Gemeinsamer Schlussbericht zum Verbundprojektes VP4 des WK abonoCARE®

„Konfektionierung – Überführung von unterschiedlichen nährstoffhaltigen Reststoffen in hochwertige Düngeprodukte und Spezialerden“

Teil II: Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Projektpartner des VP 4		
Teilprojekt 4.I Verbundkoordinator	Glatt Ingenieurtechnik GmbH Nordstraße 12 99427 Weimar	
Teilprojekt 4.II	Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar Coudraystraße 9 99423 Weimar	
Teilprojekt 4.III	Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH Nordstraße 15 04420 Markranstädt	

Projektlaufzeit: 01.04.2019 – 31.12.2022

Weimar, im Juni 2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2

Literaturverzeichnis 3

II. Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse 4

II.1 TP 4.1 – Erarbeitung von technologischen Lösungen zur Überführung von phosphathaltigen Reststoffen in hochwertige Düngerprodukte 4

II.1.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse 4

II.1.2 Ergebnisbewertung / Fazit 26

II.2 TP 4.2 – Entwicklung einer Rezepturmatrix zur Überführung von phosphathaltigen Reststoffen in hochwertige Düngeprodukte 27

II.2.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse 27

II.2.2 Ergebnisbewertung / Fazit 43

II.3 TP 4.3 – Konfektionierung von hochwertiger Spezialerden - Überführung von phosphathaltigen Reststoffen in hochwertige Spezialerden 44

II.3.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse 44

II.3.2 Ergebnisbewertung / Fazit 62

Literaturverzeichnis

Ario Fahimi, S. F. (20. März 2021). Evaluation of the sustainability of technologies to recover phosphorus from sewage sludge ash based on embodied energy and CO2 footprint. *Journal of Cleaner Production, 289*. Von https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125762 abgerufen

Brentrup, F., Lammel, J., Stephani, T., & Christensen, B. (2018). Updated carbon footprint values for mineral fertilizer from different world regions. *11th International Conference on Life Cycle Assessment of Food.* Bangkok.

Döhler, H., & Wulf, S. (2009). *Aktueller Stand bei der Gärrestaufbereitung.* Wulf, Sebastian.

Kerkering, M. (2013). *Aufbereitungsverfahren für Gärreste am Beipiel aktueller Forschungsergebnisse; Fachtagung "Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen".* Berlin.

Kyttä, V., Helenius, J., & Tuomisto, H. L. (2021). Carbon footprint and energy use of recycled fertilizers in arable farming. *Journal of Cleaner Production, 287*.

Lauterböck, B., Germ, T., Lorber, G., Baumgartner, M., Ramler, A., Liebhard, G., & Fuchs, W. (2013). *Effiziente Ammoniumentfernung mit Hilfe von Membrankontaktoren.* Berlin: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

REMONDIS Industrie Service. (14. 12 2022). *www.remondis-industrie-service.de*. Von https://www.remondis-industrie-service.de/praxiswissen/detail/das-tetraphosr-verfahren-ein-leuchtturmprojekt-fuer-nachhaltigkeit-und-umweltschutz/ abgerufen

Statistisches Bundesamt. (12. Dezember 2022). *www.statista.com*. Von https://de.statista.com/statistik/daten/studie/881600/umfrage/co2-emissionen-im-deutschen-gueterverkehr-nach-verkehrsmitteln/ abgerufen

Umweltbundesamt. (12. Dezember 2022). *www.umweltbundesamt.de.* Von https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#anmerkung- abgerufen

Wilken, D., Rauh, S., Weiß, R., Strippel, F., Wiesheu, M., & Luyten-Naujoks, K. e. (2018). *Düngen mit Gärprodukten.* Freising: Fachverband Biogas e.V.

II. Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

II.1 TP 4.1 – Erarbeitung von technologischen Lösungen zur Überführung von phosphathaltigen Reststoffen in hochwertige Düngerprodukte

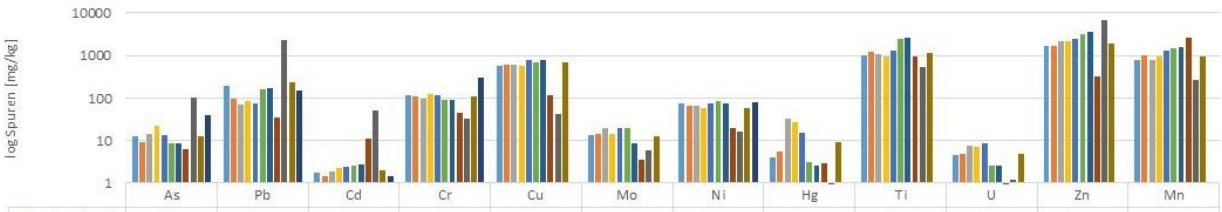
II.1.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse

II.1.1.1 Entwicklung einer variablen Grundmatrix auf der Basis unterschiedlicher phosphathaltiger Reststoffe und Mineralsäuren

II.1.1.1.1 Rohstoffbewertung

Die ersten Schritte galten der Eingrenzung relevanter phosphathaltiger Reststoffe und deren Bewertung hinsichtlich ihrer spezifischen Voraussetzungen für Weiterverarbeitung und gezielte Nährstoffanreicherung. Hierfür wurden neben verschiedenen Klärschlammaschen auch andere Reststofftypologien, wie unterschiedliche Holz-, Stroh, Biomasse- und Tiermehlaschen, aber auch Struvit aus der Klärschlammbehandlung oder Ammoniumsulfatlösungen als industrielles Abfallprodukt, Kartoffelfruchtwasser als Abfallprodukt der Stärkeproduktion sowie Dicalciumphosphat herangezogen.

Ein Teil dieser Rohstoffe wurden in diesem Zusammenhang näher analysiert, wobei deutlich wurde, dass diese voneinander stark variierende Zusammensetzungen und vor allem Schwermetallkonzentrationen mitbringen, die grundsätzlich über den Grenzwerten der Düngemittelverordnung liegen (vgl. Abbildung 1). Vor diesem Hintergrund musste der Phosphorrückgewinnungsprozess zwangsläufig an eine effektive Schwermetallabreicherung gekoppelt werden.



	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Hg	Ti	U	Zn	Mn
Asche 1 (KSA)	12,9	197	1,73	117	569	13,4	74,0	3,97	1039	4,71	1689	794
Asche 2 (KSA)	9,33	98,9	1,49	107	604	14,0	66,6	5,65	1248	4,80	1637	1035
Asche 3 (KSA)	14,1	72,0	1,93	94,9	625	20,1	64,7	32,5	1059	7,40	2217	790
Asche 4 (KSA)	22,1	82,8	2,26	125	558	14,5	58,7	26,4	953	7,00	2109	921
Asche 5 (KSA)	13,1	73,7	2,38	113	789	19,4	75,3	14,9	1269	8,73	2499	1270
Asche 6 (KSA)	8,73	160	2,66	90,0	688	19,7	83,8	3,03	2445	2,54	3113	1443
Asche 7 (KSA)	8,71	175	2,71	92,4	775	8,71	74,8	2,66	2655	2,60	3511	1538
Asche 8 (?)	6,12	33,8	11,4	46,3	120	3,52	19,6	2,87	932	0,741	318	2656
Asche 9 (BPD)	104	2316	52,0	32,6	40,9	5,85	15,9	0,736	540	1,23	6961	258
Asche 10 (KSA)	12,9	229	1,96	110	669	12,5	57,4	9,35	1120	4,77	1941	928
DüMV	40	150	1,5	300			80	1				

Abbildung 1: Schwermetallbelastung der untersuchten Klärschlammaschen

Darüber hinaus ging es darum, die Verfügbarkeitsvoraussetzungen und Qualitäten alternativer Lösungsmittel für den Phosphoraufschluss zu analysieren, um die Abhängigkeit der Technologie von der Phosphorsäure zu reduzieren. In diesem Zuge wurde eine Vielzahl prinzipiell relevanter Säuren identifiziert, wobei auch im Ergebnis der in diesem Zuge durchgeführten Vorversuche insbesondere Schwefelsäure und Salpetersäure ein großes Einsatzpotenzial attestiert werden konnte, da beide Stoffe am Markt in großen Mengen und deutlich preisgünstiger als die bislang für den Aufschluss genutzte Phosphorsäure verfügbar sind.

II.1.1.1.2 Erarbeitung der Basisrezepturen

Auf Grundlage der identifizierten Sekundärrohstoffe und Mineralsäuren wurden grundlegende Rezepturansätze für PK und NPK-Produktspezifikationen erarbeitet. Dabei handelt es sich aktuell um die Basisrezepturen für folgende Referenzsysteme:

- PK-Dünger aus Biomasseasche und Phosphorsäure (z. B.PK 11-22)
- PK-Dünger aus Biomasseasche und Schwefelsäure (z. B.PK 11-22)
- PK-Dünger aus Biomasseasche und Salpetersäure (z. B.PK 11-22)
- NPK-Dünger aus Monoklärschlammasche und Schwefelsäure (z. B.NPK 15-15-15)
- NPK-Dünger aus Monoklärschlammasche und Salpetersäure (z. B. NPK 15-15-15)
- NPK-Dünger aus Monoklärschlammasche und Phosphorsäure (z. B.NPK 15-15-15)
- NPK-Dünger aus Tiermehlasche – MKA-Gemisch und Schwefelsäure (z. B. NPK 15-15-15)
- NPK-Dünger aus Tiermehlasche – MKA-Gemisch und Salpetersäure (z. B. NPK 15-15-15)
- P-Dünger aus Tiermehlasche – MKA-Gemisch und Phosphorsäure (z. B. P38 oder P46)

Diese Basisrezepturen mussten dabei jeweils spezifisch auf die stofflichen Zusammensetzungen der der Sekundärrohstoffe berechnet und abgestimmt werden. Dies beinhaltete auch Hilfszusätze wie Schwefel, Kaliumchlorid, MAP, Harnstoff etc., um einzelne Parameter der Rezepturen gezielt einstellen zu können.

Die Rezepturen verhielten sich bereits im Zuge der Suspensionsherstellung sehr unterschiedlich. Als problematisch mussten insbesondere die Ansätze herausgestellt werden, bei den es zu einer teilweise sehr deutlichen Wärmeentwicklung kam, die mit einer starken Staubbildung verbunden waren oder eine extreme Klebrigkeit aufwiesen (vgl. Abbildung 2).

Abbildung 2: Ansatzversuche zur Abstimmung der Suspensionseigenschaften

Im Vorfeld der Suspensionsherstellung mussten so einige Rohstoffe, wie zum Beispiel Dicalciumphosphat und auch einige Biomasseaschen, in zusätzlichen Schritten (z. B. Aufmahlung) vorkonditioniert werden. Andere Biomasseaschen – insbesondere mit unverbrannten Strohkomponenten – ließen sich hingegen später in der Wirbelschicht nicht weiterverarbeiten. Eine Aufreinigung dieser Aschen wäre zwar möglich, wird aber aktuell nicht weiterverfolgt.

II.1.1.1.3 Untersuchung der Granulationsvoraussetzungen

Auf Basis der für die erarbeiten Rezepturen eingegrenzten Verarbeitungsanforderungen wurde eine Laborwirbelschichtanlage (Procell LabSystem) eingerichtet und Granulationsversuche in kontinuierlicher Fahrweise mit dem Wirbelschichteinsatz Vario 3 durchgeführt (Abbildung 3).

Die oberhalb der Wirbelschicht angeordneten Filter wurden kontinuierlich mit Druckluft abgereinigt, so dass ein undefinierter Partikelaustrag darüber ausgeschlossen werden konnte.

Der Produktaustrag wurde mittels Luftstrom im Zick-Zack-Sichter geregelt, was bei stabilen Betriebsbedingungen einen der zugeführten Sprühflüssigkeit gleichen Mengenaustrag als staubfreies Granulat sicherstellte.

Abbildung 3: Für die Grundlagenversuche genutzte Laborwirbelschichtanlage Procell LabSystem und Versuchsaufbau

Unter diesen Voraussetzungen konnten Untersuchungen zu den grundsätzlichen Granulationseigenschaften der erarbeiteten Basisrezepturen und zur Eingrenzung der stoffspezifischen Granulationsparameter durchgeführt werden (Abbildung 4).

a) Granulatmuster P38

b) Granulatmuster P46

c) Granulatmuster NP-5-11

d) Granulatmuster NPK (S) 5-25-3 (7) aus Biomasseasche

e) Granulatmuster NPK 5-25-3 aus Biomasseasche mit Schwefelsäure

f) Granulatmuster NPK 5-25-3 aus Biomasseasche mit Phosphorsäure

Abbildung 4: Beispielhafte Mustergranulate – Nachweis der Erzeugbarkeit einkomponentiger (a + b) und mehrkomponentiger Systeme (c – f)

Im Ergebnis dieser Voruntersuchungen zeigte sich, dass die meisten Rohstoffe zu grundsätzlich geeigneten Granulaten verarbeitet werden konnten (vgl. Abbildung 5 + Abbildung 6).

Das Granulatwachstum bei der Verarbeitung von Biomasseaschen stellte sich dabei jedoch komplexer als bei den Klärschlammaschen dar. Darüber hinaus wurde deutlich, dass einige Rezepturen Abstimmungen der technischen Anlagenkonfiguration und Prozessparameter erforderten, um die granulatspezifischen Anforderungen der Düngemittelverordnung grundsätzlich erfüllen zu können.

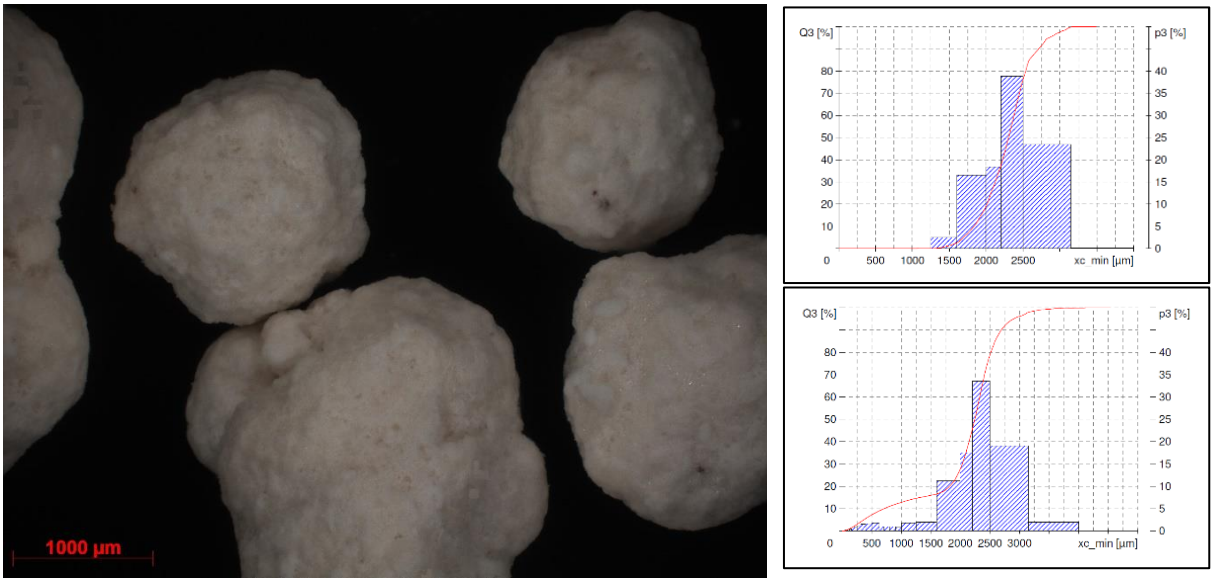


Abbildung 5: Mittels Sprühgranulation hergestelltes Düngemittelgranulat ASL und Partikelgrößenverteilungen ASL-Granulat

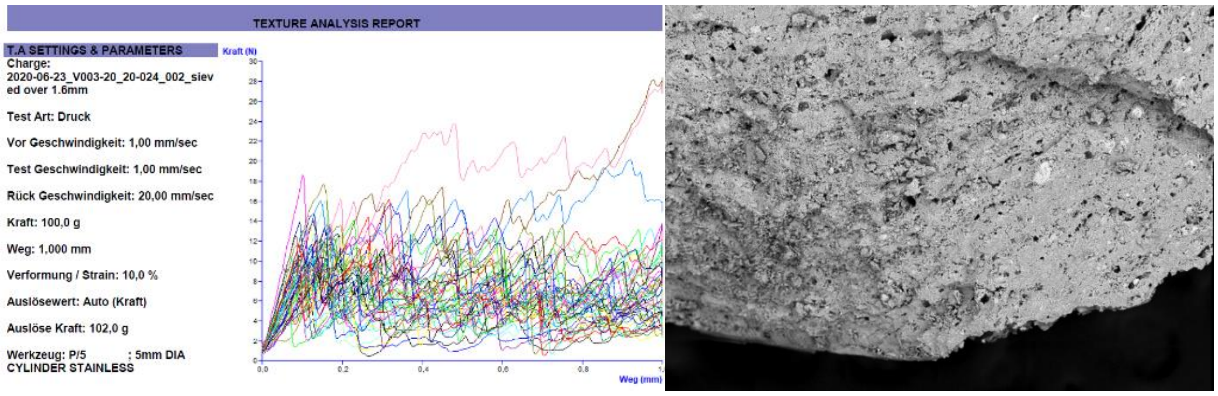


Abbildung 6: Messung der Granulatfestigkeit (links) und REM-Bildschnitt eines Düngemittelgranulates (rechts)

II.1.1.1.4 Grundsätzliche Voraussetzungen für die Prozessskalierung

Auf Basis der labortechnisch eruierten Granulationsanforderungen wurden die grundsätzlichen Voraussetzungen für eine Prozessskalierung untersucht. Dafür wurden Versuche in einer kontinuierlich betriebenen Wirbelschichtanlage (AGT PilotSystem) mit dem Prozesseinsatz AGT12 durchgeführt. Die Sprühflüssigkeit wurde hier mit einer Einstoffdüse eingebracht, die seitlich im Prozessraum angeordnet war (Side-Spray-Technologie). Der Sprühflüssigkeitszuführung wurde ein Inline-Dispergierer vorgeschaltet, mit dessen Hilfe reaktiv entstandene Agglomerate zerkleinert werden konnten.

Der Produktaustrag aus dem Prozessraum wurde über eine Zellradschleuse realisiert. Ein in den externen Siebkreislauf integriertes Doppeldecksieb (Oberdeck 4 mm; Unterdeck 2 mm) sorgte dafür, dass die feinen Partikel (<2 mm) nachfolgend pneumatisch in die Prozesskammer zurückgeführt werden konnten. Entstandenes Überkorn wurde dabei kontinuierlich über einen Walzenbrecher aufgemahlen und dem Prozess als Keimfraktion wieder zugeführt.

Abbildung 7: Pilotanlage für die orientierenden Skalierungsuntersuchungen

Im Zuge der Versuchsauswertungen wurde anhand mehrerer Modellsubstanzen schnell klar, dass die Übertragbarkeit der zuvor im Labormaßstab ermittelten Prozessvorgaben gut möglich und die Voraussetzungen für ein Up-Scaling positiv zu bewerten waren. Zwar stellten sich einige Parameter, wie z. B. die Staubanteile anders dar, die Prozessbedingungen konnten jedoch immer spezifisch abgestimmte werden. Dies galt insbesondere für Produkte wie P38, P46, PK20-30, NPK15-15-15 – auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Rezepturen.

Wichtiges Ergebnis war dabei, dass die geforderten Korngrößenverteilungen als eine zentrale Vorgabe aus der Düngemittelverordnung den Vorgaben entsprechend eingestellt und in den Produkten nachgewiesen werden konnten (vgl. Abbildung 8). Zudem konnte in den zugehörigen chemischen Analysen bestätigt werden, dass die jeweiligen Bestandteile im Endprodukt den Rezeptvorgaben entsprachen. Vor diesem Hintergrund waren diese Ergebnisse sehr positiv zu bewerten und boten eine sehr gute Ausgangslage für die darauf aufbauenden Arbeitsschritte.

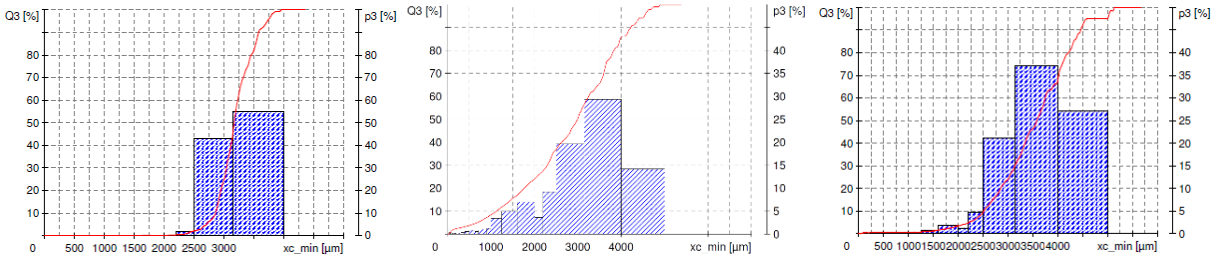


Abbildung 8: Bestimmung der Korngrößenverteilung für die erzeugten Granulatmuster (l.: P46; M.: PK20-30; r.: NPK15-15-15)

Auf der Grundlage der in den Laborversuchen ermittelten Prozessvorgaben wurde die Pilotanlage schrittweise für die Granulierung der erarbeiteten NPK-Rezepturen abgestimmt.

Ohne dadurch die Anlagenkonfiguration grundlegend zu verändern, zeigte sich jedoch, dass eine Vielzahl von Parametern für eine spezifisch abgestimmte Prozessführung zu berücksichtigen waren. Dies betraf neben der Untersuchung der Einstoffverdüsung mit unterschiedlichen Düsenvarianten vor allem die Modifikation und Variantenerprobung bei einer Reihe granulationsbestimmender Prozessstufen, wie der:

- Art der Schnecken- bzw. Sprühpumpe
- Auslegung des Rührbehälters mit Dispergiereinheit
- Umstellung des Flüssigkeitssystem auf Zirkulationsbetrieb
- Integration eines Schwingsiebs mit Über- und Unterkornabtrennung
- Integration einer Überkornvermahlung mittels drehzahlverstellbarer Stiftmühle
- Pneumatische Rückführung von Unterkorn und Mahlgut zur Wirbelschichteinheit
- Strömungstechnische Abstimmung des AGT 12-Prozesseinsatzes
- Einbindung einer externen Abluftentstaubung mittels Nass-/Strahlwäscher
- Integration einer Zyklonvorentstaubung mit Staubrückführung

Vor diesem Hintergrund wurde die Pilotanlage technisch mehrfach überarbeitet, wie in Abbildung beispielhaft gezeigt wird.

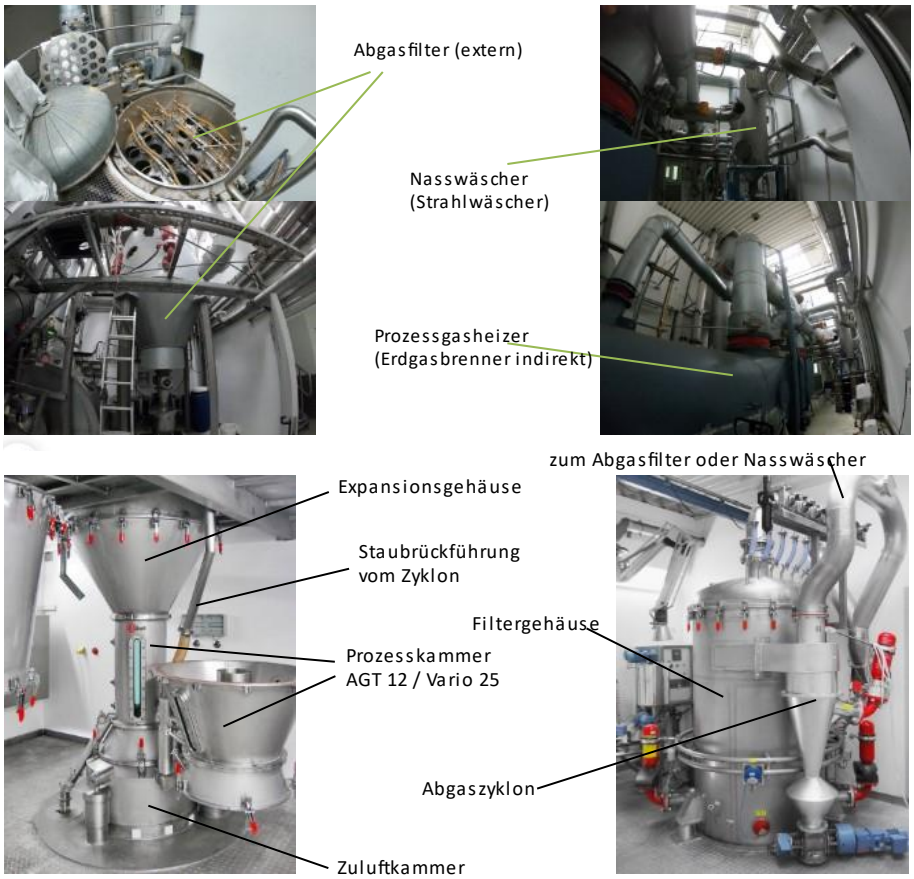


Abbildung 9: Rezepturspezifische Abstimmungen der Pilotanlage

II.1.1.2 Technologische Überführung des Verfahrens auf NPK-Düngeprodukte

II.1.1.2.1 Erarbeitung der Rezepturen

Im Ergebnis einer spezifischen Rohstoffbewertung konnten zunächst mehrere Zielsysteme definiert werden, die als Referenz für die stoffliche Bewertung der später erzeugten NPK-Muster dienten:

- NPK-Dünger 15-15-15 aus Monoklärschlammasche und Schwefelsäure
- NPK-Dünger 15-15-15 aus Monoklärschlammasche und Salpetersäure
- NPK-Dünger 5-25-3 aus Monoklärschlammasche und Schwefelsäure
- NPK-Dünger 5-25-3 aus Monoklärschlammasche und Salpetersäure

Diese Produkte wurden zudem bei vollständiger oder partieller Substitution der Klärschlammaschekomponente durch Biomasse oder Tiermehlasche sowie Integration von Ammoniumsulfatlösung und anderen Zusatzkomponenten für Schwefel (S) oder Kalium (K) als Zielsystem definiert.

II.1.1.2.2 Verfahrensentwicklung zur Herstellung von NPK-Dünger

In Fortführung der in Abschnitt II.1.1.1.2-3 dargestellten Rezeptur- und Prozessvorgaben wurden auf der Basis alternativer Rohstoffquellen unterschiedliche Rezepturen für die Herstellung von Mehrkomponentendünger untersucht. Abbildung 10 zeigt daraus erste Produktmuster von NPK-Granulaten, welche unter Verwendung einer Ammioniumsulfatlösung erzeugt werden konnten. In diesem Kontext wurden auch diverse Ansatzversuche, Sprühversuche und Produktmusterherstellungsversuche durchgeführt, wobei ermittelt werden konnte, dass sich die Ammoniumsulfatlösung sowohl als Zusatzstoff für NPK-Düngemittel, als auch als Einzelprodukt verarbeiten lässt.

Abbildung 10: Ammoniumsulfat Produktmuster

Darüber hinaus wurden mehrere Versuchsreihen zur Granulation mit weiteren Rohstoffen durchgeführt, welche aus dem Bündnis heraus adressiert werden sollten. Da viele Rohstoffe in abonoCARE jedoch noch nicht bzw. nicht in ausreichender Menge verfügbar waren, wurden äquivalente Stoffe alternativ beschafft. In Laborversuchen mit diesen Rezepturen konnte die Matrix der einsetzbaren Sekundärrohstoffe und Rezepte so um weitere Klärschlammaschen, und P-haltiges Prozesswasser erfolgreich erweitert werden.
Dafür mussten teilweise spezifische technische Modifikationen erarbeitet und an der Laboranlage erprobt werden, die sich beispielsweise auf die Düsenkonfiguration (Einstoffdüse vs.

Zweistoffdüse, Bauform, Material etc.) und Stabilisierung der Suspensionen bezogen. Damit konnte wiederholt bestätigt werden, dass sich die Matrix der im Verfahren prozessier- und gezielt verarbeitbaren Sekundärrohstoffe deutlich erweitern lässt. Gleichzeitig konnten auf dieser Basis in der Laboranlage erste größere Versuchsmengen für die Dosier- und Kompostierversuche des Verbundpartners Veolia hergestellt werden, welche sich aus folgenden Matrixkomponenten zusammensetzten: H_2O, H_3PO_4, Harnstoff, Monoklärschlammasche, Ammoniumsulfatlösung, Kaliumchlorid.

II.1.1.2.3 Verfahrensübertragung in den Pilotmaßstab

Auf dieser Basis der o. g. Rezepturen und Prozessgrundlagen wurden zunächst die Prozessvorgaben für die Pilotversuche zur Erzeugung der NPK-Granulate ermittelt. Demnach lag der theoretische Durchsatz der AGT12 hierfür bei bis zu ca. 100 kg/h Suspension, aus dem ca. 50 kg/h Granulat als gesiebte Fraktion zu erwarten waren. Dafür musste eine Prozessgasmenge von bis zu 2.000 m³/h eingesetzt werden. Die Prozessgastemperaturen wurden auf bis zu 300 °C am Eintritt und max. 180 °C am Austritt der Anlage bestimmt. Mit diesen Vorgaben konnten umfangreiche Versuche auf der Pilotanlage durchgeführt werden (Abbildung 11).

Abbildung 11: Auszug der Versuche zur NPK-Herstellung auf der Pilotanlage

II.1.1.2.4 Bewertung der hergestellten Granulatmuster

Die Bewertung der erzeugten NPK-Granulate zielte wie bereits zuvor vor allem auf die physikalischen Kenngrößen (Korngrößen-Mittelwerte, Korngrößenverteilung und Kornhärte) ab. Dabei mussten keine unerwarteten bzw. eingeschränkten Granulateigenschaften festgestellt werden (vgl. Abbildung 12 + Abbildung 13).

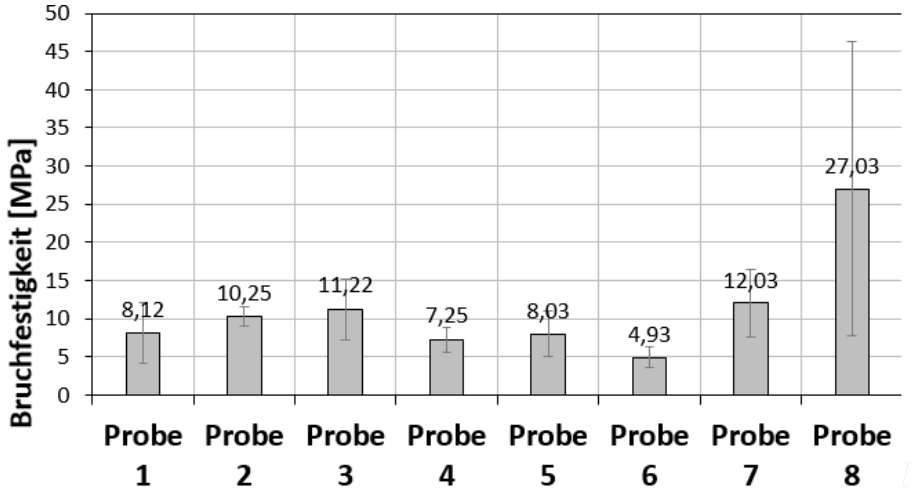


Abbildung 12: Auszug der an den NPK-Mustern durchgeführten Bruchfestigkeitsmessungen

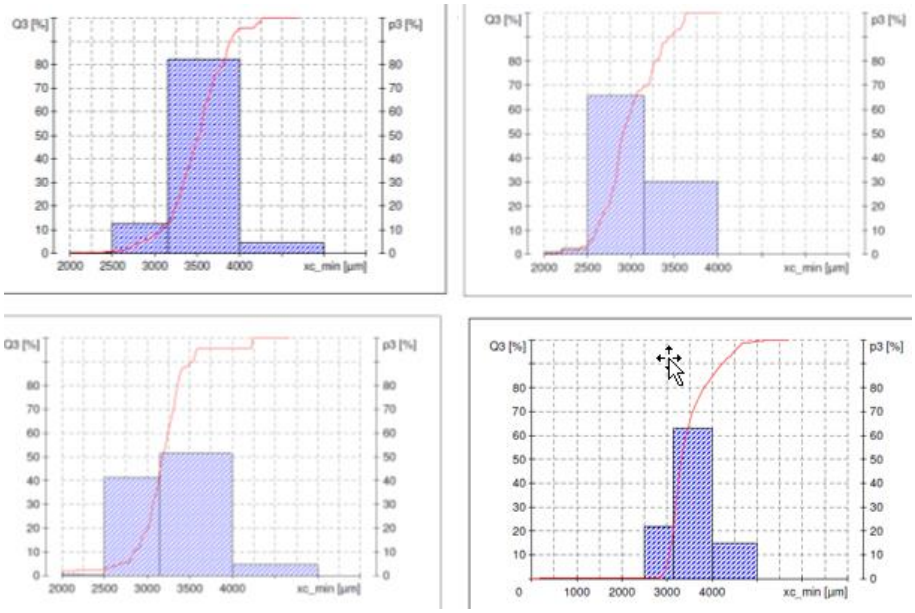


Abbildung 13: Auszug der an den NPK-Mustern ermittelten Korngrößenverteilungen

Darüber hinaus wurden erstmals auch Pflanzversuche für die Musterbewertung und den Vergleich mit zuvor hergestellten P-Düngergranulaten durchgeführt. Dafür wurden bifaktorielle Gefäßversuche mit Weidelgras und Luzerne unter folgenden Voraussetzungen herangezogen:

Referenzprodukte

- Referenz 1: Nullkontrolle
- Referenz 2: Weicherdiges Rohphosphat
- Referenz 3: Triple-Superphosphat (TSP)

Getestete Muster

- Testprodukt 1: P-38
- Testprodukt 2: P-46
- Testprodukt 3: NP*

Auf dieser Basis sollten 6 (P-Produkt) x 2 (Pflanzenart), d. h. 12 Varianten á 4 Wiederholungen betrachtet werden, woraus sich eine Anzahl von 48 Pflanzproben für diese Versuchsserie ergab. Die Anzahl der versuchsimmanenten Schnitte wurde für beide Referenzpflanzen auf 5 festgelegt. Die Beurteilung erfolgte anhand der Biomasseentwicklung des Aufwuchses und die P-Konzentrationen im Aufwuchs zu 5 Schnittterminen, so dass der gesamte P-Entzug ermittelt werden konnte. Mit den gemessenen Werten des CAL-Löslichen P im Substrat und den P-Entzügen des Aufwuchses konnte eine P-Bilanzierung vorgenommen werden. Zudem erfolgte eine Fotodokumentation.

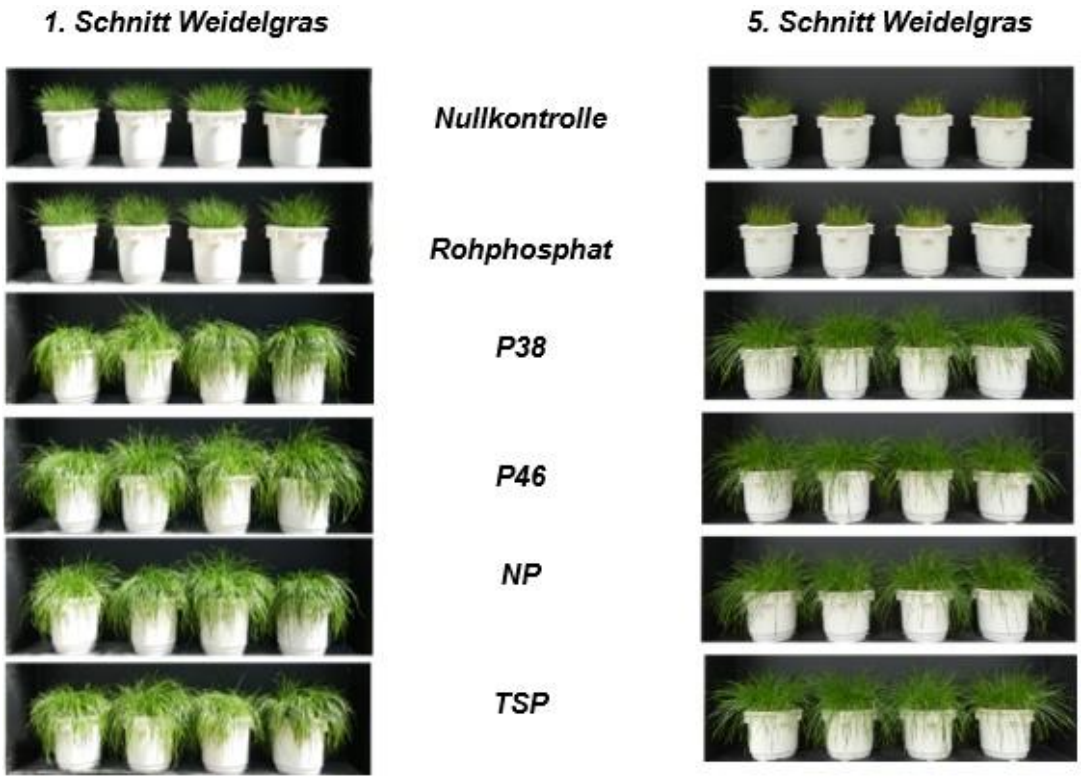


Abbildung 14: Auszug der Photodokumentation der Pflanzversuche - Beispiel Weidelgras

Im Ergebnis dieser ersten Pflanzversuche zeigte sich, dass die P-Verfügbarkeit in den Testprodukten bei den getesteten Kulturen insgesamt schon fast an die Wirkung von kommerziellem Triple-Superphosphat (TSP) heranreichte.

- Bei Weidelgras wurde nach der Düngung mit den Testprodukten etwas weniger Biomasse gebildet als bei Düngung mit TSP, die Unterschiede waren statistisch jedoch nicht signifikant. Die Trockenmassen betrugen zwischen 90 % (P-46 und NP) und 98 % (P-38) der Werte für TSP. Der P-Entzug war ebenfalls statistisch nicht unterschiedlich von der TSP-Variante. Die relativen Entzüge im Vergleich zu TSP betrugen 85 % bei der NPK, 96 % bei P-38 und 98 % bei P-46.
- Bei Luzerne war die Biomassebildung nach Düngung mit den Testprodukten statistisch nicht verschieden von der TSP-Variante. Hier wurden 94 – 96 % der Biomasse der TSP-Variante erreicht. Die P-Entzüge nach der Düngung mit den Testprodukten betrugen zwischen 86 % bei der NP und 93 % bei P-38 und P-46.

II.1.1.3 Erweiterung des Verfahrens auf Hochleistungsdünger, Mehrnährstoffdünger mit Funktionsschicht, Saatgut-Komposite

II.1.1.3.1 Verfahrensentwicklung zur Herstellung von komplexen Dünger- und Saatgutkompositen

Mit dem Ziel, die zuvor für die P- bzw. NPK-Dünger erarbeiteten Verfahrensansätze für die Herstellung komplexer Dünger- und Saatgut-Komposite zu erweitern wurden zunächst verfahrenstechnische Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, in denen für Hochleistungsdünger und funktionalisierte Dünger die Sprühgranulation von Rohstoffgemischen sowie das Sprühcoating zuvor sprühgranulierter Produkte als zielführend herausgearbeitet werden konnte.

Auf dieser Basis wurden vielschichtige Versuchsreihen durchgeführt, in denen zunächst die spezifischen Verfahrensparameter für unterschiedliche Rezepturen eingegrenzt und anschließend auf der Laboranlage Muster von Mehrkomponenten-Granulaten hergestellt werden konnten (Abbildung 15). Die daran durchgeführten Analysen zur Bewertung der Partikeleigenschaften erfüllten ohne wesentliche Ausnahmen die Ansprüche, was nicht zuletzt auf die im Vorfeld tiefgründig erarbeiteten Prozessgrundlagen und die dadurch gute produktspezifische Beherrschbarkeit des Sprühgranulationsprozesses zurückzuführen war.

Abbildung 15: Beispiel eines Mehrkomponentendünger

Für die Saatgut-Komposite, aber auch beschichteten Dünger-Komposite fokussierte man die Untersuchungen auf Coatingprozesse, in denen das Saatgut sehr schonend mit einer spezifisch funktionalisierbaren Schicht versehen werden kann. Anlagenseitig mussten insbesondere für die Abbildung dieser Coatingprozesse die technischen Voraussetzungen geschaffen werden, um insbesondere polymerbasierte Rohstoffe verarbeiten zu können. Entsprechend wurden in einem ersten Schritt die eingesetzten Laboranlagen derart modifiziert, dass mit ihnen sowohl organische Lösungsmittel als auch Polymerschmelzen verarbeitet werden können. Die Herausforderung bestand insbesondere darin, die gesamte Partikeloberfläche statistisch sicher mit dem Coatingmaterial zu belegen. Im Fall von Polymerschmelzen konnte dies jedoch nur durch einen Temperierschritt für das Anschmelzen des Polymers über eine längere Prozesszeit (>30 Minuten) bzw. – bei lösemittelbasierten Prozessen – über extreme Verdünnung erreicht werden.

Die Versuche wurden in der ProCell-Laboranlage mit dem Wirbelschichteinsatz Vario 3 unter Einsatz von Stickstoff als Prozessgas verwendet. Mit einer 1,2 mm Bodensprühdüse

(Zweistoffdüse; Zerstäubungsgastemperatur 100 – 110 °C) wurde die Sprühflüssigkeit zerstäubt. Hier mussten jedoch die maximalen Konzentrationen in den Ausgangslösungen genau eingehalten werden, um eine Verstopfung der Einsprühdüse zu vermeiden.

In den Vorversuchen zeigte sich zudem, dass sich auch höhere Sprühraten ohne kollabierende Schichtmasse realisieren ließen, was ein schnelleres Schichtwachstum bzw. z. T. auch kürzere Behandlungszeiten möglich machte. Die Evaluierung unterschiedlicher Polymere zeigte hingegen, dass diese teilweise zu Problemen durch Verkleben der Düse bzw. der Materialzuführung führten. Dies führte zur Einschränkung der weiter betrachteten Polymersysteme mit der Priorisierung geeigneter Biopolymere. Darüber hinaus mussten anlagenseitige Modifikationen vorgenommen werden, um die Lösemittel- und Temperaturbeständigkeit des Fördersystems (Pumpen und Schläuche) zu erhöhen und somit die für die Schmelzen erhöhten Fördertemperaturen sowie die chemischen Anforderungen der lösemittelbasierten Coatingrezepturen abbilden zu können.

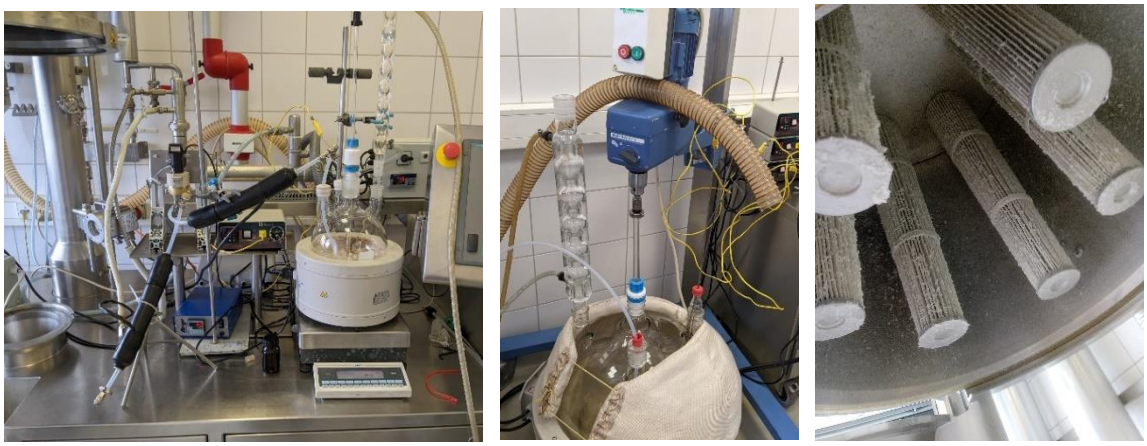


Abbildung 16: Versuchsaufbau ProCell LabSystem zum Coaten mit Biopolymeren und interne Filter nach Sprühversuchen mit Biopolymeren – Lösemittelbasiertes Ansatzsystem

Auf dieser Basis konnten umfangreiche Versuche zur Beschichtung von Ausgangsgranulaten durchgeführt und die spezifischen Prozessvorgaben herausgearbeitet werden. Dabei zeigte sich, dass der Prozess trotz des Einsatzes der primär zum großen Teil verfahrenstechnisch noch unbekannten Coatingrezepturen nach anfänglicher Abstimmung beherrschbar war und stabil geführt werden konnte. Ein beispielhafter, in mehreren Batches durchgeführter Coatingprozess ist in Abbildung 17 dargestellt.

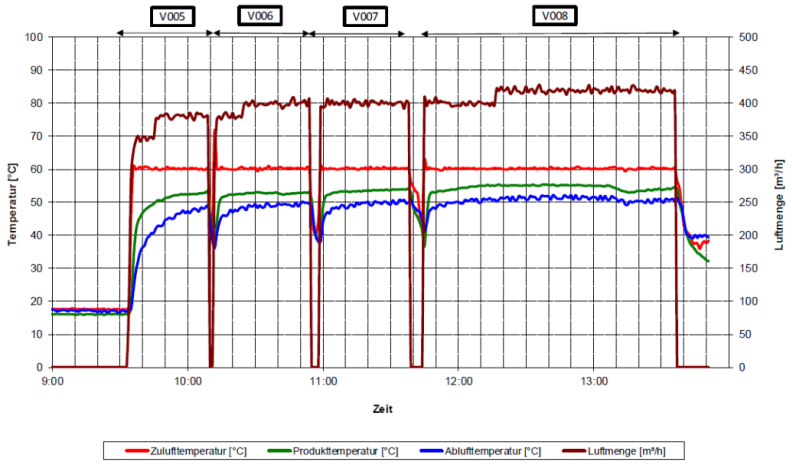


Abbildung 17: Beispielhafter Parameterverlauf im erarbeiteten Coating-Prozess

II.1.1.3.2 Verfahrensübertragung in den Pilotmaßstab

Im Vorfeld der Versuche zur Skalierbarkeit des Coatingprozesses mussten zunächst Einsatzbeschränkungen der zuvor genutzten AGT12 festgestellt werden, die sich insbesondere auf die Verarbeitung der lösemittelbasierten Ansätze bezogen. Da die diesbezügliche Umrüstung der Pilotanlage zu aufwändig und im Rahmen des Projektes nicht finanzierbar war, wurden hierauf die Polymerschmelzen verarbeitet, während für die Verarbeitung der Lösemittelsysteme mit der GF25 eine alternative Pilotanlage im Technikum herangezogen wurde.

An der AGT12 musste für die Schmelzeförderung das Pumpensystem, welches bis dato nur für niedrigere Temperaturen konzipiert war, mithilfe einer zusätzlichen Begleitheizung erweitert werden (Abbildung 18). Ansonsten waren anlagenseitig – auch bei der GF 25 – nur geringfügige Anpassungen erforderlich, so dass diese beide Pilotanlagen für die Versuche zur Verfügung standen.

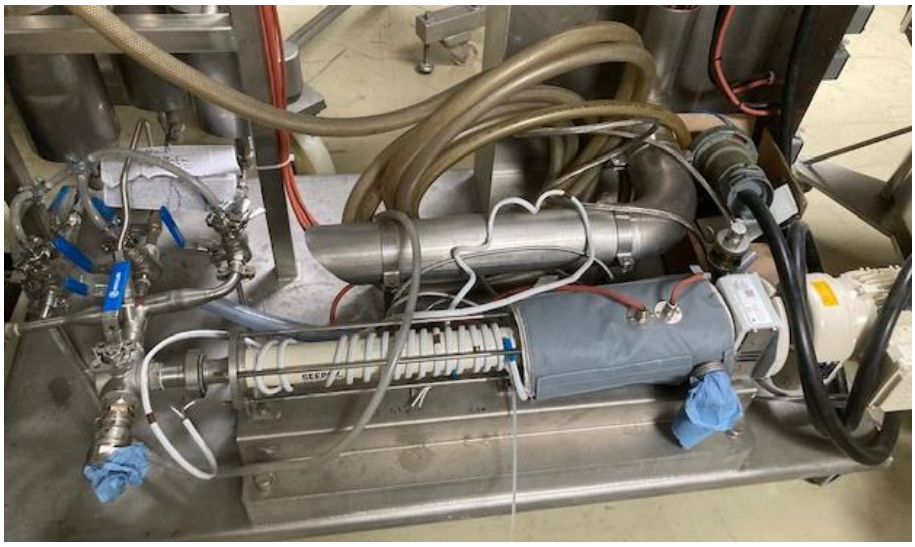


Abbildung 18: Überarbeitet Schmelzepumpe mi Begleitheizung

Aufgrund der aus dem Bündnis nur sehr begrenzt zur Verfügung gestellten Rohstoffe konnten auch hier die Skalierungsversuche nur in einem sehr begrenzten Umfang durchgeführt werden. Dennoch konnten sowohl verschiedene Kompositgranulate auf Dünger und Saatgutbasis hergestellt werden. Im Zuge dieser Versuche ließen sich die zuvor ermittelten Verfahrensvorgaben weitgehend bestätigen, wobei die optimalen Prozessvorgaben für die Verarbeitung der entwickelten Coatingrezepturen durchaus spezifische Parameteranpassungen zur Folge hatten. Im Ergebnis konnten diese jedoch umgesetzt werden, so dass sich für die untersuchten Modellprodukte stabile Prozess- und definierte Schichtwachstumsverläufe abbilden ließen.

II.1.1.3.3 Bewertung der erzeugten Granulatmuster

In den anschließenden Analysen ließen sich im Hinblick auf die Partikelgröße, -morphologie, -oberfläche sowie -geometrie sehr gute Ergebnisse (Partikelgrößenverteilung, Rundheit etc.) nachweisen (Abbildung 19). Anhand mehrerer Musterprodukte zeigte sich – auch bei Mehrfachbeschichtungen - eine geschlossene und homogene Schichtausprägung (Abbildung 20). Zudem konnte den Coatings eine geringe Porigkeit und ausreichende Härte attestiert werden, so dass die Übertragbarkeit des Verfahrens auch auf komplexe Kompositgranulate nicht nur labortechnisch, sondern auch im Pilotmaßstab bestätigt werden konnte.

Abbildung 19: Beispiele beschichteter/pillierter Saatgutmuster – Raps (links), Petersilie (rechts)

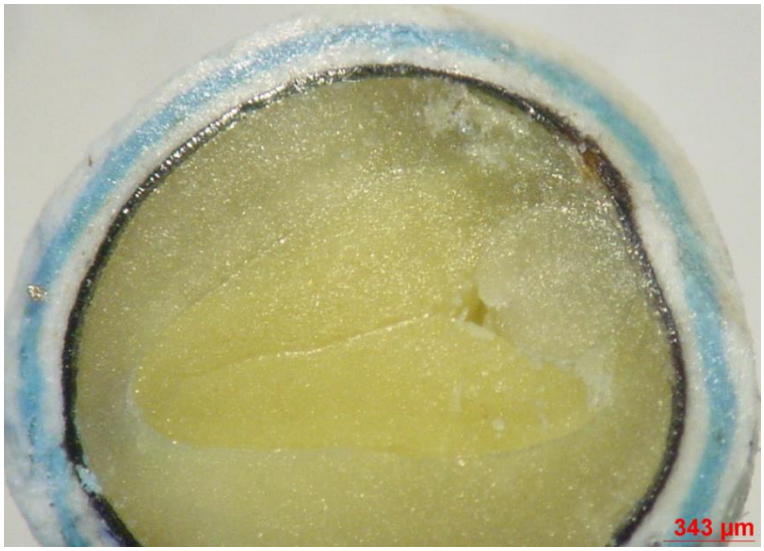


Abbildung 20: Beschichtetes Saatgutmuster mit geschlossenem, homogenen Mehrschichtcoating

II.1.1.4 Konzeptentwicklung Prozesskopplung

Im Rahmen der Arbeiten wurden diverse Abstimmungen mit zukünftigen Betreibern und Planern Monoverbrennungsanlagen durchgeführt. Die Anzahl der Monoverbrennungsanlagen und zugehörigen Kapazitäten werden sich in den nächsten Jahren in Deutschland signifikant erhöhen. Als absolute Schlüsseltechnologie bei der Verbrennung kristallisiert sich die stationäre Wirbelschichtverbrennung heraus, mit der nahezu alle Verbrennungsanlagen betrieben werden. Entsprechend ist mit einem wachsenden Aufkommen an Monoklärschlammaschen zu rechnen.

Für eine sinnvolle energetische Kopplung einer Düngemittelerzeugungsanlage an eine Monoklärschlammverbrennungsanlage Im Rahmen der Arbeiten wurden diverse Abstimmungen mit zukünftigen Betreibern und Planern Monoverbrennungsanlagen durchgeführt. Die Anzahl der Monoverbrennungsanlagen und zugehörigen Kapazitäten werden sich in den nächsten Jahren in Deutschland signifikant erhöhen. Als absolute Schlüsseltechnologie bei der Verbrennung kristallisiert sich die stationäre Wirbelschichtverbrennung heraus, mit der nahezu alle Verbrennungsanlagen betrieben werden. Entsprechend ist mit einem wachsenden Aufkommen an Monoklärschlammaschen zu rechnen.

Für eine sinnvolle wurden zwei grundlegende Ansätze zur Erschließung energetischer Synergieeffekte identifiziert:

- Auf Grund der unterschiedlichen Kapazitäten variiert der in den Monoklärschlammverbrennungsanlagen erzeugte Dampf. Hier schwankt sowohl die Menge als auch die Temperatur und zugehörige Druckstufe. Der anfallende Dampf liegt zwischen 10 bar und 180 °C sowie 46 bar und 460 °C. Ein Teil des anfallenden Dampfs kann zum Aufheizen der zur Düngemittelerzeugung notwendigen Prozessluft genutzt werden, was den Einsatz von Erdgas als Medium substituieren würde.
- Darüber hinaus erzeugen einige Monoklärschlammverbrennungsanlagen aus einem Teil des anfallenden Dampfs Elektrizität. Dieser Strom kann ebenfalls für die Anlage zur Düngemittelerzeugung verwendet werden.

Darüber hinaus wurden in den konzeptionellen Untersuchungen Einspareffekte herausgearbeitet, die durch die

- erhebliche Reduzierung der Transportwege infolge des standortbezogenen Ascheanfalls
- Komplementärnutzung vorhandener Infrastruktur wie Aschesilos, Werksperipherie Pforte, Sozialräume, Waage, Labor, Leitsystem, Logistik insgesamt etc. sowie
- Anbindung an die existierende Abluftverbrennung erschlossen werden können.

II.1.1.5 CO2-Bilanzierung des Verfahrens

Zur Bewertung der entwickelten Technologien im Hinblick auf energetische Effizienz und Schadstoffemissionen wurde die Bilanzierung der untersuchten Düngemittelproduktions- und Phosphorrecyclingverfahren am Beispiel der großtechnischen Produktionsanlage der Firma Seraplant in Haldensleben durchgeführt.

Um das Verfahren mit dem herkömmlichen Produktionsprozess für Phosphatprodukte und alternativen Phosphorrecycling-Verfahren vergleichbar zu machen, wurde eine ESCAPE-Methode (Evaluation of sustainability of material substitution using carbon footprint by a simplified approach) eingesetzt. Diese Methode ermöglicht es anhand einfach zu ermittelnder Kennzahlen Prozesse im Hinblick auf wichtige Aspekte der Nachhaltigkeit dar- und gegenüberzustellen, ohne eine vollständige Umweltbilanz (engl. life cycle assessment (LCA)) durchführen zu müssen.

Dazu werden spezifischer Energieeinsatz (EE_{SUB}) und spezifische CO2-Emissionen (CF_{SUB}) für den betrachteten Prozess ermittelt. Energieeinsatz und CO2-Emissionen enthalten hierbei alle während der kompletten Wertschöpfungskette (Rohstofferzeugung, Transport, Produktion) angefallenen Beiträge. Die spezifischen CO_2-Emissionen verstehen sich in diesem Zusammenhang als die Gesamtheit aller emittierten Treibhausgase entsprechend ihrer CO_2-Equivalente. In (Ario Fahimi, 2021) wurden mit Hilfe dieser Methode diverse Technologien zum Phosphorrecycling aus Klärschlammasche dem herkömmlichen Aufbereitungsprozess von Phosphatgestein gegenübergestellt. Es wurden daher die von der Firma Seraplant gelieferten Produktionsdaten analog zu den von (Ario Fahimi, 2021) ermittelten Ergebnissen aufbereitet, um die Performance dieses Verfahrens mit dem klassischen Herstellungsprozess und den alternativen Recycling-Verfahren vergleichen zu können.

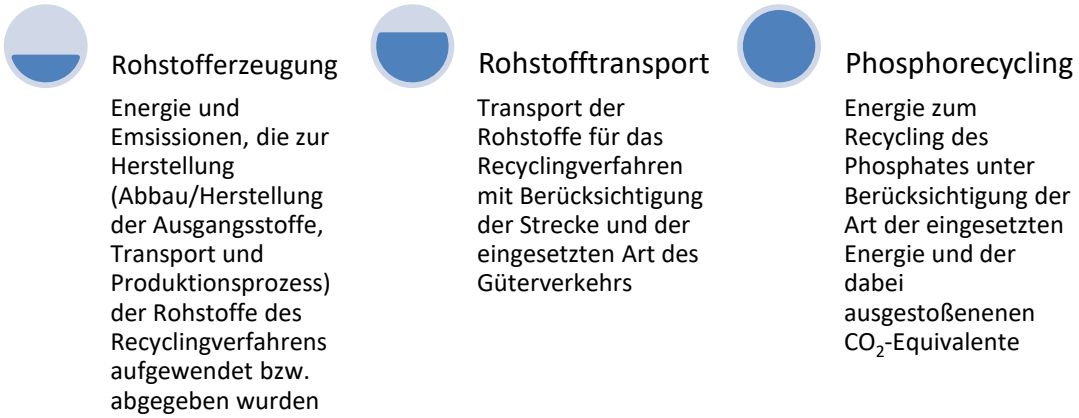
Zum Vergleich der Verfahren wird bei der ESCAPE-Methode der $SUB - RAW\ Index$ verwendet. Dieser berechnet sich nach der folgenden Gleichung:

$$SUB - RAW\ Index = \frac{1}{2}[\log EE_{RAW} - \log EE_{SUB} + \log CF_{RAW} - \log CF_{SUB}].$$

EE_{RAW} ist hierbei der spezifische Energieverbrauch des herkömmlichen Aufbereitungsprozesses und CF_{RAW} der spezifische CO2-Ausstoß. Analog dazu sind EE_{SUB} und CF_{SUB} spezifischer Energieverbrauch und CO_2-Ausstoß der Recyclingprozesse. Bei einem Vergleich der unterschiedlichen Phosphor-Recyclingverfahren werden die Werte auf den Gehalt des recycelten Phosphors normiert. Diese Darstellung ermöglicht eine schnelle Bewertung von Nachhaltigkeit und Umweltauswirkungen im Vergleich zum Benchmark, in der die Recyclingrate des entsprechenden Verfahrens ebenfalls berücksichtigt ist. Nimmt der $SUB - RAW\ Index$ einen positiven Wert an, weist der betrachtete Recycling-Prozess (SUB) eine bessere Performance auf als der Benchmark-Prozess (RAW). Auch die Performanceunterschiede unterschiedlicher Recycling-Verfahren aus Klärschlammasche lassen sich auf diese Weise beurteilen.

II.1.1.5.1 Ermittlung der notwendigen Datenbasis und Erstellung der CO2-Bilanz

Für die Erstellung der Energie- und CO_2-Bilanzen wurden der spezifische Energiebedarf und die spezifischen CO_2-Emissionen entlang der kompletten Wertschöpfungskette für das hier untersuchte Verfahren benötigt. Die zentralen Beiträge sind hierbei:



Die Auswertung aller zu Verfügung gestellten Daten und die Ermittlung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen erfolgt nach den gleichen Annahmen, die in (Ario Fahimi, 2021) getroffen wurden. So sind die im Rahmen dieses Projektes gewonnenen Ergebnisse mit den Daten der Studie direkt vergleichbar.

⇨ Düngemittelherstellung/Phosphorrecycling

Die Datengrundlage für die energetische Auswertung des Phosphorrecyclings lieferte die Seraplant GmbH. Hierzu wurden der thermische und der elektrische Energiebedarf für die drei produktionsstärksten Monate ermittelt und für die Erstellung dieses Berichtes bereitgestellt. Anhand dieser Daten konnten der spezifische Energiebedarf und spezifische CO_2-Emissionen abhängig von der Art der eingesetzten Energieform für die Produktion von P38 ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 in Bezug auf das Endprodukt dargestellt. Die erhobenen Daten wurden ebenfalls genutzt, um die Abschätzung für die Herstellung der Mehrkomponenten-Dünger NPS 7-24-8 durchzuführen. Beide Produkte waren gut miteinander vergleichbar, da sie einen ähnlichen Gesamtanteil an Nährstoffen aufweisen.

Tabelle 1: Produktspezifischer Energiebedarf und CO2-Emissionen des untersuchten Phosphorrecycling-Verfahrens für die Herstellung des Phosphatdüngers P38

Energie-form	**Spezifischer Energiebedarf Phosphorrecycling [MJ/kg$_{Pr}$]**		**Spezifische CO_2-Emission Phosphorrecycling [kg$_{CO2}$/kg$_{Pr}$]**	
	P38	NPS	P38	NPS
thermisch	0,361	0,401	0,215	0,236
elektrisch	0,028	0,031	0,036	0,040
Summe	**0,389**	**0,432**	**0,251**	**0,276**

⇨ Rohstofferzeugung

Die zentralen Einsatzstoffe der hier untersuchten Verfahren sind Klärschlammasche, technische Phosphorsäure und Ammoniumsulfat. Im Fall der Herstellung eines reinen Phosphatdüngers, wie P38, kommen ausschließlich Klärschlammasche und Phosphorsäure zum Einsatz. Bei der Herstellung eines NPS-Düngers (Mehrkomponenten-Dünger mit den Makronährstoffen Stickstoff, Phosphor und Schwefel) wird zusätzlich Ammoniumsulfat, als Stickstoff- und Schwefelträger, verwendet.

Zur besseren Vergleichbarkeit werden die Beiträge für die Klärschlammasche, analog zu (Ario Fahimi, 2021), als 0 MJ/kgP bzw. 0 kgCO_2/kgP angenommen, da es sich hierbei um einen Abfallstoff handelt. Die Beiträge für die Herstellung der technischen Phosphorsäure wurden ebenfalls aus (Ario Fahimi, 2021) entnommen und anteilig auf das Düngemittelprodukt umgerechnet. Spezifischer Energiebedarf für die Herstellung von Ammoniumsulfat und die dabei angefallenen Treibhausgas-Emissionen wurden respektive (Kyttä, Helenius, & Tuomisto, 2021) und (Brentrup, Lammel, Stephani, & Christensen, 2018) entnommen. Die Tabelle 2 zeigt die produktspezifischen Beiträge für die Einsatzstoffe, Phosphorsäure, Klärschlammasche und Ammoniumsulfat, für beide Produkte.

Tabelle 2: Spezifischer Energiebedarf [MJ/kgPr] und spezifische CO2-Emissionen [kgCO2/kgPr] der eingesetzten Rohstoffe

Rohstoff	**Spezifischer Energiebedarf Herstellung [MJ/kg$_{Pr}$]**		**Spezifische CO2-Emission Herstellung [kg$_{CO2}$/kg$_{Pr}$]**	
Produkt	P38	NPS	P38	NPS
Klärschlammasche	0,00*	0,00*	0,000*	0,000*
Phosphorsäure	15,74*	9,49*	0,821*	0,494*
Ammoniumsulfat	0,00	1,94**	0,000	0,181***

* Werte aus (Ario Fahimi, 2021); ** Wert aus (Kyttä, Helenius, & Tuomisto, 2021); *** Wert aus (Brentrup, Lammel, Stephani, & Christensen, 2018)

⇨ Rohstofftransport

In den meisten Fällen erfolgt der Transport der Rohstoffe über die Straße. Daher werden zur Berechnung der Energie- und CO_2-Bilanzen die aktuellen Werte für Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen im Güterverkehr benötigt. Als Wert für den Energieverbrauch im LKW-Verkehr wurde der Wert für das Jahr 2020 aus (Umweltbundesamt, 2022) und für die Treibhausgas-Emissionen der Wert für das Jahr 2019 aus (Statistisches Bundesamt, 2022) angenommen. In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die entsprechenden Werte aufgeführt.

Tabelle 3: Spezifischer Energiebedarf [MJ/(t km)] und spezifische CO2-Emissionen [kgCO2/(t km)] für den LKW-Transport

Spezifischer Energiebedarf [MJ/(t km)]	Spezifische CO_2-Emission [kg_{CO2}/(t km)]
1,6*	0,113**

* Wert aus 2020 (Umweltbundesamt, 2022); ** Wert aus 2019 (Statistisches Bundesamt, 2022)

Die Seraplant GmbH bezog während des Betrachtungszeitraumes die technische Phosphorsäure größtenteils aus dem südosteuropäischen Ausland. Es wurde daher eine mittlere Transportstrecke von 1.300 km angenommen. Die Klärschlammasche wird meist von Monoverbrennungsanlagen aus dem unmittelbaren Umfeld der Phosphorrecyclinganlage angeliefert, daher wurde hier eine mittlere Transportstrecke von 70 km angenommen. Ammoniumsulfat-Lösung ist regional bis überregional erhältlich, daher wird eine mittlere Transportstrecke von 150 km angenommen. Den produktspezifischen Energiebedarf in MJ/kgPr und die entsprechenden CO_2-Emissionen als Resultat dieser Annahmen zeigt die

Tabelle 4.

Tabelle 4: Produktspezifischer Energiebedarf und CO2-Emissionen für den Transport der Einsatzstoffe

Rohstoff	Spezifischer Energiebedarf Transport [MJ/kg_{Pr}]		Spezifische CO_2-Emission Transport [kg_{CO2}/kg_{Pr}]	
	P38	NPS	P38	NPS
Klärschlammasche (70 km)	0,06	0,05	0,005	0,003
Phosphorsäure (1300 km)	1,33	0,81	0,094	0,057
Ammoniumsulfat (150 km)	-	0,13	-	0,010

II.1.1.5.2 Zusammenfassung und Bewertung der CO2-Bilanz

Abschließend sind die Ergebnisse der einzelnen Teilbeiträge und das Gesamtergebnis für den produktspezifischen Energiebedarf und die CO_2-Emissionen des untersuchten Recycling-Verfahrens in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Energie- und CO2-Bilanzen in Bezug auf eine Tonne Endprodukt

		P38		NPS	
Kategorie	Material	EE [MJ/kg_{Pr}]	CF [kgCO2/kg_{Pr}]	EE [MJ/kg_{Pr}]	CF [kgCO2/kg_{Pr}]
Rohstoffe	Phosphorsäure	15,745	0,821	9,487	0,494
Rohstoffe	Klärschlammasche	-	-	-	-
Rohstoffe	Ammoniumsulfat	-	-	1,938	0,181
Transport	Phosphorsäure	1,335	0,094	0,805	0,057
Transport	Klärschlammasche	0,065	0,005	0,046	0,003
Transport	Ammoniumsulfat	-	-	0,135	0,010
Herstellung	Produkt	0,389	0,251	0,432	0,276
SUMME		**17,533**	**1,170**	**12,843**	**1,021**

Zur Veranschaulichung soll die Darstellung von produktspezifischem Energiebedarf und CO_2-Emissionen für die Düngemittelprodukte aus Klärschlammasche in Abbildung 21 dienen.

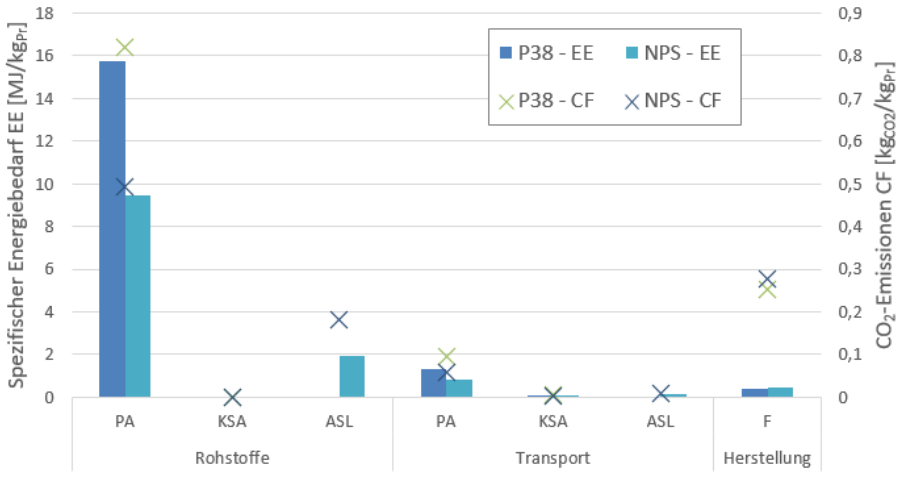


Abbildung 21 Spezifische(r) Energiebedarf u. CO_2-Emissionen d. Phosphorrecycling-Verfahrens für Phosphat u. Mehrkomponentendünger; PA – Phosphorsäure, KSA – Klärschlammasche, ASL – Ammoniumsulfat-Lösung, F - Fertigprodukt

Der größte Anteil des Gesamtenergieverbrauches und der resultierenden Treibhausgas-Emissionen entfällt sowohl bei P38 als auch bei NPS auf Herstellung und Transport der Einsatzstoffe. Hierbei nimmt die Phosphorsäure wiederum den höchsten Anteil ein. Insgesamt können über die komplette Wertschöpfungskette bei der Produktion von NPS gegenüber dem P38 27 % Energie und 13 % Treibhausgas-Emissionen pro Tonne Fertigprodukt eingespart werden. Die Einsparung kann hauptsächlich auf die geringere Einsatzmenge an Phosphorsäure bei der NPS-Produktion zurückgeführt werden.

In Abbildung 22 ist die prozentuale Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für das untersuchte Recycling-Verfahren dargestellt.

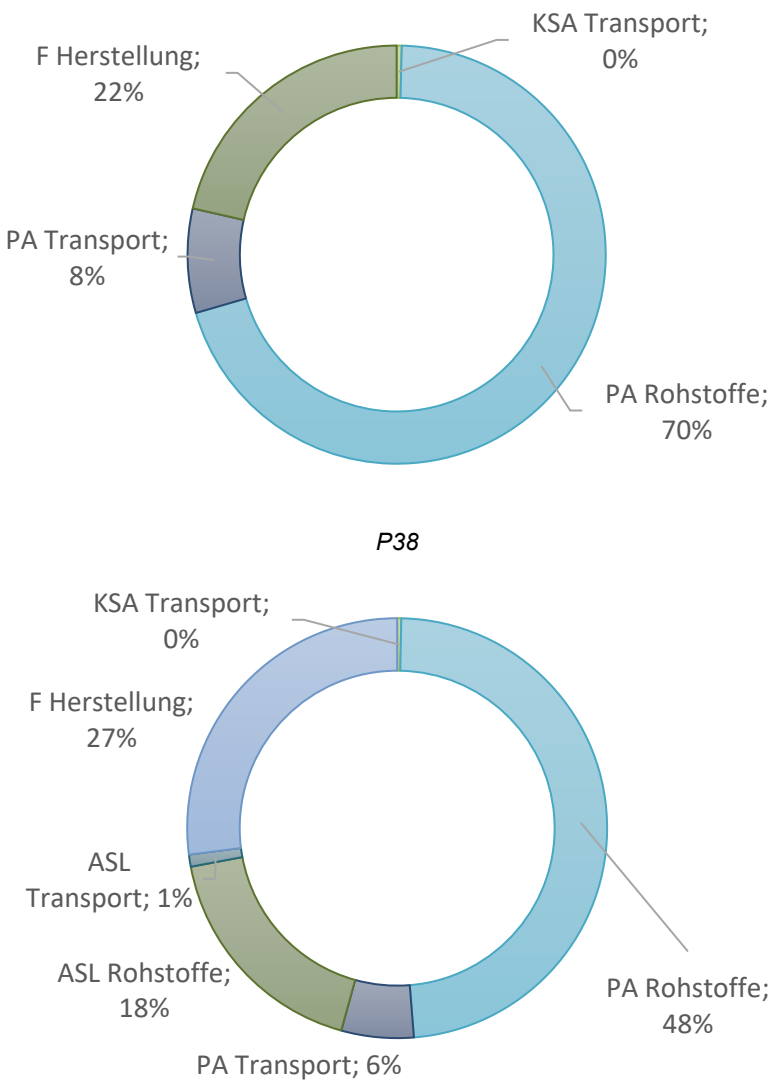


Abbildung 22: Prozentuale Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für Ein- und Mehrkomponenten-Dünger; PA – Phosphorsäure, KSA – Klärschlammasche, ASL – Ammoniumsulfat-Lösung, F - Fertigprodukt

Im Gegensatz zum spezifischen Energiebedarf (ca. 2 – 4 %) machen die CO_2-Emissionen des Recyclingverfahrens (ca. 22 – 27 %) bei beiden Produkten einen signifikanten Anteil an der Gesamtemissionen aus. Der Großteil der Treibhausgas-Emissionen, ca. 73 % für den NPS bzw. 78 % für P38, resultieren jedoch aus Herstellung und Transport der Einsatzstoffe. Die Herstellung von Phosphorsäure leistet den größten Beitrag, da es sich um ein energieintensives Verfahren handelt. Da in dem untersuchten Verfahren Düngemittel für die konventionelle, intensivierte Landwirtschaft produziert werden, die Phosphatgehalte von 24 – 38 % aufweisen, werden signifikante Mengen Phosphorsäure benötigt.

Zur Bewertung der Energie- und CO_2-Bilanz des Düngemittelproduktions- und Phosphorrecycling-verfahrens wurde der $SUB - RAW\ Index$ für die Herstellung von Düngemitteln ermittelt und mit weiteren Verfahren zur Phosphatherstellung und -aufbereitung verglichen. Zum Zweck der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus (Ario Fahimi, 2021) und die Berechnung des $SUB - RAW\ Index$ wurden die Ergebnisse für den in diesem Projekt untersuchten Recyclingprozess auf den Anteil des recycelten Phosphors normiert. Die Ergebnisse für sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Der Recycling-Dünger P38 enthält ca. 5 % Phosphor (11,2 % Phosphat) und der NPS ca. 3,5 % Phosphor (8 % Phosphat), der ursprünglich aus der Klärschlammasche stammt und wieder dem Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden kann. Durch den geringeren Ascheeinsatz bei der Herstellung des NPS ist der spezifische Energiebedarf bezogen auf die Tonne recycelten Phosphors ca. 4 % höher im Vergleich zum P38. Die spezifischen Treibhausgas-Emissionen pro Tonne recyceltem Phosphor erhöhen sich sogar um etwa 24 %.

Tabelle 6: Darstellung der Ergebnisse in Bezug auf eine Tonne recycelten Phosphors

		P38		**NPS**	
Kategorie	Material	EE [MJ/kg_P]	CF [$kgCO_2/kg_P$]	EE [MJ/kg_P]	CF [$kgCO_2/kg_P$]
Rohstoffe	Phosphorsäure	321,530	16,756	274,844	14,323
Rohstoffe	Klärschlammasche	-	-	-	-
Rohstoffe	Ammoniumsulfat	-	-	56,148	5,255
Transport	Phosphorsäure	27,260	1,925	23,322	1,647
Transport	Klärschlammasche	1,325	0,094	1,325	0,094
Transport	Ammoniumsulfat	-	-	3,906	0,276
Herstel-lung	Produkt	7,942	5,126	12,514	7,991
SUMME		**358,058**	**23,901**	**372,059**	**29,586**

In (Ario Fahimi, 2021) wird eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zum Phosphorrecyclingverfahren aus Klärschlammasche vorgestellt. Zum Zwecke dieser Gegenüberstellung werden im Rahmen dieses Berichtes ausschließlich Verfahren ausgewählt, die im Produktionsmaßstab betrieben werden und deren Daten den Autoren vollumfänglich zur Verfügung gestellt wurden. Als Vergleichspunkt (Benchmark) für die vorgestellte Studie dient die Herstellung technischer Phosphorsäure durch den nasschemischen Aufschluss von Flourapatit mittels Schwefelsäure. Das RecoPhos-Verfahren ist ein thermochemisches Verfahren, bei dem Phosphat und Schwermetalle bei hohen Temperaturen unter reduzierenden Bedingungen extrahiert werden. Bei dem ICL-Verfahren handelt es sich um ein 2-stufiges nasschemisches, schwefelsäurebasiertes Extraktionsverfahren. Im Gegensatz zu den meisten anderen nasschemischen Verfahren am Markt wird bei dem Lotus Projekt, dessen Produktionsanlage in Gifu in Japan betrieben wird, Natronlauge als Extraktionsmittel eingesetzt.

Abbildung 23 zeigt den spezifischen Energiebedarf über die spezifischen CO_2-Emissionen des Vergleichsprozesses und der betrachteten Phosphorrecycling-Prozesse aus Klärschlammasche.

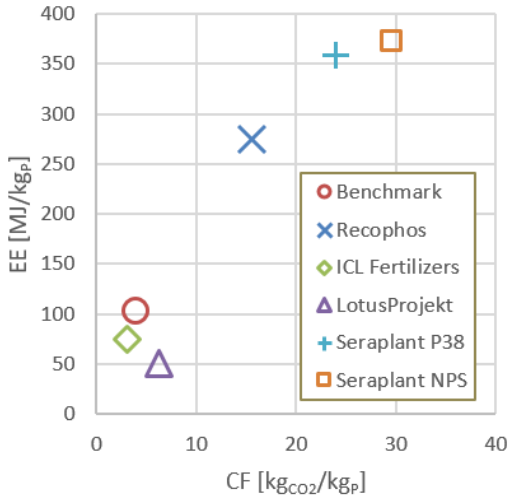


Abbildung 23 Darstellung des spezifischen Energiebedarfes über die spezifischen CO2-Emissionen des Benchmark-Prozesses und unterschiedlicher Phosphorrecyclingverfahren

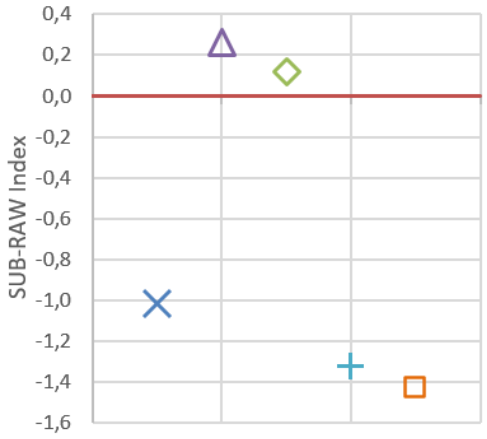


Abbildung 24 Darstellung des SUB-RAW Index der betrachteten Phosphorrecyclingverfahren

Das hier untersuchte Phosphorrecycling-Verfahren schneidet bei beiden untersuchten Düngemittelprodukten hinsichtlich spezifischen Energiebedarfs und Treibhausgas-Emissionen zunächst schlechter ab als die der herkömmliche Produktionsprozess von Phosphatdünger und die anderen dargestellten Recycling-Prozesse. Das ist auch an dem niedrigen $SUB-RAW\ Index$ zu erkennen, vgl. Abbildung 24.

Bei allen untersuchten Produkten sind jedoch über 80 % des spezifischen Energiebedarfs und über 50 % der Treibhausgas-Emissionen des Verfahrens auf die Herstellung der zugesetzten Phosphorsäure zurückzuführen, welche energieintensiv aus Phosphatgestein aus dem Abbau mineralischer Phosphatvorkommen gewonnen wird. In dem Verfahren kann jedoch jede Phosphorsäure eingesetzt werden, die die gesetzlichen Vorgaben durch die geltende Düngemittelverordnung einhält. Auf dem Markt gibt es auch Phosphorsäuren, die als Nebenprodukte anderer Produktionsprozesse anfallen und ebenfalls für den Herstellungsprozess geeignet sind. Zusätzlich gibt es bereits Verfahren am Markt, bei denen Phosphorsäure aus Zwischenprodukten der Abwasserbehandlung hergestellt wird, z. B. TetraPhos (REMONDIS Industrie Service, 2022). Bei einem Einsatz dieser Produkte ist davon auszugehen, dass sich die Beiträge für spezifischen Energiebedarf und Treibhausgas-Emissionen gegenüber dem hier betrachteten Szenario deutlich reduzieren. Da die Erzeugung solcher Produkte in der Regel dezentral organisiert ist, kann angenommen werden, dass sich infolgedessen auch die Beiträge für den Transport der Phosphorsäure verringern. Auch die Beiträge für die spezifische Energie und damit auch für die resultierenden Treibhausgas-Emissionen des Produktionsprozesses lassen sich durch eine direkte Verschaltung der Recycling-Anlage mit einer Monoverbrennungsanlage für Klärschlamm erheblich reduzieren. So fallen auch nahezu keine Beiträge für den Transport der Klärschlammasche an.

Im Rahmen dieses Projektes dient die Erstellung und Auswertung der CO_2-Bilanz zur Ergründung von Marketingstrategien für den Markteintritt der hergestellten Düngergranulate. Die Untersuchung und Etablierung dieses Düngemittelproduktions- und Phosphorrecycling-Verfahrens liegen maßgeblich in der Nutzbarmachung sonst gebundener Phosphate und deren Rückführung in den Wirtschaftskreislauf.

II.1.2 Ergebnisbewertung / Fazit

Trotz der Einschränkungen, die sich infolge der begrenzten Rohstoffverfügbarkeit insbesondere im Hinblick auf die Verfahrensskalierungen in >1-Tonnen-Maßstäbe ergaben können die im Vorhaben erzielten Ergebnisse sehr positiv beurteilt werden:

- Für das ursprünglich auf einzelne Klärschlammaschen ausgerichtete Verfahren konnten Rezepturen und Verfahrensvorgaben erarbeitet werden, die eine deutliche Ausweitung des PHOS4green-Verfahrens auf eine Vielzahl anderer biogener Reststoffe erlaubt. Damit erweitert sich das Spektrum der für eine wirtschaftliche Umsetzung der P-Rückgewinnung mit direkter Düngerherstellung heranzuziehenden Rohstoffe deutlich, was entsprechende Investitionsentscheidungen in die Technologie vereinfacht.
- Für die verfolgten Zielproduktgruppen (P-, NPK- Hochleistungsdünger/ Saatgutkomposite) konnten integrierte Prozesslösungen erarbeitet werden, welche eine durchgängige Verarbeitung der P-haltigen Rest- bzw. Rohstoffe zu definierten Düngergranulaten oder Saatgutkompositen erlauben. Anhand von Produktmustern konnte für alle drei Gruppen bestätigt werden, dass sie die granulatspezifischen Anforderungen der Düngemittelverordnung erfüllen.
- Für die betrachteten Produktgruppen konnte die Skalierbarkeit des Verfahrens bis in den Pilotmaßstab erfolgreich nachgewiesen werden. Auf dieser Basis werden aus technischer Sicht sehr gute Chancen für die industrielle Umsetzung dieser Prozesse gesehen.
- Es wurde ein Konzept für die Kopplung des Verfahrens an Monoverbrennungsanlagen erarbeitet, mit dem sich hochinteressante energetische Synergieeffekte erschließen und die Energie- bzw. CO_2-Bilanz einer Produktionsanlage signifikant verbessern lassen. In Verbindung mit der technischen Optimierung des Granulationsprozesses (insbesondere Einstoffverdüsung) bieten sich weiterführende Energieeinsparpotenziale, die mehr als 10 % gegenüber nichtoptimierten Anlagen betragen.
- Das Verfahren wurde einer eingehenden CO_2-Bilanzierung unterzogen. Dabei musste festgestellt werden, dass es in der Gesamtbetrachtung signifikante Nachteile gegenüber der konventionellen Düngemittelherstellung mitbringt. Diese resultieren jedoch überwiegend aus der Verwendung mineralisch gewonnener Phosphorsäuren. Vor dem Hintergrund, dass im Vorhaben jedoch die Verwendbarkeit alternativer Säurekomponenten nachgewiesen werden konnte, die ohne zusätzliche Energieaufwände bzw. CO_2-Emissionen sowie sehr günstig z. B. aus industriellen Stoffströmen oder der Abwasserbehandlung bezogen werden können, eröffnen sich für die zukünftige Praxis deutlich günstigere CO_2-Bilanzen und diesbezüglich klare Vorteile gegenüber der konventionellen Mineraldüngerproduktion. Vor diesem Hintergrund lässt sich auch das diesbezügliche Projektziel bestätigen.

II.2 TP 4.2 – Entwicklung einer Rezepturmatrix zur Überführung von phosphathaltigen Reststoffen in hochwertige Düngeprodukte

II.2.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse

TS 4.1 (TP 4.1.2 MFPA) -> Schwerpunkt Rohstoffuntersuchung, Entwicklung von Analyseverfahren, Löslichkeitsbestimmung und Schwermetallabtrennung

Schwerpunkt der Arbeiten lag in der Entwicklung einer geeigneten Analysenmethodik zur schnellen Untersuchung von Rohstoffaschen. Diese wurde unter anderem für die Untersuchung von Rohstoffen auf ihre Zusammensetzung genutzt. Auch für die Versuche zur Schwermetallabtrennung waren die entstehenden Untersuchungsmethoden enorm wichtig.

II.2.1.1 Entwicklung schneller Analysenverfahren

Ziel

Es soll ein Schnellanalyseverfahren für die Routinequalitätskontrolle entwickelt werden. Dieses Verfahren soll für Düngemittelprodukte als auch die entsprechenden Ausgangsstoffe wie Klärschlammasche eingesetzt werden. Es sollen neben den Hauptkomponenten auch Nebenkomponenten wie Schwermetalle quantifiziert werden.

Ergebnisse

Zur Erfüllung dieses APs sollte ursprünglich eine LA-ICP-MS (Laserablation mit induktiv gekoppeltem Plasma und Massenspektrometer) zum Einsatz kommen (s. Zwischenbericht in 2022). Nach ersten Versuchsmessungen stellte sich heraus, dass diese Art der Analytik nicht für einen routinemäßigen Gebrauch geeignet ist. Die Bedienung und Auswertungen sind sehr komplex und nur von Fachpersonal durchführbar. Alternativ zu diesem Verfahren stand in der frühen Projektphase auch ein Gerät zur wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenzanalyse (WD-RFA) zur Verfügung. Diese hatte im Vergleich zur LA-ICP-MS einige Vorteile, wie etwa einen einfacheren Messablauf. Messungen mit der enthaltenen Universalmessmethode QuantExpress der Herstellerfirma Bruker zeigten, dass die WD-RFA innerhalb kürzester Zeit (ca. 20 min) und mit geringem Aufwand der Probenvorbereitung plausible Messergebnisse bis in einen tiefen zweistelligen PPM-Bereich liefern kann. Aus diesem Grund wurde der Fokus bei der Methodenentwicklung auf dieses Gerät gelegt (siehe Zwischenbericht 2021).

Um die WD-RFA für die Analyse von Klärschlammaschen zu optimieren, ist eine matrixangepasste Kalibrierung notwendig. Da es für solch eine Applikation noch kein marktverfügbares Standardmaterial gibt, wurde der Fokus im Projekt auf Klärschlammaschen (KSA) aus Monoverbrennungsanalagen gelegt. Diese Aschen bilden die Hauptmatrix der Ein- und Ausgangsprodukte der Düngemittelproduktion. Über den Zeitraum von ca. 1 Jahr konnten insgesamt 9 verschiedene KSAs, neben der bereits vorhandenen und genutzten Muster-KSA, aus deutschen Monoverbrennungsanlagen eingeworben werden.

Um die beschafften Aschen als Standardmaterial verwenden zu können, erfolgte zunächst eine genaue nasschemische Analyse. Somit wurden Referenzwerte erhalten, die mit den Ergebnissen der RFA-Messung verglichen werden konnten. Die nasschemische Analyse wurde mit zwei verschiedenen Aschen, (Zwischenbericht 2022) durchgeführt. Es galt zu beachten, dass die Düngemittelverordnung (DüMV) und deren festgelegte Grenzwerte für Schwermetalle auf einem Königwasseraufschluss (KöWa entsprechend DIN EN 16174) beruhen.

Dieser Aufschluss ist aber nicht in der Lage KSAs komplett aufzuschließen (Silikatrückstand). Dieser Rückstand kann zu Problemen führen, da die RFA-Messung die komplette Probe (inkl. Rückstand) analysiert und somit andere Werte liefern kann. Aus diesem Grund wurde nach Aufschlüssen auf Basis von Flusssäure gesucht, die in der Lage sind, die KSAs rückstandslos in Lösung zu überführen. Dazu wurden insgesamt 6 verschiedene Aufschlüsse getestet und in ihren Rezepturen variiert, bis sich die Proben komplett lösten. Zwei Aufschlüsse erwiesen sich als geeignet, um die KSA komplett zu lösen (Tabelle 7). Die so hergestellten Lösungen konnten dann mit den RFA-Werten verglichen werden.

Tabelle 7: Übersicht zu Rezepturen der geeigneten Mikrowellen-Aufschlüsse mit Flusssäure (PER, KöWaHF) sowie dem allg. Königswasser-Aufschluss (KöWa).

Auf-schluss	Einwaage Probe	H_2O bidest.	HCl (konz.)	HNO_3 (konz.)	HF (konz.)	$HClO_4$ (konz.)	H_3BO_3 (4 %)	∑ reak-tive Säure
Abk.	[g]	[mL]						
KöWa	0,5	-	6	2	-	-	-	8
PER	0,1	20	-	9	1	3	5	13
KöWaHF	0,1	-	9	3	1	-	5	13

Die aufgeschlossenen Proben wurden mittels ICP-OES für Hauptbestandteile und ICP-MS für Nebenbestandteile und Schwermetalle analysiert. Eine Herausforderung stellte die geringe Probeneinwaage (0,1-0,5g) für die Aufschlüsse dar. Auf Grund der nötigen Verdünnung der Proben nach dem Aufschluss war es nicht möglich für alle Elemente in den optimalen Messbereichen der Analysegräte zu gelangen.

Die Aufschlüsse und Analysen wurden zum einen durch die Nutzung von Referenzmaterial verifiziert und zum anderen durch die Nutzung eines flüssigen KSA-STDs bestätigt. Alle KSAs wurden je dreimal aufgeschlossen und verdünnt, um an den ICP Geräten gemessen zu werden. Der Kohlenstoffanteil der KSAs wurde über die Ermittlung des Glühverlustes (nach DIN EN 196-2) und der Chlor-Gehalt potentiometrisch gemessen.

Ein weiterer entscheidender Baustein dieses APs war die Herstellung geeigneter STDs (s. Zwischenbericht 2021) für die Nutzung in der WD-RFA. Dazu wurden die Probenvorbereitungen mittels Schmelz- und Presstabletten untersucht. Presstabletten (PT) erwiesen sich dabei als geeignetere Probenform. Von großem Vorteil war, dass die KSAs nahezu unverdünnt gemessen werden können und flüchtige Bestandteile nicht durch Hitze, wie bei Schmelztabletten, beeinflusst werden. Die Herstellung der Presstabletten wurde deshalb weiter optimiert. Qualitätsmerkmale einer Probe wurden mittels Messungen durch die Parameter „Summe der Elemente“ und „Compton Ratio“ abgeleitet. Darüber hinaus gibt das gemessene Spektrum einer Probe Aufschluss über das Peak-Rauschverhältnis.
Für die KSAs haben sich folgende Parameter zur optimierten Probenpräparation ergeben:

- Aufmahlen: 30 g getrocknete Probe, Scheibenschwingmühle, 60 sec, 1000 rpm
- Probeneinwaage Presstablette: 9,5 g Probe, 0,5g Bindemittel,
- Pressbedingungen: 15 t Pressdruck, 30 sec. Haltezeit, langsame Druckentlastung

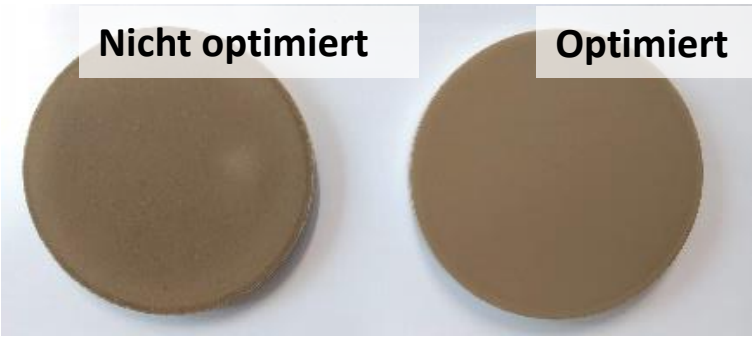


Abbildung 25: Vergleich einer PT mit nicht optimierter Probenaufbereitung (links) mit einer PT mit optimierter Probenaufbereitung (rechts). (Quelle MFPA)

Nachdem das Standardmaterial präpariert und nasschemisch analysiert worden war, stand es für die eigentliche Methodenentwicklung an der WD-RFA zur Verfügung. Die Vielzahl der Elemente in verschiedensten Konzentrationen und mit z.T. spektralen Überlagerungen stellten eine Herausforderung dar. Mit den eigenen Kenntnissen und Erfahrungen zur WD-RFA gelang es zunächst gut die Hauptelemente und auch viele Schwermetalle zu kalibrieren. Probleme bereiteten aber die nach DüMV grenzwertrelevanten Elemente Arsen, Cadmium, Quecksilber und Thallium.

Da diese Elemente auf Grund ihrer Grenzwerte in der DüMV von entscheidender Bedeutung sind und somit entscheidend für eine Aussagekraft über die Machbarkeit solch einer Methode, wurde sich Hilfe von Anwenderexperten der Geräteherstellerfirma Bruker geholt. Eine 2-tägige Methodenoptimierung an unserem Gerät fand in 2022 statt. Auch für die Expertin stellte die Zusammensetzung der KSAs eine neue Herausforderung dar. Am Ende gelang es aber eine zufriedenstellende Methode zu etablieren. Abbildung 26 zeigt beispielhaft die Kalibriergerade für das Hauptelement Phosphor.

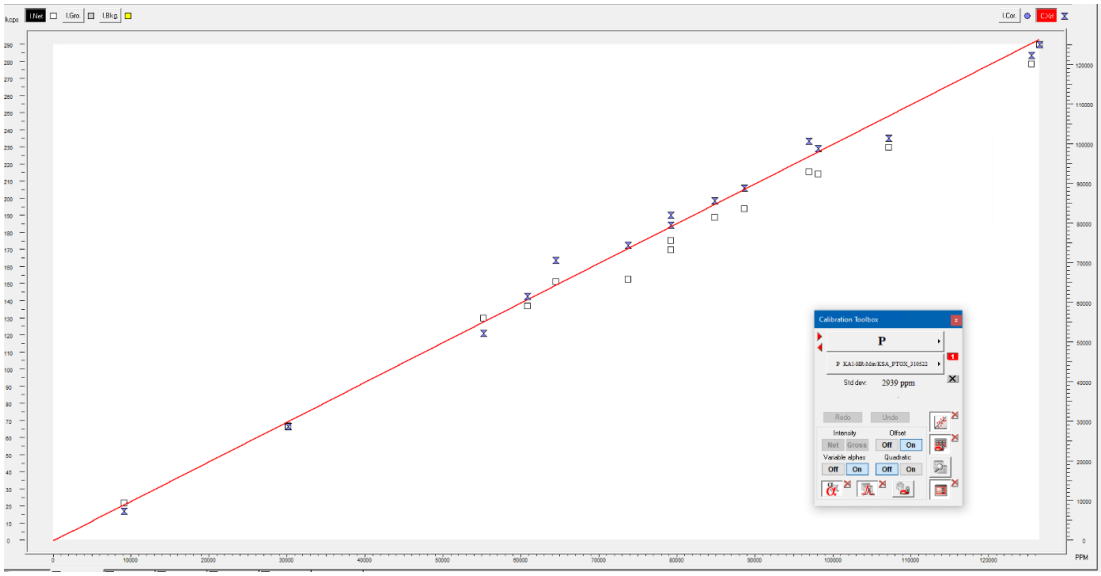


Abbildung 26: Kalibriergerade für das Hauptelement Phosphor. (Quelle MFPA)

Die Analysen von 29 Elementen (Kohlenstoff ausgenommen) dauern mit der entwickelten Methode knapp 25 min. Diese Messzeit kann weiter verkürzt werden, wenn nur noch die als Pflanzennährstoff oder Schadstoff geltenden Elemente gemessen werden würden.

Wie zuvor beschrieben analysiert die RFA die komplette Probe und nicht nur den nach DüMV grenzwertrelevanten Teil der sich im KöWa-Aufschluss löst. Dieses Problem musste deshalb mathematisch gelöst werden. Dazu wurde über alle Aufschlüsse für die DüMV-relevanten Elemente ein Löslichkeitsmittelwert berechnet und dieser dann in die Software der Methode eingepflegt.

Der Erstellung der Methode folgte eine Verifizierung. Da es keine verifizierter Standardmaterialen gab, wurden andere Möglichkeiten zur Verifizierung gewählt. Aus KSAs, die bereits als Standardmaterial zur Kalibrierung verwendet wurden und deren Bestandteile genauestens bekannt sind, wurden noch einmal neue PT hergestellt und mit der Methode analysiert. Darüber hinaus wurden weitere KSAs, die zwischenzeitlich durch die Bundesanstalt für Materialforschung zu Verfügung gestellt wurden und noch nicht Teil der Kalibrierung waren, analysiert. Die Analysen lieferten sehr zufriedenstellende Ergebnisse, zeigten aber auch noch Schwächen der Methode auf.

Dazu zeigen die Abbildung 27-Abbildung 29 noch einmal den Vergleich zwischen den gemessenen Konzentrationen, gemessen mit ICP-OES bzw. ICP-MS und WD-RFA am Beispiel der Muster-KSA. Die Grafiken berücksichtigen auch die KöWa-Messwerte und die Rückrechnung vom RFA-Messwert auf die KöWa-Konzentration der einzelnen Elemente. Zudem berücksichtigt der Fehlerbalken (±5%) für die Messergebnisse der ICPs deren Schwankungen die im Bereich von ±5% - 10% liegen.

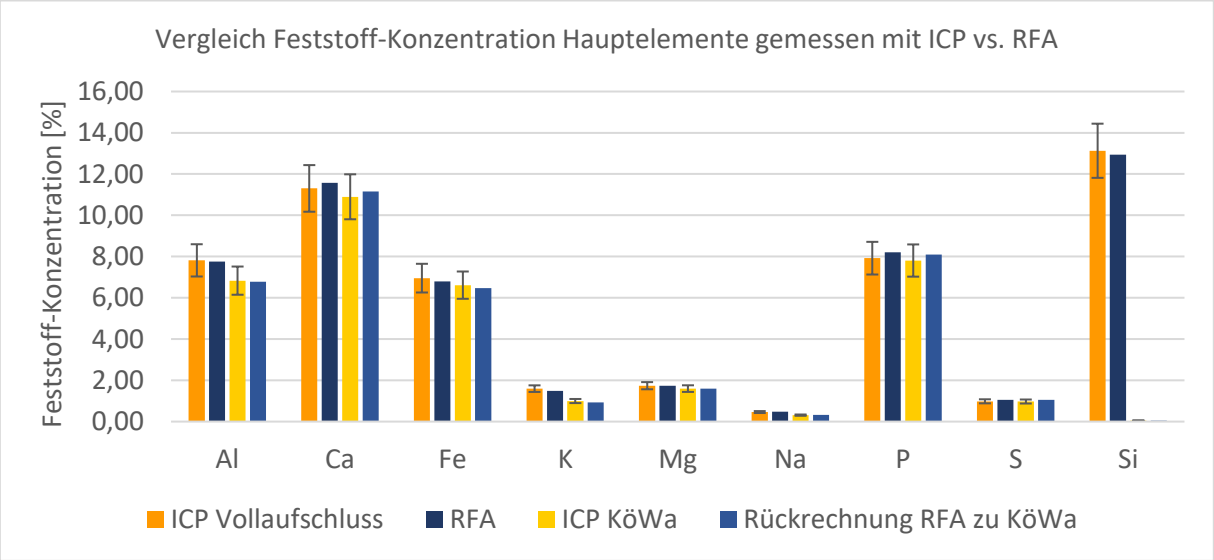


Abbildung 27: Vergleich der Feststoff-Konzentration in % der Hauptelemente gemessen mit ICP und RFA für einen Vollaufschluss und KöWa-Aufschluss am Bsp. der Muster-KSA. (Quelle MFPA)

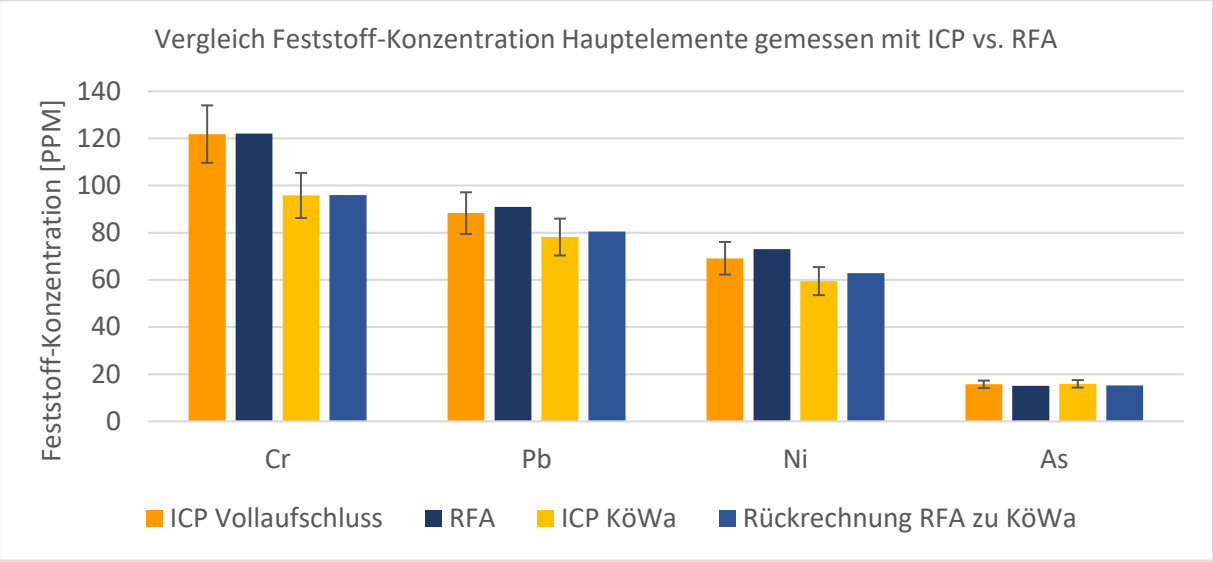


Abbildung 28: Vergleich der Feststoff-Konzentration in PPM der Schwermetalle mit Konzentrationen >5PPM, gemessen mit ICP und RFA für einen Vollaufschluss und KöWa-Aufschluss am Bsp. der Muster-KSA. (Quelle MFPA)

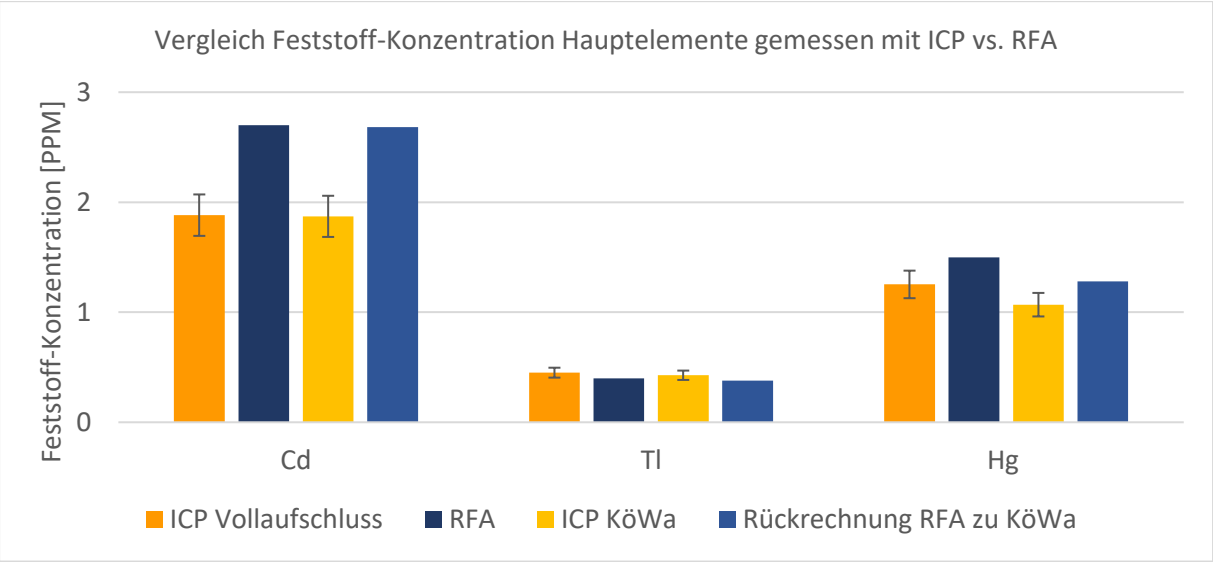


Abbildung 29: Vergleich der Feststoff-Konzentration in PPM der Schwermetalle mit Konzentrationen <5PPM, gemessen mit ICP und RFA für einen Vollaufschluss und KöWa-Aufschluss am Bsp. der Muster-KSA. (Quelle MFPA)

Erkennbar war das die Messergebnisse einer KSA, die grundsätzlich schon Teil der Kalibrierung war noch besser zu denen der nasschemischen Analyse passten. Daraus lässt sich ableiten, dass die Aschen aus Monoverbrennungsanlagen, die später einmal in einem Routinemesseverfahren regelmäßig gemessen werden sollen für noch zuverlässigere Ergebnisse Teil der Kalibrierung sein sollten. Dabei ist vorteilhaft, dass Proben aus gleichen Anlagen in ihrer Zusammensetzung recht stabil sind. Zudem kann die Methode mit weiteren Standards erweitert werden und dann noch einen größeren Kalibrierbereich abdecken.

Die Messabweichungen zwischen den gemessenen Konzentrationen mittels ICP und der RFA sind, wie in Abbildung 27-Abbildung 29 ersichtlich wird, bei den Elementen Cadmium und Quecksilber am größten. Eine Erklärung ist, dass die Konzentrationen von Quecksilber in den genutzten Verdünnungen an der Nachweisgrenze des Gerätes lagen und durch den größeren Probenvorbereitungsaufwand ein entsprechender Minderbefund plausibel ist. Diese Probleme treten nicht bei einer RFA-Messung auf, da hier die Probe direkt gemessen wird.

Für alle anderen Elemente sind die Messergebnisse im Vergleich zu denen der RFA sehr stimmig, selbst für Thallium mit Konzentrationen um Sub-PPM-Bereich. Es wird auch ersichtlich, dass die eigentlichen KöWa-Werte durch Rückrechnung aus den RFA-Messwerten sehr gut darstellbar sind. Insgesamt unterliegt die Messung einer KSA-Probe mit der RFA nur wenigen Einfluss- und Schwankungsfaktoren verglichen mit ICP-Messungen.

Zusammenfassung

Es ist gelungen mit einer WD-RFA als Kernstück eine sehr schnelle und routinetaugliche Analytikmethode zu entwickeln. Die Analyse kann innerhalb von 25min durchgeführt werden und erfordert nur minimale Probenvorbereitung. Somit bestätigt sich die in den Zwischenberichten berichtete Entscheidung, die LA-ICP-MS Analysen durch die schnellere WD-RFA Messung zu ersetzen.

II.2.1.2 Löslichkeitsuntersuchungen

Ziel

Ziel war es zu prüfen, wie gut der in den KSA enthaltene Phosphor durch Verwendung von Mineralsäuren in Lösung gebracht werden kann und somit pflanzenverfügbar wird. Zudem soll das Lösungsverhalten der Schwermetalle betrachtet werden um damit eine Methode zur Abtrennung zu etablieren.

Ergebnisse

Verschiedene mineralische Säuren haben ein unterschiedliches Vermögen, um oxidierte Elemente in Lösung zu bringen. Demzufolge wurden verschiedene mineralische Säuren (Salzsäure, Schwefelsäure und Salpetersäure) mit einer Muster-Klärschlammasche auf deren Lösungsvermögen getestet.

Für die ersten Löslichkeitsuntersuchungen wurde die Muster-KSA zunächst in einem Massenverhältnis von 1:6 mit Wasser versetzt (25:150 bzw. 50:300) und 10 gerührt. Danach wurde der pH-Wert (1; 1,5; 2) eingestellt und für 1h konstant gehalten. Die Elementkonzentrationen wurden anschließend analysiert.

Tabelle 8: Parameter für erste Löslichkeitsuntersuchungen.

Variablen erste Lösungsversuche	Versuchsparameter
Extraktionsmittel	HCl, HNO_3, H_2SO_4
Konz. Ex.-Mittel	1M, 2M
Säure:Probe	6:1
pH-Wert	1,0; 1,5; 2,0
Temperatur	Raumtemp.
Zeit	1h konst. bei pH
Rückstand	Auswaage Filterrückstand

Auf Basis der Ergebnisse der Lösungsversuche mit den Parametern in Tabelle 8Tabelle 8: Parameter für erste Löslichkeitsuntersuchungen. wurden weitere Versuche zur Optimierung der Versuchsparameter durchgeführt. Um eine bestmögliche Kombination der genannten Einflussparameter mit einer möglichst geringen Anzahl an Versuchen zu ermitteln, wurde zunächst ein Designs of Experiments (DoE) in Form des Placket Burman Modells genutzt. Basierend auf den vorrangegangenen Versuchen, wurden die Säuren HCl und H2SO4 für weitere Versuche ausgewählt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Parameter für DoE zur Löslichkeitsuntersuchung.

Variablen DoE	Versuchsparameter
Extraktionsmittel	HCl, H_2SO_4
Konz. Ex.-Mittel	2M, 7M, 12M
Säure:Probe	2:1, 5:1, 8:1
pH-Wert	1,0; 2,5; 4,0
Temperatur in °C	20, 50, 80
Zeit in min	30, 75, 120

Basierend auf den ersten DoE Versuchen wurde das Design nochmals angepasst, und mit folgenden Parametern wiederholt (Tabelle 10).

Tabelle 10: Parameter zur Optimierung der Löslichkeitsuntersuchungen.

Variablen Optimierung	Versuchsparameter
Extraktionsmittel	HCl, H_2SO_4
Konz. Ex.-Mittel	2N, 5N, 12N
L:S = H_2O: Probe	2:1, 4:1, 6:1
pH-Wert	0,5; 1,0; 1,5
Temperatur in °C	20, 40, 60
Zeit in h	1, 2, 4

Der Einfluss der Zeit auf die Löslichkeit wurde separat genauer untersucht. Für diesen Versuch wurden 100g KSA mit 600g H2O versetzt und eine 2M HCl zur Einstellung des pH-Wertes genutzt. Nach 15 min, 30 min, 60 min, 120 min, 180 min, 240 min und 24 h wurde ein 5mL Probenaliquot entnommen. Der pH-Wert wurde dabei konstant gehalten.

Eine weitere Messreihe untersuchte das Lösungs- und Fällverhalten der Elemente in Abhängigkeit des pH-Wertes über den pH-Bereich von 0,5-8,0. Um das Lösungsverhalten besser zu verstehen wurde die Muster-KSA wie gewohnt zunächst in H2O gelöst und anschließend wurde der pH-Wert schrittweise gesenkt. Proben wurden entnommen, nachdem der pH-Wert für jeweils 30 min stabil war.

Der Versuchsablauf zum Fällverhalten war ähnlich aufgebaut. Der pH-Wert wurde auf ≤1,0 mit einer 2M HCl eingestellt. Als Fällmittel wurden KOH, Na2CO3 und Na2S benutzt. Die so durchgeführten Fällungen wurden als Möglichkeit zur Schwermetallabtrennung untersucht.

Wie erwartet, wurden die Lösungsrückstände kleiner und folglich der gelöste Anteil des Feststoffes größer, je geringer der pH-Wert war (Abbildung 30). Bei H2SO4 ist ein negativer Lösungsrückstand zu verzeichnen, obwohl viele Elemente (Abbildung 31) in Lösung gegangen sind. Das Mehrgewicht des getrockneten Rückstandes ist darin begründbar, dass die Rückstände nicht noch einmal gewaschen wurden und somit Säurerückstände enthalten. Bei H2SO4 wird somit der Schwefel der Säure mit ausgewogen und verzerrt die Bilanz. An dieser Stelle wäre es sinnvoll gewesen die Filterrückstände bis zur Neutralität zu waschen und dann erst zu trocknen und auszuwiegen.

2M HCl erzielte die beste Lösungsrate mit knapp 50% bei pH 1,0 und wurde für weitere Versuche verwendet.

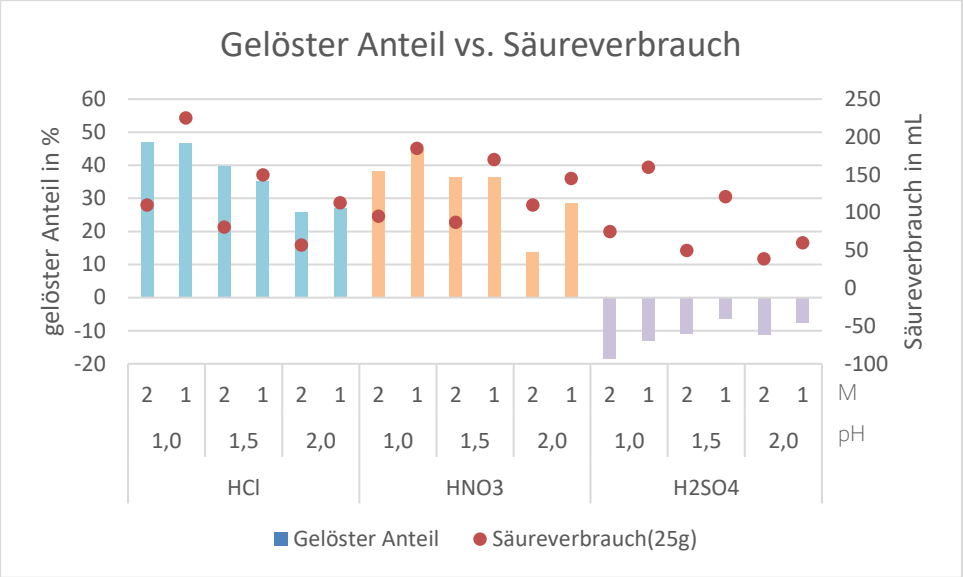


Abbildung 30: Gegenüberstellung des gelösten Anteils von je 25g KSA mit dem Säureverbrauch der je 1 M und 2 M mineralischen Säuren HCl, HNO_3 und H_2SO_4 bei pH-Wert 1,0, 1,5 und 2,0. (Quelle MFPA)

Die beste Löslichkeit, sowohl für P als auch für Schwermetalle, wurde mittels HCl und H2SO4 erzielt. HNO3 war vergleichsweise schlechter. Die Abbildung 31 zeigt das Lösungsvermögen von 2M HCl im Vergleich zu 2M H2SO4 bei den pH-Werten 0,5; 1,0; 1,5 und 2,0.

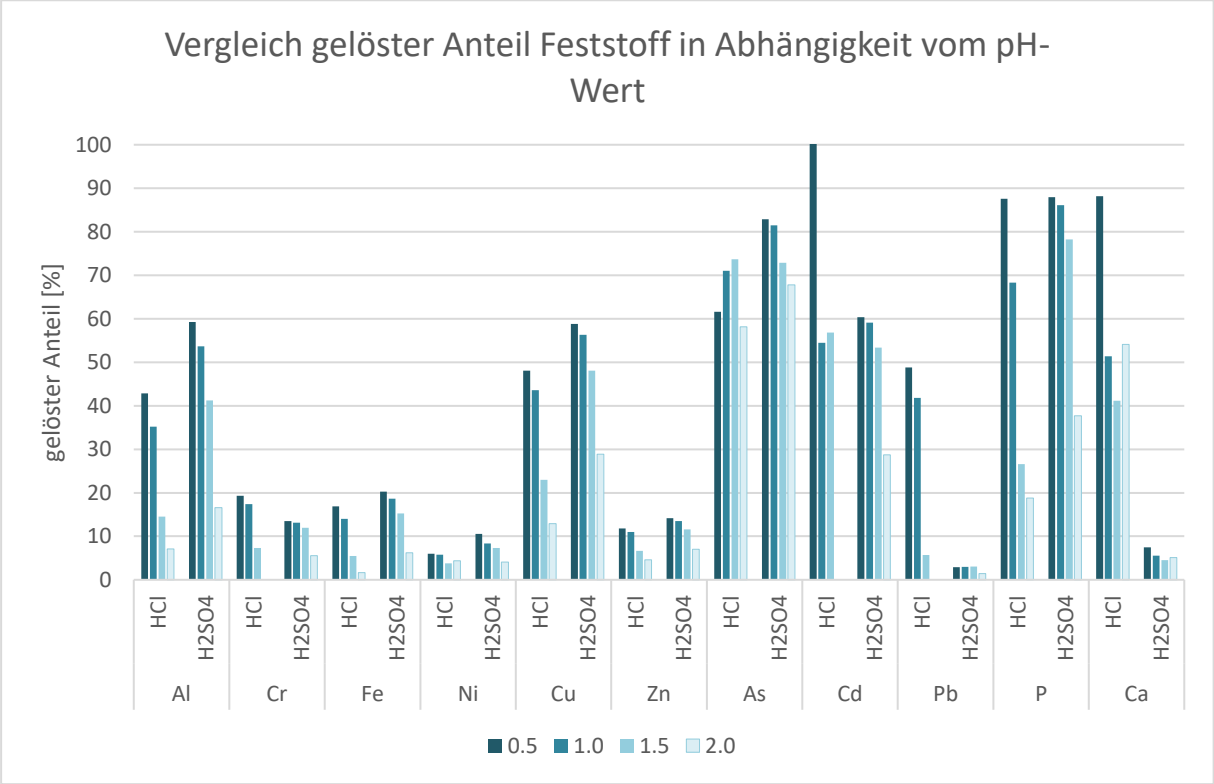


Abbildung 31: Vergleich des gelösten Anteils an Feststoff in Bezug auf Hauptelemente und Schwermetalle in Abhängigkeit vom pH-Wert zwischen HCl und H_2SO_4. (Quelle MFPA)

Ein durchgeführtes Design of Experiment mit 10 Versuchen war nicht ausreichend um die fünf untersuchten Parameter ausreichend gut auflösen zu können. Es wurde nicht klar erkennbar, wie groß der jeweilige Einfluss eines Parameters ist. Die Versuchsmatrix eines Versuchsaufbaus ist in Tabelle 11 dargestellt.

Es wurde ersichtlich, dass der pH-Wert einen entscheidenden Einfluss hat. Ebenfalls liefert eine geringere Temperatur bei längerer Reaktionszeit ähnliche Ergebnisse, wie dies bei höherer Temperatur und kürzerer Messzeit gefunden wurde. Ein Vergleich für ausgewählte Elemente bei den besten 4 Versuchsbedingungen ist in Abbildung 32 gezeigt.

Tabelle 11: Versuchsmatrix zum DoE Versuch zur Optimierung der Löslichkeit mit HCl.

Versuch Bez.	Säurekonz. M	LS (H_2O) = Mischungsverhältnis KSA g		H_2O g	Temp. °C	Zeit min	pH
C1	7	5	50	250	50	75	2,5
C2	12	2	50	100	80	30	4
C3	2	2	50	100	20	120	4
C4	12	8	50	400	20	120	1
C5	2	8	50	400	80	30	1
C6	12	2	50	100	20	30	1
C7	2	2	50	100	80	120	1
C8	2	8	50	400	20	30	4
C9	12	8	50	400	80	120	4
C10	7	5	50	250	50	75	2,5

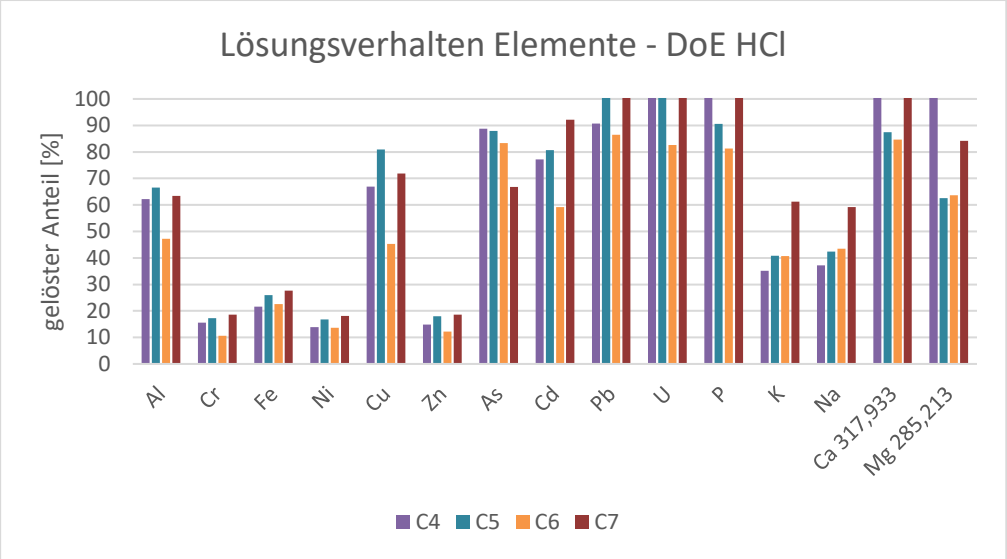


Abbildung 32: Vergleich des gelösten Anteils an Feststoff in Bezug auf Hauptelemente und Schwermetalle für Löslichkeitsuntersuchungen mit den Versuchsparametern von C4, C5, C6,C7 aus Tabelle 11. (Quelle MFPA)

Als beste Versuchsparameter stellte sich dabei die Reihen C4, C5 und C7 heraus. Allerdings zeigten weitere Versuchsreihen mit H2SO4, dass diese Lösungen vermehrt einen gelartigen Zustand einnahmen. Dies trat bei der Nutzung von HCl nicht auf.

Die Versuchsreihe mit H2SO4 wurde allerdings frühzeitig abgebrochen, als ersichtlich wurde, dass die P-Löslichkeit deutlich schlechter war im Vergleich zu HCl und die Lösungen schnell eine Art Gel bildeten.

Für HCl haben sich die Parameter wie in Tabelle 12 aufgelistet als optimiert erwiesen. Diese Parameter wurden auch noch einmal kombiniert, allerdings ohne Verbesserung der vorausgegangenen Ergebnisse.

Tabelle 12: Finale Parameter für Lösungsuntersuchungen.

Variablen Optimierung	Optimale Versuchsparameter
Extraktionsmittel	HCl
Konz. Ex.-Mittel	2N, 5N
L:S = Säure: Probe	6:1
pH-Wert	1,0
Temperatur in °C	60
Zeit in h	4

Im Vergleich der einzelnen optimierten Parameter konnte die beste Löslichkeit mit den Parametern: 2M HCl, KSA:H2O (100g KSA, 200g H20), pH 0,5, Raumtemperatur und 240 min erbracht werden.

Bei der gezielten Untersuchung des Faktors Zeit, im Vorfeld der Optimierungsversuche, konnten Erkenntnisse über das unterschiedliche Lösungsverhalten in Abhängigkeit der Zeit einzelner Elemente gewonnen werden. So geht Phosphor bereits innerhalb der ersten 15 bis 30min mit > 90% in Lösung und hält dann dieses Niveau. Auch einige Schwermetalle wie Zink, Blei, Kupfer und Chrom erreichen innerhalb von 60 min ihre höchsten Lösungsanteile. Die Löslichkeit der Elemente wie Aluminium, Eisen und Cadmium nimmt langsam zu und erreicht erst nach mind. 4h ein Maximum.

Abbildung 33 zeigt die schrittweise Absenkung des pH-Wertes vom basischen Ausgangs-pH-Bereich auf den sauren Ziel-pH-Bereich. Um möglichst viel der Elemente in Lösung bringen ist ein pH-Wert von <1 ideal. Eine weitere Absenkung des pH-Wertes auf 0,5 zeigt lediglich für Cadmium eine Verbesserung. Wobei das Messergebnis mit über 100% nicht plausibel ist und nicht erklärt werden konnte. Einige Elemente wie Natrium, Kalium und Phosphor zeigen eine weniger starke Zunahme der Löslichkeit. Für die meisten untersuchten Elemente hat die pH Absenkung keine Auswirkung auf die Löslichkeit. Deshalb wurde ein pH von 1.0 für weitere Versuche gewählt.

Wie bereits zuvor erwähnt wurde auch das Fällverhalten der Elemente in Abhängigkeit vom pH-Wert untersucht und grafisch in Abbildung 34 für die Verwendung von Na2CO3 dargestellt. Das Fällverhalten der Fällmittel Kaliumhydroxid und Natriumsulfid war vergleichbar. Die Elemente verbleiben, trotz Zugabe eines Fällmittels und der damit verbundenen Erhöhung des pH-Wertes bis zu einem pH-Wert von ca. 1,5 in Lösung. Ab einem pH-Wert von 2,0 kommt es zu starken Ausfällungen, vor allem von P und den Schwermetallen. Ein Teil der Alkalien und Arsen verbleiben in Lösung. Folglich lässt sich eine Abtrennung von P von Schwermetallen auf diesem Weg nicht realisieren. Dieser Versuch verdeutlicht, dass die Löslichkeit der Oxide der KSA stark vom pH-Wert abhängt und die Löslichkeit besonders gut im stark sauren Bereich ist.

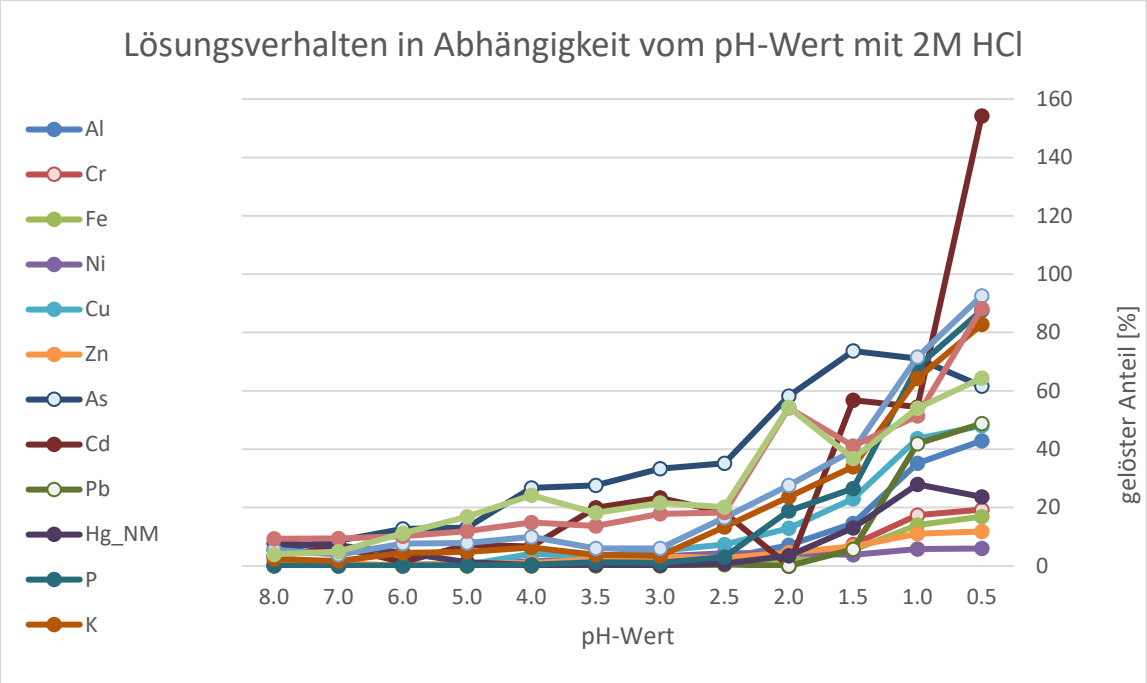


Abbildung 33 Darstellung des Lösungsverhaltens einzelner Elemente beim schrittweisen Absenken des pH-Wertes von 8,0 auf 0,5 mit 2 M HCl. (Quelle MFPA)

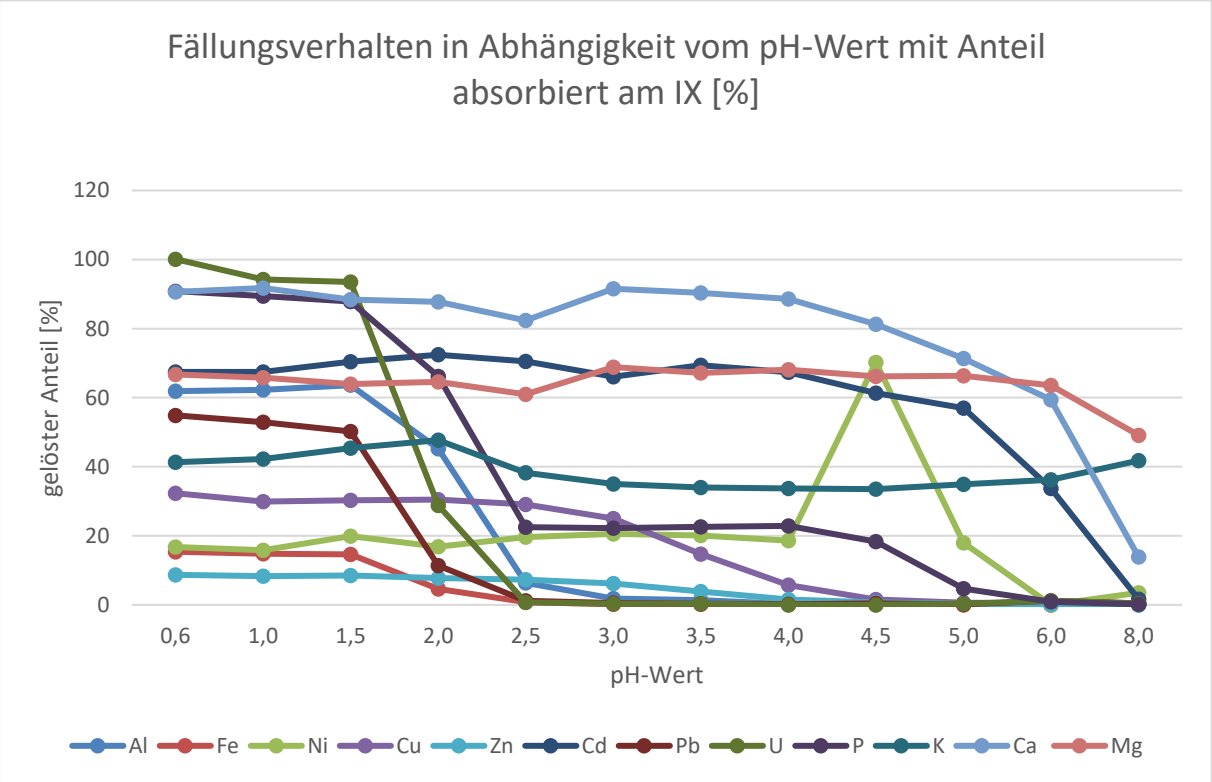


Abbildung 34: Darstellung des Fällverhalten einzelner Elemente beim schrittweisen Anheben des pH-Wertes von 0,6 auf 8,0 mit Na_2CO_3. (Quelle MFPA)

Neben der Muster-KSA wurden 9 weitere KSAs mit den optimierten Parametern auf ihr Löslichkeitsverhalten hin untersucht. Die Ergebnisse sind zusammengefasst (kleinster gelöster Anteil, größter gelöster Anteil und Median je Element in Bezug auf Feststoff im Vergleich zur Muster-KSA) in Abbildung 35 dargestellt. In Abhängigkeit der KSA, gab es Unterschiede bei der Löslichkeit einzelner Elemente und dem Säureverbrauch. Phosphor konnte zu mindestens 70% gelöst werden, bei den meisten KSAs sogar über 90%.

Die Übertragung der Parameter funktionierte auch für weitere Hauptbestandteile wie Calcium, Aluminium, Magnesium und Natrium. Für diese Elemente und auch für Kupfer waren die Löslichkeiten vergleichbar. Stärkere Schwankungen gab es dahingegen bei den Schwermetallen und deren Löslichkeiten. Es ist wahrscheinlich, dass das Fällmittel vom Fällungsprozess in der Kläranlage und der Verbrennungsprozess des Klärschlamms hier eine Rolle spielen. Es fällt beispielsweise auf, dass bei Aschen, die einen hohen Gesamtanteil Eisen haben (Ursprung wahrscheinlich Fällungsmittel Kläranlage) Zink deutlich besser herausgelöst werden kann. Um diese Zusammenhänge besser verstehen zu können, müsste man mehr über die jeweiligen Verbrennungsprozesse in Erfahrung bringen und Phasenanalysen der einzelnen Aschen durchführen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Parameter, die für eine Asche optimiert wurden, nur bedingt auch auf andere übertragbar sind. Folglich müssten die einzelnen Einflussparameter für jede Asche optimiert werden. Die Optimierung hängt aber auch davon ab, wie die Asche weiterverarbeitet werden soll und welche Elemente es dafür gilt in Lösung zu bringen.

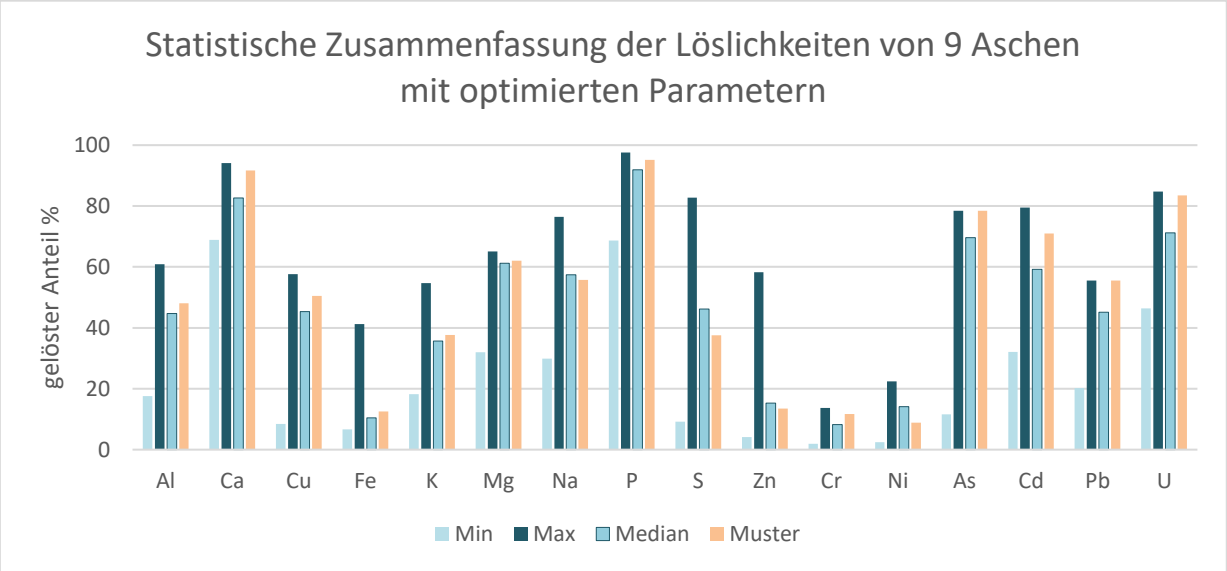


Abbildung 35: Darstellung einer statistischen Zusammenfassung (kleinster gelöster Anteil, größter gelöster Anteil und Median je Element) der Ergebnisse der 9 Klärschlammaschen im Vergleich zu der Muster Asche. (Quelle MFPA)

Zusammenfassung

Eine Löslichkeitsmatrix mit Einfluss der unterschiedlichsten Parameter wurde anhand einer Muster-KSA erarbeitet und optimiert. Sie wurde auf andere KSAs übertragen, wobei eine Übertragung nur bedingt funktionierte. Es kann demzufolge nicht eine Löslichkeitsrezeptur für alle Aschen verwendet werden und müsste gezielt für jede Asche angepasst werden. Mehrere zeigten eine geringe Löslichkeit in Mineralsäuren, was heißt, das i.d.R. weniger als 50% des jeweiligen Elements in einem einstufigen Verfahren gelöst werden können. Um hier Verbesserungen erzielen zu können wäre es sinnvoll die einzelnen Phasen in denen die Elemente in den jeweiligen Aschen vorliegen und die Einflussparameter des Verbrennungsprozesses zur Ausbildung solch schwerlöslicher Phasen genauer zu untersuchen. Eine Abtrennung von Schwermetallen durch Fällung unter den getesteten Bedingungen ist nicht sinnvoll, da gleichzeitig P mit ausfällt. Da dieser aber weiterverwendet werden soll, müssen für die Schwermetallabtrennung Alternativen gefunden werden. Der Phosphor konnte insgesamt sehr gut durch die Verwendung von Mineralsäuren gelöst werden.

II.2.1.3 Abtrennung von Schwermetallen

Ziel

Ziel ist auf Basis der Erkenntnisse aus AP1 ein möglichst effektives Verfahren zur Abtrennung von Schwermetallen zu erarbeiten mit dem Ziel der Integrierbarkeit in die bereits bestehende Prozessführung zum P-Recyclingverfahren bei dem Projektpartner GIT.

Ergebnisse

Versuchsplanung

Die Ausführungen für diesen Teil des Berichts setzen bei der Arbeit mit Chelat-IX in gepufferten Systemen an. Die Zusammenfassung der bis dahin nötigen Vorarbeiten ist im Zwischenbericht 2022 beschrieben. Diese Methode wurde als alternative Vorgehensweise zur Fällung der Schwermetalle untersucht.

Für die Nutzung von schwermetallselektiven Ionenaustauschern ist ein stabiler pH-Wert nötig. Die Idee der Nutzung eines Puffersystems beruht darauf, dass solche Systeme in der Lage sind gewisse pH-Wertschwankungen zu kompensieren. Deshalb wurden zunächst anorganische und organische Puffersysteme recherchiert und mit einer Modelllösung getestet. Die Modellösung enthielt die relevanten Haupt- und Nebenelemente einer KSA-Lösung in verdünnter Form. Bei der Auswahl des Puffer-Systems war es wichtig, dass der pH-Wert auf mindestens 2 angehoben werden konnte. pH 4 und 6 wurden zusätzlich untersucht. Analysen der Lösung ohne Puffer und nach Zugabe des Puffers bei eingestellten pH-Wert wurden mittels ICP-OES und ICP-MS durchgeführt.

In einem nächsten Schritt wurden die geeigneten Puffersysteme in einer realen KSA-Extraktionslösung der Muster-KSA getestet. Dazu wurde die Muster-KSA zunächst in ausreichender Menge mittels der optimierten Parameter gelöst und anschließend filtriert. Für die Versuche wurden je 25 mL KSA-Lösung mit Puffer versetzt, um die pH-Werte einzustellen und anschließend auf 50 mL aufgefüllt. Dem System wurden dann je 5 mL IX zugegeben und für 20 min gelagert. Die Proben wurden zum Vergleich jeweils von der KSA-Lösung vor und nach Zugabe der IX Reaktion genommen und mittels ICP-OES und ICP-MS analysiert.

Pufferbestandteile wie Zitronensäure können Schwermetalle stabilisieren bzw. komplexieren, weshalb auch der Einfluss von Zitronensäure in dem System genauer Untersucht wurde.

Des Weiteren fiel während der Versuche auf, dass die Absorption von Calcium als Konkurrenz zu den Schwermetallen an den IX Probleme bereiten kann. Aus diesem Grund wurden Versuche durchgeführt, um das Calcium vorab abzutrennen.

Ebenfalls wurden nach den Optimierungsversuchen bei 20min Reaktionszeit auch diese Zeit variiert, um den zeitlichen Einfluss zu ermitteln. Außerdem wurden noch 2 IX, auf ihre reale Beladungskapazität und Regenerierbarkeit untersucht.

Da das angedachte verfahrenstechnische Konzept Resin-in-Pulp (RIP, s. Zwischenbericht 2021 und AP 4.3) als mehrstufiges Kaskadenverfahren angewendet wird, wurden auch noch Versuche zur Simulation eines 2-Stufigen Verfahrens mit KSA-Lösung durchgeführt. In einem letzten Schritt fand noch die Übertragung des Puffersystems von der KSA-Extraktionslösung auf eine KSA-Suspension statt. Das RIP-Verfahren wurde als 1-stufiges Batch-Verfahren mit 60 min Reaktionszeit und 2 KSAs simuliert. Die IX konnten von der Suspension durch Siebung abgetrennt werden.

Auswertung

Insgesamt wurden 6 Puffersysteme zur Einstellung der pH-Werte 2, 4 und 6 getestet. Dabei erwiesen sich die Puffer mit Ammoniumverbindungen (Ammoniumcitrat, Ammoniumacetat und Ammoniumformiat) und auch NaOH als zielführend. Mit diesen Substanzen konnten die pH-Werte 2 und 4 mit einem guten Puffer:Probe-Verhältnis eingestellt werden.

Allerdings war es nicht möglich das Puffersystem bei pH-6 ausreichend zu stabilisieren. Bei der Einstellung der Puffersysteme war darauf zu achten, dass dem System ausreichend Zeit zur Stabilisierung gegeben wurde. Ausfällungen, die sich nach kurzer Zeit wieder lösten waren zu beobachten.

Die weiteren Versuche mit den IX wurden zunächst mit Ammoniumacetat (AA) und Natriumhydroxid (NaOH) durchgeführt. Bei der Verwendung von NaOH fiel auf, dass durch den Überschuss an Natrium aus dem Puffer die Beladung der IX negativ beeinflusst wurde. Des Weiteren wurde auch Ammoniumcitrat untersucht, um die Komplexierung der Schwermetalle zu untersuchen. Dieser Stoff hat den großen Vorteil, dass Citrate den P besser pflanzenverfügbar machen und der Stickstoff vom Ammonium ein zusätzlicher Pflanzennährstoff ist. Es wurde festgestellt, dass sich das Puffersystem mit Ammoniumcitrat bewährt und deshalb wurde es für weitere Versuche verwendet. Den Lösungen wurde dazu 2% Zitronensäure zugesetzt, bevor der pH-Wert mit Ammoniak auf 2 und 4 eingestellt wurde. Das sowohl der pH-Wert, als auch der Anteil der Zitronensäure in der Extraktionslösung Auswirkungen auf die Absorption in Abhängigkeit des Elements haben, ist in Abbildung 36 dargestellt. Je nach Element kann die Variation dieser Parameter die Absorption positiv oder negativ beeinflussen. Die Versuche wurden auch noch mit einer zweiten KSA und dem weiteren geeigneten IX durchgeführt und zeigten vergleichbare Ergebnisse.

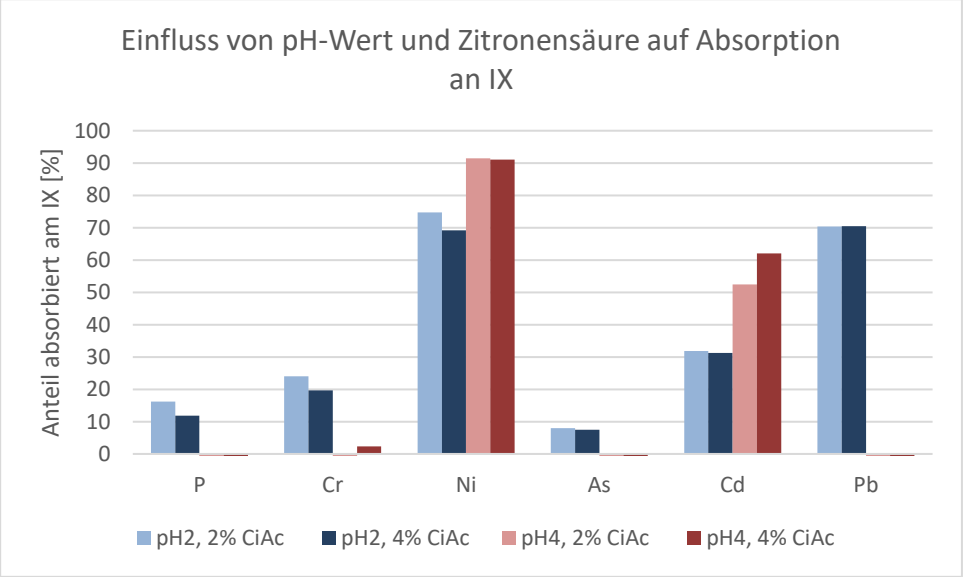


Abbildung 36: Vergleich des Einflusses von pH-Wert und Zitronensäure auf die Absorption an IX in Abhängigkeit vom Element. (Quelle MFPA)

Bei den Fällversuchen zur Reduzierung von Calcium als Konkurrenz-Ion zu den Schwermetallen, konnten mit Ammoniumsulfat bis zu 50% des Calciums als $CaSO_4$ gefällt werden. Allerdings wurde auch Blei z.T. als $PbSO_4$ mit ausgefällt. Bei der Absorption hatte der geringere Calcium-Gehalt in der Extraktionslösung einen vergleichbar geringen Effekt. Dies liegt vermutlich daran, dass die Konzentration selbst nach der Fällung noch recht hoch waren.

Bei der Untersuchung der Absorptionszeit hat sich herausgestellt, dass zwar in den ersten 20-30 Minuten viele Elemente bereits gut absorbiert werden (Abbildung 37) ist.

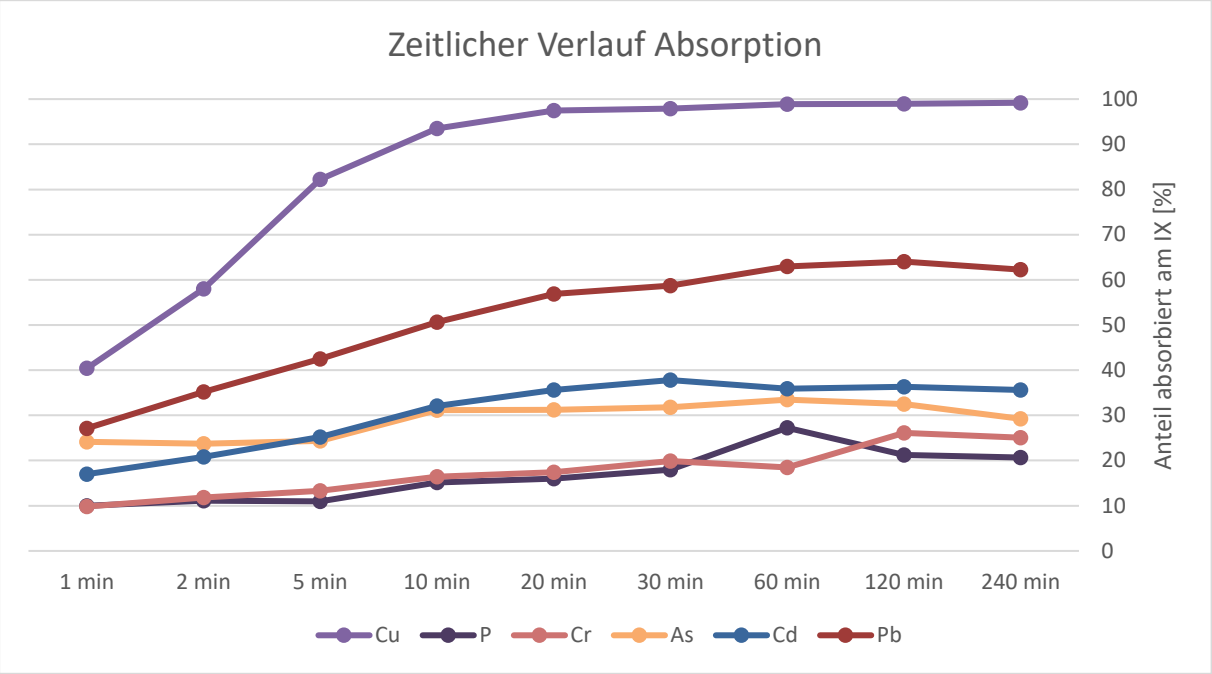


Abbildung 37: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Absorption über 1, 2, 5, 10, 20, 30, 60, 120 und 240 min in Abhängigkeit vom Element. (Quelle MFPA)

Die Versuche ein zweistufiges Kaskadensystem (s. AP 4.3) zu simulieren, zeigten vielversprechende Ergebnisse. Fügt man der Extraktionslösung in einer zweiten Stufe noch einmal frische IX hinzu können grundsätzlich noch mehr Schwermetalle absorbiert werden. Auch bereits in einer bzw. zwei Stufen gebrauchte IX können noch weitere Schwermetalle aus frischer Extraktionslösung absorbieren.

Die vorausgegangenen Ergebnisse bilden die Grundlage für das untersuchte RIP-Verfahren. Es zeigte sich, dass ein Großteil der Hauptelemente (auch Calcium), nur geringe Probleme zeigten. Die Absorption für Eisen und Aluminium war allerdings auf Grund der starken Nähe zu Schwermetallen etwas höher. Positiverweise waren die Absorptionswerte in Abhängigkeit der Elemente auch bei den zwei Test-KSAs vergleichbar und reproduzierbar.

Zusammenfassung

Die Fällung hat sich, wie bereits erwähnt, als ungeeignet erwiesen, um Schwermetalle gezielt abzutrennen. Die Versuche mit den IX haben gezeigt, dass Schwermetalle selektiv abgereichert werden können. Darüber hinaus ist ein Zusammenhang zwischen der Absorptionsfähigkeit in Abhängigkeit des Elementes vom pH-Wert und auch von der Menge an Zitronensäure durch den Puffer erkennbar geworden. Diese Parameter könnten in einem verfahrenstechnischen Prozess zur gezielten Steuerung der Trennung eingesetzt werden. Durch den schrittweisen Auf- und Ausbau der Versuchsreihen hat sich gezeigt, dass ein weiteres Upscaling gut umsetzbar wäre. Es hat sich gezeigt, dass, sofern die Schwermetalle in Lösung gebracht werden können, sie auch gezielt absorbiert werden können. Da das RIP-Verfahren nur noch einstufig im kleinen Maßstab und mit einem IX getestet werden konnte, besteht hier noch weiterer Optimierungsbedarf. Auch die Auswahl der IX bieten noch Potential, da deren Selektivität je nach Klärschlammasche auch angepasst werden kann.

Positiv ist noch zu erwähnen, dass die tatsächliche Kapazität der IX den technischen Datenblättern entspricht und auch nach vielen Beladungszyklen nicht vermindert wurde.

II.2.1.4 Verfahrenstechnisches Konzept

Ziel

Die Erkenntnisse aus den Laborversuchen in AP 4.1 und 4.2 zur Schwermetallabtrennung sollen, auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, verglichen und bewertet werden. Ein mögliches verfahrenstechnisches Konzept zur Schwermetallabtrennung soll abgeleitet werden.

Ergebnisse

Die Möglichkeit der Schwermetallabreicherung durch Fällung aus sauren Suspensionen hat sich als nicht praktikabel erwiesen, da keine differenzierte Fällung von Schwermetallen möglich war und zudem auch Phosphor ausgefällt wurde.

Dahingegen hat sich das Resin-in-Pulp-Verfahren (siehe Abbildung 39), als geeignete Alternative herausgestellt. Vorteilhaft ist dabei, dass dieses Verfahren im Bergbaubereich schon lange großtechnisch und wirtschaftlich im Einsatz ist. Die Schwermetallabreicherung kann direkt in der sauren Suspension, welche zur Rückgewinnung von Phosphor notwendig ist, im Batchbetrieb stattfinden. Zudem lässt sich das Verfahren noch modular erweitern, was die Möglichkeit der Variation und Anpassung von Parametern zur Verbesserung der Schwermetallabtrennung bietet. Das Verfahrenskonzept ließe sich prinzipiell als ergänzende Stufe in das Phos4Green Verfahren mit Sprühgranulation des Projektpartners GIT integrieren.

Auch wenn das Kernstück des Verfahrens, die Ionenaustauscher (IX) in der Anschaffung vergleichsweise kostenintensiv sind, können diese regeneriert und somit lange genutzt werden. Im Labor hat sich dazu gezeigt, dass die IX-Kapazitäten, wie im jeweiligen technischen Datenblatt angeben, auch der realen Beladungskapazität entspricht und diese auch nach mehreren Beladungszyklen nicht abnehmen. Für die Regenerierung wird mineralische Säure genutzt, welche über bestimmte Säurerückgewinnungsverfahren im Kreislauf geführt werden kann.

Bei dem gesamtheitlichen Konzept würde in einem ersten Schritt zunächst die Asche in mineralischer Säure gelöst und die Suspension dann mit IX versetzt. Nach einer gewissen Reaktionszeit können die IX, an denen sich die in Lösung befindlichen Schwermetalle angereichert haben, durch Siebung von der Suspension getrennt werden. Die abgereicherte Suspension kann wie im bisherigen Verfahren zur Sprühgranulation verwendet werden. Die IX mit absorbierten Schwermetallen werden in Säulen mit mineralischer Säure regeneriert. Die saure Lösung enthält die Schwermetalle, welche durch weitere Behandlungsstufen von der Säure getrennt werden können. IX und Säure können weiter im Kreislauf genutzt werden. Es bleibt lediglich eine kleine Fraktion mit Schwermetallen zurück.

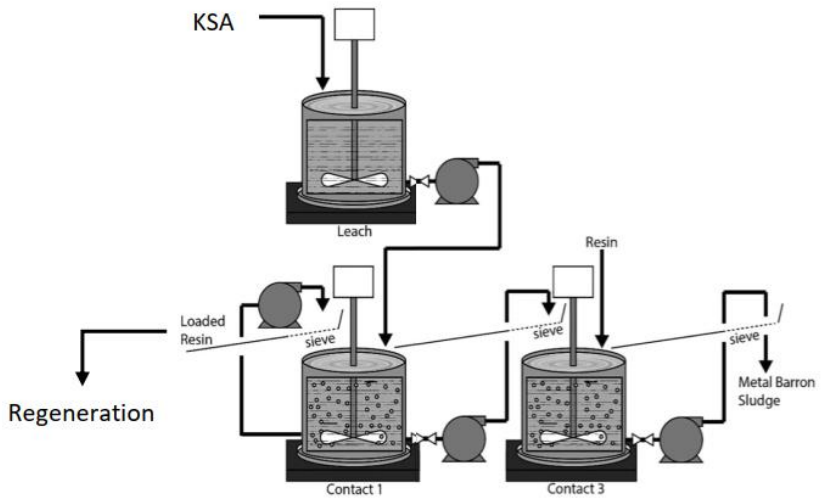


Abbildung 38: Beispiel für ein technisches Konzept des Resin-in-Pulp-Verfahrens für Klärschlamm (Quelle: Bezzina et al.(2020):Single metal isotherm study of the ion exchange removal of Cu(II), Fe(II), Pb(II) and Zn(II) from synthetic acetic acid leachate, Chemical Engineering Journal; adaptiert) (Quelle MFPA)

II.2.2 Ergebnisbewertung / Fazit

Das Resin-in-Pulp Verfahren zeigt vielversprechendes Potential, um als ganzheitliches verfahrenstechnisches Konzept in bereits bestehende Verfahren integriert zu werden.

II.3 TP 4.3 – Konfektionierung von hochwertiger Spezialerden - Überführung von phosphathaltigen Reststoffen in hochwertige Spezialerden

II.3.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse

II.3.1.1 Rezepturentwicklung Spezialerden

Die Arbeit am abonoCARE-Projekt wurde mit der Erarbeitung von Anforderungsprofilen torffreier Spezialerden sowie deren Zuschlagstoffen und Spezialdüngern begonnen. Es wurden Hersteller, Anbieter, Vertreiber und Nutzer von Spezialerden, Spezialdüngern und deren Zuschlagsstoffen sowie Wissenschaftler und Mitarbeiter sächsischer und thüringischer Landesversuchsstationen angerufen und/oder besucht und befragt. Es wurde an Konferenzen, Tagungen sowie Fachveranstaltungen teilgenommen. Auf Grundlage der während dieser Aktivitäten gesammelten Informationen wurden die Anforderungsprofile für Spezialerden und Spezialdünger erstellt.

Zusammenfassend sind folgende grundsätzliche Anforderungen an Spezialerden und deren Zuschlagstoffe zu stellen:

Substrate sollten bei hoher Wasserkapazität eine hohe Luftkapazität besitzen und schnell vollständig wiederbenetzbar sein, einen für die jeweilige Kultur günstigen und möglichst konstanten pH-Wert aufweisen. Des Weiteren sollten sie sich durch geeignete verfügbare Nährstoffgehalte mit geringen Nährstoffdynamiken (z. B. N-Immobilisierung, starke Nährstofffreisetzung aus dem Substrat) und die Abwesenheit von Pflanzensamen, triebfähigen Pflanzenteilen, Schädlingen, Krankheitserregern und pflanzenschädigenden, wachstums- hemmenden Stoffen auszeichnen. Außerdem sollten sie lagerfähig sein und allgemein eine konstante Qualität aufweisen. Anhang A gibt die, auf Grundlage der umfassenden Recherchen erarbeiteten, allgemein im Pflanzenbau geforderten Ausprägungen der wichtigsten chemischen, physikalischen, biologischen und sozioökonomischen Eigenschaften von Kultursubstraten bzw. deren Substratausgangsstoffen tabellarisch wieder.

Da der Einsatzbereich für Substrate sehr weit gestreut ist, sind die Anforderungen an diese entsprechend individuell zu gewichten. In Tabelle 2 sind einige Spezialerden und deren spezifische Eigenschaften aufgeführt. Die teils großen Spannbreiten der Nährstoffgehalte innerhalb der einzelnen Spezialerden haben ihren Ursprung in den verschiedensten Kulturführungsbedingungen und den daraus resultierenden Ansprüchen, die der Markt an Spezialerden stellt. Manche Kunden erwarten eine Düngervollversorgung ihrer Pflanzen über die gesamte Vegetationszeit von mehreren Monaten (Depot-/Dauerdüngung, Wirkdauer 3 - 14 Monate) andere möchten die (Nach-)Düngung teilweise selbst durchführen und erwarten vom Substrat eine ausreichende Düngung von Wochen bis wenigen Monaten (Langzeitdüngung, 4 - 12 Wochen) und wiederum andere Kunden wünschen nur eine Grunddüngung für die Startphase nach dem Säen oder Topfen der Pflanzen und möchten die weitere Nährstoffversorgung der Pflanzen selbst steuern können. Je nach Kundenanspruch müssen die Spezialerden mit entsprechenden Düngern vermischt bzw. aufgedüngt werden. Abhängig von den verwendeten Zuschlagstoffen für die Spezialerden, bedarf es aufgrund eventueller Stickstoffimmobilisierung durch mikrobiellen Abbau, höherer Stickstoffgaben um diesen Effekt auszugleichen und Stickstoffmangelsymptomen an den Pflanzen vorzubeugen.

Tabelle 2: Auswahl einiger Kultursubstrate und deren physikalische und chemische Eigenschaften

Parameter	Substrate						
	Baumschulsubstrat	Rhododendronerde	Koniferensubstrat	Pflanzkübelerde	Blumenerde	Gemüseerde	Anzuchterde
Chemische Eigenschaften							
pH ($CaCl_2$)	5 - 6,5	4 - 5,5	6 - 8	5 - 7	5 - 7	5 - 7	5-6,5
N [mg/l]	150 - 320	50 - 240	150 - 200	100 - 400	180 - 500	100 - 500	50-250
P_2O_5 [mg/l]	120 - 150	40 - 300	200 - 500	200 - 700	125 - 800	150 - 800	80-300
K_2O [mg/l]	150 - 350	80 - 600	400 - 1000	500 - 1200	280 - 2400	400 - 2000	100-350
Mg [mg/l]	150	100	150	50 - 200	50-250	150	150
S [mg/l]	150	50 - 250	100	100	50 - 350	50 - 500	0 - 250
Salzgehalt [g/l]	1,5	< 1,5	< 1,5	< 3	< 3	< 3	<1,5
Physikalische Eigenschaften							
Korngröße [mm]	0 - 20 bis 40	0 - 20 bis 25	0 - 20 bis 30	0 - 20 bis 30	0 - 20	0 - 20 bis 30	0 - 0,8 bis 15
Schüttdichte [kg/m³]	300 - 500	300 - 450	700 - 1200	400 - 500 kg/m³	400 - 500 kg/m³	350 - 600	350 - 450
Wasserkapazität [Vol.-%]	50 - 70	≥ 50	40 - 60	≥ 50	≥ 40	≥ 40	≥ 40
Wiederbenetzbarkeit	möglichst schnell	möglichst schnell	möglichst schnell	möglichst schnell	möglichst schnell	möglichst schnell	möglichst schnell
Luftkapazität [Vol.-%]	ca. 10	> 15	> 10	> 10	> 5	> 5	> 10
Strukturstabilität	hoch	mittel	mittel	hoch	-	-	-
Anmerkungen							
	- mind. 30 % offenporige Mineralik - u.U. grobe substrat-bestandteile nötig - strukturstabil - drainfähig - hohe Wasserhalte-fähigkeit	- niedriger pH-Wert - eher holzige Zuschlag-stoffe - locker, humusreich - hohe Wasserhalte-fähigkeit - drainfähig	- wasserhalte- und drainfähig z.B. über Bentonit, Rinden-humus, Sand und Kompost - humusreich	- strukturstabil - Mineralikanteil z.B. Bentonit, Blähton, Oberboden ≥ 20 %	- hohe Nährstoff-gehalte	- hohe Nährstoff-gehalte - Schwefelzusatz - locker, humusreich - hohe Wasserhalte-fähigkeit - drainfähig	- niedrige Nährstoff-gehalte - niedrige Salzgehalte - feine Struktur

Im Laufe der Projektbearbeitung wurden Proben bzw. Analyseergebnisse aller relevanten Einsatzmaterialien für die Spezialrezepturen beschafft. Die Einsatzmaterialien innerhalb und außerhalb des abonoCARE-Wachstumskerns wurden chemisch sowie physikalisch charakterisiert und deren Eigenschaften in einer Datenbank erfasst. Anhand dieser Datenbank sollten mögliche Verarbeitungswege und Anwendungsgebiete der Materialien abgeleitet werden und somit die Entwicklung von Rezepturen für die Herstellung von Spezialerden ermöglicht werden.

Die über Literaturrecherchen, Fachgespräche und Analysen ermittelten möglichen Einsatzstoffe für die Spezialerdenproduktion innerhalb des abonoCARE-Wachstumskerns sind RAL-gütegesicherte Komposte aus Grünschnitt, kompostierte Gärreste, abgetragenes Substrat aus der Speisepilzproduktion, Recyklatdünger (Glatt), Ammoniumsulfatlösung (GNS) und HTC-Kohle aus pflanzlichen Gärresten (DBFZ).

Für die Identifizierung von relevanten Einsatzstoffen für die Spezialerdenproduktion außerhalb des abonoCARE-Wachstumskerns wurden Produktmuster besorgt und physikalische und chemische Eigenschaften ermittelt und bewertet. Als relevante Einsatzstoffe wurden Tonmehl (Bentonit), gebrochener Ton, Blähton, Ziegelsplitt, Vermiculit, Perlit, Zeolith, gewaschener Sand, Kalk, Holzfasern, Rindenhumus und elementarer Schwefel (Schwefelblüte) identifiziert.

II.3.1.2 Herstellung von Komposten und torffreien Spezialerden

II.3.1.2.1 Herstellung von Komposten aus organischen Reststoffen für Spezialerden

Um die meisten organischen Reststoffe bei der Herstellung von Pflanzsubstraten verwenden zu können, ist es notwendig, diese u. a. konditionieren, zu stabilisieren und zu hygienisieren. Im Rahmen der Projektarbeit sollte dies über die Kompostierung der Reststoffe geschehen und so lag ein Hauptaugenmerk der Arbeiten auf der Kompostierung bzw. auf der Entwicklung geeigneter Kompostmischungen für die Herstellung von Pflanzsubstraten. Für die Entwicklung dieser Kompostiermischungen wurden Kompostierversuche im Labormaßstab mit insgesamt 12 Mischungen (je ca. 0,5 m³ Mietenvolumen) und Kompostierversuche im halbtechnischen Maßstab (ca. 50 - 100 m³) mit insgesamt 18 Mischungen durchgeführt und analytisch begleitet.

In Abbildung 2 ist das Vormischen einer Versuchsmiete im halbtechnischen Maßstab mittels Radlader und das anschließende Umsetzen zum Zwecke der Homogenisierung der Miete mit einem Mietenumsetzer zu sehen.

Abbildung 2: links: Aufsetzen der Mieten mittels Radlader;
rechts: Homogenisierung durch zweimaliges Umsetzen mit Mietenumsetzer

In Tabelle 3 sind die wichtigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften der Mischungen M1 bis M9 und der resultierenden Komposte des ersten Kompostierversuches im halbtechnischen Maßstab (August 2020 bis August 2021) dargestellt. Die Kompostierung der Mischung M0 war ein Vorversuch zur Erprobung der Technik und der Abläufe und ist der Vollständigkeit halber aufgeführt. Es ist zu sehen, dass die verfügbaren Nährstoffe der Komposte 2, 4, 7 und 8 in ausreichender Höhe vorhanden sind, sodass, bei einem Substratanteil von 40%, viele Jungpflanzenkulturen ohne zusätzliche Startdüngung 2 - 4 Wochen kultiviert werden könnten. Die pH-Werte (H2O) der Komposte 1 bis 8 liegen zwischen 6,9 und 7,8 und somit im Neutralen bis schwach basischen Bereich. Diese Werte sind akzeptabel und stünden einer Verwendung in Substraten prinzipiell nicht entgegen, jedoch optimal für die Aufnahme der meisten Nährstoffe wären pH-Werte zwischen 6,0 und 6,5. Um einen Kompost in diesem pH-Bereich zu erhalten, wurde nach einem Vorversuch zur Ermittlung der erforderlichen Menge, elementarer Schwefel in Miete 9 eingemischt. Mit ca. 2 kg Schwefel pro m³ ließ sich der pH-Wert um ca. 1,5 Einheiten auf 6,2 senken. Infolge der Schwefeleinmischung stieg aufgrund mikrobieller Oxidation des Schwefels und der daraus resultierenden Sulfationen erwartungsgemäß der Salzgehalt des Komposts. In anschließenden Keimversuchen mit Kresse und Chinakohl konnte kein keim- und wachstumshemmender Effekt aufgrund des hohen Salzgehaltes beobachtet werden. Auch spätere Pflanzversuche unter Verwendung saurer Komposte mit anderen Versuchspflanzen zeigten bisher keine nachteiligen Effekte. Die Analysen bezüglich den in Komposten enthaltenen Schadstoffen/Schwermetallen ergaben keine kritischen Werte. In Abbildung 4 sind die Temperaturverläufe der Mietenkerntemperaturen der Kompostiermischungen M0 bis M9 über die Versuchszeit dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Beimengung von elementarem Schwefel keinen negativen Einfluss auf den Temperaturverlauf und die Kompostierungsdauer hat.

Tabelle 3: Die wichtigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften sowie die Zusammensetzung der Mischungen und der resultierenden Komposte des ersten Kompostierversuches im halbtechnischen Maßstab

Bestandteile/Eigenschaften	M0		M1		M2		M4		M5		M7		M8		M9	
	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]
organische Reststoffe/Hauptbestandteile und Zuschlagstoffe																
Kräuterseitlingsubstrat	33,33	30,3	-	-	10	2,53	-	-	-	-	-	-	-	-	5	2,09
Gärrest	-	-	20	3,64	30	5,60	40	7,46	-	-	30	4,10	50	6,85	10	2,89
Strukturmaterial	66,67	41,60	60	10,40	40	6,98	40	6,95	100	17,32	70	12,14	50	8,7	75	24,13
Rohrinde	-	-	10	1,16	5	0,53	10	1,12	-	-	-	-	-	-	2,5	0,46
Siebüberlauf aus der Kompostierung	-	-	10	1,28	15	1,92	10	1,28	-	-	-	-	-	-	7,5	1,66
elementarer Schwefel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,18
Weitere Eigenschaften der Mischungen (vor Kompostierung)																
Mietenvolumen [m³]	180		50		50		50		50		50		50		90	
Wassergehalt [Ma%]	54,9		35,4		50,7		49,6		25,3		41,7		51,4		40,4	
C/N-Verhältnis	37		18		17		18		22		20		20		20	
Gesamtmasse der Miete [Mg]	71,9		85		90		100		100		100		0		0	
Dauer der Kompostierung [d]	59		195		195		195		195		195		195		195	
Eigenschaften der Komposte nach 59 bzw. 195 Tagen Kompostierung																
C/N-Verh.	12		12		11		12		10		12		12		12	
Feldkapazität [% TS]	-		164,7		246,2		216,7		164,2		188		249,5		207,3	
oTS [% TS]	51		52		54		37		36		41		41		43	
pH-Wert	7,9		7,8		7,7		7,6		8		7,8		8		6,2	
Salzgehalt [g KCl/l OS]	3,14		1,73		2,97		2,56		2,62		3,19		3,06		8,8	
N [mg/kg TS]	22.000		14.000		22.000		17.000		16.000		12.000		18.000		14.000	
P [mg/kg TS]	7.400		4.000		6.100		5.200		4.200		2.400		4.400		4.000	
K [mg/kg TS]	13.000		9.600		11.000		9.200		11.000		9.500		12.000		10.000	
Eigenschaften der Komposte nach weiteren 6 Monaten Reifung																
pH-Wert	-		6,9		7,4		7,3		7,8		7,7		7,8		6,2	
Salzgehalt [g KCl/l OS]	-		2,46		3,36		3,41		2,8		4,08		3,85		7,15	
N [mg/kg TS]	-		21.000		31.000		26.000		16.000		25.000		23.000		17.000	
NO3 CaCl2-lösl. [mg/l OS]	-		110		280		270		58		220		210		110	
P [mg/kg TS]	-		3.700		6.800		7.500		2.400		4.200		5.300		3.700	
P als P2O5 CAL-lösl. [mg/l OS]	-		790		1.500		1.500		470		740		1.300		360	
K [mg/kg TS]	-		7.500		11.000		11.000		8.900		10.000		12.000		8.700	
K2O CAL-lösl. [mg/l OS]	-		2.000		2.600		2.400		2.700		2.500		2.800		2.000	

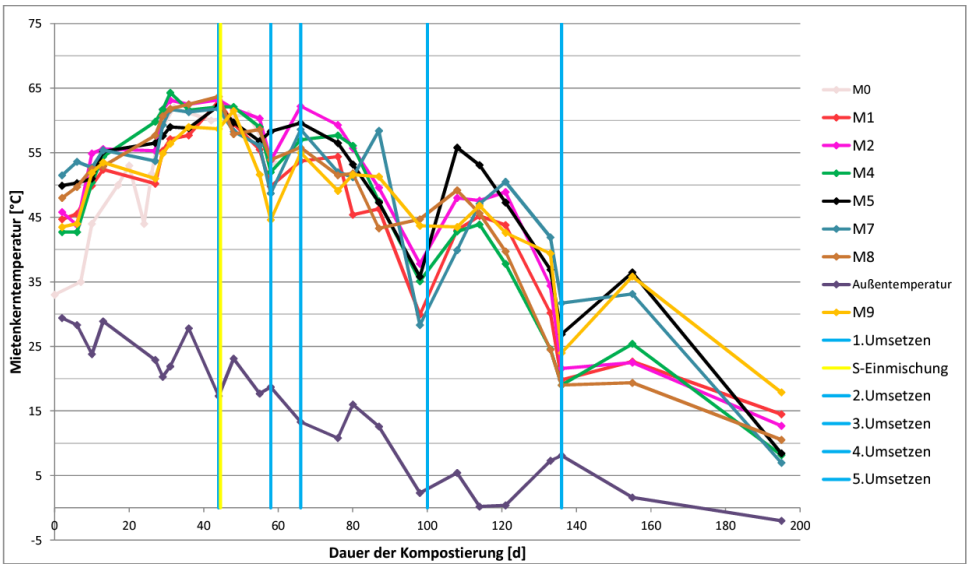


Abbildung 4: Temperaturverlauf der Mieten vom Start des Versuchs bis zur Abschlussprobenahme

Zusammenfassend zum ersten Kompostierungsversuch lässt sich sagen, dass, materialunabhängig, eine Umsetzung der Mieten mit einem Mietenumsetzer bei mittleren Drehzahlen, einer Umsetzung durch Radlader vorzuziehen ist. Eine materialbedingte Anpassung der Umsetzintervalle/-häufigkeit war bei den Verwendeten Mischungen des ersten Versuchs nicht zwingend notwendig. Bei der Kompostierung von Mischungen mit hohen Anteilen von Strukturmaterial (>50%) im Hochsommer sollte eine Beregnung der Mieten mit Wasser kurz vor oder während des Umsetzens erfolgen. Am Beispiel von Mischung 9 konnte gezeigt werden, dass mithilfe von elementarem Schwefel die Herstellung saurer Komposte möglich ist. Obwohl der pH-Wert der Miete zwischenzeitlich auf 4,2 sank, hatte dies keinen negativen Effekt auf den Kompostierungsprozess. Um torffreie saure Pflanzsubstrate, wie z. B. Rhododronsubstrat, herzustellen, sind saurere Komposte notwendig. In weiteren Versuchen sollten größere Mengen elementaren Schwefels verwendet werden, um Komposte mit niedrigeren pH-Werten zu erhalten.

Höhere Schwefelgaben, um den pH-Wert weiter auf ca. 4 zu senken, wurden bei der Durchführung des zweiten Kompostierversuches im halbtechnischen Maßstab (September 2021 bis Juni 2022) verwendet.

In Tabelle 4 sind die wichtigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften der 10 Mischungen M10 bis M19 und der resultierenden Komposte des zweiten Kompostierversuches im halbtechnischen Maßstab dargestellt. Es ist zu sehen, dass die C/N-Verhältnisse der Mischungen vor der Kompostierung trotz der mitunter hohen Anteile an Strukturmaterial verhältnismäßig niedrig waren. Selbst die beiden Mieten M10 und M18 mit 100 % Strukturmaterial haben C/N-Verhältnisse von 14 bzw. 18. Dies ist ein Indiz für wenig verholztes, krautiges, tendenziell eher feuchtes und stickstoffhaltigeres “Strukturmaterial” wie Grasschnitt. Auch die fertigen Komposte der Mischungen M10 und M18 weisen auffällig niedrige C/N-Verhältnisse von deutlich unter 10 auf. Auch der Salzgehalt der Mischung M10 war aufgrund der relativ hohen CAL-löslichen Gehalte an Kalium von 4.100 mg/l OS (als K2O) und Phosphor von 1.100 mg/l OS (als P2O5) für einen reinen Grünschnittkompost verhältnismäßig hoch. Der pH-Wert der Mischungen M18 und M19 ließ sich durch die Untermischung von elementarem Schwefel auf ca. 4 senken.

Tabelle 4: Die wichtigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften der Mischungen und der resultierenden Komposte des zweiten Kompostierversuches im halbtechnischen Maßstab

Bestandteile/ Eigenschaften	Mischungen für Kompostierung halbtechnischer Maßstab																			
	M10		M11		M12		M13		M14		M15		M16		M17		M18		M19	
	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]	Anteile [Vol.-%]	Masse [Mg]
organische Reststoffe/Hauptbestandteile																				
Kräuterseitlingsubstrat																			5	1,31
Gärrest			25	4,75	50	9,5			10	1,9	25	4,75	30	5,7					20	3,8
Strukturmaterial	100	17,3	75	12,98	50	8,65	50	8,65	40	6,92	25	4,33	30	5,19	80	13,84	100	17,3	75	12,98
HTK-Gärrest															20	4,64				
Klärschlamm							50	19,5	50	19,5	50	19,5	40	15,6						
elementarer Schwefel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0 kg/m³		3,3 kg/m³	
Weitere Eigenschaften der Mischungen (vor Kompostierung)																				
Mietenvolumen [m³]	50		50		50		50		50		50		50		50		50		50	
Wassergehalt [Ma%]	52,3		57,3		67,6		68,7		70,6		72,4		70,7		54,9		51,4		57,8	
pH-Wert	7,5		7,7		8,0		7,5		7,7		7,7		7,9		7,7		7,4		7,5	
Salzgehalt [g KCl/l OS]	2,03		3,00		4,00		3,74		3,91		3,89		3,76		3,19		2,59		2,99	
C/N-Verhältnis	14,0		15,0		14,0		7,7		7,3		7,7		8,3		14,0		18,0		14,0	
Masse der Miete [Mg]	17,30		17,73		18,15		28,15		28,32		28,58		26,49		18,48		17,30		18,09	
Rohdichte [g/l OS]	350,00		398,00		362,00		602,00		575,00		551,00		521,00		403,00		378,00		366,00	
Eigenschaften der Komposte																				
Wassergehalt [Ma%]	41,4		47,4		59,1		58,2		58,9		61,9		59,2		41,7		41,7		49,5	
pH-Wert (H2O)	7,60		7,80		8,00		6,50		5,90		6,00		6,20		7,30		4,20		3,80	
Salzgehalt [g KCl/l OS]	3,01		4,50		4,82		3,90		7,02		5,37		5,40		6,68		9,63		11,72	
C/N-Verhältnis	7,30		6,20		4,90		3,90		3,70		3,70		4,10		6,80		6,20		5,90	
Rohdichte [g/l OS]	679		724		773		766		761		757		741		746		672		668	
oTS [% TS]	28		35		41		37		43		43		42		31		28		40	
N [mg/kg TS]	26.000		31.000		44.000		55.000		64.000		63.000		55.000		28.000		23.000		37.000	
N CaCl2-lösl. [mg/l OS]	270		300		220		410		710		380		370		500		150		290	
P [mg/kg TS]	3.600		4.000		4.800		24.000		27.000		27.000		23.000		8.700		4.000		6.400	
P als P2O5 CAL-lösl. [mg/l OS]	1.100		1.500		1.400		560		680		780		720		2.300		540		960	
K [mg/kg TS]	12.000		14.000		17.000		7.100		8.200		8.900		10.000		12.000		9.400		11.000	
K als K2O CAL-lösl. [mg/l OS]	4.100		4.900		5.400		960		1.300		1.400		1.900		3.900		2.800		3.200	

Zum zweiten Kompostierungsversuch lässt sich zusammenfassend sagen, dass das gelieferte Strukturmaterial für die Mischungsherstellung ungewöhnlich feucht und weniger verholzt war, was in Verbindung mit dem relativ niederschlagsreichen Sommer und Herbst dazu führte, dass einige Kompostiermischungen zu feucht waren und auch blieben. Bei den vier Mieten M13 bis M16 waren die Mischungen so feucht, dass der Kompostierungsprozess nie richtig anlief. Die Mietenkerntemperaturen stiegen kaum über 50°C und somit konnte keine Hygienisierung und Stabilisierung des Materials erfolgen. Diese vier Versuchskomposte hätten in der Herstellung von Spezialerden keine Berücksichtigung finden können. Die Komposte der Mieten M10, M11, M12, M17, M18 und M19 können, basierend auf den Ergebnissen der Abschlussanalysen, mit Einschränkungen Verwendung in Spezialerdenmischungen für bestimmte Pflanzengattungen finden. Nach den Kriterien der Bundesgütegemeinschaft Kompost für Substratkomposte erfüllen die Versuchskomposte aufgrund von Überschreitungen der zulässigen Salzgehalte (maximal 5 g/l OS) oder der zulässigen Gehalte an löslichem Kalium (als K2O, maximal 4000 mg/l OS) nicht und sind somit nicht uneingeschränkt für die Verwendung Substraten zu empfohlen.

II.3.1.2.2 Herstellung von Komposten aus organischen Reststoffen für Spezialerden

Aus den in den Kompostierversuchen hergestellten Komposten und den als geeignet identifizierten weiteren Ausgangsstoffen wurden auf Grundlage der erstellten Anforderungsmatrizes für Spezialerden diverse Substratmischungen hergestellt und in verschiedenen Keim- und Pflanzversuchen auf ihre jeweilige Tauglichkeit geprüft. Basierend auf den Ergebnissen dieser Tests wurden Vorzugsmischungen identifiziert, die Rezepturen angepasst und die Substrate wurden erneut in weiteren Pflanzversuchen erprobt. Anfänglich wurden für die Gefäß- bzw. Topfversuche lediglich kleinere Chargen zwischen 30 und 200 l Substrat per Hand hergestellt. Später wurden die Substrate im Maßstab von ca. 3 - 10 m³ u. a. für die Befüllung der Beete im Rahmen der Freilandpflanzversuche hergestellt. Für die Herstellung dieser größeren Mengen an Substraten wurden die Substratausgangsstoffe mit dem Radlader vorgemischt und entweder mit dem Demonstrator aus VP1 (am Standort Thronitz) oder mit dem Demonstrator für Spezialerdenherstellung aus VP4 (Standort in Markranstädt) gemischt (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Mischungsherstellung größerer Mengen Substrat; links: mit dem Demonstrator der Projektpartner aus VP1 in Thronitz rechts: mit dem Demonstrator für Spezialerdeneherstellung aus VP4

Als Ausgangsstoffe zur Herstellung geeigneter Komposte für die Spezialerden haben sich Grünschnitt/Strukturmaterial, pflanzliche Gärreste (vereinzelt, je nach Eigenschaften durchaus auch Gärreste mit Schweinegülle-, Rinderfestmist- oder Hühnertrockenkotanteil), elementarer Schwefel und abgetragene Substrate aus der Speisepilzproduktion als geeignet erwiesen.

Neben einigen, während der Projektlaufzeit entwickelten, Komposten waren weitere geeignete und verwendete Ausgangsstoffe, für die Herstellung von auf organischen Reststoffen basierenden torffreien Spezialerden, Rindenhumus, Holzfasern, HTC-Kohle aus pflanzlichen Gärresten, Perlit, Bentonit, Hornspäne, Oberboden und gewaschener Sand.

Am Ende der mehrmals wiederholten Reihe von Substratherstellung, -testung und -anpassung wurden sechs Pflanzsubstrate hergestellt, die in den abschließenden Freilandpflanzversuchen erprobt werden sollten. Es handelte sich dabei um drei Varianten eines Substrates für die Kultivierung von Zierpflanzen, ein saures Substrat für die Kultivierung von Heidepflanzen, eine saure Erde (mit Oberbodenanteil) ebenfalls für die Kultivierung von Heidepflanzen und ein Substrat für die Kultivierung von Gemüsepflanzen. Des Weiteren wurde durch die Herstellung und Absiebung eines sauren Kompostes mit einem pH-Wert von 4 ein Bodenverbesserer zur pH-Wertabsenkung und Erhöhung des Humusgehalts erstellt.

In Tabelle 5 sind die oben beschriebenen Substrate, deren Bezeichnung und deren Ausgangsstoffe dargestellt.

Tabelle 5: Hergestellte Substrate und deren Ausgangsstoffe

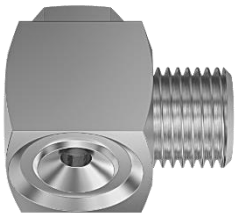
Substrat	Substrattyp	Ausgangsstoffe und Zusätze
Substrat A	Zierpflanzensubstrat + Glatt-Rezykllatdünger (NPK 13-17-18)	Holzfaser, Komposte, Rindenhumus, Sand, Perlit, Hornspäne, Glatt-NPK-Dünger
Substrat B	Zierpflanzensubstrat	Holzfaser, Komposte, Rindenhumus, Sand, Perlit, Hornspäne
Substrat C	Zierpflanzensubstrat mit 2 Vol.-% HTC-Kohle	Holzfaser, Komposte, Rindenhumus, Sand, Perlit, HTC-Kohle, Hornspäne
Substrat D	Saures Moorbeetpflanzensubstrat	Holzfaser, Kompost, Rindenhumus, Perlit, Bentonit, Hornspäne
Substrat E	Saure Moorbeetpflanzenerde	Oberboden, Kompost, Rindenhumus, Perlit, Bentonit, Hornspäne
Substrat F	Gemüsesubstrat	Holzfaser, Komposte, Rindenhumus, Perlit, Bentonit, Hornspäne
Kompost M18	Bodenverbesserer	Grünschnittkompost, elementarer Schwefel

II.3.1.3 Entwicklung Herstellungstechnologie/ Demonstrator

Bei der Erstellung des Demonstratorkonzeptes wurde darauf geachtet, dass der Demonstrator ähnlich wie die übrige betriebseigene Anlagentechnik zur Kompostierung, Siebung und Mischung möglichst mobil und somit flexibel in der Anwendung ist. Die Komposte und eventuell andere Zuschlagstoffe werden zuvor, je nach Bedarf, über eine Siebtrommel gesiebt und mithilfe eines Radladers mit integrierter Wiegeeinheit zusammen mit weiteren Substrathauptbestandteilen vorgemischt. Das vorgemischte Substrat wird mit der Radladerschaufel definiert in den Aufgabebunker der Mischtrommelanlage gegeben. Das regelbare Auftragsband befördert das vorgemischte Substrat in die Mischtrommel, während eine Dosiereinheit feste und/oder flüssige Zuschlagstoffe in die ebenfalls regelbare rotierende Mischtrommel einträgt und diese durch die Mischleistung der Mischtrommel homogen im Substrat verteilt werden. Die Dosiereinheit besteht hauptsächlich aus einer Förderschnecke, die feste Zuschlagstoffe wie Granulate und Pulver, z.B. Düngergranulate, in die Mischtrommel transportiert, und einem Sprühsystem für flüssige Zuschlagstoffe wie Wasser oder Düngerlösungen. Die Förderleistung der Förderschnecke ist über einen Frequenzumrichter steuerbar. Das Sprühsystem ist je nach Bedarf über eine Kombination aus Durchflusszähler, Kugelhahn und austauschbaren Düsenköpfen regelbar. Die Stromversorgung erfolgt über ein mobiles Notstromaggregat. Weitere Bauteile sind eine Pumpe, Schläuche und Kupplungen für das Sprühsystem.

Als Standort des Demonstrators wurde für die Dauer der Inbetriebnahme und der Validierungsuntersuchungen, das betriebseigene Zwischenlager an der Kapstraße in Markranstädt gewählt. Links in Abbildung 6 ist die Förderschnecke mit Getriebemotor zu sehen und rechts der Unterbau für die Förderschnecke und das Sprühsystem, um einen stabilen Stand und eine ideale Höhe für den Eintrag in die Mischtrommel zu erreichen. In Abbildung 7 sind zwei Düsenköpfe für einen an verschiedene Lösungen angepassten Flüssigkeitsdurchsatz zu sehen

Abbildung 6: links: Förderschnecke mit Getriebemotor;
rechts: Unterbau für Förderschnecke und Sprühsystem mit Schienen und Aufhängung



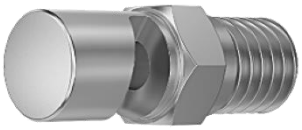


Abbildung 7: verschiedene Düsenköpfe
links: Tangential-Vollkegeldüse für die Beimischung von flüssigen Düngerlösungen;
rechts: Flachstrahl-Zungendüse für die Beimischung von Wasser bzw. größeren Volumina

Nach den Vorversuchen im Mai und Juni 2022 für die Ermittlung der Transportkapazität der Förderschnecke bei unterschiedlichen Einstellungen des Frequenzumrichters mit verschiedenen zu transportierenden Materialien (Düngergranulat und Perlit) und der Ermittlung des Einflusses der verwendeten Düsen und Betriebsdrücke auf das Sprühbild des Sprühsystems wurden im nächsten Schritt, im Juli, wie auf Abbildung 8 zu sehen, auf dem betriebseigenen Zwischenlager die Dosiereinheit und die Mischanlage kombiniert und die Einzelaggregate aufeinander Abgestimmt. In den folgenden Versuchen wurden während der Zumischung von festen (Perlit und Düngergranulat über Förderschnecke) und flüssigen (Wasser über Sprühsystem) Zuschlagstoffen in Kompost die resultierenden Mischungen mehrmals beprobt um zu ermitteln, ob sich mit dem System Mischungen mit kontinuierlicher Qualität erzeugen lassen.

Abbildung 8: Mischeinheit und Dosiereinheit inklusive Sprühsystem wurden vor Ort kombiniert

Abbildung 9 zeigt das Sprühsystem im Einsatz. Für den Test des Systems bzgl. der Zugabe von flüssigen Komponenten, wurden die Geschwindigkeit des Vorschubbandes im Aufgabebunker der Mischanlage und die Durchflussmenge des Sprühsystems so gewählt, dass die Mischung einen um ca. 10 % erhöhten Wassergehalt aufweisen sollte. Die drei Einzelproben wiesen einen um 7,9 % (28,8 %) erhöhten Wassergehalt im Vergleich zur Kompostprobe ohne Wasserzugabe (20,9 %) auf. Am Ende des Mischvorganges wurde von dem Haufwerk eine Mischprobe angefertigt, die einen Wassergehalt von 27,7 % aufwies. Die Abweichung des ermittelten Wassergehaltes zum theoretisch berechneten Wassergehalt um 2,1 % bzw. 3,2 % liegt wahrscheinlich an der nicht 100%ig genauen Mengenaufgabe des Materials mit der Radladerschaufel und einer Messtoleranz des Durchflusszählers von ±0,5 l begründet. Außerdem ist nicht das gesamte Wasser, welches in den Mischraum gesprüht wurde, auch in oder auf der Mischung verblieben. Ein Teil des Wassers wird auch die Mischtrommel benetzt haben, da der Kompost mit ca. 80 % TS recht trocken war und Wasser teilweise von der Oberfläche abperlte. Ein weiterer kleiner Teil des Wassers verdunstete wahrscheinlich aufgrund der warmen Witterungsverhältnisse am Versuchstag. Für genauere Ergebnisse sollte in Zukunft ein Durchflusszähler mit geringerer Messtoleranz verbaut werden.

Abbildung 9: Sprühsystem im Einsatz; Blick vom Rand des Aufgabebunkers der Mischeinheit in die Mischtrommel

Für die Kontrolle der gleichmäßigen Dosierung und Untermischung von festen Zuschlagstoffen wurden die Kompostmenge, die Geschwindigkeit des Vorschubbandes im Aufgabebunker der Mischanlage und die Motordrehzahl der Förderschnecke so gewählt, das ca. 10 Vol.-% Perlit in der Resultierenden Mischung vorliegen sollten. Mit der Förderschnecke wurde Perlit in die Mischtrommel dosiert und während des Mischvorganges mehrere Proben vom Auswurfband genommen. Von diesen Proben wurden 50 ml entnommen, aus diesen mit einer Pinzette die

Perlitkörner herausgelesen und anschließend die Menge optisch verglichen. In Abbildung 10 sind die herausgelesenen Perlitkörner der 4 Proben abgebildet. Es ist zu sehen, dass in der Startprobe dezent weniger Perlitkörner enthalten waren, als in den drei weiteren Proben, die augenscheinlich identische Perlitmengen enthielten. Die Abweichung zwischen der Start- und den späteren Proben lag wahrscheinlich an dem verzögerten Starten der Dosiereinheit, während das Vorschubband im Aufgabebunker der Mischanlage bereits Material in die Mischtrommel transportierte. Das Starten der Dosiereinheit sollte besser abgestimmt oder in Zukunft gleich über einen Sensor und nicht händisch ausgelöst werden.

Abbildung 10: herausgelesene Perlitkörner aus jeweils 50 ml der über den Zeitverlauf des Mischvorgangs genommen Proben; links: Startprobe; 2. v.l: + 2. v.r.: Proben zwischen Startprobe und Endprobe rechts: Probe gegen Ende des Mischvorganges

Bei der Zugabe des Düngergranulats wurden die Kompostmenge, die Geschwindigkeit des Vorschubbandes im Aufgabebunker der Mischanlage und die Motordrehzahl der Förderschnecke so gewählt, das ca. 3,5 kg des Düngers pro m³ des Kompostes eingemischt werden. Vor dem Einmischen des NPK-Düngers (15-15-15) wurde der Kompost über eine Mischprobe aus dem Haufwerk beprobt und Analysiert. Während des Mischvorganges wurden drei Proben am Auswurfband genommen und im Labor deren Nährstoffgesamtgehalte für Kalium, Phosphor und Stickstoff analysiert um auf die Gleichmäßigkeit der Verteilung des Düngers innerhalb der Mischungen zu schließen. In Tabelle 6 sind die Nährstoffgesamtgehalte des Kompostes (Demo-NPK0) sowie der Mischungen (Demo-NPK1 bis Demo-NPK3) eingetragen. Es ist zu sehen, dass die Gehalte zumindest von Kalium und Phosphor über den Versuchsverlauf hinweg relativ konstant blieben. Bei der Probe “Demo-NPK0”, die vor Beginn des Mischungsversuches genommen wurde, waren die Kalium und Phosphorgehalte niedriger als bei den zu einem späteren Zeitpunkt während des Einmischens des NPK-Düngers genommenen Proben. Der Stickstoffgehalt lag jedoch höher als bei den Proben “Demo-NPK1” und “Demo-NPK2”, in die das Düngergranulat bereits eingemischt wurde. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass der Kompost vor der Mischungsherstellung nicht ausreichend homogenisiert wurde und der Stickstoff innerhalb des Haufwerks relativ ungleichmäßig verteilt war. Warum sich diese ungleiche Verteilung nicht auch bei den Kalium- und Phosphorgehalten widerspiegelte, lässt sich ohne Kenntnis darüber in welcher Form die Nährstoffe vorlagen nicht abschließend klären.

Tabelle 6: Nährstoffgesamtgehalte für Kalium, Phosphor und Stickstoff (Kjeldahl) vor und über den Verlauf des Mischungsversuches mit Kompost und NPK-Düngergranulat

Probe	Nährstoffgesamtgehalte		
	Kalium [mg/kg TS]	Phospor [mg/kg TS]	Stickstoff [mg/kg TS]
Demo-NPK0	10.000	4.700	15.000
Demo-NPK1	11.000	5.100	14.000
Demo-NPK2	11.000	5.100	14.000
Demo-NPK3	11.000	5.000	16.000

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich mit der Kombination aus Mischeinheit und Dosiereinheit inklusive Sprühsystem Mischungen in zufriedenstellend kontinuierlicher Qualität herstellen ließen. Der Unterschied zwischen Perlitmenge gleich zu Beginn und im weiteren Verlauf der Mischungsherstellung ließe sich durch mehr Routine in der Bedienung der Anlage oder über eine Sensorgestützte Aktivierung der Dosiereinheit minimieren. Eine Analyse der CAL-löslichen Phosphor- und Kaliumgehalte bzw. der CaCl2-löslichen Stickstoffgehalte hätte womöglich einen differenzierteren Einblick hinsichtlich der gleichmäßigen Untermischung des NPK-Düngers geliefert.

Nachdem die Versuche zeigten, dass mit dem Demonstrator Substrate in mehr als zufriedenstellend konstanter Qualität hergestellt werden konnten, wurden unter Verwendung zweier Komposte aus dem zweiten Kompostierungsversuch im halbtechnischen Maßstab, Perlit, Rindenhumus, Hornspäne, Holzfasern, Sand, Bentonit und einem NPK-Dünger von Glatt vier Spezialerden und ein Bodenverbesserer hergestellt. Es wurden auch bei diesen Substraten im Verlauf der Mischung mehrere Proben genommen und analysiert. Die Analysen bestätigten die vorherigen Ergebnisse hinsichtlich einer zufriedenstellenden kontinuierlichen Qualität des Mischungsergebnisses mit teilweise Abweichungen zwischen Startprobe und den weiteren Probe im späteren Verlauf der Vermischung.

II.3.1.4 Evaluierung der Spezialerden

II.3.1.4.1 Pflanzversuche

Mit dem Ziel Vorzugsmischungen für Spezialerden und Bodenverbesserer zu identifizieren wurden anfänglich Topfversuche unter Verwendung unterschiedlicher Rohstoffkombinationen von Zuschlagstoffen durchgeführt. Die Rezepturen wurden angepasst und mit diesen erneut Topfversuche durchgeführt. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser mehreren bereits durchgeführten Topfpflanzversuche wurden die entsprechenden Substratrezepturen gegebenenfalls erneut angepasst und abschließend im Rahmen eines Freilandpflanzver- suches erprobt. Für diesen Freilandversuch wurde in Markranstädt auf dem Firmengelände der VKD eine Außenbeetanlage von gut 21 m Länge, gut 2 m Breite und ca. 0,4 m Tiefe errichtet. Die äußere Begrenzung der Außenbeetanlage wurde betoniert und so konzipiert, dass sie 12 gleich große Beete mit den Maßen von 2 m Länge und 1,6 m Breite umfasst. Die Begrenzung der einzelnen Beete erfolgte über nicht befestigte bzw. mobile L-Steine, sodass bei Änderungen im Versuchsplan die Beetgrößen veränderbar sind. Abbildung 11 zeigt die Außenbeetanlage während der Errichtung.

Abbildung 11: Außenbeetanlage während der Errichtung

Für die Erprobung im Freilandpflanzversuch wurden sechs angepasste Pflanzsubstrate hergestellt. Die Bezeichnung, der Substrattyp und die verwendeten Ausgangsstoffe sind in Tabelle 5 des Abschnitts II.3.1.2.2 aufgelistet. Als Vergleichssubstrate dienten handelsübliche Substrate für die jeweilige Anwendung – ein torffreies Zierpflanzensubstrat (Vergleichssubstrat 1), ein

torffreies Rhododendronsubstrat (Vergleichssubstrat 2), eine torfreduzierte Rhododendronerde (Vergleichssubstrat 3) aus einem Erdenwerk und ein torffreies Gemüsesubstrat (Vergleichssubstrat 4).

In Tabelle 7 sind die verwendeten Substrate und die entsprechende Beetnummer aufgelistet.

Tabelle 7: Substratmischungen, deren Bezeichnung und Verwendungsort im Rahmen des Freilandversuchs

Substrattyp	Substratvariante	Bezeichnung	Beet-Nr.
Zierpflanzensubstrate	Zierpflanzensubstrateigenmischung + Glatt-NPK-Dünger	Substrat A	1
	Zierpflanzensubstrat aus dem Fachhandel	Vergleichssubstrat 1	2
	Zierpflanzensubstrateigenmischung	Substrat B	3
	Zierpflanzensubstrateigenmischung + 2% HTC-Kohle	Substrat C	4
Rhododendronsubstrate	Rhodendronsubstrat aus dem Fachhandel	Vergleichssubstrat 2	5
	Rhodendronsubstrateigenmischung	Substrat D	6
	Rhododenronerde aus dem Fachhandel	Vergleichssubstrat 3	7
	Rhododendronerdeneigenmischung	Substrat E	8
Gemüsesubstrate	Gemüsesubstrat aus dem Fachhandel	Vergleichssubstrat 4	9
	Gemüsesubstrateigenmischung	Substrat F	10

Die Zierpflanzensubstrate wurden in der Kultivierung von Rudbeckia fulgida (Sonnenhut, 12 Pflanzen pro Beet), Coreopsis grandiflora (Großblumiges Mädchenauge, 12 Pflanzen pro Beet) und Viola pubescens (Veilchen, 30 Pflanzen pro Beet) getestet, die Substrate für Moorbeetpflanzen (Rhododendronsubstrate) wurden in der Kultivierung von Erica carnea (Winterheide, 15 Pflanzen pro Beet) und Calluna vulgaris (Sommerheide/Besenheide, 15 Pflanzen pro Beet) getestet und die Gemüsepflanzensubstrate wurden in der Kultivierung von Brassica oleracea var. gongylodes (Kohlrabi, 15 Pflanzen pro Beet) und Foeniculum vulgare var. azoricum (Knollenfenchel, 18 Pflanzen pro Beet) getestet.

Die Erica- und Calluna-Pflanzen wurden in KW 37 bzw. in KW 38, die restlichen Pflanzen bereits in KW 28 gepflanzt. Je nach Witterung und Bedarf wurden die Beete über zeitgesteuerte Viereckregner in den frühen Morgenstunden bewässert. Aller vier Wochen wurden die Pflanzen mit einem organischen NPK-Flüssigdünger mittels Gießkanne nachgedüngt.

Die Anordnung der Pflanzen in den vier Beeten mit den Zierpflanzensubstraten war auf allen vier Beeten gleich. Oben, in westlicher Richtung wurden die Sonnenhüte, in der Mitte die Großblumigen Mädchenaugen und unten, in östlicher Richtung die Veilchen. Die Testpflanzen in Beet 2 mit Vergleichssubstrat 1 waren verglichen mit den anderen 3 Beeten mit den Eigenmischungen bereits nach wenigen Wochen Versuchszeit auffallend kleiner.

In Abbildung 12 sind die vier Beete mit den Rhodendronsubstraten bzw. -erden zu sehen.

Abbildung 12: Beete 5 bis 8 in KW42
links: Beet 5, Vergleichssubstrat 2; 2. v. links: Beet 6, Substrat D; 3. v. links: Beet 7, Vergleichssubstrat 3 aus einem Erdenwerk; rechts: Beet 8, Substrat E

Bei den Beeten mit den Gemüsesubstraten zeigte sich ebenfalls bereits nach wenigen Wochen Versuchszeit, dass Vergleichssubstrat 4 kultivierten Versuchspflanzen kleiner waren und ein blasseres Blattgrün aufwiesen als die in der Substrateigenmischung kultivierten Pflanzen im Nachbarbeet.

Der Ursprung für das verzögerte bzw. verminderte Wachstum der Pflanzen könnte in der Immobilisierung von Stickstoff infolge einer Verpilzung des Substrates liegen. Erstmals wurden in KW31 Pilzfruchtkörper im Substrat bemerkt und entfernt. Ein weiteres Mal wurde ein starkes Pilzfruchtkörperwachstum in KW34 beobachtet (siehe Abbildung 13).

Abbildung 13: Verpilzung des Vergleichsubstrats 4 in Beet 9
links: KW31, Wachstum von Pilzfruchtkörpern aus dem Kontroll-Gemüsepflanzensubstrat aus dem Handel;
rechts: KW34 erneutes Wachstum von Pilzfruchtkörpern

Die Substrate wurden zu Beginn und nach Abschluss der Pflanzversuche beprobt und analysiert. In Tabelle 8 sind die Werte einiger Parameter der verwendeten Substrate aufgeführt.

Tabelle 8: Eigenschaften der verwendeten Substratmischungen zu Beginn und nach Abschluss des Freilandversuchs

Eigenschaften	Substrateigenmischungen und Vergleichssubstrate für Freilandversuch									
	Substrat A	Vergleichs-substrat 1	Substrat B	Substrat C	Vergleichs-substrat 2	Substrat D	Vergleichs-substrat 3	Substrat E	Vergleichs-substrat 4	Substrat F
Werte zu Beginn des Pflanzversuchs										
pH-Wert ($CaCl_2$)	6,3	6,7	6,0	6,0	6,3	5,4	6,0	6,3	6,4	5,9
oTS [% TS]	20	38	30	22	75	30	38	14	62	26
Rohdichte [g/l OS]	895	590	903	830	507	736	606	992	496	735
Salzgehalt [mg/100g OS]	350	130	320	420	210	660	410	420	340	740
Ca [mg/kg TS]	13.000	53.000	14.000	14.000	14.000	15.000	15.000	14.000	16.000	18.000
Mg [mg/kg TS]	2.400	17.000	2.500	2.500	3.500	3.200	3.500	3.200	3.200	4.600
S [mg/kg TS]	2.400	780	3.000	2.500	1.300	6.800	12.000	3.500	2.800	4.100
Fe [mg/kg TS]	9.000	15.000	8.600	8.400	8.500	13.000	13.000	15.000	6.200	12.000
N [mg/kg TS]	6.000	6.400	5.800	5.500	13.000	10.000	8.000	6.400	10.000	12.000
N $CaCl_2$-lösl. [mg/l OS]	220	140	230	58	140	460	40	350	530	45
P [mg/kg TS]	1.900	730	1.700	1.700	1.300	2.500	1.400	1.700	1.600	3.300
P als P_2O_5 CAL-lösl. [mg/l OS]	610	91	510	570	140	310	190	360	210	590
K [mg/kg TS]	3.600	9.100	3.500	3.600	5.300	6.500	7.000	5.700	7.600	7.200
K als K_2O CAL-lösl. [mg/l OS]	1.200	750	1.100	1.300	810	1.700	1.400	1.600	1.400	1.800
Werte nach Bonitur/Versuchslaufzeit										
pH-Wert ($CaCl_2$)	6,6	7,1	6,5	6,7	5,6	5,7	4,8	7,6	6,1	6,0
oTS [% TS]	21	38	21	23	75	30	34	15	44	35
Rohdichte [g/l OS]	894	739	912	909	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	786	677
Salzgehalt [mg/100g OS]	130	77	200	78	22	180	242	94	250	360
Ca [mg/kg TS]	10.000	44.000	11.000	11.000	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	3.100	3.300
Mg [mg/kg TS]	1.800	15.000	1.800	1.900	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	18.000	18.000
S [mg/kg TS]	1.500	760	1.900	1.400	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2.200	3.000
Fe [mg/kg TS]	8.700	15.000	8.500	8.900	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7.500	1.300
N [mg/kg TS]	5.500	5.400	4.900	5.200	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	26.000	21.000
N $CaCl_2$-lösl. [mg/l OS]	36	1,5	95	16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	33	250
P [mg/kg TS]	1.700	750	1.600	1.600	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1.600	3.000
P als P_2O_5 CAL-lösl. [mg/l OS]	520	83	470	540	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	530	470
K [mg/kg TS]	1.800	7.200	1.900	1.600	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	6.200	5.000
K als K_2O CAL-lösl. [mg/l OS]	360	620	530	310	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2.300	660

Die Bonitur der Kohlrabis und Fenchel erfolgte in KW 39, die der Veilchen in KW 42 und die Ernte der Großblumigen Mädchenaugen und der Sonnenhüte in KW 43. Die Callunen und Ericen wurden nicht bonitiert, sondern nur optisch begutachtet, da sie sehr langsam wachsen und aufgrund des späten Pflanzzeitpunktes die Ergebnisse nicht aussagekräftig gewesen wären. Die Sommerheide-Pflanzen der vier Beete 5 bis 8 mit den Substraten für Heidepflanzen wiesen vergleichbare gute bis sehr gute Qualitäten auf. Die Erica-Pflanzen in den Beeten 5, 6 und 7 waren von überwiegend guter Qualität und einige wenige Pflanzen waren von akzeptabler

Qualität, da an diesen vereinzelt abgestorbene Äste auftraten. In Beet 8 mit Substrat E zeigten sich mehr Erica-Pflanzen mit “nur” akzeptabler Qualität.. Dies lag sehr wahrscheinlich an dem mit 6,3 von Anfang an zu hohen pH-Wert für ein Substrat für Moorbeetpflanzen. Der pH-Wert stieg bis zum Projektlaufzeitende auf 7,6. Des Weiteren erwies sich das Substrat E aufgrund des verwendeten scheinbar lehmhaltigen Oberbodens als zu bündig für die Anwendung Rhododendronerde. Die Eigenmischung D erwies sich vorerst , als gut geeignet für die Anwendung als Rhododendronsubstrat, zumindest für die Kultivierung der getesteten Versuchspflanzen, allerdings müsste noch geklärt werden, wie langanhaltend der Substrat-pH-Wert niedrig bleibt.

Für die Bonitur wurden die Zier- bzw. Gemüspflanzen dicht über der Beetoberfläche abgeschnitten und deren oberirdische Frischmasse bestimmt sowie stichprobenartig die Wurzeln begutachtet. Je nach Versuchspflanze wurden zusätzlich die Blütenanzahl und die Frischmasse ohne Blätter ermittelt.

Abbildung 14 zeigt die beiden Gemüsesubstratbeete 9 und 10 in KW 39 kurz vor der Bonitur.

Abbildung 14: Beet 9 und 10 in KW39 kurz vor der Bonitur
links: Vergleichssubstrat 4 aus dem Handel; rechts: Gemüsepflanzensubstrateigenmischung

Die Abbildungen 15 zeigt die Kohlrabis bzw. Fenchel nach dem Wiegen ohne Blätter. Es ist zu sehen, dass die Kohlrabis und Fenchelknollen, die in der Eigenmischung Substrat F kultiviert wurden, mitunter deutlich größer waren als jene, die im Vergleichssubstrat 4 aus dem Fachhandel kultiviert wurden.

Abbildung 15: geerntete Kohlrabis und Fenchel ohne Blätter links: Kohlrabis aus Beet 9 mit Vergleichssubstrat 4 aus dem Handel; 2. v. links: Kohlrabis aus Beet 10; 3. v. links: Fenchel aus Beet 9 mit Vergleichssubstrat 4 aus dem Handel; rechts: Fenchel aus Beet 10 mit der Eigenmischung Substrat F

Diesen Eindruck bestätigt die Abbildung 16, die in Form von Säulendiagrammen die bestimmten durchschnittlichen oberirdischen Frischmassen der Kohlrabi- und Knollenfenchelpflanzen ohne Blätter sowie die dazugehörigen Standardabweichungen darstellt. So wiesen die im Substrat F kultivierten Kohlrabis im Durchschnitt eine gut 280 g höhere Frischmasse auf, als die im Vergleichssubstrat kultivierten Kohlrabis.

Ähnlich verhielt es sich bei den Fenchelpflanzen. Die in der Eigenmischung Substrat F kultivierten Fenchel wiesen im Durchschnitt eine gut 260 g höhere Frischmasse auf, als die im Vergleichssubstrat 4 kultivierten Pflanzen.

Mit dem Vergleichssubstrat wurden demzufolge um ca. 30 % (bei Kohlrabis) bzw. ca. 50 % (bei Fenchel) geringer Frischmassen erzielt als mit der Eigenmischung.

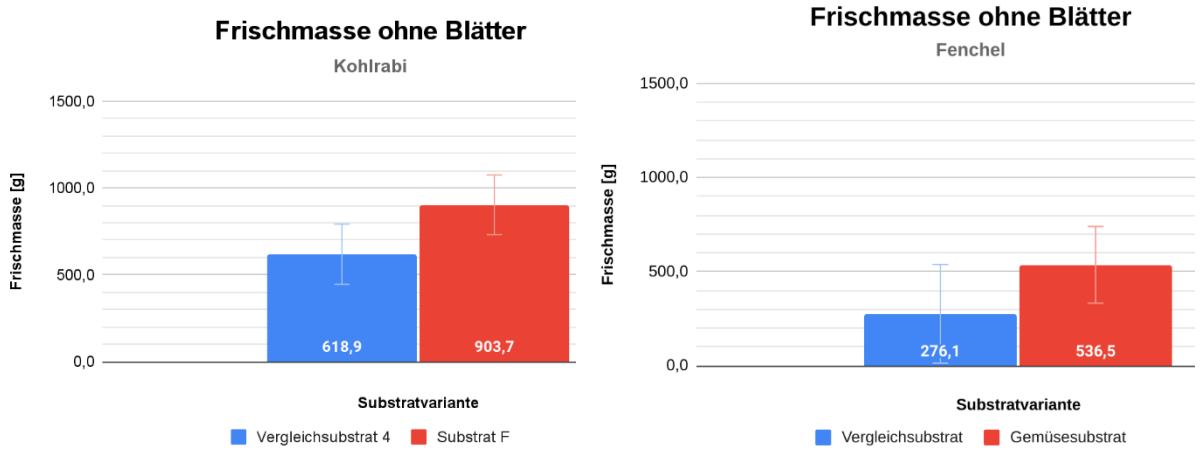


Abbildung 16: Diagramme Frischmasse Kohlrabis und Fenchel ohne Blätter kultiviert in Vergleichssubstrat 4 aus dem Handel (blau) und Substrat F (rot); links: Kohlrabiknollenfrischmassen; rechts: Frischmassen Fenchelknollen

Substrat F scheint für Anwendung als Gemüsesubstrat gut geeignet zu sein. Der Grund für den deutlichen Unterschied der im Versuch erzielten Frischmassen zwischen den Beeten 9 und 10 liegt wahrscheinlich in der bereits erwähnten Verpilzung des Vergleichssubstrates 4 besonders während der ersten Hälfte des Versuches. Pilz und Gemüsepflanzen konkurrierten wahrscheinlich um Wasser und Nährstoffe und dies führte womöglich zu dem verminderten Massezuwachs der Pflanzen in Beet 9.

Die Abbildung 17 zeigt die vier Zierpflanzensubstratbeete kurz vor der Bonitur der Veilchen in KW 42. Deutliche Unterschiede in der Größe der Pflanzen sind im Vergleich zwischen Beet 2 mit Vergleichssubstrat 1 und den anderen Beeten (mit Eigenmischungen) zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die im Vergleichssubstrat kultivierten Pflanzen unterentwickelt und deutlich kleiner waren als die in den anderen Substraten kultivierten Pflanzen.

Abbildung 17: Beete 1 bis 4 in KW42 kurz vor der Bonitur; links: Beet 1, Substrat A mit NPK-Dünger von Glatt; 2. v. links: Beet 2, Vergleichssubstrat 1 aus dem Handel; 3. v. links: Beet 3, Substrat B; rechts: Substrat C mit 2% HTC-Kohle

Die Abbildung 18 bestätigt die rein optisch klar zu erkennenden großen Unterschiede hinsichtlich der Güte der Pflanzen. Es sind in Form von Säulendiagrammen die ermittelten durchschnittlichen oberirdischen Frischmassen und die dazugehörigen Standardabweichungen der in den verschiedenen Substraten kultivierten Versuchspflanzen dargestellt. Die erzielte Pflanzenqualität kommt einem Totalausfall nahe. Links in Abbildung 18 ist zu sehen, dass bei der Bonitur der Sonnenhüte die im Vergleichssubstrat 1 kultivierten Testpflanzen mit 12,6 g die

geringste durchschnittliche Frischmasse aufwiesen. Die durchschnittlich schwersten Sonnenhutpflanzen mit 353,7 g ließen sich über die Kultivierung in Substrat A erzielen. Die durchschnittlichen oberirdischen Frischmassen der in den Substraten B und C kultivierten Pflanzen betrugen 236,5 g bzw. 304,8 g.

Auch bei der Bonitur der Großblumigen Mädchenaugen wurden bei den im Vergleichssubstrat 1 kultivierten Pflanzen deutlich geringere Frischmassen als bei den anderen Substraten bestimmt. Wie in der Mitte von Abbildung 18 zu sehen, zeigte sich bei den in den drei Eigenmischungen kultivierten Großblumigen Mädchenaugen ein einheitlicheres Bild als bei den anderen Versuchszierpflanzen. Die Frischmassen der Pflanzen schwankten von durchschnittlich 687,1 g in Substrat C, über durchschnittlich 654,1 g in Substrat B bis zu durchschnittlich 600,9 g in Substrat A.

Rechts in Abbildung 18 ist zu sehen, dass die in Substrat B kultivierten Veilchen mit 95,4 g die größte durchschnittliche oberirdische Frischmasse aufwiesen. Die niedrigste durchschnittliche Frischmasse von 3,3 g besaßen die Veilchen, die in Vergleichssubstrat 1 aus dem Handel kultiviert wurden. In Beet 4, mit Substrat C mit 2 % HTC-Kohle gefüllt, war die Frischmasse der Veilchen mit durchschnittlich 72 g höher, als die Frischmasse der Veilchen, die in Substrat A mit NPK-Dünger von Glatt kultiviert wurden (57,2 g).

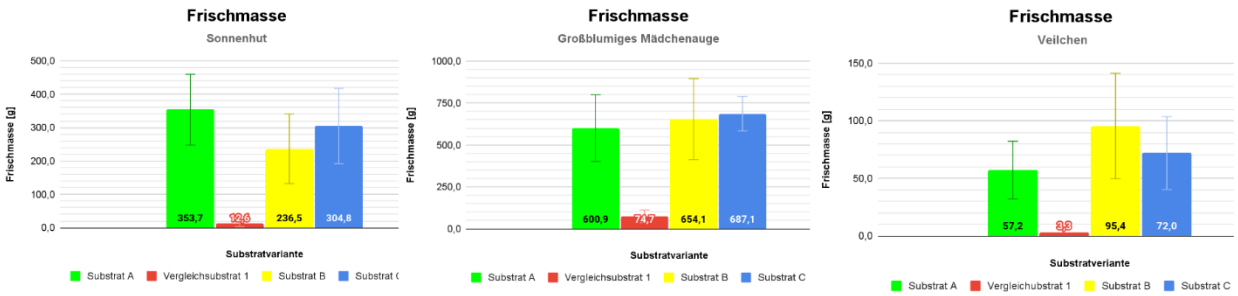


Abbildung 18: Säulendiagramme mit den durchschnittl. oberirdischen Frischmassen der unterschiedlich kultivierten Testpflanzen;
links: Frischmassen der Sonnenhutpflanzen;
2. v. links: Frischmassen der Großblumigen Mädchenaugen;
rechts: Frischmassen der Veilchen

Die Substrate A, B, und C scheinen für die Anwendung als Zierpflanzensubstrat, zumindest in der Kultivierung der gewählten Testpflanzen, als gut geeignet. Für einen uneingeschränkten Einsatz, z. B. für die Kultivierung von sehr salzempfindlichen Kulturen sind wahrscheinlich die Salzgehalte zu erhöht. Warum das Vergleichssubstrat 1 hinsichtlich der Frischmasse und dem allgemeinen Erscheinungsbild der Zierpflanzen im Vergleich zu den anderen Substraten A, B und C deutlich schlechter abgeschnitten hat, konnte nicht abschließend geklärt werden. Zwar war zu Beginn des Versuchs der Gehalt an CaCl2-löslichen Stickstoff mit 140 mg/l OS verglichen mit Substrat A und Substrat B verhältnismäßig niedrig, jedoch wies Substrat C mit 2% HTC-Kohle einen Gehalt an CaCl2-löslichen Stickstoff von nur knapp 60 mg/l OS auf und brachte deutlich größere und vitalere Pflanzen hervor. Eventuell lag die Ursache für den geringen Frischmassezuwachs in einer Immobilisierung des Stickstoffs gleich zu Beginn der Versuchszeit aufgrund der mikrobiologischen Zersetzung von Substratbestandteilen oder in den, im Vergleich zu den anderen Substraten, niedrigeren (aber theoretisch ausreichenden) P- sowie K-Gehalten. Wahrscheinlich lag die Ursache in den, im Vergleich zu den Eigenmischungen, erhöhten Fe-, Ca- und Mg-Werten. So lagen der Fe-Gehalt mit 15.000 mg/kg TS, der Mg-Gehalt mit 17.000 mg/kg TS und besonders der Ca-Gehalt mit 53.000 mg/kg TS deutlich über den entsprechenden Werten der Eigenmischungen (Fe-Gehalt: 8400 bis 9000 mg/kg TS; Mg-

Gehalt: 2.400 bis 2.500 mg/kg TS; Ca-Gehalt: 13.000 bis 14.000 mg/kg TS, siehe Tabelle 8). Die Nährstoffanalyse der bonitierten Testpflanzen zeigte, dass die P- und K-Gehalte der im Vergleichssubstrat kultivierten Pflanzen, verglichen mit denen der Versuchspflanzen aus den anderen Beeten, deutlich niedriger waren. Aufgrund bekannter Nährstoffantagonismen kann angenommen werden, dass durch die erhöhten Fe- und Ca-Gehalte die Phosphat- sowie Kaliumaufnahme der Pflanzen negativ beeinträchtigt wurden und sich dies hemmend auf das Pflanzenwachstum ausgewirkt hat.

II.3.1.4.2 Lagerstabilitätsversuche

Die Lagerstabilität der Substrate A bis F wurde unter zwei verschiedenen Lagerungsregimen betrachtet. In Variante 1 wurden die Substrate in Form von mit Planen abgedeckten Haufwerken im Freien gelagert und untersucht. In Variante 2 wurden die Substrate in 40-Liter-Säcken abgesackt und überdacht in einer Halle gelagert.

In Abbildung 19 sind die beiden Lagerungsvarianten dargestellt. In den Tabellen 9 und 10 sind die Analyseergebnisse der Substrate zu Beginn und während bzw. am Ende der jeweiligen Lagerung dargestellt.

Bei den meisten im Freien gelagerten und mit Planen abgedeckten Substraten blieben die pH-Werte innerhalb der ersten vier Monate konstant oder sanken moderat um 0,1 bis 0,3 Einheiten. Bei Substrat A sank der pH-Wert etwas stärker von 6,8 auf 6,3 und blieb dann aber bis zum Versuchsende konstant. Über die gesamte Versuchsdauer von ca. acht bzw. zehn Monaten sanken bei allen Substraten die pH-Werte. Am stärksten sank der pH-Wert bei den Substraten D und F um 0,8 Einheiten. Der Salzgehalt der Substrate A und B blieb über den gesamten Versuchszeitraum nahezu konstant, bei den Substraten C, D und E stieg er um jeweils ca. 1 g/l und bei Substrat F war ein sehr starker Anstieg von ca. 3 g auf 5,42 g/l zu verzeichnen. Der Gehalt an CAL-löslichem Kalium blieb über die Versuchszeit bei den Substraten B, C und E relativ konstant bzw. stiegen oder fielen in geringerem Ausmaß zwischen 200 und 300 mg/kg TS. Bei den Substraten A, D und F waren Schwankungen von 700, 500 bzw. 400 mg/kg TS zu beobachten. Die Gehalte an CAL-löslichem Phosphor sanken, über die gesamte Versuchszeit betrachtet, bei allen Substraten. Die Schwankungen von 120 bis 220 mg/kg TS bei den Substraten A, B, C und D waren eher gering. Die Substrate E und F unterlagen während der Lagerungsdauer Schwankungen im CAL-löslichem Phosphorgehalt von 360 bzw. sogar 750 mg/kg TS.

Bei allen abgesackten und überdachten Substraten war über den Lagerungszeitraum ein deutlicher Anstieg der Gehalte an CaCl2-löslichen Stickstoff zu beobachten. Ebenso stiegen die Salzgehalte. Am stärksten stieg der Salzgehalt um 2,26 von 3,14 auf 5,4 g/l in Substrat F. Bei den anderen Substraten betrug der Anstieg des Salzgehaltes 0,75 bis 1,52. Die Gehalte an CAL-löslichem Phosphor und Kalium stiegen in den Substraten A und B stark an. Bei den anderen vier Substraten blieben diese Werte nahezu konstant. Der pH-Wert sank bei allen Substraten während der ca. siebenmonatigen Lagerungsdauer um 0,5 bis 0,7 Einheiten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei beiden Lagerungsarten das Material einem gewissen mikrobiellen Abbau unterworfen zu sein scheint und dass die hergestellten Substrate, unabhängig von den hier getesteten Lagerregimen, innerhalb von vier bis fünf Monaten ihrer Verwendung zugeführt werden sollten, damit sich die eingestellten Substrateigenschaften nicht zu stark ändern.

Vor allem die Stickstoffverluste wahrscheinlich aufgrund von Witterungseinflüssen sind bei der Lagerung in mit Planen abgedeckten Haufwerken im Freien größer als bei der abgesackten und überdachten Lagervariante. Bei der abgesackten überdachten Lagerung stiegen die Salzgehalte wahrscheinlich infolge eines fortschreitenden mikrobiellen Abbaus und fehlendem Stoffaustausch mit der Umwelt stärker an.

Abbildung 19: Aufbau Lagerstabilitätsversuche; links: Variante 1, mit Planen abgedeckte Haufwerke im Freien (für Bild Planen teilweise entfernt); rechts: Variante 2, abgesackt und überdachte Lagerung

Tabelle 9: Entwicklung der Substrateigenschaften über die Dauer der Lagerung in mit Planen abgedeckten Haufwerken im Freien

Eigenschaften	Merkmalsausprägung der Substrate in Abhängigkeit der Lagerungsdauer (abgedecke Haufwerke im Freien)																	
	Substrat A			Substrat B			Substrat C			Substrat D			Substrat E			Substrat F		
Lagerdauer, abgedeckt im Freien [Monate]	0	4	8	0	4	8	0	4	8	0	4	10	0	4	10	0	4	8
TS [%OS]	67,1	65,4	67,1	65,7	59,9	63,6	62,6	62,1	71,2	53,4	49,0	52,7	76,5	63,5	66,7	50,7	48,9	59,9
Salzgehalt [g / l OS]	3,19	3,82	3,09	2,71	2,73	2,9	2,52	2,59	3,47	3,9	4,06	4,89	3,19	3,34	4,21	2,4	3,14	5,42
oTS [%TS]	38,1	40,0	20,0	27,9	25,0	30,0	32,6	44,0	22,0	51,6	42,0	30,0	7,8	15,0	14,0	50,7	57,0	26,0
Rohdichte [g/l]	755	830	895	699	814	903	686	978	830	584	636	736	1.139	1.062	992	534	693	735
pH (CaCl2)	6,8	6,3	6,3	6,5	6,5	6,0	6,7	6,7	6,0	6,2	6,0	5,4	7,0	6,9	6,3	6,7	6,4	5,9
N [mg / kg TS]	4.300	7.100	6.000	5.300	5.900	5.800	5.400	6.400	5.500	13.000	12.000	10.000	3.700	7.400	6.400	26.000	13.000	12.000
N (CaCl2-lösl.) [mg / kg TS]	360	380	220	140	90	230	120	0	58	250	230	460	140	130	350	410	470	45
P [mg / kg TS]	1.800	1.700	1.900	1.800	1.600	1.700	2.100	1.400	1.700	2.500	2.300	2.500	1.600	1.600	1.700	4.000	3.300	3.300
P2O5 (CAL-lösl.) [mg / l OS]	830	720	610	630	550	510	660	530	570	470	290	310	1.100	350	360	950	830	590
K [mg / kg TS]	3.400	3.100	3.600	3.400	2.800	3.500	3.900	2.500	3.600	5.800	4.500	6.500	4.800	4.100	5.700	6.800	5.400	7.200
K2O (CAL-lösl.) [mg / l OS]	1.400	1.900	1.200	1.200	1.400	1.100	1.200	1.400	1.300	1.200	1.500	1.700	1.700	1.500	1.600	1.400	1.800	1.800

Tabelle 10: Entwicklung der Substrateigenschaften über die Dauer der Lagerung in überdachten 40-Liter-Säcken

Eigenschaften	Merkmalsausprägung der Substrate in Abhängigkeit der Lagerungsdauer (abgesackt + überdacht)											
	Substrat A		Substrat B		Substrat C		Substrat D		Substrat E		Substrat F	
Lagerdauer, abgesackt + überdacht [Monate]	0	7	0	7	0	7	0	7	0	7	0	7
TS [%OS]	65,4	68,1	59,9	59,5	62,1	59,2	49,0	48,5	63,5	61,0	48,9	50,6
Salzgehalt [g/l OS]	3,82	5,27	2,73	3,86	2,59	3,34	4,06	5,58	3,34	4,62	3,14	5,4
oTS [%TS]	40,0	17,0	25,0	21,0	44,0	19,0	42,0	33,0	15,0	18,0	57,0	35,0
Dichte [g/l]	830	943	814	916	978	918	636	772	1.062	1.017	693	774
pH (CaCl2)	6,3	5,8	6,5	5,9	6,7	6,2	6,0	5,3	6,9	6,3	6,4	5,7
N [mg / kg TS]	7.100	9.100	5.900	9.200	6.400	9.500	12.000	12.000	7.400	18.000	13.000	25.000
N (CaCl2-lösl.) [mg /kg TS]	380	520	90	350	0	230	230	390	130	1.200	470	880
P [mg / kg TS]	1.700	1.900	1.600	1.500	1.400	1.600	2.300	1.500	1.600	2.500	3.300	3.600
P2O5 (CAL-lösl.) [mg /l OS]	720	1.900	550	1.500	530	650	290	360	350	340	830	870
K [mg / kg TS]	3.100	3.800	2.800	3.200	2.500	3.100	4.500	5.100	4.100	5.600	5.400	6.800
K2O (CAL-lösl.) [mg /l OS]	1.900	3.800	1.400	3.200	1.400	1.500	1.500	1.700	1.500	1.200	1.800	2.000

II.3.2 Ergebnisbewertung / Fazit

Durch die im Rahmen der Projektarbeit durchgeführten Kompostierversuche im Labor- und besonders im halbtechnischen Maßstab wurden neue verwendungsspezifische Kompostiermischungen mit angepassten Komposteigenschaften entwickelt, erprobt, und verbessert. Besonders die sauren Komposte aus organischen Reststoffgemischen unter Verwendung von elementarem Schwefel stellen eine Neuerung dar, die es ermöglicht, den pH-Wert von Substraten definiert und bei Bedarf über mehrere Einheiten zu senken und so auch attraktive Substrate und Komposte auf basis organischer Reststoffe, mit pH-Werten üblicherweise im basischen Bereich, herzustellen. Bei den bisher durchgeführten Pflanzversuchen unter Verwendung saurer Komposte zeigten sich, trotz des durch das eingetragene Sulfat erhöhten Salzgehaltes, bei den bislang verwendeten Versuchspflanzen keinerlei pflanzenschädigende Folgen und auch der Kompostierungsprozess scheint hinsichtlich Temperaturverlauf der Rotte sowie der Kompostierungsdauer unverändert. Dennoch sollten die Pflanzenverträglichkeitstests mit weiteren Pflanzenarten ausgeweitet werden. Auch bestehen noch zu klärende Fragen z. B. bezüglich der Wirkungsdauer der Versauerung und des Einflusses verschiedener Kultursysteme auf die Nachhaltigkeit der Substratversauerung (z. B. Ebbe-Flut-Bewässerung vs. Tröpfchenbewässerung).

Mit dem in Betrieb genommenen Demonstrator ließen sich Spezialerden und Substrate mit gleichbleibenden Produkteigenschaften herstellen. Um die Bedienung des Demonstrators zu erleichtern und gelegentliche Produktschwankungen aufgrund des zeitversetzten Startens von Auftragsband und Dosiereinheit zu vermeiden, wäre es sinnvoll ein abgestimmtes, synchrones Starten der beiden Einheiten sensorgestützt zu realisieren.

Im Rahmen der durchgeführten Pflanzversuche konnte gezeigt werden, dass sich mit den hergestellten hochwertigen torffreien Spezialerden auf Basis organischer Reststoffe in der Kultivierung von Zierpflanzen, Gemüsepflanzen und von Moorbeetpflanzen Kulturerfolge erzielen lassen. Auch hier sollten noch weitere Pflanzversuche mit anderen Versuchspflanzen durchgeführt werden, da aufgrund der Zugabe von organischem Dünger, Recyclatdünger und sauren Komposten die Salzgehalte mancher Substrate für einige Pflanzenarten zu hoch sein könnten und eine Anpassung hinsichtlich verwendeter Düngermenge, Düngerart oder des Stroffstommanagements für die Kompostherstellung erforderlich ist, um die Salzfrachten im Substrat zu minimieren.

Anhang A:

Chemische, physikalische, biologische und sozioökonomische Eigenschaften von Kultursubstraten bzw. von Substratausgangsstoffen und deren für die Pflanzenproduktion geforderten Ausprägungen (anw.-/k.-abh.: anwendungs-/kulturabhängig)

Eigenschaften		Geforderte Ausprägung			
		hoch	niedrig	frei/ohne	anw.-/k.-abh.
Chemische Eigenschaften					
pH-Wert	Gibt den Säuregehalt der Mischung an. Optimum je nach Toleranzspanne der jeweiligen kultivierten Pflanzenart. Aufgrund Nährstoffverfügbarkeit für die meisten Pflanzenarten im schwach sauren bis neutralen Bereich ideal.				x
Salzgehalt	Gibt die Masse der Salzionen pro l Substrat wieder. Toleranzbereich der kultivierten Pflanzenart entscheidend, aber je geringer desto universeller einsetzbar. Hohe Salzgehalte beeinflussen Nährstoff- und Wasseraufnahme der Pflanze negativ.		x		
Nährstoffgehalte	Die Höhe der Nährstoffgehalte und deren Verhältnis ist von den Toleranzen und Bedürfnissen der kultivierten Pflanzen abhängig. Die Nährstoffgehalte der Substratausgangsstoffe sind in der Regel sind nicht ausreichend und die Substrate müssen aufgedüngt werden.				x
Pufferkapazität	Aufnahmekapazität des Substrats für Säuren und Basen bei gleichbleibendem pH-Wert.	x			
Stickstoffimmobilisierung	Durch mikrobiellen Abbau induzierte Immobilisierung von Stickstoff (steht den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung) aus dem Substat. Muss bei Kulturführung berücksichtigt werden und ggf. durch Dünger ausgeglichen werden.		x		
wachstumshemmende Stoffe	Die Substrate dürfen keinen wachstumshemmenden Effekt auf die Pflanzen haben. Wachstumshemmende Stoffe sollten vorab oder über die Vorbehandlung der Stoffe ausgeschlossen bzw. abgebaut werden.			x	
Physikalische Eigenschaften					
Strukturstabilität	Stabilität des Substrats gegen mikrobiellen Abbau, Abrieb, Zersetzung oder andere Gefügeveränderungen. Je länger Kulturzeitraum, desto wichtiger.	x			
Schüttdichte	Masse eines bestimmten Volumens des unkomprimierten Substrats (Feststoffe inklusive Luft/Poren zwischen den Partikeln).		x		
Feldkapazität	Maximale Wassermenge den ein Boden gegen die Schwerkraft (maximale Wasserkapazität), zwei bis drei Tage nach ausreichender Wassersättigung, halten kann. Der Totwasseranteil (aufgrund zu hoher Saugdrücke für Pflanzen nicht nutzbares Wasser) sollte möglichst klein sein.	x			
Luftkapazität	Luftgefülltes Porenvolumen eines Substrates bei Feldkapazität anhand dessen die Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzeln beurteilt werden kann	x			
Wiederbenetzbarkeit	Wasseraufnahme (Geschwindigkeit und Menge) des Substrats nach Austrocknung	x			
Schrumpfung	Volumenverlust des Substrats infolge von Trocknung. Hohe Schrumpfung kann Wasserkapazität, Wiederbenetzbarkeit und Strukturstabilität negativ beeinflussen		x		
Biologische Eigenschaften					
Unkraut	Die Substrate sollten frei von Unkrautsamen und triebfähigen Pflanzenteilen sein			x	
Schädlinge	Die Substrate sollten frei von Pflanzenschädlingen, wie z.B. Trauermücken, sein			x	
Krankheitserreger	Die Substrate sollten frei von phyto-, zoo- und humanpathogenen Keimen, wie z.B. Salmonelen, phytopathogene Nematoden, sein			x	
mikrobielle Tätigkeit	Je nach Anwendunggewünscht oder unerwünscht.				x
Sozioökonische Eigenschaften					
Lagerstabilität	Je nach Anwendung sollten Substrate ist Lagerstabilität mehr oder weniger wichtig (wichtiger für Sackware für Privatgebrauch, weniger wichtig für direkte Anwendungen nach Produktion)	x			
Qualitätsbeständigkeit	Produkte sollten über das Jahr relativ konstante Qualitäten aufweisen. Für das Profisegment entscheidend, im Hobbysegment größere Qualitätsschwankungen vertretbar	x			
Transportstabilität	Substrate sollten sich beim Transport nicht entmischen. Je länger Transportwege umso wichtiger.	x			
Nachhaltigkeit	Nachhaltigkeit (Herkunft, CO2-Fußabdruck, Umweltfreundlichkeit, etc.) wird zu einem größeren Faktor.	x			
Preis	Wichtig, da teilweise mit niedrigsten Margen pro Pflanze produziert werden muss. Im Hobbybereich etwas entspannter.		x		