



# Wirksamkeit von verschiedenen P-Rezyklaten im Pflanzenversuch

Fabian Jacobi<sup>1</sup>,  
Dierk Koch<sup>2</sup>, Carmen Schumann<sup>2</sup>

Eine Untersuchung der Landesbetriebe

Hessisches Landeslabor<sup>1</sup> und Landwirtschaft Hessen<sup>2</sup>

i.A. des Hess. Min. f. Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

# Fragestellung

*Wieviel von dem in P-Rezyklaten aus dem Kläranlagenprozess vorhandenen Phosphor kann von Pflanzen im Sinne eines Düngers verwertet werden?*

Ansatz:

Bestimmung der P-Verfügbarkeit und P-Effizienz von P-Rezyklaten aus unterschiedlichen Herkünften und Verfahrensweisen anhand eines Gefäßversuches mit der Kultur Weidelgras auf einem P-armen Substrat.

# P-Rezyklatgewinnung

Abwasser & Prozesswässer	Klärschlamm	Klärschlammasche
<p><b>Kristallisation / Fällung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Phostrip</li> <li>▪ DHV-Crystalactor®</li> <li>▪ Ostara PEARL®</li> <li>▪ Unikata Phosnix®</li> <li>▪ Nishihara</li> <li>▪ Kurita Festbettreaktor</li> <li>▪ Ebara</li> <li>▪ MAP Kristallisation Treviso</li> <li>▪ CSIR Wirbelschichtreaktor</li> <li>▪ REPHOS®</li> <li>▪ P-RoC</li> <li>▪ PRISA-Verfahren</li> <li>▪ Sydney Waterboard Reaktor</li> </ul>	<p><b>Kristallisation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ AirPrex MAP-Verfahren</li> <li>▪ PECO-Verfahren (biol.)</li> <li>▪ FIXPhos</li> <li>▪ ReAlPhos</li> </ul>	<p><b>Nasschemischer Aufschluss</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PASCH</li> <li>▪ Leachphos</li> <li>▪ SEPHOS</li> <li>▪ SESAL-Phos</li> <li>▪ BioCon</li> <li>▪ Eberhard-Verfahren</li> <li>▪ RecoPhos (Jävenitz)</li> <li>▪ TetraPhos</li> </ul>
<p><b>Ionenaustausch</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ REM NUT®</li> <li>▪ PHOSIEDI</li> </ul>	<p><b>Säureaufschluss</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stuttgarter Verfahren</li> <li>▪ Seaborne-Verfahren</li> <li>▪ Kemira KEMICOND®</li> <li>▪ Budenheim</li> </ul>	<p><b>Thermischer Aufschluss</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ash Dec</li> <li>▪ Mephrec</li> <li>▪ ATZ-Eisenbadreaktor</li> <li>▪ RecoPhos (Leoben)</li> <li>▪ Thermphos</li> <li>▪ ReAlPhos</li> </ul>
<p><b>Sonder- und Kombiverfahren</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ RECYPHOS</li> <li>▪ Magnetseparator</li> </ul>	<p><b>Hydrothormaler Aufschluss</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PHOXNAN LOPROX</li> <li>▪ Kemira KREPRO®</li> <li>▪ Aqua Reci</li> <li>▪ Cambi-Prozess</li> </ul>	<p><b>Elektrokinese</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ EPHOS</li> </ul>
	<p><b>Thermischer Aufschluss</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mephrec</li> <li>▪ ATZ-Eisenbadreaktor</li> <li>▪ Kubota</li> <li>▪ Thermphos</li> </ul>	<p><b>Bioleaching</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inocre</li> </ul>

Quelle: Franke, M., Mocker, M., Kozlik, M., Wiesgickl, S., Daschner, R., Löh, I., Jung, R. (2012): Phosphorstrategie für Bayern – Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen und Handlungsempfehlungen. Bericht des Fraunhofer UMSICHT für das Bayerische Staatsministerium. Sulzbach-Rosenberg.

# Herstellung Rezyklate

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

# Eingesetzte Rezyklate

3 MSE GmbH

4 Infracerv GmbH

5 Sepura GmbH

6 Sepura GmbH

*Struvit*

*Doppelsuperphosph.*

*Rhenianiphosphat*

*Klärschlammasche*



7 Pyreg GmbH

8 Terranova Energy GmbH

9 Kopf Syngas GmbH

10 CNP Cycles GmbH

*KS-Carbonisat*

*Ca-Phosphat*

*Klärschlammasche*

*Struvit*



Versuchs Variante	Ausgangsmaterial	Produkt	Firma, Verfahren
1	-	Kontrolle	-
2	-	TSP	-
3	Faulschlamm	Struvit	MSE GmbH Stuttgarter Verfahren
4	Klärschlammverbrennungasche	Doppelsuperphosphat	Infracerv GmbH Säureaufschluss mit anschließender Granulierung
5	Klärschlammasche	Doppelsuperphosphat	SePura GmbH: Calciniierung im Drehrohrofen (erweitertes Outotec-Verfahren)
6	Klärschlamm, überwiegend aus Bio-P-gefälltem Klärschlamm	Klärschlammasche	SePura GmbH Verbrennung im Wirbelschichtofen
7	Klärschlamm	Klärschlammkarbonisat	Pyreg GmbH Karbonisierung im Doppelschnecken Reaktor
8	Entwässerter Klärschlamm, 25% TS nach Eisenfällung	Calciumphosphat	TerraNova Energy GmbH Hydrolyse/Hydrothermale Karbonisierung im Adsorptions-/ Kristallisationsreaktor
9	Klärschlamm (90% TS)	Asche	Kopf SynGas GmbH Vergasung mit Nachoxidation im Wirbelschicht-Vergaser
10	Faulschlamm	Struvit	CNP Cycles GmbH AirPrex Fällung im belüfteten Reaktor

# Rezyklate Analytik

Parameter   VV Nr.	3	4	5	6	7****	8	9	10	Grenzwert / Mindestwert **** 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	-
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	-
Mg (%)	9,7	0,9	2,3	1,6	1,1	0,1	0,5	8,7	-
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 (%abs. / %P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	26,4 / 92	37,4 / 88	18,2 / 97	9,5 / 75	12,6 / 85	13,9 / 92	2,8 / 28	23,9 / 89	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> neutr.-ammon.löslich (%abs. / %P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	26,9 / 94	34,7 / 82	17,7 / 94	4,0 / 32	11,8 / 80	13,6 / 90	1,8 / 18	24,2 / 90	5% von P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (inkl. wasserl.)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wasserlösl. (%abs. / %P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,2 / <u>0,7</u>	20,1 / 47	0,0 / <u>0,0</u>	0,0 / <u>0,0</u>	0,8 / 5,5	1,3 / 8,8	0,0 / <u>0,0</u>	0,2 / <u>0,9</u>	2,5% von P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ausschl. mineralsreisl. (%abs. / %P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) *	2,1 / 6	7,3 / 18	1,3 / 6,3	9 / 68	3,2 / 20	1,4 / 9,8	8,2 / 83	2,8 / 9,6	2% von P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
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-Löslichkeiten relativ zu Gesamt-P

Extraktionen zur analytischen Abschätzung der Pflanzenverfügbarkeit

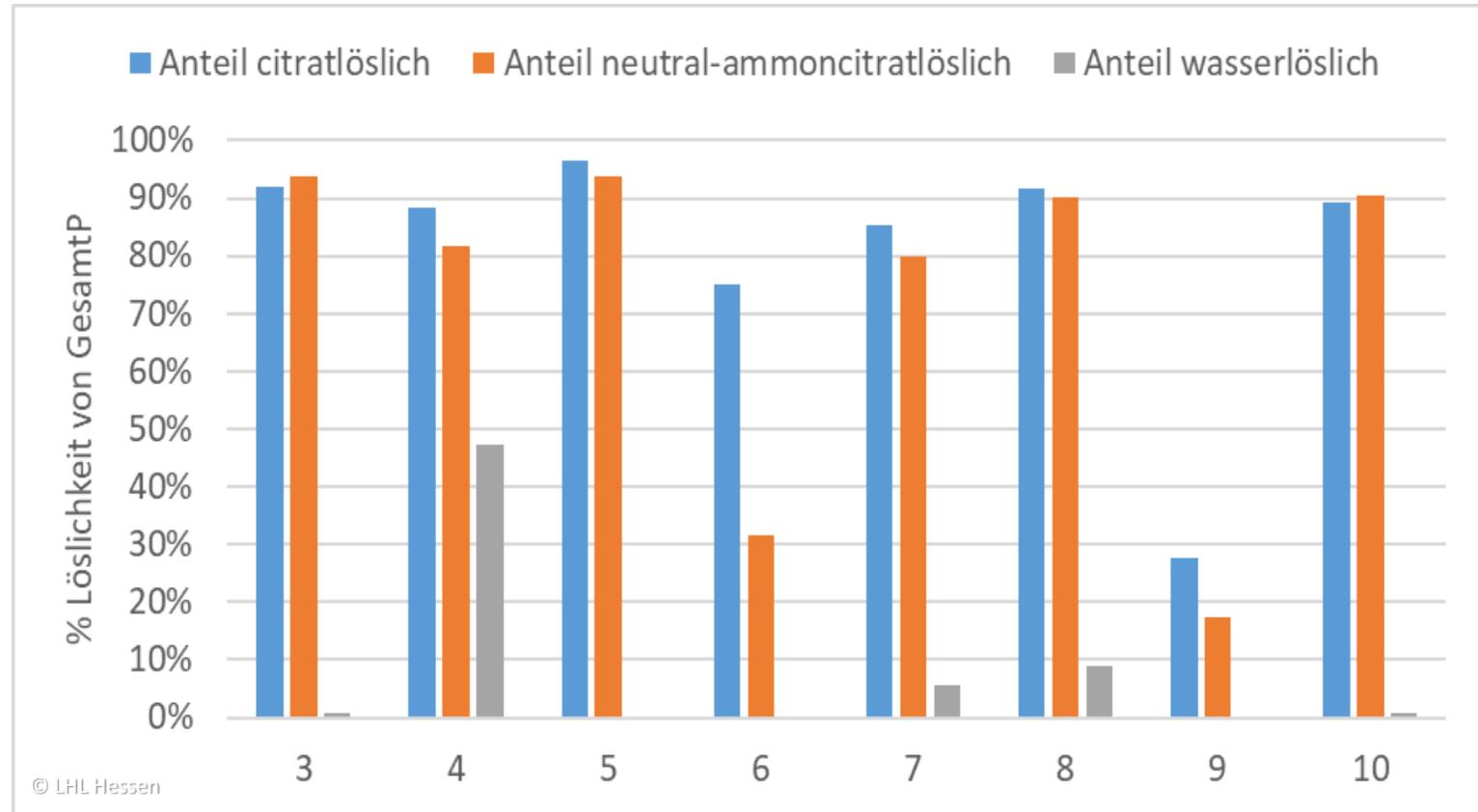
Mindestanforderung DÜMV

Citratlöslich: keine

Neutral-ammoncitratlsl.: 5%

Wasserlösl.: 2,5%

Versuchs Variante	Ausgangsmaterial	Produkt	Firma, Verfahren
1	-	Kontrolle	-
2	-	TSP	-
3	Faulschlamm	Struvit	MSE GmbH Stuttgarter Verfahren
4	Klärschlammverbrennungssasche	Fluorapatit	Infraserv GmbH Säureaufschluss mit anschließender Granulierung
5	Klärschlammmasche	Düngemischel-Phosphat	SePura GmbH: Calcinierung im Drehrohrofen (erweitertes Outotec-Verfahren)
6	Klärschlamm, überwiegend aus Bio-P-gefalltem Klärschlamm	Klärschlammmasche	SePura GmbH Verbrennung im Wirbelschichtofen
7	Klärschlamm	Klärschlammkarbonisat	Pyreg GmbH Karbonisierung im Doppelschnecken Reaktor
8	Entwässerter Klärschlamm, 25% TS nach Eisenfällung	Calciumphosphat	TerraNova Energy GmbH, Hydrolyse-hydrothermale Karbonisierung im Adsorptions-/ Kristallisationsreaktor
9	Klärschlamm (90% TS)	Asche	Kopf SynGas GmbH Vergasung mit Nachoxidation im Wirbelschicht-Vergaser
10	Faulschlamm	Struvit	CNP Cycles GmbH AirPrex Fällung im belüfteten Reaktor



# Pflanzversuch

- 8 Rezyklate (eigentlich 10)
- 2 Kontrollen (Nullvariante, TSP)
- Jeweils 4 Wiederholungen
- Mitscherlichgefäße (4,7 kg Substrat)
- Welsches Weidelgras (Gemini)
- kontinuierliche Bandanlage
- Je 750mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (berechnet über Gesamt-P-Gehalte)
- NK-Düngung nach jedem Schnitt

VV		TSP 2	3	4	5	6	7	8	9	10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Ges (Rezyklat)	%	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

# HGoTECH Substrat

- Ergänzungsdüngung der Nährstoffe Kalium und Nitrat ist notwendig
- andere Nährstoffe müssen nicht ergänzt werden
- Wasserhaltekapazität 33%



# Gefäßbefüllung und Aussaat



5 kg P-Null-Substrat mit Rezyklatmenge auf Basis von 0,75 g Ges.-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; manuell gefäßweise vermischt



Verteilung von 1,5 g Welschem Weidelgras je Gefäß

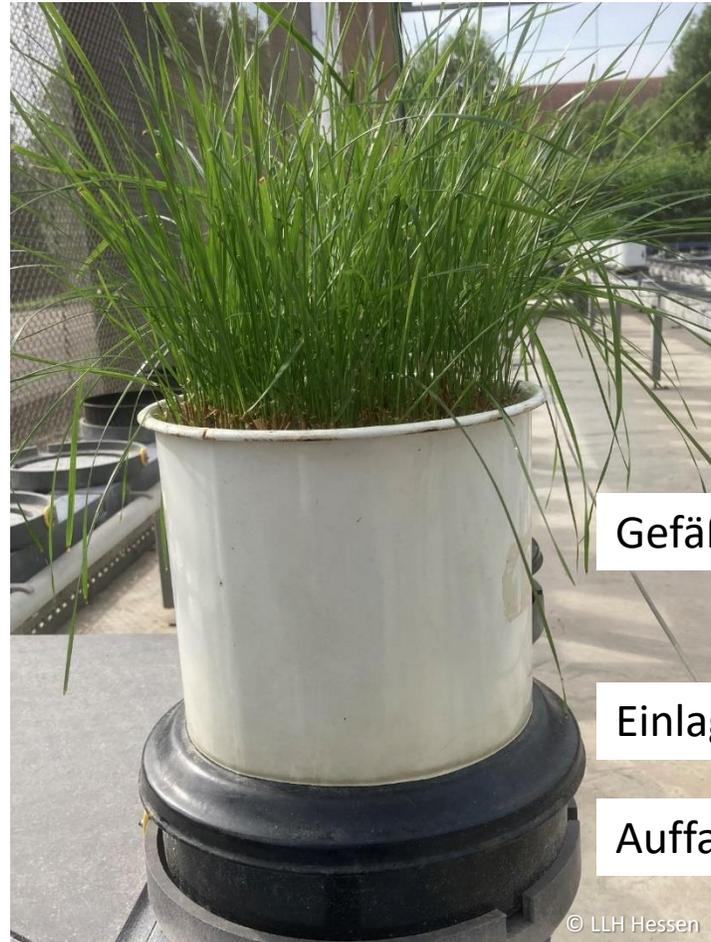


Abdeckung der Saat mit 200 g lufttrockenem Substrat



Startbewässerung mit 150 mL H<sub>2</sub>O

# Aufwuchs in Mitscherlichgefäßen



Gefäßoberteil mit HGo TECH Substrat ohne P

Einlagescheibe

Auffangschale

© LLH Hessen

# Von der Bandanlage bis zur Ernte



Bandanlage



Schnitt des Aufwuchses



# Aufwuchs



31.05.2021



17.06.2021



12.07.2021



30.07.2021



19.08.2021



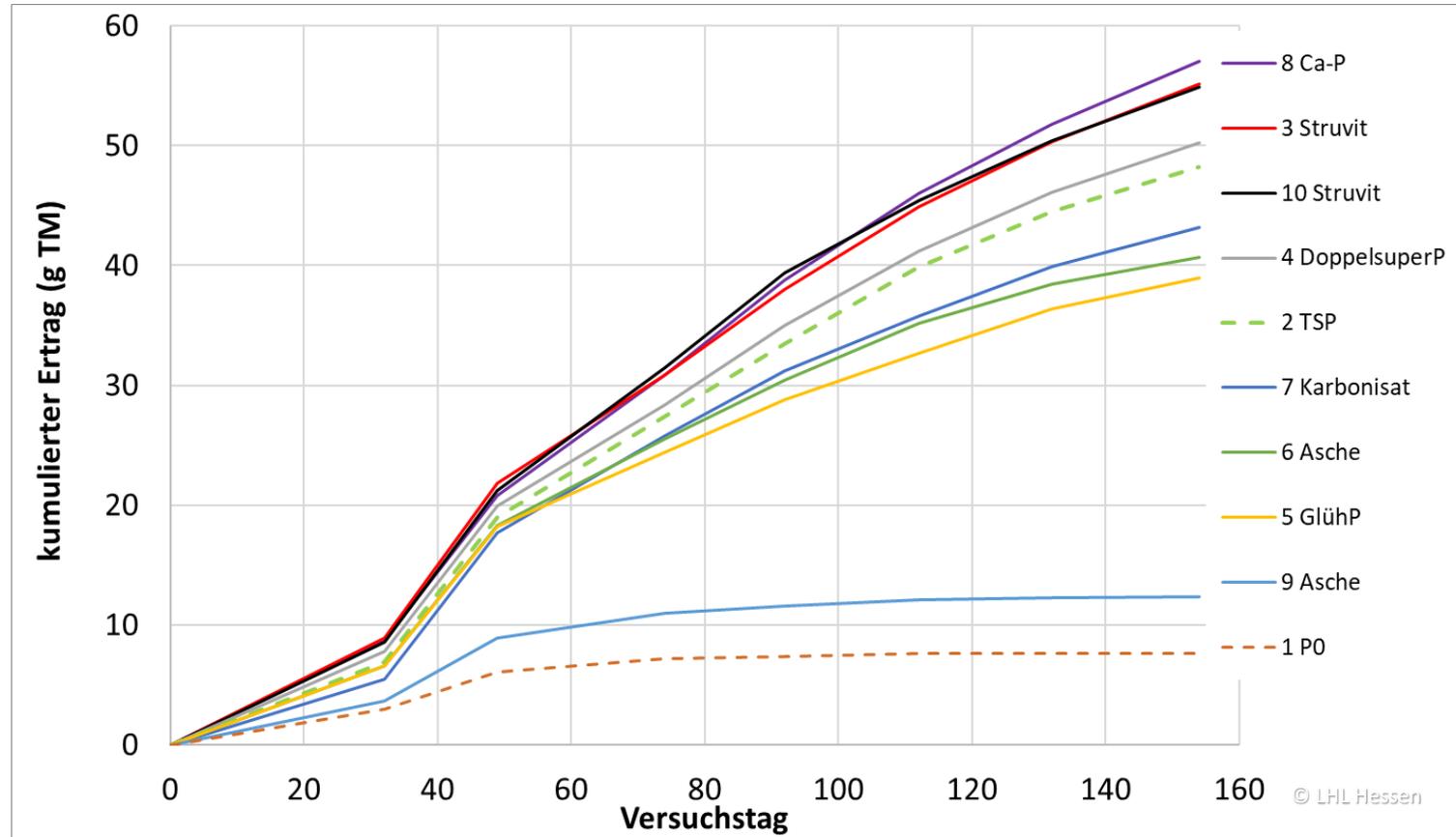
08.09.2021



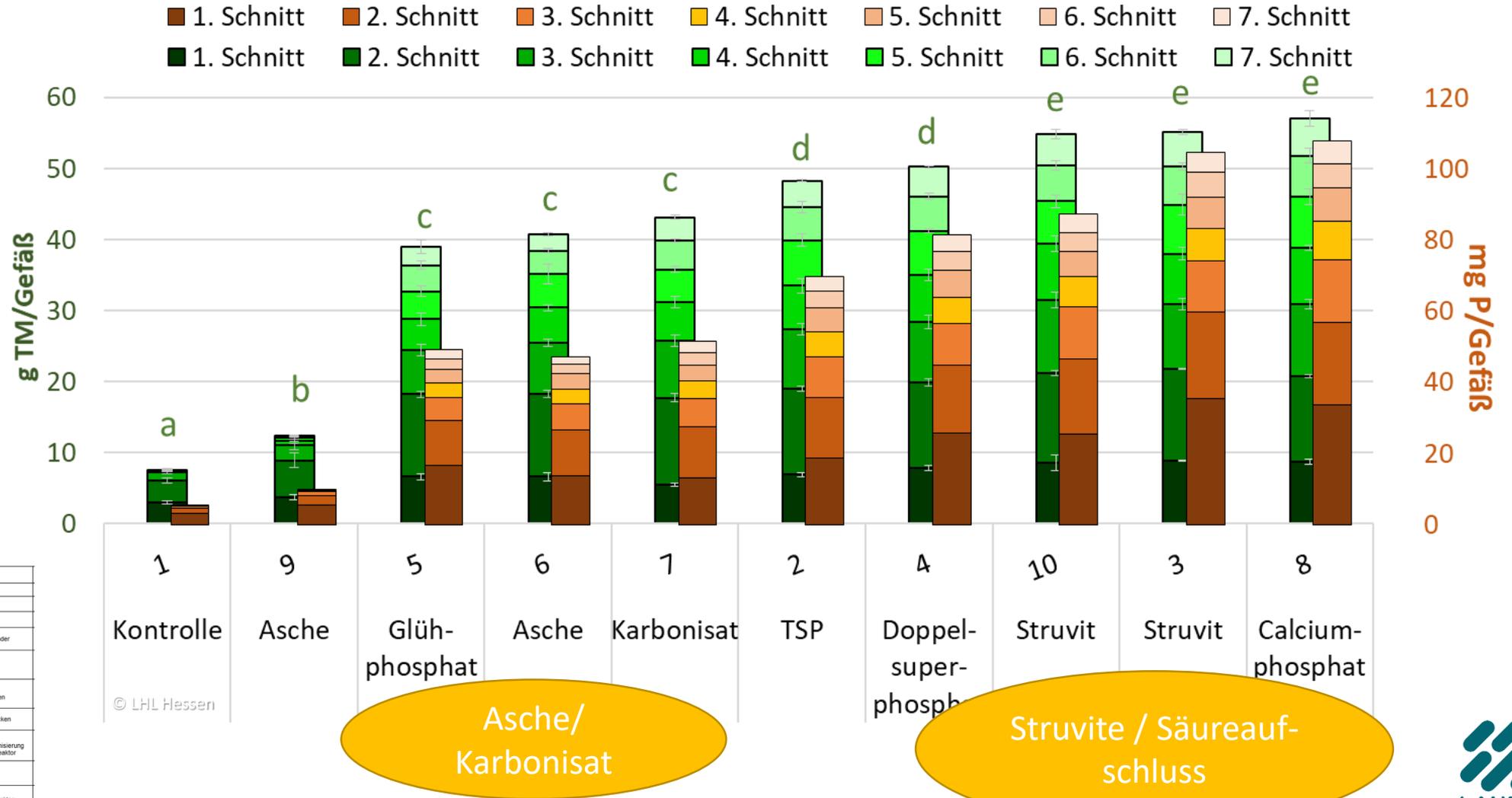
30.09.2021

Versuchs Variante	Ausgangsmaterial	Produkt	Firma, Verfahren
1	-	Kontrolle	-
2	-	TSP	-
3	Faulschlamm	Struvit	MSE GmbH Stuttgarter Verfahren
4	Klärschlammverbrennungssasche	Doppelschicht-Phosphat	Infraserv GmbH Säureaufschluss mit anschließender Granulierung
5	Klärschlammmasche	Doppelschicht-Phosphat	SePura GmbH Calcinierung im Drehrohrofen (erweitertes Outotec-Verfahren)
6	Klärschlamm, überwiegend aus Bio-P-gefälltem Klärschlamm	Klärschlammmasche	SePura GmbH Verbrennung im Wirbelschichtofen
7	Klärschlamm	Klärschlammkarbonisat	Pyreg GmbH Karbonisierung im Doppelschnecken Reaktor
8	Entwässerter Klärschlamm, 25% TS nach Eisenfällung	Calciumphosphat	TerraNova Energy GmbH, Hydrolyse/Hydrothermale Karbonisierung im Adsorptions-/ Kristallisationsreaktor
9	Klärschlamm (90% TS)	Asche	Kopf SynGas GmbH Vergasung mit Nachoxidation im Wirbelschicht-Vergaser
10	Faulschlamm	Struvit	CNP Cycles GmbH AirPrex Fällung im belüfteten Reaktor

# Trockenmassezuwachs

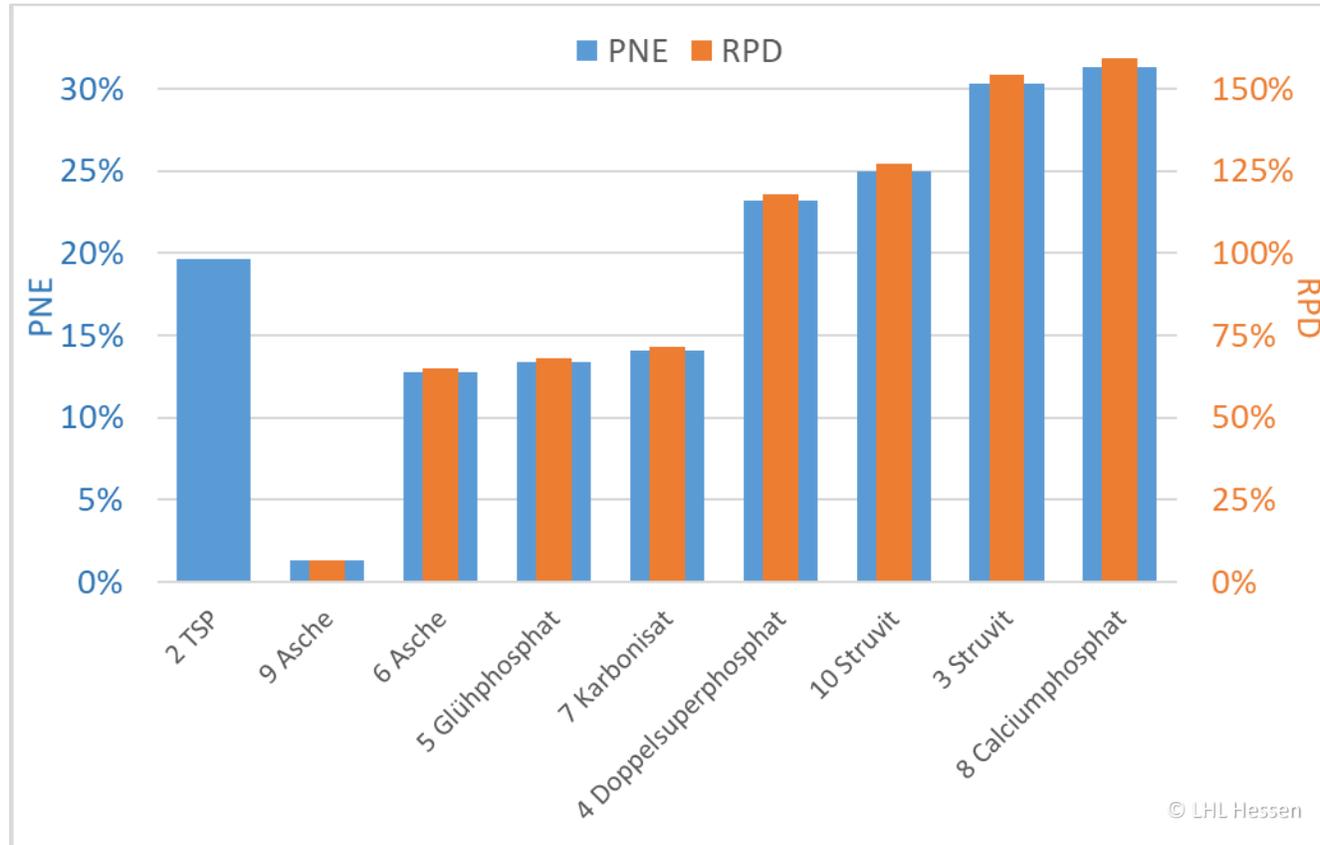


# Trockenmassezuwachs und P-Aufnahme



Versuchs Variante	Ausgangsmaterial	Produkt	Firma, Verfahren
1	-	Kontrolle	-
2	-	TSP	-
3	Faulschlamm	Struvit	MSE GmbH Stütgarter Verfahren
4	Klärschlammverbrennungsasche	Klärschlammverbrennungsasche	Infraserv GmbH Säurelösliche Asche mit anschließender Granulierung
5	Klärschlammasche	Klärschlammverbrennungsasche	SePura GmbH Calcinierung im Dreirohren (erweitertes Outotec-Verfahren)
6	Klärschlamm, überwiegend aus Bio-P-gefälltem Klärschlamm	Klärschlammasche	SePura GmbH Verbrennung im Wirbelschichtofen
7	Klärschlamm	Klärschlammkarbonisat	Pyrog GmbH Karbonisierung im Doppelschnecken Reaktor
8	Entwässertes Klärschlamm, 25% TS nach Eisenfällung	Calciumphosphat	Terrakova Energy GmbH Hydrolyse-Hydrothermale Karbonisierung im Adsorptions-/ Kristallisationsreaktor
9	Klärschlamm (90% TS)	Asche	Kopf SynGas GmbH Vergasung mit Nachoxidation im Wirbelschicht-Vergaser
10	Faulschlamm	Struvit	CNP Cycles GmbH AirPrex Fällung im belüfteten Reaktor

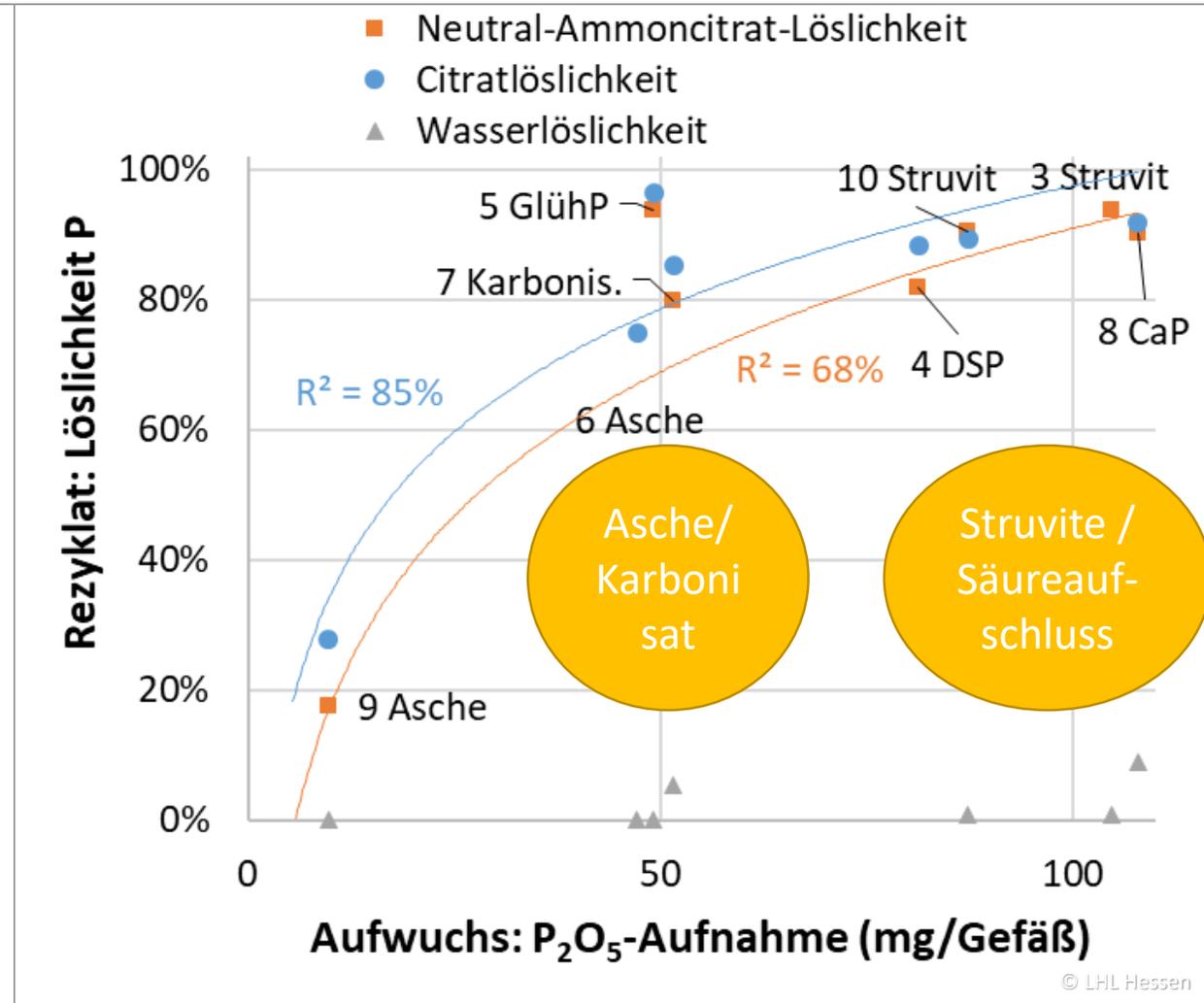
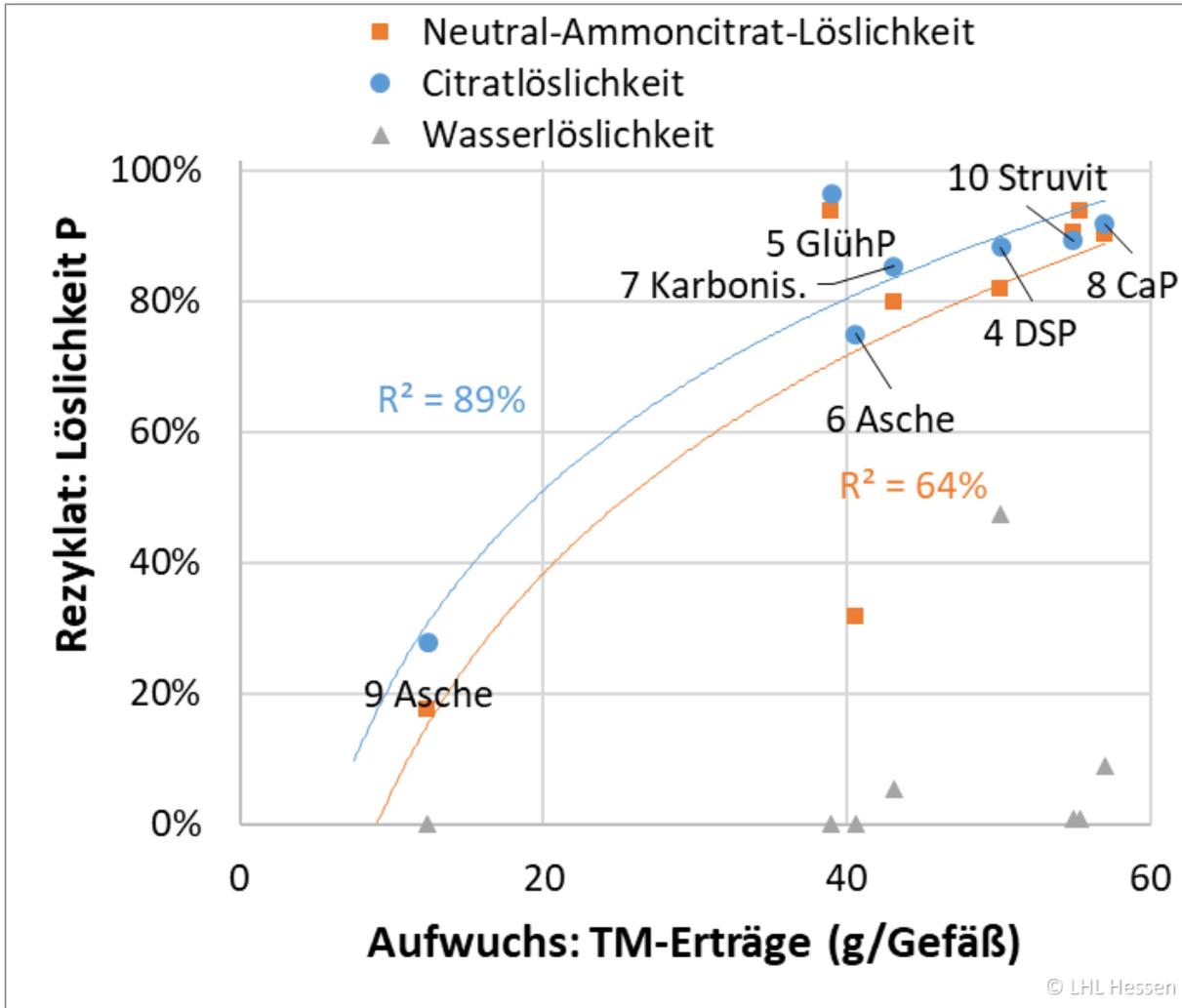
# P-Wirksamkeit



**PNE:** P-Nutzungseffizienz.  
Wieviel des vorhandenen P wurde durch die Pflanzen aufgenommen und im Erntegut wiedergefunden?  
→ 1 - 31%

**RPD:** Relative Düngeeffizienz.  
Wieviel % des Düngeeffektes von TSP konnten mit dem Rezyklat erreicht werden.  
→ 7 - 159%

# Vorhersagbarkeit der P-Düngewirksamkeit auf Basis der Löslichkeiten



# Fazit Düngewirksamkeit

- Sehr heterogene Ergebnisse hinsichtlich Düngewirksamkeit
  - ca. 25-120 % des erreichten Ertrages bzw. ca. 15-160 % der P-Aufnahme relativ zu TSP
  - einige Rezyklate heben sich nur geringfügig von der Negativkontrolle ab und erscheinen nicht als Düngemittel einsetzbar, während andere sogar besser als die Positivkontrolle abschneiden.
- eingesetzte Aschen und Karbonisate bleiben teils deutlich zurück
- Struvite sowie säureaufgeschlossene Calcium- und Superphosphate erzielen gute bis sehr gute Ergebnisse



© LLH Hessen

# Fazit P-Analytik

- Abschätzung des Düngepotentials durch die Analytik (P-Löslichkeiten):
  - Gesamt-P-Gehalt aus dem Vollaufschluss und
  - Wasserlöslichkeit erlauben keine Prognose der Düngewirksamkeit
  - Neutralammoncitratlöslichkeit und Citratlöslichkeit erlauben eine gewisse Abschätzung der P-Düngewirksamkeit bei nicht unerheblicher Streuung
  - Zusammenhänge nicht linear, Vergleichbarkeit hinsichtlich einer Tendenz gut möglich
  - Für eine präzise Bewertung/Düngung ausreichend???



© LLH Hessen



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Projektbericht Download Abschlussbericht „P-Düngewirksamkeit von Klärschlamm-Rezyklaten“:  
<https://umwelt.hessen.de/nachhaltigkeit-und-ressourcenschutz/phosphorrueckgewinnung>

Kontakt:

Dr. Fabian Jacobi

Landesbetrieb Hessisches Landeslabor

Am Versuchsfeld 11-14

34128 Kassel

0561 9888 181