



BMFTR-Fördermaßnahme

# Regionales Phosphor-Recycling

Ergebnisse zum Transferevent

Gefördert durch:

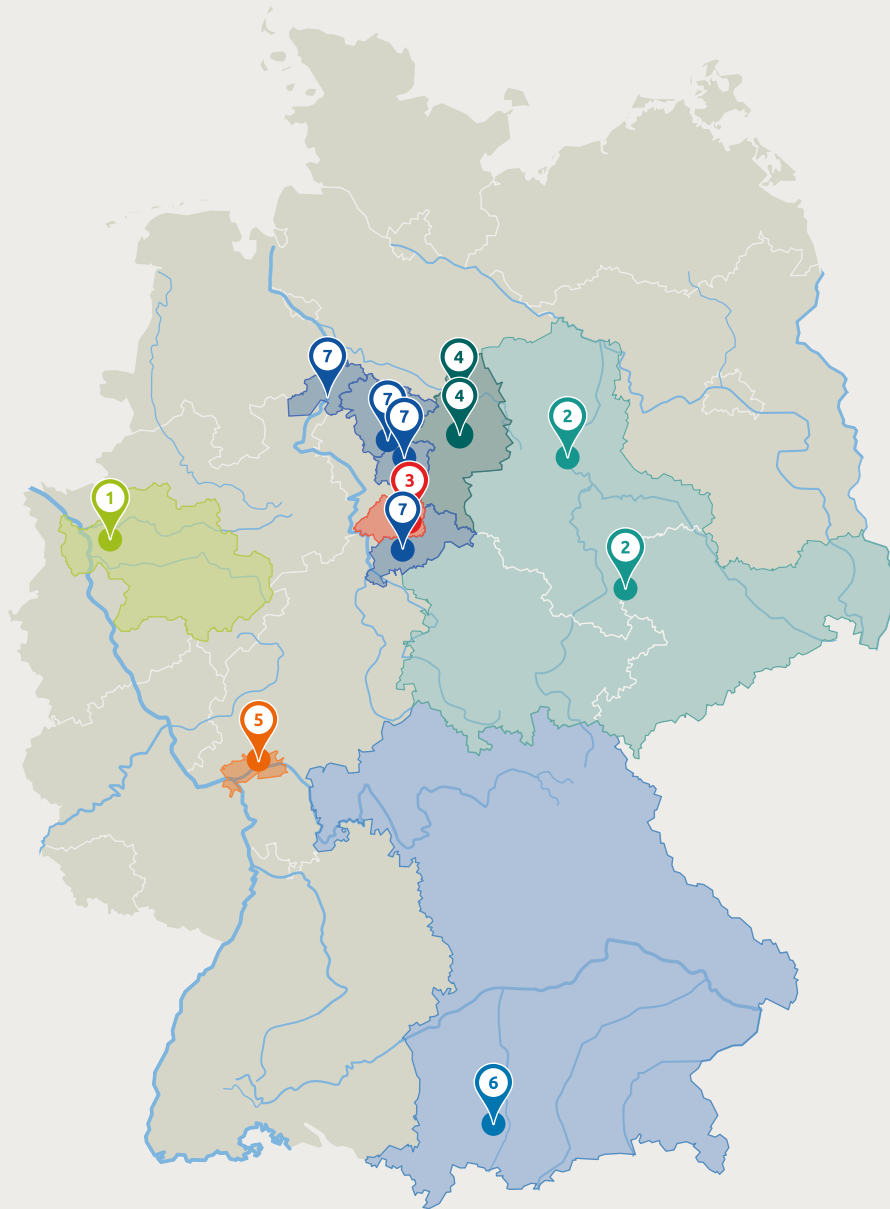


Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**FONA**

Forschung für Nachhaltigkeit

# Technologiestandorte der Verbundprojekte



## 1 AMPHORE

Regionales Klärschlamm- und Aschen-Management zum Phosphorrecycling für einen Ballungsraum

Koordinatorin: Hanna Evers (Ruhrverband, Essen)

Technologie: Parforce-Verfahren

## 2 DreiSATS

DreiSATS: Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling aus Klärschlämmen im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen

Koordinator: Matthias Hoger (Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH, Markranstädt)

Technologie: Carbotechnik Staubfeuerung; Pontes Pabuli-Verfahren

## 3 KlimaPhoNdS

Klimaneutrale und reststofffreie Klärschlammverwertung mit Phosphorsäureproduktion in Südost-Niedersachsen

Koordinator: Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers (TU Clausthal)

Technologie: Clausthaler Verfahren

## 4 P-Net

Aufbau eines Netzwerks zum ressourceneffizienten Phosphor-Recycling und -Management in der Region Harz und Heide

Koordinator: Prof. Dr.-Ing. Thomas Dockhorn (TU Braunschweig)

Technologie: Peco-Verfahren

## 5 RePhoRM

Regionales Phosphorrecycling im Rhein-Main- Gebiet unter Berücksichtigung industrieller und agrarischer Stoffkreisläufe

Koordinator: Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart (TU Darmstadt)

Technologie: PHO4green-Verfahren

## 6 R-Rhenania

Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern

Koordinator: Dr.-Ing. Christian Adam (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin)

Technologie: AshDec®-Verfahren; R-Rhenania-Verfahren

## 7 SATELLITE

Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling

Koordinatorin: Dr.-Ing. Maike Beier (LU Hannover)

Technologie: Klärschlamm-trocknung mit sequentieller

Stickstoffrückgewinnung; Düngemittelherstellung On-Demand

# Inhalt

<b>Die BMFTR-Fördermaßnahme RePhoR – Regionales Phosphor-Recycling</b>	<b>4</b>
<b>AMPHORE</b>	<b>6</b>
Regionales Klärschlamm- und Aschenmanagement zum Phosphorrecycling für einen Ballungsraum	
<b>DreiSATS</b>	<b>10</b>
Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen	
<b>KlimaPhoNds</b>	<b>14</b>
Klimaneutrale und reststofffreie Klärschlammverwertung mit Phosphorsäureproduktion in Südost-Niedersachsen	
<b>P-Net</b>	<b>18</b>
Aufbau eines Netzwerks zum ressourceneffizienten Phosphor-Recycling und -Management in der Region Harz und Heide	
<b>RePhoRM</b>	<b>22</b>
Regionales Phosphorrecycling im Rhein-Main-Gebiet unter Berücksichtigung industrieller und agrarischer Stoffkreisläufe	
<b>R-Rhenania</b>	<b>26</b>
Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern	
<b>SATELLITE</b>	<b>30</b>
Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling	
<b>Kontaktdaten</b>	<b>34</b>
<b>Impressum</b>	<b>38</b>

# Die BMFTR-Fördermaßnahme RePhoR – Regionales Phosphor-Recycling

## Hintergrund und Ziele

Phosphor (P) ist ein essenzieller und nicht substituierbarer Baustein in allen Lebewesen und wird vor allem als Dünger für eine ertragreiche Landwirtschaft gebraucht. Die endlichen Phosphaterz-Reserven sind auf wenige, teilweise politisch instabile Regionen in der Welt begrenzt und zunehmend verunreinigt. Deutschland, wie auch nahezu alle Länder der Europäischen Union (EU), hat keine eigenen Rohphosphatlagerstätten und ist deshalb vollständig auf Importe angewiesen. Eine wichtige Rolle zur Sicherung der zukünftigen Versorgung spielt die Rückgewinnung von Phosphor aus P-reichen Abfallströmen wie Abwasser und Klärschlamm. Die Bundesregierung hat deshalb die Rückgewinnung von Phosphor im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess II) als wichtigen Baustein zur Etablierung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft verankert und mit der im Oktober 2017 in Kraft getretenen Novellierung der Klärschlammverordnung die gesetzlichen Rahmenbedingungen geschaffen. Diese Entwicklungen unterstreichen den großen Bedarf an wirtschaftlichen und nachhaltigen Lösungen zum P-Recycling.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) die Fördermaßnahme Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR) als Teil der Strategie „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ auf den Weg gebracht. Ziel ist es, durch innovative wirtschaftliche Lösungen zum regionalen P-Recycling einen Beitrag zur Umsetzung der neuen Klärschlammverordnung zu leisten. Durch die daraus resultierende verstärkte Nutzung von Sekundärphosphor aus der Kreislaufwirtschaft sollen der Ver-

lust von Phosphor und die Abhängigkeit Deutschlands von Phosphorimporten maßgeblich verringert werden.

In RePhoR werden verschiedene Technologien zur P-Rückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungssasche großtechnisch umgesetzt und wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse und praktische Erfahrungen gesammelt. Es wird die Lücke zwischen P-Rückgewinnung und P-Recycling möglichst regional geschlossen und der rückgewonnene Phosphor über die Landwirtschaft in den Nährstoffkreislauf oder als Rohstoff in die Industrie zurückführt. Die umgesetzten regionalen P-Konzepte innerhalb von RePhoR sollen als Vorbild für andere Regionen mit vergleichbaren Bedingungen dienen und die dortigen relevanten Entscheidungsträger dabei unterstützen, das aus der Klärschlammverordnung resultierende P-Rückgewinnungsgebot in ihrer jeweiligen regionalen Einheit wirtschaftlich und nachhaltig umzusetzen.

## Zeitlicher und inhaltlicher Überblick

Die Förderung innerhalb der Fördermaßnahme RePhoR erfolgte in zwei Phasen. Die sechsmonatige erste Phase (Konzeptphase) mit 19 geförderten Projekten diente der Erstellung der regionalen Konzepte zum P-Recycling und endete im Juli 2019. Daraus wurden sieben Verbundprojekte ausgewählt, die innerhalb der bis zu fünfjährigen Umsetzungsphase eine Förderung zur Realisierung ihrer Konzepte erhielten. Die Umsetzungsprojekte starteten ab dem 1. Juli 2020 und werden in dieser Publikation vorgestellt. Während ein Teil der Projekte Ende 2025 abgeschlossen wurde, läuft ein anderer Teil noch darüber hinaus.

Jedes Projekt besteht aus mehreren Teilprojekten und Arbeitspaketen, in denen die Verbundpartner aus Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis miteinander folgende inhaltliche Schwerpunkte der Fördermaßnahme umsetzen oder umgesetzt haben:

- » **Regionaler Ansatz:** Hierbei werden die örtlichen Gegebenheiten und Infrastrukturen der Abwasserreinigung und Klärschlammverwertung sowie möglichst kurze Transportwege für Klärschlämme, Klärschlammverbrennungsaschen und P-Rezyklate berücksichtigt. Es wird möglichst die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet, um den rückgewonnenen Phosphor in die Landwirtschaft oder in die Industrie zurückzuführen. Dabei wird darauf geachtet, dass alle regional relevanten Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft, Verwaltung und Gesellschaft von Anfang an mit eingebunden werden.
- » **Großtechnische P-Rückgewinnung:** Die großtechnische Umsetzung eines Verfahrens zur P-Rückgewinnung aus den Stoffströmen Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungsasche ist ein entscheidender Aspekt in den Projekten. Möglich ist auch die sinnvolle Einbindung von bestehenden großtechnischen Anlagen. Mit diesen großtechnischen Umsetzungen werden Erfahrungen unter realen Bedingungen gesammelt, um die Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb und die Klärschlamm-entsorgung sowie die Produktqualität der P-Rezyklate und deren Nutzung vernünftig beurteilen zu können.
- » **Qualität der P-Rezyklate:** Eine wichtige Voraussetzung für die Akzeptanz der erzeugten P-Rezyklate am Markt ist der Nachweis, dass sie kontinuierlich, in ausreichender Menge und in guter Qualität erzeugt werden können. Je nach Verwendungszweck müssen dabei unterschiedliche Anforderungen erfüllt werden. Bei einer Verwendung als Düngemittel zum Beispiel ist eine gute Pflanzenverfügbarkeit bei gleichzeitiger Schadstoffarmut entscheidend. Aus diesem Grund sind Qualitätsuntersuchungen der erzeugten P-Rezyklate ein wichtiger Teil des Arbeitsprogramms der RePhoR-Projekte.
- » **Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und Bilanzierungen:** Innerhalb der regionalen Konzepte und Umsetzungen sollen möglichst wirtschaftliche und nachhaltige Lösungen zum P-Recycling realisiert werden. Zur Abschätzung werden hierfür Wirtschaftlichkeitsanalysen und Ökobilanzierungen mit etablierten Verfahren innerhalb der Projekte durchgeführt.

Die vorliegende Publikation markiert den Abschluss der RePhoR-Fördermaßnahme. Sie fasst die zentralen Ergebnisse der sieben Verbundprojekte zusammen und gibt Antworten auf Fragen, die für die Umsetzung der Phosphorrückgewinnungspflicht in der Praxis entscheidend sind: Welche Verfahren funktionieren unter welchen Bedingungen? Wie lassen sich die erzeugten Rezyklate in bestehende Lieferketten integrieren? Und wie können die Ergebnisse weiter verwendet werden? Die Beiträge richten sich an alle, die an der Planung, Genehmigung, dem Betrieb oder der Förderung von Phosphorrecycling-Anlagen beteiligt sind.

Die sieben Verbundprojekte haben die in RePhoR untersuchten Phosphor-Rückgewinnungsverfahren auch in Verfahrenssteckbriefen dokumentiert. Diese vertiefen die hier zusammengefassten Ergebnisse mit Prozessdaten, Eigenschaften der gewonnenen Rezyklate, Betriebsanforderungen und weiteren technischen Informationen.



# AMPHORE

## Regionales Klärschlamm- und Aschenmanagement zum Phosphorrecycling für einen Ballungsraum

### Projektziel & Hintergrund

In AMPHORE wurde eine gemeinsame Möglichkeit zur P-Rückgewinnung für fünf sondergesetzliche Wasserverbände in NRW untersucht. Ausgangslage bilden die Verbandsgebiete mit rd. 140 KA sowie einer zentralisierten KS-Entsorgung inkl. Monoverbrennung. Technischer Kern ist ein nasschemisches Verfahren inkl. Schwermetallaus-schleusung zur Rückgewinnung aus Verbrennungsasche. Neben der Nutzung des P-Rezyklats wurden auch mögliche Verwertungspfade der Nebenprodukte und Reststoffe betrachtet. Es wurden exemplarisch Wege zur Lösung der hochkomplexen rechtlichen, organisatorischen, logistischen und wirtschaftlichen Herausforderungen betrachtet.

### Key Facts zum Projekt

#### Koordination

##### Ruhrverband

Kronprinzenstraße 37, 45128 Essen

##### Hanna Evers, M. Sc.

Tel. +49 201 178-2380

hev@ruhrverband.de

#### Untersuchungsstandort

Bottrop

#### Projektpartner

- » Emschergenossenschaft | Lippeverband
- » Wupperverband
- » Linksniederrheinische Entwässerungs-Genossenschaft
- » Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen University (ISA)
- » Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
- » Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH (ifeu)
- » Emscher Wassertechnik GmbH
- » Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH
- » PhosRec Phosphor-Recycling GmbH

#### Assoziierte Partner

- » BETREM GmbH
- » INNOVATHERM Gesellschaft zur innovativen Nutzung von Brennstoffen mbH
- » WFA Elverlingsen GmbH
- » SF-SoepenberG GmbH

- » Yara GmbH & Co. KG
- » WKW GmbH & Co. KG
- » COMPO EXPERT GmbH
- » Wocklum GmbH & Co. KG

#### Laufzeit

01.07.2020 – 31.03.2027

#### Verbundprojekt-Webseite

[www.ruhrverband.de/nachhaltigkeit/forschungsprojekte/amphore](http://www.ruhrverband.de/nachhaltigkeit/forschungsprojekte/amphore)  
[www.phosrec.de](http://www.phosrec.de)

### Technische Ergebnisse

Bei nasschemischen Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungsasche wie der PARFORCE®-Technologie spielt die Extraktion (saurer Aufschluss der Asche) eine zentrale Rolle. Durch gezielte Einstellung der Aufschlussparameter sollen Extraktionsgrade von mindestens 90 % für Phosphor erreicht werden, um – unter Berücksichtigung möglicher Verluste in nachfolgenden Prozessstufen – den gesetzlich geforderten P-Rückgewinnungsgrad von 80 % sicherzustellen. Der Extraktionsgrad von Phosphor lag in den ersten Versuchskampagnen für die unterschiedlichen Aschen in der Regel bei über 80 %, im Mittel wurden etwa 85 % des P aus der Aschematrix herausgelöst und in das Filtrat überführt. Dieser Wert liegt jedoch noch unter dem angestrebten Zielwert. Im verbleibenden Ascherest nach dem Aufschluss wurden etwa 9 % des ursprünglichen P-Gehalts ermittelt. Es liegen demnach ca. 6 % P-Verluste bei dem Filtrationschritt vor, die nicht in den Prozess transferiert wurden. Infolge der Umsetzung verfahrenstechnischer Op-

timierungen konnten diese Verluste minimiert werden und weitere 4–5% des Phosphors aus dem Filtrationsschritt in den Prozess zurückgeführt werden. Demzufolge konnte ein ausreichender Transfer des 90%igen Extraktionsgrads in den Versuchskampagnen realisiert werden.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass die analytische Bestimmung des P-Gehalts in der Asche sehr komplex ist und von der Probenahme bis zur Probenaufbereitung und Analytik eine höhere Fehleranfälligkeit aufweist als gut durchmischte Flüssigproben. Überschätzte P-Gehalte in der Asche führen zu einem geringeren P-Rückgewinnungsgrad.

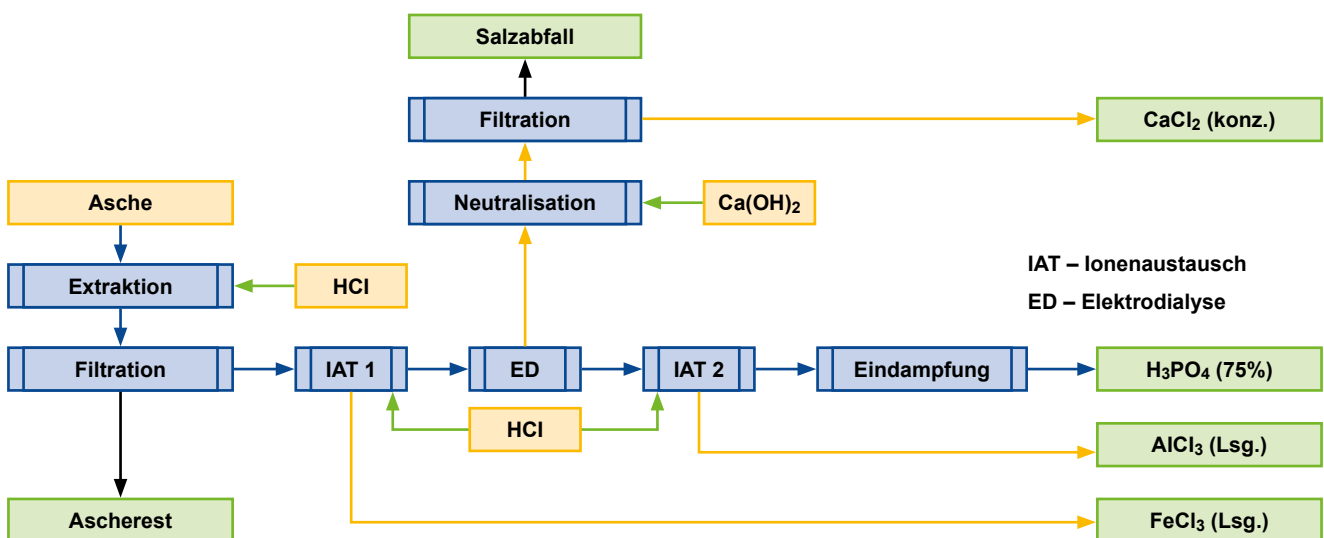
Salzsäure wird im Prozess sowohl für den Extraktion als auch für die Regeneration der Ionenaustauscher (IAT) eingesetzt. Der Anteil der für den Extraktionsschritt verwendeten Salzsäure beträgt nur etwa ein Drittel des gesamten Säureverbrauchs. Den Großteil der Säure benötigt der Betrieb der IAT. Entsprechend besteht in diesen Stufen ein hohes Einsparpotenzial. In einzelnen Optimierungsschritten erfolgte die Parametrierung mit dem Ziel hohe Produktqualitäten zu gewährleisten, um sicher Begleitstoffe wie Al und Fe bei geringem Säureverbrauch abzutrennen. Hierbei zeigt sich insbesondere, dass der Betriebsmittelverbrauch stark ashespezifisch und von den Al- und Fe-Frachten abhängig ist. Entsprechend variiert der Säureverbrauch. In den ersten Versuchskampagnen lag er bei etwa 3 t HCl (31%) je Tonne Asche bei hohen Al- und Fe-Frachten in den eingesetzten Aschen.

Die Aschezusammensetzung – insbesondere die Konzentration der Hauptelemente (P, Ca, Fe, Al) – hat einen wesentlichen Einfluss auf den Prozess und entsprechend auf den Betriebsaufwand. Der P-Gehalt in der Asche bestimmt maßgeblich die Masse des am Ende erzeugten Hauptprodukts. Die darauf bezogenen spezifischen Betriebsmittelverbräuche und der Energiebedarf sind bei höheren P-Gehalten in

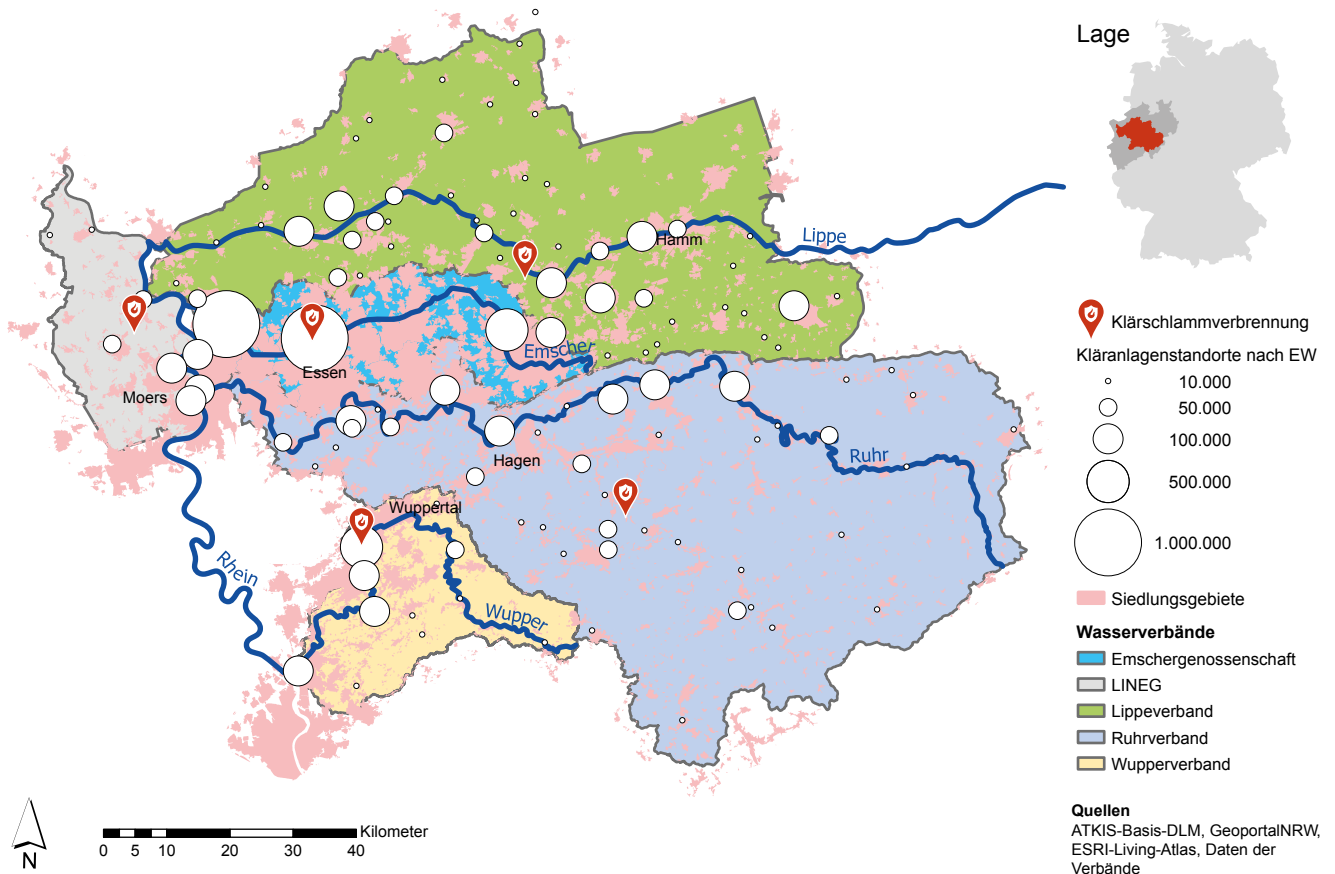
der Asche entsprechend geringer. Bei Aschen mit höherem Ca-Gehalt erhöht sich der Säureverbrauch infolge der alkalischen Pufferkapazität der Asche bei der Extraktion. Gleichzeitig steigt der Energiebedarf der Elektrodialyse, um die höhere Ca-Fracht effektiv aus dem Produktstrom zu entfernen. Auch können höhere Ca-Gehalte im System die Beladungskapazität der IAT für Fe und Al beeinflussen, mit der Folge, dass die Anzahl der spezifischen Regenerationszyklen steigt. Erhöhte Al- und Fe-Gehalte beeinflussen die Betriebsführung der IAT im gleichen Maße. Bei höheren Konzentrationen ist die Beladungskapazität früher erschöpft und die spezifische Anzahl der Regenerationszyklen steigt, was wiederum zur Erhöhung des Säureverbrauchs und auch des Regenerat-Anfalls (Nebenprodukt) führt. Ferner steigt die Anzahl notwendiger Waschschritte zwischen Beladung und Regeneration der IAT-Säulen, wodurch sich der spezifische Wasserverbrauch und Abwasseranfall erhöht. Ferner erfolgt hierdurch eine zusätzliche Verdünnung des Produktstroms, was zu einem höheren Energiebedarf in der Eindampfung der Phosphorsäure führt.

### Ökonomische & ökologische Aspekte

Die P-Rückgewinnung ist in allen Fällen nicht kostendeckend. Erlöse aus der stofflichen Nutzung der zurückgewonnenen Phosphor- und Nebenprodukte können zur Reduzierung der Kosten beitragen, sind jedoch stark von der Marktsituation und regulatorischen Vorgaben abhängig. Zentrale Kostentreiber sind der Energie- und Chemikalienbedarf, der Personalaufwand sowie der Transport und die Entsorgung von Reststoffen. Die Investitionskosten der Anlagen spielen aufgrund der im Vergleich hohen Betriebskosten eine untergeordnete Rolle. Die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung werden mit Abschluss der weiteren Arbeitspakete konkret benannt. Für die wesentlichen Einflussgrößen (u. a. Energie, Säureeinsatz und Erlöse) werden im Rahmen der ökonomischen Bewertung zusätzliche Sensitivitätsanalysen durchgeführt.



Verfahrensschema PARFORCE®-Verfahren.



**Die betrachtete Projektregion in AMPHORE. © AMPHORE**

Die bisherigen Ökobilanzierungen (LCA) zeigen, dass die Herkunft der eingesetzten Betriebsmittel (hier Salzsäure) einen maßgeblichen Einfluss auf die Umweltbilanz hat. Besonders positiv können sich zudem die Gutschriften aus der Rückgewinnung von Al und Fe sowie die Nutzung von Abwärme auswirken. Insgesamt hängt die Nachhaltigkeit des Verfahrens wesentlich davon ab, ob Sekundärsalzsäure eingesetzt wird und in welcher Qualität Al und Fe zurückgewonnen werden. Entscheidend ist zudem, ob die Al-/Fe-Rezyklate konventionell hergestellte Flockungsmittel vollständig substituieren können. Ein weiterer Hebel ist die Nutzung vorhandener Abwärme, was die Bedeutung der Standortwahl unterstreicht.

**Rezyklate & Abnahmemärkte**

Bei der PARFORCE®-Technologie ist das Zielprodukt eine P-Säure mit einem Gehalt von 75% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. In den bisherigen Versuchskampagnen konnte die Qualität der erzeugten Säure verbessert und die Reinheit stabil auf einem hohen Niveau gehalten werden. Die wesentlichen Hauptelemente der Ausgangsasche Al, Ca, Fe und Mg stellen den größten potenziellen Massenanteil an der Verunreinigungsfracht dar und können im Prozess wirksam von der P-Säure separiert werden. Die Konzentrationen sämtlicher Makroelemente liegen unterhalb von 1.000 ppm. Hinsichtlich der Schwermetallgehalte

ist die erzeugte Säure gering belastet. Hervorzuheben sind die niedrigen Gehalte an Cd und U, die jeweils unter 5 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> liegen und damit die Anforderungen der Handelskategorie „Technical Grade“ für diese Elemente erfüllen. Bei einem P-Gehalt der eingesetzten Asche von 7,5% konnten etwa 0,25 t H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (75%) je Tonne Asche gewonnen werden.

Bei der Regeneration der IAT fallen Al- (AlCl<sub>3</sub>) und Fe-Chloridlösungen (FeCl<sub>3</sub>) an. Deren Eignung für einen möglichen Einsatz als Fällmittel in Kläranlagen wird derzeit bewertet. Je Tonne eingesetzter Asche entstehen jeweils etwa 0,5 bis 1 t dieser Co-Produkte. Die anfallenden Metallsalzlösungen weisen derzeit einen Wirkstoffgehalt von etwa 5 (Fe) bis 10 (Al) g WS/kg auf. Durch weitere Prozessoptimierungen besteht das Potenzial, künftig Teilströme in höher konzentrierter Form bereitzustellen und die Richtwerte des DWA-A 202 (2026) für Verunreinigungen in Fällmitteln einzuhalten.

Als weiteres Nebenprodukt entsteht durch die Neutralisation des Konzentrates aus der Elektrodialyse mit Ca(OH)<sub>2</sub> und anschließender Fest-Flüssig-Trennung ein Ca-Chlorid-Konzentrat (CaCl<sub>2</sub>), dessen Verbleib bzw. Weiterverarbeitung noch untersucht wird. Derzeit wird für den Ascherest („ausgelaugte Asche“) von einer Entsorgung (Deponierung) als Reststoff ausgegangen.

## Transfer/Verstetigung

Mit der Demonstrationsanlage wird die PARFORCE®-Technologie erstmals im großtechnischen Maßstab betrieben und eine belastbare Datengrundlage ermittelt, welche eine wichtige Entscheidungsgrundlage für zukünftige vollmaßstäbliche Umsetzungen bildet.

Das Projekt AMPHORE endet zum 30. Juni 2026. Darüber hinaus wird die Demonstrationsanlage bis zum 31. März 2027 durch die PhosRec GmbH weiterbetrieben. Parallel wird die wissenschaftliche Begleitung des Betriebs fortgeführt. Insgesamt wird so ein zweijähriger Betrieb realisiert. Im Zuge des Planungsprozesses konnte bereits der grundsätzliche Nachweis der Genehmigungsfähigkeit nach BImSchG erbracht werden. Für eine vollmaßstäbliche Umsetzungen sollte der Demonstrationsbetrieb u.a. Detailspekte zum Abwasserabfall und Inhaltsstoffe (insb. Metallfrachten) in Abhängigkeit unterschiedlicher Aschequalitäten sowie ggf. Behandlungsnotwendigkeiten erarbeiten. Der Anlagenbau und -betrieb dient darüber hinaus dem Nachweis der technischen Umsetzbarkeit des Verfahrens und der Einordnung der Zuverlässigkeit und Eignung der Verfahrenstechnik (insb. auch ökologische und ökonomische Bewertung). Wege für die Nutzung des P-Rezyklats und der Nebenprodukte und für die Entsorgung von Reststoffen werden aufgezeigt.

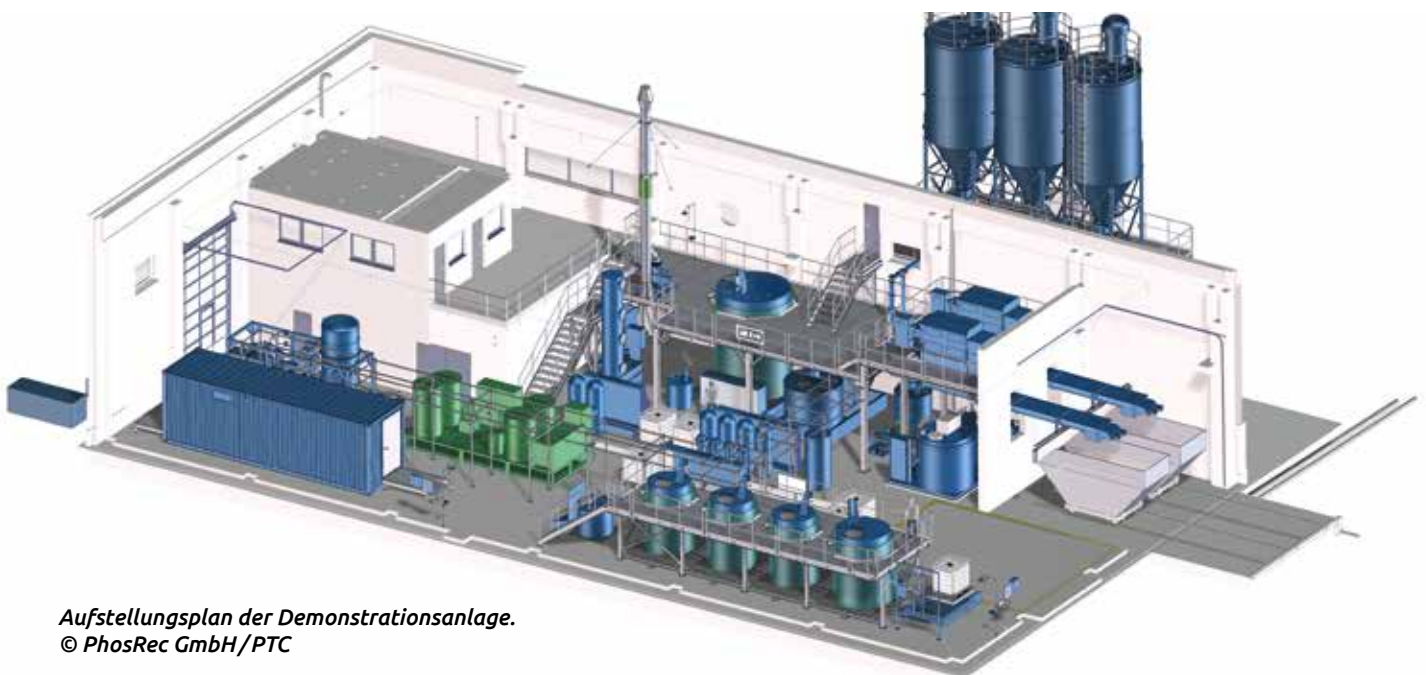
Die PhosRec Phosphor-Recycling GmbH wurde im März 2020 gemeinsam von den fünf Wasserverbänden als beispielhaftes Organisationsmodell für eine öffentlich-rechtliche Kooperation zur Umsetzung der gesetzlich vorgeschriebenen P-Rückgewinnung gegründet. In AMPHORE wurden auch Hinweise für weitere mögliche Gesellschaftsformen

(öffentlich-rechtlich, privatrechtlich) erarbeitet. Zur Verfahrenswahl sowie zur Wahl eines Standorts (inkl. Logistik) wurden in AMPHORE multikriterielle Methoden entwickelt. Wesentliche Projektergebnisse wurden (und werden) auf Fachveranstaltungen sowie in Fachzeitschriften präsentiert und veröffentlicht.

AMPHORE leistet als Brücke zwischen Labor- bzw. Technikumsversuchen und großtechnischer Umsetzung einen nachhaltigen Beitrag zur Umsetzung regulatorischer Anforderungen, zur Ressourcenschonung und zur Etablierung einer resilienten, nationalen P-Wertschöpfungskette in Deutschland.

### Fazit: Drei Empfehlungen für die Praxis

- 1.) Ein organisatorischer Zusammenschluss von Verantwortlichen zur Umsetzung der P-Rückgewinnung ist sinnvoll. Aufgrund der rechtlichen Komplexität ist eine dauerhafte rechtliche Begleitung zwingend erforderlich.
- 2.) Bei einer nasschemischen P-Rückgewinnung beeinflusst insbesondere die Menge der zu transportierenden Stoffe den Aufwand der Logistik. Aufgrund möglicher Synergien sind Chemparks als Standorte vorteilhaft.
- 3.) Bei der Verfahrenswahl sowie bei der Anlagenkonzeptionierung und dem Betrieb einer nasschemischen P-Rückgewinnung ist die starke Abhängigkeit von der Aschequalität zu beachten.



**Aufstellungsplan der Demonstrationsanlage.**  
© PhosRec GmbH/PTC

## DreiSATS

# Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen

### Projektziel & Hintergrund

Ziel des Verbundprojektes DreiSATS ist die praxisnahe, prototypische Erprobung und Demonstration einer innovativen, wirtschaftlich und technisch tragfähigen Prozesskette zur thermischen Klärschlammverwertung mit Phosphorrecycling und Produktverwertung. Beteiligt sind neben dem Projektkoordinator Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH (VKD) die Projektpartner Carbotechnik GmbH, LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH, Pontes Pabuli GmbH sowie die Forschungseinrichtungen Fraunhofer-IKTS und Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA).

### Key Facts zum Projekt

#### Koordination

**Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH**  
Nordstraße 15, 04420 Markranstädt

#### Matthias Hoger

Tel.: +49 34205 738-19  
matthias.hoger@veolia.com

#### Claudyn Kidszun

Tel.: +49 163 73800-28  
claudyn.kidszun@veolia.com

#### Untersuchungsstandort

Markranstädt und Magdeburg

#### Projektpartner

- » Carbotechnik Energiesysteme GmbH
- » Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme IKTS
- » Lufttechnik Crimmitschau GmbH
- » MFPA Materialforschungs- und prüfanstalt an der Bauhaus Universität Weimar
- » Pontes Pabuli GmbH

#### Laufzeit

01.07.2020 – 31.12.2025

#### Verbundprojekt-Webseite

[www.dreisats.de](http://www.dreisats.de)

### Technische Ergebnisse

Das Verbundprojekt DreiSATS demonstriert erfolgreich eine innovative, dezentrale Prozesskette zur thermischen Klärschlammverwertung mit integriertem Phosphorrecycling. Die technologischen Kernelemente bilden die Carbotechnik-Staubfeuerung sowie das Pontes Pabuli-Verfahren zum Phosphoraufschluss und zur Düngemittelherstellung.

Die im Projekt DreiSATS eingesetzte Staubfeuerung der Carbotechnik GmbH demonstriert eine robuste, wirtschaftliche und für Kommunen gut übertragbare Lösung zur dezentralen thermischen Klärschlammverwertung. Die Pilotanlage in Magdeburg, ausgelegt für rund 8.000 t/a mechanisch entwässerten Klärschlamm, zeigt, dass selbst stark schwankende Klärschlammqualitäten sicher und emissionsarm verarbeitet werden können. Das vollautomatische Regelungskonzept steuert Brennstoff- und Luftmengen kontinuierlich anhand eines definierten O<sub>2</sub>-Sollwerts und hält die Verbrennungsqualität stabil. Der CO-Gehalt im Abgas lag in allen Versuchsreihen deutlich unter den Grenzwerten und dient als verlässlicher Indikator für einen sicheren Anlagenbetrieb.

Ein zentrales Ergebnis ist die prozessintegrierte Schwermetallentfrachtung. Die Staubfeuerung ermöglicht eine In-Situ-Aschemodifikation, bei der die Asche bereits im Feuerraum thermochemisch verändert wird. Durch die gezielte Additivierung und das hohe Temperaturniveau werden leichtflüchtige Schwermetalle bereits während der Verbrennung abgereichert. Die partikuläre, schadstoffreduzierte Asche wird

über den integrierten Zyklon bzw. den keramischen Heißgasfilter abgetrennt, während gasförmige Schwermetalle erst in der Abgasreinigung auskondensieren und sicher separiert werden. Die resultierende Asche ist feinkörnig, homogen und weist deutlich reduzierte Schadstoffgehalte auf. Zudem weist die Asche eine sehr gute Phosphorlöslichkeit auf. Je nach Inputmaterial kann die Asche bereits den Anforderungen der Düngemittelverordnung (DüMV) entsprechen.

Die Staubfeuerung erfüllt die Vorgaben der 17. BImSchV und benötigt über den gesamten Regelbereich keine Stützflamme. Ihr breiter, stufenlos regelbarer Leistungsbereich ermöglicht eine flexible Anpassung an regionale Stoffströme und saisonale Schwankungen. Dies ist insbesondere vorteilhaft, wenn überschüssige Wärme z. B. in ein Fernwärmenetz eingespeist wird. Durch ihre kompakte Bauweise, die einfache Bedienung, den hohen Automatisierungsgrad und die robuste Betriebsweise eignet sich die Technologie besonders für dezentrale Anlagenkonzepte, die kurze Transportwege, regionale Wertschöpfung und eine schnelle Umsetzung der Rückgewinnungspflichten ab 2029 ermöglichen.

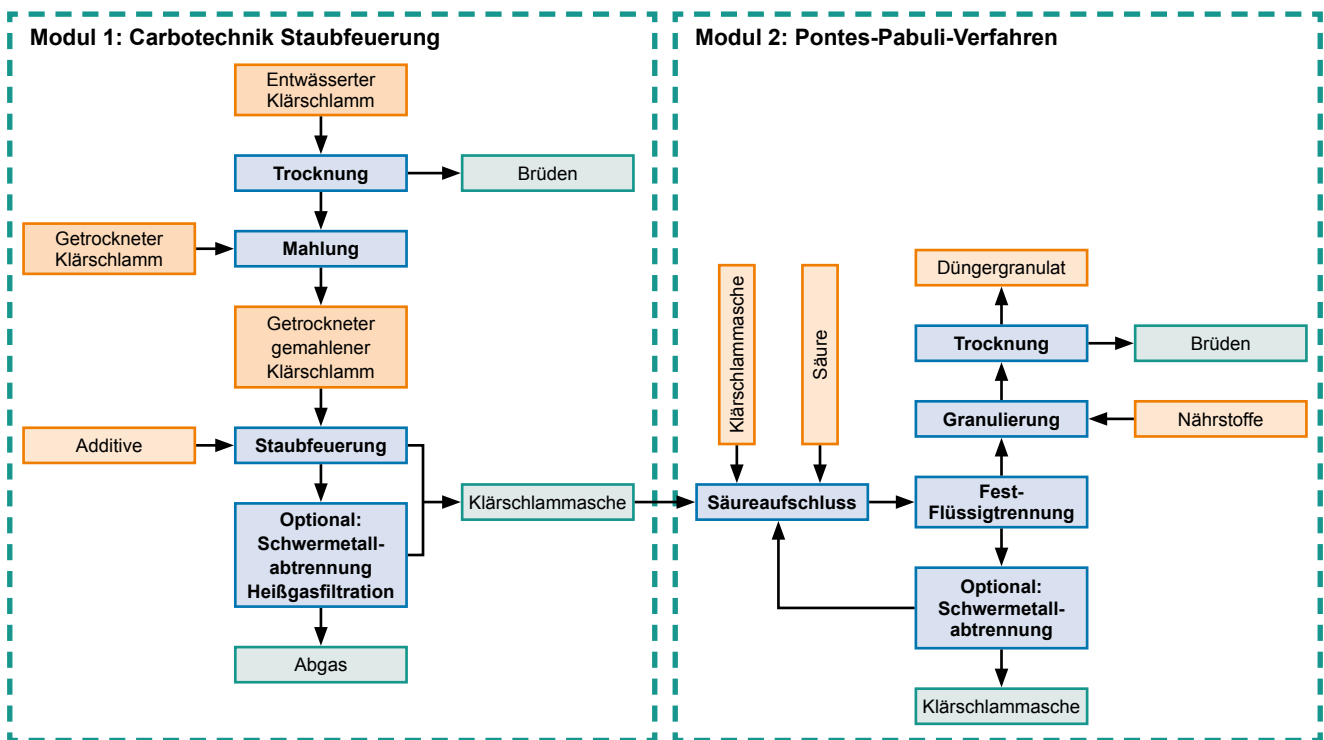
Als zentrale Prozessstufe zur Ascheaufbereitung wurde das Pontes Pabuli-Verfahren im TRL 6-Maßstab etabliert. Hierbei wird zunächst eine Suspension aus Asche, Wasser und Säure erzeugt, mechanisch in feste und flüssige Phasen getrennt und die feste Phase unter Zugabe weiterer, exakt dosierter Nährstoffe zu einem hochwertigen Düngergranulat verarbeitet. Im März 2022 ging hierfür die Versuchsanlage in Markranstädt auf dem Gelände der Veolia in Betrieb. Im

Projektverlauf wurde diese Technologie zu einer modularen Technologieplattform weiterentwickelt: Neben dem Standardverfahren (FLEX) mit zuschaltbarer Schwermetallabreicherung wurden das „EcoPLUS“-Verfahren und das „Perfect-CLEAN“-Verfahren entwickelt. Das EcoPLUS-Verfahren ist für besonders hochwertige Aschen konzipiert, kommt ohne Schwermetallabtrennung aus und zeichnet sich durch niedrige Betriebs- und Investitionskosten aus. Mit dem Perfect-CLEAN-Verfahren können hingegen Schwermetalle nach Bedarf zu über 90% abgeschieden und die Phosphatkonzentration auf über 40% eingestellt werden. Umfangreiche Versuchsreihen zeigten erfolgreich, dass diese Verfahrensvarianten unabhängig von der eingesetzten Verbrennungstechnik (mit Aschen aus unterschiedlichen Verbrennungssystemen) so gesteuert werden können, dass stets eine gleichbleibende, sehr hohe Düngerqualität resultiert.

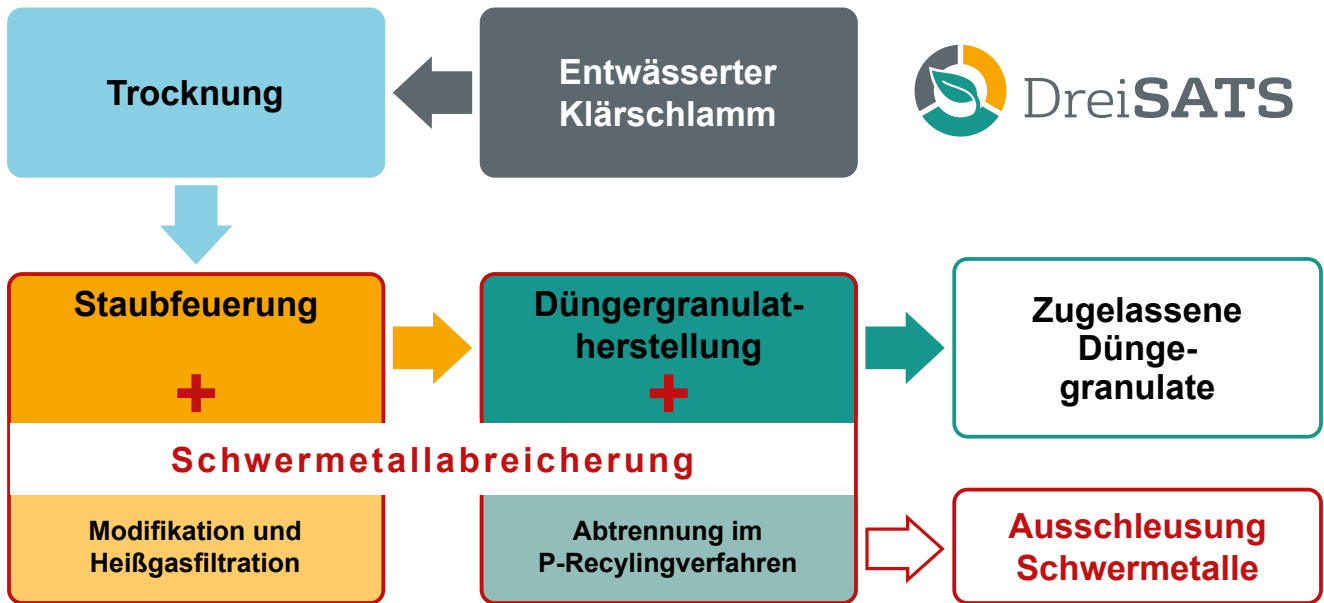
### Ökonomische & ökologische Aspekte

Der dezentrale Ansatz von DreiSATS bietet erhebliche ökonomische und ökologische Vorteile gegenüber zentralen Großanlagen. Während aktuell favorisierte Wirbelschichtverbrennungsanlagen erst bei deutlich größeren Anlagenkapazitäten rentabel sind, kann die Carbotechnik-Staubfeuerung bereits in kleineren Anlagengrößen wirtschaftlich betrieben werden.

Durch diese geringere Baugröße können die Anlagen direkt auf dem Gelände der Kläranlagen oder in gut angebundenen Industriegebieten errichtet werden. Zugleich ermöglicht der stufenlos regelbare Leistungsbereich eine flexible



DreiSATS Fließschema. © DreiSATS



Technologieketten im Verbundprojekt DreiSATS. © DreiSATS

Anpassung an saisonale Schwankungen sowie eine effiziente Wärmenutzung, etwa durch die Einspeisung in Fernwärmenetze. Ökologisch profitiert das Konzept maßgeblich von der Reduzierung des Transportaufkommens, da der Klärschlamm regional verwertet wird.

Ein weiterer wesentlicher Umweltvorteil des innovativen Pontes Pabuli-Verfahrens besteht darin, dass neben den gezielt abgetrennten Schwermetallen keine weiteren Abfallstoffe anfallen.

Mit dem DreiSATS-Ansatz werden lokale Nährstoffkreisläufe gestärkt. Analysen zeigen, dass sich der Phosphatbedarf in der Region „Mitteldeutsches Dreiländereck“ zu rund 60% aus den dort anfallenden Klärschlämmen decken ließe.

Auf Grundlage der im Realbetrieb erhobenen Daten wurden zudem erste technische Kalkulationen erstellt, um die Wirtschaftlichkeit einer großtechnischen Umsetzung belastbar zu bewerten.

### Rezyklate & Abnahmemärkte

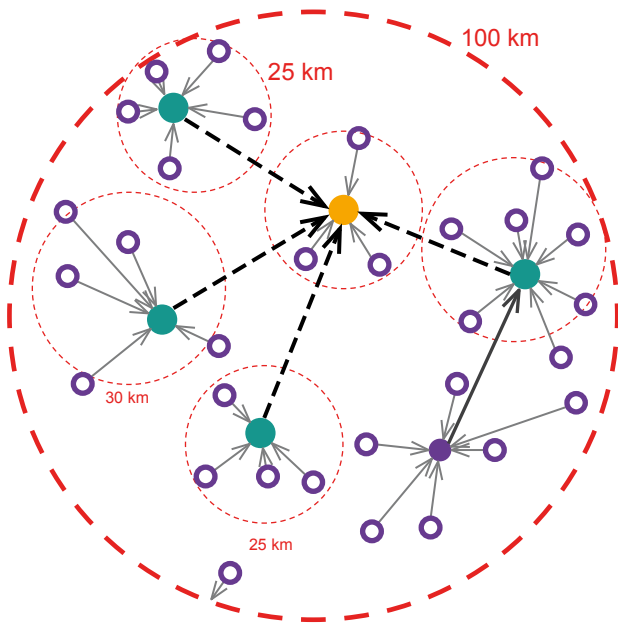
Das primäre Ziel von DreiSATS ist die Erzeugung marktfähiger Düngerprodukte aus Klärschlämmen bzw. -aschen, die der Landwirtschaft in gleichbleibend hoher Qualität bereitgestellt werden können. Die in der Staubfeuerung erzeugte Asche erfüllt bei geeigneten Eingangsqualitäten bereits die Anforderungen der DüMV. Sie ist infolge der Prozessbedingungen der Staubfeuerung feinkörnig sowie homogen und weist aufgrund der prozessintegrierten In-Situ-Aschemodifikation und Schwermetallentfrachtung deutlich reduzierte Schadstoffgehalte auf. Analysen belegen darüber hinaus

eine sehr gute Phosphorlöslichkeit. Die feine Kornstruktur und die große spezifische Oberfläche schaffen zugleich günstige Voraussetzungen für die Weiterverarbeitung zu definierten Düngern, etwa im Pontes Pabuli-Verfahren oder in anderen P-Rückgewinnungsprozessen.

Ein wesentlicher Hebel zur Erschließung attraktiver Abnahmemärkte ist die Veredelung im Pontes Pabuli-Verfahren. Dabei entsteht ein standardisiertes Düngergranulat, dessen Nährstoffzusammensetzung durch die gezielte Zugabe weiterer Komponenten präzise auf den jeweils geforderten Düngertyp eingestellt werden kann. Die Qualität dieses Granulats entspricht der von konventionellen Mineräldüngern und schafft damit gute Voraussetzungen für eine hohe Marktakzeptanz. Die agronomische Wirksamkeit der erzeugten Rezyklate wurde im Projekt umfassend validiert: Granulierungs- und Pflanzversuche mit Aschen aus der Staubfeuerung lieferten sehr positive Ergebnisse. Ergänzend wies das Fraunhofer IKTS die Düngerwirkung in standardisierten Labor-Pflanzversuchen wissenschaftlich nach, während Veolia Freiland- und Gewächshausversuche zur Qualitätssicherung durchführte. Damit wurde die Marktfähigkeit als vollwertiger Ersatz für primäre Dünger belastbar belegt.

### Transfer/Verstetigung

Die im Projekt DreiSATS aufgebauten Demonstratoren bleiben über das Projektende hinaus als Transfer- und Erprobungsinfrastrukturen verfügbar. Die Staubfeuerungsanlage in Magdeburg kann für Besichtigungen, weiterführende Untersuchungen sowie standortspezifische Versuche mit Klärschlämmen externer Betreiber genutzt werden. Ebenso steht die Demonstrationsanlage zum Pontes Pabuli-Verfahren



- ← Transport entwässerter Klärschlamm
- ← - - Transport getrockneter Klärschlamm
- ← - - - Transport Klärschlammasche
- Standort Trocknung, Mono-KS-Staubfeuerung und Konfektionierung
- Standort Trocknung und Mono-KS-Staubfeuerung
- Kläranlage ohne Trocknung
- Kläranlage mit Trocknung

#### Vorteile der dezentralen Klärschlammbehandlung

#### Dezentrales Konzept. © DreiSATS

ren für Untersuchungen weiterer Klärschlammaschen und zur verfahrensspezifischen Anpassung relevanter Prozessparameter zur Verfügung. Beide Anlagen liefern damit belastbare, standortspezifische Datengrundlagen für Planung, Auslegung und Betrieb künftiger Anlagenkonzepte.

Die im Projekt erhobenen Betriebsdaten der Staubfeuerung unterstützen Genehmigungsbehörden und Planungsverantwortliche bei der Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit und schaffen eine belastbare Datengrundlage für die Konzeption zukünftiger Anlagen.

Zur Überführung des Pontes Pabuli-Verfahrens in den großtechnischen Maßstab werden derzeit im Rahmen eines Forschungsprojektes weiterführende Planungs- und Skalierungsuntersuchungen durchgeführt. Ziel ist die Realisierung einer Demonstratoranlage, mit der die technische Reife und Anwendungsnähe des Verfahrens weiter validiert werden können.

Ein wesentlicher Baustein der Verstetigung ist ein GIS-basiertes Softwaretool zur standortbezogenen Bewertung und Optimierung künftiger Anlagenkonzepte. Hierfür werden lokale Standortbedingungen, Klärschlammauftreten, landwirtschaftlicher Nährstoffbedarf, logistische Randbedingungen sowie Vermarktungsoptionen für Wärme und Strom integrativ berücksichtigt. Auf dieser Grundlage ermöglicht das Tool eine fundierte Dimensionierung zukünftiger Anlagen.

In acht Stakeholder-Workshops wurden relevante Akteursgruppen entlang der Wertschöpfungskette systematisch eingebunden, um Hemmnisse frühzeitig zu identifizieren, Akzeptanzpotenziale zu adressieren und den Wissenstransfer in die Praxis zu unterstützen.



Kontrolle der Korngröße der Düngergranulate in der Pontes Pabuli-Versuchsanlage am Standort der Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH (VKD). © Veolia GmbH

#### Fazit: Drei Empfehlungen für die Praxis

- 1.) Dezentrale Anlagenkonzepte sollten bevorzugt geprüft und umgesetzt werden, um Transportwege zu reduzieren, lokale Wärmepotenziale zu nutzen und regionale Nährstoffkreisläufe zu stärken.
- 2.) Kleinere, standortgerecht dimensionierte Staubfeuerungsanlagen können Genehmigungsverfahren vereinfachen, Projekte beschleunigen und Investitionsrisiken senken.
- 3.) Modulare Düngeraufbereitung mit bedarfsgerechter Schwermetallabtrennung sichert trotz schwankender Aschequalitäten eine konstant hohe, marktfähige Düngerqualität bei optimierten Prozesskosten.

# KlimaPhoNds

## Klimaneutrale und reststofffreie Klärschlammverwertung mit Phosphorsäureproduktion in Südost-Niedersachsen

### Projektziel & Hintergrund

KlimaPhoNds zielt darauf ab, Phosphor dezentral, d.h. direkt auf Kläranlagen zurückzugewinnen. Es richtet sich insbesondere an Anlagen ohne Anbindung an eine Monoverbrennungsanlage. Die Rückgewinnung erfolgt unter Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben ausschließlich aus Überschussschlamm (ÜSS) in Form von Struvit. Der verbleibende, phosphatarme Klärschlamm wird durch eine nahezu wärme neutrale Wirbelschichtverdampfungstrocknung getrocknet und kann flexibel weiterverwertet werden, etwa durch Mitverbrennung. Das gewonnene Struvit-Rezyklat erfüllt die Anforderungen an Recyclingdünger und kann zudem zur Weiterverarbeitung zu Phosphorsäure oder Phosphordünger genutzt werden.

### Key Facts zum Projekt

#### Koordination

**CUTEC-Forschungszentrum der TU Clausthal**

Leibnizstraße 23, 38678 Clausthal-Zellerfeld

**Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers**

Tel.: +49 5323 72-6243

michael.sievers@cutec.de

#### Untersuchungsstandort

Northeim

#### Projektpartner

- » TU Clausthal
- » Eigenbetrieb Abwasserbeseitigung Stadt Northeim
- » Knoke Industrie-Montagen GmbH
- » PARFORCE Engineering & Consulting GmbH
- » Lukson AG

#### Assoziierte Projektpartner

- » Braunschweigische Maschinenbauanstalt AG
- » Schwenk Zement (Werk Bernburg)
- » HeidelbergCement

#### Laufzeit

01.10.2020 – 30.09.2027

#### Verbundprojekt-Webseite

[www.klimaphonds.de](http://www.klimaphonds.de)

### Technische Ergebnisse

Für eine gesetzeskonforme Phosphorrückgewinnung aus Abwasser wurde für die Kläranlage Northeim das „Clausthaler Verfahren“ entwickelt und optimiert. Die Phosphorrückgewinnung erfolgt ausschließlich aus eingedicktem Überschussschlamm.

Mittels optimierter thermischer Schlammhydrolyse werden bis zu 70% des im Schlamm enthaltenen Phosphors in das Schlammwasser überführt. Maßgebliche Einflussfaktoren sind die Temperatur und die Verweilzeit. Die maximale Phosphorrücklösung wird bei etwa 60°C und nach 24 Stunden erreicht.

Neben diesen Betriebsparametern ist vor allem der Anteil an leicht rüclösbarem biologisch gebundenem Phosphor (Bio-P) im Überschussschlamm für die Menge des freisetzbaren Phosphats maßgeblich. Aufgrund saisonaler Schwankungen oder betrieblicher Störungen ist die Bio-P-Aufnahme und -Rüclösung zeitweise unzureichend, weshalb das Verfahren auch eine Zugabe von Zitronensäure beinhaltet. Dadurch werden zusätzlich chemisch gebundene Phosphate gelöst, beispielsweise Calcium- oder Eisenphosphate. Im Ergebnis wird dadurch auch bei schwankender Bio-P-Verfügbarkeit eine ausreichende Phosphorrüclösung gewährleistet. Der Einsatz von Zitronensäure erlaubt auch für Kläranlagen mit teilweiser Bio-P-Elimination eine gesetzeskonforme P-Gewinnung, allerdings ist die Wirtschaftlichkeit, die wesentlich vom Bedarf der Zitronensäure bestimmt wird, für jeden Anwendungsfall zu prüfen.

Nach der Hydrolyse wird der hydrolysierte Überschussschlamm entwässert. Untersuchungen zeigen gute Entwässerungseigenschaften mit erreichbaren Trockensubstanzgehalten von über 23%, wodurch mehr als 80% der zuvor gelösten Phosphate über das Zentratwasser abgetrennt werden.

Die Phosphate im Zentratwasser werden anschließend durch Fällung mit Magnesiumchlorid als Struvit zurückgewonnen. Zur optimalen pH-Einstellung wird Natronlauge zugegeben. Bei einer leicht überstöchiometrischen Magnesiumdosierung (P:Mg = 1:1,1) und einem pH-Wert von 8,5 bis 9 werden über 95% der gelösten Phosphatfracht ausgefällt. Eine zusätzliche Ammoniumquelle wie z. B. Zentrat aus der Faulschlamm-entwässerung ist nicht erforderlich, da bereits ausreichend Ammonium vorhanden ist. Die gebildeten Struvitkristalle werden diskontinuierlich am Boden abgezogen.

Der phosphatarmer Überlauf aus dem Phosphat-Fällungsreaktor wird mit dem entwässerten Hydrolysat vermischt und gemeinsam mit dem Primärschlamm der Faulung zugeführt. Damit greift das Verfahren nicht in die bestehende Abwasserbehandlung ein. Auch die bestehende Schlammbehandlung ist nur geringfügig betroffen, indem der Überschussschlamm über einen Bypass behandelt und nach der Behandlung mit nahezu unverändertem Trockensubstanzgehalt in die Faulung gelangt.

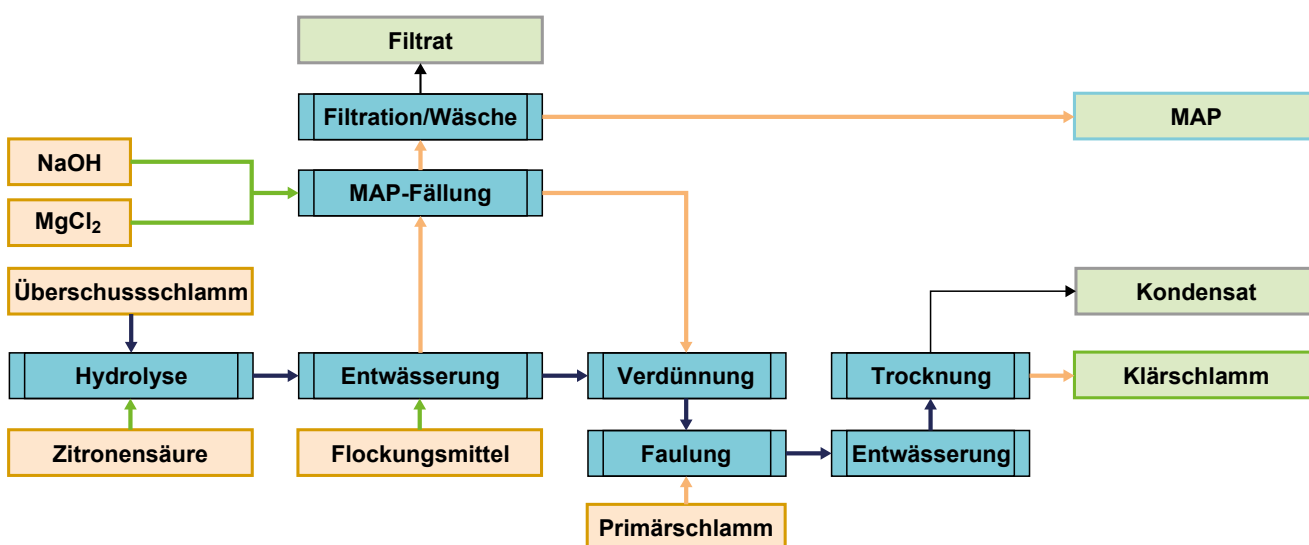
Der entwässerte Klärschlamm wird im Projekt erstmals mittels Wirbelschichtverdampfung (Pilotmaßstab) getrocknet. Die Trocknung erfolgt in reiner Wasserdampf-Atmosphäre, wodurch die zugeführte Wärme mittels Kondensation der Brüden nahezu vollständig zurückgewonnen wird.

Die Demonstration des P-Rückgewinnungsverfahrens erfolgt im großtechnischen Maßstab und im Vollstrom auf der Kläranlage in Northeim (Südost-Niedersachsen). Dabei werden aus täglich etwa 20–25 m<sup>3</sup> eingedicktem Überschussschlamm rund 200 kg Struvit erzeugt, entsprechend etwa 25 kg rückgewonnenem Phosphor. Bezogen auf die P-Zulaufmenge ergibt sich eine Rückgewinnungsquote von ca. 50%. Für die Anlagentechnik wird der bestehende Schlamm-polder umgebaut und erweitert; die gesamte Aufstellfläche beträgt rund 300 m<sup>2</sup>.

Die Rückgewinnungsanlage ist weitgehend automatisiert und basiert überwiegend auf etablierten, in der Abwasserbehandlung bewährten Verfahren. Dadurch ist der Personalaufwand gering, und umfangreiche Schulungsmaßnahmen für das Betriebspersonal sind nicht erforderlich.

### Ökonomische & ökologische Aspekte

Die Betriebskosten für die P-Gewinnung lassen sich auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse näherungsweise abschätzen. Neben dem Energiebedarf werden sie vor allem durch den Verbrauch an Natronlauge und Zitronensäure bestimmt. Natronlauge wird dauerhaft zur pH-Regulierung bei der Struvitfällung benötigt, während der Bedarf an Zitronensäure von den Betriebsbedingungen der Bio-P-Abwasseranlage abhängt. Den größten Anteil an den Energiekosten verursacht die stromintensive Entwässerung des Hydrolyсата. Da ausschließlich eingedickter Überschussschlamm behandelt wird, bleibt der Gesamtenergiebedarf jedoch vergleichsweise gering. Die Beheizung der Schlammhydrolyse erfolgt über das Heizwassernetz der Kläranlage;



Verfahrensfließbild Clausthaler Verfahren.

bei Bedarf kann eine Zusatzheizung zugeschaltet werden. Zusätzlich wird der Wärmebedarf durch eine Wärmerückgewinnung mittels Wärmeaustauschs zwischen hydrolysiertem und frischem Schlamm reduziert.

Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Anlage wirtschaftlich betrieben werden kann, da die Bio-P-Elimination optimiert wurde und die zusätzlichen Betriebskosten für die P-Gewinnung durch Einsparungen bei der Klärschlammverwertung und dem Erlös aus dem Verkauf des Struvits weitgehend ausgeglichen werden können.

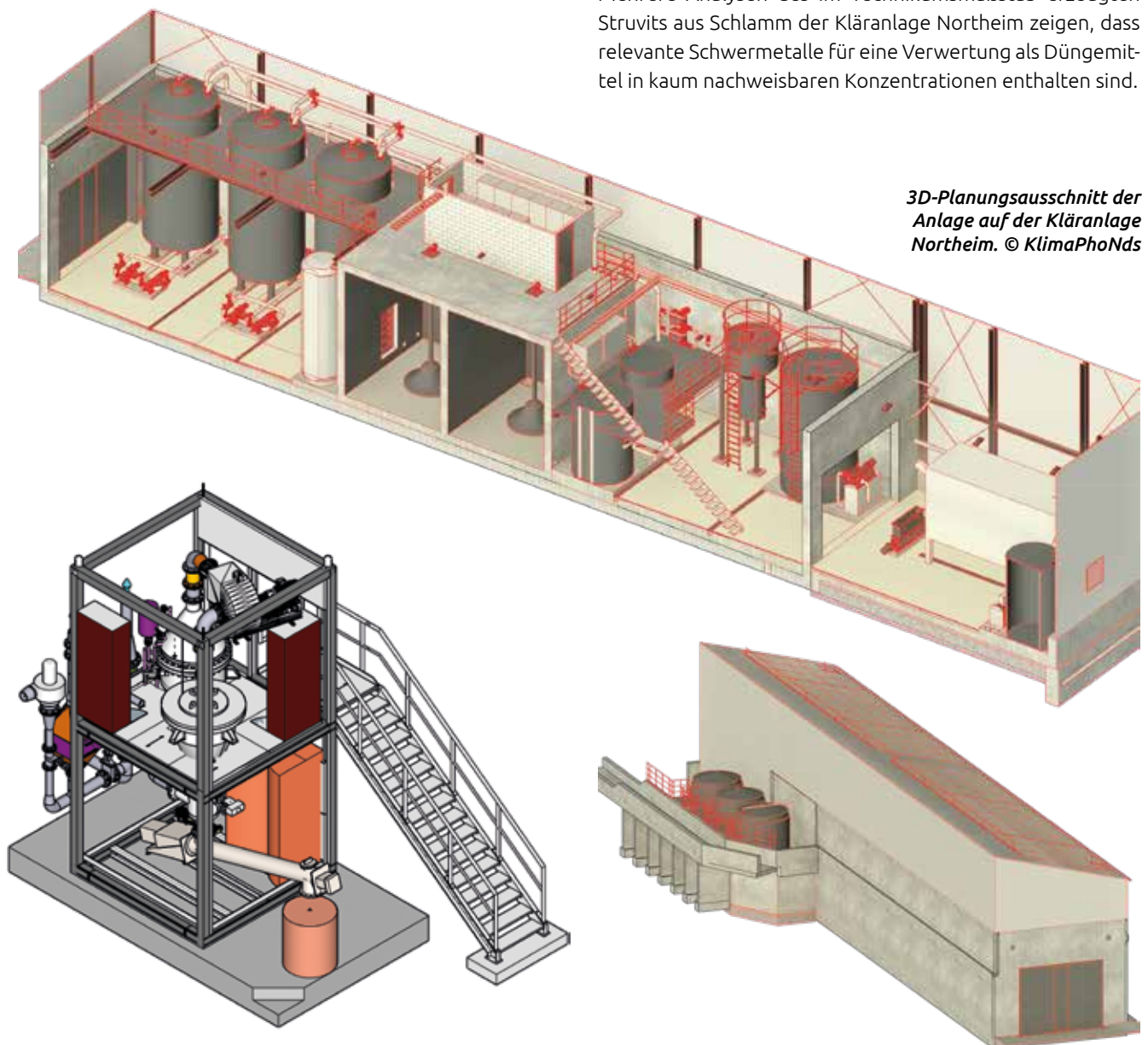
Anhand bisheriger Ergebnisse wurde die CO<sub>2</sub>-Bilanz für den Betrieb abgeschätzt. Diese zeigt, dass die Zusatz-Emissionen der Phosphorrückgewinnung nahezu vollständig durch Gutschriften aus der landwirtschaftlichen Nutzung des Struvits kompensiert werden. Die Erweiterung um die Klärschlamm-

trocknung mittels Wirbelschichtverdampfung sowie die energetische Verwertung als biogener Brennstoff in der Zementindustrie führt zudem zu einer deutlichen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem bisherigen Betrieb mit landwirtschaftlicher Verwertung.

### Rezyklate & Abnahmemärkte

Im Projekt wird Struvit als Phosphor-Rezyklat erzeugt. Das Produkt weist nur geringe organische Verunreinigungen auf, u.a. weil die Fällung im Zentratwasser erfolgt. Anhaftende Rückstände am Rezyklat werden durch einfaches Abspülen entfernt.

Milde Bedingungen in der Schlammhydrolyse verhindern, dass relevante Mengen an Schwermetallen aus dem Überschussschlamm in das Schlammwasser überführt werden. Mehrere Analysen des im Technikumsmaßstab erzeugten Struvits aus Schlamm der Kläranlage Northeim zeigen, dass relevante Schwermetalle für eine Verwertung als Düngemittel in kaum nachweisbaren Konzentrationen enthalten sind.



*3D-Planungsausschnitt der Anlage auf der Kläranlage Northeim. © KlimaPhoNds*

*Ausstellungsplan Pilotrockner. ©Knoke GmbH*



Das auf der Kläranlage Northeim produzierte Struvit soll künftig regional als Düngemittel in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Entsprechende Anfragen zur Verwertung durch potenzielle Abnehmer liegen bereits vor. Alternativ wird eine zweistufige Aufbereitung des Struvits untersucht: 1) Kalzinierung und 2) PARFORCE-Technologie. Dabei werden Phosphorsäure, Ammoniakwasser sowie eine Magnesiumchloridlösung gewonnen. Die Phosphorsäure weist eine technische Qualität auf und kann somit vermarktet werden, z. B. in der Düngemittelindustrie. Die Magnesiumchloridlösung wird als recyceltes Fällmittel auf der Kläranlage Northeim für die Struvitfällung rückgeführt.

### Transfer/Verstetigung

Die im Projekt erzielten Ergebnisse werden gezielt in die Praxis überführt. Die Phosphorrückgewinnungsanlage auf der Kläranlage Northeim wird auch nach Ende der Förderphase weiterhin im Vollstrom durch den Betreiber EBA Northeim betrieben. Damit ist ein dauerhafter Praxisbetrieb sichergestellt. Gleichzeitig dient die Anlage als Demonstrationsstandort, um interessierten Kläranlagenbetreibern die dezentrale Phosphorrückgewinnung mit dem Clausthaler Verfahren unter realen Bedingungen zu veranschaulichen.

Ein wesentlicher Beitrag zum Transfer besteht in der umfassenden Nutzung der im Projekt gewonnenen praktischen Erfahrungen. Insbesondere Erkenntnisse aus dem Anlagenbau, der Inbetriebnahme und dem laufenden Betrieb werden systematisch aufgearbeitet und für zukünftige Anwendungen bereitgestellt.

Darüber hinaus werden belastbare Daten zu Investitions- und Betriebskosten, insbesondere zu Energiebedarf, Chemikalieneinsatz sowie Personalaufwand, zur Verfügung gestellt, um eine wichtige Grundlage für die technische und wirtschaftliche Bewertung zukünftiger Projekte zu schaffen. Für die Planungs- und Genehmigungsphase werden praxisnahe Empfehlungen abgeleitet, z. B. um Zeit- und Aufwandsersparnisse bei zukünftigen Umsetzungen zu ermöglichen.

Ergänzend werden die Ergebnisse im Rahmen von Fachveröffentlichungen sowie auf Tagungen und durch Informationsveranstaltungen auf der Kläranlage Northeim einem breiteren Publikum vorgestellt.

### Fazit: Drei Empfehlungen für die Praxis

- 1.) Für eine Bewertung der abwasserseitigen P-Gewinnung sollten die Phosphorbilanzströme (Abwasser, Schlamm) inkl. saisonaler Schwankungen bekannt sein.
- 2.) Die abwasserseitige P-Gewinnung kann auch bei teilweiser Bio-P-Elimination wirtschaftlich sein. Der Anteil der Bio-P-Elimination sowie der rücklösliche P-Anteil sollte geprüft bzw. ermittelt werden.
- 3.) Die Wirbelschichtverdampfungstrocknung ermöglicht eine 90%ige Wärmerückgewinnung bei Temperaturen von über 120 °C. In Bezug auf eine Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist es empfehlenswert, den Einsatz dieser Trocknungstechnik zu prüfen.

# P-Net

## Aufbau eines Netzwerks zum ressourceneffizienten Phosphor-Recycling und -Management in der Region Harz und Heide

### Projektziel & Hintergrund

Das Ziel von P-Net ist die Entwicklung eines nachhaltigen, ressourcenschonenden und ganzheitlichen Verfahrens zum Phosphor-Recycling mittels einer anaerob-biologischen P- Remobilisierung mit anschließender Struvit-Fällung, sodass kommunale Kläranlagen die Anforderungen der Klärschlammverordnung künftig direkt auf der Anlage erfüllen können. Auf Basis der Rezyklate sollen hochwertige P-Dünger für die landwirtschaftliche Nutzung bereitgestellt und vertrieben werden. Dabei werden alle relevanten Akteure der Wertschöpfungskette – von der Kläranlage über die Düngemittelherstellung bis zum landwirtschaftlichen Anwender – eingebunden.

### Key Facts zum Projekt

#### Koordination

**Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig**  
**Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW)**  
 Pockelsstr. 2a, 38106 Braunschweig  
**Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Dockhorn**  
 Tel.: +49 531 391 7937  
 t.dockhorn@tu-braunschweig.de

#### Untersuchungsstandort

Gifhorn, Braunschweig

#### Projektpartner

- » ISWW – Institut für Siedlungswasserwirtschaft
- » ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung GmbH
- » Julius-Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde (JKI)
- » Abwasserverband Braunschweig (AVB)
- » Stadtentwässerung Braunschweig GmbH (SE|BS)
- » Abwasser- und Straßenreinigungsbetrieb Stadt Gifhorn (ASG)
- » PFI-Planungsgemeinschaft GmbH & Co. KG
- » SF-SoepenberG GmbH

#### Laufzeit

01.07.2020 – 31.03.2026

#### Verbundprojekt-Webseite

[www.tu-braunschweig.de/isww/forschung/p-net-umsetzung](http://www.tu-braunschweig.de/isww/forschung/p-net-umsetzung)

### Technische Ergebnisse

Während der Projektlaufzeit wurde ein großtechnischer Versuchsbetrieb auf den Kläranlagen in Braunschweig und Gifhorn über mehrere Monate realisiert, bei dem jeweils der gesamte Überschussschlamm (ÜS) genutzt wurde. Dabei wurden Schlämme mit einer Feststoffkonzentration zwischen 5 g/L und 50 g/L eingesetzt. Es konnte ein Struvit-Fällungsgrad von >90% des PO<sub>4</sub>-P erreicht werden, wobei der P- Rückgewinnungsgrad bei ca. 50% bezogen auf Rohschlamm und bei ca. 40–50% bezogen auf die P-Zulauf-fracht der Kläranlage lag. Der P- Remobilisierungsgrad lag im großtechnischen Betrieb zwischen 40–60%. Eine Rücklösung von >50% wird als Zielwert angestrebt. Das Verfahren konnte an beiden Standorten nicht über die gesamte Verfahrenskette in einem großtechnischen Maßstab abgebildet werden, da die vorhandene Anlagentechnik für die Versuche umgenutzt wurde und keine neuen Anlagenteile angeschafft werden konnten. Aus diesem Grund ist der nach der P-Rücklösung zu erwartende P-Gehalt im entwässerten Faulschlamm berechnet worden, wobei für beide Standorte Werte zwischen 17–19 g P/kg TM ermittelt wurden. Da diese Werte unter dem Grenzwert von 20 g P/kg TM liegen ist der Faulschlamm somit von der Monoverbrennungspflicht befreit. Es hat sich gezeigt, dass das Verfahren bzgl. der P-Rücklösung auch großtechnisch und bei Temperaturen <38°C betriebsstabil funktioniert. Die sich daraus ergebenden Abhängigkeiten beziehen sich insbesondere auf das benötigte Reaktorvolumen, da der Prozess, in Abhängigkeit von der Temperatur, zwischen 4–10 Tage Aufenthaltszeit in der Remobilisierung erfordert. Im Gegensatz zu chemischen P-Extraktionsmethoden wird hierbei vollständig auf die Zu-

gabe von mineralischen Säuren verzichtet. Dem Überschuss-schlamm wird lediglich ein geeignetes Co-Substrat als Kohlenstofflieferant zugegeben. Im Laufe des Projekts hat sich die Zugabe von eingedicktem Primärschlamm (PS) als funktionale und kostenneutrale Lösung erwiesen. Das erforderliche Mischungsverhältnis der beiden Schlämme ist standort-spezifisch und bedarf vorheriger Untersuchungen im Labor. Während der Remobilisierung werden organische Säuren gebildet, die den pH-Wert auf einen Wert zwischen 5–5,5 abfallen lassen. Der Schlamm nach der Remobilisierung wird als Remobilisat und die Flüssigphase als FiltratREM bezeichnet. Das zur Struvit-Fällung eingesetzte FiltratREM erweist sich als schwach gepuffertes System, so dass es nur einen geringen Laugenbedarf für die Struvit-Fällung erfordert. Für die beiden Standorte wurde ein Laugenverbrauch von 1,5 bis 3 L NaOH (33 %)/m<sup>3</sup> FiltratREM ermittelt. Neben Struvit kann es auch zu Ausfällungen von Fe-P und Ca-P Verbindungen kommen. Im Projekt wurde weiterhin eine alternative Magnesiumquelle zur Struvit-Fällung untersucht. Hierbei wurde ein Abwasserstrom aus der Kaliherstellung eingesetzt, der einer 25–30 % MgCl<sub>2</sub>-Lösung entspricht. Der großtechnische Einsatz verlief problemlos, wodurch die Betriebskosten für die Fällung in Zukunft reduziert werden könnten.

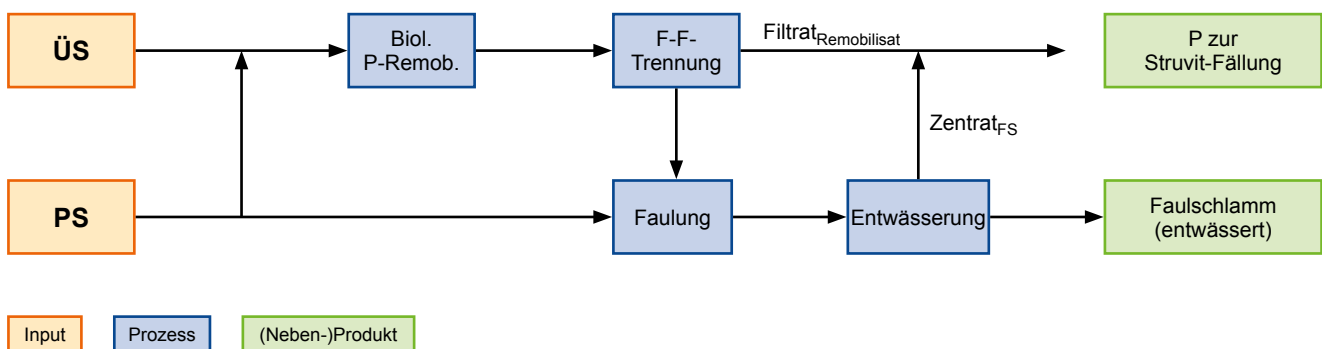
Das Verfahren ist geeignet für Schlämme, die durch eine Bio-P oder Eisenfällung zur P-Elimination geprägt sind. Schlämme aus Anlagen mit Al-P-Elimination sind nicht geeignet. Für den Betrieb hat sich gezeigt, dass die Prozessstabilität ein wichtiger Faktor ist und ein möglichst gleichmäßiger Betrieb anzustreben ist. Weiterhin entsteht durch die organischen Säuren ein prägnanter Geruch, weshalb die Abluft zu behandeln ist.

### Ökonomische & ökologische Aspekte

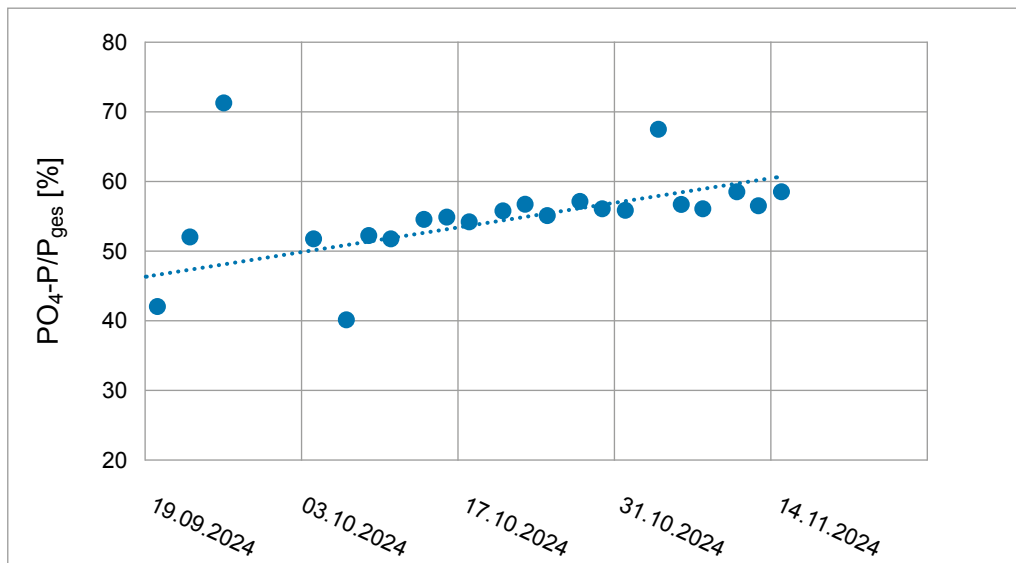
Die Kosten für das Verfahren setzen sich aus Investitions- und Betriebskosten zusammen. Die größten Kosten-

positionen umfassen den Bau von Reaktorvolumina und Entwässerungsaggregaten sowie die Struvit-Fällung. Das größte Einsparpotenzial ist durch die Faulschlammmentsorgung mittels Mitverbrennung und die damit verbundenen entfallenden Kosten für die Monoverbrennung sowie die P-Rückgewinnung aus der Asche zu erzielen. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse des untersuchten Verfahrens zeigt, dass die Umsetzung ab einer Anlagengröße von etwa 50.000 Einwohnerwerten wirtschaftlich darstellbar ist. Wie für alle Verfahren im Bereich P-Recycling ist es auch für dieses Verfahren essentiell, dass die anfallenden Kosten gebührenfähig sind. Das Verfahren arbeitet ressourcenschonend, da der biologische Prozess der Phosphorrücklösung ohne den Einsatz von Chemikalien erfolgt und somit kaum Betriebsmittel benötigt werden. Lediglich für die anschließende Struvit-Fällung werden Natronlauge (NaOH) und eine Magnesiumquelle benötigt. Das daraus entstehende Struvit-Produkt ist nahezu frei von Schadstoffbelastungen und kann als hochwertiger Recyclingdünger eingesetzt werden.

Im Rahmen des Projekts hat das Julius-Kühn-Institut die Pflanzenverfügbarkeit von Struvit in Topf-, Feld- und Mesokosmenversuchen untersucht und die Düngeeigenschaften agronomisch bewertet. Dazu wurde Struvit in pelletierter und granulierter Form verwendet, das zuvor vom Projektpartner Soepenbergl konfektioniert wurde. Die Ergebnisse bestätigen, dass konfektionierter Struvit bei der Erhaltungsdüngung eine geeignete Alternative zu konventionellen wasserlöslichen P-bietet. Unter starken P-Mangelbedingungen kann seine fehlende Wasserlöslichkeit allerdings zu einer geringeren P-Versorgung führen, die bei stark P-bedürftigen Kulturen auch ertragsrelevant werden kann. Der Verkaufserlös des erzeugten Struvitdüngers deckt nur einen kleinen Teil der entstehenden Investitions- und Betriebskosten. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ergibt sich vor allem aus den Einsparungen bei der Schlammmentsorgung, also der Vermeidung der Monoverbrennung sowie der Rückgewinnung aus der Asche bzw. der Deponierung.



Verfahrensfließbild Peco-Verfahren. © ISWW



**P-Remobilisierungsrate  
großtechnische Versuche  
Gifhorn.**

### Rezyklate & Abnahmemärkte

Im Rahmen des Verfahrens wird überwiegend Struvit als Phosphorzyklat erzeugt, teilweise sind auch Anteile von Calcium- und Eisenphosphaten enthalten. Die Hauptbestandteile sind in der Abbildung dargestellt. Die gesetzlichen Anforderungen bezüglich der Schwermetallkontamination wurden im Struvit stets eingehalten. Bezüglich der Verunreinigung mit Pathogenen konnten in allen untersuchten Proben die Grenzwerte für E. coli weit unterschritten werden. Da jedoch in 14% der Proben Salmonellen nachgewiesen wurden, ist es ggf. notwendig, eine geeignete Hygienisierung in die Düngemittelproduktion zu integrieren. Nach bisheriger Erfahrung erlaubt die Inhomogenität der Struvitchargen keine direkte Ausbringung in der Landwirtschaft, sondern erfordert einen entsprechenden Homogenisierungs- und Konfektionierungsprozess zur Herstellung



des Struvitdüngers. Hier ist der Projektpartner Soepenber im Aufbau einer entsprechenden Produktionsstraße. Als Abnahmepartner sind im engeren Kreis die Landwirte des Abwasserverbands Braunschweig interessiert, wodurch hier ein direkter Absatzweg in die landwirtschaftliche Nutzung sichergestellt ist. Zudem zeigen auch bisher Klärschlamm nutzende sowie ökologisch wirtschaftende Landwirte großes Interesse. Als Hersteller und damit Bindeglied zwischen struvitproduzierenden Kläranlagen und nutzenden Landwirten kommen die Kläranlagen selbst, Joint ventures zwischen Kläranlagen, Düngemittelhersteller und auch Düngermischer in Frage. Eine wesentliche Hürde für die Markteinführung des Struvits können notwendige Genehmigung- und Zertifizierungsprozesse darstellen, sofern sie den Kläranlagenbetreibern aufgebürdet werden, da sie einen erheblichen Mehraufwand darstellen. Insbesondere auch dann, wenn hohe Zusatzkosten verhältnismäßig geringen Produktmengen gegenüberstehen.

### Transfer/Verstetigung

Nach Abschluss der Förderphase soll das im P-Net Projekt entwickelte PECO-Verfahren zur anaerob-biologischen P-Remobilisation auf der Kläranlage des Abwasserverbands Braunschweig in Braunschweig implementiert werden. Anschließend soll die Stadtentwässerung Braunschweig den Betrieb übernehmen. Die Inbetriebnahme ist vor 2029 geplant. Die in P-Net gewonnenen Erkenntnisse sind auch für andere Betreiber anwendbar. Das Verfahren ist sowohl für Bio-P als auch Anlagen mit Eisenelimination geeignet. Erste Erkenntnisse zeigen, dass durch einen höheren Anteil an Bio-P die Rücklösefähigkeit des im Schlamm gebundenen Phosphors nochmals verbessert wird, weshalb die Etablierung eines Bio-P Prozesses empfohlen wird. Für eine erfolgreiche Umsetzung muss das Verfahren jedoch an die jeweiligen Standortbedingungen und Schlämme angepasst und zuvor



Struvit aus Braunschweig. © P-Net



Anlage zur Struvit-Fällung auf dem Klärwerk Steinhof, Braunschweig. © Thomas Dockhorn/ISWW, TU Braunschweig

die P- Rücklösefähigkeit sowie das benötigte Mischungsverhältnis der Schlämme im Labor untersucht werden. Aus dem Projekt heraus wurden bereits Netzwerke und Kooperationen aufgebaut, insbesondere im Rahmen der Struvit-Werkstätten, und weiteren Veranstaltungen des Verbundes, bei denen ein intensiver Austausch zwischen regionalen und überregionalen Stakeholdern stattgefunden hat. Informationen, Ergebnisse und weiterführende Veröffentlichungen stehen über die P-Net-Website zur Verfügung: [www.tu-braunschweig.de/isww/forschung/p-net-umsetzung](http://www.tu-braunschweig.de/isww/forschung/p-net-umsetzung)

### Fazit: Drei Empfehlungen für die Praxis

- 1.) P-Recycling über die anaerob-biologische P-Remobilisierung und Struvit-Fällung ist auf Kläranlagen möglich und braucht keine zentralisierte Infrastruktur. Es braucht jedoch ab sofort eine eindeutige Regelung für die Umlage der entstehenden Investitions- und Betriebskosten im Bereich der Abwasser- und Schlammbehandlung auf die Abwassergebühr, um diesen Weg auch in Niedersachsen sicher gehen zu können.
- 2.) P-Recycling auf der Kläranlage erlaubt die Schließung des (regionalen) P-Kreislaufs hier und heute und trägt direkt zur Unabhängigkeit der deutschen Landwirtschaft bei der Düngerversorgung bei. Es braucht Investitionsförderung für die Umsetzung zur Demonstration der Implementierbarkeit unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen/an verschiedenen Standorten.
- 3.) Die Änderung der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) muss schnellstmöglich beschlossen werden, um Rechtssicherheit zu schaffen. Vollzugspraxis und Grenzwertregime im Rahmen der AbfklärV sollten so ausgestaltet werden, dass in der Einführungs- und Optimierungsphase innovativer Verfahren realistische Lern- und Übergangsphasen möglich sind, etwa durch befristete Grenzwertregelungen und bundesweit abgestimmte Vollzugshinweise.

# RePhoRM

## Regionales Phosphorrecycling im Rhein-Main-Gebiet unter Berücksichtigung industrieller und agrarischer Stoffkreisläufe

### Projektziel & Hintergrund

Das Verbundprojekt RePhoRM zielt im Einklang mit der hessischen Ressourcenschutzstrategie darauf ab, in einem nasschemischen Verfahren mit anschließender Sprühgranulation aus der Asche von Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen in der Metropolregion FrankfurtRheinMain ein Düngemittelrezyklat zur Schließung des Nährstoffkreislaufs in der Landwirtschaft herzustellen. Zur Umsetzung dieser Strategie soll ein Phosphor-Recyclingverbund aus öffentlich-rechtlichen und privatwirtschaftlichen Partnern gegründet werden.

### Key Facts zum Projekt

#### Koordination

**Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR  
Fachgebiet Abwassertechnik**

Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt

**Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart**

Tel. +49 6151 16 20301

markus.engelhart@tu-darmstadt.de

#### Untersuchungsstandort

Frankfurt am Main, Industriepark Höchst

#### Projektpartner

- » Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR, Fachgebiet Abwassertechnik (AT) und Arbeitsgruppe Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft (SUR)
- » Becker Büttner Held Rechtsanwälte  
Wirtschaftsprüfer Steuerberater PartGmbH (BBH)
- » Infracore GmbH & Co. Höchst KG (ISH)
- » Glatt Ingenieurtechnik GmbH (GIT)
- » TVM Thermische Verwertung Mainz GmbH (TVM)
- » Stadt Frankfurt am Main – Stadtentwässerung Frankfurt am Main (SEF)

#### Laufzeit

01.07.2020 – 31.12.2025

#### Verbundprojekt-Webseite

[www.iwar.tu-darmstadt.de/rephorm](http://www.iwar.tu-darmstadt.de/rephorm)

### Technische Ergebnisse

Im Projekt RePhoRM wurde die technische Machbarkeit eines regionalen Phosphorrecyclings aus Klärschlammaschen im Rhein-Main-Gebiet vom Labor- und Technikumsmaßstab bis zur Demonstration untersucht. Grundlage waren die Aschen der drei Monoverbrennungsanlagen TVM, SEF und ISH mit Kapazitäten von 35.000 Mg TM/a, rund 40.000 Mg TM/a bzw. 52.000 Mg TM/a. Die Aschen fallen in einem Umkreis von maximal ca. 20 km um den vorgesehenen Standort einer P-Recyclinganlage im Industriepark Höchst an. Die Phosphorgehalte der Aschen schwankten zwischen etwa 40 und 90 g P/kg TR. Für SEF waren erhöhte Kupfergehalte relevant, für ISH erhöhte Nickelanteile; als kritisch wurden vor allem Cu, Ni, Pb und Zn bewertet.

Ausgehend von diesen Randbedingungen wurde das PHOS-4Green-Verfahren der Glatt Ingenieurtechnik GmbH um eine nasschemische Vorbehandlung zur Schwermetallabreicherung erweitert. Der Prozess beruht auf der Extraktion von Phosphor aus Klärschlamm-Asche mit Schwefelsäure und der anschließenden selektiven Fällung gelöster Schwermetalle aus der erzeugten Roh-Phosphorsäure mit anschließender Fest-Flüssig-Trennung. Wesentliche Betriebsparameter waren H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Asche-Verhältnis, TR-Gehalt der Suspension, pH-Wert, Reaktionszeit, Filtrierbarkeit und Fällungsmitteldosierung. Durch Anpassung dieser Parameter wurden P-Rücklöseraten von 81 bis 95% erreicht; die gesetzlich geforderte Rücklösung von 80% konnte damit für die betrachteten Mischungen erreicht werden. Eine Waschung des Filterkuchens erwies sich als wesentlich und konnte die P-Rücklösung teilweise um etwa 12% erhöhen.

Für die Schwermetallabreicherung wurden insbesondere sulfidische Fällungsmittel untersucht, Anorganische Fällungsmittel zeigten hohe Fällungsleistungen, vor allem für Cd, Cu und Pb; für Ni und Zn waren höhere Fällungsmitteldosierungen bzw. angepasste pH-Bedingungen erforderlich. Gleichzeitig führten diese Fällungsmittel im sauren Milieu zur Bildung von H<sub>2</sub>S. Zur sicheren Durchführung der Schwermetallfällung bedarf es daher einer angepassten Dosierstrategie, H<sub>2</sub>S-Sensorik und einer Abluftwäsche. Die Fällungsreaktion wurde in den Optimierungsversuchen auf ca. 10 Minuten ausgelegt, um nicht umgesetztes Sulfid kontrolliert reagieren zu lassen. Technische Herausforderungen waren außerdem klebrige Suspensionen, Filterverstopfungen, Agglomeratbildung und Wandverklebungen bei der Sprühgranulation.

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit wurde eine Demonstrationsanlage in Containerbauweise errichtet. Sie umfasste Aschezuführung, Prozessbehälter, Bandfilter, Auffang- und Lagerbereiche, Abluftwäscher sowie Messstellen für pH-Wert, Temperatur sowie die selektive sensorischen Überwachung des gelösten Sulfids. In der Demonstrationsphase wurden unter anderem Aschemischungen wie ISH:SEF:TVM = 2:1,5:1 verarbeitet. Die erhaltenen Phosphorsäuren lagen mit ca. 80.000 bis 100.000 mg P/kg TR sowie in den Schwermetallgehalten im Bereich der Anforderungen der DüMV und konnten für die Granulation genutzt werden.

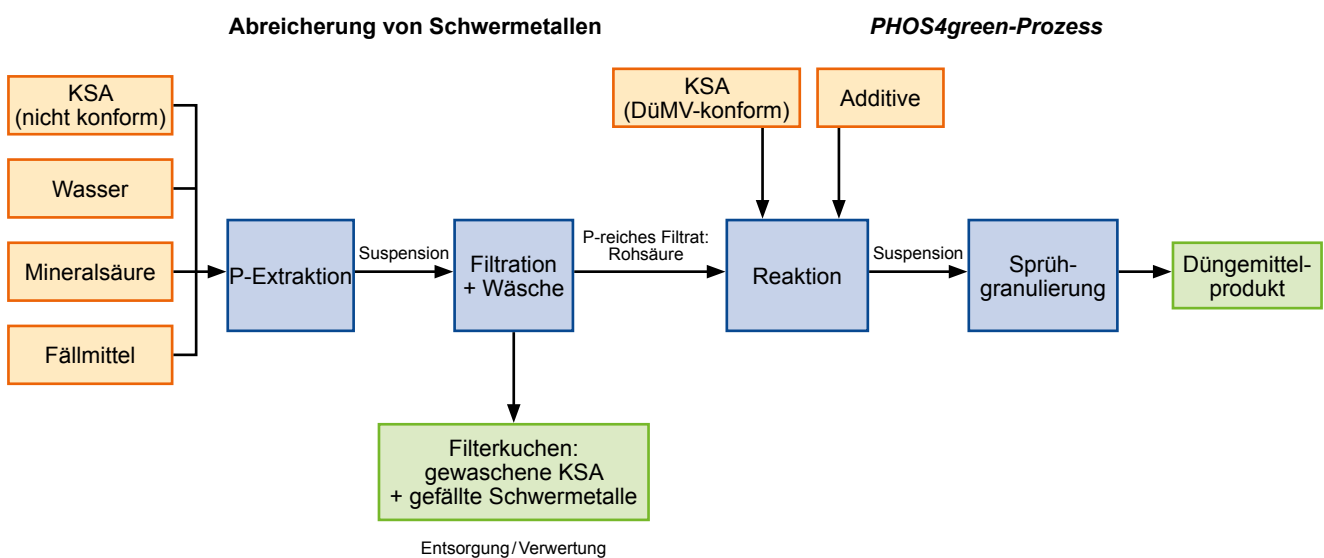
In der Granulation wurden zunächst Suspensionen mit etwa 27 % TS eingesetzt, die wegen hoher Klebrigkeit und Filterproblemen nicht stabil verarbeitet werden konnten. Durch Erhöhung des Feststoffgehalts auf ca. 40 % konnte ein P38-Düngemittelgranulat erfolgreich hergestellt werden. Für

dieses Produkt wurden P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalte von 36,7 bis 39,6 % bestimmt; gleichzeitig konnten Abreicherungsraten von bis zu 85 % bezogen auf die Ausgangsaschen ISH und SEF erreicht werden. Im Technikumsmaßstab wurden außerdem P30- und NPS-7-24-9-Granulate mit D50-Werten von etwa 2.268 bis 3.110 µm und Restfeuchten von 0,16 bis 0,28 % erzeugt.

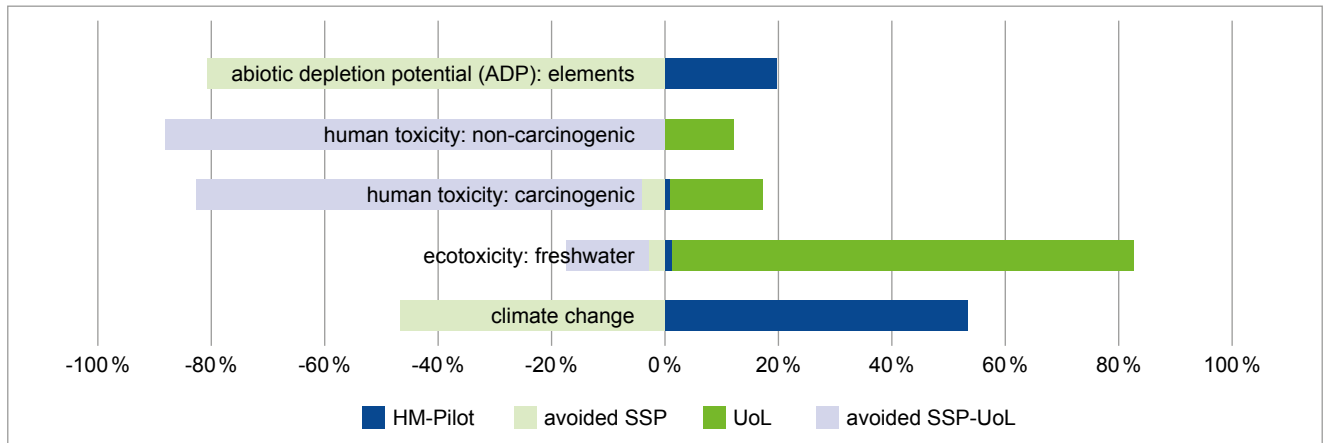
Für eine großtechnische Umsetzung wurde ein Anlagenkonzept am Industriepark Höchst ausgearbeitet. Das Konzept sieht die Verarbeitung von 40.000 t Klärschlammasche pro Jahr auf zwei separaten Linien vor und die Herstellung zweier granulierter Düngemittelprodukte. In der Jahresbetrachtung ergaben die Produktionssimulationen etwa 19.000 t/a P30 und ca. 38.800 t/a NPS. Für die Betriebsführung bestehen hohe Anforderungen an Personal und Anlagentechnik, insbesondere bei Säuren, sulfidischen Fällungsmitteln, H<sub>2</sub>S-Sicherheit, Filtration, Abluftreinigung und Prozesssensorik. Die Untersuchungen zeigen eine technische Umsetzbarkeit, jedoch nur bei flexibler Rezepturführung, Online-Überwachung und gesicherter Aschequalität.

### Ökonomische & ökologische Aspekte

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass sowohl die Investitionskosten als auch die jährlichen Betriebs- und Unterhaltungskosten im hohen zweistelligen Millionenbereich liegen. Den größten Anteil daran hatte die Anlagentechnik mit ca. 46 % der gerundeten Investitionssumme. Der Hochbau stellte mit ca. 23 % die zweitgrößte Kostenposition dar. Die übrigen rund 31 % entfielen auf Geländerschließung und Tiefbau, Planung, Genehmigung und Nebenkosten, Lagerhaltung sowie unvorhergesehene Kosten.



Verfahrensschema erweitertes Phos4GREEN-Verfahren.



**Umweltbelastungen und vermiedene Umweltwirkungen des HM-PILOT-Szenarios bei Substitution von Einfachsuperphosphat (SSP).**

Ökologisch wurde das Verfahren mittels LCA bewertet. Für das HM-PILOT-Szenario bei Substitution von SSP ergab sich eine Nettobilanz von  $3,68 \cdot 10^6$  kg CO<sub>2</sub>-Eq für Klimawandel,  $7,19 \cdot 10^9$  CTUe für Frischwasser-Ökotoxizität,  $-0,509$  CTUe für karzinogene Humantoxizität,  $-2,29 \cdot 10^2$  CTUe für nicht karzinogene Humantoxizität und  $-2,13 \cdot 10^3$  kg Sb-Eq beim abiotischen Ressourcenverbrauch. Die Ergebnisse zeigen Vorteile bei Ressourcenschonung und Humantoxizität, jedoch keine zusätzliche CO<sub>2</sub>-Minderung durch die Schwermetallentfrachtung. Wesentliche Hebel sind daher Chemikalienverbrauch, Wärmebedarf, Transportentfernungen und Nutzung kohlenstoffarmer Energiequellen.

**Rezyklate & Abnahmemärkte**

Im Projekt wurden mehrere phosphorhaltige Rezyklate hergestellt und bewertet. Zentrale Zwischenprodukte waren Roh-Phosphorsäuren aus der nasschemischen Extraktion, die im Demonstrationsbetrieb P-Gehalte von etwa 80.000 bis 100.000 mg/kg TR aufwiesen. Daraus wurden streufähige

hige Düngemittelgranulate hergestellt, insbesondere P38, P30 sowie NPS 7-24-9. Beim P38-Granulat lagen die P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalte bei 36,7 bis 39,6%; die Produkte erfüllten die Anforderungen der DüMV Anlage 2, während der Zinkgehalt mit Blick auf EU 2019/1009 weiterhin als kritischer Optimierungspunkt bewertet wurde.

Die Technikumsgranulate P30 und NPS 7-24-9 zeigten Restfeuchten von 0,16 bis 0,28 % und D50-Werte von ca. 2,3 bis 3,1 mm. Für P30 wurden je nach Filtrat P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalte von 31 bis 33 % bestimmt, für NPS 7-24-9 lagen sie bei 20 bis 26 %. Der Vergleich mit konventionellen Düngern zeigte, dass das mit Ammoniumsulfat aufgewertete NPS-Produkt aufgrund geringerer Schadstoffkonzentrationen qualitativ günstiger bewertet wurde als ein reiner P30-Einnährstoffdünger. Im technischen P30 lag Zink bei 1.360 mg/kg TR und im technischen NPS bei 941 mg/kg TR; damit wurde der EU-Grenzwert von 1.500 mg/kg TR unterschritten. Kupfer lag im technischen P30 bei 363 mg/kg TR und im NPS bei 250 mg/kg TR, Nickel bei 73 bzw. 68 mg/kg TR.



Mikroskopische Aufnahmen der P35 (links) und NPS 7-24-9 (rechts) Düngemittelgranulate. © RePhoRM



*Filtration der RePhoRM Anlage.  
© Glatt Ingenieurtechnik GmbH*

Als Zielmärkte wurden vor allem landwirtschaftliche Absatzwege betrachtet, da die regionale Rückführung von Phosphor in den Nährstoffkreislauf dem Projektziel entspricht. Eine großtechnische Vermarktung erfolgte während der Projektlaufzeit noch nicht. Für die Markteinführung bleiben daher Produktzulassung, Qualitätskonstanz, Akzeptanz von Recyclingdüngern aus Klärschlammasche und die rechtssichere Einhaltung deutscher und europäischer Grenzwerte entscheidend.

### Transfer / Verstetigung

Die Projektergebnisse liefern eine Grundlage für die Übertragung regionaler P-Recyclingkonzepte auf andere Ballungsräume. Besonders übertragbar sind die systematische Aschecharakterisierung, die Bewertung zeitlicher Schwankungen, die Ableitung kritischer Schwermetalle und die Anpassung der Prozessführung an unterschiedliche Aschemischungen. Für andere Betreiber ist wesentlich, dass nicht nur der mittlere Phosphorgehalt, sondern auch die Variabilität von Cu, Ni, Pb und Zn frühzeitig in die Planung einbezogen wird.

Die großtechnische Anlage wurde innerhalb der Projektlaufzeit nicht realisiert. Der Betrieb nach Förderende ist daher nicht als Weiterbetrieb einer bestehenden Großanlage zu verstehen, sondern als Weiterverwertung der erarbeiteten Planungs-, Demonstrations- und Bewertungsgrundlagen. Dazu zählen die containerbasierte Demonstration beim Projektpartner GIT, Prozessdaten zur Extraktion und Fällung, Granulationsversuche, LCA-Ergebnisse, CAPEX-Abschätzungen und Konzepte für den Industriepark Höchst.

Organisatorisch wurden mehrere Modelle für einen länderübergreifenden Recyclingverbund geprüft, darunter eine Öffentlich-Private-Partnerschaft mit quotaler Einbringung von Aschemengen und Eigenkapital, ein ÖPP-Verbund mit

Dritten sowie eine private Gesellschaft bzw. ein Dienstleistermodell. Die Ergebnisse zeigen, dass technische Umsetzung und Organisationsmodell gemeinsam betrachtet werden müssen. Stoffstromsicherheit, Genehmigung, Düngemittelrecht, Reststoffentsorgung und Rezyklatabnahme sind bereits in der Planungsphase zu klären.

Für die Verstetigung sind langfristige Aschelieferverträge, belastbare Wirtschaftlichkeitsrechnung und Behördenabstimmungen entscheidend. Die Untersuchungen zu Schwermetalleinträgen im Ballungsraum Frankfurt zeigen außerdem, dass präventive Maßnahmen im Einzugsgebiet die spätere Rezyklatqualität verbessern können. Als Transferprodukte eignen sich Praxisleitfäden zu Aschemonitoring, Genehmigung, Anlagen- und Personenschutz-, Produktqualität und Verbundorganisation.

### Fazit: Drei Empfehlungen für die Praxis

- 1.) **Aschequalitäten vor der Anlagenplanung über längere Zeiträume charakterisieren:** P-Gehalte, Cu, Ni, Pb und Zn bestimmen direkt Rezeptur, Chemikalienbedarf und Produktqualität.
- 2.) **Schwermetallabreicherung flexibel auslegen:** Fällungsmitteldosierung Dosierung, pH-Führung, Anlagen- und Personenschutz, Filtration und Abluftwäsche müssen bereits im Basic Engineering berücksichtigt werden.
- 3.) **Verbund früh absichern:** Aschelieferung, Genehmigung, Rezyklatabnahme und Kostenverteilung müssen vor Investitionsentscheidungen vertraglich geklärt werden und stellen in einem ÖPP-Verbund nicht zu unterschätzende Hürden dar.

# R-Rhenania

## Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern

### Projektziel & Hintergrund

In die Klärschlammmonoverbrennungsanlage der Emter GmbH in Altenstadt wurde ein thermochemisches Verfahren zur Phosphorrückgewinnung integriert. Während der Verbrennung reagiert der Klärschlamm mit Natriumadditiven, wodurch ein hochwirksamer anorganischer Phosphatdünger entsteht. Die Anlage produziert bis zu 15.000 Tonnen des Rezyklats pro Jahr. In Gefäß- und Feldversuchen wurde die Düngewirksamkeit des Rezyklats erfolgreich nachgewiesen.

### Key Facts zum Projekt

#### Koordination

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)**

**Fachbereich 4.4 Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung**

Richard-Willstätter-Straße 11, 12489 Berlin

**Dr.-Ing. Christian Adam**

Tel. +49 30 8104 5670

christian.adam@bam.de

**Dr. Hannes Herzel**

Tel. +49 30 8104 5680

hannes.herzel@bam.de

#### Untersuchungsstandort

Altenstadt

#### Projektpartner

- » Emter GmbH
- » sePura GmbH
- » Metso
- » Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
- » Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH (KWB)
- » FEHS-Institut für Baustoff-Forschung e. V.
- » Universität Bonn

#### Assoziierte Partner

- » Proman (Unterauftragnehmer)

#### Laufzeit

01.07.2020 – 30.06.2026

#### Verbundprojekt-Webseite

[www.bam.de/r-rhenania](http://www.bam.de/r-rhenania)

### Technische Ergebnisse

Im Projekt wurden zwei Verfahrensvarianten (AshDec® und R-Rhenania) eines thermochemischen Prozesses untersucht, denen die gleichen Reaktionen zugrunde liegen: Phosphatreichen Materialien wie Klärschlamm oder Klärschlammasche wird ein Natriumadditiv zugemischt. Die Mischung wird anschließend in einem thermischen Aggregat, wie beispielsweise einer Rostfeuerung, einem Drehrohr- oder einem Paddelofen, bei mindestens 850 °C thermochemisch behandelt. Dabei entsteht ein Rezyklat, welches die düngewirksame Phosphatphase  $\text{CaNaPO}_4$  enthält. Die Behandlung von Klärschlammasche wird im Projekt als AshDec-Verfahren bezeichnet, die Behandlung von Klärschlamm als R-Rhenania- bzw. Emter-Verfahren. Bei allen Verfahrensvarianten wird ein vergleichbares hochwirksames Phosphatdünger-Rezyklat hergestellt.

Das AshDec-Verfahren wurde in zwei Produktionskampagnen im Jahr 2020 mit einem Durchsatz von 20 kg/h an insgesamt zehn Tagen im Drehrohrföfen demonstriert. Von dieser thermochemischen Behandlung von Klärschlammasche wurden 1,1 t Rezyklat für Gefäß- und Feldversuche verwendet.

Die thermochemische Behandlung von Klärschlamm im R-Rhenania-Verfahren wurde in die Monoverbrennungsanlage für Klärschlamm der Firma Emter GmbH in Altenstadt integriert. Die genehmigte Kapazität der Anlage beträgt 55.000 Tonnen Klärschlamm-Trockensubstanz pro Jahr, aktuell werden rund 12.000 Tonnen phosphatreiche Aschen produziert. Der Klärschlamm wird aus der Region angeliefert und vor Ort getrocknet. Der Standort Altenstadt war für die Integration des thermochemischen R-Rhenania-Verfahrens besonders gut geeignet, da die Monoverbrennungsanlage Altenstadt über eine Rostfeuerung verfügt. Dadurch können ein hoher Feststoff/Feststoff-Kontakt und hohe Feststoffverweilzeiten realisiert werden. Diese Bedingungen für die Feststoff-

reaktionen können auch in Verbrennungsanlagen mit Drehrohr- oder Paddelöfen eingestellt werden, jedoch nicht in konventionellen Wirbelschichtverbrennungsanlagen.

Zur Auslegung und zum Testen des neuen Rhenania-Verfahrens wurde eine fünftägige Kampagne durchgeführt. Dabei wurde der Klärschlamm mit Natriumcarbonat vermischt und anschließend thermochemisch in der Rostfeuerung behandelt. Der Betrieb war über die gesamte Kampagne hinweg stabil. Unter anderem wurde untersucht, welchen Einfluss der Einsatz des Additivs auf die Phosphorverfügbarkeit des Produkts hat. Die Zudosierung korreliert sehr gut mit der Phosphorverfügbarkeit, die mittels Neutralammoniumcitrat (PNAC) bewertet wurde, sodass die Produktqualität sehr gut eingestellt werden kann. Ab einer Konzentration von über 8 Gew.-% Na im Produkt betrug der PNAC-Wert mindestens 80 % und bei einem Na-Gehalt von 10,5 Gew.-% Na im Produkt war der Phosphor komplett löslich. Die genaue Zugabe des notwendigen Natrium-Additivs und der resultierende Natriumgehalt im Rezyklat hängen von der Zusammensetzung des Klärschlammes ab und können daher an anderen Standorten variieren. Parallel dazu konnten die Gehalte an Schwermetallen wie Arsen, Cadmium, Quecksilber, Blei und Thallium durch Verdampfung und Abscheidung in der Abluftreinigungsanlage verringert werden. Schwermetalle wie Nickel können jedoch nicht über die Gasphase entfernt werden. Der Nickelgehalt muss also bereits im Klärschlamm so gering sein, dass er im Produkt unterhalb des Grenzwerts nach Düngemittelverordnung liegt. Die Klärschlammasche aus Altenstadt weist niedrige Schadstoffgehalte auf und ist daher gemäß den Regelungen für Düngemittel und Klärschlamm zulässig. An anderen Standorten ist eine Bewertung der Schwermetalle notwendig, um eine sichere Unterschreitung der Grenzwerte für Nickel im Produkt zu garantieren.

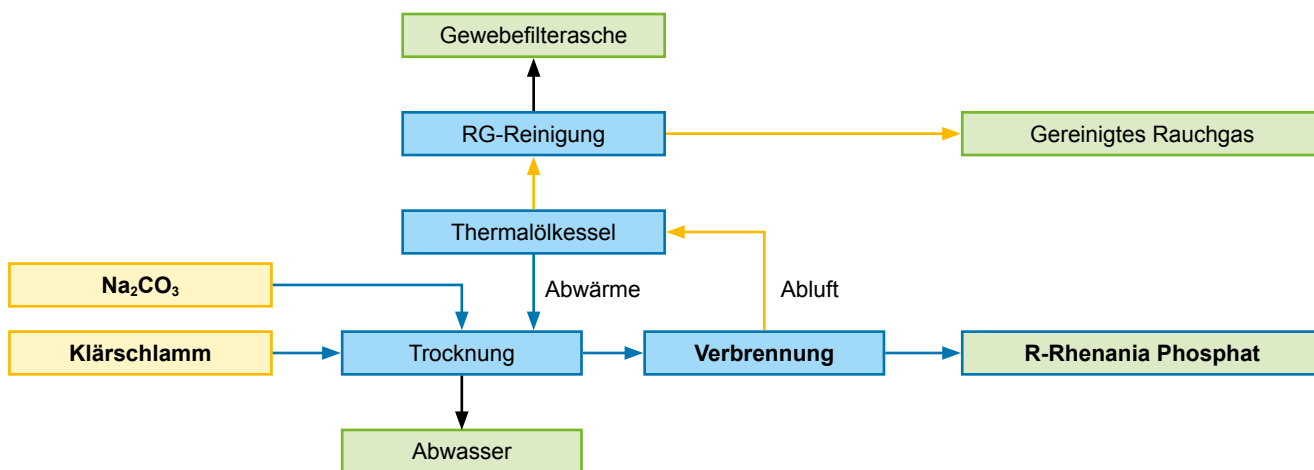
Aufgrund der erfolgreichen Demonstrationenkampagne investierte die Firma Emter in die Anlagenperipherie, um das

thermochemische Verfahren in den kontinuierlichen Betrieb zu integrieren. Dafür wurden eine Additivdosierung, ein Silo und eine Produktlagerhalle gebaut. Seit 2025 ist das thermochemische P-Rückgewinnungsverfahren integriert.

## Ökonomische & ökologische Aspekte

Die Monoverbrennungsanlage ist seit über 15 Jahren in Betrieb und wird als energieautarker Prozess mit geringen Energieüberschüssen gefahren. Dadurch ist sie sehr unabhängig von Veränderungen der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Die bisherigen Betriebsparameter und -kosten werden für den integrierten Prozess übernommen. Veränderungen können voraussichtlich erst nach mehrjährigem Betrieb der großtechnischen P-Rückgewinnungsanlage abgeschätzt werden. Da der Prozess in eine vorhandene Monoverbrennungsanlage integriert wurde, waren ausschließlich Investitionen in den Ausbau der Peripherie notwendig. Es wurden ein Silo und eine Dosiereinheit für das Additiv sowie eine Lagerhalle für das Produkt gebaut. Die zusätzlichen Kosten für den Ankauf von Natriumcarbonat werden durch die Vermarktung des hochwirksamen Phosphatdüngers abgedeckt.

Der Phosphatdünger enthält keine organischen Schadstoffe. Die enthaltenen Schwermetalle liegen unterhalb der Grenzwerte der Düngemittelverordnung. Hinsichtlich der Ökobilanzierung der Verfahren ist beim Treibhauspotential insbesondere die Herstellung des Natriumadditivs und die direkten Kohlendioxid-Emissionen aus dem Additiv relevant. Im Falle der nachgeschalteten AshDec-Technologie ist der Brennstoff (sofern fossil) ebenso für das Treibhauspotential zu berücksichtigen. Durch die erhöhte Pflanzenverfügbarkeit der Produkte (neutral-ammonium-citrat löslicher Phosphor größer 80 %) gegenüber einer unbehandelten Klärschlammasche wird eine Entlastung im Süßwassereutrophierungspotential (P-Emissionen in die Umwelt) prognostiziert.



Verfahrensfließbild R-Rhenania-Prozess.



In den Verfahren werden darüber hinaus Schwermetalle (Arsen, Cadmium, Quecksilber, Blei und Thallium) aus der Asche entfernt. Dadurch wird das Human- und Ökotoxizitätspotential gegenüber der Düngung mit Klärschlammasche verringert. Es gibt die Möglichkeit bei der AshDec-Technologie auch neben Natriumcarbonat, Natriumchlorid als Zuschlagstoff einzusetzen. Dies führt dazu dass auch Schwermetalle wie Kupfer oder Zink entscheidend reduziert werden können. Das Chlorid wirkt allerdings korrosiv. Daher ist in diesem Fall die Drehrohrfeuerung aus einem Chlorbeständigen Material auszuführen.

### Rezyklate & Abnahmemärkte

Bei den thermochemischen Verfahren R-Rhenania, Emter und AshDec entsteht ein aschebasiertes Rezyklat. Unabhängig vom Verfahren weisen diese eine vergleichbare Düngewirkung auf. Die Unterschiede in der Zusammensetzung hängen von der chemischen Zusammensetzung des eingesetzten Klärschlammes bzw. dessen Asche ab. Die Rezyklate sind schwermetallabgereichert und weisen eine hohe Düngewirkung auf. Ihre Düngewirkung wird anhand ihrer Löslichkeit in Neutralammoniumcitrat bewertet und im Verfahren auf einen Wert zwischen 80 und 100% eingestellt. Abhängig vom Ausgangsklärschlamm bzw. den Aschen beträgt der P-Gehalt 8–10% im Rezyklat.

Die Düngewirkung wurde sowohl in Gefäßversuchen als auch in Feldversuchen im ökologischen Landbau bestätigt. Die Rezyklate wurden unter verschiedenen Bedingungen wie unterschiedlichen Böden, Düngestufen und Pflanzen (u.a. Mais, Sommerweizen und Ackerbohnen) getestet. Im

ökologischen Landbau fanden über einen Zeitraum von drei Jahren an drei Standorten in Bayern Feldversuche mit einer Fruchtfolge aus Mais, Winterroggen und Klee gras statt. Dabei konnte bestätigt werden, dass das thermochemische Rezyklat eine vergleichbare Düngewirkung wie Struvit und Triplesuperphosphat hat.

Das thermochemische Rezyklat erfüllt die Grenzwerte für Schwermetalle sowie die geforderte Löslichkeit in Neutralammoniumcitrat gemäß der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV). Der aktuelle Wert für die Wasserlöslichkeit in der Verordnung, der vom Rezyklat nicht erreicht wird, wird voraussichtlich in einer Aktualisierung der Verordnung herausgenommen. Gemäß der EU-Düngeproduktverordnung kann das Rezyklat in die Produktfunktionskategorie (PFC)1(C)(a) und die Komponentenmaterialkategorie (CMC) 13 eingruppiert werden. Zudem erfüllt es die geforderte Löslichkeit von über 75% in Neutralammoniumcitrat. Um das Produkt vermarkten zu können, wurde eine REACH-Registrierung beantragt, die sich derzeit in der Abschlussphase befindet. Das Rezyklat hat eine hohe Akzeptanz im ökologischen Landbau und könnte dort eingesetzt werden. Daher wird die Zulassung für den ökologischen Landbau über die Positivliste bezogen auf die EU-Öko-Basisverordnung beantragt.

### Transfer/Verstetigung

Sowohl für Klärschlamm als auch für Klärschlammaschen in Deutschland besteht ein großer Bedarf an der zeitnahen Umsetzung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung, um die Vorgaben der Klärschlammverordnung ab dem Jahr 2029 einzuhalten. Schwermetallarme Klärschlämme und deren



*Blick in die Verbrennung in Altenstadt . © BAM*

Aschen eignen sich sehr gut für thermochemische Verfahren. Der Aufbau dieser Verfahren ist innerhalb weniger Jahre möglich und kann daher einen wichtigen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben leisten.

Die erfolgreichen Demonstrationsversuche für das AshDec-Verfahren sowie die Implementierung des R-Rhenania-Verfahrens in die Monoverbrennungsanlage in Altenstadt sind wichtige Bestätigungen für diese thermochemischen Verfahren mit Alkaliadditiven. Durch die Implementierung in die Anlage der Firma Emter mit einer Produktkapazität von 15.000 t/a entstand eine der größten Phosphorrückgewinnungsanlagen in Deutschland. In dieser Anlage wird direkt aus Klärschlamm ein wirksamer Phosphatdünger produziert. Ein vergleichbares Verfahrensprinzip im Drehrohrofen mit Alkaliadditiv setzt die Firma Werkstätten-Heating Systems GmbH an den Standorten Michelstadt und Schlitz um.

Auf Basis der Kooperation aus dem Projekt R-Rhenania werden mit der Firma Michaelis GmbH & Co. KG verschiedene Umsetzungen mit der Paddelofen-Technologie geplant. Es sind Verbrennungsanlagen mit dem integrierten thermochemischen Verfahren an verschiedenen Standorten vorgesehen. Zusätzlich plant Michaelis zusammen mit sePura GmbH eine großtechnische thermochemische Verwertung von 15.000 t/a Klärschlammasche im Paddelofen in Veitshöchheim. Diese Umsetzung im Paddelofen wird als Canaphos-Verfahren bezeichnet. In dieser Anlage soll auch die Verarbeitung von Aschen mit Kupfergehalten oberhalb der Düngemittelgrenzwerte möglich sein. Die Inbetriebnahme dieser Anlage ist für das Jahr 2027 geplant.

### Fazit: Drei Empfehlungen für die Praxis

- 1.) Klärschlämme und Klärschlammaschen mit niedrigen Schwermetallgehalten können in thermochemischen Verfahren wirtschaftlich verwertet werden, um somit auch die Vorgaben der AbfKlärV zu erfüllen.
- 2.) Bei der thermochemischen Verwertung von Klärschlamm kann ein Energieüberschuss generiert werden. Bei der Verwertung von Klärschlammaschen kann der Energiebedarf durch optimierte Energiekonzepte minimiert werden und ist somit wirtschaftlich darstellbar.
- 3.) Die thermochemischen Rezyklate weisen eine hohe Düngewirkung auf. Das Rezyklat kann nach der DüMV als auch nach der EU-Düngeregulatorverordnung Düngertypen zu geordnet werden. Die Grenzwerte für die umweltrelevanten Schwermetalle werden eingehalten und die relevanten Vorgaben der Phosphorlöslichkeit werden erfüllt.

# SATELLITE

## Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling

### Projektziel & Hintergrund

Die deutsche Phosphorrückgewinnungsstrategie mit Fokus auf thermischer Verwertung bedeutet eine Umstellung der Klärschlammverwertungsstrategie besonders in landwirtschaftlich geprägten Regionen, die mit hohen Investitionen verbunden ist. SATELLITE zielt daher auf das Bereitstellen eines Leitfadens mit Werkzeugen zur angepassten und optimierten Verfahrensauswahl, nutzbar sowohl für die einzelne Anlage als auch für lokale bis interkommunale Verbünde mit mehreren Anlagen. Zudem wird eine integrale Nährstoffrückgewinnung angestrebt, die neben dem Phosphor auch den Stickstoff mitbetrachtet.

### Key Facts zum Projekt

#### Koordination

**Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover (ISAH)**

Welfengarten 1, 30167 Hannover

**Dr.-Ing. Maïke Beier**

Tel. +49 762 2898

beier@isah.uni-hannover.de

#### Untersuchungsstandort

Hildesheim, Pattensen, Landkreis Nienburg, Göttingen

#### Projektpartner

- » Landwirtschaftskammer Niedersachsen
- » Göttinger Entsorgungsbetriebe
- » Stadtentwässerung Hildesheim AöR
- » Kreisverband für Wasserwirtschaft Nienburg
- » Stadt Pattensen
- » BIORESTEC GmbH
- » Ingenieurbüro Dr. Breitenkamp
- » SF-SoepenberG GmbH
- » Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (bis 30.06.2023)

#### Assoziierte Partner

- » KNRN

#### Laufzeit

01.07.2020 – 31.12.2025

#### Verbundprojekt-Webseite

[www.satellite-rephor.de](http://www.satellite-rephor.de)

### Technische Ergebnisse

Die Umstellung der Klärschlammverwertung infolge gesetzlicher Vorgaben erfordert neue, integrierte Konzepte für Planung, Betrieb, Logistik und Nährstoffrückgewinnung. Insbesondere für ländlich geprägte Regionen mit vielen kleinen und mittleren Kläranlagen fehlen praxisnahe Lösungen, die technische, wirtschaftliche und organisatorische Aspekte auch im Kläranlagenverbund berücksichtigen und großtechnisch validiert sind.

Durch erfolgreiche Umstellung von aerober Voll- auf anaerobe Teilstabilisierung (Verlagerung der Stabilisierung auf die Kläranlage Hildesheim) konnte der Strombedarf der KA Pattensen um ca. 11 % reduziert und ein Belebungsbecken außer Betrieb genommen werden - bei gleichzeitiger Erzeugung von zusätzlichem Faulgas in Hildesheim. Ergänzend wurde eine Feststoffabtrennung im Zulauf mittels Trommelsieb erprobt, die vergleichbare Abscheidegrade wie ein Vorklärbecken zeigte. Durch die Entlastung der Belebung konnten weitere Energieeinsparungen von bis zu 20 % erzielt werden.

In der Modellregion Landkreis Nienburg wurde die Umstellung von 11 Satelliten-Kläranlagen auf eine zentrale Faulung untersucht. Durch reduzierte Belüftung und zusätzliche Biogaserträge ergibt sich ein Energiepotenzial von rund 900 MWhel/a. Die Bündelung der Schlammströme eröffnet zudem Optionen für eine solare Trocknung, wodurch Transportmengen sinken, der Heizwert steigt und die Flexibilität im Betrieb der Monoklärschlammverbrennung erhöht wird. Des Weiteren wurde in der Modellregion der Einsatz einer mobilen Entwässerung erprobt und ein entsprechender

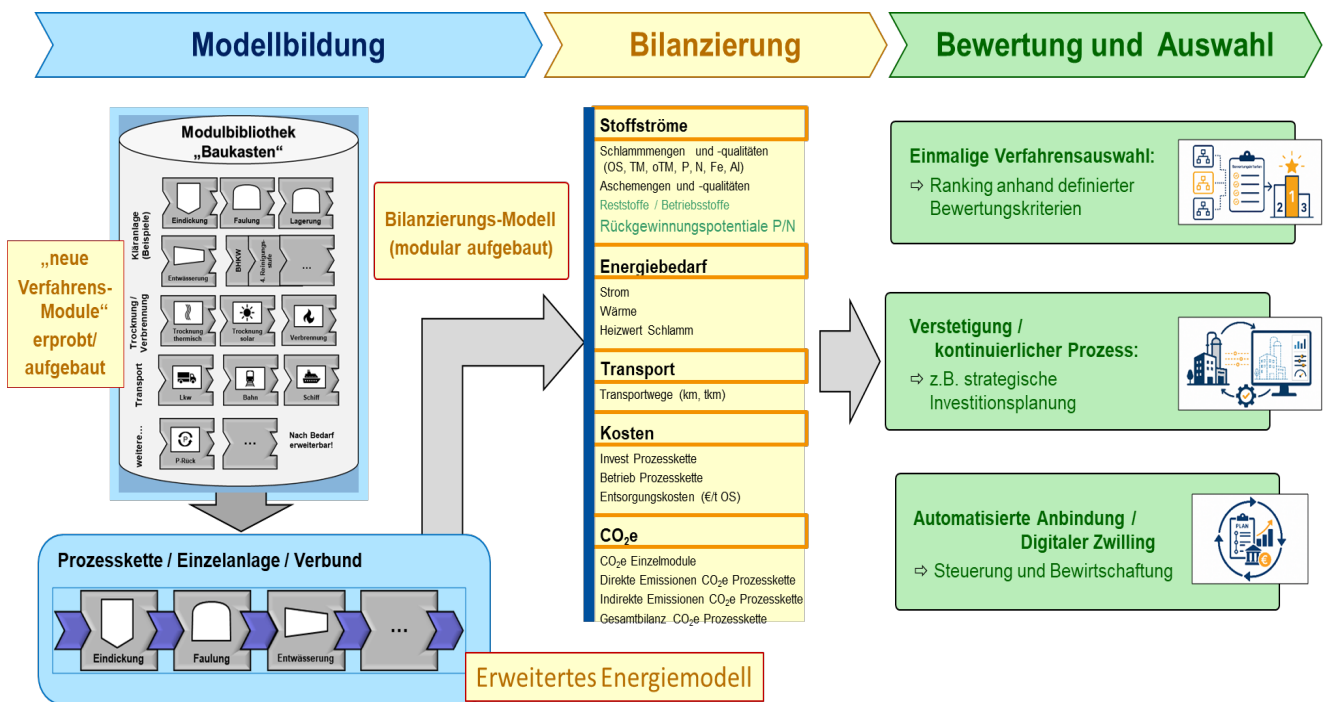
Fahrplan (Planungshilfe) entwickelt. Fahrplan und mobile Zentrifuge kommen auch nach Projektende weiterhin in der Modellregion zum Einsatz.

Am Standort Göttingen wurde die Option einer Klärschlamm-trocknung untersucht: Durch Nutzung vorhandener Eigenenergie kann der Trockensubstanzgehalt von 26 auf 36 % erhöht und die Lagerkapazität auf 5 Tage gesteigert werden. Gleichzeitig lassen sich Transportemissionen um etwa 25 Mg CO<sub>2</sub>e/a reduzieren. Eine weitergehende Trocknung erhöht zwar die Flexibilität (bis zu 12 Tage Lagerung), geht jedoch mit zusätzlichem fossilem Energieeinsatz einher und wurde daher unter Abwägung der Betriebsanforderungen bewertet.

Am Standort Hildesheim wurde ein Bilanzmodell der Gesamtanlage aufgebaut und kalibriert, in dem die verschiedenen P-Fractionen im Hinblick auf die P-Rückgewinnung differenziert abgebildet sind. Zusätzlich wurde in der Modellregion ein intensives Schlammscreening aller Kläranlagen mit dem Ziel der P-Fraktionierung durchgeführt. Hierbei zeigt sich zum einen eine große Schwankung in den Schlämmen der verschiedenen Anlagen. Aber auch eine saisonale Schwankung ist zu erkennen. So sind die P-Gehalte im Sommer auf die Trockenmasse bezogen durch den geringeren TS in der Belebung merklich erhöht. Auch die über den Schlamm ausgeschleusten P-Frachten sind im Sommer höher als im Winter.

Im halbtechnischen Maßstab wurden im Projekt zwei Verfahren entwickelt: Zum einen die Stickstoffrückgewinnung während der Klärschlamm-trocknung, deren Kern mehrere gezielt gesetzte Brüdenabzüge sind. So konnte in den halbtechnischen Versuchen ein Ammoniakstarkwasser mit bis zu 33 g/L NH<sub>4</sub>-N erzeugt werden (im Mittel 16,9 g/L). In Rektifikationsversuchen konnte aus einem Kondensatstrom mit 13,2 g/L NH<sub>4</sub>-N eine Lösung mit 18 % NH<sub>3</sub> erzeugt werden, wobei die Rektifikationskolonne nicht für diese Versuche geplant und folglich nicht am Optimum betrieben werden konnte. Eine Steigerung auf 25 % NH<sub>3</sub> ist demnach technisch möglich. Zusätzlich wurde eine modulare Anlage zur Herstellung von flüssigem Stickstoffdünger entwickelt. Sie erlaubt es, aus auf Kläranlagen anfallenden hoch stickstoffhaltigen Strömen wie Brüdenkondensaten oder Ammoniumsulfatlösungen durch gezielte Zugabe von Harnstoff und/oder Phosphorsäure ein Düngemittel mit gewünschtem N- und P-Gehalt zu erzeugen.

Auch eine umwelt- und kostenoptimierte Logistik ist ein wichtiger Faktor für eine optimierte Klärschlammverwertung im Verbund. Hierzu wurden im Projekt unterschiedliche Logistikkonzepte für den Gesamtverbund, aber auch für Einzelanlagen (Standort Göttingen) betrachtet und ein Prototyp für einen speziell für den Klärschlammtransport zugeschnittenen Transportcontainer entwickelt.



Verfahrensschema SATELLITE.

## Modelle und Werkzeuge

Als Basis für die Entwicklung unterschiedlicher Modelle und Tols wurde im Projekt eine Open-Access-Modulbibliothek erarbeitet, die projektübergreifend genutzt und fortgeschrieben werden kann. Hier sind verschiedene Verfahren und Verfahrensausprägungen aus dem Kontext der Klärschlammverwertung dokumentiert und systematisiert. Hinterlegt sind zum einen standardisierte Steckbriefe (Textform) sowie Modul-Datensätze, die zentrale Kenngrößen (z. B. Stoffstromänderungen, Energiebedarfe, Emissionen) enthalten. Aus den hinterlegten Daten können (Verfahrens-) Module abgeleitet werden, die einzelne Prozessschritte funktional im Modell abbilden. Durch Kombination und Verschaltung der Module lassen sich Verfahrensketten und Anlagenmodelle erstellen.

Mit dem OptiNETZ-Tool wurde hierauf aufbauend ein zentrales Werkzeug für eine integrierte Planung und Bewirtschaftung ganzer Klärschlamm- bzw. Entsorgungsverbünde (bspw. die KNRN) entwickelt und erprobt. Mit dem OptiNETZ-Tool #plan können versch. Planungsszenarien hinsichtlich Kosten, Energieeinsatz, Emissionen und Stoffströmen bewertet und miteinander verglichen werden. Das OptiNETZ-Tool #live ist als Prototyp für eine KI-gestützte, optimierte Bewirtschaftung umgesetzt.

Darüber hinaus wurde ein Prototyp für ein regionales Nährstoffmodell entwickelt, das eine monatscharfe Bilanzierung und Prognose von Nährstoffanfall und -bedarf in einer Region ermöglicht und damit die Grundlage für ein gezieltes regionales Nährstoffmanagement bildet.

## Integrale Bewertung

Für eine anwendungsfallsspezifische Verfahrensauswahl und -bewertung im Nährstoffrecycling ist eine ganzheitliche Bewertung im Gesamtsystem erforderlich. Dabei sind sowohl die Inputseite (Klärschlammqualität, -menge und -bewirtschaftung im regionalen Verbund) als auch die Outputseite (regionale Nährstoffbedarfe und Rückführung) zu berücksichtigen. Die Eigenschaften des Klärschlammes beeinflussen maßgeblich Aufwand, Rückgewinnungsquote sowie Energie- und Stoffbilanzen der Phosphorrückgewinnung und können Anpassungen in vorgelagerten Prozessen erforderlich machen.

Hierzu wurde im Projekt SATELLITE ein systematisches, modellgestütztes Vorgehen erarbeitet und angewendet. Ausgangspunkt ist die Definition von Bilanzraum, Betrachtungshorizont und Bewertungszielen durch die entscheidenden Akteure. Darauf aufbauend werden relevante Verfahrensalternativen (Prozessketten) definiert und als Szenarien





formuliert. Im Rahmen einer modellgestützten Bilanzierung werden standort- und verfahrensspezifische Stoffströme, Energie- sowie Kosten für die entsprechenden Prozessketten ermittelt. Einheitliche Bilanzgrenzen und konsistente Annahmen sichern die Vergleichbarkeit der Alternativen; Sensitivitätsanalysen ermöglichen die Berücksichtigung unsicherer oder volatiler Rahmenbedingungen. Aus den Ergebnissen werden strategische Bewertungsgrößen abgeleitet. Diese können fallbezogen gewichtet und zusammengeführt werden (z. B. in Form einer Bewertungsmatrix). Modellgestützte Bewertungs- und Planungswerkzeuge (s.o.) ermöglichen dabei eine modulare Abbildung der Prozessketten sowie eine flexible Szenarienparametrisierung und bilden die Grundlage für transparente, nachvollziehbare und strategisch fundierte Verfahrensentscheidungen.

### Transfer / Verstetigung

Die in der Großtechnik erprobten **Betriebsstrategien** werden auch nach Projektende von den beteiligten Kläranlagen weiterhin umgesetzt. Hierzu zählt bspw. die Außerbetriebnahme eines Belebungsbeckens auf der Kläranlage Pattenzen und die damit verbundene Stabilisierung der Schlämme auf der Kläranlage Hildesheim (energiebringend anaerob). Auch die gemeinsame Nutzung einer Zentrifuge zur Entwässerung von Klärschlämmen im kleinen Verbund wird im Nachgang weiter in der Modellregion genutzt. Die in der Halbttechnik erprobten Verfahren zur Stickstoffrückgewinnung und Düngemittelherstellung werden im Nachgang zur Marktreife weiterentwickelt.

Ein Kern des SATELLITE-Projekts und damit ein zentraler Punkt der Verstetigung sind die **entwickelten Modelle und Werkzeuge**. Die **Modulbibliothek** steht als **Open-Access-Anwendung** zur Verfügung und kann durch neue Verfahren oder Verfahrensausprägungen erweitert werden. Sie kann also sowohl von Verfahrensgebern als auch durch nachfolgende Forschungsprojekte erweitert werden. Sie bietet somit eine direkte Anschlussstelle und bildet die Grundlage, um neue Verfahren schnell der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Des Weiteren steht das **OptiNETZ-Tool #plan** für die strategische Planung von Klärschlamm- oder Entsorgungnetzwerken zur Verfügung und wurde bereits außerhalb des Projekts eingesetzt. Das OptiNETZ-Tool #live zur Unterstützung des Betriebsmanagements wird nach Ende des Projekts weiterentwickelt. Zudem kann die **Landwirtschaftskammer Niedersachsen** das entwickelte **Planungsmodell zur regionalen Nährstoffplanung** für behördeninterne Arbeitsschritte nutzen.

Die den Modellen, der **strategischen Investitionsplanung und modellgestützten Bewertung** zugrunde liegende Methodik fand Eingang in den Arbeitsbericht der DWA KEK AG 7.7, war Gegenstand mehrerer Webinare und wird auch durch die DWA-RePhoR-Seminarreihe weiterverbreitet. Neben verschiedenen Fachvorträgen und Zeitschriftartikeln finden die Projektergebnisse Eingang in drei Dissertationen.

### Fazit: Drei Empfehlungen für die Praxis

- 1.) Eine verlässliche Bewertung verschiedener Verfahren und/oder Strategien ist nur unter Berücksichtigung von regionalen Rahmenbedingungen und über die gesamte Prozesskette (Abwasserreinigung bis Rezyklatnutzung) möglich.
- 2.) Für die Planung sollten Zeiträume von mindestens 40 Jahren betrachtet und Unsicherheiten bei den angesetzten Kenngrößen (Sensitivität) berücksichtigt werden.
- 3.) Für die Entscheidung für ein bestimmtes Verfahren ist es wichtig auf Kennzahlen der zum Vergleich stehenden Verfahren zurückgreifen zu können.

# Kontakt Daten der Verbundpartner

## TransPhoR

**Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen (FiW) e. V.**

Ölmühle 4  
52074 Aachen

**Univ.-Prof. Dr.-Ing.**

**Johannes Pinnekamp**  
[pinnekamp@fiw.rwth-aachen.de](mailto:pinnekamp@fiw.rwth-aachen.de)

**Sophia Schüller, M.Sc.**  
[schueller@fiw.rwth-aachen.de](mailto:schueller@fiw.rwth-aachen.de)

**HGoTECH GmbH**

Karlrobert-Kreiten-Straße 13  
53115 Bonn

**Prof. Dr. Heiner Goldbach**  
[goldbach@hgotech.de](mailto:goldbach@hgotech.de)

**Dipl.-Ing. Christian Heck**  
[heck@hgotech.de](mailto:heck@hgotech.de)

**INAB der RWTH Aachen University  
Institut für Nachhaltigkeit im  
Bauwesen**

Mies-van-der-Rohe-Str. 1  
52074 Aachen

**Univ.-Prof. Dr. Ing. Marzia Traverso**  
[marzia.traverso@inab.rwth-aachen.de](mailto:marzia.traverso@inab.rwth-aachen.de)

**Dr.-Ing. Roland Meyer**  
[roland.meyer@inab.rwth-aachen.de](mailto:roland.meyer@inab.rwth-aachen.de)

**TUTTAHS & MEYER  
Ingenieurgesellschaft für  
Wasser-, Abwasser- und  
Energiewirtschaft mbH**

Bismarckstrasse 2-8  
52066 Aachen

**Prof. Dr.-Ing. Markus Schröder**  
[m.schroeder@tum-ingenieure.de](mailto:m.schroeder@tum-ingenieure.de)

## AMPHORE

**Ruhrverband**

Kronprinzenstraße 37  
45128 Essen

**Hanna Evers, M.Sc.**  
[hev@ruhrverband.de](mailto:hev@ruhrverband.de)

**Emschergenossenschaft/Lippeverband**

Kronprinzenstraße 24  
45128 Essen

**Dirk Bogaczyk**  
[bogaczyk.dirk@eglv.de](mailto:bogaczyk.dirk@eglv.de)

**Wupperverband**

Untere Lichtenplatzer Str. 100  
42289 Wuppertal

**Catrin Bornemann**  
[bor@wupperverband.de](mailto:bor@wupperverband.de)

**Linksniederrheinische  
Entwässerungs-Genossenschaft**

Friedrich-Heinrich-Allee 64  
47475 Kamp-Lintfort

**Helle Dorothee Wischer**  
[wischer.h@lineg.de](mailto:wischer.h@lineg.de)

**Institut für Siedlungswasserwirtschaft  
der RWTH Aachen  
University (ISA)**

Mies-van-der-Rohe-Str. 1  
52074 Aachen

**Dr.-Ing. David Montag**  
[montag@isa.rwth-aachen.de](mailto:montag@isa.rwth-aachen.de)

**Fraunhofer-Institut für System- und  
Innovationsforschung (ISI)**

Breslauer Straße 48  
76139 Karlsruhe

**Dr.-Ing. Jutta Niederste-Hollenberg**  
(ehem. ISI, jetzt FiW e.V.)  
[niederste-hollenberg@fiw.rwth-aachen.de](mailto:niederste-hollenberg@fiw.rwth-aachen.de)

**Institut für Energie- und  
Umweltforschung gGmbH (ifeu)**

Wilckensstr. 3  
69120 Heidelberg

**Horst Fehrenbach**  
[horst.fehrenbach@ifeu.de](mailto:horst.fehrenbach@ifeu.de)

**Joachim Reinhardt**  
[joachim.reinhardt@ifeu.de](mailto:joachim.reinhardt@ifeu.de)

**PhosRec Phosphor-Recycling GmbH**

In der Welheimer Mark 190  
46238 Bottrop

**Dr.-Ing. Yvonne Schneider**  
[ysc@ruhrverband.de](mailto:ysc@ruhrverband.de)

**Prof. Dr.-Ing. Torsten Frehmann**  
[frehmann.torsten@eglv.de](mailto:frehmann.torsten@eglv.de)

**Dr.-Ing. Dennis Blöhse**  
[bloehse.dennis@eglv.de](mailto:bloehse.dennis@eglv.de)

**Emscher Wassertechnik GmbH**

Brunnenstraße 37  
45128 Essen

**Dr.-Ing. Tim Fuhrmann**  
[fuhrmann@ewlw.de](mailto:fuhrmann@ewlw.de)

**WiW – Wupperverbandsgesellschaft  
für integrale Wasserwirtschaft mbH**

Untere Lichtenplatzer Str. 100  
42289 Wuppertal

**Dr.-Ing. Gerd Kolisch**  
[kol@wupperverband.de](mailto:kol@wupperverband.de)

## ASSOZIIERTE PARTNER

**BETREM GmbH**

Sturmshof 20  
46238 Bottrop

**Dagmar Dörtelmann**

**Compo Expert GmbH**

Krögerweg 10  
48155 Münster

**André Leise**

**INNOVATHERM Gesellschaft zur  
innovativen Nutzung von  
Brennstoffen mbH**

Frydagstraße 47  
44536 Lünen

**Falko Lehrmann**

**WFA Elverlingsen GmbH**

Auf der Mark 1  
58791 Werdohl

**Dierk von Felde**

**Chemische Fabrik Wocklum |  
Gebr. Hertin GmbH & Co. KG**

Glärbach 2  
58802 Balve

**Thorsten Löchter**

**SF-SoepenberG GmbH**

Emil-Fischer-Straße 14  
46569 Hünxe

**Martin Teloo**

**Yara GmbH & Co. KG**

Hanninghof 35  
48249 Dülmen

**Dr. Marina Ettl**

**WKW Aktiengesellschaft**

Siebeneicker Straße 235  
42553 Velbert

**Volker Stange**

## DreiSATS

**Veolia Klärschlammverwertung  
Deutschland GmbH**  
Nordstraße 15  
04420 Markranstädt  
**Matthias Hoger**  
[matthias.hoger@veolia.com](mailto:matthias.hoger@veolia.com)  
**Claudyn Kidszun**  
[claudyn.kidszun@veolia.com](mailto:claudyn.kidszun@veolia.com)

**Fraunhofer-Institut für Keramische  
Technologien und Systeme IKTS**  
Winterbergstraße 28  
01277 Dresden  
**Marc Lincke**  
[marc.lincke@ikts.fraunhofer.de](mailto:marc.lincke@ikts.fraunhofer.de)

**Carbotechnik Energiesysteme GmbH**  
Lauterbachstraße 12  
82538 Geretsried  
**Peter Schöfmann**  
[schoefmann@carbotechnik.de](mailto:schoefmann@carbotechnik.de)

**Pontes Pabuli GmbH**  
Harkortstraße 8  
04107 Leipzig  
**Dr. Lars Leidolph**  
[l.leidolph@pontes-pabuli.de](mailto:l.leidolph@pontes-pabuli.de)

**LTC – Lufttechnik Crimmitschau GmbH**  
Gewerbering 24  
08451 Crimmitschau  
**Holger Ullmann**  
[holger.ullmann@ltc-crimmitschau.com](mailto:holger.ullmann@ltc-crimmitschau.com)

**Materialforschungs- und -prüfanstalt  
an der Bauhaus-Universität Weimar  
(MFPA Weimar)**  
Coudraystraße 9  
99423 Weimar  
**Timon Echt**  
[timon.echt@mfpa.de](mailto:timon.echt@mfpa.de)

## KlimaPhoNds

**Clausthaler Umwelttechnik  
Forschungszentrum  
CUTEC – Abteilung Abwasser-  
verfahrenstechnik**  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
**Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers**  
[michael.sievers@cutec.de](mailto:michael.sievers@cutec.de)

**CUTEC – Abteilung Thermische  
Prozesstechnik**  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
**Dr.-Ing. Stefan Vodegel**  
[stefan.vodegel@cutec.de](mailto:stefan.vodegel@cutec.de)

**CUTEC – Abteilung Ressourcentechnik  
und -systeme**  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
**Dipl.-Umweltwiss. Jan Schlecht**  
[jan.schlecht@cutec.de](mailto:jan.schlecht@cutec.de)

**PARFORCE Engineering &  
Consulting GmbH**  
Am St.-Niclas-Schacht 13  
09599 Freiberg  
**Dr. Peter Fröhlich**  
[peter.froehlich@parforce-technologie.de](mailto:peter.froehlich@parforce-technologie.de)

**LUKSON AG**  
Geyener Str. 1  
50259 Pulheim  
**Dipl.-Ing. Franz Hormes**  
[f.hormes@lukson.de](mailto:f.hormes@lukson.de)

**KNOKE Industrie-Montagen GmbH**  
Gesellensteig 48  
38229 Salzgitter  
**Adam Bardosi**  
[bardosi@knoke-salzgitter.de](mailto:bardosi@knoke-salzgitter.de)  
**Kevin Piel**  
[piel@knoke-salzgitter.de](mailto:piel@knoke-salzgitter.de)

**Eigenbetrieb Abwasserbeseitigung  
der Stadt Northeim**  
Scharnhorstplatz 1  
37154 Northeim  
**Dipl.-Ing. Olaf Hagenow**  
[ohagenow@northeim.de](mailto:ohagenow@northeim.de)

## ASSOZIIERTE PARTNER

**BMA – Braunschweigische  
Maschinenbauanstalt AG**  
Am Alten Bahnhof 5  
38122 Braunschweig  
**Dr. Andreas Lehnberger**  
[andreas.lehnberger@bma-de.com](mailto:andreas.lehnberger@bma-de.com)

**Schwenk Zement KG**  
Hindenburgring 15  
89077 Ulm  
**Dr. Hendrik Möller**  
[moeller.hendrik@schwenk.de](mailto:moeller.hendrik@schwenk.de)  
**HeidelbergCement**  
Berliner Straße 6  
69120 Heidelberg  
**Dirk Kastner**  
[dirk.kastner@heidelbergcement.com](mailto:dirk.kastner@heidelbergcement.com)

# Kontakt Daten der Verbundpartner

## P-Net

**Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW), Technische Universität Braunschweig**  
Pockelsstraße 2a  
38106 Braunschweig  
**Prof. Dr.-Ing. Thomas Dockhorn**  
[t.dockhorn@tu-braunschweig.de](mailto:t.dockhorn@tu-braunschweig.de)

**Abwasserverband Braunschweig (AVB)**  
Celler Straße 22  
38176 Wendeburg  
**Dr.-Ing. Franziska Gromadecki**  
[franziska.gromadecki@abwasserverband-bs.de](mailto:franziska.gromadecki@abwasserverband-bs.de)

**Abwasser- und Straßenreinigungsbetrieb Stadt Gifhorn (ASG)**  
Winkeler Straße 4  
38518 Gifhorn  
**Dipl.-Ing. Hans-Oskar Baron**  
[baron@asg-gifhorn.de](mailto:baron@asg-gifhorn.de)

**ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung**  
Hamburger Allee 45  
60486 Frankfurt am Main  
**Dr.-Ing. Martina Winker**  
[winker@isoe.de](mailto:winker@isoe.de)

**Julius-Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI)**  
Erwin-Baur-Straße 27  
06484 Quedlinburg  
**Dr. Elke Bloem**  
[elke.bloem@julius-kuehn.de](mailto:elke.bloem@julius-kuehn.de)  
**Dr. Sylvia Kratz**  
[sylvia.kratz@julius-kuehn.de](mailto:sylvia.kratz@julius-kuehn.de)

**PFI-Planungsgemeinschaft**  
Karl-Imhoff-Weg 4  
30165 Hannover  
**Dipl.-Ing. Oliver Hermanussen**  
[hermanussen@pfi.de](mailto:hermanussen@pfi.de)

**SF-SoepenberG GmbH**  
Emil-Fischer-Straße 14  
46569 Hünxe  
**Dr. Joachim Clemens**  
[j.clemens@soepenberG.com](mailto:j.clemens@soepenberG.com)

**Stadtentwässerung Braunschweig GmbH (SE|BS)**  
Postfach 45 10  
38035 Braunschweig  
Taubenstraße 7  
38106 Braunschweig  
**Dipl.-Ing. Jens-Christoph Siemers**  
[christoph.siemers@se-bs.de](mailto:christoph.siemers@se-bs.de)

## RePhoRM

**Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR, Fachgebiet Abwassertechnik**  
Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt  
**Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart**  
[markus.engelhart@tu-darmstadt.de](mailto:markus.engelhart@tu-darmstadt.de)  
**Ibrahim Sharifov**

**Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR, Arbeitsgruppe Stoffstrommanagement und Ressourcenvirtschaft**  
Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt  
**Dr. sc. Vanessa Zeller**  
[v.zeller@iwar.tu-darmstadt.de](mailto:v.zeller@iwar.tu-darmstadt.de)  
**Chunyu Miao**

**Becker Büttner Held Rechtsanwälte Wirtschaftsprüfer Steuerberater PartGmbH**  
Magazinstraße 15–16  
10179 Berlin  
**Beate Kramer**  
[beate.kramer@bbh-online.de](mailto:beate.kramer@bbh-online.de)  
**Dr. Anna Alexandra Seuser**

**Infraserv GmbH & Co. Höchst KG**  
Industriepark Höchst  
65926 Frankfurt am Main  
**Jannik Mühlbauer**  
[jannik.muehlbauer@infraserv.com](mailto:jannik.muehlbauer@infraserv.com)  
**Thorsten Appel**

**Glatt Ingenieurtechnik GmbH**  
Nordstraße 12  
99427 Weimar  
**Dr. Johannes Buchheim**  
[johannes.buchheim@glatt.com](mailto:johannes.buchheim@glatt.com)  
**Dr. Michael Jacob**

**TVM Thermische Verwertung Mainz GmbH**  
Industriestraße 70  
55120 Mainz  
**Michael Krauss**  
[michael.krauss@tvm.mainz.de](mailto:michael.krauss@tvm.mainz.de)  
**Carsten Krollmann**

**Stadt Frankfurt am Main – Stadtentwässerung Frankfurt am Main**  
Goldsteinstraße 160  
60528 Frankfurt am Main  
**Dr. Susanne Schmid**  
[susanne.schmid@stadt-frankfurt.de](mailto:susanne.schmid@stadt-frankfurt.de)  
**Dr. Rolf Götz**

## R-Rhenania

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)**  
Unter den Eichen 87  
12200 Berlin  
**Dr.-Ing. Christian Adam**  
[christian.adam@bam.de](mailto:christian.adam@bam.de)

**Outotec GmbH & Co. KG**  
In den Schwarzwiesen 13  
61440 Oberursel  
**Tanja Schaaf**  
[tanja.schaaf@mogroup.com](mailto:tanja.schaaf@mogroup.com)

**Emter GmbH**  
Alpenstraße 50  
86972 Altenstadt  
**Johann Emter**  
[info@emter-gmbh.de](mailto:info@emter-gmbh.de)

**sePura GmbH**  
Raiffeisenstraße 1  
97209 Veitshöchheim  
**Dieter Leimkötter**  
[dieter.leimkoetter@sepura.de](mailto:dieter.leimkoetter@sepura.de)

**Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH (KWB)**  
Cicerstraße 24  
10709 Berlin  
**Fabian Kraus**  
[fabian.kraus@kompetenz-wasser.de](mailto:fabian.kraus@kompetenz-wasser.de)

**Universität Bonn**  
Karlrobert-Kreiten-Str. 13  
53115 Bonn  
**Jürgen Burkhardt**  
[j.burkhardt@uni-bonn.de](mailto:j.burkhardt@uni-bonn.de)

**FEhS-Institut für Baustoff-Forschung e. V.**  
Bliersheimer Straße 62  
47229 Duisburg  
**Hans-Peter König**  
[hp.koenig@fehs.de](mailto:hp.koenig@fehs.de)

**Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)**  
Vöttinger Straße 38  
85354 Freising  
**Peer Urbatzka**  
[peer.urbatzka@lfl.bayern.de](mailto:peer.urbatzka@lfl.bayern.de)

## SATELLITE

**Institut für Siedlungswasserwirtschaft  
und Abfalltechnik der Leibniz  
Universität Hannover (ISAH)**

Welfengarten 1  
30163 Hannover

**Dr.-Ing. Maïke Beier**

[beier@isah.uni-hannover.de](mailto:beier@isah.uni-hannover.de)

**Fraunhofer-Institut für Materialfluss  
und Logistik (IML)**

Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2 – 4  
44227 Dortmund

**Frederic Veit**

[frederic.veit@iml.fraunhofer.de](mailto:frederic.veit@iml.fraunhofer.de)

**Landwirtschaftskammer  
Niedersachsen**

Vor dem Zoll 2

31582 Nienburg

**Hauke Ahnemann**

[hauke.ahnemann@](mailto:hauke.ahnemann@lwk-niedersachsen.de)

[lwk-niedersachsen.de](mailto:hauke.ahnemann@lwk-niedersachsen.de)

**Kommunale Nährstoffrückgewinnung  
Niedersachsen GmbH (KNRN)**

Kanalstr. 50

31137 Hildesheim

**Dr.-Ing. Jens Manthey**

[j.manthey@knrn.de](mailto:j.manthey@knrn.de)

**Göttinger Entsorgungsbetriebe (GEB)**

Rudolf-Wissel-Str. 5

37079 Göttingen

**Carsten Keunecke**

[c.keunecke@goettingen.de](mailto:c.keunecke@goettingen.de)

**Stadtentwässerung Hildesheim  
Kommunale AöR (SEHi)**

Kanalstraße 50

31377 Hildesheim

**Dr.-Ing. Erwin Voß**

[erwin.voss@sehi-hildesheim.de](mailto:erwin.voss@sehi-hildesheim.de)

**Kreisverband für Wasserwirtschaft  
Nienburg**

Am Wall 2

31582 Nienburg

**Axel Brause**

[brause@kvwasser-nienburg.de](mailto:brause@kvwasser-nienburg.de)

**Stadt Pattensen – Kläranlage**

Rathausplatz 1

30982 Pattensen

**Jörg Hinrichsen**

[hinrichsen@pattensen.de](mailto:hinrichsen@pattensen.de)

**Ingenieurbüro Dr. Breitenkamp**

Hansastr. 45

32257 Bünde

**Dr.-Ing. Sabrina Breitenkamp**

[breitenkamp@ressourcen-](mailto:breitenkamp@ressourcen-effizienz.pro)

[effizienz.pro](mailto:breitenkamp@ressourcen-effizienz.pro)

**BIORESTEC GmbH**

Karlsruher Str. 20a

30880 Laatzen

**Dr.-Ing. Dipl.-Biol. Paul Stopp**

[info@biorestec.de](mailto:info@biorestec.de)

**SF SoepenberG GmbH**

Emil-Fischer-Str. 14

46569 Hünxe

**Dr. Joachim Clemens**

[j.clemens@soepenberG.com](mailto:j.clemens@soepenberG.com)

**Schlammverbund Nienburg  
(Modellregion)**

**Kreisverband für Wasserwirtschaft  
Nienburg**

Am Wall 2

31582 Nienburg

**Axel Brause, KVWW**

[brause@kvwasser-nienburg.de](mailto:brause@kvwasser-nienburg.de)

**Mirco Matthey, Flecken Steyerberg**

[mirco.matthey@steyerberg.de](mailto:mirco.matthey@steyerberg.de)

## Impressum

### Herausgeber

Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft  
an der RWTH Aachen (FiW) e. V.  
An der Ölmühle 4 | 52074 Aachen  
Fon +49 241 80 2 68 25 | Fax +49 241 80 2 28 25  
transphor@fiw.rwth-aachen.de

### Redaktion

TransPhoR – Vernetzungs- und Transfervorhaben der  
BMFTR-Fördermaßnahme

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt  
bei den Autoren der einzelnen Beiträge. Die Broschüre ist nicht  
für den gewerblichen Vertrieb bestimmt.

### Fotonachweise (wenn nicht am Bild vermerkt)

Titel: Kläranlage © Ruhrverband, Blühende Landschaft  
© Christian Schwier/adobestock.com, Industriepark  
© 360degreeAerial/shutterstock.com;  
S. 4–5 © Michael Schwarzenberger/pixabay.com

### Layout

FiW e. V., Aachen | design@fiw.rwth-aachen.de

### Bezug über

Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft  
an der RWTH Aachen (FiW) e. V.  
Download: [www.bmbf-rephor.de](http://www.bmbf-rephor.de)

### BMFTR-Fördermaßnahme

#### „RePhoR – Regionales Phosphor-Recycling“

#### Ansprechpartner:in beim Projektträger

Projektträgerschaft Ressourcen, Kreislaufwirtschaft;  
Geoforschung (PTRKG), Projektträger Karlsruhe (PTKA),  
Wassertechnologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 | 76344 Eggenstein-  
Leopoldshafen

#### Dr.-Ing. Carsten Jobelius

carsten.jobelius@kit.edu

#### Dr.-Ing. Thu Nguyen

le.nguyen@kit.edu

#### Dr. Thomas Deppe

thomas.deppe@kit.edu

### Auflage

1. Auflage, Juni 2026



## INNOVATIONSATLAS WASSER

Hier finden Sie weitere innovative Produkte aus der BMFTR-geförderten Wasserforschung. Die Produkte umfassen neben Technologien und Verfahrenen auch Managementkonzepte, Software-Tools und Bildungsmaterialien zum nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser.

[www.innovationsatlas-wasser.de](http://www.innovationsatlas-wasser.de)





Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**FONA**  
Forschung für Nachhaltigkeit

[www.bmbf-rephor.de](http://www.bmbf-rephor.de)