DREISATS

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

SACHBERICHT TEIL II – EINGEHENDE DARSTELLUNG

TEILPROJEKT PONTES PABULI GMBH

FÖRDERKENNZEICHEN: **02WPR1544C**

KURZTITEL: **DREISATS**

Teilprojekt: „Kleintechnische Verfahrensentwicklung des pontes pabuli – Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Verbrennungsaschen“

VERBUNDPARTNER: **PONTES PABULI GMBH**
Harkortstraße 8, 04107 Leipzig

LAUFZEIT: 01.07.2020 bis 31.12.2025

Gefördert durch: das Förderprogramm „Regionales Phosphor-Recycling“ (RePhor) im Rahmen des Förderprogramms „Forschung für Nachhaltige Entwicklungen (FONA3)“

FONA Forschung für Nachhaltigkeit

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

1. Ziele und Zielerreichung

Die Partner verfolgen mit dem entwickelten DREISATS-Konzept ein regionale Phosphorrecycling aus Klärschlämmen mit integrierter Schwermetallabscheidung. Als Gesamtprojektziel stand dabei die praxisnah-prototypische Erprobung und Demonstration dieses Konzeptes und der dazugehörigen Prozesskette von der thermischen Klärschlammverwertung über das Phosphorrecycling bis zur Produktverwertung beispielhaft für die Modellregion "Mitteldeutsches Dreiländereck" Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen. Im Rahmen des DREISATS-Konzeptes erfolgt die Nutzbarmachung des Phosphors nach dem PONTES PABULI-VERFAHREN. Dabei werden erzeugten Aschen in gebrauchsfertige Düngemittel überführt und können so konventionelle Düngemittel in der Landwirtschaft ersetzen. Im Teilprojekt der Pontes pabuli GmbH sollte der Machbarkeitsnachweis des Verwertungsverfahren im technisch relevanten Maßstab erbracht und Basisdaten für die Skalierung in den Produktionsmaßstab gewonnen werden. Zusammenfassend wurden folgende Ziele erreicht:

- **Erarbeitung und Bereitstellung standortspezifischer Rezepturen:** Auf Basis der Ermittlung und Bewertung der Inputströme und durchgeführter laborativer und kleintechnischer Vorversuche wurden standortspezifische Rezepturen für unterschiedlichen Demonstrator-Aschen entwickelt. An der errichteten Versuchsanlage konnten diese Rezepturen in diesem (klein-)technischen Maßstab verifiziert werden. Durch eingehende Untersuchung einschließlich durchgeführter Pflanzversuche konnte die Eignung als Düngemittel nachgewiesen werden. So belegen die analytischen Untersuchungen an erzeugten unterschiedlichen Düngertypen, dass die Neutralammoniumcitrat-Löslichkeit als Maß für einen Aufschluss der Aschen und als Indikator für die Pflanzenverfügbarkeit bei größer 90 % bezogen auf den Gesamtphosphatgehalt liegt (→Meilenstein 3). Durch Pflanzversuche (Topf- und Freiland) wurde die Düngewirkung (Wirksamkeit und Pflanzenverfügbarkeit) erzeugter Düngemittel nachgewiesen (→Meilenstein 4).
- **Ermittlung regionalspezifischer Material- und Verfahrensparameter:** Durch die systematischen Voruntersuchungen der (Teil-)Prozessschritte konnten die relevanten Prozessparameter für die Auslegung der Versuchsanlage definiert, die Technologiekomponenten für die Prozessschritte ausgewählt und für die Versuchsanlage dimensioniert werden. Aus den durchgeführten Versuchen und Untersuchungen an der Versuchsanlage resultiert eine Parametermatrix für alle Verfahrensschritte zur rezeptur- und produktspezifischen Prozessführung für unterschiedliche Aschematrizes.
- **Untersuchung der Schwermetallabtrennung:** Durch umfassende Versuche wurde eine wirksame Abtrennprozedur für die mit der Aufschlusslösung mitgelösten Schwermetalle unter den spezifischen Reaktionsbedingungen im PONTES PABULI-VERFAHREN entwickelt. Die elektrochemische Schwermetallabtrennung erwies sich dabei als deutlich weniger effizient als die sulfidische Abtrennung. Um bei Bedarf auch die ungelösten bzw. schwerlöslichen Schwermetalle abtrennen zu können, wurde zusätzlich eine flexibel nutzbare Option in Form eines 2-strangigen Verfahrens entwickelt. Die Abtrennprozeduren wurden im (klein-)technischen Maßstab erprobt. Auf Basis der erzielten Versuchsergebnisse und ermittelten Parametersätze kann nun der spezifische Schmermetallanteil unterschiedlicher Aschen effizient abgetrennt werden.
- **Errichtung und Inbetriebnahme einer Versuchsanlage zur P-Rückgewinnung:** Im Projekt wurde eine Versuchsanlage zum PONTES PABULI-VERFAHREN mit einem möglichen Durchsatz (Einsatzmenge) von 20 – 50 kg Klärschlammasche / Stunde konzipiert, geplant und in Leipzig-Markranstädt errichtet, die den Gesamtprozess des P-Recyclings abbildet. Mit der Inbetriebnahme wurde die technische Funktionsfähigkeit der Anlage nachgewiesen (→ Meilenstein 1).
- **Ermittlung von Steuer- und Prozessparametern an der Versuchsanlage:** Nach der Inbetriebnahmephase wurden systematische Untersuchungen zunächst an den einzelnen Prozessschritten separat und anschließend über die gesamte Prozesskette hinweg durchgeführt. Mit diesen Versuchen konnte die technische Realisierbarkeit des PONTES PABULI – VERFAHRENS mit einer wirksamen Schwermetallabtrennung durch einen stabilen Prozess über mehrere Zyklen nachgewiesen werden. (→ Meilenstein 2)

Durch standardisierte Analysetests und Pflanzversuche wurde zudem die Nährstoffwirkung der erzeugten Düngemittel belegt. Für unterschiedliche Aufschlusssysteme wurden die technischen Parameterbereiche für eine stabile und wirksame Prozessführung erarbeitet und daraus eine Parametrierung für eine zukünftige Produktionsanlage abgeleitet. Es wurden die Einflussfaktoren und kausalen Zusammenhänge bei der Prozessführung erforscht, daraus die Steuerparameter und Steuergrößen für eine stabilen Prozessführung abgeleitet und in ein Steuerungs- und Automatisierungskonzepts für eine zukünftige Produktionsanlage überführt. Auf Basis der Versuchsdaten und Erfahrungen aus den Untersuchungen an der Versuchsanlage konnten die relevanten Verbrauchsdaten, Prozessgrößen, Werkstoffeigenschaften und Technologieanforderungen konkretisiert werden, wodurch ein belastbares Konzept für eine zukünftigen Produktionsanlage bis hin zu einem 3D-Modell entwickelt werden konnte. Mit diesem Konzept und den vorliegenden Verbrauchsdaten konnte eine orientierende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Verfahren durchgeführt werden.

2. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

2.1 Charakterisierung Aschen aus Wirbelschichtverbrennung und Staubfeuerung

Zu Projektbeginn lagen bereits umfangreiche Analysedaten zur chemisch-physikalischen Konstitution von Klärschlammaschen aus der konventionellen Wirbelschicht-Monoverbrennung sowie zu deren Löseverhalten vor. Ebenso bestanden umfassende Erkenntnisse aus der Eignungsuntersuchung verschiedene Muster dieser Aschen zur Verwertung mittels des PONTES PABULI – VERFAHRENS im Labormaßstab. Eine Besonderheit der DREISATS-Konzeption ist die regionale thermische Verwertung mit dezentralen Klärschlamm-Verbrennungsanlagen mit geringerer Leistung und vorgeschalteter Trocknung. Dazu wurde im Rahmen des Projektes von den Partnern die Nutzung einer Staubfeuerung für die Klärschlammverbrennung mit thermischer Schwermetallabtrennung erprobt. Durch die grundlegend andere thermische Behandlung war zu erwarten, dass sich die Eigenschaften der resultierenden Asche aus der Staubfeuerung deutlich von den Aschen aus der konventionelle Wirbelschicht-Monoverbrennung unterscheiden. Diese unterschiedlichen Ascheeigenschaften, wie Korngröße, Kristallinität, Phasenzusammensetzung, chemische Zusammensetzung etc.) wirken sich entsprechend auf das Reaktionsverhalten im P-Rückgewinnungsverfahren aus. Entsprechend galt es zu klären, welche Unterschiede bei den Ascheeigenschaften resultieren und inwieweit sich diese unterschiedlichen Ascheeigenschaften auf das Reaktionsverhalten im P-Rückgewinnungsverfahren auswirken. Diese Grundlagenuntersuchungen konzentrierten sich auf von den Projektpartnern übergebene Muster aus der Staubfeuerung. Als Mineralsäuren wurde mit Salpetersäure, Schwefelsäure und Phosphorsäure experimentiert. Die Auswahl erfolgte insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass diese Säuren zusätzliche Nährstoffkomponenten liefern sollten. Die Untersuchungen zum grundlegendem Löseverhalten erfolgten im Rahmen von Batch-Versuchen mit diesen 3 ausgewählten Mineralsäuren unter gezielter Variation von Säurekonzentration und Reaktionszeit:



Abbildung 1: Versuchsaufbau

	Säurekonzentration	Verhältnis m(KSA) / m(Säure)	Temperatur
Einheit	[%]	[-]	[°C]
Schwefelsäure	96 %	1,0 – 3,0	20 - 60
Salpetersäure	65 %	1,0 – 2,5	
Phosphorsäure	85 %	1,2 – 2,0	

Tabelle 1: Parameterübersicht der Löseparameter

Aus diesen grundsätzlichen Batch-Löseversuchen konnten Abhängigkeiten des Löseverhaltens des Phosphates von der Art der zugegebenen Säure, der Konzentration der zugegebenen Säuremenge und der Reaktionstemperatur vergleichend zu Asche aus der konventionellen Wirbelschichtverbrennung abgeleitet

werden. Beispielhaft zeigt die Abbildung 2 den gelösten Anteil an Phosphat aus der Klärschlammasche bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Art und Konzentration der Mineralsäuren Salpeter-, Schwefel- und Phosphorsäure. Abbildung 3 zeigt vergleichend den gelösten Anteil von Phosphat aus jeweils 2 typischen Klärschlammaschen aus der Wirbelschicht-Monoverbrennung und der Staubfeuerung in Abhängigkeit von der zugegebenen Menge an Schwefelsäure.

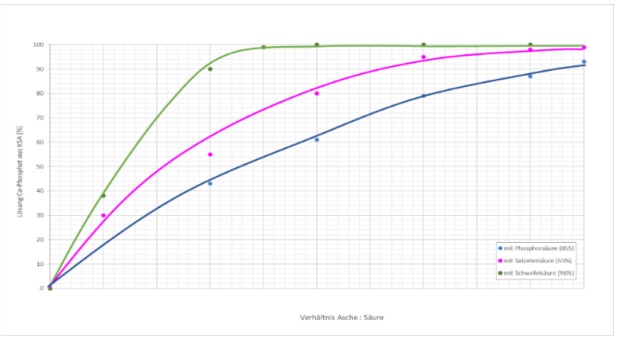


Abbildung 2: Gelöster Anteil an Phosphat aus der KSA in Abhängigkeit von der Art und Konzentration der Säure

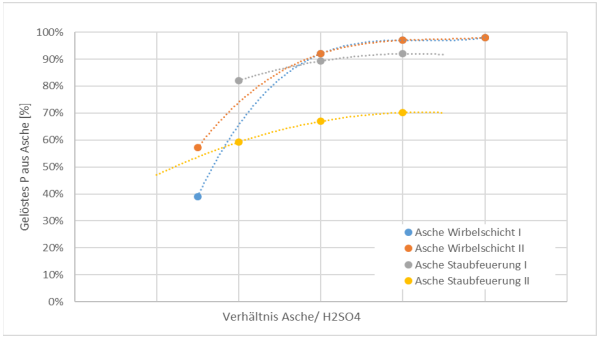


Abbildung 3: Gelöster Anteil an P aus KSA Wirbelschicht- bzw. Staubfeuerung in Abhängigkeit von H_2SO_4-Säuremenge

Folgende Aussagen resultieren aus Abbildung 2 und Abbildung 3:

- Das Phosphat in der unbehandelten Klärschlammasche ist schlecht pflanzenverfügbar. Dies gilt für Klärschlammaschen aus der konventionellen Wirbelschicht-Monoverbrennung sowie für die resultierenden Aschen aus der Staubfeuerung.
- Mit Säuren mit einer ausreichend hohen Säurestärke kann das Phosphat der Klärschlammasche gelöst werden. Dieses Auflösen ist die Voraussetzung für eine Umwandlung in ein besser-Pflanzenverfügbares Phosphat im Verwertungsprozess.
- Im Vergleich der hier untersuchten Muster aus der Staubfeuerung mit konventionellen Wirbelschichtaschen konnte, anders als erwartet, keine höhere Löslichkeit des Phosphates ermittelt werden. Zwar schwanken die Phosphatlöslichkeiten je nach Spezifik der Asche, die ermittelten Werte für die Staubfeuerungsaschen lagen jedoch sogar unterhalb der typischen Löslichkeits-bereich von Aschen aus der Wirbelschicht-Monoverbrennung, so dass derzeit keine grundsätzlich verbesserte P-Löslichkeit durch die Staubfeuerung festgestellt werden kann. Möglicherweise resultiert dieses Ergebnis aus einem noch nicht optimierten Verbrennungsprozess an der Staubfeuerungsversuchsanlage der Partner. Entsprechend gilt es diese Aussage noch zu verifizieren.

2.2 Standortspezifische Rezepturentwicklung

Anforderungskatalog an die regionale Asche und zu erzeugende Düngemittel

Zur Entwicklung der standortspezifischen Rezepturen wurden zunächst die Anforderungen an die Klärschlammasche definiert. Dabei wurde an Beispielrezepturen der Einfluss der Elementzusammensetzung auf die Qualität des Endproduktes und auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens bewertet. Dafür wurde beispielsweise wirtschaftlich sinnvolle Mindestgehalte von P in der Verbrennungsasche definiert, die rezepturspezifisch unterschiedlich sind. P ist dabei im Wesentlichen das Element, welches im Produkt den Verkaufserlös erzeugt. Unterhalb des definierten Mindestwertes übersteigen die Verfahrenskosten die Verkaufserlöse, wodurch entsprechend die Ascheabnahmekosten steigen müssten.

Die Verbrennungsaschen beinhalten je nach Herkunft unterschiedliche Arten und Mengen an Schwermetallen, die zumindest in einem relevanten Anteil in dem Verwertungsprozess abgereichert werden sollten. Der Anteil an abzutrennenden Schwermetallen sollte aus Nachhaltigkeitsgründen zunächst möglichst groß sein. Allerdings ist eine steigende Abtrennquote auch mit zunehmenden Chemikalien- und Energieverbrauch und damit stark ansteigenden Verfahrenskosten verbunden, weshalb hier ein ökologisch und ökonomisch sinnvolles Zielmaß zu finden ist. Von rechtlicher Seite gibt es zwar mit der deutschen Düngemittelverordnung Vorgaben zur Schwermetallgrenzwerten in Düngemitteln, rechtlich ist jedoch nach wie vor

ihre Interpretation für rezyklierten Phosphordüngern ungeklärt. Laut Düngemittelverordnung gelten die definierten Grenzwerte für Düngeprodukte, bei der Herstellung aus Reststoffen wird die Verordnung hingegen zum Teil interpretiert, dass diese Grenzwerte auf die Ausgangsstoffe zu beziehen sind. Eine Abreicherungsquote wird sich dann aus der Konzentration im Ausgangsstoff ergeben. Nach aktueller Einschätzung wird davon ausgegangen, dass bereits die Verbrennungsaschen die Grenzwerte der deutschen Düngemittelverordnung einhalten müssen bzw. bei Überschreitung mindestens diese Anteile abzutrennen sind. Entsprechend war mit dieser Rahmenvorgabe eine effiziente Schwermetallabtrennung zu entwickeln, die aus ökonomischen Gründen auch möglichst flexibel an die unterschiedlichen Inputqualitäten anpassbar ist. Für Beispielaschen wurde abgeschätzt, welche Kosten bei unterschiedlichen Schwermetallkonzentrationen zu erwarten sind. Aus der Bewertung der Kosten für die Schwermetallabreicherung unter Berücksichtigung der Kostenstruktur durch unterschiedliche P-Gehalte wurden unter dem Aspekt der Bereitstellung eines unter aktuellen Marktbedingungen wirtschaftlichen Rückgewinnungsverfahrens eine Anforderungsmatrix an die Verbrennungsaschen zu deren Schwermetallgehalt und P-Konzentration abgeleitet.

Neben der Schwermetallabreicherung ergeben sich für unterschiedliche Zielmärkte weitere unterschiedliche Anforderungen an die Recyclingdünger. So werden im Biolandbau nicht nur besonders hohe Anforderungen an eine Schwermetallabreicherung gestellt, sondern auch an die Art und Herkunft aller eingesetzten Roh- und Hilfsstoffe. Auch diese Aspekte wurden in den Anforderungskatalog übernommen.

Daneben müssen die erzeugten Düngemittel für eine breite Anwendbarkeit mit notwendigem Marktwert in ihrer Nährstoffzusammensetzung und ihren Handlingeigenschaften weitgehend konventionellen Düngern entsprechen. Beim Handling und Ausbringen der Düngemittel sind Maschinen notwendig, die an die Eigenschaften der konventionellen Düngemittel (wie Korngrößenverteilung, Festigkeit, Abrieb etc.) angepasst sind. Die Akzeptanz von Rezyklaten ist nur dann gegebenen, wenn der Landwirt bestehende Technik weiterverwenden kann. Daraus ergaben sich die konkreten Spezifikationsvorgaben von Festigkeit, Abriebeigenschaften sowie Granulatgröße und -form für die zu erzeugenden Düngegranulate. Zudem erbrachte die durchgeführte Markterkundung, dass die Bewertung der Verkaufserlöse nicht aus dem monetären Nährstoffwert der Recyclate berechnet werden kann. So werden beispielsweise für Fällungsprodukte aus der P-Elimination am Klärwerk (z. B. Struvit) trotz der hohen Nährstoffwerte nur minimale Preise bezahlt. Grund dafür ist, dass ein Dünger für den Landwirt nur dann einen adäquaten Wert hat, wenn dieser die pflanzen- und standortspezifischen Anforderungen erfüllt. Recyclingdünger haben entsprechend dann einen wirtschaftlich gerechtfertigten Wert, wenn diese den Nährstoffzusammensetzungen der konventionellen Düngertypen entsprechen und in Qualität, Handling und Verarbeitung mindestens gleichwertig sind. Abgeleitet wurde daraus die Anforderung an die erzeugten Düngemittel, dass die Nährstoffzusammensetzung weitgehend typischen, konventionellen Düngemitteln entsprechen muss.

Entwicklung von Grundrezepturen

Mit den abgeleiteten Anforderungen an die Inputaschen, an die erzeugten Düngemittel und den Grundinformationen zur Löslichkeit wurden für unterschiedliche Klärschlammaschen, sowohl aus der konventionellen Wirbelschicht-Verbrennung als auch aus der Staubfeuerung Rezepturen entwickelt (beispielhafte standortspezifische Rezepturen). Dies umfasste u. a. marktübliche Düngerzusammensetzungen insbesondere für P-, NP- und NPK-Dünger, um zukünftig Landwirten möglichst identische Produkte zur Verfügung stellen zu können.

- Dazu wurde eine Kalkulationsmatrix entwickelt. Dort können zum einen die spezifische Elementzusammensetzung der zu verwertenden Klärschlammasche eingesetzt werden. Aus den Ergebnissen der Ascheuntersuchungen sind dort zum anderen die erforderlichen Mengen an Aufschlusssäure je nach Säurearten hinterlegt. Je nach Anforderung kann die Säureart ausgewählt werden, woraus sich die Einsatzmengen für die Aufschlussreaktion ergibt. Sowohl eingesetzte Säure als auch die Klärschlammasche werden in das erzeugte Düngemittel nahezu vollständig (bis auf kleine Abtrennungen aus der Schwermetallabreicherung) überführt, wobei in der Kalkulationsmatrix entsprechende Mengen an weiteren Nährstoffkomponenten (wie Harnstoff $MgSO_4$, KCl etc.) hinzugefügt werden können, woraus sich die stoffliche Zusammensetzung der zu erzeugenden Düngemittel ergibt.

- Dabei wurden die Rezepturen auch insbesondere unter Einbeziehung von wirtschaftlichen Aspekten abgeleitet. Zwar können im pontes pabuli - Phosphorrückgewinnungsverfahren nahezu beliebig Nährstoffe zugegeben und so konventionelle Düngertypen identisch nachgestellt werden. Dazu müssen die Nährstoffe jedoch zugekauft werden. Je größer dieser Anteil ist, desto größer wird dadurch die Abhängigkeit vom extrem volatilen und von globalen Großkonzernen dominierten Rohstoffmarkt, was gerade in der aktuellen Situation zu nahezu unkalkulierbaren wirtschaftlichen Risiken führen kann. Andererseits spiegeln große eingesetzten, nicht-regionale Nährstoffmengen den Anspruch an das Schließen und Verwerten regionaler Nährstoffkreisläufe nur noch eingeschränkt wider.

  Bei der Ableitung der Rezepturen wurde deshalb versucht, sowohl den Chemismus der Versuchsaschen und der Aufschlusssäuren mit dem Nährstoffbedarfsverhältnis der Landwirte derart zu berücksichtigen, dass Rezepturen mit möglichst wenig zusätzlichen Nährstoffkomponenten resultieren. Ein Beispiel dafür: Ein marktübliches Produkt ist ein NP-Dünger mit 12 % N und 27 % P_2O_5. Zur Abbildung dieser Nährstoffzusammensetzung werden so viele zusätzliche Nährstoffe (z. B. Harnstoff, P-Salze) benötigt, dass der Ascheanteil im Endprodukt lediglich 35 % beträgt. Bei halbierten Nährstoffwert, also NP 6/14, steigt der Anteil der Asche im Produkt auf über 60 % und neben der eingesetzten Aufschlusssäure sind fast keine zusätzlichen Nährstoffe notwendig. Das bedeutet für den Landwirt, dass er eine gleiche Nährstoffzusammensetzung bekommt, zwar die doppelte Menge ausbringen muss, aber dafür das Produkt sehr nachhaltig und kostengünstiger ist.

Mit dieser Kalkulationsmatrix wurde ein Werkzeug entwickelt, um geeignete Rezepturen je nach Chemismus der zu verwertenden Klärschlammasche und den Anforderungen an die Produktqualität zu kalkulieren. Damit wurden verschiedene standortspezifische Rezepturen für unterschiedliche Aschetypen abgeleitet, die im Rahmen des Projektes als Beispielrezepturen in den Versuchen eingesetzt wurden und experimentell überprüft wurden. Anhand der hier erhaltenen Ergebnisse wurde die Kalkulationsmatrix überprüft, iterativ angepasst und um die Versuchsergebnisse stetig ergänzt. Daraus resultiert final, dass die Kalkulationsmatrix validiert ist und als Werkzeug für weiterführende Arbeiten zur Verfügung steht.

Erweiterung Kalkulationsmatrix um Aspekte der erfolgten Verfahrensweiterentwicklungen

Im Projektverlauf erfolgte die Entwicklung einer wesentlichen Verfahrenserweiterung für die Abtrennung von schwerlöslichen Schwermetallen (→ siehe Abschnitt 2.4). Durch diese Verfahrenserweiterung ergab sich ein wesentlicher Einflussaspekt auf die resultierende chemische Zusammensetzung der erzeugten Düngemittel. Da diese neue Verfahrenserweiterung besonders relevant für die zukünftige Umsetzung des Phosphorrecyclings nach dem PONTES PABULI – VERFAHREN ist, wurden die Rezepturentwicklungen und die Kalkulationsmatrix um diesen neuen Einflussaspekt angepasst.

Die dafür erforderlichen Parameter resultierten aus den Versuchen und Untersuchungen zu diesem optionalen Teilstrang. Dazu wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, wie die Teilprodukte aus den beiden Prozesssträngen zu brauchbaren Düngergranulaten verknüpft werden können. Dies umfasste zum einen die Rezepturentwicklung zur Erzeugung von P-, NP-, PK- und NPK-Düngern und zum anderen die Prozedur zur Verarbeitung der erzeugten Filterkuchen einschließlich ihrer Granulation. In diesem 2-strangige Verfahren bilden die Filterkuchen aus den beiden Prozesssträngen die Basis für die Erzeugung der Dünger. Die Anfallmengen der jeweiligen Filterkuchen hängen dabei maßgeblich von der dem jeweiligen Prozessstrom zugeführten Stoffstrommenge ab. Dieser Stoffstrom richtet sich dabei unter anderem nach den Erfordernissen der Schwermetallabtrennung, also im Grund nach der Schwermetallbelastung der KSA und gewünschten Reinheit der Produkte. Dies allein spannt ein breites Variationsfeld je nach standortspezifischer Asche und den standortspezifischen Rahmenbedingungen auf. Dieses Variationsfeld multipliziert sich dann zusätzlich durch die mögliche Produktvielfalt der zu erzeugenden Düngertypen. Um dies handelbar machen zu können, wurde die entwickelte Kalkulationsmatrix für die Rezepturbestimmung entsprechend so angepasst, dass die diese verschiedenen Parameter mit abbildet. Mit dieser Matrix konnten bereit im Projektverlauf beispielhaften Demonstratorrezepturen für unterschiedliche Düngertypen definiert und in Verarbeitungsversuchen erprobt werden. Die durchgeführten Analysen der Endprodukte belegten dabei die Brauchbarkeit der erstellten Matrix zur Abbildung dieser komplexen Zusammenhänge und zur standortspezifischen Rezepturdefinition.

2.3 Voruntersuchung zu einzelnen Prozessschritten

Basis für die P-Rückgewinnung im Projekt ist das PONTES PABULI – VERFAHREN, welches durch die Errichtung und Betrieb einer Versuchsanlage (klein-)technisch demonstriert werden sollte. Als Vorarbeiten für die Konzeption, Planung und Errichtung der Versuchsanlage stand die Konkretisierung der Technologieauswahl für die einzelnen Prozessschritte. Für die Schritte der Fest/Flüssig-Trennung und der Granulation war zu Projektbeginn zwar die grundsätzlichen Technologien ausgewählt und der Prinzipnachweis erfolgt, es fehlten jedoch eingehende Untersuchungen, um die die Spezifikation dieser Technologiekomponenten für die Versuchsanlage ableiten zu können. Deshalb wurden zunächst 2 Versuchsstände im Technikum des Projektpartners MFPA mit Unterstützung von pontes pabuli und VKD aufgebaut, um diese Teil-Prozessschritte eingehend zu prüfen. Pontes pabuli hat hierzu die Anforderungsspezifikation und die Planung für beiden Module erstellt, Lieferanten für die notwendigen Komponenten gesucht, bewertet und bei denen entsprechende bestellreife Angebote eingeholt und den Aufbauprozess unterstützt.



Abbildung 4: Versuchsstand Fest/ Flüssig-Trennung mittels Membranfilterpresse



Abbildung 5: Versuchsstand Granulation mittels Granulierteller oder Intensivmischer

Rezepturspezifische Filtrationsuntersuchungen

Nach erfolgtem Aufbau des Versuchsstandes und der Inbetriebnahme wurde zunächst ein umfassendes Versuchsprogramm zur Untersuchung der Fest-/Flüssigtrennung durchgeführt. Die Versuchsmatrix umfasste dabei zum einen variable Parameter bei der Suspensionsherstellung und zum anderen technische Parameter bei der Fest-/Flüssigtrennung:

- Zum Einsatz kamen dabei Versuchsaschen aus der Staubfeuerung sowie eine Asche aus der konventionellen Wirbelschichtverbrennung.
- Als Mineralsäuren wurden Schwefelsäure und Salpetersäure eingesetzt, wobei die zusätzlich zugegebene Wassermenge (Verdünnung) variiert wurde. Das Verhältnis zwischen Asche und Säuremenge wurde den Ergebnissen aus den laborativen Vorversuchen entnommen.
- Die Reaktionstemperatur beim Löseprozess und damit die Temperatur der Suspension bei der Fest-/Flüssigtrennung wurde von Raumtemperatur bis ca. 60 °C variiert.
- Variierte Technische Parameter F/F-Trennung: Durchflussgeschwindigkeit; Pumpendruck; Membrandruck; Art des Filtermaterials

Als Ergebnis aus diesen Untersuchungen resultierten Erkenntnisse zur rezeptur- und produktspezifischen Prozessführung, die belastbare Aussagen zuließen, in welchem Säuresystem welche Filterpresseneinstellung erfolgen sollte. Zudem resultierten Informationen zur Abtrennwirkung bei unterschiedlichen Prozessparametern. Dabei wurden Restfeuchten zwischen 25 – 40 % je nach gewählter Einstellung erreicht. Diese Erkenntnisse aus den Vorversuchen konnten für die Konzipierung der und nachfolgenden Versuche an der Versuchsanlage genutzt werden. Dabei konnte das geeignete Parameterfenster für die deutlich aufwendigeren Versuche an der Versuchsanlage entsprechend zielführend eingegrenzt werden.



Abbildung 6: Beispiel für erzeugten Filterkuchen am Versuchsstand

Untersuchung Granulationsprozess



Abbildung 7: Granulations-versuch

Der beschaffte Labor-Granulierteller und Intensivmischer wurden aufgebaut und in Betrieb genommen. Im Anschluss erfolgten systematische Voruntersuchungen zum Granulationsverhalten mit den abgeleiteten standortspezifischen Rezepturen. Variiert wurden dabei folgende Parameter:

- Einsatz unterschiedlicher Filterkuchen aus der Fest-/Flüssigtrennung
- Zugabe verschiedener bindemittelwirksamer Komponenten z. flüssigen Phase
- Granulierparameter (Neigungswinkel, Drehgeschwindigkeit, Granulierzeit)

Die experimentellen Arbeiten erfolgten in wissenschaftlich-technischer Begleitung und Auswertung durch pontes pabuli wieder bei MFPA. Folgende Ergebnisse resultieren aus diesen Versuchen:

- Es können sowohl am Granulierteller als auch im Intensivmischer ausreichend runde und stabile Granulate mit der Zielgranulatgröße erzeugt werden.
- Die Korngröße der eingesetzten Gemische hat signifikante Auswirkungen auf die Kornform und das Bindeverhalten. Es muss eine ausreichende Feinheit sichergestellt werden. Das bedeutet, dass insbesondere der Filterkuchen, aber auch zugegebene Nährstoffkomponenten aufgemahlen bzw. desagglomeriert werden müssen, sofern die geeignete Korn- bzw. Aggregatgröße überschritten wird (z. B. bei Einsatz von formstabilen Nährstoffgranulaten)
- Die Zugabe allein von Wasser zur Granulation auf dem Granulierteller ist nicht ausreichend. Gute Granulationserfolge wurden hingegen erreicht, wenn dem Wasser ein Salz als „Bindemittel“ zugegeben oder Prozesswasser verwendet wird. Die Salzkomponenten kristallisieren beim Trocknen aus und führen zur notwendigen Bindefestigkeit. Im Intensivmischer konnten hingegen formstabile Granulate bei Zugabe von Wasser erzielt werden.

Aus diesen Versuchen resultierten (laborative) Erkenntnisse zur rezeptur- und produktspezifischen Prozessführung und Erarbeitung einer Parametermatrix für den Verfahrensschritt Granulation unter Berücksichtigung der betrachteten Aschen. Diese wurden im nächsten Skalierungsschritt an der Versuchsanalage übertragen und dort verifiziert werden. Die laborativen (Vor-)Versuche ermöglichen dabei nun eine zielgerichtete Untersuchungsarbeit an der Versuchsanlage durch mögliche Eingrenzung der Versuchsparameter aus den vorliegenden Erkenntnissen.

Diskontinuierlicher Versuchsbetrieb zur Prozessoptimierung

Nach erfolgtem Aufbau der beiden Versuchsstände zur Granulation und Filtration bei der MFPA und Durchführung der prozessspezifisch durchgeführten Versuche, wurden die Prozessstufen zusammenhängend betrachtet. Ziel war dabei eine erste Prozessskalierung von der Chargengrößen von 100 – 1.000 g im Labormaßstab in den Bereich von 1 – 10 kg. Basis waren dabei die zuvor abgeleiteten Rezepturen, die hier in einer nächst größeren Prozessdimensionierung verifiziert werden sollten. Dabei galt es, geeignete Prozessparameter abzuleiten und die Handlingeigenschaften zu ermitteln, um vorab die Parameterbereiche für die Versuche an der zu errichtenden Versuchsanlage eingrenzen zu können. Der Fokus lag dabei insbesondere auf der Ermittlung des Verhaltens und der Einflussfaktoren bei Kreislaufführung.

So wurden mit der vorab ermittelten aschespezifisch notwendigen Säuremengen Kreislaufversuche mit zum Teil mehr als 20 Zyklen durchgeführt, wobei das abgetrennte Prozesswasser im nächsten Zyklus eingesetzt wurde. Als Aufschlusssäuren wurden Salpetersäure und Schwefelsäure eingesetzt. Bei den Versuchen wurde die Veränderung der Suspension (Viskosität, Temperatur, gelöste Bestandteile) und des Filtrationsverhaltens (Filtrationszeit, notwendiger Pressdruck, Filtrationswirkung) über mehrere Zyklen ermittelt. Zudem wurden im erzeugten Filterkuchen die Menge und Löslichkeit an Phosphat bestimmt. Problematisch war die Neigung der Suspension zur Gelierung. Hier waren zusätzlich umfangreiche Untersuchungen notwendig, um mögliche Ursachen zu ermitteln, daraus Lösungen abzuleiten und zu erproben. Für die untersuchte Salpeter- und Schwefelsäure konnte letztlich jeweils eine prozesstechnische Lösung gefunden werden, die zu einem stabilen Kreislaufbetrieb über mindestens 20 Zyklen führte.

Die dabei erzeugten Filterkuchen wurden in den Granulationsschritt überführt. Dort erfolgten systematische Voruntersuchungen zur Veränderung des Granulationsverhaltens bei fortschreitender Zyklenanzahl und zum Einfluss einzelner Nährstoffkomponenten im System Filterkuchen aus Asche/ Säure auf das Granulationsverhalten und die resultierenden Granulateigenschaften. Durch diese Basisuntersuchungen konnten Erkenntnisse abgeleitet werden, wie sich zum einen das Granulationsverhalten mit der Zyklenanzahl verändert, wobei sich nach 10 – 15 Zyklen ein weitgehend stabiles System einstellte. Zum anderen resultierten Erkenntnisse dazu, welche Nährstoffkomponenten in welchen Konzentrationen einsetzbar sind und wie sie den Granulationsprozess bzw. die Eigenschaften verändern. Da für eine Nährstoffart (wie z. B. Kalium) immer mehrere Nährstoffkomponenten prinzipiell möglich sind (hier z. B. K_2SO_4, KCl) kann diese nun gezielt je nach Anforderung ausgewählt werden.

Anschließend an diese Voruntersuchungen erfolgten erste Untersuchung mit den abgeleiteten konkreten Rezepturen. Für jede Rezeptur mussten dabei die erforderlichen Granulationsbedingungen (Drehgeschwindigkeit, Aufgabemenge, Wassermenge) ermittelt werden. Die erzeugten Granulate wurden auf Ihre Form und Formstabilität untersucht und anschließend getrocknet. An den getrockneten Proben erfolgte die Untersuchung zur Bruchfestigkeit und auch zur Löslichkeit. Im Ergebnis konnten für diese ersten Rezepturen hier eine Parameterfestlegung für den Granulationsprozess als Vorgabe für die noch ausstehenden Versuche an der Versuchsanlage im kontinuierlichen Prozess abgeleitet werden.

2.4 Laborative Schwermetallabtrennung

Untersuchungen zur elektrochemischen Schwermetallabreicherung

Da es, unabhängig von der rechtlichen Bewertung der Schwermetallabtrennung, Anspruch der DREISASTS – Konzeption ist, einen möglichst hohen Anteil an Schwermetallen abzutrennen, war an der Versuchs- und Demonstratoranlage zwingend ein Modul zur Schwermetallabreicherung zu implementieren. Verfolgt wurden dabei zunächst die zwei Verfahrensansätze – zum einen die Sulfidfällung und zum anderen eine elektrochemische Abscheidung. Die Sulfidfällung ist dabei ein gängiges Verfahren zur Abtrennung von Schwermetallen aus Lösungen. Vorteil der Sulfidfällung gegenüber der ebenfalls weit verbreiteten Hydroxidfällung ist, dass die Fällung bei wesentlich niedrigeren pH-Werten erfolgen kann. Bei der elektrochemischen Abscheidung werden die Elektroden so ausgewählt und gesteuert, dass gelösten Schwermetalle an die Kathode wandern und sich dort abscheiden. Nach ausreichender Reaktionszeit kann die zu reinigende Flüssigkeit von der Kathode getrennt und die Abscheidung an der Kathode abgelöst werden.

Die vor Projektbeginn vorliegenden Erfahrungen zur elektrochemischen Abscheidung im PONTES PABULI – VERFAHREN (jedoch nur in stationären Versuchen) implizierten, dass diese Methode für das Verfahren möglicherweise geeignet sein könnte. Mit gezielten Vorversuchen im kontinuierlichen Durchfluss sollte im Rahmen dieses Projektes diese zunächst im Labormaßstab überprüft werden. Dazu wurde eine Durchflusszelle konstruiert. Die Planung dieser Durchflusszelle erfolgte gemeinsam mit dem Projektpartner MFPA, die die Zelle dann gemäß der Planung aufbaute. An der konstruierten Durchflusszelle erfolgten anschließend systematische Untersuchungen. Dazu wurde Prozesswasser aus der Fest/Flüssig-Trennung der Zelle im Durchfluss zugeführt. Die Stromstärke in der Zelle wurde bei den Versuchspunkten variiert, um den Einfluss auf die Schwermetallabtrennung zu bewerten. Die Versuche wurden bei der bzw. durch die MFPA durchgeführt. Pontes pabuli begleitete und bewertete die Versuche.

Bei diesen Versuchen konnte nur eine geringe Abtrennrate erreicht werden. Mögliche Ursachen dafür können sehr unterschiedlich sein, z. B. zu geringe Stromstärke, ein zu weiter Abstand zwischen den Kathoden, zu geringe Kathodenfläche, ungeeignetes Kathodenmaterial. Da bei diesen Versuchen auch insbesondere im Vergleich zur parallel untersuchten sulfidischen Fällung geringe Abtrennrate erreicht wurde, wurden weiterführende Versuche zur elektrochemischen Abreicherung eingestellt und die sulfidische Fällung als Methode der Schwermetallabreicherung für die Versuchsanlage festgelegt. Entsprechend wurden die weiterführenden Untersuchungen zur Sulfid-Fällung im PONTES PABULI – VERFAHREN zunächst verstärkt fokussiert. Dadurch konnten die belastbare Voraussetzungen für die sich daran anschließenden Versuche zur Schwermetallabtrennung an der Versuchsanlage gelegt werden.

Untersuchungen zur sulfidischen Schwermetallabreicherung

Mit der sulfidischen Fällung bietet sich eine geeignete Möglichkeit der Schwermetallabreicherung unter den spezifischen Bedingungen des PONTES PABULI – VERFAHRENS. Dies begründet sich einerseits darin, dass bei der Sulfidfällung die Schwermetalle sehr gut selektiv vom Phosphat ausgefällt werden können. Anderseits kann eine Sulfidfällung im verhältnismäßig sauren pH-Wertbereich erfolgen. Dies hat erhebliche Vorteile, da so der pH-Wert des Prozesswassers zur Schwermetallfällung nicht (wesentlich) angehoben werden und bei der Rückführung zum nächsten Lösebatch nicht wieder aufwendig abgesenkt werden muss. Das spart erhebliche Mengen an Chemikalien.

Im Rahmen des Projektes wurden systematische Untersuchungen zum sulfidischen Fällungsverhalten an standortspezifischen Aschen, insbesondere auch vergleichend zwischen Aschen aus der Staubfeuerung und Wirbelschichtverbrennung, durchgeführt. So wurden zunächst in Voruntersuchungen verschiedene sulfidische Fällungsmittel (Natriumsulfid, Natriumhydrogensulfid, Thioharnstoff, Thioacetamid, Ammoniumthiosulfat, TMT15) auf ihre Wirkung im spezifischen Suspensionssystem untersucht. Diese verschiedenen Fällungsmittel sind dabei im Grunde als sehr gute Fällungsmittel bereits in Anwendung, zeigten jedoch in dem spezifischen System sehr unterschiedliche Wirkung. Insbesondere für die hier anvisierte Anwendung in sehr niedrigen pH-Wertbereichen konnten nur 2 der 6 getesteten Fällungsmittel eine überzeugende Wirksamkeit nachweisen, woraus im Kostenvergleich ein Fällungsmittel favorisiert wird. Nachfolgend wurden vielschichtige Versuche mit den standortspezifischen Aschen und unterschiedlichen Säuren zur Ermittlung von Wirkungszusammenhängen realisiert. In der Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Fällungsversuche beispielhaft für eine Versuchsserie dargestellt, bei denen zu einer Aufschlusslösung unterschiedliche Mengen Fällungsmitteln zugegeben wurden. Der pH-Wert wurde hierbei zunächst mit 1,5 gewählt, weil in diesem Bereich erfahrungsgemäß das Phosphat noch nicht ausfällt, eine Sulfidfällung jedoch bereits erfolgen kann. Ziel der Versuche war es, eine vom Phosphat selektive Fällung der Schwermetalle zu erreichen. Dargestellt ist jeweils die Veränderung der Schwermetallkonzentration in Bezug auf die Ausgangslösung (Abgetrenntes Filtrat aus der Fest/Flüssig-Trennung) für die jeweils eingesetzten Mengen an Fällungsmittel.

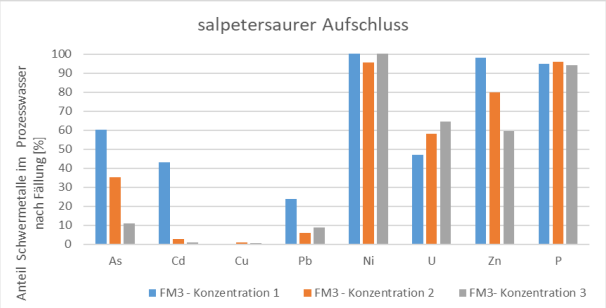


Abbildung 8: Beispiel Sulfidfällung im salpetersauren System (Batch-Vorversuche)

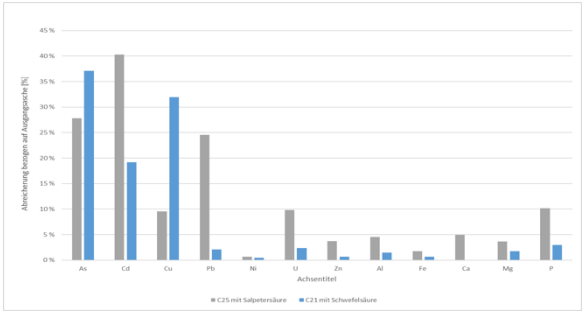


Abbildung 9: Vergleich der Element-Löslichkeit bei Einsatz von Salpeter- bzw. Schwefelsäure in Zyklenversuchen

Mit diesen Voruntersuchungen konnten bereits umfassende Zusammenhänge zwischen den Abtrennraten und den Einflussfaktoren ermittelt werden. Aus den herausgestellten Abhängigkeiten in den Batch-Versuchen und deren technischen und wirtschaftlichen Evaluierung wurden Versuche zur Kreislaufführung geplant und durchgeführt. Diese Kreislaufversuche waren insofern zwingend, weil im PONTES PABULI – VERFAHREN nach der Lösereaktion ein Teil der flüssigen Phase der Suspension abgetrennt und das abgetrennte Prozesswasser dem nächsten Löse-Batch zurückgeführt wird. Durch die Rückführung des Prozesswassers wird der Löseprozess beeinflusst, da mit dem Prozesswasser auch gelöste Bestandteile zurückgeführt werden. Durch die Rückführung bilden sich Kreisläufe der gelösten Komponenten aus, die es zu ermitteln galt. So auch, wie sich diese Kreisläufe auf das Löseverhalten der zugeführten Asche durch die Säure auswirken. Für die Versuche wurde im ersten Schritt wieder eine Suspension aus Wasser, Säure und Asche nach definierter Zusammensetzung hergestellt. Nach der eingehaltenen Reaktionszeit wurde der Feststoffgehalt der Suspension abgetrennt und dem Filtrat das Sulfid als Fällungsmittel zugegeben. Nach einer erneuten Reaktionszeit wurde dieses Gemisch erneut einer mechanischen Fest-Flüssig-Trennung (Zentrifuge) im Labor zugeführt. Das entstandene Prozesswasser wurde dabei dem nächsten Zyklus statt

des im Zyklus 1 verwendeten Wassers zugegeben. Dieser Ablauf wurde mindestens 10x wiederholt. Dabei wurden in jedem Zyklus die Prozessparameter ermittelt und die gezogenen Proben anschließend analysiert. Diese Untersuchungen erfolgten an unterschiedlichen Modellaschen. Im Vergleich zu den grundlegenden Batchversuchen wurden in diesen Kreislaufversuchen folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Es bilden sich je nach Versuchsspezifik nach 6 – 8 Zyklen stabile Gleichgewichtskreisläufe, d. h. die Konzentration im Prozesswasser erreicht ein stabiles Niveau und steigt nicht weiter an.
- Bei geeigneter Prozessführung kann in allen Zyklen ein sehr hoher Phosphoranteil von über 90 % aus der Asche gelöst werden. Auch der Anteil der im Zyklus herausgelösten Schwermetalle kann innerhalb der versuchsbedingten Schwankungsbreite stabil gehalten werden.
- Dabei kann in den Kreislaufversuchen im Vergleich zu den Batch-Versuchen eine gleiche Löslichkeit (Phosphat und Schwermetalle) aus der Asche mit deutlich geringer Säure-Konzentration (z. T. bis >30 %) erreicht werden. Dies steht mit der Rückführung des Prozesswassers und der darin enthaltenen, noch nicht abreagierten Säurekomponenten in einem eindeutigen Verhältnis.

Abbildung 9 zeigt vergleichend die abgetrennten Schwermetallmengen im System Salpeter- und Schwefelsäure für eine Modellasche im stabilen Zyklenbetrieb nach 10 Zyklen an einem Beispiel. Die hier erzielten Abtrennraten sind dabei so hoch, dass die gesetzlichen Anforderungen zur Erfüllung der deutschen Düngemittelverordnung eingehalten werden. Grundsätzlich kann die Abtrennrate, falls aschespezifisch erforderlich, weiter gesteigert werden. Dies ist jedoch verbunden mit höheren Prozess- und Rohstoffkosten, was es entsprechend auch wirtschaftlich abzuwägen gilt. Diese Untersuchungen bildeten die Basis für die (klein-)technischen Versuche an der Versuchsanlage zur Schwermetallabtrennung.

Entwicklung einer Verfahrensoption zur Abtrennung schwerlöslicher Schwermetalle

Mit der sulfidischen Fällung können relevante Mengen an Schwermetallen selektiv vom Phosphat aus dem Prozesswasser im PONTES PABULI – VERFAHREN abgeschieden werden. Voraussetzung für die sulfidische Schwermetallabtrennung aus dem Prozesswasser gemäß Abbildung 10 ist, dass die Schwermetalle im Säureaufschluss gelöst wurden und nach der Fest/Flüssig-Trennung in gelöster Form vorliegen. Durch Art und Konzentration der eingesetzten Mineralsäure und die Steuerung des Löseprozesses kann dabei Einfluss auf die Quantität der im Prozesswasser gelöst vorliegenden Schwermetalle genommen werden. Schwermetalle, die schlecht löslich sind (wie Zink, Nickel), können über diese entwickelte Prozedur jedoch kaum abgetrennt werden. Die eingesetzte Menge an Mineralsäure beim Phosphataufschluss löst hier nur geringe Anteile dieser Schwermetalle, weshalb eine anschließende Separation aus dem Prozesswasser nur einen entsprechend geringen Anteil bezogen auf die Ausgangsasche abtrennt. Zwar könnte man die Menge an eingesetzter Mineralsäure (wesentlich) erhöhen und würde dadurch dann auch relevante Anteile an diesen Schwermetallen lösen, jedoch ist ein solch hoher Säureeinsatz wirtschaftlich kaum noch darstellbar und die anschließende Prozessführung wird erheblich erschwert.

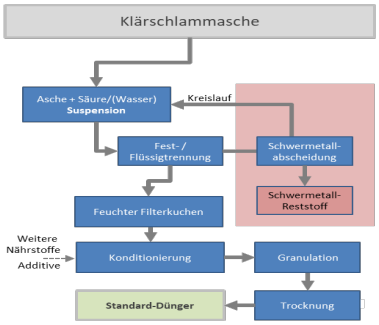


Abbildung 10: Schwermetallabreicherung im pontes pabuli Verfahren

Da ein relevanter Anteil der aus der Klärschlammverbrennung resultierender Aschen Gehalte an diesen schwerlöslichen Schwermetallen deutlich über den zulässigen Grenzwerten aufweist, wurde im Rahmen des Projektes eine zusätzliche bzw. alternative Abtrennprozedur wie folgt entwickelt, um zukünftig auch diese Aschen mit dem PONTES PABULI – VERFAHREN verwerten zu können: Zunächst wird analog zum PONTES PABULI – VERFAHREN eine Suspension aus Asche, (Prozess-)Wasser und Säure erzeugt. Die Art und Konzentration sind dabei so ausgerichtet, dass das Phosphat aus der Asche gelöst wird. Zur ausreichenden Reaktion zwischen der Säure als Reaktionsmittel und der Asche wird eine Inkubationszeit (Lösezeit) abgewartet. Nach der Inkubationszeit liegen in

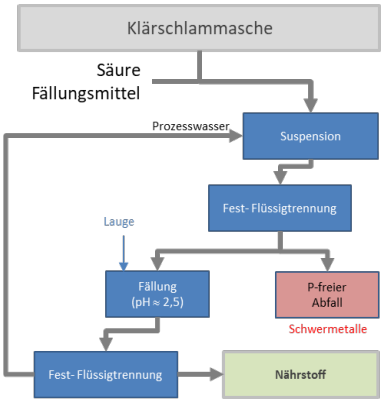


Abbildung 11: Abtrennprozedur für schwerlösliche Schwermetalle

der Suspension anteilig durch die Säure gelöste Schwermetalle und nicht gelöste Schwermetalle vor. Der Suspension wird deshalb ein geeignetes Schwermetallfällungsmittel in der Form und Art zugesetzt, dass die gelösten Schwermetalle (wie beispielsweise As, Cd) weitgehend ausfallen, dass gelöste Phosphat jedoch gelöst bleibt. Im nächsten Schritt wird die flüssige Phase als phosphathaltige, schwermetallarme flüssige Phase abgetrennt. Der verbleibende schwermetallhaltiger Filterkuchen wird aus dem Prozess ausgeschleust. Dieser Filterkuchen beinhaltet dabei zum einen die nicht durch die Säure gelösten Schwermetalle (wie z. B. weitgehend Pb, Ni, Zn), die bisher aufgrund ihrer schlechten Löslichkeit besonders kritisch bei der Abtrennung waren. Zum anderen befinden sich die durch die Säure gelösten, aber durch das Fällungsmittel gefällten Schwermetalle ebenfalls im Filterkuchen. Zur Abtrennung des Phosphates aus der phosphathaltigen, schwermetallarmen flüssigen Phase wird der pH-Wert erhöht, wodurch das gelöste Phosphat in eine feste Form ausgefällt wird. Dieses so ausgefällte Phosphat wird anschließend von der flüssigen Phase getrennt und bildet eine schwermetallarmes Nährstoffsubstrat. Die abgetrennte flüssige Phase wird bevorzugt dem Prozess zur Herstellung der Suspension zurückgeführt.

In experimentellen Versuchen mit dem Projektpartner MFPA wurden diese Prozessvariante und die Einflussparameter zunächst im Labormaßstab eingehend untersucht. Daraus resultierte eine geeignete Parametrierung für die Aufschlusssysteme mit Salpeter-, Schwefel- und Phosphorsäure zu dieser Verfahrensvariante. Zusammenfassend resultiert daraus, dass sich jeweils bezogen auf die Ausgangsasche

- mehr (zum Teil deutlich mehr) als 90 % aller Schwermetalle abtrennen und
- mehr als 80 % des Phosphates in das Nährstoffsubstrat überführen lassen.

2.5 Konzeption, Planung und Errichtung Versuchsanlage Phosphorrecycling

Auf Basis der gewünschten Spezifikation und Ausstattung wurde eine Konzeption für die Versuchsanlage durch pontes pabuli und VKD erstellt, welches eine Aufstellungsplanung, Prozessfließbild, Dimensionierung der Anlagenbauteile für Richtrezepturen, Konzept für Peripherie und eine Konzeptvorlage zur Abstimmung mit Genehmigungsbehörde umfasste. Diese Konzeption bildete die Basis für den Detailplanungs- und Genehmigungsprozess, der mit einem externen Kooperationspartner für die Ingenieursleistungen im Rahmen der Versuchsanlagenplanung realisiert wurde. So wurden gemeinsam geeignete Lieferanten für die Anlagenkomponenten gesucht und evaluiert, die erforderlichen Spezifikation der Anlagenkomponenten mit den Lieferanten abgestimmt und entsprechender Angebote eingeholt sowie die Detailplanung der Versuchsanlage durchgeführt. Nach Anlieferung der Komponenten erfolgte die Installation durch den Projektpartner VKD. Abbildung 12 bis Abbildung *15* zeigen die Aufbauphase der Versuchsanlage.



Abbildung 12: Containerhaus in Aufbauphase



Abbildung 14: Installierte Filterpresse an Versuchsanlage



Abbildung 13: Aufbau Mikrowellenbandtrockner



Abbildung 15: Versuchsanlage Ebene I

Im März 2022 erfolgte der Start der Inbetriebnahme. Dazu wurden schrittweise die einzelnen Prozessteile in Betrieb genommen und auf ihre Funktion geprüft. Pontes pabuli begleitete und unterstützte diesen Prozess, der federführend durch den Partner VKD durchgeführt wurde. Für die vereinzelt noch festgestellten Fehlfunktionen wurden gemeinsam Lösungen zur Fehlerbehebung bzw. prozesstechnische Anpassungen erarbeitet und nachfolgend umgesetzt. Im 3. Quartal 2022 wurde die Versuchsanlage erfolgreich in Betrieb genommen und es begannen daran die systematischen Untersuchungen zum PONTES PABULI – VERFAHREN.

2.6 Systematische Untersuchungen zur Ascheverwertung und Düngerherstellung

Nach der Inbetriebnahme begannen die systematischen Untersuchungen an der Versuchsanlage. Dabei wurde zunächst die Funktionsweise der einzelnen Verfahrensschritte getestet. Es konnten zunächst die Funktionsfähigkeit und Eignung aller Prozessschritte festgestellt und erste Erfahrungen im Anlagenbetrieb gesammelt werden. Nach dieser grundsätzlichen Funktionstestung wurden die Prozessschritte weiterführend einzeln intensiv untersucht. Im Fokus stand dabei zunächst das Scale-up durchgeführter Versuche aus dem Labor an der Versuchsanlage. Ermittelt wurde dabei, inwieweit die Prozessführung an der Versuchsanlage reproduzierbar ist. Dabei wurden punktuelle Abweichungen – beispielsweise bei der resultierenden Zusammensetzung und Eigenschaft des Prozesswassers in den Zyklenkreisläufen – ermittelt. Zur Aufklärung dieser Unterschiede wurden laborative Zusatzversuche durchgeführt, mit deren Erkenntnissen Anpassungen für den Versuchsbetrieb an der Versuchsanlage vorgenommen werden konnten. Im Ergebnis konnten die Einzelprozessschritte so an der Versuchsanlage verifiziert werden.

Schrittweise wurden dann die einzelnen Prozessschritte geclustert und zusammenhängend betrachtet. Hier stand die Funktionstestung der Prozessschnittstellen im Mittelpunkt. So wurde durch orientierende Vorversuche ermittelt, welcher Stoffeingangsparameterbereich für den jeweils folgenden Prozessschritt geeignet ist. Zudem wurde eine geeignete Steuerung des Prozesses zur jeweiligen Übergabe in den nächsten Prozessschritt ermittelt und als Prozedur festgeschrieben. Die Untersuchungen gingen anschließend schrittweise in Versuche über mehrere Stunden mit gleicher Rezeptur und möglichst stabilen Versuchsbedingungen über. Das ermöglichte eine weiterführende Verfahrens- und Stoffentwicklung und die Ermittlung weiterer Prozessdaten für einen stabilen Anlagenbetrieb.

Mit diesen systematischen Versuchen im Zyklenbetrieb über die gesamte Prozesskette mit unterschiedlichen Verbrennungsaschen und verschiedenen Aufschlusssäuren wurde ein Parametermatrix für den (klein-)technischen Prozess erarbeitet, die zu einer stabilen Prozessführung und zur anvisierten Erhöhung der Löslichkeit im erzeugten Produkt führt und so die Grundlagen für ein Scale-up in den Produktionsmaßstab legt. Beispielhaft zeigt Abbildung 16 für eine solche durchgeführte Zyklenuntersuchung mit einer Asche aus der Wirbelschicht-Monoverbrennung im Aufschlusssystem mit Schwefelsäure den Verlauf der Elementkonzentration im abgetrennten Prozesswasser, der im grundlegenden Verlauf so auch für andere Aschetypen und Aufschlusssysteme steht. Abbildung 17 zeigt dazugehörig die resultierende Neutral-Ammoniumcitratlöslichkeit im abgetrennten Filterkuchen über die Zyklenversuche.

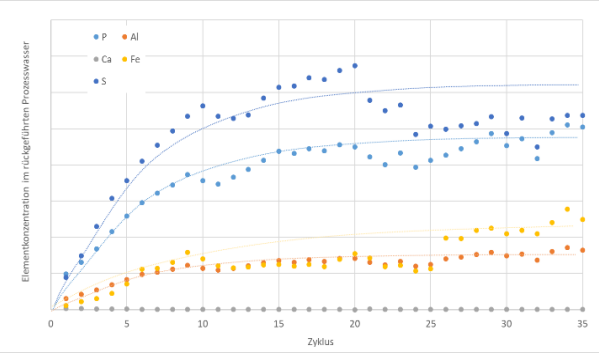


Abbildung 16: Verlauf der Elementkonzentration über die Zyklen

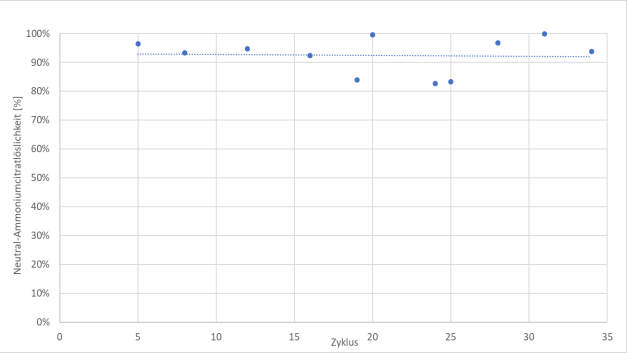


Abbildung 17: Verlauf der Neutral-Ammoniumcitratlöslichkeit über die Zyklen

Der Abbildung 16 ist zu entnehmen, dass die gelösten Bestandteile bei den ersten Zyklen zunächst ansteigen und laufen nach ca. 15 Zyklen in einen Gleichgewichtszustand ein. In diesem Gleichgewichtszustand werden so viele gelöste Bestandteile durch die am Feststoff anhaftende Flüssigkeit ausgetragen, wie durch die Asche/Säure-Reaktion nachgelöst werden. Aus den Versuchen mit unterschiedlichen Mineralsäuren resultiert dabei die identische Trendaussage. Ein Unterschied ergibt sich im Absolutwert der Konzentration, da unterschiedliche Säuren unterschiedlich stark die verschiedenen Phasen lösen.

Neben der Veränderung der Konzentration der gelösten Bestandteile wurde bei diesen Versuchen auch analysiert, inwieweit sich diese Art der Kreislaufführung auf die gewünschte Erhöhung der Löslichkeit auswirkt. Dazu zeigt Abbildung 17 die ermittelte Neutral-Ammoniumcitratlöslichkeit des Phosphates in den abgetrennten Filterkuchen der entsprechenden Zyklen beispielhaft für einen Versuch mit Einsatz von Schwefelsäure. Die Phosphatlöslichkeit des abgetrennten Feststoffs wurde dabei deutlich gegenüber der Ausgangsasche erhöht. Die Erhöhung der Neutral-Ammoniumcitratlöslichkeit entspricht dabei weitgehend den stationären, laborativen Vorversuchen. Damit bestätigt sich, dass die resultierende Ergebnis- und Parametermatrix aus den stationären Löseversuchen eine brauchbare Basis für die Ableitung von Verfahrensparametern und die Anpassung der Prozessführung auf Ascheschwankungen oder verschiedene Aschetypen als schneller Vortest ist. Auch zeigen die Versuche, dass bei geeigneter Prozessführung die Neutral-Ammoniumcitratlöslichkeit über die Zyklen weitgehend stabil bleibt.

Diese Ergebnisse gemäß Abbildung 17 resultieren in vergleichbarer Weise für auch für die anderen untersuchten Aufschlusssysteme. Für die Prozessführung ergibt sich hieraus zunächst, dass bereits nach wenigen Zyklen eine Kreislaufführung scheinbar stabil ist. Dies deutet auf eine vergleichsweise kurze Einfahrphase bis zum stabilen Prozessbetrieb hin. Damit sind Start- und Stopp-Phasen bis zur gleichmäßigen Produktqualität wahrscheinlich gering und ermöglicht so auch günstig gegebenenfalls Produktwechsel.

Mit diesen Versuchen konnte der Nachweis erbracht werden, dass die P-Löslichkeit durch Mineralsäuren im Kreislaufversuch wesentlich erhöht werden kann. Im Versuch wurde gezeigt, dass Ammoniumcitratlöslichkeiten oberhalb 90 % bei Kreislaufführung erreicht werden können, was deutlich über dem Meilenstein 1 mit der Forderung von größer 60 % liegt.

Alternative Abtrennprozedur im Kreislaufversuch an Versuchsanlage

Neben den Untersuchungen zum PONTES PABULI – GRUNDVERFAHREN wurden an der Versuchsanlage auch Skalierungsversuche zu der neu entwickelten Verfahrensoption zur Abtrennung schwerlöslicher Schwermetalle durchgeführt. Auf Basis der laborativen Voruntersuchungen zur Kreislaufführung mit der alternativen Abtrennprozedur für die Schwermetalle erfolgten ausgewählte Versuche mit den Aufschlusssysteme mit Schwefelsäure, mittels Salpetersäure und in Kombination mit Schwefel- und Salpetersäure an die Versuchsanlage in Markranstädt mit dem Verbundpartner VKD. Dazu wurde die Verschaltung der Prozesskomponenten an der Versuchsanlage an die veränderte Prozessführung im Vergleich zum Grundverfahren angepasst. Dann wurden die in den Laborversuchen optimierten Prozessabläufe zunächst in diese Skalierungsstufe übertragen und anschließend jeweils mindestens 20 Zyklen durchgeführt.

So wurden beispielsweise die pH-Wertbereiche in dieser Skalierungsstufe präzisiert. Abbildung 18 zeigt hierzu beispielhaft die Ergebnisse aus den Optimierungsversuchen zur pH-Wertanpassung für die Ausfällung der mitgelösten Schwermetalle, damit diese möglichst selektiv vom Phosphat gefällt werden. Dabei ergeben sich für den Aufschluss mit Schwefelsäure und Salpetersäure erhebliche Unterschiede, die entsprechend je nach Prozessgestaltung zu beachten sind.

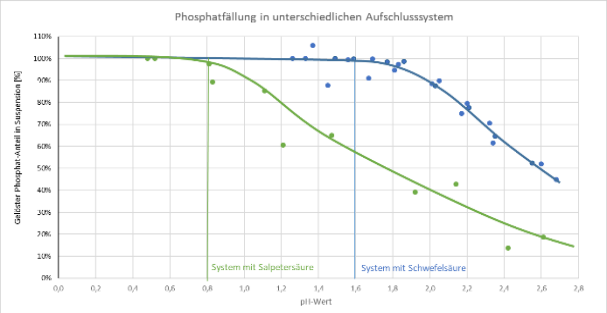


Abbildung 18: Fällungsbereich von Phosphat bei unterschiedlichen Aufschlusssystemen

Für die Aufschlusssysteme mit Schwefelsäure und kombinierter Schwefel-/Salpetersäure war die Übertragung in den (klein-)technischen Maßstab erfolgreich. Die Prozessführung konnte über die gesamte Zyklenanzahl stabil durchgeführt werden. Festzuhalten ist dabei, dass sich analog dem Verlauf im Grundverfahren nach einer Einlaufphase ein Plateau der Konzentrationswerte im versuchsbedingten Schwankungsbereich einstellt.

Neben den pH-Wertbereichen wurden so die erforderlichen Inkubationszeiten für die Reaktion ermittelt und unterschiedliche Fällungsmittel vergleichend getestet. So konnten kausale Zusammenhänge zwischen den relevanten Prozessparametern und der resultierenden Produktqualität ermittelt und eine Stoffbilanzierung erstellt werden. Final resultiert aus diesem Prozessstrang ein sehr schwermetallarmes, nährstoffreiches Düngersubstrat und ein schwermetallhaltiger, phosphatarmer Reststoff. Die chemische Zusammensetzung wurden für die jeweiligen Zyklen der unterschiedlichen Versuchsserien analytisch ermittelt und bilanziell bewertet. Nachfolgende Tabelle 2 zeigt die typischerweise resultierende Zusammensetzung für das Nährstoffsubstrat und den Reststoff für das System mit Schwefelsäure.

		Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	NAC-löslicher Anteil *
Anteil im Abfall	[%]	7 - 9	25 - 30	< 1	< 1	25 - 30	1 - 3	25 - 30	6 - 10	50 - 60
Anteil im Produkt	[%]	10 - 12	2 - 4	<1	1	22 - 27	1 - 2	25 - 30	30 - 35	90 - 95

Tabelle 2: Hauptkomponenten von Reststoff und Nährstoffsubstrat im Aufschlusssystem mit Schwefelsäure

* NAC – Neutral-ammoniumcitrat-löslicher Anteil als Maß für die erwartete Bioverfügbarkeit des Phosphates (bezogen auf P_{ges})

Der größte Anteil des Phosphates aus der KSA wird in das Nährstoffsubstrat überführt. Dabei besteht derzeit noch Optimierungspotential, da mit der (klein)technischen Filterpresse in der Versuchsanlage typbedingt ein noch vergleichsweise hoher Restfeuchtegehalt im Reststoff verbleibt, womit noch zu viel gelöstes Phosphat ausgetragen wird. Im großtechnischen Betrieb werden solche Filterkuchen typischerweise gespült/ gewaschen, wodurch die Phosphataustrag über die Restfeuchte weitgehend unterbunden werden kann. Dennoch wurden so in den durchgeführten Versuchen bereits 75 – 85 % des Phosphates aus der KSA in das Nährstoffsubstrat überführt. Nachfolgende Tabelle 3 zeigt ergänzend noch die Schwermetalle im abgetrennten Reststoff und dem Nährstoffsubstrat bezogen auf den Input mit der KSA.

	As	Cd	Cu	Pb	Ni	U	Zn	P
	[%]*	[%]*	[%]*	[%]*	[%]*	[%]*	[%]*	[%]*
Im Abfall	90 - 95	95 - 90	95 - 99	95 -99	85 -90	60 -70	75 - 85	15 -25
Im Produkt	5 -10	5 - 10	1 - 5	1 - 5	10 - 15	30 - 40	15 - 25	75 - 85

Tabelle 3: Bilanz der Schwermetalle und Phosphor im Aufschlusssystem mit Schwefelsäure * bezogen auf Inputasche

Die Wirksamkeit der Schwermetallabtrennung kann damit eindrucksvoll belegt werden. Sowohl die schwerlöslichen (wie Ni, Zn), als auch die leicht löslichen (wie As, Cd, Cu) Schwermetalle, werden im sehr hohen Maße abgetrennt. Dies belegt auch, dass die vorgeschaltete sulfidische Fällung der mitgelösten Schwermetalle trotz des sehr niedrigen pH-Werts ausreichend wirksam ist.

Verarbeitung und Granulation des Filterkuchens

Erste Versuche an der Versuchsanlage führten zu technischen Schwierigkeiten im Handling und der Verarbeitung der Filterkuchen, da diese insbesondere im System mit Schwefelsäure sehr klebrig sind.

Zur Lösung des Verarbeitungs- und Handlingprobleme wurden die möglichen Lösungswege einer Reduzierung der Klebrigkeit durch Zwischentrocknung und eine direkte Verarbeitung in einem Intensivmischer parallel verfolgt. Als zielführend erwies sich dabei die direkte Verarbeitung im Intensivmischer. Durch Zuführung und intensive mechanische Beanspruchung des erzeugten Filterkuchen in einem Intensivmischer

gelingt bei geeigneter Restfeuchte eine gute Desagglomeration weitgehend auf die Partikelgröße des ursprünglichen festen Rückstands der Suspension. Es resultierte ein sehr feines erdfeuchtes Pulver (Abbildung 19). Anschließend kann diesem erdfeuchten Pulver eine kleine Menge Wasser zugeführt, wodurch die Granulation einsetzte. Je nach Menge des zugeführten Wassers und den eingestellten Granulationsparametern (wie Zeit, Rotationsgeschwindigkeit) gelang es auch am Intensivmischer, die gewünschte Grüngranulatgröße einzustellen. Somit konnten nicht nur die Verarbeitungsschwierigkeiten gelöst, sondern gleichzeitig auch eine Granulation ohne Zwischenschritt in einer Prozesseinheit (Intensivmischer) erreicht werden, was den Verarbeitungsprozess erheblich vereinfachte.



Abbildung 19: Granulationsstufen beispielhaft für Filterkuchensystem mit Schwefelsäure

Mit systematischen Versuchen wurden als wesentliche Parameter für diesen kombinierten Homogenisierungs- und Granulationsprozess im Intensivmischer geeigneter Konsistenzbereiche (also im Wesentlichen Festigkeit, Klebrigkeit und Wasseranteil des Filterkuchens) ermittelt. Anhand von Filterkuchenmuster aus der Versuchsanlage wurden anschließend Prozeduren und Möglichkeiten erarbeitet, wie die resultierenden Filterkuchen aus der Fest/Flüssigtrennung der Membranfilterpresse konditioniert werden müssen, um den Konsistenzbereich für die Verarbeitung zu erreichen. Hierzu wurden beispielsweise der Filterkuchen (anteilig) vorgetrocknet oder geeignete, inerte Stoffe hinzugefügt. Zudem wurde der Einfluss der Zugabe von Nährstoffkomponenten zum Filterkuchen auf das Verarbeitungs- und Granulationsverhalten bestimmt. Hieraus resultieren Erkenntnisse, welche Nährstoffkomponenten in welchen Mengen dem System zuführbar sind und wie sich dadurch das Verarbeitungs- und Granulationsverhalten ändert bzw. gezielt einstellen lässt. Dies bildet nun den technischen Einsatzrahmen von Nährstoffkomponenten in der Rezeptur über diese Verarbeitungs- und Granulationstechnologie.



Abbildung 20: Installierter Intensivmischer an Versuchsanlage

Mit diesen systematischen Untersuchungen konnten geeignete Rezepturen für die unterschiedlichen Aufschlusssystemen erarbeitet werden. Auf dieser Basis stand die Skalierung dieser Verfahrenslösung an die Versuchsanlage. Dazu wurde (nachträglich) ein Intensivmischer in entsprechender Dimensionierung für die Versuchsanlage beschafft und installiert. Anschließend erfolgten daran Übertragungsversuche aus dem Labormaßstab in diese Skalierungsgröße.

Zusammenfassend gilt aus dem Skalierungsversuch festzustellen, dass die am Labor-Granuliermischer erzielten Versuchsergebnisse im Skalierungsmaßstab 1:10 bestätigt werden konnten. Die am Labor-Intensivmischer erarbeiteten Parametersätze (wie Rotorgeschwindigkeit, Granulationsdauer, Wassergehalt etc.) zur Erzeugung von brauchbaren Granulaten waren mit entsprechendem Skalierungsfaktor nahezu identisch am Intensivmischer im Technikum anwendbar. Daraus kann erwartet werden, dass auch die Vielzahl der anderen Granulationsversuche am Labor-Intensivmischer (z.B. für NP, PK, NPK – Düngerrezepturen) weitgehend in dieser Form in den Technikumsmaßstab übertragbar sind.

Fraktionierung und Verarbeitung von Über-/ Unterkorn

Aus den Granulationsversuchen resultiert ein Grüngranulat, welches nachfolgend in ein getrocknetes, auf die Zielgröße (2 – 5 mm) fraktioniertes Düngergranulat als Endprodukt zu überführen ist. Das bei der Fraktionierung anfallende Über- und Unterkorn soll dem Granulationsprozess in aufbereiteter Form wieder

zurückgeführt werden. Die technologische Verschaltung der dazu notwendigen Prozessschritte Trocknung und Fraktionierung soll dabei möglichst effizient gestaltet werden. Da die ermittelte Ausbeute an Gutkorn (2 – 5 mm) im Intensivmischer bei 60 – 70 % lag, heißt das, Über- und Unterkorn liegen voraussichtlich im Bereich 30 – 40 %. Für die Prozessverschaltung von Trocknung/ Fraktionierung des erzeugten Grüngranulates und Rückführung des aufbereiteten Unter- und Überkorns ergeben sich grundsätzlich die beiden folgenden Verfahrensvarianten:

	1	2
Varianten	Zunächst werden die Grüngranulate getrocknet und anschließend diese so getrockneten Granulate fraktioniert. Das dabei abgetrennte Über- und Unterkorn wird aufgemahlen und dem Granulationsprozess zurückgeführt.	Das erzeugte Grüngranulat wird zunächst fraktioniert. Das abgetrennte Gut-Korn wird anschließend getrocknet und das (angetrocknete) Über- und Unterkorn wird dem Granulationsprozess zugeführt.
Vorteil:	▪ Die Fraktionierung von getrockneten Granulaten ist technologisch einfacher.	▪ Geringerer Energieaufwand für die Trocknung; Leichtere Aufbereitung von Über- und Unterkorn.
Nachteil:	▪ Energieaufwand für die Trocknung größer, da das gesamte Kornband getrocknet werden muss ▪ Die Aufmahlung von Über- und Unterkorn ist energieintensiver	▪ Gefahr der Verstopfung der Siebe ▪ Nachsiebung erforderlich

Welche Variante der Prozessführung hinsichtlich technischer Prozessstabilität und Energieeinsatz empfehlenswert ist, hängt maßgeblich von resultierenden, materialspezifischen Grüngranulat(handling)eigenschaften (wie Verteilung Kornband, Festigkeit, Restfeuchte etc.) und den gewünschten Produkteigenschaften (wie Ziel-Granulatgröße) ab. Zu einer ersten orientierenden Einschätzung, ob eine Fraktionierung von erzeugten Grüngranulaten in den hier vorgegebenen Siebschnitten überhaupt möglich ist, wurden Vorversuche im Labormaßstab durchgeführt. Aus diesen laborativen Versuchen resultierte, dass zumindest das Überkorn wahrscheinlich bereits aus dem (ungetrockneten) Grüngranulat abgesiebt und anschließend direkt im Intensivmischer ohne weitere Aufbereitung verarbeitet werden könnte.

An dem Rüttelsieb an der Versuchsanlage (→

Abbildung 21) wurde das Siebverhalten der in den Skalierungsversuchen erzeugten Grüngranulate (System mit Phosphor- und Schwefelsäure) untersucht. Dieses Sieb war mit einem 5 mm und 2 mm Sieb ausgerüstet. Dabei sind unterhalb der jeweiligen Siebe Vibrationskugeln angebracht (→

Abbildung 21; rechtes Bild), die während des Siebprozesses permanent an den Siebboden stoßen und so ein Zusetzen des Siebes verhindern sollen.



Abbildung 21: Rüttelsieb Versuchsanlage

Die durchgeführten Versuche belegen, dass das gesamte Grüngranulat bei diesen Versuchen problemlos fraktioniert werden konnte. Nach Versuchsende wurden weder auf dem 5 mm noch dem 2 mm Sieb Verklebungen festgestellt. Die Vibrationskugeln wirkten zumindest bei den Untersuchungen einer Siebzusetzung entgegen. Aus diesen Versuchsergebnissen lässt sich zunächst klar vermuten, dass auch die Abtrennung des Unterkorns aus dem Grüngranulat wahrscheinlich möglich ist. Weiterführend wurden anschließend mögliche Varianten der Rückführung des abgetrennten Über-/ Unterkorn im kleintechnischen Maßstab untersucht. Dabei wurden festgestellt, dass das abgetrennte Über-/Unterkorn aus dem ungetrockneten Grüngranulat ohne weitere (separate) Aufbereitung (z. B. Mahlung, Zerkleinerung) direkt wieder dem Granulationsprozess im Intensivmischer zugeführt werden kann. Die Scherintensität des Intensivmischers reichte aus, um das Über-/Unterkorn im Intensivmischer so aufzumahlen, dass es sich zur erneuten Granulation eignet.



Abbildung 22: (links) 2 bzw. (rechts) 5 mm Sieb nach Versuchsende



Abbildung 23: Zerkleinerung von Über-/ Unterkorn im Intensivmischer

Anschließende Untersuchungen belegten, dass dieses so aufbereitete Über- und Unterkorn als Teil der Rezeptur problemlos granuliert werden kann. Festgestellt wurde dabei, dass die ermittelten Granulationsparameter und dabei insbesondere die Menge an Flüssigkeit weitgehend identisch dem Ablauf ohne Über-/ Unterkorn übernommen werden kann, da sich das Über-/ Unterkorn beim Granulationsprozess weitgehend inert verhält. Damit bietet sich die Möglichkeit, dass das abgetrennte Über- und Unterkorn aus dem Grüngranulat ohne weitere Aufbereitung/ Aufmahlung direkt zum nächsten Batch für die Aufschluss- und Granulationsreaktion geführt wird.

Untersuchung der Granulateigenschaften

Die Granulatfestigkeit ist eine wichtige Handlingeigenschaft für Dünger. Zum einen muss sie ausreichend hoch sein, damit beim Transport, dem Handling und dem Ausbringen möglichst wenig Abrieb/ Bruch entsteht. Insbesondere beim Ausbringen auf dem Feld durch Streuwagen besteht kurzzeitig eine sehr hohe mechanische Beanspruchung der Granulate auf der Streuscheibe. Bei zu geringer Granulathärte werden einzelne Granulate zerbrochen oder gar vollständig in Staub zerkleinert. Dadurch würde die Dosiermenge schwanken, die Wurfweite reduziert und ein gleichmäßiges Ausbringen entsprechend nicht möglich sein. Die Erfahrungswerte zum Erhalt der Granulatstruktur mit heutiger Ausbringtechnik fordern eine Granulatfestigkeit von mindestens 3 daN, besser über 5 daN (→ DLG-Merkblatt 445 - Einsatz von Mineraldüngerstreuern). daN steht dabei für „deka Newton“, 1 deka Newton entspricht 10 Newton, wobei Newton die internationale Maßeinheit (SI) für die physikalische Größe „Kraft“ ist. Gemeinsam mit den Verbundpartnern wurde die Granulatfestigkeit ausgewählter Muster beispielhaft bestimmt und bewertet. Zusammenfassend gilt es festzustellen, dass die erzeugten Granulate oberhalb der geforderten Festigkeit liegen. Dabei zeigen die Granulate zwischen den verschiedenen, aber auch innerhalb eines Aufschlusssystems eine Variationsbreite der Festigkeit. Die Einflussparameter (Art und Anteil der Aufschlusssäure und der Nährstoffkomponenten) konnten mit diesen Untersuchungen ermittelt werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Festigkeit der Granulate bei Bedarf anzupassen.

Damit zeigen die erzeugten Düngergranulate eine ausreichend hohe Einzelkornfestigkeit. Zu klären galt es, ob die Löslichkeit insbesondere von Phosphat durch diese Granulatfestigkeit negativ beeinflusst wird, da die Festigkeit auch mit dem Auflöse- bzw. Zerfallsverhalten auf dem Feld im Zusammenhang steht und hohe Festigkeiten tendenziell die Zerfallsgeschwindigkeit reduzieren wird. In den ersten dazu durchgeführten Untersuchungen mittels der Standard-Extraktionstests konnten hohe Phosphatlöslichkeiten nachgewiesen werden. Im Rahmen dieser standardisierten Testmethoden erfolgt die Extraktion des in Wasser löslichen Phosphors (P) gemäß DIN EN15958:2011 und die Extraktion des in neutralem Ammoniumcitrat löslichen Phosphors (P) gemäß DIN EN15957:2011. Um das Löseverhalten von Phosphat anwendungsnäher zu untersuchen, wurden die Standardmethode zur Bestimmung der Wasser- und NAC-Löslichkeit von Phosphat gemeinsam mit dem Projektpartner MFPA wie folgt angepasst: Die Granulate wurden für die Untersuchung nicht aufgemahlen, sondern in der Granulatform belassen. Diesen Granulaten wurde analog der Standard-Testbedingungen das flüssige Lösemedium (Wasser bzw. NAC) zugeführt. Statt des permanenten Schüttelns laut Standard-Test wurden die Proben ruhend gelagert. Lediglich direkt vor der Probennahme der überstehenden Lösung wurde die Probe kurz aufgeschüttelt, um mögliche Konzentrationsgradienten in der überstehenden Lösung aufzulösen. Die entnommenen Proben wurden analysiert. Abbildung 24 zeigt den Versuchsaufbau. Visuell war dabei festzustellen, dass sich alle Granulate, also auch die kommerziellen Vergleichsprodukte, nach 14 Tagen nicht aufgelöst hatten, sondern weitgehend formstabil waren. Die experimentellen Untersuchungen und die Analytik erfolgten bei der MFPA, die Ergebnisbewertung durch pontes pabuli.

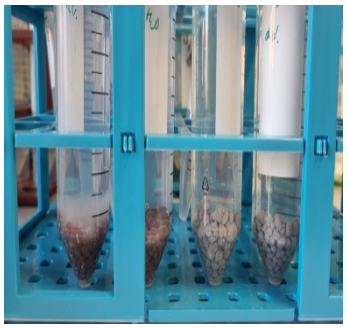


Abbildung 24: Untersuchung P-Löslichkeit aus erzeugten Granulaten

Abbildung 25 zeigt beispielhaft den ermittelten Verlauf der Phosphatfreisetzung aus einem Granulat, welches aus einem Filterkuchen aus dem Schwefelsäureaufschluss erzeugt wurde. Aufgetragen ist dabei im Diagramm die gelöste Menge an Phosphat in NAC in Bezug auf die im Granulat vorhandene Gesamtphosphatmenge über die Zeit. Vergleichend wurde zu dem die ermittelte NAC-Löslichkeit des Phosphates aus dem Standard-Test (gestrichelt) eingetragen.

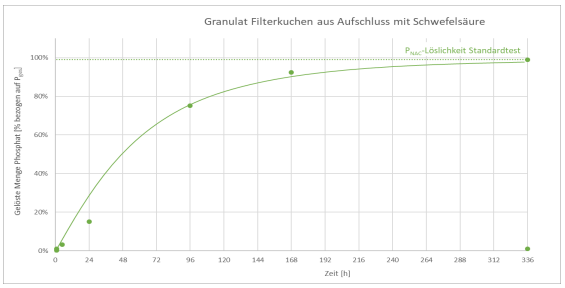


Abbildung 25: Beispielgranulat aus Filterkuchen mit Schwefelsäureaufschluss

Aus diesen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass obwohl die Granulate nach Untersuchungsende nicht zerfallen sind, das Phosphat dennoch wie im Standard-Bestimmungstest (an aufgemahlenen Pulvern) freigesetzt wird. Die P-Freisetzung scheint damit (weitgehend) unabhängig von der Granulatstruktur zu sein. Die Phosphatfreisetzung aus den untersuchten Granulaten erreichte zudem innerhalb weniger Stunden/ Tage den im Labor ermittelten Wert nach dem Standard-Bestimmungstest.

Neben der Festigkeit und dem Auflöseverhalten wurde die Düngewirkung ausgewählter Muster von den Projektpartnern IKTS und VKD in Pflanzversuchen untersucht. Diese Untersuchungen belegen, dass einige Muster eine sehr hohe Düngewirkung vergleichbar Trippelsuperphosphat (Kontrolle) aufweisen. Je nach Prozedur resultiert dabei eine unterschiedlich starke Düngewirkung. Entsprechend konnten aus den Untersuchungen zur Düngewirkung kausale Zusammenhänge zur Prozessführung abgeleitet werden.



Abbildung 26: Versuchsstand Pflanzversuche beim IKTS

2.7 Ableitung eines Grundkonzeptes zur großtechnischen Umsetzung im Produktionsmaßstab – Teilkonzeption einer P-Verwertungsanlage

Aus den Ergebnissen der systematischen Untersuchungen an der Versuchsanlage und energetischen, stofflichen und wirtschaftlichen Bilanzierung des Gesamtprozesses war final ein Grundkonzept für eine mögliche technische Produktionsanlage zu erstellen. Dazu wurde für den Teil der Phosphorrecyclinganlage nach dem PONTES PABULI – GRUNDVERFAHREN eine R&I-Fließbild und eine detaillierte Berechnungsmatrix (stoffstromspezifische Auslegungsberechnungen) für den Stoffstrom erstellt. Als Basis dafür erfolgte zuvor die Festlegung der erforderlichen Prozessschritte (Säurereaktion, Fest-/Flüssig-Trennung, Trocknung etc.), für die wiederum die eingesetzten Anlagenkomponenten definiert werden konnten (Art der Filterpresse, Art der thermischen Trocknung usw.). Auf dieser Grundlage wurde eine Vordimensionierung der Prozesskomponenten für den Teilprozess des P- Recycling beispielhaft für eine zukünftige Verwertungsanlage von 10.000 t Asche pro Jahr erarbeitet. Dabei wurden die einzelnen Aggregate für den ermittelten Durchsatz dimensioniert. Daraus resultiert die Spezifikationsvorgaben für die Aggregate, die auch als Basis für eine zukünftige, konkrete Angebotsabfrage bei potenziellen Technologielieferanten dienen können.

Aus dem R&I-Fließbild und der Dimensionierung der Anlagenbauteile für den abgeleiteten Stoffstrom wurde nachfolgend ein grundlegender Aufstellungsplans entwickelt. Dabei wurden umweltrechtlichen und behördlichen Anforderungen berücksichtigt. Relevant sind hier zum einen eine effektive Abgasreinigung sowie das Lagern und Handeln von Gefahrstoffen wie Säure. Aus dieser Aufstellungsplanung resultieren die Anforderungen und die Kubatur einer benötigten Halle zur Aufstellung des Teilprozesses zum P-Recycling mit der beispielhaften Verwertungskapazität von 10.000 t/a.

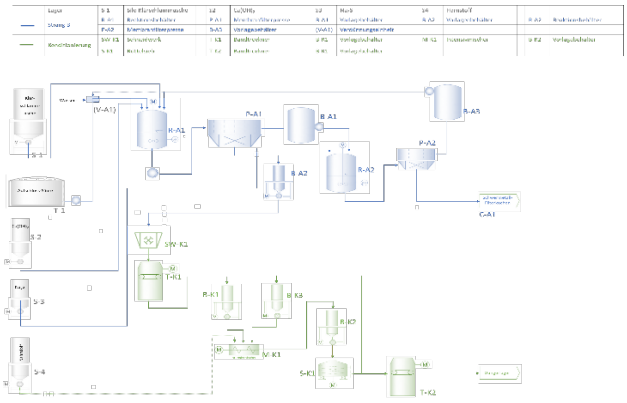


Abbildung 27: R & I Fließbild

So wird mindestens eine Grundfläche von 20x26 m mit einer lichten Höhe von mindestens 15 m benötigt, wobei die relevanten Bereiche mit einer Wanne zum Auffangen eventuell auslaufender Flüssigkeiten auszurüsten sind. Diese Halle kann dabei eine eigenständige Halle oder ein Teil einer großen DREISATS-Gesamtanlage sein. Diese Aufstellungsplanung bildete die Basis für die Entwicklung eines 3D-Modells für den Teilprozess des P-Recyclings. Abbildung 27 zeigt eine Ansicht aus diesem entwickelten 3D-Modell. Farblich unterschiedlich sind dabei die Teilprozesse zum Aufschluss der Asche (orange) und der Konditionierung der Düngemittel (grün). Türkis sind die Abluftführung und das Abluftreinigungssystem dargestellt. Die grau markierten Silos sind die Inputstoffe und grün die Silos für die erzeugten Produkte. Aus diesem 3D-Modell können nun die Schnitt- und Grundrisspläne für Genehmigungsbehörden entnommen werden.

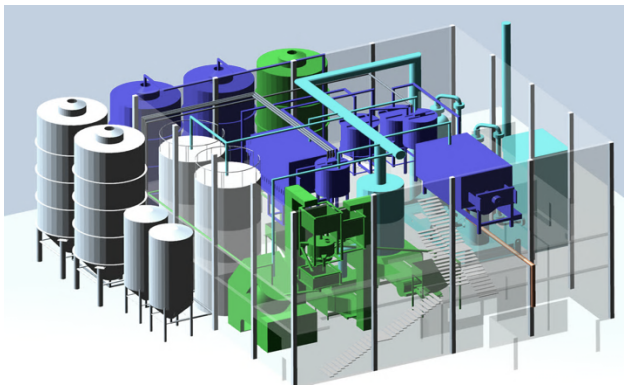


Abbildung 28: Ausschnitt aus 3D-Modell der P-Anlage

3. Erreichung der wissenschaftlichen/ technischen Arbeitsziele

Für den Teilprozess der P-Rückgewinnung sollte innerhalb von DREISATS die Skalierung dieses PONTES PABULI – VERFAHRENS in den (klein-)technischen Maßstab vergleichbar TLR 6 erfolgen. Dazu waren eine Versuchs- und Demonstratoranlage zu konzipieren, errichten und daran systematische Versuche und Untersuchungen durchführen. Mit diesen Untersuchungen sollte der Nachweis der technischen Realisierbarkeit des Verfahrens erbracht und relevante Prozessparameter sowie die wesentlicher Steuerparameter und Steuergrößen für eine zukünftige Produktionsanlage ermittelt werden.

Wie in Abschnitt 2 ausführlich dargestellt, konnte diese Zielsetzung vollständig erreicht werden. Im Rahmen des Projektes wurde auf Basis von Voruntersuchungen eine Versuchsanlage konzipiert, errichtet und erfolgreich in Betrieb genommen. Anschließend erfolgten systematische Untersuchungen mit unterschiedlichen Aschen, wobei die technische Machbarkeit und Wirksamkeit des Verfahrens an der Versuchsanlage nachgewiesen werden konnte.

- Dazu wurde zunächst aus Recherchen und Bedarfsanalysen ein Anforderungskatalog an die regionale Asche bezüglich ihrer chemisch-mineralogischen Konstitution und Schwermetallkonzentration und für zu erzeugenden (regionalen) Düngerprodukte abgeleitet.
- In stofflichen Voruntersuchungen wurden das Löse- und Reaktionsverhalten unterschiedliche Aschen eingehend analysiert. Dabei erfolgte insbesondere die vergleichende Ermittlung der erforderlichen Prozessparameter für den speziellen Aschetyp aus der Staubfeuerung, der in der DREISATS-Konzeption eine zentrale Rolle spielt. Aus diesen Untersuchungen wurde Richtrezepturen und eine Parametermatrix für die Prozessführung und Dimensionierung der zu errichtenden Versuchsanlage abgeleitet.
- Durch weiterführende Voruntersuchungen konnten für die Teilprozesse „Filtration“ und „Granulation“ die Technologieauswahl konkretisiert, die Anforderungen an die Prozesstechnologie präzisiert und die zielführende Parameterbreite eingegrenzt werden. Auf dieser Basis konnten geeignete Prozessmodule für die Versuchsanlage konzipiert und beschafft sowie die erforderliche Versuchsbreite an der Versuchsanlage gezielt eingegrenzt werden.
- Durch systematische Untersuchungen zur Schwermetallabtrennung wurde die Sulfidfällung als Variante für die Versuchsanlage aufgrund der hohen Wirksamkeit ausgewählt. Die ebenfalls untersuchte elektrochemischen Abscheidung von Schwermetallen erwies sich hier als nicht ausreichend effizient.
- Mit weiterführenden Untersuchungen wurde darüber hinaus eine Verfahrensoption entwickelt, die Schwermetalle deutlich umfangreicher und dabei insbesondere auch schwerlösliche Schwermetalle abscheidet. Diese Verfahrensvariante wurde dabei so konzipiert, dass sie bei Bedarf dem PONTES PABULI – VERFAHREN zuschaltbar ist.

- Auf Basis dieser Vorarbeiten wurde eine Versuchsanlage mit der geplanten Dimensionierung zur Abbildung des gesamten PONTES PABULI – VERFAHRENS konzipiert. Entsprechende Genehmigungen dazu wurden bei den Behörden erwirkt. Durch ein stringentes, kosteneffizientes Beschaffungsmanagement konnten das Kostenbudget für die Versuchsanlage eingehalten werden. Nach Errichtung und punktuellen Anpassungsmaßnahmen erfolgte die erfolgreiche Inbetriebnahme.
- Erfolgreich wurden nachfolgend unterschiedliche Aschetypen und unterschiedliche Rezepturen an der Versuchsanlage im (klein-)technischen Prozessmaßstab untersucht. Dabei wurden die kausalen Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der resultierenden Qualität von Zwischen- und Endprodukten ermittelt. Daraus ließ sich erfolgreich eine Parametermatrix erarbeiten, die nun ein Scale-up in den Produktionsmaßstab ermöglicht.
- Mit erfolgreich durchgeführten Versuchsserien über eine Zyklenanzahl von mehr als 20 wurde für verschiedene Aufschlusssysteme der Dauerbetrieb des Verfahrens und der Versuchsanlage getestet. Daraus resultierten wichtige Erkenntnisse über das Einstellen stabiler Lösungs- und Reaktionszustände, woraus die technischen Parameterbereiche für relevante Prozessgrößen für eine zukünftige Produktionsanlage noch einmal präzisiert werden konnten. Auch ermöglichte dies die Ableitung wesentlicher Steuerparameter und Steuergrößen für die Erstellung eines Steuerungs- und Automatisierungskonzepts für eine zukünftige Produktionsanlage.
- Anhand erzeugter Applikationsmengen wurden sehr positive Düngeeigenschaften und eine hohe Düngewirkung nachgewiesen. Dabei wurden die Einflussfaktoren der Prozessführung auf die Düngewirkung ermittelt. Diese umfassenden Untersuchungen an den erzeugten Düngegranulaten belegen auch, dass die an der Versuchsanlage erzeugten Nährstoffgranulate in den Handlingeigenschaften (Lager- und Transportstabilität, Ausbringeigenschaften) und der Düngewirkung (Freisetzung Nährstoffe) mit konventionellen Düngern vergleichbar sind.
- Final wurde aus den erzielten Erkenntnissen ein Grundkonzept zur großtechnischen Umsetzung einer Verwertungsanlage im Produktionsmaßstab erstellt. Dieses umfasst neben dem R&I-Fließschema die Spezifikationsanforderungen für die Technologiekomponenten einer solchen Anlage als Vorbereitung für die Lieferanfragen bei potenziellen Technologielieferanten. Aus Prozessfließbild und Dimensionierung wurden eine Aufstellungsplanung und ein 3D-Modell einer beispielhaften P-Verwertungsanlage für eine Verwertungskapazität von 10.000 t/a erstellt, woraus erforderliche Grundrisse und Querschnitte beispielsweise für Genehmigungsbehörden entnommen werden können. Damit sind wichtige Voraussetzungen für ein zukünftiges Engineering einer konkreten Produktionsanlage geschaffen. Auch resultiert daraus der erforderliche Platzbedarf für eine solche Verwertungsanlage, welcher als Faktor in die Kostenplanung eingeht. So wurden gemeinsam mit den ermittelten Steuerparameter und Steuergrößen sowie den orientierenden Verbrauchsdaten eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einschließlich Ableitung der erforderlichen Investitions- und Betriebskosten abschließend möglich.

4. Verwertbarkeit der Ergebnisse und Nachhaltigkeit

Die Projektergebnisse im DREISATS-Teilbereich des P-Rückgewinnung aus Verbrennungsaschen sind sehr positiv (→ Absatz 2) und lassen eine wirtschaftliche Verwertbarkeit erwarten. Es wurde ein Arbeitsstand erreicht, der nun konkrete Verwertungsansätze eröffnet. Dazu müssen die Projektergebnisse nun in standortspezifische Produktionsprozesse und Produktionsanlagen überführt werden. Die ermittelten, kausalen Zusammenhänge zwischen Rohstoffeigenschaften, Prozessführung und resultierenden Produktparametern, die abgeleitete Parametermatrix, die aschespezifisch abgeleitete Prozessführung und die definierten Steuerungsparameter bilden zusammen mit dem daraus abgeleiteten Grundkonzept bis zum erstellten 3D-Modell eine belastbare Basis für die Konzipierung derartiger Anlagen. Damit können nun die notwendigen, weiterführende Arbeiten insbesondere zum prozess- und anlagentechnische Scale-up bestritten werden.

Ziel ist es, nun innerhalb von 2 Jahren geeignete lizensierte Umsetzungspartnerschaften so zu formen, dass eine erste Demonstrationsanlage auf Basis der Vorarbeiten hier im Projekt errichtet und betrieben wird. Auf Basis der Erfahrungen an dieser, zu errichtenden Demonstrationsanlage soll das Verwertungskonzept in der Kommerzialisierungsphase breit ausgerollt werden. Hierzu gilt es, entsprechende regionale Produk-

tionsanlagen zu planen, konzipieren, umzusetzen und zu betreiben. Durch Marketing- und Vertriebsmaßnahmen müssen für diese Kommerzialisierungsphase potenzielle Interessenten und weitere Umsetzungspartner/ Investoren für das Verwertungskonzept akquiriert werden.

Das in DREISATS entwickelte Lösungskonzept stellt eine nachhaltige, dezentrale Verwertungslösung von Klärschlämmen bzw. daraus erzeugten Aschen im Sinne der Kreislaufwirtschaft auch für andere Regionen dar. Entsprechend kann das gesamte Konzept DREISATS, aber auch der entwickelte Teilprozess der P-Verwertung aus den Verbrennungsaschen von der aktuellen Modellregion auf andere Regionen übertragen werden. Auch in diesen Regionen kann dadurch ein nachhaltiges, regionales Nährstoffmanagement ermöglicht werden. Zu dieser technischen und wirtschaftlichen Umsetzung in der Region und zur Übertragung auf andere Regionen kann pontes pabuli auf bereits bestehende Kooperationen zurückgreifen.

- So besteht eine feste Kooperation mit dem Anlagenbauer EPC Engineering & Technologies GmbH, der als Generalunternehmer Verwertungsanlagen zum Phosphor-Rückgewinnung gemäß des PONTES PABULI – VERFAHRENS, auch zukünftig modifizierte Anlagen zur Ascheumwandlung aus weiteren organischen Reststoffen konzipieren und errichten kann.
- Zudem besteht eine langjährige Kooperation zum Projektpartner Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH (VKD) auch außerhalb des Projektes DREISATS auf dem Gebiet von Phosphorrecycling. Diese Umsetzungspartnerschaft kann nun auf Basis der positiven Projektergebnisse weiter forciert werden. VKD kann dabei zum einen als Anlagenbetreiber und gegebenenfalls Investor fungieren, zum anderen kann VKD die Logistik der Asche- und Rohstoffbeschaffung bei Bedarf und als zusätzliche Erweiterungsmöglichkeit übernehmen.
- Pontes pabuli ist in dieser Kooperationskonstellation primär Know-how- und Lizenzgeber des Verfahrens und sichert die technische und strategische Umsetzung. Über Verfahrenslizenzen und aktiven Technologietransfer sollen die technologischen Kompetenzen breit in die Praxis einfließen und darüber eine Multiplikatorwirkung entfalten.

5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Mit dem Projekt wurde das bestehende PONTES PABULI – VERFAHREN zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen auf weitere Ausgangsstoffe und Anwendungsfelder erheblich erweitert. Dies erforderte die Beantwortung offene fachliche und technische Fragestellungen, deren Beantwortung einerseits eine grundlegende Herangehensweise notwendig machte, andererseits jedoch auch erhebliche technische und in der Folge auch wirtschaftliche Risiken nach sich zog. Durch die absolvierten analytischen und experimentellen Untersuchungen konnten die bestimmenden kausalen Zusammenhänge umfassend ermittelt und eine technisch machbare Prozessführung abgeleitet werden.

- Dabei konnte der Projektaufwand trotz der großen Breite der unterschiedlichen organischen Reststoffe durch die Fokussierung auf 3 demonstratorhafte Aschetypen der Versuchs- und Analyseumfang auf einen akzeptablen Umfang eingegrenzt werden, wobei jedoch eine hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist. Damit konnten mit für pontes pabuli „beherrschbaren“ Personalkapazitäten und Sachkosten die verfolgten Zielstellungen erreicht werden.
- Trotz sich im Laufe des Projektes ergebender Änderungen zum ursprünglich geplanten Projektarbeitsplan konnten die Entwicklungshürden letztlich durch die erarbeiteten technischen Lösungen innerhalb der geplanten Personal- oder Investitionsaufwände realisiert werden.

Die hohe Forschungsintensität des Vorhabens rechtfertigt sich angesichts der nunmehr nachgewiesenen Einsatzfähigkeit des VERFAHRENS im Kontext regionaler Stoffkreisläufe. Dieser Status wäre für pontes pabuli ohne dieses Projekt bis heute nicht erreichbar gewesen. Auch wenn bis zum produktiven Einsatz noch weitere Herausforderungen zu bewältigen sind, sind die Projektergebnisse als großer Erfolg zu werten. Neben den gewonnenen Erfahrungen zu den Voraussetzungen unterschiedlicher Aschen, zur Prozessführung und Anlagengestaltung konnte pontes pabuli hier viele neue Erfahrungen gewinnen, die dem Unternehmen nicht nur einen deutlichen Kompetenz- und Wettbewerbsvorsprung einräumen, sondern sich auch für weiterführende Verwertungsszenarien, wie anderer biogener Reststoffe, nutzen lassen. Diese Expertise hätte man sich ohne Unterstützung des BMFTR nicht erarbeiten bzw. finanzieren können.

6. Während der Konzeptphase bekannt gewordene Fortschritte anderer auf dem Vorhabenfeld

Während des Projekts wurden bestehende Aktivitäten Dritter im Innovationsfeld ausführlich recherchiert und betrachtet. Grundsätzlich sind im Bereich der Phosphorrückgewinnung aus Verbrennungsaschen zahlreiche Akteure in der Forschung, Entwicklung und Umsetzung aktiv. Das innerhalb der DREISATS-Konzeption verfolgte PONTES PABULI – VERFAHREN unterscheidet sich jedoch deutlich von den Verfahren der Wettbewerber. Dies belegt auch der mittlerweile erreichte Patentschutz auf das Grundverfahren. Pontes pabuli ist dazu alleiniger Eigentümer von verschiedener europäischer und internationaler Patente und Patentanmeldungen für dieses Phosphorrecycling-Verfahren, so zu den Patentfamilien auf Basis der Prioritätsanmeldung DE 102018104921 und DE102018104918 jeweils vom 05.03.2018. Die neue entwickelte Verfahrensoption zur Abscheidung auch unlöslicher Schwermetalle befindet sich darüber hinaus als eingereichte Anmeldung bereits in der fortgeschrittenen Prüfungsphase. Nach Einschätzung des aktuellem Prüfungsstandes wird erwartet, dass auch hier eine Schutzwirkung erreicht werden kann, was die Andersartigkeit gegenüber Wettbewerbern belegt. Bis heute sind keine Entwicklungs- oder Umsetzungsaktivitäten bekannt, die sich konzeptionell und technologisch wie das PONTES PABULI – VERFAHREN ausrichten.

Die eigene Verwertung setzt jedoch nicht zwingend ein eigenes patentiertes Verfahren voraus, hierzu dürfen lediglich Rechte Dritter nicht verletzt werden. Bisher wurden weder von pontes pabuli, noch vom Patentamt Patente bzw. -anmeldungen recherchiert, die einer eigenen Verwertung entgegenstehen. Auch besteht hierzu derzeit kein Verlangen Dritter gegenüber pontes pabuli. Entsprechend geht pontes pabuli davon aus, dass sie nach erfolgreichem Erreichen der Serienreife ihr P-Verfahren frei verwerten dürfen.

7. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Das Projekt erweitert die Technologiebasis von pontes pabuli. Diese wird pontes pabuli regelmäßig auf Konferenzen, Tagungen und diversen Präsentationen bei potenziellen Kunden und Kooperationspartnern vorgestellt, insbesondere im Rahmen der Kundenakquise und Vertriebsstrategie.

Spezifische Projektpräsentationen erfolgten bislang vor allem im Kontext der gemeinsam mit den Verbundpartnern durchgeführten Veranstaltungen, Tagungen und Messeauftritte. Darüber hinaus werden mit den Partnern aktuell weitere gemeinsame Veröffentlichungen diskutiert, die sowohl auf relevante Fachzeitschriften als auch Veranstaltungen abzielen.

Zudem wurde für das Seminar der MFPA an ihrer Akademie “Entsorgung und Verwertung von organischen Reststoffen“ ein Modul zum Exkurs Klärschlamm und Nährstoffrecycling entwickelt, welches diesen Teilbereich der Pontes pabuli -Konzeption ausführlich darstellt. Dieses Seminar wurde im 1. Quartal 2024 erstmals durchgeführt und soll zukünftig in der MFPA-Akademie regelmäßig angeboten werden.

8. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Schwerpunkt der bewilligten Ausgaben lag mit ca. 70 % bei der reinen Entwicklungsleistung in Form der Personalkosten. Nachkalkulatorisch hat sich diese Quote leicht verringert. Grund hierfür waren insbesondere die anfänglichen Probleme bei der Besetzung der Projektstelle, ohne dass sich dies jedoch inhaltlich nachteilig ausgewirkt hat.

Sachausgaben entstanden im Kontext der beschafften Anlagen- und Messkomponenten, des externen Detailengineerings für die und für Reisen. Während die Abschreibungskosten plangemäß verausgabt wurden, lagen die Ausgaben für die externen Leistungen und Reisen geringfügig unter den Planungen.

Im Rahmen der Nachberechnung wurde vor diesem Hintergrund festgestellt, dass die insgesamt realisierten Projektausgaben ca. 9 % unter den geplanten Kosten lagen und die primäre Projektkalkulation somit als sehr realistisch bestätigt werden konnte.