

**Hessisches Landeslabor**

Standort Kassel

**HESSSEN**



## **„P-Düngewirksamkeit von Klärschlamm-Rezyklaten“**

**Abschlussbericht**

06.10.2022

**Dr. F. Jacobi**

**J. Löber**

**Landesbetrieb Hessisches Landeslabor**

Fachgebiet IV.5

Am Versuchsfeld 11-13

34128 Kassel

0561 9888 181

fabian.jacobi@lhl.hessen.de

<http://www.lhl.hessen.de>

**D. Koch**

**C. Schumann**

**Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen**

Fachgebiet Fachinformation Pflanzenbau

Am Versuchsfeld 11-13

34128 Kassel

0561 9888 440

dierk.koch@lhl.hessen.de

<http://www.llh.hessen.de>

Hauptsitz:

Schubertstraße 60, Haus 13, 35392 Gießen

Telefon: 06 41 / 4800 – 555

Telefax: 06 41 / 4800 – 5900

E-Mail: [poststelle@lhl.hessen.de](mailto:poststelle@lhl.hessen.de)

**Standort:**

Am Versuchsfeld 11-13, 34128 Kassel

Telefon: 0 561 / 9888 181

E-Mail: [poststelle@lhl.hessen.de](mailto:poststelle@lhl.hessen.de)

Gleitende Arbeitszeit: Anrufe und Besuche bitte Montag bis Donnerstag zwischen 7:30 – 16:30 Uhr,  
Freitag von 7:30 – 15:00 Uhr oder nach Vereinbarung





## Inhalt

Tabellenverzeichnis .....	1
Abbildungsverzeichnis.....	1
Abkürzungen .....	2
1. Veranlassung .....	3
2. Durchführung .....	4
2.1. Analytik Rezyklate .....	4
2.2. Analytik Boden .....	4
2.3. Analytik Pflanzenmaterial .....	4
2.4. Durchführung Aufwuchsversuch.....	5
3. Ergebnisse .....	7
3.1. Rezyklate .....	7
3.2. Boden – Ausgangssubstrat .....	12
3.3. Aufwuchsversuche .....	13
3.3.1. Ertragsleistung in der Trockenmasse .....	13
3.3.2. Phosphoraufnahme und -konzentrationen im Aufwuchs .....	17
3.3.3. Relation zwischen P-Analytik im Rezyklat und Ertrag .....	20
4. Zusammenfassung.....	24
5. Quellen .....	25
6. Anhang .....	26
6.1. Zusätzliche Tabellen und Abbildungen.....	26
6.2. Fotodokumentation der Aufwüchse jeweils vor der Nutzung .....	31
6.3. Beschreibung der verwendeten Rezyklate.....	33
6.4. Beispielhafte Prüfberichte.....	36
6.4.1. Auszug Prüfbericht Rezyklate.....	36
6.4.2. Auszug Prüfbericht Substrat/Boden.....	37
6.4.3. Auszug Prüfbericht Aufwuchs .....	38



## Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Zeitablauf Durchführung des Versuchs in der Gefäßanlage des LLH in Kassel Harleshausen.	6
Tab. 2	Übersicht Rezyklate: Art und Herstellung.	8
Tab. 3	Analyseergebnisse der Rezyklate. Abweichungen von Grenz- / Mindestwerten sind gekennzeichnet.	10
Tab. 4	Einsatzmengen im Versuch zur Erreichung von 750mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> je Ansatz.	11
Tab. 5	Zusammensetzung des Versuchsbodens.	26
Tab. 6	Zusammensetzung des Pflanzenmaterials. Durchschnittskonzentration über alle Schnitte. Konzentrationsangabe in mg/kg getrockneten Pflanzenmaterials.	27
Tab. 7	Zu den Versuchsgefäßen mit dem Rezyklat zudotierte Mengen.	28
Tab. 8	Signifikanz der Unterschiede der Trockenmasseerträge zu den Schnittterminen und insgesamt im Vergleich zur „TSP“-Variante.	29

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Übersicht Rezyklate: Produktfoto, Hersteller, Produkttyp.	9
Abb. 2	P-Löslichkeiten: Anteil des Gesamtphosphates, der mit den verschiedenen Lösemitteln extrahiert werden konnte.	11
Abb. 3	Verlauf der Aufwuchsleistung: Kumulierte Trockenmasseerträge über den gesamten Versuchszeitraum.	13
Abb. 4	GRÜN: Kumulierte Trockenmasseproduktion (g/Gefäß) der einzelnen Schnitte (Homogene Gruppen mit gleichen Buchstaben gekennzeichnet, LSD 95,0 %). BRAUN: Phosphoraufnahme des Aufwuchses (mg/Gefäß) der einzelnen Schnitte.	14
Abb. 5	Erträge relativ zur Positivkontrolle TSP: Vergleich der Erträge der einzelnen Schnitte.	15
Abb. 6	Relation zwischen P-Gehalt des Aufwuchses und Ertragsleistung.	18
Abb. 7	P-Nutzungseffizienz (PNE) und relative P-Düngeeffizienz (RPD).	19
Abb. 8	Zusammenhang zwischen zugeführter Menge an löslichem P und dem TM-Ertrag bzw. der P-Aufnahme.	20
Abb. 9	Korrelation und damit Prognosestärke der kumulierten Erträge zu den einzelnen Schnittzeitpunkten auf den Gesamtertrag.	22
Abb. 10	Ertragsspannen der Trockenmasseproduktion (g/Gefäß) über den gesamten Versuchszeitraum von 154 Tagen.	30
Abb. 11	Mittlere rückgerechnete Phosphorkonzentration (% TM) des Aufwuchses (1. - 7. Schnitt).	30
Abb. 12	Fotodokumentation der Aufwüchse jeweils vor der Nutzung.	32



## Abkürzungen

DüMV	Düngemittelverordnung
KSA	Klärschlammasche
P	Phosphor
PNE	P-Nutzungseffizienz
RPD	P-Düngeeffizienz
TSP	Triple-Superphosphat
VV	Versuchsvarianten

## 1. Veranlassung

Phosphor zu Düngungszwecken ist ein endlicher Rohstoff. Seine Gewinnung erfolgt in wenigen Lagerstätten und die verbleibenden Lagerstätten weisen unterschiedliche Qualitäten und Belastungen auf. Aus diesem und verschiedenen anderen Gründen ist es das Ziel deutscher Gesetzgebung Phosphat aus Abwässern und damit aus Klärschlämmen zunehmend zurückzugewinnen, um ihn einer Verwertung zuzuführen.

Klärschlämme enthalten neben dem nutzbaren P auch verschiedenste Schadstoffe. Daher wird ihre direkte Nutzung zu Düngungszwecken zunehmend als problematisch angesehen. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten Rückstände aus Kläranlagen für die P-Rückgewinnung aufzubereiten. Ziel ist die Verringerung der Schadstofffracht. Sie muss aber - für den sinnvollen Einsatz als Düngemittel - mit einer hohen Pflanzenverfügbarkeit des P einhergehen.

In der Düngemittelverordnung (DüMV) ist eine Anzahl von Verfahren zur Ermittlung der P-Löslichkeit aus Düngemitteln vorgeschrieben, die damit ein Maß für die Verfügbarkeit des P für die Pflanze darstellen sollen. Die Vorgaben richten sich nach der Einordnung des Düngemittels durch in der DüMV vorgegebene Kriterien. Rezyklate unterscheiden sich von herkömmlichen Düngemitteln und auch untereinander in Herstellungsverfahren, Form und Zusammensetzung, vor allem in der Art der chemischen Bindung des Phosphors. Daher ist es unklar, wie aussagekräftig die Ergebnisse der herkömmlichen Verfahren in Hinsicht auf die P-Düngewirkung solcher Rezyklate sind (s.a. Kratz und Schnug 2009, Wollmann et al. 2018).

Das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) hat für das Geschäftsjahr 2021 den Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL) beauftragt, in Zusammenarbeit mit dem Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) in einer Gefäßversuchsreihe die **Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor in Rezyklaten aus Klärschlämmen in einem Leistungsvergleich zu Triple-Superphosphat (TSP)** zu bestimmen. Die zur Anwendung kommenden Produkte wurden durch das Ministerium ausgewählt. Die Rezyklate wiesen verschiedene Herkünfte und Herstellungsverfahren auf, weshalb unterschiedliche Düngewirksamkeiten vermutet und durch die Versuchsreihe näher bestimmt werden sollten.

Die Versuchsreihe sollte im Gefäßversuch mit repräsentativen Pflanzen des Ackerbaus durchgeführt und laboranalytisch begleitet werden. Mit der Anwendung von Weidelgras (*Lolium multiflorum* Lam.) konnte dieser Vorgabe des HMUKLV Rechnung getragen werden. Über bis zu sieben Schnitte wurde damit die gesamte Wachstumsperiode abgebildet und so die Phosphatwirkung unmittelbar nach Versuchsbeginn sowie in ihrer Nachwirkung über die gesamte Vegetationsperiode erfasst. Zur Anwendung kam ein spezielles Substrat, welches selbst kein P zur Verfügung stellte. Der Versuch erlaubt so eine Einordnung der getesteten Rezyklate hinsichtlich Ihrer Düngewirkung.

## 2. Durchführung

### 2.1. Analytik Rezyklate

Aus der DüMV ergeben sich verschiedene Vorgaben für die Charakterisierung und Einordnung von Düngemitteln und daraus resultierende Mindestanforderungen, welche Düngemittel erfüllen müssen. Die hier verwendeten Produkte lassen sich bis auf eines der Anlage 2 der Tabelle 6.2 zuordnen. Für Carbonisate gibt es noch keinen Düngemitteltyp, was eine entsprechende Zuordnung nicht erlaubt. Daraus ergibt sich die unter Anlage 1 unter 1.2.9 zu findende Vorgabe eines Mindestgehaltes von  $P_2O_5$  von 10 %. Weiterhin bestehen Vorgaben für Löslichkeiten des vorhandenen Gesamtphosphates bei Anwendung verschiedener Extraktionsverfahren. Für die in der Anlage 2 der DüMV in Tabelle 6.2 charakterisierten Erzeugnisse finden sich diese Vorgaben in der gleichen Anlage der DüMV unter Tabelle 5.7: Wasserlöslichkeit des Phosphates: 2,5 %, neutral-ammoncitratlösliches und wasserlösliches Phosphat: 5 % sowie ausschließlich mineralsäurelösliches Phosphat: 2 %. Die Rezyklate wurden auf diese Parameter, einen weiteren Löslichkeitsparameter und weiterhin auf Gehalte an Makro- und Mikronährstoffen und anorganischen Schadstoffen untersucht.

Die Untersuchungen erfolgten nach den jeweils anzuwendenden Verfahren, für die das Labor akkreditiert ist. Die analysierten Parameter finden sich in den Ergebnissen in Tab. 3. Nähere Hinweise auf die verwendete Methodik finden sich im beispielhaft beigefügten Prüfbericht im Anhang 6.4.1.

### 2.2. Analytik Boden

Das Bodenmaterial wurde vor dem Einsatz im Versuch auf Gehalte an Makro- und Mikronährstoffen sowie Schadstoffen untersucht. Die Untersuchungen erfolgten nach den jeweils anzuwendenden Verfahren, für die das Labor akkreditiert ist. Die analysierten Parameter finden sich in den Ergebnissen in Tab. 5 (Anhang). Nähere Hinweise auf die verwendete Methodik finden sich im beispielhaft beigefügten Prüfbericht im Anhang 6.4.2.

### 2.3. Analytik Pflanzenmaterial

Das Pflanzenmaterial wurde in ähnlichem Umfang wie die Rezyklate und der Boden untersucht, um zuvorderst die Aufnahme an P und zudem auch die Aufnahme ggf. in den Aschen vorhandener weiterer Stoffe zu untersuchen. Die Untersuchungen erfolgten nach den jeweils

anzuwendenden Verfahren, für die das Labor akkreditiert ist. Nähere Hinweise auf die verwendete Methodik finden sich im beispielhaft beigefügten Prüfbericht im Anhang 6.4.3.

## 2.4. Durchführung Aufwuchsversuch

Die Aufwuchsversuche wurden in Mitscherlichgefäßen in der Gefäßstation des Landesbetriebes Landwirtschaft Hessen in Kassel durchgeführt. Die kontinuierlich laufende Bandanlage ist mit einer automatisierten Gießstation ausgerüstet und gewährleistet gleiche klimatische Verhältnisse sowie Wasserversorgung aller Varianten.

Für die Versuche wurde ein spezielles Substrat verwendet welches der Pflanze von sich aus kein P zur Verfügung stellen sollte. Je Ansatz wurden am 29.04.2021 5kg des künstlichen feuchten Substrates (Fa. HGoTech, P0) mit einer variantenspezifischen Menge des Rezyklates vermischt, die 750 mg  $P_2O_5$  beinhalteten (s.a. Tab. 2). Das Rezyklat wurde wie angeliefert verwendet, es erfolgte keine zusätzliche Vermahlung oder anderweitige Aufbereitung. Als Kontrolle dienten eine ungedüngte Variante sowie eine Variante mit Triple-Superphosphat (TSP). Nach Verdichtung des Substrates mittels einer Rüttelplatte wurden 1,5 g Saatgut Welschen Weidelgrases (Sorte Gemini) auf der Oberfläche verteilt, mit wiederum 200g Substrat bedeckt und mit 150ml bewässert. Die in den Mitscherlichgefäßen befindliche Menge trockenen Substrates entsprach nach Trockensubstanzbestimmung 4,70kg.

Die Kalium- und Magnesiumversorgung ist als sehr hoch zu bezeichnen (s.a. Anhang Tab. 5). Laut Substrathersteller sollte dennoch das Ausgangssubstrat nach jeder Nutzung mit einem Kaliumnitratdünger gedüngt werden, um eine ausreichende Versorgung der Pflanzen mit N und K zu gewährleisten. Hierfür wurde der handelsübliche Dünger Yara Terra KRISTA K Plus verwendet, der eigentlich in der Kartoffel-Düngung seine Einsatzschwerpunkte hat.

Es wurden je Variante 4 Wiederholungen angesetzt. Mit Kontrolle (ohne P) und TSP-Variante wurden somit 10 Varianten in 40 Versuchsgefäßen angesetzt.

Die Versuchsgefäße wurden regelmäßig bewässert und nach jeder Schnittnutzung einer NK-Düngung mit 1,65g Yara Terra Krista K (13,5 % N, 46 %  $K_2O$ ) je Gefäß als Lösung in 50 mL/Gefäß unterzogen.

Zu den Ernteterminen, welche sich nach dem bis dahin entstandenen Aufwuchs richteten, wurde das Weidelgras auf Höhe der Gefäßoberkante abgeschnitten, gefäßweise ausgewogen, getrocknet und variantenweise zusammengeführt der Analytik zugeführt. Bei sehr geringen Erntemengen wurde Material mehrerer Schnitte einer Variante gemeinsam in die Analytik gegeben. Dies war bei den VV 1 der Fall.

Tab. 1. Zeitablauf Durchführung des Versuchs in der Gefäßanlage des LLH in Kassel Harleshausen.

Datum	Tätigkeit	Beschreibung
29.04.2021	Gefäßbefüllung und Varianzdüngung	- Vermischung von jeweils 5 kg feuchtem Substrat mit der variantenspezifischen Rezyklat- bzw. TSP-Menge - Befüllung des Gefäßes – Verdichtung mittels Rüttelplatte
29.04.2021	Aussaat	- Verteilung von 1,5 g Welsches Weidelgras der Sorte Gemini je Gefäß auf der Substratoberfläche - Abdeckung der Saat mit 200 g lufttrockenem Substrat - Erste Bewässerung mit 150 ml H <sub>2</sub> O mittels Minibrauseaufsatz
31.05.2021	Fotodokumentation des Erscheinungsbildes jeder Variante vor der ersten Schnittnutzung	
31.05.2021	1. Schnitt	- Ermittlung des Biomasseaufwuchses je Einzelgefäß - Bestimmung der Trockensubstanz der Variantenmischprobe (Umlufttrockenschrank bei 70 Grad)
01.06.2021	Düngung	- NK-Düngung mit 1,65 g Yara Krista K (13,5 % N, 46 % K <sub>2</sub> O) je Gefäß als Lösung in 50 mL/Gefäß
17.06.2021	Fotodokumentation des Erscheinungsbildes jeder Variante vor der zweiten Schnittnutzung	
17.06.2021	2. Schnitt	- Ermittlung des Biomasseaufwuchses je Einzelgefäß - Bestimmung der Trockensubstanz der Variantenmischprobe (Umlufttrockenschrank bei 70 Grad)
18.06.2021	Düngung	- NK-Düngung mit 1,65 g Yara Krista K (13,5 % N, 46 % K <sub>2</sub> O) je Gefäß als Lösung in 50 mL/Gefäß
12.07.2021	Fotodokumentation des Erscheinungsbildes jeder Variante vor der dritten Schnittnutzung	
12.07.2021	3. Schnitt	- Ermittlung des Biomasseaufwuchses je Einzelgefäß - Bestimmung der Trockensubstanz der Variantenmischprobe (Umlufttrockenschrank bei 70 Grad)
12.07.2021	Düngung	- NK-Düngung mit 1,65 g Yara Krista K (13,5 % N, 46 % K <sub>2</sub> O) je Gefäß als Lösung in 50 mL/Gefäß
30.07.2021	Fotodokumentation des Erscheinungsbildes jeder Variante vor der vierten Schnittnutzung	
30.07.2021	4. Schnitt	- Ermittlung des Biomasseaufwuchses je Einzelgefäß - Bestimmung der Trockensubstanz der Variantenmischprobe (Umlufttrockenschrank bei 70 Grad)
30.07.2021	Düngung	- NK-Düngung mit 1,65 g Yara Krista K (13,5 % N, 46 % K <sub>2</sub> O) je Gefäß als Lösung in 50 mL/Gefäß
19.08.2021	Fotodokumentation des Erscheinungsbildes jeder Variante vor der fünften Schnittnutzung	
19.08.2021	5. Schnitt	- Ermittlung des Biomasseaufwuchses je Einzelgefäß - Bestimmung der Trockensubstanz der Variantenmischprobe (Umlufttrockenschrank bei 70 Grad)
24.08.2021	Düngung	- NK-Düngung mit 1,65 g Yara Krista K (13,5 % N, 46 % K <sub>2</sub> O) je Gefäß als Lösung in 50 mL/Gefäß
08.09.2021	Fotodokumentation des Erscheinungsbildes jeder Variante vor der sechsten Schnittnutzung	
08.09.2021	6. Schnitt	- Ermittlung des Biomasseaufwuchses je Einzelgefäß - Bestimmung der Trockensubstanz der Variantenmischprobe (Umlufttrockenschrank bei 70 Grad)
09.09.2021	Düngung	- NK-Düngung mit 1,65 g Yara Krista K (13,5 % N, 46 % K <sub>2</sub> O) je Gefäß als Lösung in 50 mL/Gefäß
30.09.2021	Fotodokumentation des Erscheinungsbildes jeder Variante vor der siebten Schnittnutzung	
30.09.2021	7. Schnitt	- Ermittlung des Biomasseaufwuchses je Einzelgefäß - Bestimmung der Trockensubstanz der Variantenmischprobe (Umlufttrockenschrank bei 70 Grad)
08.10.2021		- Entnahme der Bodenproben als Variantenmischprobe



### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Rezyklate

Es sollten 10 verschiedene Rezyklate untersucht werden. Zwei der angelieferten Proben ließen sich jedoch nicht valide bewerten, sodass im Bericht neben der Null-Variante und der TSP-Variante nur acht Rezyklate dargestellt werden. Die Rezyklate unterschieden sich in Hinsicht auf das zugrundeliegende Herstellungsverfahren, Zusammensetzung und Produktform.

Die Aufbereitung von Klärprodukten mit dem Ziel der P-Rückgewinnung kann aus verschiedenen Prozessschritten der Kläranlage heraus und nach unterschiedlichen Verfahrensprinzipien erfolgen (verändert nach LAGA 2015 und ergänzt um die eingesetzten Produkte):

##### 1. Wässrige Phase

- Kristallisation
- chemische Fällung
  - Struvit (3 MSE, 10 CNP Cycles)

##### 2. Klärschlamm

- Kristallisation
  - Ca-Phosphat nach Karbonisierung und Säureaufschluss (8 Terranova)
- Adsorption
- nasschemischer Aufschluss
- metallurgische Verfahren
- thermochemische Verfahren
  - Karbonisat (7 Pyreg)
  - KSA (7 Sepura, 9 Kopf Syngas)

##### 3. Klärschlammasche

- nasschemischer Aufschluss
  - Doppelsuperphosphat (4 Infracerv)
- metallurgische Verfahren
- thermochemischer Aufschluss
  - Glühphosphat/Rhenaniaphosphat (5 Sepura)

Die im Projekt zum Einsatz kommenden Rezyklate werden an der entsprechenden Stelle genannt, bezeichnet mit der VV-Nummer sowie der bereitstellenden Firma.

Eine tabellarische Charakterisierung der Produkte und Verfahren ist der Tab. 2 und dem Anhang 6.2 zu entnehmen. Das Erscheinungsbild der Rezyklate und eine Übersicht finden sich in Abb. 1. Die umfassenden Ergebnisse der Rezyklatanalytik sind in Tab. 3 aufgeführt. Daraus wird die

unterschiedliche Zusammensetzung der Rezyklate ersichtlich. Abweichungen von den o.g. und weiteren Vorgaben der DüMV sind gekennzeichnet.

Tab. 2. Übersicht Rezyklate: Art und Herstellung.

Versuchs Variante	Produkt	Ausgangsmaterial	Firma, Verfahren	Prinzipien
1	Kontrolle	-	-	-
2	TSP	-	-	-
3	Struvit	Faulschlamm	MSE GmbH Stuttgarter Verfahren	Struvitfällung
4	Doppel- superphosphat	Klärschlamm- verbrennungsasche	Infraserv GmbH Säureaufschluss mit anschließender Granulierung	Nasschemischer Aufschluss
5	Glühphosphat Rhenaniaphosphat	Klärschlamm- asche	SePura GmbH: Calcinierung im Drehrohrofen (erweitertes Outotec-Verfahren)	Thermochemischer Austrieb von SM, Aufbereitung zu CaNaP
6	Klärschlamm- asche	Klärschlamm, überwiegend aus Bio-P-gefälltem Klärschlamm	SePura GmbH Verbrennung im Wirbelschichtofen	Verbrennung
7	Klärschlamm- karbonisat	Klärschlamm	Pyreg GmbH Karbonisierung im Doppelschnecken Reaktor	Verkohlung
8	Calciumphosphat	Entwässerter Klärschlamm, 25% TS nach Eisenfällung	TerraNova Energy GmbH, Hydrolyse/Hydrothermale Karbonisierung im Adsorptions-/ Kristallisationsreaktor	Karbonisierung, Säurelösung, Kristallisation
9	Asche	Klärschlamm (90% TS)	Kopf SynGas GmbH Vergasung mit Nachoxidation im Wirbelschicht-Vergaser	Verbrennung
10	Struvit	Faulschlamm	CNP Cycles GmbH AirPrex Fällung im belüfteten Reaktor	Belüftung, Struvitfällung

3 MSE GmbH <i>Struvit</i>	4 Infraseriv GmbH <i>Doppelsuperphosph.</i>	5 Sepura GmbH <i>Rhenaniaphosphat</i>	6 Sepura GmbH <i>Klärschlammasche</i>
			
7 Pyreg GmbH <i>KS-Carbonisat</i>	8 Terranova Energy GmbH <i>Ca-Phosphat</i>	9 Kopf Syngas GmbH <i>Klärschlammasche</i>	10 CNP Cycles GmbH <i>Struvit</i>
			

Abb. 1. Übersicht Rezyklate: Produktfoto, Hersteller, Produkttyp.

Tab. 3. Analyseergebnisse der Rezyklate. Abweichungen von Grenz- / Mindestwerten sind gekennzeichnet.

Parameter	VV Nr.	3	4	5	6	7	8	9	10	Grenzwert / Mindestwert n. **** n. DüMV
As (mg/kg)		0,6	26,5	7,7	11,1	4,1	1,1	6,4	0,3	40
Benzo(a)pyren		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
Cd (mg/kg)		0,1	2,5	0,0	1,4	0,2	0,3	0,0	0,0	
Cr (mg/kg) ***		1	98	84	109	79	7	51	3	-
C <sub>tot</sub> (%)		1,5	0,5	0,0	0,9	21,9	1,4	3,0	1,1	-
Cu (mg/kg)		5	612	569	555	596	6	474	6	900**
Hg (mg/kg)		0,0	0,3	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1
K (%)		0,2	0,5	0,8	0,7	10,4	0,0	0,2	0,0	-
K <sub>2</sub> O (%)		0,2	0,6	1,0	0,9	12,5	0,0	0,2	0,0	-
Mg (%)		9,7	0,9	2,3	1,6	1,1	0,1	0,5	8,7	-
MgO (%)		16,2	1,5	3,8	2,6	1,8	0,2	0,9	14,3	-
N (Gesamt) (%)		4,9	0,1	0,1	0,1	1,3	0,8	0,1	2,6	-
Ni (mg/kg)		0	74	45	46	73	13	28	0	80
Cd (mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )		0,3	5,8	0,0	11,3	1,2	1,9	0,4	0,0	50 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Pb (mg/kg)		15	107	7	98	79	2	25	1	150
PFT		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
P (%)		13	19	8	6	6	7	4	12	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)		29	42	19	13	15	15	10	27	10%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> citronensäurelöslich (%)		26,4	37,4	18,2	9,5	12,6	13,9	2,8	23,9	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> neutr.-ammon.löslich (%)		26,9	34,7	17,7	4,0	11,8	13,6	1,8	24,2	5% (inkl. wasserl.)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wasserlösl. (%)		0,2	20,1	0,0	0,0	0,8****	1,3	0,0	0,2	2,5%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ausschl. mineralsreisl. (%) *		2,1	7,3	1,3	9	3,2	1,4	8,2	2,8	2%
S (%)		0,4	0,8	0,3	0,9	1,1	0,2	2,6	0,0	-
Tl (mg/kg)		0,0	0,4	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1
Zn (mg/kg)		37	1860	1350	1770	2590	650	1330	29	4000
Fe (%)		2,8	4,8	11,1	5,1	10,4	1,1	12,0	2,2	

\* P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ausschl. mineralsreisl. (%) = P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%) - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> neutr.-ammon.löslich (%)

\*\* Höchstwert nach DüMV Anlage 1 Abschnitt 4.1.1 Spalte 6, falls zutreffend

\*\*\* Eine Untersuchung auf Chrom VI ergab, dass alle Proben Werte unterhalb des Grenzwertes von 2 mg/kg nach DüMV Anlage 2 Tab 1.4 lagen. Zwei Proben zeigten Werte oberhalb von 1 mg/kg (VV3 und 9). Dabei wird aber davon ausgegangen, dass eine Eigenfärbung/Trübung der Probe die photometrische Messung beeinflusst hat. Alle weiteren Werte lagen deutlich unterhalb der Bestimmungsgrenze.

\*\*\*\* Mindestwert gilt mangels Zuordnung zu einem Düngemitteltyp nicht für VV7

Die Gesamt-P-Gehalte variieren zwischen 10 und 42 % bemessen als P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und erfüllen damit alle den in der DüMV geforderten Mindestgehalt. Entsprechend der verschiedenen Aufbereitungsverfahren variieren auch alle anderen analysierten Parameter in tw. noch weitaus größerem Umfang. Den unterschiedlichen Gesamt-P-Gehalten Rechnung tragend, wurden entsprechend unterschiedliche Mengen der Rezyklate unter das Versuchssubstrat gemischt, was wiederum zu stark variierenden tatsächlich applizierten Mengen aller übrigen Parameter außer P führte (s.a. Anhang Tab. 7).

Tab. 4. Einsatzmengen im Versuch zur Erreichung von 750mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> je Ansatz.

VV		TSP 2	3	4	5	6	7	8	9	10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Ges	%	46	29	42	19	13	15	15	10	27
Rezyklat	g/Gef.	1,6	2,6	1,8	4	5,9	5,1	5	7,4	2,8

Die Verfügbarkeit des P wurde anhand vier verschiedener Methoden gemessen: Gesamtphosphatgehalt im Königswasseraufschluss (im Ergebnis gleichzusetzen mit Mineralsäureaufschluss), Wasser-, Neutral-Ammoncitrat- und Citratlöslichkeit. Diese Verfahren stellen unterschiedlich starke Lösungsmittel dar und sollen den Gesamtgehalt sowie die Verfügbarkeit des P unter den Wachstumsbedingungen der Pflanze charakterisieren. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt.

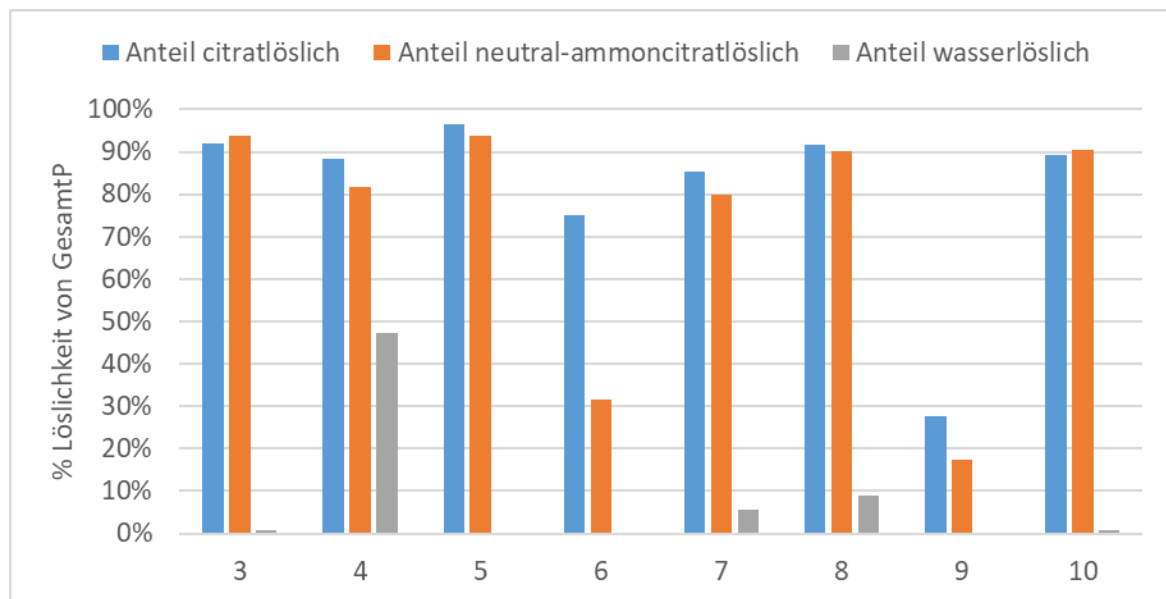


Abb. 2. P-Löslichkeiten: Anteil des Gesamtphosphates, der mit den verschiedenen Lösemitteln extrahiert werden konnte.

Die Citratlöslichkeit liegt bei über der Hälfte der Rezyklate über 85 % des enthaltenen P (3, 4, 5, 7, 8, 10) und nur bei einem Produkt unter 50 % (9). Es findet also unter entsprechend

angesäuerten Bedingungen eine Freisetzung von P statt und es kann damit auf eine entsprechende Verfügbarkeit für die Pflanze geschlossen werden. Die Citratlöslichkeit stellt allerdings, wie bereits erwähnt, keine Anforderung der DüMV dar.

Die Neutral-Ammoncitrat-Löslichkeiten liegen weitgehend leicht unter der Citratlöslichkeit. Sie sind i.d.R. nahezu gleichbedeutend mit den Ergebnissen der sequentiellen Extraktion mit Wasser und neutraler Ammoncitratlösung (DüMV Anlage 2, 4.2.3) und werden dieser daher hier gleichgesetzt. So ergibt sich, dass alle Produkte das Kriterium der DüMV (mind. 5 %) erfüllen.

Die Wasserlöslichkeit – nach DüMV mit mind. 2,5 % vorgegeben - liegt bei allen Produkten, mit Ausnahme von VV4 (Doppelsuperphosphat aus Säureaufschluss einer KSA) unterhalb dieses Grenzwertes.

In Bezug auf weitere in der DüMV relevante Größen fällt der Cd-Gehalt von Produkt 4 auf, der oberhalb des zulässigen Grenzwertes liegt.

Beobachtungen zum Zusammenhang zwischen Aufwuchs und P-Löslichkeiten sind weiter unten ausgeführt (Abb. 8 Kap. 3.3.3).

### **3.2. Boden – Ausgangssubstrat**

Das verwendete Substrat ist speziell für Versuche zur P-Düngung entwickelt worden und stellt der Pflanze nur sehr geringe Mengen P zur Verfügung. Es weist eine Korngrößenverteilung von 14,2 % Ton, einen Schluffanteil von 8,9 % und einen Sandanteil 76,9 % auf. Es handelte sich bei diesem künstlich angemischtem Substrat damit gemäß bodenkundlicher Kartieranleitung um einen schwach tonigen Sand. Das Ausgangssubstrat ist dem Zweck entsprechend mit 4 mg  $P_2O_5/100$  g Boden niedrig versorgt. Es weist sehr hohe Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium und Magnesium auf. Die Corg- und N-Gehalte sind niedrig eingestellt. Weiterhin sind bei der Analyse die Schwermetallgehalte aufgefallen. Hier werden die Vorsorgewerte nach Bundesbodenschutzgesetz für Kupfer und Nickel etwas überschritten, was für den Versuch aber ohne Relevanz sein sollte. Die mineralische Substratmischung hat einen vergleichsweise hohen pH-Wert. Für die üblicherweise angebauten Kulturpflanzen, wie auch Weidelgras, stellt dies aber in Bezug auf die Beeinflussung des die Wurzel umgebenden Milieus keine Einschränkung dar und es wird davon ausgegangen, dass der pH-Wert des Substrates keine Beeinflussung auf den Aufwuchs von Weidelgras (ebenso Mais, Raps und die üblichen Getreidearten) hat (Prof. H.E.Goldbach, pers. Mitteilung). Die untersuchten Parameter sind in Anhang Tab. 5 dargestellt.

### 3.3. Aufwuchsversuche

In Tab. 1 ist der zeitliche Ablauf des Versuches dargestellt. Der Versuch startete am 29.04.2021 mit der Befüllung der Gefäße mit dem HGoTec Substrat und der Aufbringung der Rezyklate. Am gleichen Tage wurde auch das Weidelgras gesät. Der erste Schnitt erfolgte am 31.05.2021. Die 7. Nutzung erfolgte in den stark wüchsigen Varianten am 30.09.2021. Ein Versuchsprodukt (9) lieferte ab der 4. Nutzung keine nennenswerten Erträge mehr. Die fotografische Dokumentation der Aufwüchse kann dem Anhang unter 6.2 entnommen werden und stellt anschaulich die Unterschiede im Aufwuchsverhalten der Varianten dar.

#### 3.3.1. Ertragsleistung in der Trockenmasse

Das Pflanzenwachstum erfolgte über die gesamte Versuchszeit hinweg nach dem Auflaufen relativ gleichmäßig mit zum Versuchsende hin abnehmenden Erträgen. Für die unterschiedlichen VV fand dies aber auf sehr unterschiedlichen Ertragsniveaus statt, wie Abb. 3 und Abb. 4 zu entnehmen ist.

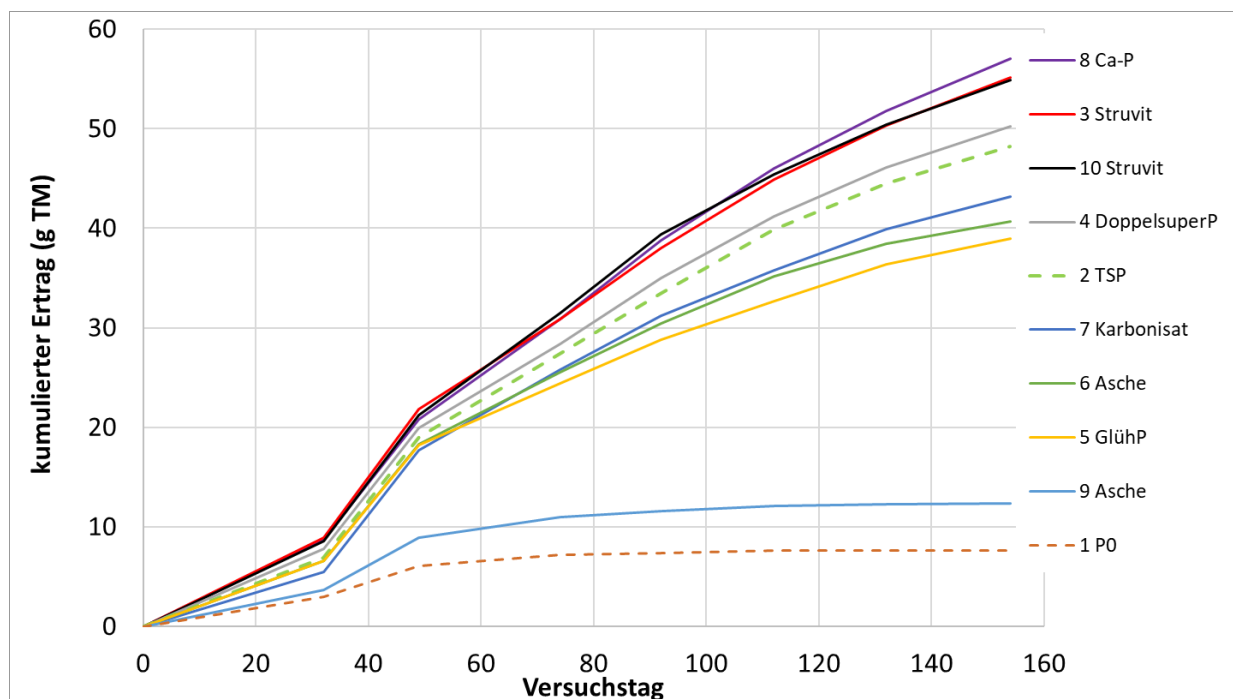


Abb. 3. Verlauf der Aufwuchsleistung: Kumulierte Trockenmasseerträge über den gesamten Versuchszeitraum.

Den geringsten Ertrag erbrachte die Negativkontrolle ohne P-Düngung. So kann davon ausgegangen werden, dass die Verfügbarkeit von P für die Pflanzen die limitierende

Wachstumsbedingung gewesen ist und der Versuch so geeignet war, um die Verfügbarkeitsunterschiede zwischen den Rezyklaten zu ermitteln. Einige Varianten lagen in der Ertragsleistung sogar über der TSP-Variante.

Um festzustellen, ob die Unterschiede zwischen den Varianten signifikant sind, wurden verschiedene Ansätze verfolgt. Zunächst wurden die Gesamterträge verglichen, um mittels der Untersuchung aller Varianten und Wiederholungen homogene Gruppen zu definieren, bzw. die Unterschiede zwischen diesen festzustellen. Es konnten fünf voneinander differenzierbare Gruppen gefunden werden: In Abb. 4 sind die Gesamterträge, bestehend aus denen der einzelnen Schnitte dargestellt und statistisch signifikant unterscheidbaren Gruppen gekennzeichnet (kleine Buchstaben) (siehe auch Anhang Abb. 10 zur Streuung der TM-Erträge). Das Weidelgras entwickelte sich im Versuchsverlauf in der VV1 ohne P-Düngung entsprechend gering. Die VV 3, 8 und 10 (e) übertreffen statistisch abgesichert die Positivkontrolle TSP (VV 2). Die Versuchsvariante 4 (InfraServ GmbH) ist statistisch nicht signifikant von der TSP Variante zu unterscheiden (d). Während die Versuchsvarianten 5 bis 7 eine homogene Ertragsgruppe (c) knapp unterhalb des Niveaus der Positivkontrolle bilden, erreicht die VV9 (b) deutlich geringere Erträge und liegt nahe am Niveau der Negativkontrolle VV1 (a).

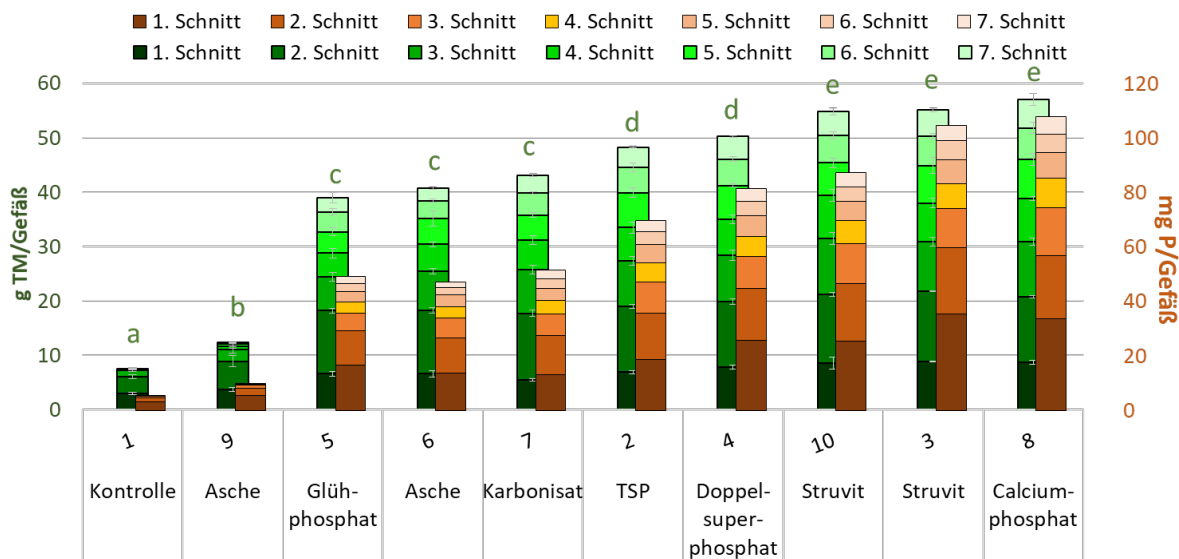


Abb. 4. GRÜN: Kumulierte Trockenmasseproduktion (g/Gefäß) der einzelnen Schnitte (Homogene Gruppen mit gleichen Buchstaben gekennzeichnet, LSD 95,0 %).

BRAUN: Phosphoraufnahme des Aufwuchses (mg/Gefäß) der einzelnen Schnitte.

Weiterhin wurde untersucht, inwiefern sich die Entwicklung des Ertrages im Verlauf voneinander unterschied, um feststellen zu können, ob sich die Bereitstellung von P durch die Rezyklate im



Versuchsverlauf verändert. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 5 die Abweichungen im Ertrag in Relation zur TSP-Kontrolle (100%) dargestellt. Es wurde für jede Schnittnutzung untersucht, ob ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsprodukten und der VV 2 (TSP) vorhanden ist. Die Auswertung dieser relativen Betrachtung erfolgte mittels Dunnett-Test. Dieser Test ist ein Post-Hoc-Test (oder multipler Vergleichstest) und lässt sich im Rahmen einer Varianzanalyse zur Bestimmung von signifikanten Unterschieden zwischen den Mittelwerten einer einzelnen Kontrollgruppe und den verbleibenden Behandlungsgruppen einsetzen. Die Vorzeichen geben dabei an, ob der Trockensubstanzertrag der jeweiligen Schnittnutzung signifikant niedriger oder höher ausgefallen ist. Das Ergebnis ist in Anhang Tab. 8 dargestellt.

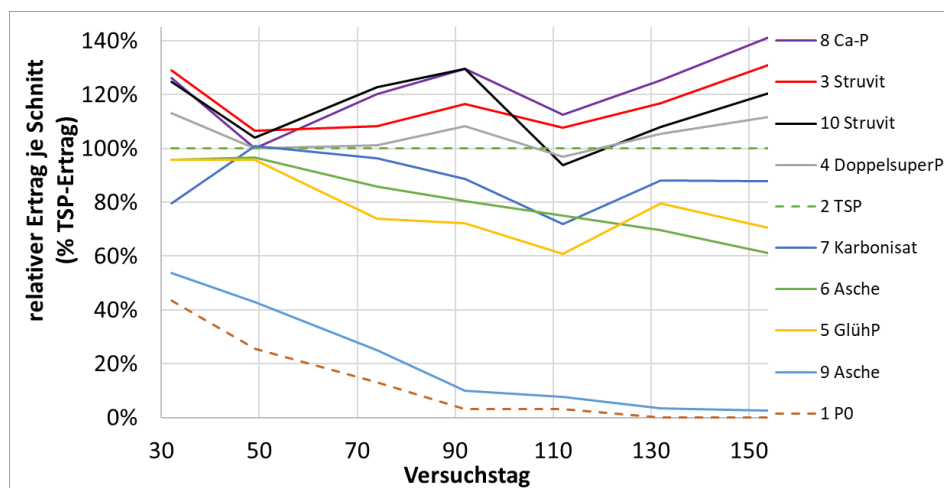


Abb. 5. Erträge relativ zur Positivkontrolle TSP: Vergleich der Erträge der einzelnen Schnitte.

Bei Betrachtung der Unterschiede der Schnitte (Abb. 5, Anhang Tab. 8) und der Vergleiche der Signifikanzen über die Vegetationsperiode hinweg fällt bei den VV 5 und 6 auf, dass sich diese zunächst nicht von der TSP-Kontrolle unterscheiden, in den späteren Schnitten dann aber zurückbleiben. Es kann vermutet werden, dass P durch das Rezyklat hier zunächst in ausreichender Menge bereitgestellt und dann aber nicht mehr nachgeliefert oder das zur Verfügung stehende P aufgebraucht wurde. Dies ist in Bezug auf Rezyklat 5 besonders auffällig, da die Citratlöslichkeit hier nahezu 100 % betrug und daraus abgeleitet ein höherer TM-Ertrag erwartet worden wäre. Zudem haben Citratlöslichkeiten um 90 % bei den Rezyklaten 3, 8 und 10 zu den höchsten Erträgen geführt. Die VV 8 (Calciumphosphat) zeigt nahezu bei allen Nutzungsterminen eine nach dem Dunnett-Test signifikant höhere Trockenmasse-Aufwuchsleistung als TSP und die beiden Struvit-Produkte (VV 3 und VV 10) verhielten sich sehr ähnlich. Insgesamt kann festgestellt werden, dass das zu (Calcium-)Phosphat aufbereitete Karbonisat (VV8) sowie Struvite (VV3, 10) eine deutlich höhere Düngewirkung erzielen konnten (s. Abb. 4

„e“). Die Asche (VV 9) („b“) erzielte nur sehr geringe Düngewirkungen, während andere Verbrennungsprodukte (VV 5-7) („c) immerhin ca. 80-90 % der Düngewirkung der Positivkontrolle TSP erreichen konnten.

Daraus ergibt sich für diesen Versuch folgende, statistisch abgesicherte Reihung:

- CaP (9) = Struvite (3,10)
- > TSP = SSP (4)
- > Carbonisat (7) = GlühP (5) = Asche (6)
- > Asche (9)
- > Kontrolle

Diese Beobachtungen sind vergleichbar mit denen anderer Studien, wie unter Römer und Steingrobe 2018 zusammengefasst. Auffällig ist allerdings, dass die höher aufbereiteten Rezyklate tw. sogar oberhalb des Niveaus der TSP-Kontrolle liegen, was in der Literatur sonst nicht berichtet wird.

Die Ursache könnte in den mit dem Rezyklat zugeführte Mengen an Nährstoffen (vgl. Tab. 7) liegen. Diese wurden nicht durch eine Ausgleichsdüngung der anderen Varianten angepasst. Denkbar wäre dies z.B. für N gewesen. So entsprach die initial mit dem Rezyklat zugegebene Menge an N bis zu 57% (VV3) der nach jedem Schnitt applizierten Düngermengen. Ein Vorteil zum Start der Kultivierung ist damit nicht auszuschließen, allerdings nicht in dem hohen Ausmaß. Die mit Rezyklat zugegebenen Nährstoffe sind zu Beginn der Kultivierung nicht vollständig für die Keimlinge verfügbar gewesen, da sie im gesamten Substrat verteilt vorlagen und vom Wurzelwerk erst hätten erreicht werden müssen.

Gegen eine Ausgleichsdüngung spricht, dass diese mit einem sofort verfügbaren Düngemittel stattgefunden hätte, während die mit dem Rezyklat zugeführten Nährstoffe in anderer, teils unbekannter Bindungsform und Verfügbarkeit vorgelegen hätten. Letzteres hätte zum Nachteil dieser Varianten gereichen können. Ein korrekter Ausgleich wäre also schwer möglich gewesen.

Bezogen auf N hätte die VV3 durch die mit dem Rezyklat eingebrachte Stickstoffmenge einen auf die gesamte Kultivierungsdauer bezogenen Vorteil von 10% gegenüber den Varianten gehabt, die ausschließlich mit den sechs erfolgten Düngergaben gedüngt wurden. Weitere VV mit nennenswerter N-Zuführung durch das Rezyklat sind 7, 8 und 10 (mit jeweils aber lediglich 5, 3 und 5% des insgesamt gedüngten N). Die Varianten, die im Ergebnis um oder über der TSP-Kontrolle lagen, sind also auch diejenigen, die eine gewisse N-Menge durch das Rezyklat mitgebracht haben, wenn diese mit Ausnahme des Struvites VV3 auch niedrig lagen. Eine Ausnahme stellt VV4 (Doppelsuperphosphat) dar, welches sogar die geringsten N-Mengen mitbrachte, aber Erträge vergleichbar zu TSP erbrachte.

Gegen einen signifikanten Einfluss spricht weiterhin, dass die N-Konzentrationen im Aufwuchsmaterial des ersten Schnittes gegenüber der TSP-Variante kaum abweichen. Die höheren Zuwächse bei den Varianten mit einem Gesamtmehrertrag gegenüber TSP bleiben auch über die weiteren Schnitte bestehen. Ein deutlicher Vorteil durch die mit dem Rezyklat mitgebrachten N-Mengen hätte sich aber ab der ersten Düngung stark vermindern oder erübrigen sollen.

Weiterhin sind die Unterschiede zwischen Aufwüchsen der beiden Struvite (VV3 und 10) nur sehr gering, obwohl sich die mitgebrachten N-Mengen um den Faktor zwei unterscheiden. Ein großer Einfluss, insbesondere auf die Erntemenge des ersten Schnittes hätte also hier zutage treten müssen.

Eine weitere Begründung für die Mehrerträge oberhalb der TSP-Variante könnte sein, dass der wasserlösliche Anteil P in Düngemitteln (wie TSP) nach Übergang in die Bodenlösung durch Sorption, Fällung und mikrobielle Aktivität einer Festlegung unterliegen kann. Dadurch wäre er in seiner Verfügbarkeit für die Pflanze reduziert. Wenig wasserlösliche P-Quellen haben – insofern Sie rasch nachgeliefert und durch die Pflanzen genutzt werden können – den Vorteil, dass keine Festlegung des P im Boden nach Übergang in die Bodenlösung stattfindet. Die tatsächliche Verfügbarkeit kann somit höher liegen und Erträge oberhalb der (wasserlöslichen) Positivkontrolle mit TSP erklären (Goldbach 2019 und Prof. H.E.Goldbach, pers. Mitteilung). Ähnliche Erfahrungen wurden mit dem verwendeten Substrat in vergleichbaren Versuchsansätzen gemacht.

### **3.3.2. Phosphoraufnahme und -konzentrationen im Aufwuchs**

Nach jeder Schnittnutzung und der Gewichtsermittlung wurden Variantenmischproben getrocknet und rückgewogen. Anschließend wurden diese Proben im Labor auf die Inhaltsstoffe analysiert. Anhand der Gesamtaufwuchsmenge und der Gesamt-P-Aufnahme einer jeden Variante, konnte eine durchschnittliche P-Konzentration im geernteten Pflanzenmaterial ermittelt werden (s. Abb. 4 und Abb. 11). Diese steht in direkter Relation zum Gesamt-TM-Ertrag, wie in Abb. 6 dargestellt. Die P-Konzentration liegt bei der schwachen Versuchsvariante (VV 9) und der ungedüngten Variante (VV 1) bei 0,07 bis 0,08 % in der Trockenmasse. Die TSP-Positivkontrolle und die Hohertragsvarianten (VV 3, 4, 8 und 10) weisen hingegen Anteile von über 0,14 % in der Trockenmasse auf.

In Abb. 4 wird neben den kumulierten TM-Erträgen die P-Aufnahme im Aufwuchs pro Schnittnutzung und kumuliert dargestellt. Ermittelt wurden die P-Aufnahmemengen anhand des Ertrages und der darin gemessenen P-Konzentrationen. Bei VV 9 konnten nur fünf Nutzungen

vorgenommen werden. Die VV 1 (Kontrolle ohne P-Düngung) wurde nur vier Mal beerntet. Die VV 3, 8 und 10 heben sich mit P-Entzügen von 87 bis 108 mg/Gefäß deutlich von den anderen Rezyklaten ab.

In aufsteigender Reihe sortiert unterscheidet sich die Reihenfolge der P-Aufnahme nur marginal von der Reihung der Gesamt-TM-Erträge (s. Abb. 4). Eine statistische Auswertung konnte für die P-Aufnahme nicht vorgenommen werden, da die Analytik in Variantenmischproben durchgeführt wurde und so keine Einzeldaten vorlagen. Es ist aber davon auszugehen, dass sich leichte Verschiebungen in der Gruppenzusammensetzung im Vergleich zu den TM-Erträgen ergeben würden. Die augenscheinlich aus Abb. 4 erkennbare Abweichung von einer linearen Korrelation zwischen TM-Ertrag und P-Aufnahme zeigt sich in der Gegenüberstellung dieser beiden Größen. In Abb. 6 wird der Zusammenhang zwischen P-Gehalt im Pflanzenmaterial und Gesamt-TM-Ertrag dargestellt. Es ist daraus ersichtlich, dass es sich nicht um einen linearen Zusammenhang handelt. Vielmehr erlaubt eine hohe P-Versorgung durch eine hohe Pflanzenverfügbarkeit des P im Rezyklat auch eine höhere Anreicherung von P (bzw. keinen Mangel) und dementsprechend höhere Konzentrationen in der Pflanze, ohne im gleichen Maße mit dem Massezuwachs zu steigen. Der Zusammenhang lässt sich im Bereich der Ergebnisse dieses Versuches gut durch eine Exponentialfunktion darstellen.

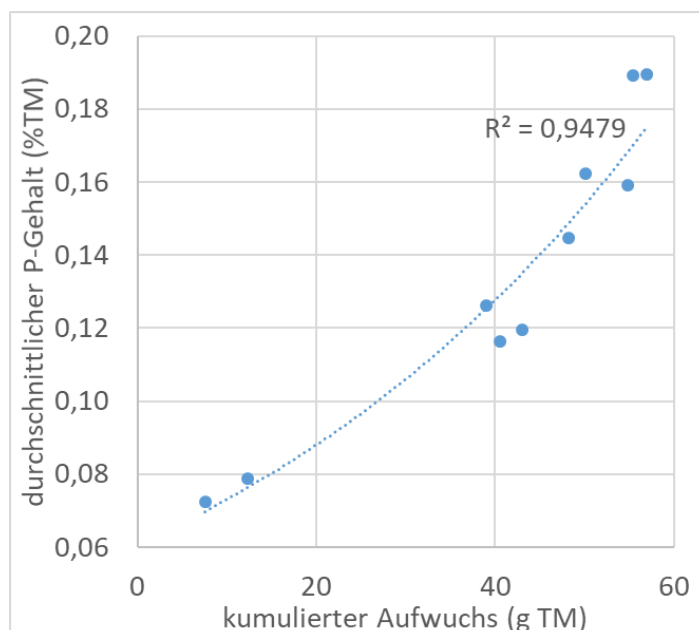


Abb. 6. Relation zwischen P-Gehalt des Aufwuchses und Ertragsleistung.

Ein standardisiertes Verfahren zur Bewertung von Phosphordüngemitteln im Rahmen der Durchführung von Gefäßversuchen zur Untersuchung der P-Verfügbarkeit von Recyclingdüngern wird z.B. von Wollmann et al. (2018) beschrieben. Dabei werden die

ungedüngte Variante sowie die Positivkontrolle mit einem wasserlöslichen Dünger herangezogen und eine P-Nutzungseffizienz (PNE) sowie eine relative P-Düngeeffizienz (RPD) berechnet:

$$\text{PNE (\%)} = \frac{\text{P\_Aufnahme (Rezyklatdüngung)} - \text{P\_Aufnahme (ungedüngte Kontrolle)}}{\text{applizierte Menge P}}$$

$$\text{RPD (\%)} = \frac{\text{PNE (Rezyklat)}}{\text{PNE (wasserlöslicher P Dünger (TSP))}}$$

Für die Berechnung der Parameter wurde nur das im oberirdisch geernteten Schnittgut enthaltene P berücksichtigt. In der Abb. 7 werden die beiden Parameter dargestellt. Beide Parameter korrelieren entsprechend der Berechnungsformeln und die RPD stellt die PNE in Relation zur Positivkontrolle TSP dar. Die PNE des TSP lag bei ca. 20 %, die maximale PNE bei ca. 31 % (VV8). Dies zeigt, dass die vorhandene P-Menge vermutlich bei weitem nicht erschöpft war und der Versuch gegen Ende nicht durch P-Mangel restringiert wurde. Da die PNE sich nach der Aufnahme des P und nicht nach dem Trockenmasseertrag richtet und da die Konzentrationen in der Trockenmasse mit höheren Erträgen anstiegen, ergibt sich bei der Betrachtung des abgeleiteten Parameters RPD eine deutlich größere Differenzierung der Varianten als bei der Betrachtung des TM-Ertrages. Relativ zur TSP-Variante wurden bis zu 160 % der RPD erreicht. Die relative P-Düngeeffizienz in der ertragsstärksten Variante VV8 lag also beim 1,6-fachen der TSP-Positivkontrolle.

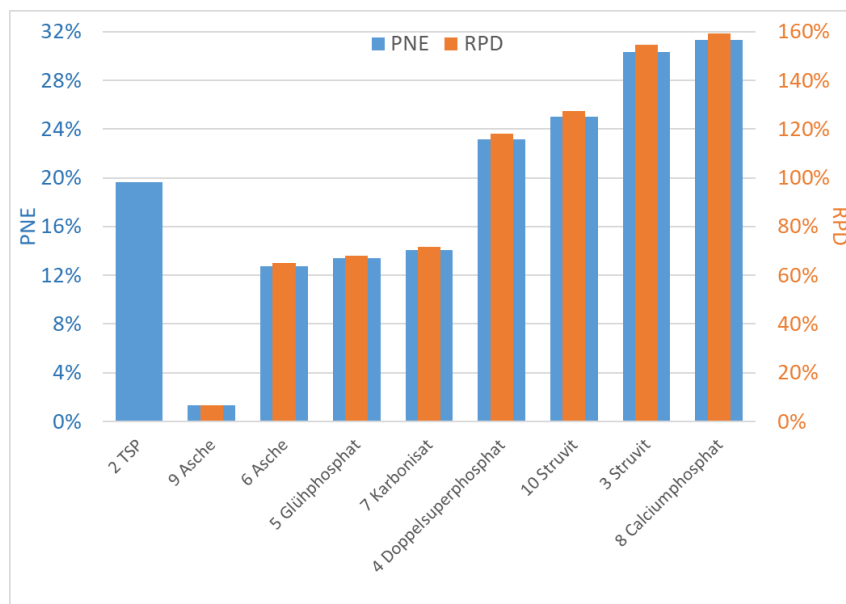


Abb. 7. P-Nutzungseffizienz (PNE) und relative P-Düngeeffizienz (RPD).

Die Abb. 7 macht aber auch deutlich, dass das wasserlösliche TSP (VV 2 Kontrolle) eine Wiederfindungsrate im Erntegut (PNE) von ca. 20 % aufweist und damit ein Großteil der gedüngten Menge (abzüglich des in der im Gefäß befindlichen Pflanzenmasse gebundenen P) noch ungenutzt im Gefäß vorliegt.

In Relation zur TSP-Variante ergibt sich bei Betrachtung der RPD-Werte eine ähnliche Gruppierung und Reihenfolge der Varianten wie bei den Trockenmasseerträgen (Abb. 4). Die Unterschiede sind aber deutlicher. Die VV 3, 4, 8 und 10 erzielten mit 154, 118, 159 und 116% RPD P-Aufnahmen tw. sehr deutlich oberhalb der TSP-Variante. Die VV 5-7 liegen zwischen 65 und 72% und damit deutlicher unter der TSP-Variante. Im unteren Bereich liegt die VV 9 mit unter 2 % PNE und entsprechend niedrigen RPD sehr niedrig. Hinsichtlich der Ausbeute des gedüngten P ist das als ungenügend zu bezeichnen und es stellt sich die Frage, inwiefern P überhaupt in nennenswertem Umfang aus letztgenanntem Rezyklat zum Pflanzenwachstum bereitgestellt wurde. Um einen sinnvollen Düngungseffekt mit einer hohen Verwertung des aufwändig dem Klärprozess entzogenen Rezyklat-P zu erzielen, sollten die PNE bzw. RPD eines Rezyklatdüngers möglichst nah an TSP heranreichen.

### 3.3.3. Relation zwischen P-Analytik im Rezyklat und Ertrag

Zurückgreifend auf die Eigenschaften der Rezyklate und das Ziel analytisch Aussagen zur P-Verfügbarkeit zu treffen, sind im Folgenden die Zusammenhänge und damit die Prognosekraft der verschiedenen untersuchten Löslichkeiten dargestellt.

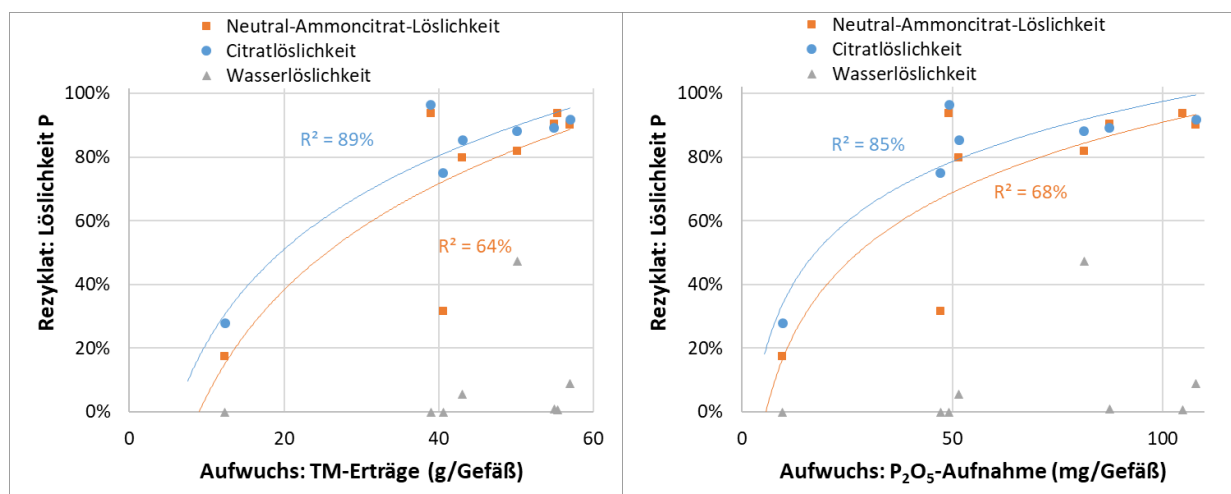


Abb. 8. Zusammenhang zwischen zugeführter Menge an löslichem P und dem TM-Ertrag bzw. der P-Aufnahme.

Wie aus Abb. 8 hervorgeht, stehen die citratlöslichen P-Mengen mit Ertrag und tatsächlicher P-Aufnahme in erkennbarer Beziehung. Dies zeigt sich auch bei den Varianten mit geringem Aufwuchs. Ähnliches gilt für die neutral-ammoncitrat-lösliche P-Fraktion. Hier fällt nur eine Probe (VV6) aus dem ansonsten offensichtlichen Zusammenhang.

Keine Aussagekraft in Hinsicht auf die Aufwuchsmengen hat hingegen die Analyse des wasserlöslichen Anteils des Gesamtphosphates. In Abb. 8 dargestellt ergibt sich kein erkennbarer Zusammenhang. Diese eignet sich also nicht für eine Abschätzung der Düngewirksamkeit der eingesetzten Rezyklate.

Die schwierig darzustellende Beziehung zwischen einer Extraktionsmethode und der Wirksamkeit im Pflanzenversuch bei unterschiedlichsten P-Quellen (hier Rezyklaten), die bekannt und beschrieben ist (s. Übersichtsartikel Kratz und Schnug 2009), bestätigt sich in diesem Versuch: Eine exakte Prognose der Düngewirksamkeit anhand der Löslichkeiten ist nicht möglich und kann nur im Pflanzenversuch ermittelt werden.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die gefundenen Beziehungen nicht linear sind. Dies ist aber insbesondere daher relevant, da relativ hohe Löslichkeiten noch nicht zu den entsprechend hohen Erträgen / P-Aufnahmen führen. Diese werden erst bei sehr hohen Löslichkeiten erreicht. Über einen weiten Bereich von 80-100% Löslichkeit gibt es eine sehr weite Spanne an TM-Erträgen (40-60g/Gefäß) bzw. P-Aufnahmen (ca. 50-110 mg/Gefäß). Für die monetäre Bewertung und die Berechnung der Einsatzmengen als Düngemittel erscheinen die Ergebnisse der Löslichkeitsanalytik daher nur bedingt verwendbar.

Ähnliche Beziehungen zwischen Aufwuchsergebnis und verschiedenen P-Löslichkeiten unterschiedlich aufbereiteter Klärschlammaschen beschreibt auch Schick 2009. Hier wird allerdings von linearen Beziehungen berichtet. Im vorliegenden Versuch erschienen die Beziehungen hingegen nicht linear. Allerdings fanden die Untersuchungen von Schick in Boden mit einem gewissen, wenn auch niedrigen P-Gehalt statt. Die Limitierung bei schlecht versorgenden Produkten muss daher geringer gewesen sein, als im vorliegenden Versuch. Dies wird in der Betrachtung eines anderen (engeren) Bereiches der (Unter-)Versorgung resultiert haben, in welchem die Beziehungen zwischen Löslichkeit und Wirksamkeit eben linear darstellbar sind.

Eine weitere Frage in Hinsicht auf die Bereitstellung von P ist die nach der Dynamik und damit verbunden inwiefern Rezyklate auch eine längerfristige Bereitstellung von P erlauben. Um zu ergründen, inwiefern sich die Bereitstellung von P im Verlauf der Vegetationsperiode veränderte, wurde die Prognosefähigkeit der Erträge zu frühen Schnittzeitpunkten auf den Gesamtertrag geprüft. Geht man davon aus, dass sich die Fähigkeit pflanzenverfügbares P bereitzustellen über die Vegetationsperiode hinaus nicht ändert, dann sollte es möglich sein

durch den bereits nach wenigen Schnitten erreichten Ertrag auf den Gesamtertrag zu schließen. Würde die P-Bereitstellung eines Rezyklates im Verlauf der Vegetationsperiode steigen oder abfallen, dann müsste es bei der Gegenüberstellung von kumuliertem Ertrag bis zu einem frühen Schnitt und dem Gesamtertrag auffallen. Je näher der Schnitt am Vegetationsende liegt, desto besser wird logischerweise diese Korrelation.

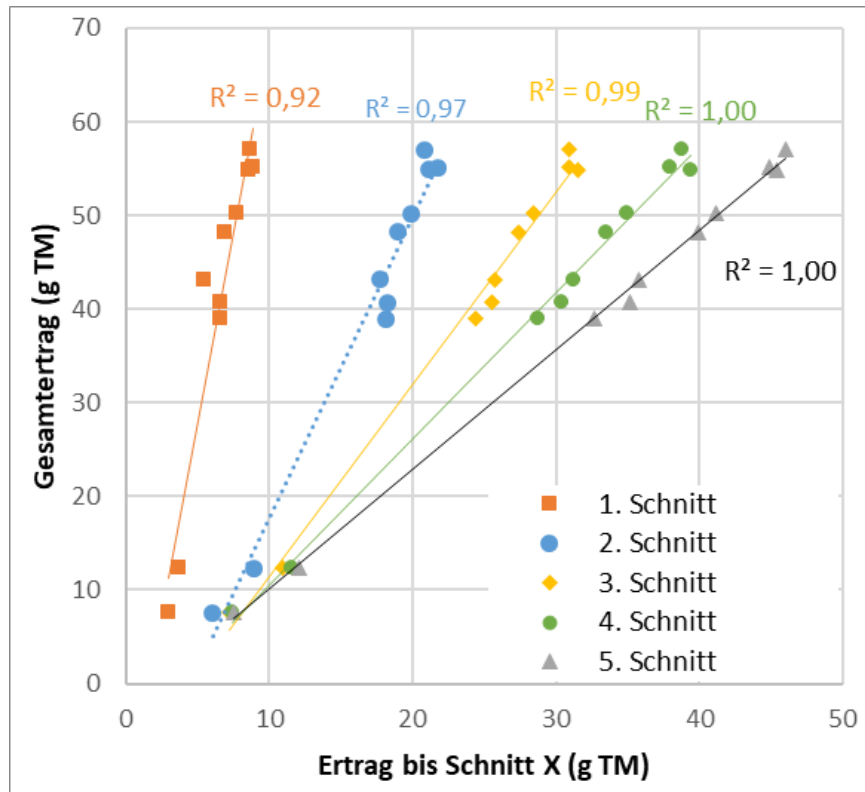


Abb. 9. Korrelation und damit Prognosestärke der kumulierten Erträge zu den einzelnen Schnittzeitpunkten auf den Gesamtertrag.

In Abb. 9 sind diese Beziehungen dargestellt. Bereits zum 4. Schnitt (von 7) beträgt das Bestimmtheitsmaß 1,00 oder 100%; die Prognosefähigkeit der kumulierten Erträge des 4. Schnittes auf das Gesamtergebnis ist also hier sehr hoch. Zum ersten Schnitt hingegen gibt es noch uneinheitliche Beziehungen, die sich durch die Abweichung einzelner Substrate vom Trend der übrigen Rezyklate zeigen. Für die meisten Rezyklate scheint zwar die Prognosefähigkeit bereits hier sehr hoch zu sein, für das Rezyklat VV 7 bei einem Gesamtertrag von 43,1g trifft dies aber nicht zu, es liegt erst bei späteren Schnitten auf dem Trend. Der Ertrag des ersten Schnittes lag also unterhalb des Trends und es könnte daher darauf geschlossen werden, dass die Verfügbarkeit des P zu Beginn des Versuches schlechter war und im weiteren Verlauf anstieg. Dies lässt sich auch aus dem zeitlichen Verlauf in Abb. 3 und besser noch aus



Abb. 5 ersehen. Das Karbonisat VV 7 liegt zunächst unterhalb der VV 5 und 6 und übersteigt diese dann im Ertrag kurz nach dem 2. Schnitt.

Der Effekt, dass sich die Dynamik der P-Bereitstellung im Laufe der Zeit ändert scheint also möglicherweise für z.B. diese VV gegeben zu sein. Andererseits ist dieser aber eher schwach und nur zu Versuchsbeginn ersichtlich. Insgesamt zeigt sich ja eine sehr gute Prognosefähigkeit hin auf den Gesamtertrag bereits ab dem ersten Schnitt. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Rezyklate einen gewissen Anteil am Gesamt-P zur Verfügung stellen können und dieser Anteil bereits früh festgelegt ist, im Laufe der Vegetation durch die Pflanze erschlossen werden muss und zunächst nicht-verfügbares P vermutlich auch nur in geringem Umfang kurzfristig in verfügbares P umgewandelt wurde. Auf dieser Hypothese basierend wären höchstens sehr langfristige P-Düngewirkungen durch die Rezyklate zu erwarten, die nur geringe Erträge und damit geringe P-Mengen im Versuchszeitraum bereitgestellt haben. Vor diesem Hintergrund sei aber auch nochmals auf die PNE in Abb. 7 hingewiesen, die aufzeigt, dass auch die ertragsstärksten Varianten maximal 31 % des zugeführten Gesamt-P im Versuchsverlauf in die geerntete Blattmasse aufgenommen haben (auch TSP lag nur bei ca. 20 %) und die Wirksamkeit der verbleibenden, nicht aufgenommenen P-Mengen über weitere Vegetationsperioden hinweg nicht innerhalb dieses einsaisonalen Versuches festgestellt werden konnte.

#### 4. Zusammenfassung

In einem Pflanzversuch wurden 8 verschiedene Rezyklate unterschiedlicher Herkünfte und zugrundeliegender Verfahrensweisen untersucht und dies laboranalytisch begleitet.

Im Ergebnis konnte gezeigt werden

1. welche Düngepotentiale die verwendeten Rezyklate hinsichtlich P in einem P-freien Substrat tatsächlich haben:

Ein Teil der Rezyklate zeigte eine sehr gute Düngewirkung. Es wurde jedoch eine breite Streuung von ca. 25-120 % des erreichten Ertrages bzw. ca. 15-160 % der P-Aufnahme, jeweils bezogen auf die TSP-Kontrolle, festgestellt. D.h. einige Rezyklate hoben sich dabei nur geringfügig von der Negativkontrolle ab und erscheinen nicht als Düngemittel einsetzbar, während andere sogar besser als die Positivkontrolle abschnitten.

Hinsichtlich der P-Düngewirkung bleiben die im Versuch eingesetzten Aschen und Karbonisate bezogen auf TSP deutlich zurück, während Fällungsprodukte (Struvite) sowie säureaufgeschlossenen Calcium- und Superphosphate gute bis sehr gute Ergebnisse erzielten.

2. welche Aussagekraft Analysen zur Charakterisierung der P-Löslichkeit der Rezyklate hinsichtlich des tatsächlichen Düngepotentials haben:

Die Wasserlöslichkeit des Phosphates im Rezyklat erlaubte keine Prognose der Düngewirksamkeit, ebensowenig der Gesamt-P-Gehalt aus dem Königswasseraufschluss.

Der neutral-ammoncitrat-lösliche Anteil erlaubte eine gewisse Abschätzung der P-Düngewirksamkeit, mit der Einschränkung einer nicht unerheblichen Streuung, auch im oberen Bereich der Löslichkeiten. Die nicht DüMV-obligate Analyse der Citratlöslichkeit erlaubte eine ähnliche Abschätzung der Düngewirkung, aber ebenfalls mit Einschränkungen.

In beiden Fällen sind die Zusammenhänge zwischen Aufwuchs und Extrahierbarkeit nicht linear gewesen und eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichsten Rezyklate mittels der gleichen Extraktionsmethode erscheint hinsichtlich einer Tendenz gut möglich. Für eine präzise Bewertung/Düngung erscheint dies aber nicht ausreichend.

## 5. Quellen

- DüMV Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist.
- Goldbach, H.E., Eichert, T., Heck, C. Wovon hängt die Pflanzenverfügbarkeit von Recyclingphosphaten ab? VDLUFA Konferenz, Gießen, 2019.
- Kratz, S., Schnug, E.: Zur Frage der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor in Düngemitteln. Journal für Kulturpflanzen, 61 (1). S. 2–8, 2009.
- LAGA Ad-hoc-AG: Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung. Abschlussbericht Juni 2015. [https://www.laga-online.de/documents/2015-07\\_1503989850.pdf](https://www.laga-online.de/documents/2015-07_1503989850.pdf)
- Römer, W., Steingrobe, B.: Review: Fertilizer effect of phosphorous recycling products. Sustainability, 10(4), S. 1166. 2018
- Schick, Judith: Dissertation Fakultät für Lebenswissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig: Untersuchungen zu P-Düngewirkung und schwermetallgehalten thermochemisch behandelter Klärschlammaschen. 2009
- Severin, Breuer, Rex, Stemann, Adam, Van den Weghe und Kücke: Phosphate fertilizer value of heat treated sewage sludge ash. Plant Soil Environ. Vol. 60, 2014, No. 12: 555–561
- Uni Göttingen. BMBF/BMU Förderinitiative, "Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor" Endbericht FKZ 02WA0786: Phosphorrecycling – Charakterisierung der Düngewirkung recyclierter Phosphatdünger in Feld- und Gefäßversuchen, Wissenschaftlicher Abschlussbericht, Univ. Göttingen, Dep. f. Nutzpflanzenwissenschaften Abt. Pflanzenernährung. <https://edocs.tib.eu/files/e01fb11/659467852.pdf>
- Wollmann, I., Müller, T., Breuer, J., Möller, K.: Standardisiertes Verfahren zur Bewertung des Phosphordüngewertes von Recyclingdüngemitteln. Im Auftrag des Min.f. Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. 2018.

## 6. Anhang

### 6.1. Zusätzliche Tabellen und Abbildungen

Tab. 5. Zusammensetzung des Versuchsbodens.

	<b>Gehalt</b>	<b>Einheit</b>	<b>Extraktion/Methode</b>
<b>pH-Wert</b>	8,1		-
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	4	mg/100g	CAL
<b>K<sub>2</sub>O</b>	84	mg/100g	CAL
<b>Mg</b>	65	mg/100g	CaCl <sub>2</sub>
<b>B (CAT)</b>	0,914	mg/kg	CaCl <sub>2</sub> /DTPA
<b>Cu (CAT)</b>	6,42	mg/kg	CaCl <sub>2</sub> /DTPA
<b>Fe (CAT)</b>	14,8	mg/kg	CaCl <sub>2</sub> /DTPA
<b>Mn (CAT)</b>	10,1	mg/kg	CaCl <sub>2</sub> /DTPA
<b>Zn (CAT)</b>	1,41	mg/kg	CaCl <sub>2</sub> /DTPA
<b>Al</b>	16857	mg/kg	Königswasser
<b>Fe</b>	12014	mg/kg	Königswasser
<b>K</b>	5119	mg/kg	Königswasser
<b>Mg</b>	18936	mg/kg	Königswasser
<b>P</b>	555	mg/kg	Königswasser
<b>S</b>	373	mg/kg	Königswasser
<b>Pb</b>	3,0	mg/kg	Königswasser
<b>Cd</b>	0,0544	mg/kg	Königswasser
<b>Cu</b>	39,9	mg/kg	Königswasser
<b>Cr</b>	26,4	mg/kg	Königswasser
<b>Ni</b>	20,4	mg/kg	Königswasser
<b>Hg</b>	0,0226	mg/kg	Königswasser
<b>Zn</b>	27,6	mg/kg	Königswasser
<b>Nges % [VA]</b>	0,030	%	Verbrennung
<b>Humus %</b>	0,034	%	Verbrennung
<b>Corg % [VA]</b>	0,030	%	Verbrennung
<b>Ton &lt;0,002 mm</b>	14,2	%	Sedimentation
<b>Schluff 0,002-0,063 mm</b>	8,9	%	Sedimentation
<b>Sand 0,63-2,00 mm</b>	76,9	%	Siebung

s.a. Prüfbericht zu Probe 21/BO/9200 in Anhang 6.4.2

Tab. 6. Zusammensetzung des Pflanzenmaterials. Durchschnittskonzentration über alle Schnitte. Konzentrationsangabe in mg/kg getrockneten Pflanzenmaterials.

	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Tl</b>	<b>Zn</b>
<b>VV</b>	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
<b>1</b>	911	0,37	0,24	4,8	30	789	499	4,3	0,55	0,035	70
<b>2</b>	231	0,31	0,11	5,8	20	227	218	3,7	0,25	0,023	38
<b>3</b>	244	0,46	0,08	6,9	19	228	229	4,1	0,26	0,018	43
<b>4</b>	170	0,37	0,06	6,2	18	197	227	4,1	0,23	0,022	52
<b>5</b>	318	0,34	0,12	7,8	20	256	293	5,1	0,25	0,024	67
<b>6</b>	289	0,38	0,12	7,6	20	248	250	4,6	0,24	0,023	74
<b>7</b>	267	0,32	0,08	6,2	17	242	222	4,0	0,24	0,019	68
<b>8</b>	121	0,50	0,06	5,4	19	153	237	3,8	0,21	0,018	62
<b>9</b>	269	0,37	0,27	4,5	27	354	558	4,8	0,32	0,031	114
<b>10</b>	181	0,29	0,08	6,6	21	201	273	4,5	0,22	0,021	50

Tab. 7. Zu den Versuchsgefäßen mit dem Rezyklat zudotierte Mengen.

Varianten:	TSP	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>g/Gefäß</b>	<b>1,63</b>	<b>2,61</b>	<b>1,77</b>	<b>3,97</b>	<b>5,91</b>	<b>5,07</b>	<b>4,97</b>	<b>7,43</b>	<b>2,8</b>
<b>mg/Gefäß</b>									
<b>As</b>	n.b.	0,00	0,05	0,03	0,07	0,02	0,01	0,05	0,00
<b>Cd</b>	n.b.	2E-04	4E-03	0E+00	9E-03	9E-04	1E-03	3E-04	0E+00
<b>Cr</b>	n.b.	3E-03	2E-01	3E-01	6E-01	4E-01	4E-02	4E-01	7E-03
<b>Ctot</b>	n.b.	39,2	8,0	0,0	50,8	1108	70,1	220,7	29,7
<b>Cu</b>	n.b.	0,0	1,1	2,3	3,3	3,0	0,0	3,5	0,0
<b>Hg</b>	n.b.	0	6E-04	0	3E-03	0	0	0	1E-04
<b>K</b>	n.b.	4,1	9,0	33,3	43,6	527,3	1,7	13,7	1,0
<b>K<sub>2</sub>O</b>	n.b.	5,0	10,8	40,1	52,5	633,8	2,1	16,6	1,2
<b>Mg</b>	n.b.	254,2	16,4	91,7	94,0	54,8	6,6	39,2	242,2
<b>MgO</b>	n.b.	422,8	27,1	152,1	156,0	90,2	11,0	65,0	400,4
<b>N (Gesamt)</b>	n.b.	127,9	1,8	4,0	5,9	65,9	39,8	7,4	72,8
<b>Ni</b>	n.b.	0,00	0,13	0,18	0,27	0,37	0,06	0,21	0,00
<b>Pb</b>	n.b.	4E-02	2E-01	3E-02	6E-01	4E-01	1E-02	2E-01	4E-03
<b>P</b>	327	326	327	328	327	328	328	326	328
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	750	749	750	750	751	750	750	750	750
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, citronensäurelöslich</b>	750*	688	662	724	562	640	689	208	670
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, neutr.-amm.cit.löslich</b>	750*	702	614	703	238	599	677	132	678
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, wasserlöslich</b>	n.b.	5,2	355,4	0,0	0,0	41,1	66,3	0,0	6,9
<b>S</b>	n.b.	11,5	14,5	10,8	51,9	54,2	8,4	190,2	1,3
<b>TI</b>	n.b.	0E+00	7E-04	0E+00	2E-03	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
<b>Zn</b>	n.b.	0,1	3,3	5,4	10,5	13,1	3,2	9,9	0,1
<b>Fe</b>	n.b.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0

\*=aus Produktdeklaration ermittelte Werte

Tab. 8. Signifikanz der Unterschiede der Trockenmasseerträge zu den Schnittterminen und insgesamt im Vergleich zur „TSP“-Variante.

Versuchsvarianten		1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt	4. Schnitt	5. Schnitt	6. Schnitt	7. Schnitt	Gesamt
1	Kontrolle	---	---	---	---	---	---	---	---
3	Struvit/MSE	+++						++	++
4	Doppelsuperph./Infaserv								
5	Glühphosphat/Rhenania Phosphat/Sepura			---	--	---		--	---
6	Klärschlammasche/Sepura					-	---	---	--
7	Klärschl.karbonisat/Pyreg	---				--			
8	Calciumphosphat/Terra Nova Energy	+++		++	+++		++	+++	+++
9	Asche/KopfSyngas GmbH	---	---	---	---	---	---	---	---
10	Struvit/CNP Cycles GmbH	+++		+++	+++				++

Dunnett-Test, 90 %-, 95 %- und 99 %-Konfidenzintervall

--- = 99 % niedriger; -- = 95 % niedriger; - = 90 % niedriger

+++ = 99 % höher; ++ = 95 % höher; + = 90 % höher

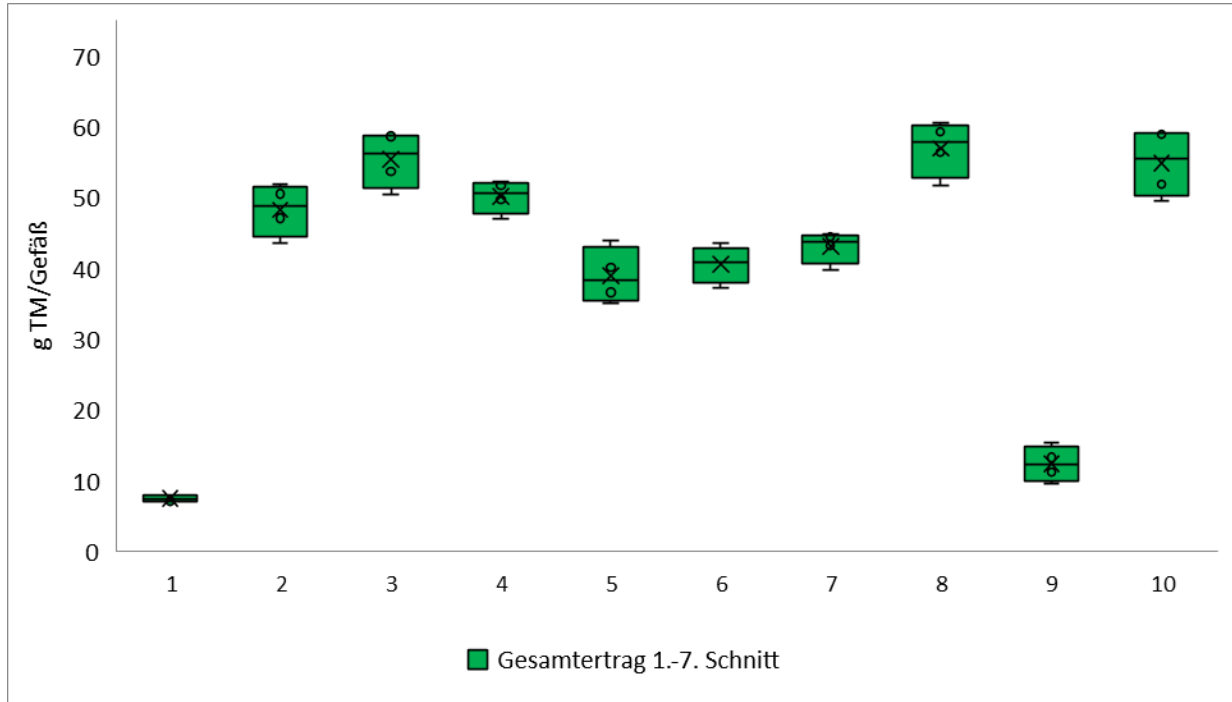


Abb. 10. Ertragsspannen der Trockenmasseproduktion (g/Gefäß) über den gesamten Versuchszeitraum von 154 Tagen.

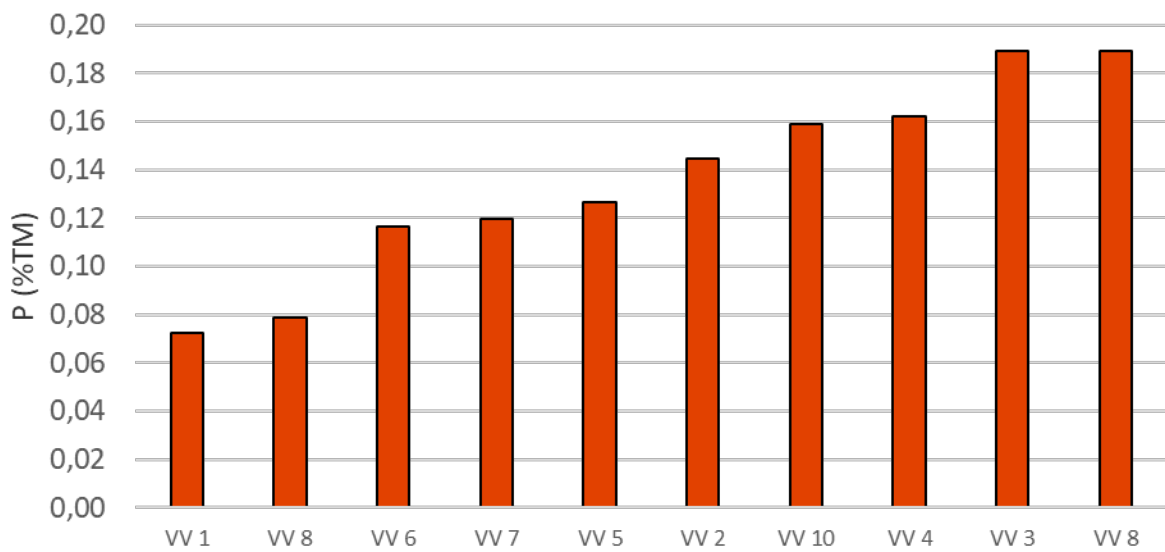


Abb. 11. Mittlere rückgerechnete Phosphorkonzentration (% TM) des Aufwuchses (1. - 7. Schnitt).



## 6.2. Fotodokumentation der Aufwüchse jeweils vor der Nutzung

1 Kontrolle

2 TSP

3

4

5

6

7

8

9

10



31.05.2021



17.06.2021



12.07.2021



30.07.2021



19.08.2021

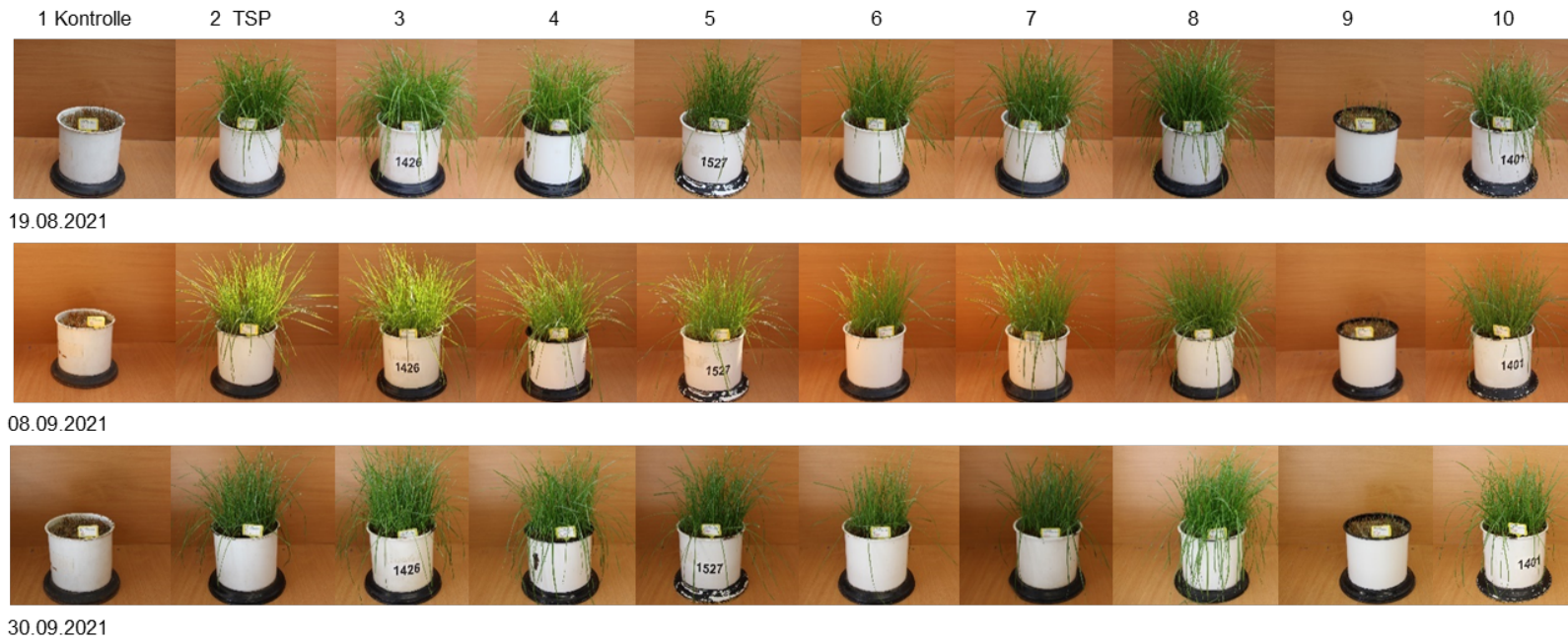


Abb. 12. Fotodokumentation der Aufwüchse jeweils vor der Nutzung.

### 6.3. Beschreibung der verwendeten Rezyklate

VV	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Firma/ Anlage</b>	MSE Mobile Schlammentwässerungs GmbH	Infraserv GmbH & Co. Höchst KG	sePura GmbH	sePura GmbH	PYREG GmbH	TerraNova Energy GmbH	Kopf SynGas GmbH & Co. KG	NIERSVERBAND Kläranlage Mönchengladbach-Neuwerk in Kooperation mit CNP CYCLES GmbH
<b>Produktname / Versuchsname</b>	MSE-Struvit	P38	Rhenianaphosphat	Bio-P	PyregPhos			Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP), Kläranlage Mönchengladbach-Neuwerk
<b>Ausgangsmaterial</b>	Faulschlamm	Klärschlammverbrennungsasche	Klärschlammasche, KSPA der Fa. Emter, Altenstadt	Klärschlamm, überwiegend aus Bio-P-gefälltem Klärschlamm; KSPA des Klärwerkes Steinhäule; Neu-Ulm	Klärschlamm des Abwasserzweckverbandes Linz-Unkel am Rhein	entwässerter Klärschlamm 25% TS nach Eisenfällung	Klärschlamm (90% TS)	Faulschlamm
<b>Einsatzchemikalien</b>	MgO, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaOH, Zitronensäure	Phosphorsäure	Natriumhydrogencarbonat	Nicht zutreffend	4% Kaliumacetat als Additiv zugemischt vor der Karbonisierung	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HNO <sub>3</sub> , CSH (zugelassen nach D-DüMV 1.2.9 Tabelle 6.2.4)	Kalkstein	MgCl <sub>2</sub>
<b>Art des Verfahrens</b>	Stuttgarter Verfahren saures Leaching mit	Säureaufschluss mit	Calcinierung bei ca. 900 °C. Schlecht pflanzenverfügbar	Verbrennung	Karbonisierung im PYREG-Verfahren bei 600°C	Klärschlammaufschluß Hydrolyse/Hydrothermale	Vergasung mit Nachoxidation	AirPrex Fällung /Kristallisation aus Faulschlamm

	anschließender Fällung von Struvit	anschließender Granulierung	es Tricalciumphosphat (Whitlockit) wird hierbei in gut pflanzenverfügbares Calciumnatriumphosphat umgewandelt. Die Phosphatlöslichkeit in neutralem Ammonicitrat steigt von ca. 35 % auf über 80 % an.			Karbonisierung, Rücklösung des Phosphors aus hydrolysiertem Schlamm mittels Säurezugabe, Abtrennung Feststoff, Adsorption/Kristallisation des Phosphors aus Filtrat mittels CSH (ähnlich P-Roc Verfahren).		
<b>Reaktortyp</b>	Rundreaktor; mech. Rührwerk	Wirbelschicht-Reaktor	Drehrohrofen	Wirbelschichtfeuerung	PYREG Doppelschnecken Reaktor	Adsorptions-/Kristallisationsreaktor gerührt	Wirbelschicht-Vergaser	Belüfteter Reaktor
<b>Produkt</b>	Struvit $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Doppelsuperphosphat	Glühphosphat, Rhenaniaphosphat	Klärschlammasche	Klärschlammkarbonisat	Ca-Phosphat (zugelassen nach D-DüMV 1.2.9 Tabelle 6.2.4)	Asche	Struvit
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Gehalt in der Produkt-Trockenmasse</b>	0,2653	0,4	20 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mineralsäurelöslich; 17 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> in neutralem Ammoniumcitrat löslich	18 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . mineralsäurelösliches Phosphat, 9 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> in neutralem Ammoniumcitrat lösliches	0,14	>16%	0,1	0,426
<b>Umsatz im Reaktor</b>	> 70%		Umsatz 100 %	Umsatz 100 %		60-70%	Aus Klärschlamm: 24% TS	>90%

<b>P-Rückgewinnungsrate</b>	Klärschlamm >65%	100%	ca. 99 % (geringe Anteile an Filteraschen werden separat entsorgt)	P-Rückgewinnungsrate ca. 99 % (geringe Anteile an Filteraschen werden separat entsorgt)	100 %		Aus Asche: 100 % TS	<10% (Rückgewinnung kann durch Modifizierung der Anlage erhöht werden)
<b>physikalische Feinheit des Produktes</b>	Partikelgröße ca. 130 µm; Granulat 3-6 mm	2-6 mm Granulat	90 % < 0,63 mm, 75 % < 0,16 mm	90 % < 0,63 mm, 75 % < 0,16 mm	gemahlen mindestens 98 % Siebdurchgang bei 0,630 mm lichter Maschenweite	<1mm		0,25-5mm

## 6.4. Beispielhafte Prüfberichte

### 6.4.1. Auszug Prüfbericht Rezyklate

#### Prüfbericht

Auftrags-Nr.: 216004889 Probeneingang 15.03.2021 Untersuchungsbeginn 15.03.2021  
Tgb.-Nr.: 21/DP/00035 Probennahme 22.02.2021 Untersuchungsende

Herkunft: Privateinsender

Probennehmer: Auftraggeber

#### Prüfergebnisse

Parameter	Ergebnisse	Einheiten	Fußnote
Ctot	1,50	%	6
Kalium (K)	0,16	%	1
Kaliumoxid (K <sub>2</sub> O)	0,19	%	1
Magnesiumoxid (MgO)	16,2	%	1
Gesamtstickstoff (N)	4,90	%	2
P <sub>205</sub> (wasserlöslich)	0,20	%	3
P <sub>205</sub> (citronensäurelöslich)	26,4	%	3
Phosphat (P <sub>205</sub> )	28,7	%	1
Phosphor (P)	12,5	%	1
P <sub>205</sub> (neutral-ammoniumlöslich)	26,9	%	3
Eisen (Fe)	2,83	%	1
Aluminium (Al)	< 0,20	%	1
Arsen	0,62	mg/kg	4
Blei	15,2	mg/kg	4
Chrom	1,24	mg/kg	4
Cadmium	0,09	mg/kg	4
Kupfer	5,41	mg/kg	4
Quecksilber (Hg)	< 0,0100	mg/kg	5
Nickel (Ni)	< 3,00	mg/kg	1
Thalium	<0,0250	mg/kg	4
Zink (Zn)	36,5	mg/kg	1
Uran	< 0,0500	mg/kg	4
Schwefel (S)	0,44	%	1

Prüfmethoden

<b>Fußnote</b>	<b>Methode</b>	<b>Beschreibung</b>
1	M.4.3.3.0502.08 2019-07	Bestimmung von Elementen in verschiedenen Matrizen mittels ICP
2	VDLUFA Band II.1, 3.5.2.7 1995	Bestimmung von gesamt-Stickstoff, Verbrennungsmethode
3	DIN EN 15959 2012-02	Bestimmung von Phosphor in den Extrakten
4	M.4.3.3.0601.08 2019-03	Bestimmung von Elementen in verschiedenen Matrizen mittels ICP-MS
5	M.4.3.3.0404.07 2019-04	Bestimmung von Quecksilber in verschiedenen Matrizes mittel CV-AAS
6	DIN EN 15936 2012-11	Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung (Modifikation: ausschließlich Bestimmung von Gesamtkohlenstoff nach Methode A)
6	VDLUFA Band I, A 4.1.3.2 7. Teil 2016	Direkte Bestimmung von organischen Kohlenstoff durch Verbrennung bei 550 °C und Gasanalyse

## 6.4.2. Auszug Prüfbericht Substrat/Boden

### Prüfbericht

Auftrags-Nr.:	216021249	Probeneingang	12.10.2021	Untersuchungsbeginn	09.11.2021
Tgb.-Nr.:	21/BO/24296	Probennahme	11.10.2021	Untersuchungsende	11.01.2022

Herkunft:	Privateinsender
Probennehmer:	Auftraggeber
Probenbezeichnung:	P-Recycling
Schlagbezeichnung:	V1 G21-P-Recycl
Bodenartgruppe:	2
Nutzart:	Keine Auswertung

### Prüfergebnisse

Parameter	Ergebnisse	Einheiten	Fußnote
pH-Wert	8,2		1
Phosphor (P205)	3	mg/100g	2
Kalium (K2O)	147	mg/100g	2
Magnesium (Mg)	58	mg/100g	3
Bor (CAT)	0,96	mg/kg	6
Kupfer (CAT)	3,76	mg/kg	5
Eisen (CAT)	15,3	mg/kg	5
Mangan (CAT)	13,9	mg/kg	5
Zink (CAT)	1,20	mg/kg	6
Aluminium (Al)	16.300	mg/kg	5
Arsen	3.37	mg/kg	6
Eisen (Fe)	11.900	mg/kg	5
Kalium (K)	5.590	mg/kg	5
Magnesium (Mg)	18.200	mg/kg	5
Phosphor (P)	565	mg/kg	5
Schwefel (S)	449	mg/kg	5
Thallium	0,16	mg/kg	6
Blei	6,39	mg/kg	6
Cadmium	0,05	mg/kg	6
Kupfer (Cu)	30,0	mg/kg	5
Chrom (Cr)	25,4	mg/kg	5
Chrom	27,4	mg/kg	6



Nickel	21,3	mg/kg	6
Quecksilber (Hg)	0,02	mg/kg	4
Zink	28,4	mg/kg	6
P-Freisetzungsrate	< 50	µg/(kg*min)	7

### **Prüfmethoden**

<b>Fußnote</b>	<b>Methode</b>	<b>Beschreibung</b>
1	VDLUFA Band I, A.5.1.1 7. Teillfg. 2016	Bestimmung des pH-Wertes
2	VDLUFA Band I, A.6.1.1 6. Teillfg. 2012	Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat-Lactat-Auszug
3	VDLUFA Band I, A.6.2.4.1 1991	Bestimmung von pflanzenverfügbaren Magnesiums im Calciumchlorid-Auszug
4	M.4.3.3.0404.07 2019-04	Bestimmung von Quecksilber in verschiedenen Matrices mittel CV-AAS
5	DIN EN ISO 11885 2009-09	Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES)
6	M.4.3.3.0601.08 2019-03	Bestimmung von Elementen in verschiedenen Matrizen mittels ICP-MS
7	M.4.5.1.0059.01 2021-06 nicht akkreditiert	Bestimmung der Phosphorfreisetzungsrate (Pfr) in Ackerböden mittels Continuos-Flow-Analyser (CFA)

### 6.4.3. Auszug Prüfbericht Aufwuchs

#### Prüfbericht

Auftrags-Nr.:	216011093	Probeneingang	16.07.2021	Untersuchungsbeginn	21.07.2021
Tgb.-Nr.:	21/FU/01606	Probennahme	15.07.2021	Untersuchungsende	06.08.2021

Herkunft:	Privateinsender
Probennehmer:	Auftraggeber
Probenbezeichnung:	S 1.1
Material:	Pflanzenprobe
Schnitt-Nr.:	1/

#### Prüfergebnisse

Parameter	Erg. (TM)	Erg. (FM)	Einheiten	Konformität	Fußnote
Trockenmasse		18,0	%		3
Stickstoff (N)	4,85	0,873	%		1
Kalium (K)	3,32	0,598	%		2
Calcium (Ca)	0,295	0,053	%		2
Phosphor (P)	0,100	0,018	%		2
Magnesium (Mg)	0,303	0,055	%		2
Natrium (Na)	0,230	0,041	%		2
Schwefel (S)	0,344	0,062	%		2
Chlorid (Cl)	0,469	0,084	%		2
Kupfer (Cu)	26,0	4,68	mg/kg		2
Zink (Zn)	67,1	12,1	mg/kg		2
Eisen (Fe)	308	55,4	mg/kg		2
Mangan (Mn)	167	30,1	mg/kg		2
Arsen	0,238	0,043	mg/kg		4
Blei	0,261	0,047	mg/kg		4
Cadmium	0,085	0,015	mg/kg		4
Chrom	1,35	0,243	mg/kg		4
Quecksilber	< 0,0100	< 0,0100	mg/kg		5
Nickel	1,52	0,274	mg/kg		4
Thallium	< 0,0250	< 0,0250	mg/kg		4

Erg. (FM) = Werte sind auf analysierte Trockenmasse (18,0%) bezogen.

### **Prüfmethoden**

<b>Fußnote</b>	<b>Methode</b>	<b>Beschreibung</b>
1	DIN EN ISO 12099 2018-01	Anleitung für die Anwendung von Nahinfrarot-Spektrometrie
2	VDLUFA Band III, 10.8.3 6. Erg. 2006	Bestimmung von ausgewählten Elementen in Pflanzen und Grundfuttermitteln mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)
3	VDLUFA Band III, 3.1 1976	Bestimmung der Feuchtigkeit
4	M.4.3.3.0601.08 2019-03	Bestimmung von Elementen in verschiedenen Matrizen mittels ICP-MS
5	M.4.3.3.0404.07 2019-04	Bestimmung von Quecksilber in verschiedenen Matrices mittel CV-AAS

### **Bemerkungen**

Messbereiche für die Bestimmung von Mineralstoffen in Futtermittel % TM:

K 0,60-3,20; Ca 0,10-1,70; P 0,10-0,44; Mg 0,07-0,44; Na 0,02-0,26; S 0,05-0,30; Cl 0,10-0,90

Messbereiche für die Bestimmung von Mineralstoffen im mg/kg TM:

Cu 4,0-20; Zn 15-180; Mn 40-310; Fe 100-1300

Messwerte, die außerhalb der angegebenen Messbereiche liegen, weisen eine größere Messunsicherheit auf.