Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt:	Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling aus Klärschlämmen im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen **DreiSATS**
Teilprojekt:	Teilprojekt 1
Zuwendungsempfänger:	Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH
Förderkennzeichen:	02WPR1544A
Laufzeit des Vorhabens:	01.07.2020 bis 31.12.2025
Berichtszeitraum:	01.07.2020 bis 31.12.2025
Autoren:	Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH Claudyn Kidszun, Oskar Stiehler
Projektpartner:	-Fraunhofer IKTS (IKTS) -Carbotechnik Energiesysteme GmbH (Carbotechnik) -Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus Universität Weimar (MFPA) -LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH (LTC) -Pontes Pabuli GmbH (Pontes Pabuli)

DreiSATS

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesmini-sterium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Markranstädt: 22. April 2026

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **4**
Tabellenverzeichnis **5**
Teil I Kurzfassung **7**
Aufgabenstellung und Wissenschaftlicher Stand 7
Wesentliche Ergebnisse im Überblick 7
Teil II Eingehende Darstellung **9**
Motivation, Aufgabenstellung und wissenschaftlicher Stand 9
AP 1.1 Charakterisierung Klärschlämme 10
AP 1.2 Charakterisierung Klärschlammaschen und alternative Inputstoffe 10
AP 2.1 Optimierung Monoklärschlammverbrennung mit Staubfeuerungstechnologie 11
Mahlversuche mit Walzenmühle: 11
Mahlversuche mit Labor-Planetenmühle: 12
Lagerstabilitätsuntersuchungen: 12
Materialcharakterisierung und -auswahl: 12
AP 2.4 Vorbereitung Dauerbetrieb Technikumsanlage Staubfeuerung 13
Organisation der externen Mahlung: 13
Logistik und Materialtransporte: 13
Projektkoordination: 14
AP 3.1 Standortspezifische Rezepturentwicklung 14
AP 3.4 Konzeption, Planung und Errichtung Prototyp Phosphorrecycling Pontes Pabuli 15
Nachrüstungen 17
Filterkuchenherstellung 19
Filterkuchenbehandlung 20
Granulation 21
Bewertung der Pflanzenverfügbarkeit- und Wachstum 22
Rechtliche Bewertung 24
Europäische Düngemittelproduktverordnung (EU DüMPV 2019): 24
REACH-Registrierungsstrategie: 25
Deutsche Düngemittelverordnung (DüMV): 25
AP 4.1 Entwicklung GIS-System zur Standortwahl und Düngervermarktung 26
Visualisierung und Analyse 27
AP 5.1 Begleitende Bilanzierung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen 28
AP 5.2 Ableitung eines Grundkonzeptes zur großtechnischen Umsetzung im Produktionsmaßstab 29
AP 5.3 Stakeholdermanagement sowie Stakeholderanalyse unter Berücksichtigung weiterer Standorte 29
AP 5.4 Vorbereitung Anschlussphase zur Umsetzung am Modellstandort 31
AP 6.1 Öffentlichkeitsarbeit 31
AP 6.2 Projektkoordination und Berichtswesen 32
Erzielte Ergebnisse 37
Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen 38

Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse 38
Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes 39
Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc. 39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Korngrößenverteilung des gemahlenen Klärschlammgranulats in der Walzenmühle 12
Abbildung 2: Versuchsanlage von außen 16
Abbildung 3: Nachgerüsteter Intensivmischer (l.) und entsprechendes Granulierergebnis 18
Abbildung 4 Fest-Flüssig Trennung an der Kammerfilterpresse (l.) und abgepresster Filterkuchen (r.) 20
Abbildung 5: Trocknung (l.), Schreddern (m.) und Mahlung (r.) des Filterkuchen in der Forschungsanlage 21
Abbildung 6: Granulat (Links: Überkorn, >5 mm; Mittel: Zielkorn, 2-5 mm; Rechts: Untenkorn, <2 mm) 22
Abbildung 7: Pflanzversuche im Gewächshaus 23
Abbildung 8: Pflanzversuche im Freiland in Markranstädt 24
Abbildung 9: Heatmap der Kläranlagen über 50.000 EW und Standorte der Klärschlamm - Monoverbrennungsanlagen sowie P-Recycling Anlagen in Deutschland 27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Übersicht der in DreiSATS durchgeführten Stakeholder Workshops 30
Tabelle 2 - Übersicht der Veröffentlichungen und Vorträge - DreiSATS - VKD 33

Teil I Kurzfassung

Aufgabenstellung und Wissenschaftlicher Stand

In Deutschland soll der in Klärschlämmen enthaltene Phosphor künftig verpflichtend zurückgewonnen werden. Zukunftsfähige Klärschlammentsorgungsstrategien müssen daher P-Recycling integrieren und zugleich Entsorgungssicherheit sowie Wirtschaftlichkeit gewährleisten. Erforderlich sind robuste, regional angepasste und flexible Prozessketten mit gesicherter Rohstoffversorgung und stabilem Produktabsatz. Der Projektkoordinator Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH und seine Partner verfolgten das Ziel, für die Modellregion Mitteldeutsches Dreiländereck eine innovative, technisch und wirtschaftlich tragfähige Prozesskette zur Klärschlammverwertung mit Phosphorrecycling praxisnah zu demonstrieren.

DreiSATS entwickelte dafür eine abgestimmte Prozesskette aus Trocknung, Staubfeuerung sowie Säureaufschluss und Granulierung im technischen Maßstab. Ein Schwerpunkt lag auf der integrierten Schwermetallabtrennung in der Verbrennung bzw. im nachgeschalteten Säureaufschluss. Bei der Verbrennung ist die Wirbelschichttechnologie derzeit Stand der Technik, diese ist jedoch erst ab großen Durchsatzmengen wirtschaftlich. Für kleinere, dezentrale Anlagen ist sie aufgrund hoher Investitions- und Betriebskosten ungeeignet. Die Staubfeuerung bietet hier Vorteile. Beim Phosphorrecycling gibt es Technologien, die beim Phosphor im Abwasser auf den Kläranlagen ansetzen und solche, die auf die Klärschlammasche abzielen. Im Vergleich zu Verfahren, die Phosphor auf der Kläranlage zurückgewinnen, erreichen Verfahren, die bei der Klärschlammasche ansetzen, deutlich höhere Rückgewinnungsquoten, da der Phosphor hier konzentrierter vorliegt. Dabei gibt es viele verschiedene Verfahrensansätze wie thermochemische, thermoelektrische und nasschemische Verfahren. Das Pontes Pabuli Verfahren ist ein nasschemisches Verfahren mit Säureaufschluss zur Herstellung marktfähiger Düngemittel. Dabei zeichnet sich das Pontes Pabuli-Verfahren durch einen niedrigen Energiebedarf und einem nahezu abfall-, abwasserfreien Gesamtprozess sowie einer optionalen Schwermetallabtrennung aus. Der nach der Fest-Flüssig-Trennung verbleibende Feststoff wird unter Zugabe weiterer Nährstoffe zu marktfähigen Granulaten aufbereitet. Ziel ist ein gebrauchsfertiger Dünger in vergleichbarer Qualität zu konventionellen Mineraldüngern. Das Verfahren wurde im Rahmen des Projekts von TRL 4 auf TRL 6 hochskaliert.

Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Zunächst wurden Klärschlämme und Aschen charakterisiert, die Staubfeuerungstechnologie optimiert und ein innovatives Phosphorrecyclingverfahren entwickelt und erprobt. Auf Basis der VKD-internen Datenbank wurde eine erweiterte Klärschlamm-Matrix mit Anlagen aus der Modellregion Mitteldeutsches Dreiländereck sowie weiteren Regionen erstellt, um die Übertragbarkeit sicherzustellen. Ein detaillierter Anforderungskatalog berücksichtigte Verbrennungseigenschaften, Schwermetall- und Phosphorgehalte. Parallel wurden regionale und überregionale Ascheerzeuger identifiziert, Potenziale analysiert und alternative phosphorhaltige Reststoffe hinsichtlich Verfügbarkeit, Preis, Phosphorgehalt und technischer Eignung bewertet. Die Optimierung der Mono-Klärschlammverbrennung mittels Staubfeuerung stellte insbesondere bei der Mahlung des Klärschlammgranulats eine zentrale Herausforderung dar. Für die Materialbewertung wurde eine Trockengutmatrix erstellt und technisch getrocknete Schlämme hinsichtlich verbrennungsrelevanter Eigenschaften untersucht. Umfangreiche Transporte zwischen den Standorten Sangerhausen und Magdeburg ermöglichten entsprechende Mahl- und Feuerungsversuche. Für das Säureaufschlussverfahren wurde am Standort Markranstädt eine Forschungsanlage im TRL-6-Maßstab aus vier 40-Fuß-Containern errichtet. Aufgrund eingeschränkter Marktverfügbarkeit wurden zentrale Komponenten im Ausland beschafft, was zu Verzögerungen führte. Trotz pandemiebedingter Herausforderungen wurde die Anlage im März 2022 in Betrieb genommen und anschließend technisch optimiert. Es folgten systematische Untersuchungen zur Ascheverwertung und Düngerherstellung mit zahlreichen Kreislauf- und Granulationsversuchen. Neben dem Pontes-Pabuli-Verfahren wurden die Varianten EcoPlus und Perfect Clean etabliert und um eine Schwermetallfällung ergänzt. Die Filterkuchenbehandlung wurde prozesstechnisch angepasst, indem die Trocknung vor die Zerkleinerung verlegt wurde. Die Bewertung der Düngerprodukte umfasste über drei Jahre Gewächshaus- und Freilandversuche mit verschiedenen Kulturen zur Untersuchung von Phosphorverfügbarkeit, Pflanzenverträglichkeit und Düngewirkung. Die Ergebnisse flossen in die Verfahrensoptimierung ein. Rechtlich wurden die Produkte im Hinblick auf CE-Zertifizierung, nationale Düngemittelverordnung und REACH bewertet und eine Registrierungsstrategie entwickelt. Die Produkte erreichten hohe Neutral-Ammoncitratlöslichkeiten, wiesen jedoch eine geringe Wasserlöslichkeit auf. Ergänzend wurde ein GIS-basiertes Tool zur ökologisch und wirtschaftlich optimierten Standortwahl und Düngervermarktung entwickelt. Technische Auslegungsparameter, Massen- und Energiebilanzen sowie Businesspläne bildeten die Grundlage für ein großtechnisches, modular aufgebautes Anlagenkonzept. Begleitend fanden Stakeholder-Workshops, Öffentlichkeitsarbeit und die Vorbereitung der Umsetzung am Modellstandort statt.

Teil II Eingehende Darstellung

Motivation, Aufgabenstellung und wissenschaftlicher Stand

In Deutschland soll der in Klärschlämmen vorhandene Phosphor zukünftig verpflichtend zurückgewonnen werden. Zukunftssichere, d.h. für die Aufgabenträger langfristig nutzbare Klärschlammentsorgungsstrategien müssen das geforderte P-Recycling beinhalten und gleichzeitig maximale Entsorgungssicherheit bei größtmöglicher Wirtschaftlichkeit gewährleisten. Dafür sind robuste, an den konkreten regionalen Bedingungen orientierte und flexible Prozessketten mit stabiler Rohstoffversorgung und gesichertem Produktabsatz erforderlich.

Im DreiSATS-Konzept bilden Trocknung, thermische Behandlung und Phosphorrecycling die zentralen Verfahrensschritte. Die Trocknung dient der Volumenreduktion des Klärschlamms zur Senkung der Transportkosten und zur Vorbereitung der Verbrennung. Eingesetzt werden übliche Systeme wie Band-, Trommel- oder Wirbelschichttrockner, idealerweise gekoppelt mit Energieanlagen zur Nutzung von Abwärme. Geplant ist die Kombination mit einer Staubfeuerung. Bei der Verbrennung ist die Wirbelschichttechnologie derzeit Stand der Technik, diese ist jedoch erst ab großen Durchsatzmengen wirtschaftlich. Für kleinere, dezentrale Anlagen ist sie aufgrund hoher Investitions- und Betriebskosten ungeeignet. Die Staubfeuerung bietet hier Vorteile: Sie ist auch im kleinen Leistungsbereich wirtschaftlich, flexibel regelbar und erzeugt deutlich feinere Aschen mit größerer Oberfläche. Dadurch werden die Schwermetallabtrennung und der anschließende Säureaufschluss erleichtert. Zudem enthält die Asche keinen zusätzlichen Sandanteil aus der Wirbelschicht, was die Nährstoffkonzentration erhöht und die Weiterverarbeitung verbessert. Beim Phosphorrecycling gibt es Technologien, die beim Phosphor im Abwasser auf den Kläranlagen ansetzen und solche, die auf die Klärschlammasche abzielen. Im Vergleich zu Verfahren, die Phosphor auf der Kläranlage zurückgewinnen, erreichen Verfahren, die bei der Klärschlammasche ansetzen, deutlich höhere Rückgewinnungsquoten, da der Phosphor hier konzentrierter vorliegt. Dabei gibt es viele verschiedene Verfahrensansätze wie thermochemische, thermoelektrische und nasschemische Extraktionsverfahren. Das Pontes Pabuli Verfahren ist ein nasschemisches Verfahren mit Säureaufschluss zur Herstellung marktfähiger Düngemittel. Dabei zeichnet sich das Pontes Pabuli-Verfahren durch einen niedrigen Energiebedarf und einer möglichen Schwermetallabtrennung aus.

Ziel des Projektkoordinators Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH und der Projektpartner war die praxisnahe-prototypische Erprobung und Demonstration einer innovativen, wirtschaftlich und technisch tragfähigen Prozesskette zur

Klärschlammverwertung mit Phosphorrecycling und Produktverwertung für die Modellregion Mitteldeutsches Dreiländereck. Bei den Entwicklungen liegt dabei ein Hauptaugenmerk auf der prozessintegrierten Schwermetallabtrennung in der Verbrennung beziehungsweise im nachgeschalteten Säureaufschluss. Im Pontes Pabuli-Verfahren werden phosphathaltige Aschen wie beispielsweise Klärschlammasche in hochwertige und standardisierte Düngergranulate umgewandelt. Dazu wird die Möglichkeit genutzt, Phosphate mit Säuren aufzuschließen, ähnlich wie es bereits in der Düngemittelindustrie mit Rohphosphat gemacht wird. Der Prozess kann dabei so gesteuert werden, dass relevante Schwermetalle angereichert werden können. Der aus der Fest-Flüssig-Trennung resultierende feuchte Feststoff wird zu Düngegranulaten weiterverarbeitet, wobei weitere Nährstoffkomponenten zugegeben werden, wodurch die Zusammensetzung der Dünger zielgenau eingestellt werden kann. Als Produkt soll ein gebrauchsfertiger Dünger resultieren, der in der Qualität den heute in der Landwirtschaft eingesetzten Mineraldüngern entspricht.

AP 1.1 Charakterisierung Klärschlämme

Auf Grundlage der VKD internen Datenbank wurde eine Klärschlamm-Matrix, als Erweiterung der im Rahmen der Konzeptphase entwickelten Datenbank, erstellt. Die Kläranlagen befanden sich überwiegend in der Modellregion. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit auf andere Regionen sowie zur Abdeckung benötigter Anforderungen der Schlämme wurden auch Kläranlagen außerhalb der Modellregion vorausgewählt.
Für die Auswahl geeigneter Klärschlämme zur Beprobung und weiteren Untersuchung wurde ein Anforderungskatalog erarbeitet. Hierzu wurden Untersuchungsparameter von Carbotechnik bezüglich der Verbrennungseigenschaften, vom IKTS in Hinblick auf die Schwermetallgehalte sowie die Anforderungen von VKD bezüglich des Phosphorgehaltes zusammengetragen.
Dabei wurden Klärschlämme aus der Klärschlamm-Matrix für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Die Kontaktaufnahme mit den Kläranlagenbetreiber sowie die Abstimmung der Probenahmen erfolgte durch die VKD.
Anhand der erstellten Klärschlamm-Matrix wurden Klärschlämme für die Umsetzungsphase ausgewählt. Hierzu wurde die Verfügbarkeit der erforderlichen Klärschlammmengen über die Projektlaufzeit sichergestellt.

AP 1.2 Charakterisierung Klärschlammaschen und alternative Inputstoffe

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden Ascheerzeuger sowohl regional als auch überregional identifiziert und eine Potenzialanalyse durchgeführt. Klärschlammascheproben aus der Wirbelschichtverbrennung wurden entnommen und

zur MFPA für die Aschemodifikation geliefert. Ziel war die Identifikation einer Modellasche. Für die Monoverbrennung konnte aus bestehenden Anlagen erfolgreich eine Modellasche ausgewählt werden. Für die Staubfeuerung wurden verschiedene Aschen analysiert, jedoch wurde aufgrund des noch nicht finalisierten Prozessaufbaus bei Carbotechnik noch keine finale Modellasche festgelegt. Zusätzlich wurden verschiedene phosphorhaltige Reststoffe als Inputmaterial für das Pontes Pabuli Verfahren hinsichtlich Verfügbarkeit, Preis, P-Gehalt und technischer Adaptierbarkeit für den Prozess bewertet. Diese Auswahl wurde dem IKTS für weitere Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

AP 2.1 Optimierung Monoklärschlammverbrennung mit Staubfeuerungstechnologie

VKD unterstützte die Optimierung der Staubfeuerungstechnologie im Rahmen des Forschungsprojektes mit Untersuchungen zur Mahlung im Labormaßstab, Lagerstabilitätsuntersuchungen und Materialcharakterisierung und -auswahl. Zudem wurden auch Klärschlammgranulate für großtechnische Mahlversuche zur Verfügung gestellt.
Es wurden umfangreiche Voruntersuchungen im Labormaßstab zur Mahlung und Klassierung von Klärschlammgranulat durchgeführt, um die Aufbereitung des Materials für den Einsatz in der Staubfeuerung zu untersuchen. Das zentrale Ziel war die Einstellung des Zielparameters von 50% der Partikel kleiner als 90 µm.

<u>Mahlversuche mit Walzenmühle:</u>
Nach Evaluierung geeigneter Aufbereitungsaggregate wurde zunächst eine Walzenmühle im industriellen Maßstab ausgewählt. Mit einer 10 kg Probe Klärschlammgranulat wurden drei aufeinanderfolgende Versuche durchgeführt: Versuch 1 erfolgte bei 75% Geschwindigkeit, Versuch 2 mahlte das bereits gemahlene Material von Versuch 1 erneut bei 75% Geschwindigkeit, und Versuch 3 verarbeitete das Material von Versuch 2 bei 100% Geschwindigkeit. Trotz mehrfacher Mahlung zeigten sich keine optischen Veränderungen des Granulats. Die Analyse der Partikelgrößen von Versuch 2 und 3 ergab, dass keine signifikante Verschiebung des Kornbandes in den Zielbereich von 90% kleiner als 90 µm erreicht wurde. Auch bei weiteren Untersuchungen, bei denen eine 10 kg Probe dreimal gemahlen wurde, blieb der Korndurchmesser zu groß für den Einsatz in der Staubfeuerung. Während des Mahlvorgangs wurde zusätzlich der entstehende Staub aus der Luft gefiltert und nach Partikelgröße klassiert, um ihn mit der Partikelgröße des Granulats zu vergleichen.

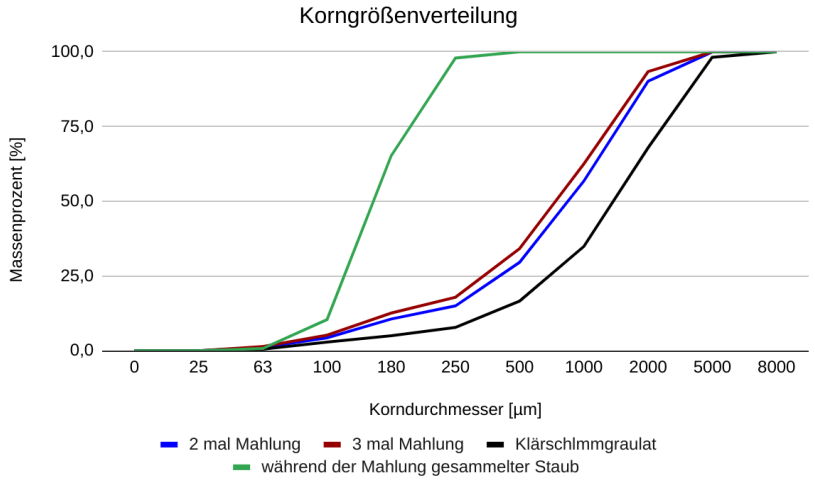


Abbildung 1: Korngrößenverteilung des gemahlenen Klärschlammgranulats in der Walzenmühle

Mahlversuche mit Labor-Planetenmühle:

Parallel wurden bei VKD Mahluntersuchungen mit einer Labor-Planetenmühle durchgeführt. Es wurden drei Mahlversuche mit Variation der Mahlzeit von 4, 8 und 12 Minuten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass mit der Labor-Planetenmühle feinere Mahlgrade als mit der Walzenmühle erzielt werden konnten. Allerdings ergab die Siebung nach 12-minütiger Mahlung, dass der Korndurchmesser immer noch zu groß für den Einsatz in der Staubfeuerung war. Eine Verlängerung der Mahlzeit zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Korngrößenverteilung, weshalb aufgrund des Energieaufwandes geringere Mahlzeiten zu bevorzugen sind.

Lagerstabilitätsuntersuchungen:

Die Lagerstabilität des gemahlenen Klärschlammgranulats wurde über ein Jahr systematisch untersucht. Die Granulate wurden in drei Behältern unter verschiedenen Bedingungen gelagert und quartalsweise untersucht: abgedeckt, halb-offen und vollständig offen. Die Untersuchungen zeigten, dass sich die physikalischen Eigenschaften des Klärschlammgranulats nach einem Jahr Lagerung nicht verändert hatten. Es gab keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Lagerungsarten. Es waren keine oxidativen Prozesse erkennbar und es kam zu keiner Klumpenbildung, die einer weiteren Verarbeitung in der Staubfeuerung entgegenstehen würde. Das gemahlene Klärschlammgranulat erwies sich somit als für eine Langzeitlagerung geeignet.

Materialcharakterisierung und -auswahl:

VKD übernahm die Verantwortung für Organisation, Bereitstellung und Lieferung der getrockneten Klärschlämme. Neben der Klärschlammmatrix wurde eine Trockengutmatrix für die Auswahl des zu verbrennenden Klärschlammes erstellt. In

dieser Matrix wurden die in den DreiSATS-Regionen technisch getrockneten Klärschlämme aufgelistet und die für die Verbrennung relevanten Eigenschaften ausgewertet. Die Charakterisierung umfasste Parameter wie Glühverlust , Aschegehalt, Heizwert, Gesamtstickstoff, Eisengehalt sowie Schwermetalle. Bei einigen Proben wurden Grenzwertüberschreitungen für Cadmium und Kupfer festgestellt. Die Verfügbarkeit des Trockenguts in verschiedenen Maßstäben wurde ebenfalls geprüft.
Die von VKD erstellte Klärschlammmatrix wurde von IKTS und CT vervollständigt, und die finale Auswahl für den Dauerbetrieb der Technikumsanlage Staubfeuerung wurde getroffen. Hierbei wurden Klärschlämme für den Dauerbetrieb bestimmt.

AP 2.4 Vorbereitung Dauerbetrieb Technikumsanlage Staubfeuerung

Die VKD unterstützte auch die Vorbereitungen zum Dauerbetrieb der Technikumsanlage Staubfeuerung bei der Organisation der externen Mahlung, der Logisitik und Materialtransporte und der Projektkoordination.

Organisation der externen Mahlung:
Da die Partikelgröße < 90 µm bei 50% der zu verbrennenden Partikel ein kritischer Parameter für die Staubfeuerung ist, musste eine geeignete Mahllösung gefunden werden. VKD kontaktierte zahlreiche Dienstleister und holte fünf Angebote für die Mahlung ein. Als Alternative wurde eine Aufwandsabschätzung für die eigene Mahlung zwischen allen betroffenen Projektpartnern erstellt. Gleichzeitig wurden weitere externe Dienstleister ermittelt, die mit der Mahlung beauftragt wurden. Dabei unterstützt die VKD das Fraunhofer IKTS, das intensiv mit der Durchführung der großtechnischen Mahlversuche beauftragt war.

Logistik und Materialtransporte:
VKD organisierte umfangreiche Transporte der getrockneten Klärschlämme. Im Jahr 2021 wurden bereits einige Tonnen getrocknete Klärschlämme für die Verbrennungsversuche zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wurden mehrere BigBags Klärschlammpellets für die Probemahlung organisiert und bei VKD zwischengelagert. Im März wurden weitere BigBags sortenreines Granulat nach Magdeburg geliefert, wovon auch IKTS eine Probe für Laboruntersuchungen erhielt. Aufgrund des Umbaus der Staubfeuerungsanlage wurde zunächst kein weiteres Granulat organisiert.
Da die Lagerkapazität in Magdeburg beschränkt war, wurden Teile des Klärschlamms bei VKD zwischengelagert. Für die Zwischenlagerung stellte LTC drei Lagercontainer zur Verfügung. Im Februar 2024 organisierte VKD den Transport von getrockneten Klärschlammgranulaten, die zunächst in Lagercontainern zwischengelagert und dann in BigBags umgefüllt wurden. Anschließend wurde der Transport zur Mahlung organisiert. Zusätzlich zu den selbst organisierten Granulaten wurde auch die Logistik für weitere

Klärschlammgranulate übernommen. Die gemahlenen Klärschlammgranulate wurden daraufhin durch VKD nach Magdeburg, teilweise mit vorheriger erneuter Zwischenlagerung, für Versuche in der Staubfeuerung transportiert. Im Dezember wurde getrockneter Klärschlamm erneut gemahlen und für Versuche in der Staubfeuerung in Magdeburg verwendet, dessen Transport von VKD organisiert wurde.

Projektkoordination:
Zur gemeinsamen Fortführung der Thematik Staubfeuerung wurde ein zweiwöchentlicher JourFix zwischen IKTS, CT, LTC und VKD etabliert, der über den gesamten Projektzeitraum fortgeführt wurde. In diesen regelmäßigen Abstimmungen wurden die Fortschritte dokumentiert und die nächsten Schritte gemeinsam geplant. IKTS wurde von VKD bei der weiteren Bearbeitung der Thematik Mahlung unterstützt, um die optimalen Verfahrensparameter für die Aufbereitung des Klärschlammgranulats zu ermitteln.

AP 3.1 Standortspezifische Rezepturentwicklung

Im AP 3.1 wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zu den Nährstoffverhältnissen und Mangelzuständen von Böden in der Region (Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen) und überregional (deutschlandweit) durchgeführt. Dabei wurde erkannt, dass Nährstoffmängel regional stark unterschiedlich ausgeprägt sind, da sie mit der Geochemie der Landschaften korrelieren. Allerdings war Phosphor das häufigste Mangelelement unter den betrachteten Hauptnährelementen in Deutschland.
Neben der Literaturrecherche zu den geologischen Nährstoffverfügbarkeiten wurde eine Marktrecherche zu gängigen Düngeprodukten in der Region durchgeführt. Die Erkenntnisse aus der Literatur- und Marktrecherche wurden in der regionalen Rezepturentwicklung berücksichtigt.
Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden außerdem umfassende Arbeiten zur Anforderungsermittlung und Rezepturentwicklung für Düngerprodukte aus Klärschlammaschen durchgeführt.
Die Anforderungen an die Düngerprodukte wurden systematisch ermittelt und in vier folgende Kategorien unterteilt: Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Qualität und Dünge-Effizienz, physikalische Anforderungen und Anforderungen zur Integration in den Produktionsprozess.

AP 3.4 Konzeption, Planung und Errichtung Prototyp Phosphorrecycling Pontes Pabuli

Im Rahmen der Planung und Konzeption der Versuchsanlage wurden zunächst umfassende Evaluierungen durchgeführt, um geeignete Technologien für alle Anlagenteile unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen auszuwählen. Für die Fördertechnik wurden verschiedene Optionen wie offene Förderbänder, Förderschnecken und pneumatische Förderungen bewertet, wobei die Auswahl für jeden Übergang basierend auf den Förderanforderungen, Materialeigenschaften und der räumlichen Lage erfolgte. Ebenso wurden geeignete Systeme für die Trockner- und Mahltechnik evaluiert und ausgewählt.
Die Auslegung der Anlagenkapazitäten erfolgte auf Grundlage der möglichen Dünger-Rezepturen und der verfügbaren Klärschlammaschenmenge. Dabei wurden Materialflussberechnungen durchgeführt, die Marktverfügbarkeit der Komponenten geprüft und die gewünschte Betriebsart berücksichtigt. Für jede Position wurde mit Unterstützung von Pontes Pabuli eine spezifische Anfrage erstellt, wobei mindestens fünf Lieferanten pro Anlagenkomponente angefragt wurden. Die Bewertung der eingegangenen Angebote erfolgte anhand der Kriterien Größe, Leistung, Material, Preis und Zertifizierung, woraufhin konkretisierte Angebote für die Bestellungen vorbereitet wurden.
Unter Einbeziehung der Voruntersuchungen von MFPA wurde das Prozessfließbild während der Planungsphase kontinuierlich weiterentwickelt und optimiert. Die Versuchsanlage wurde konzipiert, um in vier zusammengesetzten 40-Fuß-Containern installiert zu werden, wobei zwei Container an den langen Seiten nebeneinander stehen und zwei weitere Container in gleicher Ausrichtung exakt auf den beiden unteren positioniert sind. Dies ergibt eine Gesamtaußenlänge von zwölf Metern, eine Breite von 4,9 Metern und eine Höhe von 5,6 Metern.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens stellte sich nach Überprüfung des eingereichten Antrags durch das Landratsamt Leipzig heraus, dass für die Errichtung der Versuchsanlage kein vereinfachtes Baugenehmigungsverfahren erforderlich war, sondern ein Genehmigungsfreistellungsverfahren notwendig wurde.
Für die detaillierte Planung wurde eine softwarebasierte Aufstellung der Versuchsanlage mit einem 3D-Modell erstellt, dass das Layout und die Anordnung der Anlagenkomponenten mit Realmaßen zeigt. Hierfür wurde im Rahmen des Projekts eine AutoCAD Lizenz erworben. Dies ermöglichte eine effiziente Nutzung des begrenzten Raums in den Containern. Das 3D-Modell wurde im Zuge des Bestellprozesses schrittweise aktualisiert und verfeinert.
Bei der Beschaffung der Anlagenkomponenten stellte sich heraus, dass aufgrund der spezifischen Dimensionen der Versuchsanlage die Verfügbarkeit auf dem deutschen

Markt gering und die Kosten entsprechend hoch waren. Daher wurden die Hauptkomponenten auf dem chinesischen Markt beschafft. Der Organisations-, Bestellungs- und Lieferprozess wurde ausführlich dokumentiert. Aufgrund des hohen Aufwands bei der Kommunikation, Schwierigkeiten bei der Organisation der internationalen Lieferung sowie des komplizierten Einfuhrverfahrens am Hamburger Hafen kam es zu mehrmonatigen Verzögerungen bei der Zustellung. Die letzten Anlagenteile wurden schließlich im November 2021 am Standort Markranstädt zugestellt.
Zur Vorbereitung der Stromversorgung wurden nach dem Bestellprozess die elektrischen Informationen aller Anlagen zusammengefasst. Da zwei Positionen in der Versuchsanlage automatisch gesteuert werden sollten, wurde die Planung der Teil-Automatisierung erstellt.

Trotz der Corona-Pandemie und den dadurch verursachten Schwierigkeiten sowie der Verzögerung bei der Anlagenlieferung wurde die Pontes Pabuli Forschungsanlage am Standort Markranstädt fristgerecht errichtet und am 28. März 2022 in Betrieb genommen. Das Containerhaus, in dem die Versuchsanlage installiert wurde, war bereits im Jahr 2021 aufgebaut worden. Die Errichtung der Versuchsanlage wurde von der eigenen VKD Werkstatt übernommen.



Abbildung 2: Versuchsanlage von außen

Unter Berücksichtigung der Arbeitssicherheit wurden im Jahr 2022 einige Umbaumaßnahmen am Containerhaus vorgenommen. Es wurde ein Schutzgeländer mit Handlauf an der Außentreppe angebracht und jedes Rolltor mit einem zusätzlichen Geländer ausgestattet. Außerdem wurde ein zusätzlicher Notausgang im Erdgeschoss installiert.
Im Erdgeschoss wurden folgende Anlagenkomponenten installiert: die Asche-Entleerstation, eine Zellenradschleuse, ein Suspensionsbehälter, ein Trommeltrockner, eine Förderschnecke, ein Mischer, zwei Vakuumförderer, eine Kugelmühle ein Mikrowellen-Bandtrockner und ein Sieb.

Im Obergeschoss wurden zwei Membranfilterpressen installiert, wobei die größere für die Fest-Flüssigtrennung der Suspension aus Asche und Säure und die kleinere für die Schwermetallabscheidung vorgesehen ist. Weiterhin befinden sich dort ein Prozesswasserbehälter, ein Reaktionsbehälter, ein Lagerbehälter sowie drei Nährstoff-Dosierstationen, die jeweils mit einer Zellenradschleuse ausgestattet sind. Zusätzlich wurde ein Vakuumförderer zum Transport von Material aus dem Erdgeschoss zum Obergeschoss installiert. Für die Entlüftung wurde auf jeder Etage ein Ventilator installiert. Die Entlüftungsstellen wurden unter Berücksichtigung der Prozessschritte und der anlagenspezifischen Gegebenheiten festgelegt.
Einige Geräte in der Versuchsanlage sind pneumatisch zu betreiben und müssen für den Betrieb mit Druckluft angeschlossen sein. Außerdem benötigen einige elektrisch angeschlossene Anlagenkomponenten eine zusätzliche Druckluftzufuhr, um die pneumatisch zu betreibenden Bauteile zu nutzen. Um den Druckluftbedarf zu decken, wurde eine zentrale Druckluftversorgung gebaut. Um die Versuchsanlage mit Strom zu versorgen, wurde ein Stromgenerator installiert. VKD hat für die Planung der Stromversorgung die elektrischen Daten aller Ausrüstungen zusammengestellt und die Anschlusspläne der Steuerkästen der einzelnen Anlagenkomponenten zur Verfügung gestellt.

Nachrüstungen

Nach der Inbetriebnahme im März 2022 wurde bauliches und technisches Optimierungspotenzial festgestellt, weshalb nachträgliche Anpassungen und Umbaumaßnahmen durchgeführt wurden.
Um die Materialförderung zwischen Filterpresse, Schredder, Mischer und Nährstoff-Dosierstationen zu optimieren, wurden die Schnittstellen zwischen den Anlagenteilen umgebaut.
Während der Errichtung der Versuchsanlage blieb VKD mit den Sicherheitsingenieuren von Veolia im regelmäßigen Austausch. Bevor die Versuchsanlage in Betrieb ging, wurde durch die Sicherheitsexperten eine Gefährdungsbeurteilung der Versuchsanlage erstellt. Es wurden Unterweisungen für den Umgang mit Säuren sowie zur Arbeitssicherheit durchgeführt und die für den Betrieb der Versuchsanlage benötigten persönlichen Schutzausrüstungen wurden beschafft. Auch nach der Inbetriebnahme blieb VKD weiterhin im engen Kontakt mit den Sicherheitsingenieuren von Veolia. Es wurde eine Betriebsanweisung für den Betrieb der Versuchsanlage erstellt, die während der Projektlaufzeit kontinuierlich weiter verfeinert wurde.

Die Anlage wurde im Projektverlauf weiter kontinuierlich den Anforderungen des Versuchsbetriebs angepasst. So wurde z.B. die Filterpressenpumpe gegen eine größere ausgetauscht. Desweiteren wurde die Entlüftungsanlage im November 2024 umfassend umgebaut, um den Suspensionsbehälter sowie die Raumluft effektiver absaugen zu

können. Dafür wurden die Durchmesser der Rohrleitungen sowie die Absaugstellen angepasst. Zur Erweiterung der Granulationsmöglichkeiten wurde 2023 außerdem ein Intensivmischer eingebaut.



Abbildung 3: Nachgerüsteter Intensivmischer (l.) und entsprechendes Granulierergebnis

Arbeitspaket 3.5 - Systematische Untersuchungen zur Ascheverwertung und Düngerherstellung

Das Arbeitspaket 3.5 hatte zum Ziel, die Verwertung von Klärschlammasche durch Säureaufschluss und die anschließende Herstellung von Düngerprodukten im Pilotmaßstab zu untersuchen und zu optimieren. Die Arbeiten waren notwendig, um die im Labor entwickelten Verfahrensvarianten (Flex, Perfect Clean, EcoPlus) auf eine technische Größenordnung TRL 6 zu übertragen und deren Dauerbetriebsfähigkeit nachzuweisen. Die PP-Versuchsanlage wurde seit März 2022 schrittweise in Betrieb genommen und kontinuierlich weiterentwickelt.

Die PP-Versuchsanlage durchlief nach der Inbetriebnahme im März 2022 zunächst eine mehrmonatige Testphase (Q2-Q3 2022), in der die Funktionalität aller Anlagenkomponenten systematisch geprüft wurde. Diese Phase war notwendig, um Betriebsbedingungen zu ermitteln und Anlagenkomponenten unter realen Bedingungen zu testen, bevor wertvolle Klärschlammaschen und Säuren eingesetzt wurden. Hierfür wurden zunächst Ersatzmaterialien wie Sand, Salz und Filterkuchen aus dem Technikum verwendet. Ab Q4 2022 erfolgte der Übergang zum Regelbetrieb mit dem Einsatz von Schwefelsäure für den Ascheaufschluss.

Die Forschungsanlage wurde dann im Regelbetrieb vier bis fünf Tage pro Woche betrieben, wobei ein Tag pro Woche für Reinigungs- und Wartungsaufgaben vorgesehen

wurde. Aufgrund unterschiedlicher Verarbeitungskapazitäten der Anlagenkomponenten wurde die Untersuchungsdurchführung in drei Hauptarbeitsteile gegliedert: Filterkuchenherstellung, Filterkuchenbehandlung (Trocknung/Mahlung) und Granulation. Im Folgenden werden die Untersuchungen in den Hauptarbeitsteilen detaillierter vorgestellt.

Filterkuchenherstellung

Die Filterkuchenherstellung bestand aus dem Säureaufschluss, der Schwermetallentfrachtung, der Fest-Flüssig Trennung mittels Kammerfilterpresse und der Filtratrückführung in den nächsten Batch Ansatz des Säureaufschlusses. Dabei wurden zahlreiche Kreisläufe durchgeführt, die jeweils aus mehreren Zyklen bestanden, wobei die Bandbreite von einzelnen bis zu mehreren Dutzend Zyklen reichte. Dabei wurden viele verschieden Aschen aus unterschiedlichen Verbrennungsverfahren und mit variablen Qualitäten getestet. Dabei sollte sichergestellt werden, dass das Verfahren robust ist und mit verschiedenen Aschen und Schwermetallgehalten stabil funktioniert. Beim Säureaufschluss wurden 2 mineralische Säuren mit unterschiedlichen Konzentration eingesetzt.
Im Laufe der systematischen Untersuchungen wurde das Standard Pontes Pabuli Verfahren weiterentwickelt und um zwei weitere Hauptverfahrensvarianten erweitert. Daher wurden neben dem Flex Verfahren auch das EcoPlus und das Perfect Clean Verfahren an der Forschungsanlage getestet.
Für das Flex und das Perfect Clean Verfahren wurde dabei auch die Schwermetallfällung getestet. Bei der Schwermetallfällung wurden außerdem zwei verschiedene sulfidische Fällungsmittel getestet und deren Effektivität gegenübergestellt.

Die Fest-Flüssig Trennung erfolgte mit einer Membran-Kammerfilterpresse. Durch das Einsetzen zusätzlichen Membrandrucks an die Filtertücher konnten die angestrebten Trockensubstanzgehalte erreicht werden. Wesentliche Herausforderungen waren das Einstellen der richtigen Anzahl an Filterplatten, die Reinigung und Wartung der Filtertücher und Anlagenteile sowie die Filtration der Schwermetallfilterkuchen.

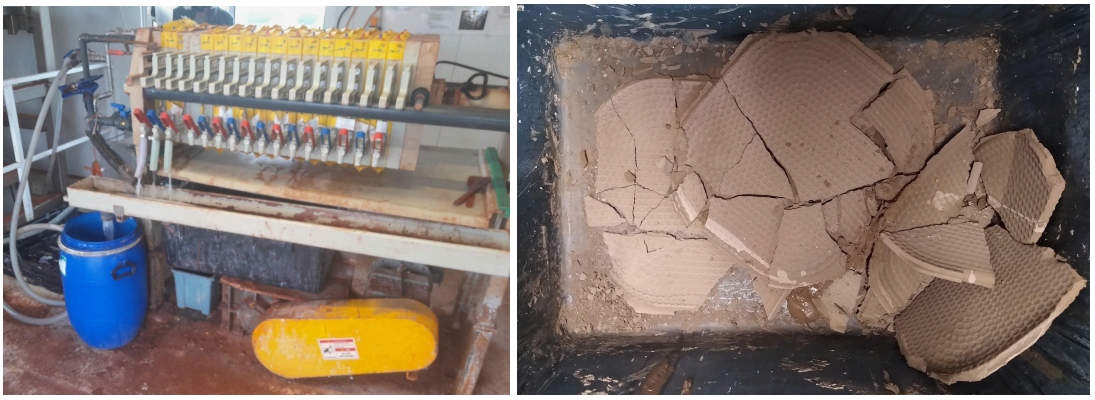


Abbildung 4 Fest-Flüssig Trennung an der Kammerfilterpresse (l.) und abgepresster Filterkuchen (r.)

Die Laborrezepturen zur Filterkuchenherstellung konnten erfolgreich hochskaliert werden und ein stabiler Kreislauf des Pontes Pabuli Verfahrens in verschiedenen Verfahrensvarianten nachgewiesen werden. Die Wirksamkeit der Schwermetallentfernung konnte gezeigt und die Schwankungsbreiten des P-Gehalts sowie der anderen Bestandteile des Filterkuchens definiert werden.

Filterkuchenbehandlung

Die Filterkuchenbehandlung stellte einen zentralen Untersuchungsgegenstand dar. Durch eine Prozessumstellung konnte der Filterkuchen erfolgreich getrocknet und gemahlen werden.
Auf Basis von Vorversuchen wurde die Dosierung der Nährstoffe gezielt in einen separaten Verfahrensschritt verlagert, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Die Mahlung mittels Kugelmühle erfolgte mit keramischen Kugeln verschiedener Durchmesser. Systematische Untersuchungen zeigten, dass Schwefelsäure-Filterkuchen im getrockneten Zustand sehr effektiv gemahlen werden können. Die Korngrößenverteilung wurde kontinuierlich analysiert.
Anhaftungen an den Innenwänden konnten durch Nachreinigung erfolgreich entfernt werden. Für die Materialzufuhr wurde ein Vakuumförderer in Betrieb genommen, der die automatisierte Beschickung ermöglichte.



Abbildung 5: Trocknung (l.), Schreddern (m.) und Mahlung (r.) des Filterkuchen in der Forschungsanlage

Die Erweiterung der Versuchsanlage im Jahr 2024 ermöglichte die Feinmahlung mittels Intensivmischer. Dank der schneidenden Rotorbewegung eignet sich der Intensivmischer besonders gut für die Verarbeitung von Material mit niedrigen TS-Gehalten. Zur Analyse der Korngrößenverteilung wurde die Anlage zusätzlich mit einem Siebturm ausgestattet.

Granulation

An der Forschungsanlage wurden systematische Granulationsversuche sowohl am Granulierteller als auch am Intensivmischer durchgeführt. Zunächst erfolgte die Erprobung an einem kleineren, modellgleichen Granulierteller, bevor der Granulierteller in der Technikumsanlage eingesetzt wurde.
Vollfaktorielle Versuchspläne zeigten, dass die Wasserdosierung, neben Drehzahl und Neigungswinkel, den größten Einfluss auf die relevanten Prozessparameter hatte. Dabei konnten geeignete Nährstoffe für die Granulierung identifiziert und eine entsprechende Auswahl getroffen werden. Für den Versuchsbetrieb erwies sich der Intensivmischer als besonders praktikabel, da der kontinuierlich ausgelegte Granulierteller größere Mengen an gemahlenem Filterkuchen erforderte.
Mit der Siebmaschine der Forschungsanlage konnten die erzeugten Granulate auf die Zielgröße von 2 - 5 mm gesiebt werden.



Abbildung 6: Granulat (Links: Überkorn, >5 mm; Mittel: Zielkorn, 2-5 mm; Rechts: Untenkorn, <2 mm)

Für die Ausbringung der Granulate in der Landwirtschaft waren außerdem auch die Kornhärte und der Zerfall der Granulate wichtige Parameter, die untersucht wurden. Die Kornhärteanalyse wurde mit einem Kraftmessgerät durchgeführt, wobei alle Granulate im endgetrockneten Zustand vergleichbare Kornhärten herkömmlicher Granulate und Standards erreichten. Zudem wurde der Zerfall der Granulate im Wasser getestet und dokumentiert.

AP 3.6 Bewertung und Testung der Düngerprodukte

Bewertung der Pflanzenverfügbarkeit- und Wachstum

Über drei Jahre wurden umfangreiche Pflanzenversuche durchgeführt, um die Phosphorverfügbarkeit, Pflanzenverträglichkeit und Düngewirkung von Produkten aus dem Pontes Pabuli-Verfahren zu untersuchen. 2022 wurden erste Orientierungsversuche durch IKTS und VKD durchgeführt. Es wurden verschiedene Konzentrationen in Einheitserde getestet, wobei eine Keimungsrate von über 90 % bei allen Konzentrationen festgestellt wurde und sich keine Chlorosen oder Nekrosen bildeten, sodass der Filterkuchen als pflanzenverträglich eingestuft werden konnte.
2023 fanden systematische Gewächshausversuche bei der VKD in Markranstädt statt. Dabei wurden Proben aus der Forschungsanlage sowie Klärschlamm- und Tiermehlasche und weitere Laborproben 10 Wochen lang an Weidelgras getestet. Es kam eine Nullerde und eine P-freie Nährlösung zum Einsatz. Die Proben aus der Pontes Pabuli Anlage zeigten dabei eine hohe P-Verfügbarkeit im Vergleich zur TSP Kontrolle.
2024 wurden die Versuchsreihen erweitert und systematische Topfversuche mit verschiedenen Kulturen im Gewächshaus durchgeführt. Es kamen Sommerraps, Luzerne, Weidelgras und Zuckermais zum Einsatz. Dabei wurde Einheitserde, eine Erde der Firma HGoTech und landwirtschaftliche Erde von einem Feld eingesetzt.



Abbildung 7: Pflanzversuche im Gewächshaus

Die Ergebnisse wurden in die Entwicklung der Verfahren und den Aufbau des ersten Freilandversuchs im Juli 2024 einbezogen. Von Juli bis September wurde dabei Kohlrabi und Fenchel mit einer Nullerde getestet. Dabei zeigte sich beim Kohlrabi ein vergleichbares Wachstum bei allen Düngern. Im Jahr 2025 wurden weitere Freilandversuche mit Mais und Sommerraps und einer Nullerde durchgeführt, wobei vor allem die Form der Ausbringung der Düngergranulate im Fokus stand. Es fand sowohl eine Unterfußdüngung, als auch eine oberflächige Aufbringung von festen und aufgemahlenen Granulaten statt. Dabei wurde auch die Menge der Aufbringung, orientierend am P-Bedarf der Pflanzen, stufenweise untersucht. Eingesetzt wurden Flex und Clean Produkte aus der Forschungsanlage sowie herkömmlicher TSP zur Kontrolle.
Es zeigt sich eine gute Düngewirkung und Pflanzenverträglichkeit der Produkte.



Abbildung 8: Pflanzversuche im Freiland in Markranstädt

Rechtliche Bewertung

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die Düngerprodukte umfassend unter rechtlichen Aspekten zur Zulassung bewertet. Die Markteinführung kann in Deutschland über zwei verschiedene Wege erfolgen: über den Zulassungsprozess der CE-Zertifizierung der Europäischen Düngemittelproduktverordnung (EU DüMPV 2019) oder über die Deklaration der Produkte nach der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV). Die Düngerprodukte wurden daher aus der Perspektive beider möglichen Varianten bewertet.

Europäische Düngemittelproduktverordnung (EU DüMPV 2019):

Ab dem Inkrafttreten der neuen EU-Verordnung über Düngemittel im Jahr 2022 erhält jedes Material, das die CE-Kennzeichnung (als EU-Düngemittelprodukt) erreicht, automatisch den Status "Abfallende". Um diesen Status zu erreichen, muss das Material nicht nur die Kriterien des Eingangsmaterials (Component Material Category - CMC) und der Produkteigenschaften (Product Function Category - PFC) erfüllen, sondern auch entsprechend gekennzeichnet sein und eine Konformitätsbewertung durchlaufen haben.

Da die Düngemittel aus Asche gewonnen werden, fallen sie unter die Düngemittelverordnung gemäß dem neuen STRUBIAS CMC13 (Thermische Oxidationsmaterialien und -derivate), die zum Zeitpunkt der Berichterstattung den endgültigen Adoptionsverfahren unterzogen wurden. Vom 24. bis 25. November 2020 wurden die endgültigen STRUBIAS-Kriterien von der EU-Expertengruppe für Düngemittel genehmigt. Das Material muss die STRUBIAS-Kriterien und die Kriterien für ein Düngemittelprodukt (eines der PFC von Anhang I der Düngemittelverordnung 2019/1009) einhalten, eine entsprechende Kennzeichnung (Anhang III) aufweisen sowie einer Konformitätsbewertung (Anhang IV) unterzogen werden.

Die EU DüMPV 2019 setzt für Komponentenmaterialien der CMC 13, unter die auch Klärschlammaschen fallen, voraus, dass die Materialien, die aus thermischer Oxidation gewonnen wurden oder deren Folgeprodukte, gemäß der REACH-Verordnung in einem Dossier registriert sein müssen.

REACH-Registrierungsstrategie:

In Zusammenarbeit mit einer externen Beratungsfirma erfolgte die Entwicklung einer Registrierungsstrategie nach REACH für die möglichen Düngerprodukte. Das Ziel war eine Registrierung zu erreichen, die alle Verfahrensvarianten und deren Qualitätsschwankungen vereinigt. Dafür wurde das Herstellungsverfahren definiert.
Hierfür wurden die erforderlichen Dokumente zur Definition der Produkte zusammengestellt. Es wurde eine umfassende Auswertung verschiedener Düngerprodukte sowie deren unteren und oberen Qualitätsgrenzen durchgeführt. Außerdem wurde eine Phasenanalyse zur Charakterisierung der Düngerprodukte eingeleitet.
Die Qualität der Düngerprodukte aus dem Versuchsbetrieb der Forschungsanlage wurde fortlaufend mit den Anforderungen der EU DüMPV abgeglichen. Die Verordnung schreibt mindest P-Löslichkeiten von 40% Wasserlöslichkeit, 75% Neutral-Ammoncitratlöslichkeit oder 55% Ameisensäurelöslichkeit vor. Maßgeblich für die Pflanzenverfügbarkeit war die Neutral-Ammoncitratlöslichkeit, die in allen Produktvarianten über 75% lag. Nach einer Schwermetallabreicherung können die geforderten Grenzwerte von den entstandenen Produkten eingehalten werden. Allerdings erlaubt die EU-Verordnung keine gefährlichen Abfälle als Komponentenmaterialien für neue Düngemittel. Viele Klärschlammaschen werden jedoch aufgrund hoher Schwermetallkonzentrationen als gefährliche Abfälle eingestuft. Da das Komponentenmaterial für das angestrebte Düngerprodukt nach CMC 13 die Klärschlammasche darstellt, stellt dies noch ein mögliches Hindernis bei der Zulassung der Produkte über die EU DüMPV dar.

Deutsche Düngemittelverordnung (DüMV):

Die Düngerprodukte wurden auch nach der DüMV bewertet. Da Düngemittel nach der deutschen Düngemittelverordnung kein Registrierungs- oder Zulassungsverfahren durchlaufen, sondern lediglich deklariert und dann kontrolliert werden, wurde zur umfassenderen Bewertung der Düngerprodukte eine probeweise Düngemittelverkehrskontrolle durchgeführt. Hierbei wurden die bekannten Probleme der P-Löslichkeitsvorgaben in der DüMV bemängelt. Die DüMV fordert, dass mindestens drei Parameter gleichzeitig eingehalten werden müssen: Mindestens 2,5%

Wasserlöslichkeit, 5% Neutral-Ammoncitratlöslichkeit und 2% ausschließliche Mineralsäurelöslichkeit.
Die Anforderung, alle drei Parameter gleichzeitig einhalten zu müssen, ist für P-Rezyklate generell eine Herausforderung
Auch dass nach der DüMV schon die Ausgangsstoffe die Grenzwerte der Produkte einhalten müssen, steht der Verwendung einer Vielzahl von potenziellen Klärschlammaschen entgegen.

Die identifizierten gesetzlichen Hürden wurden fortlaufend mit allen Akteuren und auch in Formaten wie der RePhoR Maßnahme, der Deutschen Phosphor Plattform, der European Sustainable Phosphorus Platform oder auch diversen Konferenzen diskutiert und hier mögliche Lösungen erarbeitet.

AP 4.1 Entwicklung GIS-System zur Standortwahl und Düngervermarktung

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein GIS-basiertes Softwaretool zur Unterstützung einer ökologisch und wirtschaftlich sinnvollen, wissensbasierten Standortauswahl für Teile der DreiSATS-Prozesskette entwickelt und programmiert. Es wurde ein freies GIS System ausgewählt, welches gängige Vektordaten, Rasterdaten und räumliche Datenbanken unterstützt und durch zahlreiche Erweiterungen an individuelle Anforderungen angepasst werden kann.
Die Standortauswahl für Teile der DreiSATS-Prozesskette basiert auf vielen Faktoren, von denen einige mit einem GIS-System nicht vollständig abgebildet werden können. Dazu gehören beispielsweise die Möglichkeit wirtschaftlicher Kooperationen sowie diverse strategische Überlegungen. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte wurde eine Vorauswahl von sechs potentiellen Standorten getroffen, deren Einzugsgebiete mithilfe des GIS-Systems unter verschiedenen Aspekten verglichen werden sollten. Zu den vergleichbaren Aspekten gehören die verfügbaren Kläranlagen, Klärschlammtrocknungs- und Monoverbrennungsanlagen sowie bereits bestehende und geplante P-Recycling Anlagen im Einzugsgebiet. Das entwickelte GIS-System sollte die Standortauswahl unter den bestehenden Favoriten erleichtern. Die sechs vorausgewählten Standorte befinden sich dabei alle im mitteldeutschen Dreiländereck. Die ausgewählten Standorte wurden im GIS-System über eine OpenStreetMap lokalisiert. Im nächsten Schritt erfolgte das Einfügen relevanter Kläranlagenstandorte und deren Eigenschaften in die Einzugsgebiete. Dabei dienten interne sowie öffentlich verfügbare Daten der jeweiligen Bundesländer als Datengrundlage. Im nächsten Schritt wurden umfangreiche Daten zu Monoverbrennungsanlagen, Kläranlagen und P-Recycling-Anlagen einbezogen. Alle Monoverbrennungsanlagen in Deutschland in Planung, Bau und in Betrieb wurden kartografiert. Dabei wurden drei verschiedene Ausbaugrößen betrachtet: Anlagen unter 100.000 t KS/a, Anlagen zwischen

100.000-200.000 t KS/a und Anlagen über 200.000 t KS/a. Diese Differenzierung ermöglichte eine bessere Einschätzung der Kapazitäten und Konkurrenzsituation an den verschiedenen Standorten. Auch alle Kläranlagenstandorte in Deutschland über der P-Recycling-relevanten Größe von 50.000 Einwohnerwerten (EW) wurden aufgenommen. Diese Schwelle ist relevant, da ab dieser Größe die gesetzliche Phosphor-Recycling-Pflicht greift. Zusätzlich wurden die aktuellen P-Recycling-Projekte einbezogen, die bereits im Großmaßstab in Betrieb gegangen sind oder in konkreter Planung sind. Auch die Standorte bestehender Trocknungsanlagen und die unter VKD Vertrag stehenden Kläranlagen konnten mit einbezogen werden.

Visualisierung und Analyse

Mit dem GIS System konnten flexibel passende Karten zur Unterstützung der Standortauswahl erstellt werden. So wurde zum Beispiel eine Heatmap aller Kläranlagen über 50.000 EW in Deutschland erzeugt, die die räumliche Verteilung und Dichte der Kläranlagen visualisiert. Die Standorte aller Monoverbrennungsanlagen in Planung, Bau und in Betrieb wurden als Koordinatenpunkte dargestellt, während P-Recycling-Projekte als schwarze Dreiecke markiert wurden.

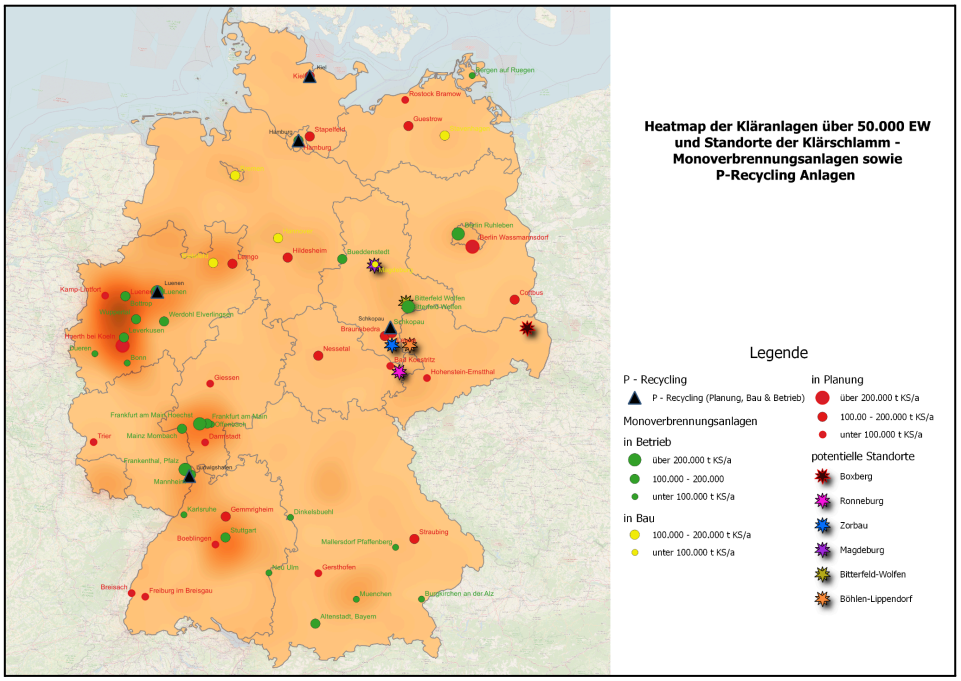


Abbildung 9: Heatmap der Kläranlagen über 50.000 EW und Standorte der Klärschlamm - Monoverbrennungsanlagen sowie P-Recycling Anlagen in Deutschland

Eine detaillierte Betrachtung des Dreiländerecks Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen zeigte differenzierte Standortcharakteristika.

Des Weiteren wurde erkannt, dass die Auswahl des P-Recycling-Standorts auch von vielen anderen Faktoren abhängt, die in einem GIS-System nur schwer abzubilden sind.

Dazu gehören die Nähe zum möglichen Vertrieb der Produkte, Standortsynergien durch mögliche Wärmeabnahmen und Chemikaliennutzungen, vorhandene Infrastrukturen und weitere standortspezifische Faktoren.
Diese Faktoren sind unabhängig von überregionalen Trends sehr individuell für spezifische Standorte unterschiedlich und können daher nicht standardisiert im GIS abgebildet werden.

Das GIS-System wurde kontinuierlich erweitert und aktualisiert, um alle Monoverbrennungsanlagen, Trocknungsanlagen, Kläranlagen und P-Recycling-Anlagen in Deutschland zu erfassen. Da vor allem die Kläranlagenstandorte und die dadurch verfügbaren Klärschlammmengen sowie die Monoverbrennungsanlagen und die dadurch verfügbaren Klärschlammaschemengen für eine Standortwahl entscheidend sind, bildet das entstandene GIS-System eine gute Hilfestellung zur Standortwahl einer Verbrennungs- oder P-Recyclinganlage. Die verschiedenen möglichen Standorte wurden in den Radien 50 km, 100 km und 150 km genauer betrachtet, um die lokale und regionale Verfügbarkeit von Rohstoffen und Synergiepotenzialen besser einschätzen zu können. Die Einbeziehung der möglichen Wärmeabnahmemengen stellte sich im Laufe der Arbeiten als im GIS-System kaum sinnvoll darstellbar heraus, da diese möglichen Wärmeabnahmemengen in der Regel von lokal sehr spezifischen Faktoren abhängen. Die Einbeziehung der Trocknungsanlagen in der Datenbasis liefert allerdings die Möglichkeit, nach Wärmesynergien mit Trocknungsanlagen zu suchen. Die Möglichkeit der Einbeziehung von Vertriebsoptionen der Düngemittelprodukte wurde intensiv geprüft.

Im letzten Schritt wurde das GIS System so erweitert, dass es auch in einer Online Anwendung interaktiv verwendet werden und so noch schneller wichtige Informationen liefern kann.

AP 5.1 Begleitende Bilanzierung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Für die Wirtschaftlichkeitsbewertung wurden technische und kaufmännische Aspekte erarbeitet. Auf technischer Seite wurden die Auslegungsparameter festgelegt. Zudem wurden Massen- und Energiebilanzen entsprechend den Erfahrungen beim Betrieb der vorhandenen Forschungsanlagen erstellt und ein Aufstellungsplan abgeleitet. Die Dimensionierung und das Design der Anlage erfolgte in Zusammenarbeit mit der internen technischen Abteilung für Kalkulation der Veolia. Hierbei werden verschiedene Ausbaugrößen kalkuliert und auf eine Ausbaugröße fokussiert, welche modular erweiterbar ist.
Die kaufmännische Betrachtung erfolgte auf Basis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der technischen Kalkulation. Hierzu werden Businesspläne im Szenarienmanager

erstellt und bilanziert. Hauptschwerpunkt ist hierbei die Modellierung der OPEX über den Bilanzzeitraum, um das Risiko im Preismodell zu ermitteln. Die Betrachtungen wurden unter Berücksichtigung der laufenden Versuche und der damit einhergehenden Weiterentwicklung der Verfahren kontinuierlich überarbeitet.

AP 5.2 Ableitung eines Grundkonzeptes zur großtechnischen Umsetzung im Produktionsmaßstab

Im Rahmen dieses Arbeitspakets erfolgte die Ableitung einer technischen Konzeption zur großtechnischen Umsetzung der DreiSATS-Prozesskette im Produktionsmaßstab. Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse aus den systematischen Labor- und Pilotversuchen sowie der begleitenden stofflichen und energetischen Bilanzierungen wurde zunächst eine erste Teilkonzeption für die P-Verwertungsanlage erarbeitet. Der Fokus lag dabei auf der Konzeption einer Anlage zur Herstellung eines trockenen und gemahlenen Düngemittelvorprodukts, welches nach Bedarf flexibel mit weiteren Nährstoffen granuliert werden kann. Das erarbeitete Anlagenkonzept sieht einen modularen Aufbau vor und ist für den flexiblen Betrieb mit unterschiedlichen Säuresystemen ausgelegt. Im Zuge der Konzeption wurden detaillierte Massenbilanzen erstellt, sämtliche Anlagenkomponenten – wie Lager-, Dosier-, Reaktions-, Filtrations-, Mahl- und Trocknungstechnik – dimensioniert sowie erste Aufstellungspläne und Schätzungen zum Platz- und Energiebedarf (Strom und Wärme) erarbeitet. Diese konzeptionellen Ergebnisse und Auslegungsdaten bildeten das wesentliche Fundament für die anschließenden fundierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und die orientierende Abschätzung von Investitions- und Betriebskosten (siehe AP 5.1).

AP 5.3 Stakeholdermanagement sowie Stakeholderanalyse unter Berücksichtigung weiterer Standorte

Zur Vorbereitung der Stakeholderworkshops wurden zunächst mögliche Stakeholder identifiziert und analysiert. Alle relevanten Akteure wurden erfasst und anhand einer Bewertungsmatrix beurteilt. Hierbei wurden verschiedene Stakeholdergruppen wie Klärschlammerzeuger, Trockenguterzeuger, Verbrenner sowie Ministerien und Behörden detailliert kategorisiert und hinsichtlich ihres Einflusses sowie ihres Interesses am Projekt evaluiert. Das Ergebnis der Analyse verdeutlichte, dass diese Akteure sowohl einen großen Einfluss als auch ein sehr hohes Interesse an der Projektumsetzung haben, was sich später in den hohen Teilnehmerzahlen der jeweiligen Workshops bestätigte. Nachfolgend fanden im Projektzeitraum insgesamt 7 Stakeholder Workshops

statt. Tabelle 1 zeigt eine vollständige Übersicht der adressierten Stakeholder der jeweiligen Workshops.

Tabelle 1 - Übersicht der in DreiSATS durchgeführten Stakeholder Workshops

Workshop	Stakeholder	Ort	Datum
1	Konzeptphase	Markranstädt	
2	Klärschlamm-erzeuger	online	18. Mai 2021
3	Trockengut-erzeuger	online	18. November 2021
4	Verbrenner	Markranstädt	18. Mai 2022
5	Ministerien und Behörden	Markranstädt	02. November 2022
6	Landwirte, Düngeabnehmer	Markranstädt	geplant 22. Juni 2023
7	Demonstrator Besichtigung #1	Markranstädt	28. November 2023
8	Demonstrator Besichtigung #2	Markranstädt	16. April 2025

Im Zuge der fortgeführten Stakeholderanalyse wurde jedoch auch deutlich, dass insbesondere auf der Anwenderseite (Landwirte und Düngeabnehmer) noch große Unsicherheiten und ein erheblicher Aufklärungsbedarf gegenüber Recyclingdüngern bestehen. Vor allem offene rechtliche Fragen zur Düngerzulassung hemmen hier eine breite Akzeptanz.

Erst nachdem alle Stakeholder einmal eingeladen worden waren, wurde das Konzept strategisch angepasst und in Form von Demonstratorenbesichtigungen fortgeführt. Diese Umstellung verfolgte das Ziel, mit sämtlichen Stakeholdern weiterhin in engem Kontakt zu bleiben und sie kontinuierlich über den aktuellsten Stand der Projekte auf dem Laufenden zu halten. Darüber hinaus bot dieses interaktive Format einen hervorragenden Rahmen für das aktive Netzwerken der Akteure untereinander. Ein wesentlicher Aspekt der Neuausrichtung war zudem die Möglichkeit, den Teilnehmern die verschiedenen im Projekt entwickelten Demonstratoren, konkret die P-Recycling-Anlage nach dem Pontes Pabuli Verfahren, die Staubfeuerungsanlage sowie den Pflanzversuchsstand – direkt und praxisnah vor Ort zu zeigen.

AP 5.4 Vorbereitung Anschlussphase zur Umsetzung am Modellstandort

Die Aktualisierung der Konzeption der P-Rückgewinnungsanlage erfolgte fortlaufend, sodass alle gewonnenen Erkenntnisse berücksichtigt werden. Die notwendigen Eigenschaften des Düngemittelvorprodukts wurden im Rahmen einer Kooperation mit einem Düngemittelhersteller definiert, um die Marktakzeptanz zu maximieren. Um die Umsetzung am Modellstandort mit dem Kooperationspartner voran zu treiben wurde bei den systematischen Versuchen ein Schwerpunkt auf die Erzeugung des neu definierten Düngemittelvorprodukts gelegt.

Die aus den systematischen Untersuchungen und empirischen Analysen abgeleiteten wissenschaftlichen Erkenntnisse und methodologischen Schlussfolgerungen wurden in einem iterativen Prozess zur kontinuierlichen Optimierung und Weiterentwicklung der bestehenden Anlagenkonzeption implementiert.

Die Prüfung der genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen an dem Modellstandort erfolgte in mehreren Schritten: Zunächst wurde eine Analyse der aktuellen Flächennutzung und des Bebauungsplans durchgeführt. Im zweiten Schritt erfolgte die Ermittlung der erforderlichen und vorhandenen Genehmigungen und weiteren relevanten Vorschriften.

Zudem wurde eine Checkliste der einzureichenden Unterlagen erstellt und mögliche Hindernisse oder Auflagen identifiziert. Die Bewertung des Zeit- und Kostenaufwands für das Genehmigungsverfahren wurde durchgeführt. Abschließend erfolgte die Dokumentation der Ergebnisse als Grundlage für die weitere Planung.

AP 6.1 Öffentlichkeitsarbeit

Um dem Projekt von Beginn an ein professionelles und einheitliches Auftreten zu verleihen, wurden zunächst ein eigenes Logo sowie ein Corporate Design entwickelt, woraus unter anderem ein Standard-Foliensatz für Präsentationen abgeleitet wurde. Als zentraler Informationskanal diente zudem die frühzeitig eingerichtete Projekt-Homepage (www.dreisats.de), auf der die Ziele und technologischen Ansätze des DreiSATS-Projekts kontinuierlich vorgestellt wurden.
Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes erstellten die VKD und die Projektpartner zahlreiche Veröffentlichungen, um die Forschungsarbeiten zum Phosphorrecycling breit zu kommunizieren und den aktiven Austausch mit relevanten Akteuren zu fördern. Die entsprechenden Textbausteine und Manuskripte für die Publikationen wurden dabei federführend von der VKD entworfen und stets eng mit allen Projektpartnern abgestimmt.
Über die gesamte Projektlaufzeit von 2020 bis 2025 hinweg präsentierte das Projektteam die technologischen Fortschritte auf einer Vielzahl von nationalen und internationalen Fachveranstaltungen. Zu den wesentlichen Meilensteinen der

Öffentlichkeitsarbeit gehörten Vorträge, Poster und Ausstellungsstände auf Branchenleitmessen und Fachkongressen wie der IFAT, der Berliner Klärschlammkonferenz, dem P-Rück Kongress sowie auf diversen Formaten der Deutschen Phosphor Plattform (DPP). Darüber hinaus wurden die Ergebnisse in renommierten Fachzeitschriften und Magazinen publiziert (z. B. in „Müll und Abfall“, im „Entsorga Magazin“ und im „WWT“ Leitfaden). Eine vollständige Übersicht sämtlicher Veröffentlichungen, Messeauftritte und Veranstaltungsbeiträge im Projektzeitraum befindet sich in Tabelle 2 im Anhang dieses Berichts.

AP 6.2 Projektkoordination und Berichtswesen

Die VKD übernahm über die gesamte Projektlaufzeit hinweg die zentrale Projektkoordination und die damit verbundenen umfassenden administrativen Aufgaben. Dies umfasste unter anderem die vollständige Planung, Durchführung und sorgfältige Protokollierung sämtlicher Projekttreffen sowie die Überwachung des Projektzeitplans und die Abstimmung der Synergien zwischen den Partnern. Für einen schnellen und strukturierten Datenaustausch innerhalb des Konsortiums wurde die Fraunhofer OwnCloud genutzt. Darüber hinaus koordinierte die VKD die Abstimmung bilateraler Absprachen, um einen reibungslosen Informationsfluss und eine effiziente Zusammenarbeit sicherzustellen.
Zur Abstimmung übergeordneter Schnittstellen nahm die VKD aktiv am JourFix zur Staubfeuerung teil, der vom IKTS in Zusammenarbeit mit Carbotechnik und LTC koordiniert wurde. Parallel dazu wurde ein regelmäßiger JourFix mit der Pontes Pabuli GmbH und der MFPA etabliert, in dem spezifische Abstimmungen zur Säureaufschlussgranulation vorgenommen wurden.
Zusätzlich fungierte die VKD als zentrale Kommunikationsschnittstelle zum Begleitprojekt TransPhoR und stellte sicher, dass alle relevanten Informationen zeitnah an die Projektpartner weitergeleitet sowie Zuarbeiten fristgerecht erbracht wurden. Zur Förderung des fachlichen Austauschs nahm die VKD zudem Kontakt zu weiteren RePhoR-Projekten auf, wodurch beispielsweise die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) gezielt zum Stakeholder-Workshop für Ministerien und Behörden eingeladen werden konnte. Durch diese umfassende Koordinationstätigkeit gewährleistete die VKD die erfolgreiche Integration aller Projektaktivitäten und die effektive Zusammenarbeit aller Beteiligten über den gesamten Zeitraum.

Anhang

Tabelle 2 - Übersicht der Veröffentlichungen und Vorträge - DreiSATS - VKD

Veröffentlichung	Titel	Datum	Bemerkung
Broschüre - Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen	Phosphor Recycling für eine nachhaltige Nutzung von Phosphor	Oktober 2020	Herausgeber: Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e. V., Redaktion: TransPhoR
ESPP e News	German national “RePhoR” P-recovery projects announced	Okt. 2020	eNews n°48
DreiSATS Homepage	DreiSATS- Technologydemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling	Nov. 2020	Projekthomepage https://www.dreisats.de/willkommen.htm
6. Kongress P- Rück	DreiSATS - Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling im „Mitteldeutschen Dreiländereck“	Nov. 2020	DWA Vortrag, 26.11.2020
6. Kongress P- Rück	DreiSATS - Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling im „Mitteldeutschen Dreiländereck“	Nov. 2020	Manuskript zum 6. Kongress P Rück
Berliner Klärschlamm-konferenz	DreiSATS- Technologydemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling	Nov. 2020	Kurzvorstellung DreiSATS für TransPhoR
Berliner Klärschlamm-konferenz	Ganzheitliches P-Recycling von der Kläranlage bis zur Mono-Asche: Die Ansätze von Veolia	Nov. 2020	Vortrag Berliner Klärschlamm- konferenz
Berliner Klärschlamm-konferenz	Ganzheitliches P-Recycling von der Kläranlage bis zur Mono-Asche: Die Ansätze von Veolia	Nov./Dez. 2020	Manuskript zur Berliner Klärschlamm- konferenz 2020, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH
Projektblatt	DreiSATS Technologiedemonstration zur Kombination Staubfeuerung und		

	Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallentfernung		
TKOR Homepage	RePhoR Verbundprojekt DreiSATS (Umsetzungsphase): Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschluss	Feb 2021	
“Müll und Abfall”	Ganzheitliches P- Recycling von der Kläranlage bis zur Mono-Asche: Die Ansätze von Veolia	18. Mai 2021	
6. CIO-Arbeitskreistreffen Wassertechnologie	Verbundprojekt DreiSATS: Klärschlammbehandlung mittels kombinierter Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallentfernung	27. Mai 2021	
Pressemitteilung Veolia	Forschungsprojekt DreiSATS setzt auf regionales Phosphorrecycling im “Mitteldeutschen Dreiländereck”	18. Mai 2021	
Euro Heat & Power	Forschungsprojekt: DreiSATS untersucht Phosphorrecycling bei thermischer Verwertung von Klärschlamm	28. Mai 2021	
Technologie Medien	Forschungsprojekt DreiSATS Regionales Phosphorrecycling im “Mitteldeutschen Dreiländereck”	20. Mai 2021	
EM Das Entsorgungsmagazin	Regionales Phosphorrecycling im “Mitteldeutschen Dreiländereck”	18. Mai 2021	
Recycling Portal	Phosphorrecycling im “Mitteldeutschen Dreiländereck” - Forschungsprojekt	18. Mai 2021	
Recycling Magazin	Forschungsprojekt setzt auf regionales Phosphorrecycling	18. Mai 2021	
GFA Wasserwirtschaft Abwasser Abfall	Regionales Phosphorrecycling im “Mitteldeutschen Dreiländereck”	18. Mai 2021	
EU Recycling Umwelttechnik	Phosphorrückgewinnung aus kommunalen Abwässern: Vieles geplant - Die Branche stellt sich auf den Wechsel ein	Juni 2021	
BDE - Grüne Innovationen in der Kreislaufwirtschaft	Neue Verwertungsstrategie für Klärschlämme, Regionales Phosphorrecycling im “Mitteldeutschen Dreiländereck”	18. Juni 2021	
plattform Zukunft	Forschungsprojekt DreiSATS Regionales Phosphorrecycling im “Mitteldeutschen Dreiländereck”	22. Juni 2021	
EUWID 25. 2021	Veolia baut ab Juli mit Partnern Versuchsanlage	23.06.2021	
DWA Vortrag	Von der Klärschlammtrocknung in	01.09.2021	

	Zorbau zum regionalen Phosphor-Recycling		
Berliner Klärschlammkonferenz 2021	Klärschlammmonoverbrennung durch Staubfeuerung-Prozessintegrierte Schwermetallentfrachtung und Aschequalität	16.11.2021	Vortrag & Manuskript
IFAT	Vorstellung Pontes Pabuli Verfahren auf Messestand Veolia	Mai/Juni 2022	Auch separater Messestand Pontes Pabuli GmbH und Carbotechnik GmbH, IKTS
DWA Vortrag auf IFAT	Vorstellung Pontes Pabuli Verfahren	Mai/Juni 2022	Matthias Hoger
2. Bioökonomie Kongress	Postervorstellung DreiSATS	2. Mai 2022	Projektteam DreiSATS
DWA	Umsetzung der Phosphorrecycling Pflicht am Beispiel Boxberg	23. Mai 2022	Matthias Hoger
DBFZ Jahrestagung	Biomassepotenzial in Haushaltsabfällen und Klärschlämmen	23. Juni 2022	Matthias Hoger
DPP	Forum 2022 Thema: Phoshorus Recycling 2029 Etappenziel erreicht?	Oktober 2022	Matthias, Claudyn Kidszun
P- Rück Kongress	Ergebnisse aus dem Versuchsbetrieb der P-Recyclinganlage nach dem Pontes Pabuli Verfahren	23. - 24. November 2022	Matthias Hoger
Berliner Klärschlammkonferenz	Ergebnisse aus dem Betrieb der Versuchsanlage nach dem Pontes Pabuli Verfahren	14. - 15. November	
Entsorga Magazin	P-Recycling- Technologien	12. Dezember 2022	
Statusseminar der BMBF-Fördermaßnahme „Regionales Phosphor-Recycling“ (RePhoR)	DreiSATS: Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen.	03./04. Mai 2025	Matthias Hoger
19. Kreislaufwirtschafts- & Deponieworkshop Zittau-Liberec	Ergebnisse aus dem Versuchsbetrieb der Forschungsanlage zum P-Recycling mit dem Pontes Pabuli Verfahren	21./22. September 2023	Claudyn Kidszun
7. Sitzung des Innovationsbeirates Sachsen	Praxisschau Kreislaufwirtschaft	22.03.2023	Freiberg
VDI Umweltmagazin	Düngergranulate aus Asche	03. April 2023	Matthias Hoger, Claudyn Kidszun, Lars Leidolph
DPP vor Ort	Versuchsanlage P-Recycling bei Veolia in Markranstädt	09. Mai 2023	
3. Bioökonomie Werkstatt Sachsen	Kreislaufwirtschaft und Nährstoffrecycling	24.05.2023	

DPP Ökofeldtage	Mitaussteller	14-. - 15.062023	
FutureSax in Delitzsch	Info Stand Dünger	21.03.2024	Claudyn Kidszun, Rui Yue
IFAT	Präsentation DreiSATS	13. - 17. Mai 2024	Matthias Hoger, Claudyn Kidszun
ACHEMA	Präsentation DreiSATS	10. Juni - 14. Juni 2024	
Umweltstammtisch	Lösungsansätze zum P-Recycling	08. August 2024	Claudyn Kidszun
Jahresveranstaltung Circular Saxony “Mit Kreislaufwirtschaft ans Ziel”	Effizientes Phosphorrecycling: Hochwertige Düngergranulate aus Klärschlamm Aschen	19. September 2024	Claudyn Kidszun
Phosphordialog Bayern	Vorstellung Phosphorrecycling Pontes Pabuli	27. November 2024	Matthias Hoger
Phosphordialog Hessen	Vorstellung Phosphorrecycling Pontes Pabuli	03. Dezember 2024	Claudyn Kidszun
DPP Forum 2025	Präsentation: Zukunftsweisende Kreislaufwirtschaft: Die FuE Aktivitäten von Veolia und Entwicklungen im Phosphorrecycling	09. Oktober 2025	Oskar Stiehler
WWT Artikel Themenspecial Klärschlamm	Wie Phosphor recycelt werden kann	Ausgabe 10/25	Claudyn Kidszun, Marc Lincke, Peter Schöfmann

Erzielte Ergebnisse

Das Gesamtziel des Verbundvorhabens DreiSATS bestand in der praxisnahen Erprobung und Demonstration einer innovativen, wirtschaftlich und technisch tragfähigen Prozesskette zur Klärschlammverwertung mit Phosphorrecycling in der Modellregion „Mitteldeutsches Dreiländereck“. Diese Technologiekette umfasste die Klärschlammtrocknung, die Mono-Verbrennung mittels Staubfeuerung mit integrierter Schwermetallreduktion sowie die Säureaufschlussgranulierung nach dem Pontes Pabuli-Verfahren zur Erzeugung marktfähiger Düngemittel. Die übergeordnete Zielstellung, diese Prozesskette im technischen Maßstab (TRL 6) zu demonstrieren und ein Konzept für die großtechnische Skalierung (TRL 8) abzuleiten, wurde vollumfänglich erreicht.
Detaillierte Darstellung der fachlichen Ergebnisse Die fachlichen Meilensteine gliedern sich analog zur Vorhabenbeschreibung in die folgenden Kernbereiche:

- Staubfeuerung und In-Situ-Schwermetallabscheidung (AP 2): Die Pilotanlage am Standort Magdeburg wurde erfolgreich für die Mono-Verbrennung von getrocknetem Klärschlamm adaptiert. Ein wesentliches Ergebnis war die Entwicklung und Integration eines Moduls zur In-situ-Aschemodifikation und der keramischen Heißgasfiltration. Hierdurch konnte demonstriert werden, dass eine prozessintegrierte Schwermetallabscheidung direkt im Verbrennungsprozess technisch realisierbar ist.
- Phosphorrecycling und Düngerproduktion (AP 3): Die prototypische Versuchsanlage für das Pontes Pabuli-Verfahren (TRL 6) wurde am Standort Markranstädt errichtet und im März 2022 erfolgreich in Betrieb genommen. In einem systematischen (halb-)technischen Dauerbetrieb wurden die Prozessschritte vom Säureaufschluss der Klärschlammaschen über die Schwermetallabreicherung bis zur Granulierung des Endprodukts validiert. Die pflanzenbauliche Wirksamkeit der erzeugten Phosphor-Düngegranulate wurde durch erfolgreiche Topf- und Freilandversuche (u.a. mit Weidelgras und Chinakohl) praktisch nachgewiesen.
- GIS-System und großtechnisches Grundkonzept (AP 4 & 5): Zur Unterstützung der Standortauswahl und regionalen Logistik wurde ein GIS-basiertes Softwaretool entwickelt, in dem sämtliche relevanten Kläranlagen, Monoverbrennungs- und Trocknungsanlagen sowie P-Recycling-Projekte in Deutschland erfasst wurden. Darauf aufbauend wurde ein detailliertes Grundkonzept für eine großtechnische Produktionsanlage erarbeitet. Dieses umfasst Massen- und Energiebilanzen, die Vordimensionierung sämtlicher Anlagenkomponenten, Aufstellungspläne sowie fundierte Wirtschaftlichkeits- und Ökobilanzierungen (Life-Cycle-Assessment).

Bestehende Abweichungen zur Zielstellung und Auswirkungen auf den Zuwendungszweck Hinsichtlich der wissenschaftlich-technischen Zielsetzungen gab es keine qualitativen Abweichungen. Die Projektziele wurden vollständig erfüllt.
Es kam jedoch zu zeitlichen Abweichungen im Arbeitsplan, die eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung des Projekts um 6 Monate (bis zum 31.12.2025) erforderlich machten.

Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit (2020–2025) wurde die Entwicklung von Phosphorrückgewinnungsverfahren national und international stark vorangetrieben. Im Zuge fortlaufender Markt- und Technologieanalysen während des Vorhabens wurde jedoch deutlich, dass viele dieser konkurrierenden Technologien beim Transfer in den großtechnischen Maßstab mit technischen und wirtschaftlichen Hürden konfrontiert waren. So zeigten sich bei einigen Ansätzen funktionale Schwierigkeiten in der Skalierung. Diese Entwicklungen spiegelten sich auch im DWA-Branchendialog Ende 2025 wider: Hier betonten Anlagenbetreiber und Experten, dass eine flächendeckende Umsetzung der gesetzlichen P-Recyclingpflicht zum 1. Januar 2029 aufgrund der mangelnden technischen Reife vieler Verfahren unrealistisch sei. Das Risiko von Fehlinvestitionen und Fehlentwicklungen wird am Markt nach wie vor als sehr hoch eingeschätzt.

Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Für die Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH (VKD) bilden die im Verbundprojekt DreiSATS erarbeiteten Ergebnisse ein wesentliches Fundament für die künftige strategische Ausrichtung vor dem Hintergrund der ab 2029 geltenden gesetzlichen Phosphor-Rückgewinnungspflicht. Durch den erfolgreichen (halb-)technischen Betrieb der Pilotanlage und die Erarbeitung eines Grundkonzepts für eine großtechnische Produktionsanlage hat die VKD weitreichende technologische und wirtschaftliche Expertise im Bereich der Klärschlamm-Monoverbrennung und des Phosphorrecyclings aufgebaut.
Diesen wertvollen Wissenszuwachs und die generierten Realdaten nutzt die VKD gezielt, um die Marktsituation kontinuierlich zu bewerten. Durch dieses fortlaufende Monitoring der rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ist die VKD in der Lage, fundierte strategische Entscheidungen für ihr Kerngeschäft und die zukünftige Entsorgungssicherheit zu treffen.
Ein zentraler Baustein der praktischen Ergebnisverwertung ist zudem die direkte Überführung der Projektidee in die Durchführbarkeitsstudie DemoPhos. In diesem Projekt werden die technologischen Vorarbeiten und Anlagenkonzepte aus DreiSATS

maßgeblich genutzt, um die Errichtung einer fossilenergiefreien Single-Purpose-Demonstrationsanlage vorzubereiten. Ziel in DemoPhos ist es, das Verfahren weiter in den industrierelevanten Maßstab (TRL 8) zu skalieren und die Teilprozesse Trocknung, Verbrennung und Düngemittelproduktion energetisch und stofflich hochgradig effizient zu koppeln. Die Skalierung, unter Beachtung der gesetzlichen Rahmenbedingungen, wird mit dem Ziel vorangetrieben, dem Kunden eine erste industrielle Anwendung zum Phosphor-Recycling zu bieten, wobei die entsprechenden Investitionsentscheidungen derzeit vorbereitet werden. So stellt die VKD sicher, dass die in DreiSATS erarbeiteten Konzepte zur Schließung von regionalen Nährstoffkreisläufen zukunftsweisend weiterentwickelt und verwertet werden.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Im Berichtszeitraum wurden verschiedene Aktivitäten zur Vernetzung und zum Erfahrungsaustausch durchgeführt. Es wurde am Vernetzungstreffen mit anderen Verbundprojekten in Frankfurt am Main teilgenommen, ebenso wie an Lenkungskreissitzungen sowie Veranstaltungen der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) und der Deutschen Phosphor-Plattform (DPP), bei denen Akteure der RePhoR-Fördermaßnahme präsent waren. Darüber hinaus erfolgten Teilnahmen an Fachveranstaltungen zum Phosphor-Recycling und an Fachmessen, die dem Erfahrungsaustausch dienten. Zusätzlich wurde das bestehende TKoR Netzwerk für den Austausch genutzt. Parallel zu den Vernetzungsaktivitäten wurden Schulungsmaßnahmen für die Mitarbeiter durchgeführt. Diese umfassten z.B. eine Schulung zu Geographischen Informationssystemen (GIS) sowie eine Fortbildung im Bereich Projektmanagement, um die methodischen und organisatorischen Kompetenzen im Projekt zu erweitern.

Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde großer Wert auf eine kontinuierliche und zielgruppengerechte Kommunikation der Projektergebnisse gelegt. Die Dissemination erfolgte über vielfältige Kanäle, um sowohl die Fachöffentlichkeit als auch Entscheidungsträger und potenzielle Anwender zu erreichen. Eine vollständige, tabellarische Auflistung aller Veröffentlichungen und Vorträge befindet sich im Anhang dieses Berichts.

Die Aktivitäten lassen sich in folgende Schwerpunkte gliedern:

1. Fachpublikationen und Fachpresse

Die technologischen Fortschritte des Pontes-Pabuli-Verfahrens sowie der Staubfeuerung wurden regelmäßig in Fachzeitschriften publiziert. Dazu gehören

Fachartikel in „Müll und Abfall“ (Mai 2021), im „VDI Umweltmagazin“ (April 2023), im „Entsorga Magazin“ (Dezember 2022) sowie im „WWT Themenspecial Klärschlamm“ (Ausgabe 10/2025). Zudem wurde eine Vielzahl an Pressemitteilungen und Kurzberichten in Branchenportalen und Magazinen (z.B. EUWID) veröffentlicht.

2. Vorträge auf Fachkongressen und Konferenzen

Das Projektteam präsentierte die Forschungsergebnisse kontinuierlich auf den zentralen Veranstaltungen der Branche. Zu den wichtigsten nationalen und internationalen Plattformen gehörten:

- Berliner Klärschlammkonferenz: Regelmäßige Vorträge und publizierte Manuskripte in den Jahren 2020, 2021 und 2022.
- P-Rück Kongress: Präsentation der Ergebnisse aus dem Versuchsbetrieb in den Jahren 2020 und 2022.
- Statusseminare der BMBF-Fördermaßnahme RePhoR: Fachvorträge zur Technologiedemonstration in den Jahren 2023 und 2025.
- Wissenschaftliche Formate: Unter anderem Vorstellungen beim 19. Kreislaufwirtschafts- & Deponieworkshop Zittau-Liberec (2023), auf der DBFZ Jahrestagung (2022) und beim 2. Bioökonomie Kongress (2022).

3. Messen und Ausstellungen

Um die entwickelte Anlagentechnik und die erzeugten Düngergranulate einem breiten Publikum praxisnah zu demonstrieren, war DreiSATS auf internationalen Leitmessen vertreten. Hierzu zählten gemeinsame Auftritte und Präsentationen auf der IFAT in München (2022 und 2024). Darüber hinaus wurden die Düngeprodukte auf speziellen Anwenderformaten wie den DPP Ökofeldtagen (2023) ausgestellt.

4. Gremienarbeit und regionale Dialogformate

Ein weiterer Schwerpunkt war der aktive Wissenstransfer in Netzwerken. Das Projekt wurde auf diversen Foren der Deutschen Phosphor-Plattform (DPP) präsentiert, zuletzt beim DPP Forum im Oktober 2025 unter dem Titel „Zukunftsweisende Kreislaufwirtschaft“. Auch auf Länderebene wurde gezielte Aufklärungsarbeit geleistet, beispielsweise durch Präsentationen beim Phosphordialog Bayern (November 2024), beim Phosphordialog Hessen (Dezember 2024) sowie bei der Jahresveranstaltung von Circular Saxony (September 2024).

5. Online-Präsenz

Als zentrale, dauerhafte Informationsplattform wurde bereits im November 2020 eine eigene Projekthomepage (https://www.dreisats.de/willkommen.htm) eingerichtet. Diese informiert kontinuierlich über die übergeordneten Ziele, die Projektpartner und den Fortschritt der Technologiedemonstration