhöhen und die P-Rückgewinnung zu maximieren.

Die Fällung des mobilisierten P ist unkritisch und erreichte bei moderaten pH-Werten hohe Wirkungsgrade von bis zu 96-98 %. Die Kinetik ist relativ schnell (ca. 0,5 h) und erfordert entsprechend kleine Reaktorvolumina. Um eine effiziente großtechnische Umsetzung mit hohen Phosphorausbeuten zu erreichen, sollte ein pH-Bereich zwischen 2-3 für die anorganischen und über 3 für organischen Säuren eingestellt werden. Damit lässt sich eine hohe Mobilisierungseffizienz bei moderatem Säureverbrauch von etwa 60-70 % und 5 mmol pro Gramm Trockenmasse gewährleisten. Für eine erfolgreiche P-Fällung sollte der pH-Wert schließlich auf pH 10 angehoben werden, wenn für die vorherige Mobilisierung Zitronensäure verwendet wurde. Bei Mobilisierung mit Salpeter- oder Schwefelsäure sind pH-Werte von 8 bis 9 ausreichend. Mit diesen Einstellungen sind Gesamtwirkungsgrade der Rückgewinnung von bis zu 80 % für das untersuchte nasschemische Verfahren erzielbar.

Aus Sicht der Aquakultur und der Wasserwirtschaft konnte gezeigt werden, dass die Implementierung eines P-Rückgewinnungsverfahrens die möglicherweise emittierte P-Fracht reduzieren kann. Die P-Rückgewinnung kann somit das Eutrophierungspotenzial von Aquakulturanlagen verringern und die Auswirkungen von Aquakulturanlagen auf die Umwelt weiter reduzieren.

Die oben dargestellten labortechnischen Untersuchungen sind in einem Fachartikel zusammengefasst: *Schleyken J., Gumpert F., Tränckner S., Palm H. Tränckner J. (2023) Enhanced chemical recovery of phosphorus from residues of recirculating aquaculture systems (RAS)., International Journal of Environmental Science and Technology, submitted*

Ein weiterer Beitrag zum Vergleich des Rückgewinnungspotentials bei verschiedenen Fischarten ist in Vorbereitung.

6 Literaturverzeichnis

- AWWA. (1970). CHEMISTRY OF NITROGEN AND PHOSPHORUS IN WATER Author(s): Committee Report. *American Water Works Association*, 62(2), 127–140.
- Berg, C., & Tiselius, H.-G. (1989). The effects of citrate on hydroxyapatite induced calcium oxalate crystallization and on the formation of calcium phosphate crystals. *Urol Res*, 17, 167–172.
- Boyd, C. E. (2015). Water quality: An introduction. *Water Quality: An Introduction*, 1–357. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17446-4>
- Brod, E., & Øgaard, A. F. (2021). Closing global P cycles: The effect of dewatered fish sludge and manure solids as P fertiliser. *Waste Management*, 135, 190–198. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.08.041>
- Burducea, M., Lobiuc, A., Dirvariu, L., Oprea, E., Olaru, S. M., Teliban, G. C., Stoleru, V., Poghirc, V. A., Cara, I. G., Filip, M., Rusu, M., Zheljzkov, V. D., & Barbacariu, C. A. (2022). Assessment of the Fertilization Capacity of the Aquaculture Sediment for Wheat Grass as Sustainable Alternative Use. *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/PLANTS11050634>
- Grossl, P. R., & Inskeep, W. P. (1991). Precipitation of Dicalcium Phosphate Dihydrate in the Presence of Organic Acids. *Soil Science Society of America Journal*, 55(3). <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500030006x>
- Grossl, P. R., & Inskeep, W. P. (1992). Kinetics of octacalcium phosphate crystal growth in the presence of organic acids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(5). [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90322-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90322-A)
- Kirchmann, H., Börjesson, G., Kätterer, T., & Cohen, Y. (2016). *From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook*. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0816-3>
- McDowell, R. W., & Sharpley, A. N. (2002). Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration. *Geoderma*, 112(1–2), 143–154. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00301-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00301-4)
- Ohtake, H., & Tsuneda, S. (2019). *Phosphorus Recovery and Recycling*. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8031-9>
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S. M., Vermeulen, T., Haïssam Jijakli, M., & Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International*, 26(3), 813–842. <https://doi.org/10.1007/S10499-018-0249-Z/TABLES/3>
- Schütze, E., Gypser, S., & Freese, D. (2020). Kinetics of phosphorus release from vivianite, hydroxyapatite, and bone char influenced by organic and inorganic compounds. *Soil Systems*, 4(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4010015>

- Venkiteshwaran, K., McNamara, P. J., & Mayer, B. K. (2018). Meta-analysis of non-reactive phosphorus in water, wastewater, and sludge, and strategies to convert it for enhanced phosphorus removal and recovery. *Science of The Total Environment*, 644, 661–674. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.06.369>
- Wopenka, B., & Pasteris, J. D. (2005). A mineralogical perspective on the apatite in bone. *Materials Science and Engineering C*, 25(2), 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2005.01.008>
- Xu, Y., Hu, H., Liu, J., Luo, J., Qian, G., & Wang, A. (2015). pH dependent phosphorus release from waste activated sludge: contributions of phosphorus speciation. *Chemical Engineering Journal*, 267, 260–265. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2015.01.037>
- Zuloaga, O., Navarro, P., Bizkarguenaga, E., Iparraguirre, A., Vallejo, A., Olivares, M., & Prieto, A. (2012). Overview of extraction, clean-up and detection techniques for the determination of organic pollutants in sewage sludge: A review. *Analytica Chimica Acta*, 736, 7–29. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2012.05.016>

Anhang

Präsentationen:

2022

- Internationales P-Campus-Symposium, November 2022, Online
Poster: Phosphorus recovery from residues of recirculating aquaculturesystems (Felix Gumpert)
- Internationales P-Campus-Symposium, Januar 2022, Online
Präsentation: Recovery of concentrated P-products from animal excrements in husbandry and aquaculture (Jens Tränckner)

2021

- Phosphorus in Europe Research Meeting (PERM), Juni 2021, Online
Poster: Aquaculture-applied phosphorus recycling in animal husbandry (Jonathan Schleyken)
 - Ringvorlesung P-Campus, September 2021, Online
Präsentation: P-Recycling in landgestützten Aquakultursysteme
- Internationalen P-Campus-Symposium, Januar 2021, Online