

Absatz- und Vermarktungsmöglichkeiten von Phosphorrezyklaten aus der Klärschlammaufbereitung

Fachgutachten

Gießen, Juli 2019



Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen
Nils Hasport, M. Eng.
Helge Schwenk
Technische Hochschule Mittelhessen
Kompetenzzentrum für Energie-
und Umweltsystemtechnik
Wiesenstraße 14
D-35390 Gießen
ulf.theilen@bau.thm.de
nils.hasport@bau.thm.de

Erstellt für das

HESSEN



Hessisches Ministerium für Umwelt,
Klimaschutz, Landwirtschaft und
Verbraucherschutz

Referat 1

"Internationale Zusammenarbeit,
Planungsangelegenheiten,
fachübergreifende Umweltangelegenheiten"

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Veranlassung	1
2 Ermittlung des zur Verfügung stehenden Potentials an Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammmasche	2
2.1 Ermittlung des Phosphorpotentials nach dem „Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammmasche“	2
2.1.1 Potential zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm in Hessen	4
2.1.2 Szenario 1: Weitgehende Rückgewinnung auf Kläranlagenstandorten	6
2.1.3 Szenario 2: Maximierung der Phosphorrückgewinnung.....	7
2.1.4 Szenario 3: Rückgewinnung nach den Mindestanforderungen.....	8
2.1.5 Vergleich der Szenarien: Phosphorrückgewinnungspotential	10
2.2 Vergleich der ermittelten Klärschlammmenge, des P-Gehaltes sowie des P-Aufkommens im Bereich Mittelhessen zwischen den erhobenen Daten des ISA und der THM	12
2.3 Schlussfolgerung	13
3 Beschreibung der Produkte aus den aktuell wichtigsten Rückgewinnungsverfahren und Wege zur Entlassung aus dem Abfallrecht	16
3.1 Chemische Struktur und Beschreibung der P-Rezyklate	16
3.1.1 Löslichkeit von P-Rezyklaten	17
3.1.2 Pflanzenverfügbarkeit/Agronomische Effizienz von P-Rezyklaten	21
3.1.3 Schwermetallgehalte und organische Schadstoffbelastung von P-Rezyklaten	24
3.1.4 Schlussfolgerung	31
3.2 Wege zur Entlassung von P-Rezyklaten aus dem Abfallrecht	32
3.2.1 Definition Abfall	33
3.2.2 Entlassung von P-Rezyklaten aus dem Abfallrecht	33
3.2.3 Prüfung der Erfüllungskriterien für eine Entlassung von P-Rezyklaten aus dem Abfallrecht.....	34
3.3 Verfahren zur Inverkehrbringung von P-Rezyklaten als Düngemittel	36
3.3.1 Qualitäts- und Hygienevorschriften	40
3.3.2 Schadstoffe.....	40
3.3.3 Löslichkeit.....	42

3.3.4	Hygieneparameter	44
3.3.5	Ausblick der rechtlichen Situation	44
4	Aktueller Bedarf und Vermarktung von Phosphaten sowie Phosphorsäure in Hessen	45
4.1	Inlandsabsatz an Phosphatdüngemitteln in Hessen	45
4.2	Bedeutung des Ökolandbaus in Deutschland und Hessen für den Bedarf von Phosphorrezyklaten.....	46
4.3	Weitere potenzielle Vermarktungswege für P-Rezyklate.....	48
5	Identifikation der wesentlichen relevanten Organisationen zur zukünftigen Vermarktung von Phosphorrezyklaten in Hessen	50
5.1	Identifizierung von Vermarktungsorganisationen und Vermarktungswegen	50
5.2	Auswertung Befragung zu Anforderungen an eine zukünftige Vermarktung von P-Rezyklaten	51
5.2.1	Anforderungen an P-Rezyklate	52
5.2.2	Einschätzung zu Vermarktung und Vermarktungswegen von P-Rezyklaten in Hessen	54
5.2.3	Vermarktungswege anfallender P-Rezyklate in der Landwirtschaft	55
5.2.4	Akzeptanz von Produkten aus der Klärschlammaufbereitung.....	56
5.2.5	Rückmeldung der Kreisbauernverbände Hessen	57
5.3	Beschreibung von Akzeptanz gegenüber P-Rezyklaten im Ökolandbau	57
5.3.1	Bioland.....	58
5.3.2	Demeter.....	60
6	Schlussbewertung	61
7	Literaturverzeichnis	64
8	Anhang	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Klärschlammengen und theoretisches Phosphor-Rückgewinnungspotential der Kläranlagen in Hessen (Stand 2014 sowie Prognose 2025) gemäß ISA-Gutachten (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016)	5
Tabelle 2:	Vergleichende Übersicht über die mögliche P-Rückgewinnung aus Klärschlämmen der relevanten Kläranlagen innerhalb der Szenarien 1 bis 3 nach ISA-Gutachten auf der Grundlage des Entwurfs der AbfKlärV 2015 (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016)	11
Tabelle 3:	Vergleich der ermittelten Klärschlammmenge, des P-Gehaltes sowie des P-Aufkommens nach Erhebungen des ISA-Gutachtens sowie der THM	12
Tabelle 4:	Zusammenstellung verschiedener P-Rezyklate (Steckenmesser, Vogel & Steffens, 2016)	17
Tabelle 5:	Grenzwerte für die bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen nach AbfKlärV 1992 sowie nach deren Novellierung 2017 und nach DüMV 2017 (Eigene Darstellung)	25
Tabelle 6:	Schwermetallgehalte der Klärschlammaschen aus untersuchten Monoverbrennungsanlagen in Bayern und Mediane der Schwermetallgehalte von Klärschlammaschen in Deutschland	26
Tabelle 7:	Schwermetallgehalte verschiedener Rezyklate aus Abwasser / Schlammwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche	28
Tabelle 8:	Summengehalte an PAK, PCDD/F und dl-PCB (nach den Toxizitätsäquivalenten der WHO bewertet) in den Klärschlammaschen im Vergleich zu den (PCDD/F + dl-PCB)-Grenzwerten der Düngemittelverordnung (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2015).....	29
Tabelle 9:	Summengehalte an PAK, PCDD/F und dl-PCB (nach den Toxizitätsäquivalenten der WHO bewertet) in den Recyclingprodukten im Vergleich zu den (PCDD/F + dl-PCB)-Grenzwerten der Düngemittelverordnung (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2015).....	30
Tabelle 10:	Auszug aus der Anlage 1, Tabelle 1.2 DüMV Vorgaben der Phosphatdünger (DüMV, 2017)	37
Tabelle 11:	Auszug aus der Anlage 1, Tabelle 1.2 DüMV „Vorgaben der Phosphatdünger aus Anlage 2 DüMV“ (DüMV, 2017).....	38
Tabelle 12:	Auszug aus Anlage 2, Tabelle 6.2 „Besondere Ausgangsstoffe für bestimmte mineralische Düngemittel“ (DüMV, 2017)	38
Tabelle 13:	Auszug aus Tabelle 7 DüMV Ausgangsstoffe mit beschriebenen Einschränkungen der zulässigen Ausgangsstoffe (DüMV, 2017).....	39
Tabelle 14:	Auszug aus Tabelle 7 DüMV Ausgangsstoffe mit beschriebenen Einschränkungen für Klärschlämme (DüMV, 2017)	39
Tabelle 15:	Auszug aus Anlage 2 DüMV, Kennzeichnungsschwelle und Grenzwerte Teil 1 (DüMV, 2017)	41

Tabelle 16:	Anlage 2, Tabelle 4 DüMV, zulässige Phosphorverbindungen und Phosphatlöslichkeiten (DüMV, 2017)	42
Tabelle 17:	Anlage 2 Tabelle, 5 DüMV, Gehaltsangaben und weitere Erfordernisse für den Phosphatbestandteil (DüMV, 2017)	43
Tabelle 18:	Gesammelte Inlandsabsätze von Phosphat in Hessen, kombiniert mit den jeweiligen landwirtschaftlich genutzten Flächen.....	45
Tabelle 19:	Bodennutzung landwirtschaftlicher Betriebe in Hessen mit prozentuaalem Anteil ökologisch bewirtschafteter Fläche in Hessen von 2003 bis 2017 (Hessisches Umweltministerium, 2018) (Hessisches Statistisches Landesamt, 2017b)	47
Tabelle 20:	Ökologischer Landbau nach Verbänden 2017 (Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft, 2017)	47
Tabelle 21:	Gewichtetes Ranking der Akzeptanzkriterien, Akzeptanzstudie von Bioland (Jedelhauser et al., 2015)	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entsorgungswege der für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen im Jahr 2025 nach Szenario 1 des ISA-Gutachtens (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016).....	7
Abbildung 2:	Entsorgungswege der für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen im Jahr 2025 nach Szenario 2 des ISA-Gutachtens (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016).....	8
Abbildung 3:	Aufteilung der Klärschlammströme zur Rückgewinnung anhand der P-Gehalte in den für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen im Jahr 2025 nach Szenario 3 des ISA-Gutachtens (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016).....	9
Abbildung 4:	P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Wasser (Kratz, Adam & Vogel, 2018).....	18
Abbildung 5:	P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Neutralammoniumcitrat (NAC) (Kratz, Adam & Vogel, 2018).....	19
Abbildung 6:	P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Zitronensäure (CA) (Kratz, Adam & Vogel, 2018).....	19
Abbildung 7:	P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Ameisensäure (AS) (Kratz, Adam & Vogel, 2018).....	20
Abbildung 8:	Relative agronomische Brutto-Effizienz (Brutto RAE-P) verschiedener P-Rezyklate (% des wasserlöslichen Referenzdüngers) (Kratz, Adam & Vogel, 2018).....	22
Abbildung 9:	Relative agronomische Netto-Effizienz (Netto RAE-P) verschiedener P-Rezyklate (% des wasserlöslichen Referenzdüngers) (Kratz, Adam & Vogel, 2018).....	22
Abbildung 10:	Durchschnittlicher Preis für Phosphatstein weltweit in den Jahren 1960 bis 2018 (in US-Dollar je Tonne) (Statista, 2019).....	46
Abbildung 11:	Ökologisch bewirtschaftete Fläche in Hessen (ha) (Hessisches Umweltministerium, 2018).....	46
Abbildung 12:	Vermarktungswege von P-Rezyklaten.....	50
Abbildung 13:	Auszug aus dem Fragebogen, Anforderungen an P-Rezyklate	53
Abbildung 14:	Auszug aus dem Fragebogen, Einschätzungen zu Vermarktung und Vermarktungswege von P-Rezyklaten in Hessen.....	54
Abbildung 15:	Auszug aus dem Fragebogen, Vermarktungswege anfallender P-Rezyklate in der Landwirtschaft	56
Abbildung 16:	Auszug aus dem Fragebogen, Akzeptanz von Produkten aus der Klärschlammaufbereitung.....	56

Abkürzungsverzeichnis

a	.....	Jahr
AbfKlärV	.....	Klärschlammverordnung
Abs	.....	Absatz
Al	.....	Aluminium
AOX	.....	Adsorbierbare Organisch gebundene Halogene
As	.....	Arsen
AVV	.....	Abfallverzeichnis-Verordnung
B[a]P	.....	Benzo[a]pyren
Bio-P	.....	Vermehrte biologische Phosphorelimination
BK	.....	Biokohle
BMEL	.....	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft
Ca	.....	Calcium
CA	.....	Zitronensäure
Cd	.....	Cadmium
Chem-P	.....	Chemische Phosphorelimination
Cu	.....	Kupfer
DCP	.....	Dicalciumphosphat
dI-PCB	.....	dioxinähnliche PCB
DüMV	.....	Düngemittelverordnung
DüngG	.....	Düngergesetz
DüV	.....	Düngeverordnung
e.V	.....	eingetragener Verein
EG	.....	Europäische Gemeinschaft
EPA	.....	Environmental Protection Agency
EU	.....	Europäische Union
EW	.....	Einwohnerwert
f	.....	folgend
FA	.....	Ameisensäure
Fe	.....	Eisen
FIS	.....	Fachinformationssystem
g	.....	Gramm
gem.	.....	gemäß
GK	.....	Größenklasse
HAA	.....	Hessische Abwasseranlagen
HAD	.....	Hessische Ausschreibungsdatenbank
Hg	.....	Quecksilber
ISA	.....	Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
K	.....	Kalium
kg	.....	Kilogramm
KrWG	.....	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KS	.....	Klärschlamm
KSA	.....	Klärschlammasche
MAP	.....	Magnesium-Ammonium-Phosphat
Mg	.....	Megagramm (Tonnen)
MitV	.....	Mitverbrennung
MonoV	.....	Monoverbrennung
n.b.	.....	nicht bekannt
Na	.....	Natrium
NAC	.....	Neutralammoniumcitrat
Ni	.....	Nickel
Nr	.....	Nummer
P ₂ O ₅	.....	Phosphat
PAK	.....	polyzykische aromatische Kohlenwasserstoffe

Pb	Blei
P-Bac	Verfahren zur Aschebehandlung mittels Mikroorganismen
PCB.....	Polychlorierte Biphenyle
PCDD.....	Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane
PFOA	Perfluorooctansäure
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure
PFT	Perfluorierte Tenside
P-RoC	Verfahren: Phosphorus Recovery from waste and process water by Crystallisation
RAE.....	ergonomische Effizienz
TC	Verfahren zur thermochemischen Aschebehandlung
TCP.....	Tricalciumphosphat
THM	Technische Hochschule Mittelhessen
Tl	Thallium
V. unbek.....	Verbrennungsweg unbekannt
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
Zn.....	Zink

1 Veranlassung

Auf der Basis des Angebots vom 9. Oktober 2018 wurde die Technische Hochschule Mittelhessen, Kompetenzzentrum für Energie- und Umweltsystemtechnik (ZEuUS), mit Datum vom 15. Oktober 2018 vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) mit der Erstellung eines Fachgutachtens zu Absatz- und Vermarktungsmöglichkeiten von Phosphorrezyklaten aus der Klärschlammaufbereitung beauftragt.

Vor dem Hintergrund schwindender Möglichkeiten und Akzeptanz für die bodenbezogene Klärschlammverwertung und mit Blick auf die zentrale Bedeutung des endlichen Rohstoffs Phosphor hat die Bundesregierung mit der am 3. Oktober 2017 in Kraft getretenen Neufassung der Klärschlammverordnung das Ziel vorgegeben, die bodenbezogene Klärschlammverwertung weitgehend zu reduzieren und die Rückgewinnung des Rohstoffs Phosphor aus Gründen des Ressourcenschutzes zu etablieren.

Die Neufassung der Klärschlammverordnung von 2017 sieht vor, dass Kläranlagen, die kommunales Abwasser behandeln, ab dem Jahr 2029 die Phosphorrückgewinnung aus ihrem Klärschlamm sicherzustellen haben. Dabei dürfen Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von über 100.000 Einwohnerwerten ab 2029 den Klärschlamm nicht mehr bodenbezogen verwerten. Gleiches gilt für Kläranlagen mit einer Anschlussgröße von über 50.000 Einwohnern ab dem Jahr 2032.

Die Ressourcenschutzstrategie des Landes Hessen (Stand 15.05.2018) formuliert im „Handlungsfeld VII – Stoffkreisläufe schließen, Produkte wiederverwenden“ die Ziele der Stärkung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen sowie der Etablierung der Phosphorrückgewinnung als zentrale Bausteine. Als ein Themenschwerpunkt wird die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammaschen in Hessen explizit genannt. Das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz hat die Ressourcenschutzstrategie im Kontext der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) formuliert, die in die hoheitliche Aufgabe der Abwasserentsorgung eingreift.

Auf dem Markt existieren bereits verschiedene Phosphorrückgewinnungsverfahren, die mehr oder weniger ausgereift sind. Der Entwicklungsstand bzw. die Anwendungsreife der Verfahren sind jedoch sehr unterschiedlich. Die Wahl des Verfahrens richtet sich zudem stark nach regionalen und örtlichen Gegebenheiten. Ebenso unterschiedlich wie die Technologie ist die Qualität der damit erzielten Rezyklate. Für einen Einsatz als Düngemittel in der Landwirtschaft sind die Fragen nach der Pflanzenverfügbarkeit sowie den Schadstoffgehalten maßgebend. Hauptziel für die Verwertung von Phosphorrezyklaten ist die Eignung als Düngemittel, wobei die Anforderungen des Düngemittelrechts erfüllt werden sowie eine Vermarktung gegeben sein müssen.

Während es für herkömmliche mineralische und auch organische Phosphor-Düngemittel sowie auch für sonstige Phosphor-Chemikalien (z. B. Phosphorsäure, Detergenzien, Lebensmittelzusatzstoffe) etablierte Vermarktungswege gibt, müssen diese für Rezyklate aus Klärschlamm und Klärschlammasche noch gefunden werden.

Deshalb sollen im Rahmen des Fachgutachtens Vermarktungsstrukturen von Düngemitteln und Düngemittelkomponenten dargestellt, Potentiale bei der Entwicklung neuer Wege zur regionalen Wertschöpfung bei der Verwendung von Recyclingphosphaten aufgezeigt sowie

Grundlagen für einen Absatz zur Vermarktung von Recyclingphosphaten im Landbau geschaffen werden.

Die Bearbeitung des Fachgutachtens erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Pflanzenernährung der Justus-Liebig-Universität Gießen, Prof. Steffens, und der Deutschen Phosphor-Plattform DPP e.V..

2 Ermittlung des zur Verfügung stehenden Potentials an Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche

Die Bearbeitung dieses Kapitels erfolgt auf der Basis von Daten aus dem „Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammasche“, erstellt in 2016 im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, (ISA) HAD-Referenznummer: 4827/8 (nachfolgend ISA-Gutachten (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016)), sowie von Daten, die durch die Technische Hochschule Mittelhessen in Mittelhessen direkt von den Betreibern von Abwasseranlagen erhoben wurden.

Die einer Kläranlage zufließende Phosphorfracht wird im Wesentlichen über den Klärschlamm aus dem Reinigungsprozess ausgetragen. Durch den Zellaufbau des Klärschlammes, durch Adsorption an die Schlammflocken oder durch chemische Fällung wird der Phosphor mit dem Klärschlamm abgeschieden. An dieser Stelle finden sich bis zu 98 % des Phosphors aus dem Zulauf wieder. Ein geringer Teil findet sich im Ablauf der Kläranlage in Abhängigkeit der erreichten Ablaufqualität.

Maßgebend zur Bestimmung des erschließbaren Potentials an Phosphor sind also hauptsächlich die Klärschlammströme sowie deren P-Gehalte.

2.1 Ermittlung des Phosphorpotentials nach dem „Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammasche“

Im ISA-Gutachten (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016) werden die Klärschlammengen, die Phosphorgehalte und die Entsorgungswege des anfallenden Klärschlammes der Kläranlagen innerhalb des Bundeslandes Hessen betrachtet. Auf dieser Grundlage wird ein mögliches P-Potential ermittelt und in drei verschiedenen Szenarien die davon erfassbare Menge an Phosphor-rezyklaten dargestellt.

Zum Zeitpunkt der Erstellung jenes Gutachtens lag die AbfKlärV als Referentenentwurf, veröffentlicht am 18.08.2015, vor. Dieser sah ab dem 1. Januar 2025 den Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung für kommunale Kläranlagen der Ausbaugrößenklassen GK 4 und 5 vor. Damit wären alle Kläranlagen ab einer Ausbaugröße von 10.000 EW erfasst worden. Laut dem Referentenentwurf hätte ein Klärschlammherzeuger zudem ab 2025 Phosphor aus dem in seiner Abwasserbehandlungsanlage anfallenden Klärschlamm zurückzugewinnen, sofern der Klärschlamm einen Phosphorgehalt von 20 Gramm oder mehr je Kilogramm Trockenmasse aufweist. In der Novelle der AbfKlärV 2017 gilt dies jedoch erst ab

einer Ausbaugröße von 50.000 EW (AbfKlärV, 2017). Dies hat Auswirkungen auf das zur Verfügung stehende Phosphorpotential.

Vermutlich werden sich in der Tendenz dennoch Kläranlagen der GK 1 bis 3 der Phosphorrückgewinnung anschließen, da eine bodenbezogene Verwertung stark eingeschränkt wird. Eine genauere Betrachtung dieser Thematik erfolgt im Kapitel 2.3.

Der Betrachtungsrahmen im ISA-Gutachten des liegt deshalb auf den Kläranlagen der GK 4 und 5 ab einer Phosphorkonzentration von mindestens 20 g P/kg TM im Klärschlamm. Er wird durch das ISA aber auf Kläranlagen der GK 3 erweitert, um der in Hessen verfolgten Ressourcenschutzstrategie Rechnung zu tragen. Weiterhin erfolgt eine gesonderte Betrachtung von Kläranlagen, deren P-Gehalte im Klärschlamm nahe 20 g P/kg TM liegen oder deren großer Klärschlammstrom auf ein erhöhtes Phosphorpotential schließen lässt, um möglichst große Rückgewinnungspotentiale auszuschöpfen.

Zugrunde gelegt wird zudem, dass alle Klärschlämme bzw. alle im Rahmen einer Mono- oder Mitverbrennung anfallenden Aschen auch in Hessen verwertet bzw. entsorgt werden.

Die unten aufgeführten und dem ISA-Gutachten zugrundeliegenden abwasserspezifischen Daten stammen aus dem Fachinformationssystem Hessische Abwasseranlagen (FIS HAA) und wurden vom HLNUG zur Verfügung gestellt:

- Phosphorgehalt (in mg/l) im Zulauf und Ablauf der Kläranlage (GK 2-5) sowie Jahresfracht (in kg/a) der in den Vorfluter eingeleiteten Phosphorgehalte,
- Ausbaugröße (alle GK) und angeschlossene Einwohnerwerte (sofern diese angegeben sind),
- Klärschlammmenge (in m³/a bzw. Mg/a und Angabe des TM-Gehaltes in %) und Verbleib (Entsorgungsweg(e)) des Klärschlammes
- Jahresabwassermenge im Zulauf/Ablauf (in m³/a),
- eingesetzte Zusatzstoffe zur Abwasser-/Schlammbehandlung, z. B. auch Polymereinsatz, aber auch Fällungsmittel (in Mg/a),
- Art der Abwasserreinigung und der für die Phosphorrückgewinnung relevanten technischen Ausstattung (z. B. Faulbehälter) der einzelnen Kläranlagen (sofern diese Angaben vorhanden sind)

Weitere den Klärschlamm betreffende Daten wurden über das Regierungspräsidium Kassel, Dezernat Landwirtschaft, bezogen.

Aus diesem Register wurden für das ISA-Gutachten zur Verfügung gestellt:

- aus den Jahren 2004 bis 2009 Mengenangaben, Nährstoffgehalte und TM-Gehalte zu weitgehend allen hessischen Kläranlagen in Einzelwerten, sowie als gewogene Mittelwerte zusammengefasst,
- aus 2011 bis 2014 Einzelwerte der Nährstoffgehalte und TM-Gehalte der landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme,
- ab 2011 bis 2014 gemeinsame Auswertungstabelle HAA und AbfKlärV über Mengen und Verwertungswege der Klärschlämme.

Darüber hinaus wurden die vorliegenden Daten mit Auswertungen des Hessischen Statistischen Landesamtes aus amtlichen Erhebungen abgeglichen und ergänzt.

2.1.1 Potential zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm in Hessen

Betrachtet wurden im ISA-Gutachten (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016) alle Kläranlagen, die nach dem Kriterium des Referentenentwurfs der AbfklärV von 2015 einen P-Gehalt im Klärschlamm von größer 20 g P/kg TM, eindeutig für Phosphorrückgewinnung in Größenklasse 4 und 5 vorgesehen sind. Auch Kläranlagen der Größenklasse 3, die im Klärschlamm einen P-Gehalt von größer 20 g P/kg TM haben, wurden mit einbezogen.

Weiterhin wurden die Kläranlagen in direkt entsorgende Kläranlagen – Anlagen deren Klärschlamm direkt einem Entsorgungsweg zugeführt wird – oder indirekt entsorgende Kläranlagen – Anlagen, die ihren Klärschlamm über eine andere Kläranlage entsorgen – kategorisiert. Indirekt entsorgende Anlagen wurden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Das Ergebnis wurde in einer Gruppe unter dem Begriff „relevante Kläranlagen“ zusammengefasst. Unter diesem Begriff sind im ISA-Gutachten alle Kläranlagen dargestellt, die nach dem Kriterium P-Gehalt größer 20 g P/kg TM im Referentenentwurf der AbfklärV von 2015 eindeutig für die Phosphorrückgewinnung vorgesehen sind und der GK 3, 4 und 5 angehören.

Änderungen der bundesdeutschen sowie der europäischen Gesetzgebung nehmen Einfluss auf die im Klärschlamm enthaltenen Phosphormengen. Im Einzelnen seien hier die Auswirkungen der Wasserrahmenrichtlinie auf die P_{ges} -Überwachungswerte genannt. Als weiterer Faktor fließt auch die regionale Entwicklung der Bevölkerung in Hessen mit in die Betrachtungen ein.

Wichtigster Faktor wird die Erhöhung der Phosphorfracht in der Klärschlammmenge durch die Absenkung der P_{ges} -Überwachungswerte durch das Hessische Maßnahmenprogramm zur Absenkung der P-Konzentration in Gewässern sein. Den größten Einfluss auf die Entwicklung der Klärschlammmenge in Hessen hat der geplante Bau der Klärschlammfaulung der Stadtentwässerung Frankfurt mit einer entsprechenden Reduzierung der zu verwertenden Menge.

In Tabelle 1 sind die Klärschlammengen und das theoretische Phosphor-Rückgewinnungspotential für die Ausgangssituation 2014 und die Prognose 2025 für folgende Kategorien zusammengestellt:

- Schlammmenge und P-Rückgewinnungspotential aller Kläranlagen in Hessen, deren Schlamm direkt entsorgt oder verwertet wird (ohne die Anlagen, deren Schlämme über andere Kläranlagen entsorgt wird)
- Schlammmenge und P-Rückgewinnungspotential der im ISA-Gutachten ermittelten 184 relevanten Kläranlagen,
- Schlammmenge und P-Menge der als nicht relevant für die P- Rückgewinnung eingestuft Kläranlagen

Identifiziert wurden insgesamt 184 Kläranlagen, die für die P-Rückgewinnung relevant sind. Im Jahr 2014 fallen in diesen Kläranlagen 126.619 Mg TM/a an. Das Rückgewinnungspotential von Phosphor aus Klärschlamm in Hessen im Jahr 2014, wird mit 3.403 Mg P/a angegeben.

Die Klärschlammmenge, der als für die P-Rückgewinnung relevant identifizierten Kläranlagen, wird sich im Jahr 2025 auf 110.649 Mg TM/a verringern. Das P-Rückgewinnungspotential wird

sich im Jahr 2025, aufgrund der verschärften Überwachungswerte für P_{ges} , aber auf 3.576 Mg P/a erhöhen.

Tabelle 1: Klärschlammengen und theoretisches Phosphor-Rückgewinnungspotential der Kläranlagen in Hessen (Stand 2014 sowie Prognose 2025) gemäß ISA-Gutachten (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016)

Herkunft der Klärschlämme	Ausgangssituation 2014		Prognose 2025 mit Faulung in FFM	
	Klärschlamm- menge	P- Aufkommen	Klärschlamm- menge	P- Aufkommen
	[Mg TM/a]	[Mg/a]	[Mg TM/a]	[Mg/a]
Alle direkt entsorgenden Kläranlagen Stand 2014	151.243 (100 %)	3.756 (100 %)	135.272 (100 %)	3.970 (100 %)
184 relevante Kläranlagen Stand 2014*	126.619 (83,7 %)	3.403 (90,6 %)	110.649 (81,7 %)	3.576 (90,0 %)
Alle als nicht relevant identifizierten Kläranlagen Stand 2014*	24.624 (16,3 %)	353 (9,4 %)	24.623 (18,3 %)	394 (10,0 %)

* auf der Grundlage des Entwurfs der AbfKlärV 2015.

Die Klärschlammmenge aus den 184 Kläranlagen, die in den Szenarien 1 bis 3 des ISA-Gutachtens näher betrachtet wird, beträgt im Jahr 2014 ca. 83,7 % der gesamten Klärschlammmenge, die zur Entsorgung in Hessen anfällt. In der Prognose für das Jahr 2025 reduziert sich dieser Anteil geringfügig auf 81,7 %. Das Phosphorrückgewinnungspotential liegt hiernach bei 90 % des gesamten P-Aufkommens der in Hessen anfallenden Klärschlämme.

Die restlichen als nicht relevant identifizierten Kläranlagen werden in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt. Hierbei handelt es sich zum Beispiel um Kläranlagen der Größenklasse 1 und 2, auch wenn diese einen P-Gehalt von > 20 g P/kg TM im Klärschlamm aufweisen. Auch werden Kläranlagen der GK 3 von der Betrachtung ausgeschlossen, die nicht oder nicht sicher nachweisbar einen P-Gehalt von > 20 g P/kg TM im Klärschlamm haben. Aus den Zahlen der Tabelle 1 lässt sich die Schlammmenge und das P-Aufkommen ableiten. In der Gruppe aller als nicht relevant identifizierten Kläranlagen fällt, Stand 2014, eine Klärschlammmenge von etwa 25.000 Mg TM/a mit einem P-Aufkommen von ca. 350 Mg/a an. In der Prognose für das Jahr 2025 bleibt diese Klärschlammmenge mit annähernd 25.000 Mg TM/a gleich. Das Phosphoraufkommen erhöht sich jedoch auf etwa 400 Mg/a. Als Entsorgungsweg wird für diese Gruppe hauptsächlich eine bodenbezogene Verwertung angenommen.

Im Weiteren werden in dem ISA-Gutachten drei Szenarien betrachtet, die verschiedene Rückgewinnungskonzepte und damit unterschiedliche Entsorgungswege des Klärschlammes abbilden. Dies hat, durch sich verändernde Rückgewinnungsquoten, auch veränderte P-Rezyklatmengen zur Folge.

2.1.2 Szenario 1: Weitgehende Rückgewinnung auf Kläranlagenstandorten

Im Szenario 1 des ISA-Gutachtens wird vor allem eine Entsorgung mit derzeit verfügbaren bzw. im Jahr 2025 möglicherweise verfügbaren Kapazitäten in der Verbrennung angenommen. Insbesondere findet in diesem Szenario 1 ein Zubau von Monoverbrennungsanlagen möglichst nicht statt. Dies postuliert, dass in 2025 ein größerer Anteil des anfallenden Klärschlammes durch Mitverbrennung behandelt werden würde. Die gemäß dem Referentenentwurf zur AbfKlärV aus dem Jahr 2015 geforderte P-Rückgewinnung müsste dann vor der Mitverbrennung vermehrt aus dem nassen Schlamm oder dem Schlammwasser direkt auf der Kläranlage stattfinden, um die Anforderungen zu erfüllen. Dieser besagte, dass nur Schlamm in der Mitverbrennung entsorgt werden darf, der weniger als 20 g P/kg TM aufweist oder aber eine Rückgewinnungsquote von mindestens 50 % des Phosphors im Klärschlamm vorweist, falls ein P-Gehalt von kleiner 20 g P/kg TM durch das angewendete Abreicherungsverfahren nicht erreicht werden kann.

Als Entsorgungswege im Rahmen der Mitverbrennung werden, auf Grundlage von Artikel 5 Nr. 3 § 2 Abs. 10b des Referentenentwurfs von 2015, folgende Arten von Anlagen genannt:

- Müllheizkraftwerke (MHKW)
- Kohlekraftwerke
- Zementwerke

Folgende Festlegungen und Annahmen werden im ISA-Gutachten (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016) in diesem Szenario 1 getroffen:

- Es werden die Klärschlammengen und P-Gehalte der für eine P-Rückgewinnung identifizierten 184 Kläranlagen zu Grunde gelegt.
- Die ab 2025 nicht mehr zur landwirtschaftlichen Verwertung zugelassenen Schlämme der relevanten Kläranlagen werden als „Schlämme zur Mitverbrennung“ klassifiziert, es erfolgt vorab eine P-Rückgewinnung aus dem nassen Klärschlamm oder dem Schlammwasser.
- Klärschlämme aus Kläranlagen, die im Jahr 2014 ganz oder teilweise über die Mitverbrennung entsorgt haben oder Klärschlämme, bei denen der Verbrennungsweg 2014 unbekannt war, werden ab 2025 vollständig als „Schlämme zur Mitverbrennung“ behandelt; es erfolgt vorab eine Rückgewinnung aus dem nassen Klärschlamm oder dem Schlammwasser.
- Klärschlämme aus Kläranlagen, die schon im Jahr 2014 vollständig über die Monoverbrennung entsorgt haben, werden auch im Jahr 2025 in der Monoverbrennung behandelt; für die Asche dieser Schlämme erfolgt eine Rückgewinnung aus der Asche.

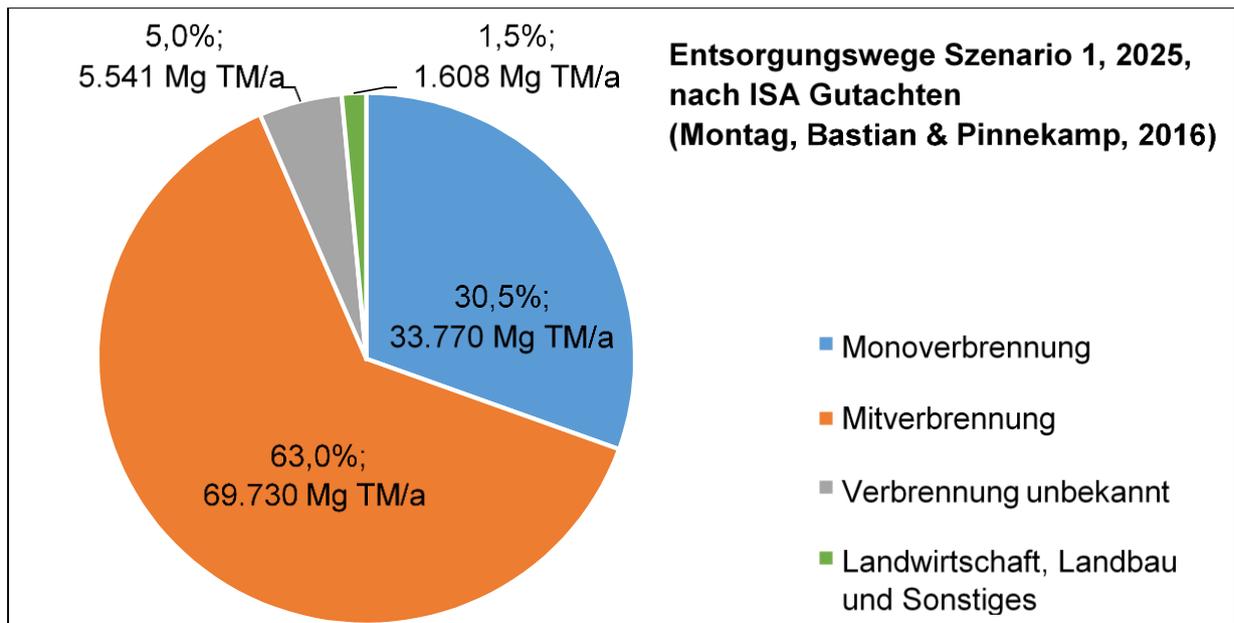


Abbildung 1: Entsorgungswege der für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen im Jahr 2025 nach Szenario 1 des ISA-Gutachtens (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016)

2.1.3 Szenario 2: Maximierung der Phosphorrückgewinnung

Aufgrund der geringen Rückgewinnungsraten für die Verfahren, die bei dem Einsatz zur Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser oder dem nassen Schlamm zu erwarten sind, wird im Gegensatz zum Szenario 1 mit dem Haupt-Entsorgungsweg „Mitverbrennung“ im Szenario 2 des ISA-Gutachtens eine maximale Behandlung in der Monoverbrennung zu Grunde gelegt. Die Rückgewinnungsraten, die bei der Verarbeitung von Klärschlammaschen zu erreichen sind, sind mit bis zu > 90 % (bezogen auf den Kläranlagenzulauf) wesentlich höher. Gleichzeitig kann durch die Konzentrierung der P-Rückgewinnung auf wenige Standorte eine einheitlichere Qualität des Rezyklats hinsichtlich P-Gehalt, P-Verfügbarkeit und Schwermetallgehalt erreicht werden.

Für Szenario 2 werden im ISA-Gutachten (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016) ab 2025 folgende Festlegungen und Annahmen getroffen:

- Es werden die Klärschlammengen und P-Gehalte der identifizierten 184 Kläranlagen zugrunde gelegt.
- Klärschlämme, aus Kläranlagen, die im Jahr 2014 ganz oder teilweise über die Monoverbrennung entsorgt haben, werden auch im Jahr 2025 vollständig der Monoverbrennung angedient, es erfolgt eine P-Rückgewinnung aus der Asche.
- Die ab 2025 nicht mehr zur landwirtschaftlichen Verwertung zugelassenen Klärschlämme werden der Monoverbrennung angedient; es erfolgt eine P-Rückgewinnung aus der Asche.
- Klärschlämme, bei denen der Verbrennungsweg 2014 unbekannt war oder die vollständig mitverbrannt wurden, werden im Jahr 2025 ebenfalls vollständig der Mitverbrennung angedient; eine Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm wird angestrebt.

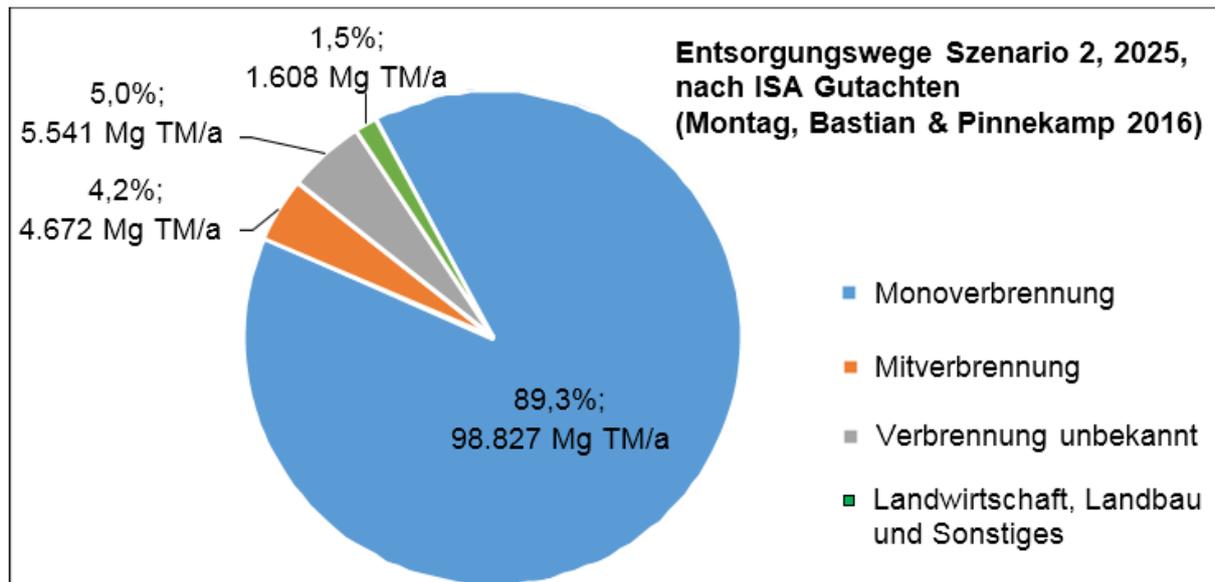


Abbildung 2: Entsorgungswege der für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen im Jahr 2025 nach Szenario 2 des ISA-Gutachtens (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016)

2.1.4 Szenario 3: Rückgewinnung nach den Mindestanforderungen

In dem diesem Gutachten zugrunde gelegten Referentenentwurf der Novelle der AbfKlärV 2015 wird zunächst eine Minimierung des P-Gehaltes im Klärschlamm auf kleiner 20 g P/kg TM gefordert, oder alternativ eine Reduzierung des P-Gehaltes von 50 %. Es besteht also auch die Möglichkeit, die P-Rückgewinnungsstrategie nach dieser Mindestanforderung auszurichten.

Mit den zurzeit erprobten Verfahren zur Nassschlammbehandlung ist eine 50%ige P-Rückgewinnung ggf. gerade zu erreichen. Es ist bei vertretbarem Kostenaufwand aber nicht möglich die Rückgewinnungsquote wesentlich zu erhöhen. Theoretisch können Schlämme unterhalb 40 g P/kg TM so behandelt werden. Um eine Anreicherung auf 20 g P/kg TM sicherzustellen, ist jedoch ein Sicherheitsfaktor vorzusehen. So sollte unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors der P-Gehalt des Klärschlammes im Betrieb im Mittel auf mind. 18 g P/kg TM minimiert werden. Daraus lässt sich ableiten, dass unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine nasschemische Behandlung von Klärschlämmen mit einem Phosphorgehalt von maximal 35 g P/kg TM möglich sein kann. Unterhalb dieser Schwelle sind, in Abhängigkeit von den tatsächlich auf den Anlagen vorliegenden P-Gehalten im Klärschlamm, auch geringere Rückgewinnungsquoten möglich, um die Anforderungen der AbfKlärV 2015 zu erfüllen.

Das Szenario 3 des ISA-Gutachtens von Montag, Bastian und Pinnekamp (2016) geht also davon aus, dass bei den relevanten Klärschlämmen mit einem P-Gehalt von < 35 g P/kg TM ein Verfahren zur P-Rückgewinnung aus dem Schlamm eingesetzt wird und danach in der Mitverbrennung behandelt werden. Alle Klärschlämme mit höheren P-Gehalten als 35 g P/kg TM werden monoverbrannt und es erfolgt eine P-Rückgewinnung aus der Asche.

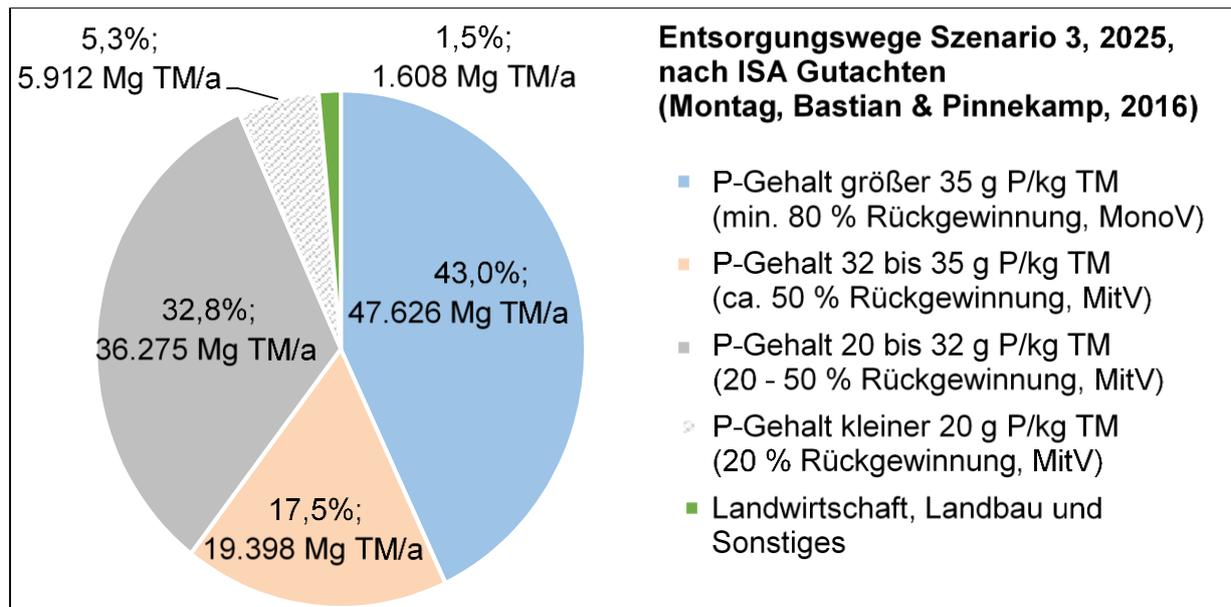


Abbildung 3: Aufteilung der Klärschlammströme zur Rückgewinnung anhand der P-Gehalte in den für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen im Jahr 2025 nach Szenario 3 des ISA-Gutachtens (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016)

Das Szenario 3 verändert sich durch die Verschärfung der Überwachungswerte im Rahmen der WRRL wesentlich deutlicher, als die Prognosen der Entwicklung bis 2025 in den Szenarien 1 und 2. Der P-Gehalt wird in den Klärschlämmen der relevanten Anlagen steigen, sodass eine Vielzahl der Anlagen höhere Rückgewinnungsquoten erreichen müssen, um den P-Gehalt sicher unter 20 g P/kg TM abzureichern. Gleichzeitig wird ein größerer Anteil der Anlagen in die Monoverbrennung entsorgen. In Tabelle 2 sind die Änderungen bei den Entsorgungswegen zu erkennen.

2.1.5 Vergleich der Szenarien des ISA-Gutachtens: Phosphorrückgewinnungspotential

Nach den oben vorgestellten Szenarien des ISA-Gutachtens (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016) ergeben sich verschiedene Rückgewinnungspotentiale, die in Tabelle 2 zusammengefasst sind.

In Szenario 1 ist die realisierbare Rückgewinnungsquote mit 55,3 % relativ niedrig. Aufgrund der vorherrschend betrachteten P-Rückgewinnung aus Klärschlamm am Kläranlagenstandort ist das auch zu erwarten. Die Klärschlammengen, die aktuell und nach Szenario 1 auch zukünftig monoverbrannt würden, erhöhen dabei die erreichbare Rückgewinnungsquote. Bei Nichtbetrachten der Klärschlämme zur Monoverbrennung liegt die mittlere Rückgewinnungsquote für die restlichen Kläranlagen lediglich bei etwa 45 %. Von dem oben beschriebenen theoretischen Potential an rezyklierbarem Phosphor von ca. 3.400 Mg/a (Stand im Jahr 2014), werden ca. 1.800 Mg P/a zurückgewonnen. Bei Eintritt der Prognose für das Jahr 2025 zur Entwicklung der Schlammströme und Veränderungen der P-Fracht durch die Maßnahmen der WRRL könnte diese Menge auf ca. 1.980 Mg P/a steigen.

In Szenario 2 wird mit 76,5 % die höchste P-Rückgewinnungsquote aller drei Szenarien erreicht. Die P-Rückgewinnungsquote des Anteils von der Klärschlammmenge zur Monoverbrennung wird im ISA-Gutachten mit der minimal zu erreichenden Quote von 80 % angenommen. Daraus ergibt sich eine zurückgewonnene P-Menge von bis zu 2.600 Mg/a. Je nach Rückgewinnungsverfahren liegt diese aber höher. Bei geschätzten 90 % P-Rückgewinnung aus der Asche steigert sich im Szenario 2 die rezyklierbare P-Menge auf insgesamt etwa 2.900 Mg P/a. Unter der Annahme, dass die für 2025 prognostizierte Entwicklung eintritt, würde sich eine P-Rezyklatmenge von ca. 3.000 Mg P/a erfassen lassen.

Szenario 3 weist, auf die P-Fracht nach Stand 2014 bezogen, mit 53,3 % eine ähnlich geringe Rückgewinnungsquote für Phosphor auf wie Szenario 1. Hier würde ein Anteil von 42 % der Klärschlämme mit P-Gehalten kleiner 32 g P/kg TM schon mit Rückgewinnungsquoten kleiner 40 % die Anforderungen der Novelle der AbfKlärV erfüllen. Durch den Anstieg der P-Gehalte in der Prognose für das Jahr 2025 und die dadurch bedingte Neueinstufung der Klärschlämme der betroffenen Kläranlagen in andere Kategorien, steigt der Anteil der Klärschlämme zur Entsorgung in der Monoverbrennung und Rückgewinnung aus der Asche. Dadurch erhöht sich die angenommene Rückgewinnungsquote auf 61,5 %. Bei Eintritt der Prognose für das Jahr 2025 würden ca. 2.200 Mg P-Rezyklate pro Jahr zurückgewonnen werden.

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind zusammenfassend die Ergebnisse des im ISA-Gutachten ermittelten Phosphor-Potentials im Klärschlamm in Hessen Stand 2014, die Prognose für die Entwicklung der Klärschlammmenge und des daraus resultierenden Phosphor-Potentials bis 2025 sowie die möglichen Mengen des rezyklierbarem Phosphors und der Entsorgungswege des Klärschlammaufkommens der Szenarien 1 bis 3 dargestellt.

Hierbei fällt auf, dass im ISA-Gutachten in den Szenarien 1 und 2 die im Jahr 2025 prognostizierten Klärschlammengen angesetzt wurden, dass aber von der Phosphorfracht Stand 2014 und damit auch von den P-Gehalten Stand 2014 auf die in den Szenarien möglichen Rückgewinnungspotentiale geschlossen wird.

Tabelle 2: Vergleichende Übersicht über die mögliche P-Rückgewinnung aus Klärschläm-
men der relevanten Kläranlagen innerhalb der Szenarien 1 bis 3 nach ISA-Gut-
achten auf der Grundlage des Entwurfs der AbfKlärV 2015 (Montag, Bastian &
Pinnekamp, 2016)

Situation 2014 Entsorgungswege und P-Fracht im Klärschlamm						
Entsorgungsweg		MonoV	MitV	V. unbek.	Sonstiges	Summen
Klärschlammmenge	[Mg TM/a]	53.231	15.817	4.388	53.183	126.619
P-Fracht im KS	[Mg/a]	1.111	522	130	1.640	3.403
Prognose 2025 Entsorgungswege und P-Fracht im Klärschlamm						
Entsorgungsweg		MonoV	MitV	V. unbek.	Sonstiges	Summen
Klärschlammmenge	Mg TM/a]	37.260	15.817	4.388	53.183	110.649
P-Fracht im KS	[Mg/a]	1.161	545	139	1.731	3.576
Szenario 1 - 2025		"Weitgehende Rückgewinnung auf Kläranlagenstandorten"				
Entsorgungsweg		MonoV	MitV	V. unbek.	Sonstiges	Summen
Klärschlammmenge	[Mg TM/a]	33.770	69.730	5.541	1.608	110.649
P-Fracht im KS	[Mg/a]	1.008	2.195	164	36	3.403
P-Rückgewinnung	[Mg/a]	806	985	71	-	1.837
Rückgewinnungsquote	[%]	80,0	44,9	43,4	-	55,3
Szenario 2 - 2025		"Maximierung der Phosphor-Rückgewinnung"				
Entsorgungsweg		MonoV	MitV	V. unbek.	Sonstiges	Summen
Klärschlammmenge	[Mg TM/a]	98.827	4.672	5.541	1.608	110.649
P-Fracht im KS	[Mg/a]	3.045	158	164	36	3.403
P-Rückgewinnung	[Mg/a]	2.432	74	71	-	2.578
Rückgewinnungsquote	[%]	80	46,9	43,4	-	76,5
Szenario 3 - 2014		"Rückgewinnung nach Mindestanforderungen des Entwurfs AbfKlärV 2015"				
Entsorgungsweg		MonoV	Mitverbrennung			Summen
	[g P/kg TM]	> 35	32 - 35	20 - 32	< 20	(incl. Sonstiges)
Klärschlammmenge	[Mg TM/a]	23.436	39.072	39.040	7.492	110.649
P-Fracht im KS	[Mg/a]	949	1.305	980	133	3.403
P-Rückgewinnung	[Mg/a]	759	653	356	26,6	1.794
Rückgewinnungsquote	[%]	80,0	50,0	36,3	20,0	53,3
Szenario 3 - 2025		"Rückgewinnung nach Mindestanforderungen des Entwurfs AbfKlärV 2015"				
Klärschlammmenge	[Mg TM/a]	47.626	19.398	36.275	5.912	110.819
P-Fracht [Mg/a]	[Mg/a]	1.856	655	921	105	3.574
P-Rückgewinnung	[Mg/a]	1.485	327	341	21	2.175
Rückgewinnungsquote	[%]	80,0	50,0	37,1	20,0	61,5

MonoV: Monoverbrennung; MitV: Mitverbrennung; V. unbek.: Verbrennungsweg unbekannt; Sonstiges: Landwirtschaft, Landbau und Sonstiges; Szenario 3- Rückgewinnungsquoten: Monoverbrennung notwendig bei > 35 g P/kg TM: 80 %; Rückgewinnung auf Kläranlage: 32 bis 35 g P/kg TM: 50 %, 20 bis 32 g P/kg TM: 20 bis 50 %, kleiner 20 g P/kg TM: 20 %

Wird die in der Prognose für 2025 ermittelte P-Fracht zugrunde gelegt, ergibt sich ein P-Rückgewinnungspotential für

- Szenario 1, 2025: 1.978 Mg P/a
- Szenario 2, 2025: 2.736 Mg P/a
- Szenario 3, 2025: 2.175 Mg P/a

2.2 Vergleich der ermittelten Klärschlammmenge, des P-Gehaltes sowie des P-Aufkommens im Bereich Mittelhessen zwischen den erhobenen Daten des ISA und der THM

Die Technische Hochschule Mittelhessen (THM) hat Daten über Klärschlammengen und Klärschlammanalysen von Kläranlagenbetreibern aus der Region Mittelhessen der Jahre 2015 bis 2017 ausgewertet.

Die Tabelle 3 stellt die durch die THM erhobenen Daten von verschiedenen Kläranlagen im Bereich Mittelhessen denen des ISA-Gutachtens (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016) gegenüber.

Tabelle 3: Vergleich der ermittelten Klärschlammmenge, des P-Gehaltes sowie des P-Aufkommens nach Erhebungen des ISA-Gutachtens sowie der THM

Kläranlage	GK	ISA (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016)			THM		
		Klärschlamm- menge	P- Gehalt	P-Aufkom- men	Klärschlamm- menge	P- Gehalt	P-Aufkom- men
		[Mg TS/a]	[% TM]	[Mg/a]	[Mg TS/a]	[% TM]	[Mg/a]
Selters	4	540	2,41	13	751	2,05	15
Fulda	5	2.218	2,86	64	2.580	2,97	77
Herborn	4	205	2,30	5	171	2,36	4
Hungen	4	923	2,98	28	684	3,90	27
Hünstetten	4	357	2,38	9	411	3,16	13
O.-Bessingen	4	439	2,73	12	0	-	0
Marburg	5	1.879	3,45	65	1.872	4,08	76
Usingen	4	488	3,20	16	505	3,38	17
Nidda	4	500	2,74	14	413	2,50	10
Kirchhain	4	1.067	1,81	19	978	2,51	25
Wetzlar	4	986	2,37	23	943	3,73	35
Dorlar	4	163	2,51	4	156	2,90	5
Gießen	5	3.174	5,28	168	3.416	3,31	113
Bad Nauheim	4	1.113	4,11	46	944	1,73	16
Büdingen	4	334	2,33	8	554	0,89	5
Butzbach	4	497	3,02	15	531	2,81	15
Lich	4	146	3,42	5	293	3,97	12
Lollar	4	869	2,52	22	836	1,69	14
Brechen	4	586	1,72	10	591	1,35	8
Braunfels	4	380	0,74	3	511	0,74	4
Haiger	4	612	1,05	6	620	1,05	7
Burgsolms	4	324	1,51	5	270	1,52	4
Summen		17.799		558	18.030		501

Alle aufgeführten 22 Kläranlagen sind im ISA-Gutachten als relevant für die Phosphorrückgewinnung identifiziert oder zumindest im Rahmen einer erweiterten Betrachtung als möglicherweise relevant eingestuft. Mit einer jährlichen Klärschlammmenge von etwa 18.000 Mg TM stehen diese für ca. 15 % des für ganz Hessen prognostizierten Klärschlammfalls, und mit einer aufsummierten Ausbaugröße von etwa 1,4 Mio. EW für ca. 14 % der vorhandenen Ausbaugröße in Hessen.

Der Vergleich der Daten ergibt bezüglich der Klärschlammmenge keine relevanten Unterschiede (17.799 gegenüber 18.030 Mg TM/a). Für das prognostizierte Phosphoraufkommen findet sich auf Grundlage der von der THM erhobenen Daten eine P-Menge von 501 Mg P/a, bei den Daten des ISA Aachen eine P-Menge von 558 Mg P/a. Dieses entspricht einem Überbefund von absolut 57 Mg P/a, entsprechend ca. 10 %.

Die Gründe für die Unterschiede in der Ermittlung der Phosphormenge in diesem Vergleich sind zum einen in einer nicht aktuellen Datenerhebung bezüglich der Klärschlammabfuhrungswege im ISA-Gutachten und zum anderen in nicht plausiblen, zum Teil sehr hohen P-Gehalten im Klärschlamm der verwendeten Daten des ISA-Gutachtens zu suchen.

Weiterhin wird auf der Kläranlage in Lich Ober-Bessingen seit 2015 eine Klärschlammvererdung zur Aufnahme des anfallenden Klärschlammes betrieben, womit die dort abgelagerte Phosphormenge zunächst der Rückgewinnung entzogen ist. Ob und wie der vererdete Klärschlamm zukünftig in eine Phosphorrückgewinnung gehen kann, kann derzeit nicht gesagt werden.

Im Fall der Kläranlage Gießen wird das mögliche P-Aufkommen im ISA-Gutachten mit 168 Mg P/a angenommen. Berechnet wird dieses mit einem P-Gehalt des anfallenden Klärschlammes von 5,3 % TM. Der langjährige P-Gehalt der Kläranlage Gießen liegt im Mittel bei einem P-Gehalt von 3,3 % TM. Nach den Daten der THM ergibt dies ein P-Aufkommen von 113 Mg P/a. Der Überbefund im ISA-Gutachten liegt allein bei der Kläranlage Gießen bei 55 Mg P/a.

2.3 Schlussfolgerung

Die Unsicherheiten, die bei der Ermittlung des Phosphorpotentials im Klärschlamm und des Potentials des rezyklierbaren Phosphors in den verschiedenen Szenarien auftreten, verdeutlichen, dass weiterer Untersuchungsbedarf über das tatsächliche Phosphor-Rückgewinnungspotential aus Klärschlamm in Hessen besteht.

Besonderer Handlungsbedarf ergibt sich aus den Änderungen in der Novelle der AbfKlärV von 2017. Aktuell ist für Kläranlagen ab einer Ausbaugröße von 100.000 EW ab dem Jahr 2029 und für Kläranlagen ab einer Ausbaugröße von 50.000 EW ab dem Jahr 2032 die bodenbezogene Verwertung untersagt.

Grundlage des ISA-Gutachtens war jedoch der Referentenentwurf zur Änderung der AbfKlärV aus dem Jahr 2015. In diesem wurden alle Kläranlagen der GK 4 erfasst, also ab einer Ausbaugröße von 10.000 EW. In der Novelle der AbfKlärV 2017 gilt dieses erst ab einer Ausbaugröße von 50.000 EW. Dies hat Auswirkungen auf das zur Verfügung stehende Phosphorpotential.

Erfahrungen aus der Bearbeitung der Machbarkeitsstudie „Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger und Phosphor-Ressource für Mittelhessen“ (Mittelhessische

Wasserbetriebe MWB der Stadt Gießen, noch unveröffentlicht), zeigen jedoch, dass auch Betreiber kleiner Kläranlagen, also solcher Anlagen, die nach der AbfKlärV 2017 noch bodenbezogen verwerten könnten, dazu neigen, sich Entsorgungsverbänden anzuschließen bzw. zukünftig als Entsorgungsweg die thermische Verwertung zu wählen. Grund hierfür dürften zum einen die Auflagen sein, die die novellierte Klärschlammverordnung 2017 und die Düngemittelverordnung 2017 vorgibt, zum anderen haben alle Kläranlagen unabhängig von ihrer Ausbaugröße als Klärschlammherzeuger spätestens bis zum 31. Dezember 2023 die geplanten und eingeleiteten Maßnahmen zur Sicherstellung der P-Rückgewinnung ab dem 1. Januar 2029 darzulegen. Dieses betrifft auch ein mögliches Konzept zur bodenbezogenen Verwertung. Dabei hat der Klärschlammherzeuger eine Vielzahl von Untersuchungspflichten, Anforderungen sowie Grenzwerte zu beachten:

- Klärschlammuntersuchung in Abhängigkeit von der anfallenden Klärschlammmenge auf Schwermetalle, organische Schadstoffe sowie Nährstoffgehalte
- Bestimmung der Bodenart vor der erstmaligen Aufbringung
- Bodenuntersuchung im Umfang wie bisher, nun in Abständen von 10 Jahren, erweitert um die Parameter Benzo[a]pyren und polychlorierte Biphenyle (PCB)
- Einhalten der Klärschlammgrenzwerte aus der AbfKlärV 2017 und DüMV 2017
- Beachten der Vorsorgegrenzwerte nach der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (Vorsorgewerte in Abhängigkeit von Bodenart und Humusgehalt)
- Erfüllen der Anforderungen an die Seuchen- und Phytohygiene nach DüMV
- Anzeigepflicht vor Ausbringung

Weiterhin ist eine bodenbezogene Verwertung auf Flächen in festgesetzten Wasserschutzgebieten der Zonen I bis III nicht mehr möglich. Hierzu gehören viele landwirtschaftliche Flächen in Hessen (z. B. im Vogelsbergkreis, Wetteraukreis, Kreis Marburg-Biedenkopf, Schwalm-Eder-Kreis, Hessisches Ried etc.), auf denen bisher noch Klärschlamm bodenbezogen verwertet wurde.

Auch der Einsatz von synthetischen Polymeren bei der Entwässerung stellt eine erhebliche Unsicherheit für den Entsorgungsweg der bodenbezogenen Verwertung dar. Aus der DüMV 2017 geht hervor, dass deren Einsatz nur noch zulässig ist, wenn sich diese zu mindestens 20 % innerhalb von zwei Jahren abbauen lassen. Wichtige Erkenntnisse dazu stehen aber noch aus. Für einzelne Polymere scheint dieser Nachweis zwar erbracht; ob dies aber für alle Polymere gilt und weiteren Untersuchungen Stand hält, bleibt abzuwarten.

Durch das limitierte Ausbringen von 170 kg/(ha*a) Gesamtstickstoff, geregelt in der DüV 2017, treten Klärschlämme in Konkurrenz um Agrarflächen mit Wirtschaftsdüngern, Gärresten aus Biogasanlagen und solchen aus der Bioabfallvergärung (DüV, 2017).

Es ist fraglich, ob unter diesen Umständen noch langfristige Entsorgungsverträge mit Besitzern entsprechender landwirtschaftlicher Flächen zu vereinbaren sind, die für die Klärschlammherzeuger eine Planungs- und Entsorgungssicherheit gewährleisten.

Klärschlämme aus kommunalen Kläranlagen haben häufig P-Gehalte über 20 g P/kg TM. Nach der Klärschlammverordnung (AbfKlärV 2017) Artikel 5 Nummer 4 § 3 Absatz 1 gilt ab einem P-Gehalt von 20 g P/kg TM die Regelung zur P-Rückgewinnung nach § 3a Absatz 1. Daraus folgt, dass für alle Anlagen, welche nicht bodenbezogen verwerten können, vor oder

nach einer thermischen Behandlung unabhängig von der Ausbaugröße der Kläranlage Phosphor aus dem Klärschlamm zurückgewonnen werden muss.

Das zwingt demzufolge auch Betreiber von Anlagen < 50.000 EW Ausbaugröße ab dem Jahr 2032 dazu, dieselben Regelungen bezüglich der Phosphorrückgewinnung einzuhalten, die für Anlagen > 50.000 EW Ausbaugröße gelten, sofern diese keine Möglichkeit zur bodenbezogenen Verwertung finden.

Alternativ kann der Betreiber einer solchen Anlage im Einzelfall auch mit Zustimmung der zuständigen Behörde nach Artikel 5 Nummer 4 § 3 Absatz 3 (AbfKlärV 2017) einen anderen Weg zur Entsorgung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes beschreiten, der keine Phosphorrückgewinnung aufweist. Es kann dann eine Entsorgung ohne P-Rückgewinnung erfolgen, zum Beispiel als Zusatzbrennstoff in der Zementindustrie, in Kohlekraftwerken oder in der Müllverbrennung.

Hiernach ergeben sich in diesem Fall für die Betreiber kleinerer und mittlerer Kläranlagen folgende Optionen (DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5, 2018):

- Phosphatabreicherung des Klärschlammes dezentral auf der Anlage, semizentral oder zentral im Verbund mit anderen Anlagen und anschließende thermische Entsorgung
- Andienung des Klärschlammes an eine Monoverbrennungsanlage mit nachgeschalteter P-Rückgewinnung oder Zwischenlagerung der Asche
- Aufbau einer eigenen thermischen Behandlungsanlage mit entsprechender Möglichkeit der P-Rückgewinnung
- Mit Zustimmung der Behörde nach § 3 Absatz 3 (AbfKlärV 2017) den Klärschlamm einem anderen Weg zur Entsorgung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zuzuführen

Wie im Kapitel 2.1.1 dargestellt, beträgt nach dem ISA-Gutachten, die Klärschlammmenge aus der Gruppe der als nicht relevant für die Phosphorrückgewinnung identifizierten Kläranlagen der GK1 und 2, die auch nach dem Referentenentwurf der AbfKlärV 2015 noch bodenbezogen verwerten dürfen, ca. 25.000 Mg TM/a. Das theoretische P-Potential innerhalb dieser Gruppe beträgt im ISA-Gutachten (Montag, Bastian & Pinnekamp, 2016) im Jahr 2025 etwa 400 Mg P/a. Annahmen über das heute erreichbare Rückgewinnungspotential aus dem Stoffstrom dieser Gruppe nach den Anforderungen der AbfKlärV 2017 (Verbot der bodenbezogenen Verwertung erst ab 50.000 EW Ausbaugröße und im Jahr 2032, Pflicht zur P-Rückgewinnung ab 20 g P/kg TM unabhängig von der Ausbaugröße beim Fehlen der bodenbezogenen Verwertung) sind nur sehr schwer zu treffen, da nicht absehbar ist, welcher Entsorgungsweg im Einzelnen mit der entsprechenden Rückgewinnungsquote beschritten wird.

Vorgeschlagen wird eine regelmäßige Erfassung und Auswertung von Klärschlammengen und deren Phosphor-Gehalt. Die Ermittlung der genauen Entsorgungswege aller Kläranlagen sollte ebenfalls periodisch erfolgen. Nur dadurch lässt sich das Phosphor-Rückgewinnungspotential durch die zukünftigen Entwicklungen auf den P-Gehalt der Klärschlämme, deren Menge sowie die Veränderungen der Entsorgungswege genauer abbilden.

Eine Neubewertung eines möglicherweise auch stärker regional ausgeprägten Entsorgungskonzeptes, kann erst auf der Grundlage aktuellerer Daten zur Bestimmung der Randbedingungen erfolgen.

Aufgrund der Vielzahl der sich möglicherweise veränderten Randbedingungen für Kläranlagen aller Größenklassen, sei es im Bereich der Entsorgungswege oder der Verbrennungs- und Behandlungskapazität, wird eine Verschmelzung der Szenarien 1 und 2 als wahrscheinliche Entwicklung angesehen.

Es ist also davon auszugehen, dass die Mitverbrennung und damit verbunden eine Abreicherung des nassen Klärschlammes auf den Kläranlagen zunehmen und auch der Bau weiterer Kapazitäten zur Monoverbrennung mit nachgeschalteter Aschebehandlung stattfinden wird. Die in der AbfklärV 2017 noch zulässige bodenbezogene Verwertung wird zurückgehen.

Die zu Verfügung stehende P-Rezyklatmenge wird aus Sicht der Unterzeichner aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten zwischen 2.200 Mg P/a und 2.800 Mg P/a im Jahr 2032 betragen. Dies entspricht einer Masse von 5000 Mg P_2O_5 /a bis 6400 Mg P_2O_5 /a als Phosphat.

3 Beschreibung der Produkte aus den aktuell wichtigsten Rückgewinnungsverfahren und Wege zur Entlassung aus dem Abfallrecht

Auf der Basis verfügbarer Literatur, Angaben des Landesbetriebs Hessisches Landeslabor LHL sowie bereits durchgeführter Pflanzversuche am Institut für Pflanzenernährung der Justus-Liebig-Universität werden die Pflanzenverfügbarkeit sowie die Schadstoffbelastung verschiedener P-Rezyklate bewertet.

3.1 Chemische Struktur und Beschreibung der P-Rezyklate

Phosphor wird von Pflanzen überwiegend je nach pH-Wert als H_2PO_4/HPO_4^{2-} (ortho-Phosphat), aufgenommen, während wiederum andere P-Formen nicht für diese verfügbar sind. Es liegt aber nur ein sehr geringer Anteil des Phosphats als ortho-P im Boden vor (Kratz, Adam & Vogel, 2018). Lediglich 15 bis 20 % des Phosphors nutzen die Pflanzen im Anwendungsjahr der Düngung aus, der Rest verbleibt, nach Abzügen der Verluste durch Auswaschung und Erosion, im Boden und steht in den nächsten Jahren zur Verfügung (Kratz & Schnug, 2009). Dieser Vorrat liegt zu einem großen Teil in anderen Verbindungen als ortho-P mit unterschiedlicher chemischer Löslichkeit vor. Die Löslichkeit dieses P-Vorrates hängt von der chemischen Struktur, der Bindungsform und vom Grad der Kristallinität ab. Weiterhin wirkt sich die Anwesenheit von Verbindungen anderer Elemente wie Al, Fe und Ca auf die Phosphorsorption bzw. -adsorption im Boden aus (Kratz, Adam & Vogel, 2018).

Je nach eingesetztem Verfahren zur P-Elimination in der Kläranlage kann Phosphor im Klärschlamm in anorganischer als auch in organischer Bindung vorliegen. Bei chemischer Fällung mit Fe- und Al-Salzen oder Calciumhydroxid werden vielfach anorganische P-Verbindungen vorliegen, während bei Anwendung der biologischen Phosphorelimination vor allem organische Verbindungen zu finden sind.

„Verarbeitete Materialien wie Klärschlammmaschen, Biokohlen und Fällungssalze enthalten in der Regel geringe Spuren organischer Reste, überwiegend liegt P in anorganischer Form vor. Die Art der Verarbeitung bestimmt, welche P-Formen entstehen. Durch thermische Behandlung des Schlammes (Verkohlung oder Veraschung) entstehen bei steigender Temperatur P-

Verbindungen mit zunehmenden Kristallisationsgrad. Bei Temperaturen > 1050 °C ist Apatit thermodynamisch stabil, während durch die Pyrolyse bei Temperaturen um 400 bis 500 °C auch weniger stabile Ca-Phosphate wie TCP (Tricalciumphosphat) und DCP (Tricalciumphosphat) gebildet werden. Je nach zugesetzten Additiven können neben reinen Ca-Phosphaten auch andere P-Formen entstehen“ (Kratz, Adam & Vogel, 2018).

Tabelle 4: Zusammenstellung verschiedener P-Rezyklate (Steckenmesser, Vogel & Stefens, 2016)

P-Verbindung	Pflanzenverfügbarkeit	Recyclingprodukt	Ausgangssubstrat	Verfahren	Name (bspw.)
Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP oder Struvit)	Sehr hoch	Vollaufgeschlossenes Salz	Abwasserstrom	MAP-Fällung	Airprex®
CaHPO ₄ ,	Sehr hoch	Vollaufgeschlossenes Salz	Unbehandelter Klärschlamm	Saurer Aufschluss mit H ₂ SO ₄ bzw. CO ₂ + Fällung mit MgO, NaOH, Ca(OH) ₂	ExtraPhos®, Stuttgarter Verfahren
Silicophosphat (ähnlich wie Thomasphosphat)	Mäßig	Schlacke	Klärschlamm-aschen, Karbonisate, unbehandelter Klärschlamm	Thermisch metallurgisches Verfahren: Schmelz-Vergasung bei 2.000 °C	Mephrec®
Ca ₅ (PO ₄) ₃ Cl und Mg ₃ (PO ₄) ₂	Auf sauren Böden hoch (pH 4,9), auf alkalischen Böden niedrig (pH 7)	Asche	Klärschlamm-aschen, Karbonisate, unbehandelter Klärschlamm	Thermochemische Behandlung bei 950 - 1.000 °C mit MgCl ₂	AshDec
CaNaPO ₄ und/oder Mischphosphate aus Ca, Na, Mg und K	Sehr hoch	Asche Karbonisat	Klärschlamm-aschen, Karbonisate, unbehandelter Klärschlamm	Thermochemische Behandlung bei 950 - 1.000 °C mit Na ₂ CO ₃ oder Na ₂ SO ₄	AshDec
Ca-Phosphate (Whitlockit) und Reste aus der Fällung (Fe- oder Al-Phosphate)	Mäßig bis gut	Karbonisat	Unbehandelter Klärschlamm	Pyrolyse Vergasung bei 550-700 °C	Pyreg®
Fe- oder Al-Phosphate	Uneinheitlich				P-Bac

3.1.1 Löslichkeit von P-Rezyklaten

In der EU-Verordnung über Düngemittel sowie in der Düngemittel-Verordnung (DüMV 2017) werden verschiedene Phosphat-Löslichkeitsprüfungen beschrieben, die je nach Düngertyp anzuwenden sind. Die Extraktionsversuche in verschiedenen Lösungsmitteln sollen das

Lösungsverhalten der Düngemittel im Boden, und damit der Pflanzenverfügbarkeit, abbilden (Kratz & Schnug, 2009). Der sofort verfügbare P-Anteil wird zum Beispiel durch die Wasserlöslichkeit beschrieben, andere Lösungsmittel sollen die Fähigkeit der Pflanzen abbilden, sich im Boden vorhandene Phosphatanteile verfügbar zu machen. Der Gesamt-P-Gehalt als Referenzpunkt wird mit Mineralsäure bestimmt (Umweltbundesamt, 2015).

Aus den Ergebnissen zu den Untersuchungen der chemischen Löslichkeit sind jedoch nur begrenzt Rückschlüsse auf die Pflanzenverfügbarkeit möglich. Einerseits handelt es sich um eine statische Methode, welche die komplexen Lösungsvorgänge von Phosphaten in der Beziehung zwischen Boden und Pflanzenwurzel nur begrenzt abbildet, andererseits schwankt die Zusammensetzung und Struktur (Korngröße) der Rezyklate im Darstellungsprozess. Auch dadurch werden sich unterschiedliche Löslichkeiten einstellen. Es ist aber dennoch möglich durch die Löslichkeitsversuche erste Rückschlüsse auf die Pflanzenverfügbarkeit zu erhalten (Kratz & Schnug, 2009) (Umweltbundesamt, 2015).

In Abbildung 4 bis Abbildung 7 finden sich die in der Literaturstudie von Kratz, Adam und Vogel (2018) gefundenen Ergebnisse zu Löslichkeitsversuchen verschiedener P-Rezyklate auf Basis zahlreicher Literaturangaben der letzten Jahre wieder. Unabhängig vom verwendeten Lösungsmittel weisen die Werte der Rezyklate in der Produktgruppe, wie auch im Vergleich untereinander, eine hohe Spannweite auf.

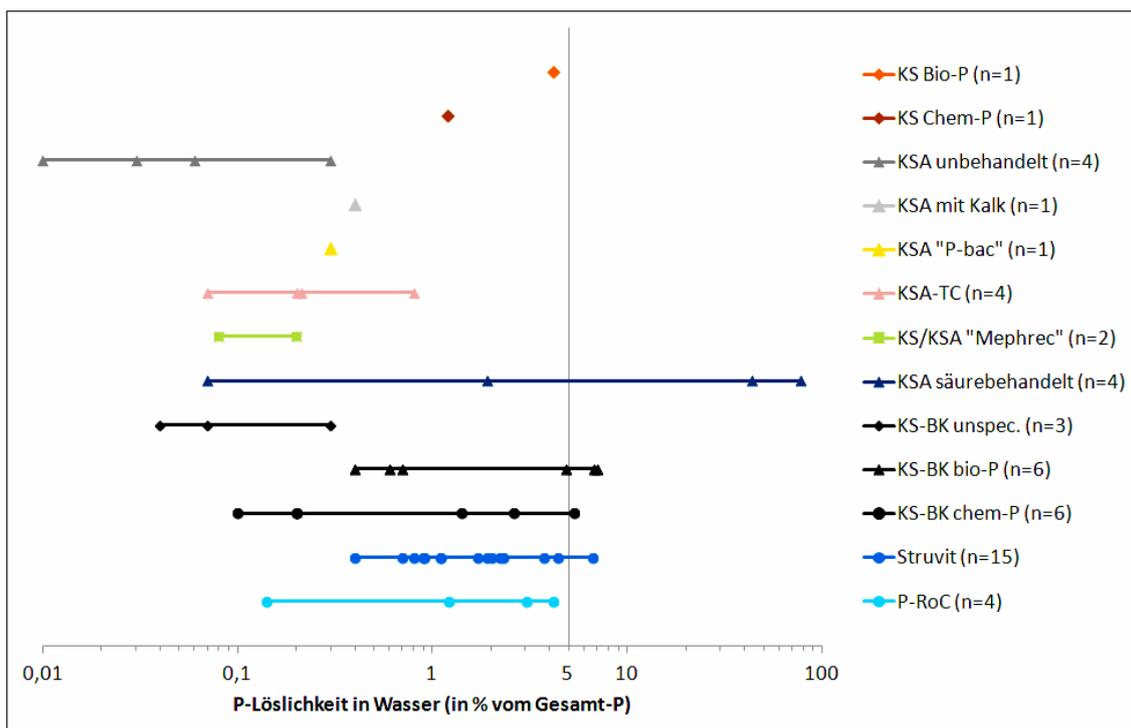


Abbildung 4: P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Wasser (Kratz, Adam & Vogel, 2018)

Die Wasserlöslichkeiten aller untersuchten Klärschlämme, Aschen und P-Rezyklate ist gering. Lediglich mit Säure aufgeschlossene Klärschlammmasche erreicht Werte, die mit denen von gut wasserlöslichen mineralischen P-Düngern vergleichbar sind.

In der nachfolgenden Abbildung 5 ist zu erkennen, dass im Vergleich zu unbehandeltem Klärschlamm die P-Löslichkeiten der untersuchten Rezyklate in Neutralammoniumcitrat (NAC) etwas geringer sind. Sie weisen aber dennoch ein mittleres bis hohes Niveau auf. Die Werte

haben aber ebenso innerhalb der Produktgruppen eine hohe Schwankungsbreite. Kratz, Adam und Vogel (2018) weisen aber darauf hin, dass durch NAC auch nicht pflanzenverfügbare P-Fractionen, wie zum Beispiel Fe-/Al-Phosphate, gelöst werden können. Dadurch kann der pflanzenverfügbare Anteil deutlich überschätzt werden.

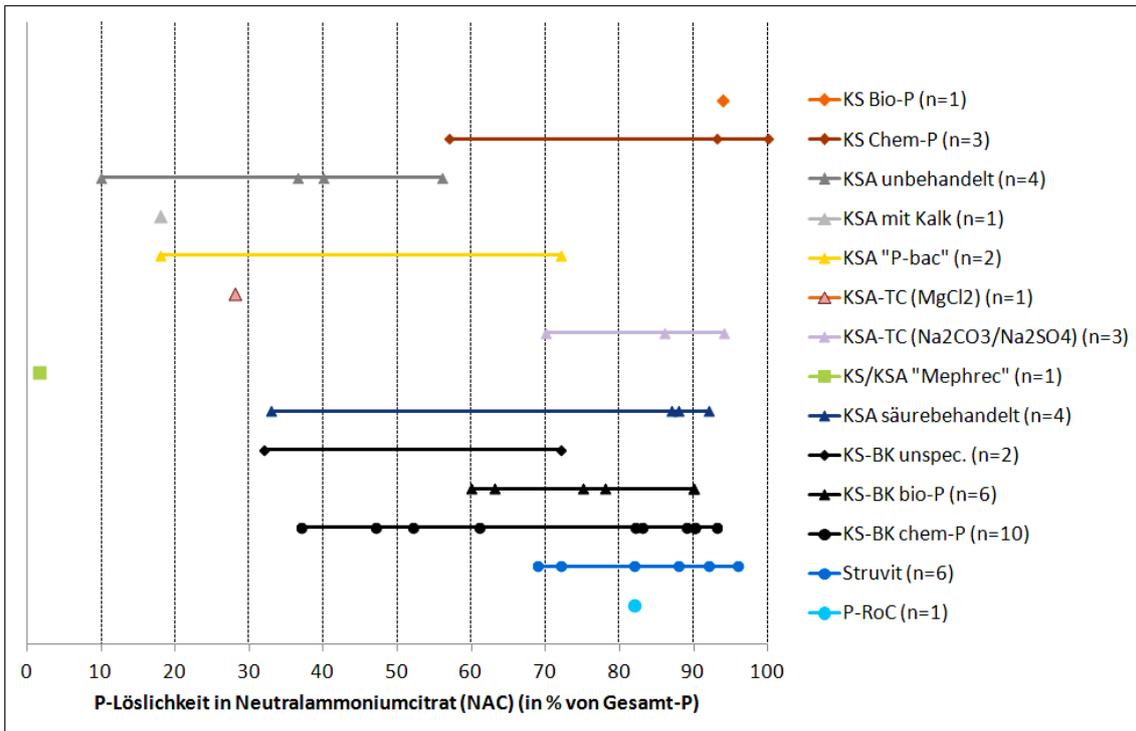


Abbildung 5: P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Neutralammoniumcitrat (NAC) (Kratz, Adam & Vogel, 2018)

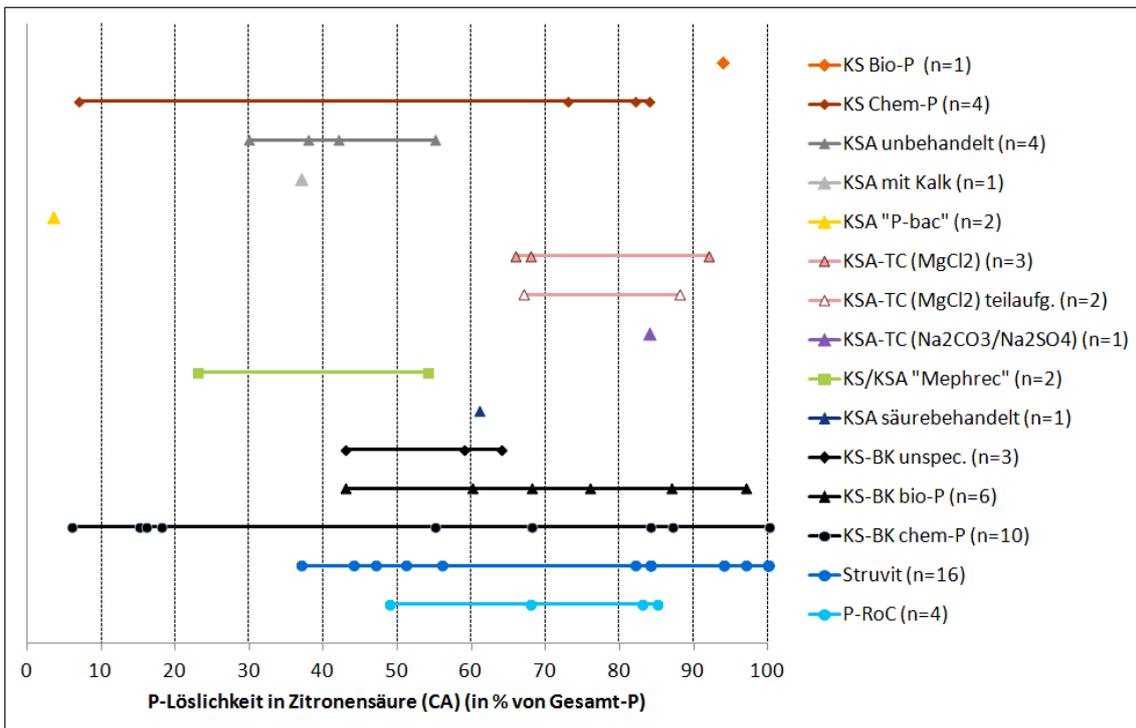


Abbildung 6: P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Zitronensäure (CA) (Kratz, Adam & Vogel, 2018)

Eine hohe Spannweite der Ergebnisse, auf insgesamt mittlerem bis hohem Niveau, weisen auch die P-Löslichkeiten der untersuchten Rezyklate in Zitronensäure auf (siehe Abbildung 6). Dieses gilt auch für die Werte innerhalb einer Produktgruppe. Es wird bei Kratz, Adam und Vogel (2018) darauf verwiesen, dass es auch bei diesem Lösemittelversuch zu Überbefunden kommen kann, da durch Zitronensäure zum Beispiel auch mehrbasische Ca-Phosphate wie Whitlockit – ein Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $\text{Ca}_9(\text{Mg,Fe})[\text{PO}_3\text{OH}](\text{PO}_4)_6$ -, aber auch Apatit – eine Sammelbezeichnung für eine Mineralgruppe mit der allgemeinen chemischen Formel $\text{Ca}_5[(\text{F,Cl,OH})](\text{PO}_4)_3$, in Lösung gehen, die nachgewiesenermaßen nicht pflanzenverfügbar sind.

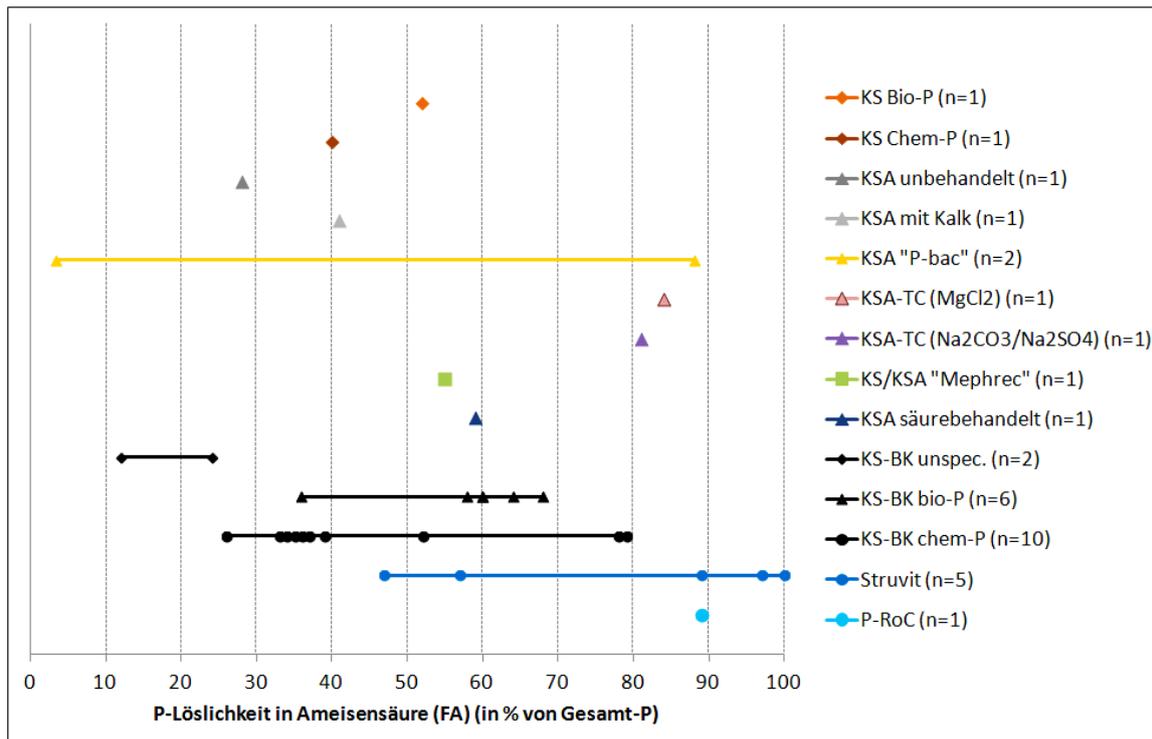


Abbildung 7: P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Ameisensäure (AS) (Kratz, Adam & Vogel, 2018)

„Die Löslichkeit von P-Rezyklaten in Ameisensäure (AS) wurde nur in wenigen Studien untersucht, insbesondere kam sie bei der Charakterisierung verschiedener Polyphosphate zum Einsatz. AS wird traditionell zur Differenzierung unterschiedlicher Rohphosphatqualitäten eingesetzt, da sie verschiedene Apatite in Abhängigkeit von deren Struktur und Stabilität unterschiedlich gut löst. Sie könnte daher brauchbar sein, um Rezyklate mit hohem Anteil derart stabiler Phosphate hinsichtlich ihrer Löslichkeit zu charakterisieren“ (Kratz, Adam & Vogel, 2018, S. 395).

Bei allen Extraktionsmitteln ist eine große Spannweite der Ergebnisse festzustellen, selbst innerhalb eines Rezyklattyps. Kratz, Adam und Vogel (2018) vermuten, dass auch innerhalb einer Produktgruppe eine starke Inhomogenität gegeben ist. Die Gründe liegen zum einen in der zeitlichen und räumlichen Variabilität des Ausgangsmaterials, beispielsweise des Klärschlammes, und zum anderen in den sich stetig verändernden Produktionsbedingungen durch die Weiterentwicklung der Behandlungsverfahren. Letztendlich nimmt sowohl die Korngröße als auch der Vermahlungsgrad Einfluss auf die Löslichkeit der P-Rezyklate.

3.1.2 Pflanzenverfügbarkeit/Agronomische Effizienz von P-Rezyklaten

Der Überbegriff „Pflanzenversuch“ umfasst einen weiten Bereich von Untersuchungsmethoden, die sowohl in Gefäßen als auch im Feld durchgeführt werden. In der Literaturstudie von Kratz, Adam und Vogel (2018) werden unter anderem verschiedene Variationen beim Versuchsdesign, insbesondere eine Vielzahl verschiedener Bodensubstrate und Substratgemische mit Unterschieden in Textur, Boden-pH-Wert, Gehalten an pflanzenverfügbarem P, Gehalten an organischer Substanz, aber auch unterschiedliche Topfgrößen und Substratmengen beschrieben. Auch die zur Untersuchung eingesetzten Pflanzen, die zugegebene Düngermenge - sowohl in Bezug auf den Zielnährstoff P als auch hinsichtlich der Basisdüngung mit anderen Pflanzennährstoffen - ändert sich in den Versuchsreihen. Weiterhin variiert mit der Versuchsdauer ein weiterer entscheidender Faktor. Entsprechend breit streuen die Ergebnisse und erschweren einen direkten Vergleich der Daten (Kratz, Adam & Vogel, 2018).

In der Literaturübersicht von Kratz, Adam und Vogel (2018) wird ein Überblick zum aktuellen Stand der Vegetationsversuche dargestellt. Die Wirksamkeit der P-Rezyklate wird anhand der Berechnung ihrer sogenannten relativen agronomischen Effizienz (RAE) beschrieben. Die RAE wird entweder auf Grundlage der Trockenmasseerträge oder der Pflanzenaufnahme von Phosphor wie folgt berechnet:

$$\text{RAE P brutto (\%)} = \frac{\text{P Aufnahme des Testdüngers} \times 100}{\text{P Aufnahme des Referenzdüngers}}$$

Oder

$$\text{RAE P netto (\%)} = \frac{(\text{P Aufnahme des Testdüngers} - \text{P Aufnahme der Null Variante}) \times 100}{(\text{P Aufnahme des Referenzdüngers} - \text{P Aufnahme der Null Variante})}$$

Zum Vergleich wird üblicherweise im Fall der P-Effizienz ein voll wasserlöslicher Mineraldünger, wie Triple-Superphosphat, herangezogen.

Das oben schon angesprochene Problem der hohen Spannbreite der Ergebnisse, auch innerhalb der einzelnen Gruppen der P-Rezyklate, stellt sich in den Abbildung 8 und Abbildung 9 dar.

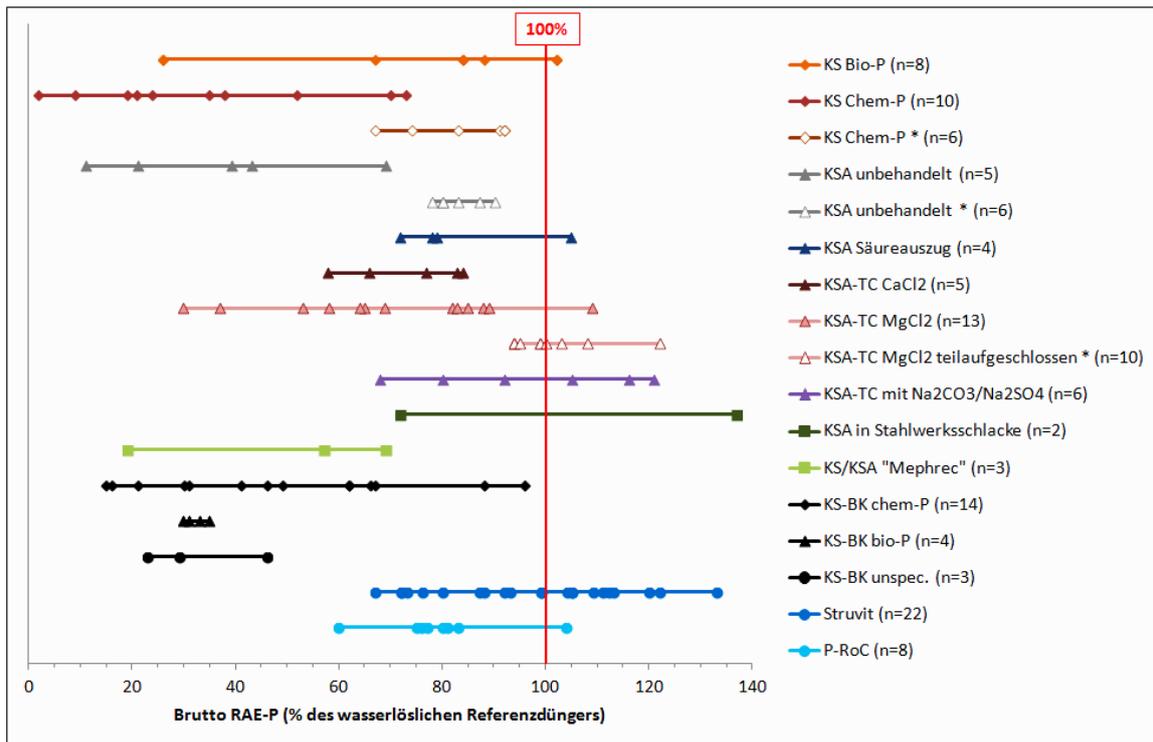


Abbildung 8: Relative agronomische Brutto-Effizienz (Brutto RAE-P) verschiedener P-Rezyklate (% des wasserlöslichen Referenzdüngers) (Kratz, Adam & Vogel, 2018)

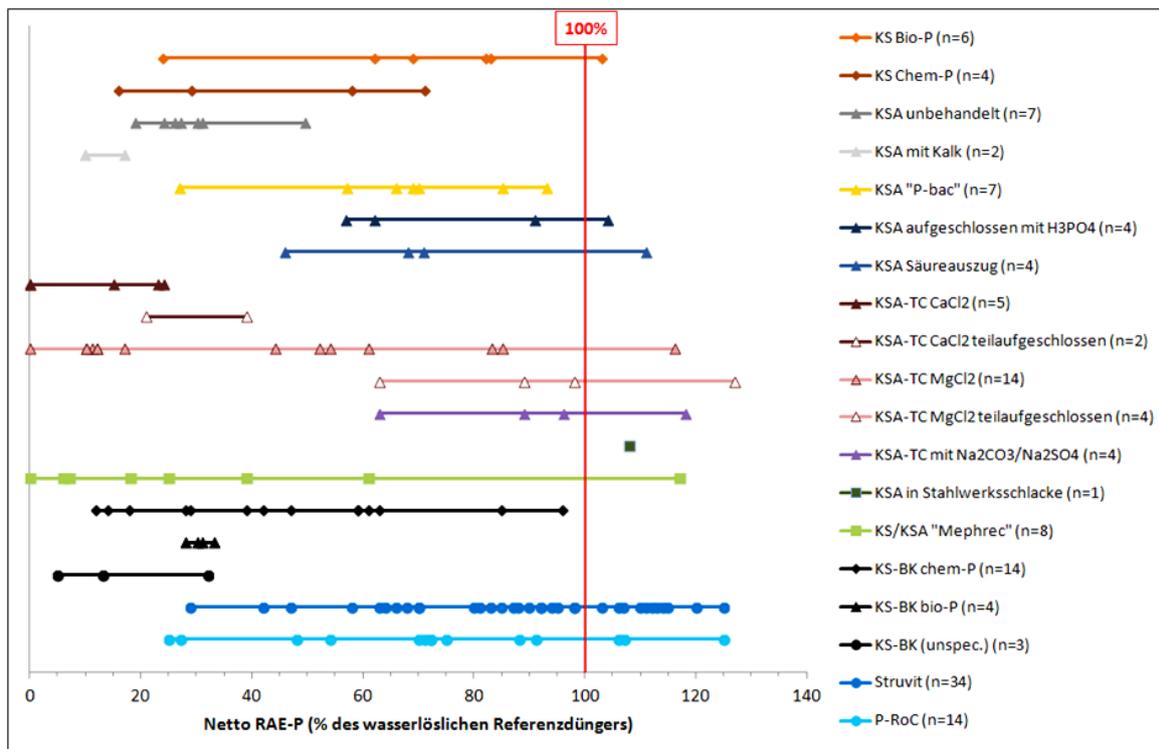


Abbildung 9: Relative agronomische Netto-Effizienz (Netto RAE-P) verschiedener P-Rezyklate (% des wasserlöslichen Referenzdüngers) (Kratz, Adam & Vogel, 2018)

Bereits beim Ausgangsmaterial Klärschlamm finden Kratz, Adam und Vogel (2018) eine erhebliche Spannweite der Ergebnisse. Schlämme aus Kläranlagen mit chemischer Fällung weisen erwartungsgemäß eine geringere Düngewirkung auf als solche aus Anlagen mit

vermehrter biologischer P-Elimination. Die hohe Varianz der Ergebnisse in diesen beiden Gruppen ist auf die schon angesprochenen Unterschiede in der Versuchsdurchführung als auch auf die Menge und Art, der zur Fällung eingesetzten Salze zurückzuführen.

Eine thermische Behandlung reduziert die RAE. Klärschlammaschen werden mit einer Spannweite von lediglich 10 bis 50 % RAE beschrieben und wiesen somit, im Vergleich zum Ausgangsmaterial Klärschlamm, deutlich eine geringere Düngereffizienz auf.

Erst durch eine thermochemische Nachbehandlung der Aschen (bei etwa 1.000 °C) mit $MgCl_2$, Na_2CO_3 oder Na_2SO_4 können der Mineraldüngung vergleichbare RAE erzielt werden.

Für die mit $MgCl_2$ behandelten Aschen gilt dies vorwiegend auf sauren Böden, wohingegen die mit Alkaliadditiven behandelten Erzeugnisse, unabhängig vom Boden-pH-Wert, eine hohe RAE aufweisen (Kratz, Adam & Vogel, 2018).

Steckenmesser, Vogel und Steffens (2016), führen in Ihrer Studie hierzu aus, dass sich thermochemische Verfahren auch untereinander stark unterscheiden. Phosphor in Klärschlammaschen, die mit $MgCl_2$ nach dem AshDec-Verfahren behandelt werden, wird meist als mäßig pflanzenverfügbar eingestuft. In Gefäßversuchen wurden Pflanzenverfügbarkeiten von 0 bis 67 % gefunden. Prinzipiell lässt sich ableiten, dass diese Produkte eher unter niedrigeren Boden-pH-Werten verfügbar sind und auf neutralen Böden schlechter wirken. Das AshDec-Verfahren mit Na_2CO_3 oder Na_2SO_4 wird bei einer Temperatur von ca. 950 – 1.000 °C unter oxidativen oder zur Schwermetallabreicherung unter reduktiven Bedingungen durchgeführt. Hierzu wird der zu behandelnden Asche oder dem eingehenden Substrat Na_2SO_4 als Additiv hinzugegeben. Die Na-Salze fungieren als Na-Donatoren und bilden, ähnlich dem Rhenania Dünger, $CaNaPO_4$, welches eine hohe Löslichkeit in Zitronensäure und Neutralammoniumcitrat aufweist. In Pflanzenversuchen im Rahmen des P-Rex Projekts konnte im Gegensatz zu den mit $MgCl_2$ behandelten Aschen eine deutlich bessere Verfügbarkeit, unabhängig vom Boden-pH-Wert, nachgewiesen werden.

Ebenfalls zu einer Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit führt eine Behandlung von Klärschlammaschen durch Säureaufschluss oder -auszug. Die von Kratz, Adam und Vogel (2018) beschriebenen Werte bezüglich der RAE liegen in etwa im Bereich der thermochemisch behandelten Aschen.

Im Fall von P-Rezyklaten, die aus Hochtemperaturverfahren (ca. 1.500 °C) stammen, sind die Ergebnisse nach Kratz, Adam und Vogel (2018) uneinheitlich. Während der Aufschluss von Klärschlammasche in Stahlwerksschlacken zu einer Erhöhung der Verfügbarkeit führt, zeigen die im Mephrec[®]-Verfahren erzeugten Rezyklate mit einer Spannweite von 0 bis >100 % RAE widersprüchliche Ergebnisse. Kratz, Adam und Vogel (2018) führen dies zum Teil auf die unter sehr unterschiedlichen Testbedingungen sowie die unterschiedlichen erzeugten Produkte bei der Weiterentwicklung der Verfahren zurück.

Bei den P-Rezyklaten, die durch Pyrolyse erzeugt wurden, wurde teilweise Soda als Additiv zugegeben bzw. wurden pyrolysierte Klärschlämme durch Nachveraschung mit und ohne Additive weiter behandelt. Kratz, Adam und Vogel (2018) beschreiben die erzielten Ergebnisse der Pyrolyseprodukte in ihrer Literaturstudie hinsichtlich ihrer Düngewirkung als gering bis mäßig. Steckenmesser, Vogel und Steffens (2016) hingegen stellen in ihrer Studie zwar eine mäßige kurzzeitige Verfügbarkeit fest, hingegen wird eine gute P-Nachlieferung festgestellt.

Die P-Pflanzenverfügbarkeit der P-Rezyklate aus der Pyrolyse ist, nach Steckenmesser, Vogel und Steffens (2016), maßgeblich vom Ausgangsklärschlamm abhängig, da die dort enthaltenen Phosphate (Aluminium-, Eisen- oder Calciumphosphate) nur wenig verändert werden. Generell nehmen organische und wasserlösliche Phosphate zu Gunsten von Calciumphosphaten (wie Whitlockit) ab.

Für P-Rezyklate, wie Struvit (MAP) oder Produkte aus dem *P-RoC*-Verfahren, die direkt bei der Abwasserreinigung oder Klärschlammbehandlung als Fällungsprodukte anfallen, werden gute bis sehr gute Werte für die Düngereffizienz beschrieben. Allerdings weisen die Daten eine sehr breite Spannweite auf, die sowohl auf Produkte aus verschiedenen Anlagen als auch Produkte aus demselben Verfahren betrifft. Neben den schon beschriebenen Unterschieden beim Versuchsdesign der Vegetationsversuche, nehmen die Qualitätsschwankungen des Klärschlammes sowie Änderungen der Produktionsbedingungen beim Fällungsprozess Einfluss, welche die Eigenschaften des Fällungsproduktes zum Teil erheblich verändern (Kratz, Adam & Vogel, 2018).

3.1.3 Schwermetallgehalte und organische Schadstoffbelastung von P-Rezyklaten

In Klärschlamm und Klärschlammaschen können sowohl anorganische Schadstoffe wie Schwermetalle als auch organische Schadstoffe wie Dioxine, polychlorierte Biphenyle (PCB), dioxinähnliche PCB (dl-PCB), perfluorierte Tenside (PFT) sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) enthalten sein. Das gilt auch für die daraus gewonnenen P-Rezyklate. Da eine potenzielle Gefahr der Anreicherung im Boden und somit in der Nahrungskette besteht, müssen für ausgebrachte Dünger Schadstoffgrenzwerte eingehalten werden. Diese Grenzwerte werden sowohl in der Düngemittelverordnung (DüMV, 2017) als auch in der Klärschlammverordnung (AbfKlärV, 2017) und als Vorsorgewerte in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 2017) benannt. Im Zuge der Novellierung der Klärschlammverordnung wurden die Grenzwerte sowohl für organische als auch für anorganische Inhaltsstoffe angepasst bzw. erweitert.

Tabelle 5 zeigt die verschiedenen Grenzwerte nach AbfKlärV (1992), DüMV (2017), der Novelle der AbfKlärV aus dem Jahr 2017 sowie Vorsorgewerte nach Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (2017). Für Uran, das in immer höheren Konzentrationen in Phosphaterzen der Lagerstätten auftritt, ist kein Grenzwert festgelegt.

Tabelle 5: Grenzwerte für die bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen nach AbfKlärV 1992 sowie nach deren Novellierung 2017 und nach DüMV 2017 (Eigene Darstellung)

Parameter	gemäß AbfKlärV 1992	gemäß DüMV 2017	gemäß AbfKlärV 2017
	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]
As	-	40	40 ^{*)}
Pb	900	150	150 ^{*)}
Cd	10	1,5 50 mg/kg P ₂ O ₅	1,5 ^{*)} 50 mg/kg P ₂ O ₅
Cr	900	-	-
Cr ^{VI}	-	2	2 ^{*)}
Cu	800	-	900 ^{*)}
Ni	200	80	80 ^{*)}
Hg	8	1,0	1,0 ^{*)}
Tl	-	1,0	1,0 ^{*)}
Zn	2.500	5000	4.000
Fe	-	-	lediglich bestimmen
PFT Summe aus PFOA und PFOS	-	0,1	0,1 ^{*)}
Summe der Dioxine (PCDD/PCDF) und dl PCB	-	30 ng/kg TM	30 ng/kg TM ^{*)}
PCB	Humusgehalt >8% ^{***)}	0,2	0,1 ^{**)}
	Humusgehalt >8% ^{***)}		0,05 ^{***)}
PCDD/PCDF	100 ng/kg TM	-	-
AOX	500	-	400
B[a]P	Humusgehalt >8% ^{***)}	-	1,0 ^{**)}
	Humusgehalt <8% ^{***)}		0,3 ^{***)}

^{*)} Werte werden nicht in der AbfKlärV beschrieben, sondern es wird auf das Düngemittelrecht verwiesen

^{**)} Werte werden nicht in der AbfKlärV beschrieben, sondern es wird auf die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 2017) verwiesen

^{***)} Eigene Einfügung aus (BBodSchV, 2017)

In einer Studie des Umweltbundesamtes, „Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz“ (2015), wird beschrieben, dass sich die Belastung von Klärschlämmen mit Schwermetallen für die meisten Parameter in den letzten Jahrzehnten deutlich reduziert hat. Bei den landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämmen liegen die Schwermetallgehalte zum

Teil deutlich unter den Grenzwerten der für diesen Stoffstrom damals geltenden AbfKlärV 1992. Etwa 80 % der verwerteten Schlämme halten die strengeren Regelungen der DüMV 2017 ein.

Die Schwermetallbelastung von Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung wird durch eine umfangreiche Untersuchung ebenfalls in dem Bericht des Umweltbundesamtes, beschrieben. Dabei wurden Aschen von 24 der 26 in Deutschland bestehenden Anlagen analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die Schwermetallgrenzwerte der DüMV 2017 nicht immer eingehalten werden konnten. Bei ca. 2/3 der Aschen war der Grenzwert für ein Metall oder mehrere Metalle überschritten. Diese Überschreitung gilt insbesondere für Klärschlämme/Aschen, die aus Kläranlagen mit höherem industriellen Abwasseranteil stammen (Umweltbundesamt, 2015).

Hingegen finden sich im Abschlussbericht „Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen“ des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2015) deutlich weniger Überschreitungen der Schwermetallgrenzwerte in den dort untersuchten Klärschlammaschen. Untersucht wurden Aschen kommunaler Klärschlämme aus Monoverbrennungsanlagen in Bayern und Baden-Württemberg.

Tabelle 6: Schwermetallgehalte der Klärschlammaschen aus untersuchten Monoverbrennungsanlagen in Bayern und Mediane der Schwermetallgehalte von Klärschlammaschen in Deutschland

Herkunft	n	Cr _{ges}	Ni	Cu	Hg	Zn	Pb	As	TI	Cd	
		[mg/kg TM]										[mg/kg P_{2}O_{5}]
KAk ¹⁾	1	114	74,4	685	0,43	2.717	146	14,2	0,3	-	14,8
München ¹⁾	3	75	46,1	718	0,01	2.710	97	15,5	0,37	-	14,3
Neu-Ulm ¹⁾	4	99	70,3	739	0,44	2.234	98	13,6	0,34	-	16,0
Altenstadt ¹⁾	4	88	55,7	555	0,01	1.794	70	9,6	0,07	-	7,5
Straubing ¹⁾	3	76	57,8	460	<0,01	1.746	45	6,7	0,16	-	6,2
Balingen ¹⁾	2	149	53,4	949	<0,01	1.909	73	10,8	0,24	-	0,9
KAi_I ¹⁾	1	85	52,8	114	0,04	2.448	18	6,4	<0,01	-	16,6
KAi_II ¹⁾	1	79	99,7	473	0,09	3.888	103	8,1	0,23	-	13,3
Klärschlammaschen in Deutschland ²⁾ (Mediane)	n.b.	160	74,8	785	0,5	2.534	117	-	-	2,7	-
Grenzwerte gemäß DÜMV, 2017 / AbfKlärV, 2017	-	-	80	900	1	4.000	150	40	1	1,5	50

1) (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015); 2) (DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1, 2018)

„Die Proben umfassen kommunale Klärschlammaschen aus den bayerischen Monoverbrennungsanlagen Altenstadt (Rostverbrennung), München, Neu-Ulm (Wirbelschichtverbrennung) und Straubing (Rostverbrennung). Weiterhin wurden zwei kommunale Klärschlammaschen (Wirbelschicht) aus Balingen (Vergasung BL) und einer baden-württembergischen Großstadt (Verbrennung KAk) untersucht. Zwei Proben aus bayerischen Verbrennungsanlagen

(Wirbelschicht KA_i_I, KA_i_II) mit einem hohen Industrieschlammanteil rundeten das Untersuchungsprogramm ab“ (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2015, S. 47).

Die Werte aus den Einzelanalysen sowie die Mittelwerte aus den mehrfach durchgeführten Analysen der Schwermetallgehalte in den untersuchten Klärschlammaschen werden in Tabelle 6 wiedergegeben. Alle Mittelwerte aus den Untersuchungen des Abschlussberichtes des Landesamtes für Umwelt Bayern sowie die Werte aus den Medianen der Klärschlammaschen im Bericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1, unterschreiten, bis auf Cadmium, die Grenzwerte für Schwermetalle aus der DüMV 2017 und der AbfKlärV 2017.

Überschreitungen der Grenzwerte zeigen sich in den Untersuchungen des Landesamtes für Umwelt Bayern (2015) für Nickel im Fall einer Einzelprobe aus der Anlage KA_i_II, mit 99,7 mg/kg TM und bei einer Einzelprobe der Anlage Neu-Ulm mit 82,6 mg/kg TM. Der Grenzwert für Kupfer wird bei beiden Proben in der Verbrennungsanlage Balingen mit 942 mg/kg TM sowie mit 956 mg/kg TM überschritten.

Es kann aus diesen Ergebnissen nicht geschlossen werden, dass die Schwermetallgehalte in Klärschlammaschen aus der Monoverbrennung die Grenzwerte deutschlandweit, regelmäßig unterschreiten.

Da eine direkte Verwertung der Aschen aufgrund ihrer schlechten Löslichkeit und ihrer geringen Düngewirksamkeit (siehe Kapitel 3.1.1 und in Kapitel 3.1.2) ohnehin nicht empfohlen wird, kann im Rahmen einer weiteren Aufarbeitung eine Schwermetallentfrachtung mit vorgesehen werden. Um einerseits die Schwermetallgehalte abzusenken und andererseits die Pflanzverfügbarkeit des Phosphats zu erhöhen, wurden verschiedene Verfahren zur Behandlung von Klärschlammaschen entwickelt.

Saure Extraktionsverfahren können die in Klärschlammaschen enthaltenen Phosphate zu Phosphorsäure umsetzen. Phosphorsäure wiederum ist ein vielseitig einsetzbares Produkt, mit dem unter anderem auch Düngemittel, wie Ammoniumphosphat oder Triplesuperphosphat, hergestellt werden können. Bei diesen Verfahren ist es möglich, Schwermetalle durch Fällung oder durch z. B. Ionentauscher abzuscheiden. Neben den nasschemischen Ansätzen wurden auch thermische Verfahren zur Behandlung von Klärschlammaschen entwickelt. Die Umwandlung der Phosphatphasen findet durch die hohen Temperaturen und die stark reduzierenden oder oxidativen Bedingungen, die auf die Asche einwirken, statt. Leicht flüchtige Schwermetalle wie Cadmium, Blei und Quecksilber aber auch schwerer flüchtige Schwermetalle wie Zink und Kupfer (Steckenmesser, 2017) gehen bei Zugabe von Chloriden bei hohen Temperaturen in die Gasphase über und können so abgetrennt werden (Umweltbundesamt, 2015). Verfahrensbedingt enthalten solche Rezyklate höhere Gehalte an schwerflüchtigen Schwermetallen wie Nickel, Chrom und Zink (Steckenmesser, 2017).

Ein weiteres Aschebehandlungsverfahren stellt das P-Bac-Verfahren dar. Dabei werden in einem Schwefelsubstrat schwefeloxidierende sowie phosphatanreichernde Mikroorganismen kultiviert. Die dabei entstehende Schwefelsäure dient als Laugungslösung für die Asche und der rückgelöste Phosphor wird von phosphatakkumulierenden Mikroorganismen aufgenommen (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2015).

Die Schwermetallgehalte des in der Regel aus Klärschlamm oder dem Schlammwasser gefällten/kristallisierten Struvits (MAP) sind im Vergleich zu anderen Rezyklaten im Allgemeinen als sehr gering einzustufen. Nachteilig ist hier die bei nahezu allen Verfahren zwingende

Voraussetzung einer vermehrten biologischen Phosphorelimination (Bogner & Ortwein, 2018) (Adam, 2018). Auch ist die Rückgewinnungsrate, bezogen auf die P-Fracht im Zulauf, eher als gering einzuschätzen. Diese Umstände stellen hohe Hindernisse bei der Implementierung dieser Verfahrenstechnik auf den Kläranlagen dar. Die verschärften Überwachungswerte bzgl. P_{ges} lassen sich mit der vermehrten biologischen Phosphorelimination allein nicht sicher einhalten. Ausgenommen von diesen Hindernissen sind das Stuttgarter Verfahren und das Extra-Phos[®]-Verfahren. Diese haben nicht zwingend Bio-P als Voraussetzung zur Phosphorelimination und weisen zudem eine höhere Rückgewinnungsrate auf. Bezüglich der Rückgewinnungsrate gilt das auch für das CalPrexTM-Verfahren.

In der Tabelle 7 sind die Schwermetallgehalte von verschiedenen Rückgewinnungs- und Aschebehandlungsverfahren angegeben. Die Daten beziehen sich auf einzelne Literaturstellen und spiegeln in einigen Fällen nur Betriebszustände von Versuchsanlagen mit wenigen Datenpunkten wieder. Die Werte sind zusammengefasst aus dem Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 und dem Abschlussbericht „Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlamm“ des Bayerischen Landesamtes für Umwelt von 2015 entnommen. Weiterhin gehen dort Untersuchungsergebnisse von Einzelproben aus dem Abschlussbericht des Landesbetriebs Hessisches Landeslabor „Bestimmung der Pflanzenverfügbarkeit von ausgewählten Recycling-Phosphaten aus Klärschlamm und Klärschlammaschen“ aus dem Jahr 2017 ein.

Tabelle 7: Schwermetallgehalte verschiedener Rezyklate aus Abwasser / Schlammwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche

Rezyklat	Cr _{ges}	Ni	Cu	Hg	Zn	Pb	Cd	
	[mg/kg TM]							[mg/kg P ₂ O ₅]
Struvit gefällt ¹⁾	15,7	8,99	32,1	0,84	74,3	21,1	<0,1	-
Struvit kristallisiert ¹⁾	5,4	2,9	7,8	0,33	<59	9	<0,1	-
Mephrec [®] 2008 ¹⁾	83	20	97	<0,1	79	20	<0,1	-
Ash Dec ¹⁾	127	56	601	0,3	1.710	60	0,3	-
Aschenaufschluss mit Konverterschlacke ¹⁾	-	24	60	<0,2	199	<5	<0,5	-
Stuttgarter Verfahren ¹⁾	0,58	1,3	1,54	-	15,8	0,2	0,07	-
thermoch. Behandlung ²⁾	129	60	579	<0,01	960	16	0,36	-
therm. Behandlung / Pyrolyse v. KS ²⁾	67	49	477	<0,01	2.600	113	1,51	-
P-Bac ³⁾	51	4,44	114	0,12	131	20	-	0,88
RecoPhos ³⁾	71	46,9	464	0,11	1.434	75,3	-	4,8
Grenzwerte gemäß DÜMV 2017/AbfKlärV 2017	-	80	900	1	4.000	150	1,5	50

1) (DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1, 2018); 2) (Schaaf, 2018); 3) (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015)

Im Klärschlamm nachweisbare organische Schadstoffe sind u.a. polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F), Halogen- und metallorganische Verbindungen sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Neben Tensiden wurden in jüngster Zeit Arzneimittel und endokrine wirksame Stoffe diskutiert.

Die Verbrennung von Klärschlamm führt zu einer weitgehenden Eliminierung von organischen Schadstoffen. Bisher gibt es keine Ergebnisse oder Erkenntnisse, die darüber Auskunft geben, ob Verbrennungsprodukte wie PCDD/F und PAK entstehen (Umweltbundesamt, 2015).

Auch im Abschlussbericht des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2015) kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die thermische Behandlung, vor allem wenn die Verbrennung der Klärschlämme entsprechend den Vorgaben der 17. BImSchV erfolgt, die organischen Schadstoffe mineralisiert und damit dieses Schadpotential deutlich vermindert.

Über eine mögliche Neuentstehung von Verbrennungsprodukten wie PCDD/F oder PAK in Klärschlammverbrennungsanlagen und bei der thermischen Nachbehandlung der Aschen liefert diese Studie aber keine Erkenntnisse. So wurden in Klärschlammaschen und auch P-Rezyklaten unterschiedlicher Entstehungs- oder Verfahrensweise organische Schadstoffe gefunden. Selbst in einem P-Rezyklat, das aus einem Rückgewinnungsverfahren aus nassem Klärschlamm stammt, wurden Dioxine und PAK nachgewiesen. Insgesamt wurden zehn Klärschlammasche- und neun Recyclingproben auf polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe ($\Sigma 16$ PAK nach EPA), polychlorierte Dibenzop-dioxine/-furane ($\Sigma 17$ PCDD/F) und dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle ($\Sigma 12$ dl-PCB) untersucht. Bei den Rezyklaten handelt es sich vielfach um Produkte, die aus Anlagen im Entwicklungsstadium stammen. Die Autoren dieses Abschlussberichts gehen davon aus, dass sich die Produkteigenschaften bei einem Scale-up mit Optimierung und Übergang vom diskontinuierlichen in den kontinuierlichen Betrieb durchaus ändern können. Dies gilt auch für die Düngermischungen (KA_M1 bis 3), welche aus oder mit Klärschlammaschen hergestellt worden sind (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015).

In der Tabelle 8 sind die Untersuchungsergebnisse für die Klärschlammaschen und in Tabelle 9 für die Recyclingprodukte dieses Abschlussberichts dargestellt.

Tabelle 8: Summengenhalte an PAK, PCDD/F und dl-PCB (nach den Toxizitätsäquivalenten der WHO bewertet) in den Klärschlammaschen im Vergleich zu den (PCDD/F + dl-PCB)-Grenzwerten der Düngemittelverordnung (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015)

Klärschlamm-asche	Probe	Σ PAK	Σ PCDD/F + dl-PCB	Anteil PCDD/F	Anteil dl-PCB
		[mg/kg TM]	[ng WHO-TEQ/kg TM]	[%]	[%]
KA _k	1	13,28	0,01	2	98
München	1	13,32	0,05	88	12
Neu-Ulm	1	14,75	0,35	98	2
Altenstadt	1	9,97	0,08	88	12
Altenstadt	2	12,00	0,45	65	35
Straubing	1	17,49	1,21	81	19
Balingen	1	1,50	0,04	54	46
Balingen	2	14,57	0,09	83	17
KA _{i,I}	1	0,97	8,09	99	1
KA _{i,II}	1	10,83	1,56	99	1
Grenzwerte gemäß DÜMV 2017/AbfKlärV 2017	-	-	30	-	-

Die PAK-Summenwerte der Klärschlammaschen liegen zwischen 1 und 18 mg/kg TM. Die Komponente Benzo[a]pyren war bei einer Bestimmungsgrenze von 0,17 mg/kg TM in keiner Probe nachweisbar. Der in der Tabelle 5 aufgeführte, aus der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung stammende Vorsorgewert von 0,3 mg/kg TM bei Humusgehalten von $\leq 8\%$, wird unterschritten. Die Dioxine/Furane und dl-PCB der kommunalen Klärschlammaschen betragen maximal 1,21 ng WHO-TEQ/kg TM und schöpfen den Grenzwert zu maximal 4 % aus. Der Anteil der PCDD/F an dem gewichteten Summenwert liegt in der Mehrzahl der Fälle bei über 85 %.

Tabelle 9: Summengehalte an PAK, PCDD/F und dl-PCB (nach den Toxizitätsäquivalenten der WHO bewertet) in den Recyclingprodukten im Vergleich zu den (PCDD/F + dl-PCB)-Grenzwerten der Düngemittelverordnung (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2015)

Rezyklat	Probe	Σ PAK	Σ PCDD/F + dl-PCB	Anteil PCDD/F	Anteil dl-PCB
		[mg/kg TM]	[ng WHO-TEQ/kg TM]	[%]	[%]
AirPrex	1	14,66	3,41	95	5
P-RoC	1	5,72	0,59	30	70
Stuttgarter-Verfahren	1	11,14	0,28	63	37
AshDec	1	2,05	1,82	93	7
P-Bac	1	12,69	0,07	6	94
RecoPhos	1	7,34	0,25	95	5
KA_M1	1	14,76	0,18	42	58
KA_M2	1	4,55	0,2	31	69
KA_M3	1	4,1	0,1	92	8
Grenzwerte gemäß DÜMV 2017/AbfKlärV 2017	-	-	30	-	-

Die Summengehalte an PAK sämtlicher Recyclingdünger bewegen sich in der gleichen Größenordnung von maximal 15 mg/kg TM wie die Werte der Klärschlammaschen. Ebenso wie bei den Klärschlammaschen war die Komponente Benzo[a]pyren in keiner Probe nachweisbar.

Die Summengehalte an PCDD/F und dl-PCB bei den Recyclingdüngern sind tendenziell höher als bei den kommunalen Klärschlammaschen und erreichen mit maximal 3,4 ng WHO-TEQ/kg TM im Fall eines MAP-Rezyklats. Das entspricht einer Ausschöpfung des Grenzwertes von 11 % (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2015).

Auch im Abschlussbericht des Landesbetriebs Hessisches Landeslabor „Bestimmung der Pflanzenverfügbarkeit von ausgewählten Recycling-Phosphaten aus Klärschlämmen und Klärschlammaschen“ werden Einzelproben von Rezyklaten aus den Verfahren untersucht. Dabei handelte es sich um ein Rezyklat aus nasschemischem Aufschluss, zwei Rezyklaten aus thermochemischen Behandlungsverfahren bei höherer Temperatur und einem Rezyklat aus einem thermischen Behandlungsverfahren bei niedrigerer Temperatur (Pyrolyse). In den vorliegenden Proben wurden weder perfluorierte Verbindungen noch Benzo[a]pyren oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen. Die Bestimmungsgrenze lag für perfluorierte Verbindungen bei 0,10 mg/kg TM und für Benzo[a]pyren bei 0,05 mg/kg TM (Schaaf, 2018).

Hingegen weist Steckenmesser (2017) nach, dass bei der thermochemischen Behandlung von Klärschlämmen PAK wie z. B. Naphthalin entstehen oder verbleiben können.

3.1.4 Schlussfolgerung

Die Löslichkeiten von P-Rezyklaten schwanken nicht nur in Abhängigkeit des angewendeten Verfahrens, sondern auch innerhalb eines Rezyklattyps. Dabei lässt sich oft nicht erkennen, ob es sich um unterschiedliche Chargen aus dem gleichen Rückgewinnungsprozess oder um Chargen aus zum Teil modifizierten Prozessen mit gleicher Bezeichnung handelt. Auch wenn die Zeiträume der Untersuchungen eng zusammen liegen, lässt sich aus den Angaben nicht eindeutig nachvollziehen, ob die untersuchten Rezyklate aus exakt den gleichen Herstellungsverfahren stammten (Umweltbundesamt, 2015). Ferner ist zu berücksichtigen, dass bei vielen Untersuchungen nicht immer die Korngröße der untersuchten Rezyklate angegeben ist. Im Bericht des UBA (Umweltbundesamt, 2015) werden jedoch bei Rezyklaten unterschiedliche P-Löslichkeiten in Abhängigkeit von der Korngröße des Materials beschrieben.

Auch Kratz, Adam und Vogel (2018) sehen in der Heterogenität der P-Rezyklate, selbst innerhalb einer Gruppe, einen wichtigen Grund für die große Spannweite der Werte in den Löslichkeitsversuchen, wie auch in den Vegetationsversuchen. Ihrer Vermutung nach liegt hier einer der Gründe dafür, dass auch nicht alle Studien eine signifikante Korrelation zwischen chemischen Lösungsverhalten und Pflanzenaufnahme im Vegetationsversuch feststellen. Einen weiteren Grund sehen sie in der Natur der Versuche zur Löslichkeit gegeben. Durch den statischen Versuchsaufbau ist es nicht möglich die komplexen Vorgänge von Lösung, Festlegung als auch Transport eines Nährstoffs im Boden abzubilden. Ihrer Meinung nach gilt dieses aber strenggenommen nicht ausschließlich für P-Rezyklate, sondern auch für mineralische Düngemittel.

Aufgrund der wenigen und, wegen ihrer Verschiedenheit, schwer miteinander zu vergleichenden Untersuchungen, ist eine Beurteilung der P-Rezyklate im Hinblick auf die Löslichkeit und die Düngeneffizienz nur eingeschränkt möglich. Auch durch die Weiterentwicklung der Behandlungsverfahren entstehen ständig veränderte P-Rezyklate mit anderen Zusammensetzungen und Eigenschaften.

Zusammenfassend lässt sich bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit Folgendes feststellen:

- Nach P-Rezyklartart:

– MAP/Struvit	hoch bis sehr hoch
– Mg-Phosphate	mittel bis hoch
– Ca-Phosphate	gering bis hoch
– Fe-/Al-Phosphate	gering

- Nach Herstellungsverfahren:

– Fällungs-/Kristallisationsprodukte	mittel bis hoch
– Klärschlammasche (säurebehandelt)	mittel bis hoch
– Klärschlammasche (Th.-chem., alkalisch)	mittel bis hoch
– Klärschlammasche (Th.-chem., CaCl ₂)	gering bis mittel
– Klärschlammasche (unbehandelt)	gering

Bei der Betrachtung der Schwermetallgehalte und der Belastung mit organischen Schadstoffen der P-Rezyklate, ergibt sich ein ähnliches Bild wie schon bei der Bestimmung der Löslichkeit und der Düngewirkung. Die Belastungen mit Schadstoffen schwanken nicht nur in Abhängigkeit des angewandten Verfahrens oder Eingangsstoffes, sondern auch innerhalb derselben Verfahrens- oder Produktgruppe. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele der untersuchten Proben verschiedene Entwicklungsstadien aus den jeweiligen Behandlungsverfahren abbilden. Bei allen Verfahren beeinflusst aber die Ausgangsbelastung der behandelten Stoffströme die Belastung der P-Rezyklate mit Schadstoffen deutlich. Rezyklate, die aus Klärschlämmen oder Klärschlammaschen gewonnen werden, die unter einem hohen Einfluss von industriellem Abwasser oder Schlamm entstehen, werden tendenziell höhere Schadstoffbelastungen haben. Nach der Aufbereitung der Klärschlammasche zu P-Rezyklaten, werden unabhängig von dem angewendeten Verfahren alle in der DüMV (2017) und der AbfKlärV (2017) geforderten Grenzwerte eingehalten.

Zusätzlich zur Einhaltung der verschiedenen Grenzwerte sowie zur Pflanzenverfügbarkeit werden im Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 (2018) noch weitere Anforderungen an die Eigenschaften der P-Rezyklate beschrieben. So sollen Dünger aus oder mit Rezyklaten noch weiteren Anforderungen für Pflanzendünger entsprechen. Neben einem möglichst hohen und stabilen P-Gehalt sind bei Rezyklaten Gehalte anderer Bestandteile zu beachten. Hier sind vor allem die Metalle Eisen und Aluminium sowie Chlorid hervorzuheben. Diese Metalle spielen eine Rolle vor allem auf Grund ihrer Fähigkeit Phosphor im Boden festzulegen und haben damit einen ungünstigen Einfluss auf die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor. Chlorid hingegen wirkt bei hohen Gehalten, aufgrund seiner korrosiven Eigenschaften negativ ein.

Die Rezyklate sollten entweder für eine direkte Ausbringung geeignet sein oder eine Mischbarkeit bei Konfektionierung ermöglichen. Weder bei Lagerung noch durch Ausbringung der Rezyklate als Dünger sollten Staub- oder Geruchsemissionen entstehen. Die Transport- und Lagerfähigkeit darf nicht schlechter sein als die von herkömmlichen, mineralischen P-Düngern.

Für den Fall, dass Rezyklate zu Düngemittel granuliert werden, schreibt die DüMV für einige Rezyklate eine Mahlfineinheit von 98 % bei 0,63 mm und 90 % bei 0,16 mm vor. Die Granulate müssen gewährleisten, dass sie unter Feuchtigkeitseinfluss stabil bleiben und nicht zerfallen.

Werden die Granulate durch Breitschleudern auf das Feld verteilt, werden die Körner abhängig von ihrer Größe unterschiedlich weit verteilt. Daher ist für eine Verteilung eine Mischung aus Korngrößen von ca. 2 bis 4 mm vorteilhaft.

3.2 Wege zur Entlassung von P-Rezyklaten aus dem Abfallrecht

Das Inverkehrbringen abfallbürtiger P-Rezyklate erfordert einen Übergang vom Abfall- zum Produktrecht. Insbesondere ist dabei das Ende der Abfalleigenschaft nachzuweisen, andererseits die Konformität der Rezyklate mit dem Düngemittelrecht. Dies schafft die Voraussetzungen dafür, dass die Rezyklate als frei handelbares Wirtschaftsgut (i) nicht mehr der Registerpflicht des Verwerters unterliegen und (ii) als Pflanzennährstoff auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht werden können.

3.2.1 Definition Abfall

Für die Betrachtung der Wege zur Entlassung von P-Rezyklaten aus dem Abfallrecht ist zunächst zu prüfen, wie Abfall im Sinne der Kreislaufwirtschaftsgesetz definiert ist.

Der Begriff Abfall wird im Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) wie folgt in § 3 Abs. 1 Satz 1 KrWG definiert:

„Abfälle im Sinne dieses Gesetzes sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung (KrWG, 2017).“

Dieser Tatbestand ist bei Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche voll umfänglich gegeben und somit ist nach § 3 Abs. 1 Satz 1 KrWG das Abwasser und seine resultierenden Stoffströme Klärschlamm und Klärschlammasche als Abfall einzuordnen.

Der § 2 Abs. 2 Nr. 9 KrWG widerspricht dieser Einordnung als Abfall nicht. Zwar wird beschrieben, dass die Vorschriften für *„Stoffe, sobald sie in Gewässer oder Abwasseranlagen eingeleitet oder eingebracht werden“*, nicht gelte, dies berührt die Abfalleigenschaft als Solche jedoch nicht, sondern definiert, dass die Abwasserbehandlung dem Wasserrecht und nicht dem Abfallrecht unterliegt. Ist die vorrangige Behandlung von Abwasser durch das Wasserrecht beendet, sind sowohl das Abwasser an sich, der Klärschlamm und die Klärschlammasche als Abfall von dem Abfallrecht umfasst (Umweltbundesamt, 2015).

Die Einordnung von Schlämmen aus kommunalem Abwasser als Abfall spiegelt sich zudem in der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) wider, wo diese unter dem Abfallschlüssel 19 08 05 geführt werden (Schiebold, 2018).

Die Abfalleigenschaft schränkt die freie Handelbarkeit ein (Registerpflicht des Behandlers). Somit müssen aus der Perspektive des Erzeugers von P-Rezyklaten die Kriterien für deren Entlassung aus dem Abfallrecht geprüft werden.

3.2.2 Entlassung von P-Rezyklaten aus dem Abfallrecht

Für die weitergehende Prüfung, ob ein P-Rezyklat mit seinen konkreten Eigenschaften aus dem Abfallrecht entlassen werden kann, ist § 5 Abs. 1 KrWG einschlägig. Hierzu heißt es in § 5 KrWG *„Ende der Abfalleigenschaft“*:

§ 5 Ende der Abfalleigenschaft

„(1) Die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes endet, wenn dieser ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

- 1. er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,*
- 2. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,*
- 3. er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie*
- 4. seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.“*

Das bedeutet konkret, dass P-Rezyklate in einem Verwertungsverfahren hergestellt worden sein müssen. Hierbei muss der Abfall soweit behandelt werden, dass sich das entstehende Produkt (P-Rezyklat) in seiner Eigenschaft nachweislich von den Eigenschaften des vorausgehenden Verarbeitungsmaterials (Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammmasche) unterscheidet. Insbesondere müssen dabei die abfalltypischen Gefahren wegfallen.

3.2.3 Prüfung der Erfüllungskriterien für eine Entlassung von P-Rezyklaten aus dem Abfallrecht

Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, muss ein Rezyklat ein Verwertungsverfahren durchlaufen und im Abschluss vier Anforderungen nach § 5 Abs. 1 Nr. 1 ff. KrWG genügen (§ 5 KrWG).

Als Verwertung können für P-Rezyklate im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetz § 3 Abs. 23, 25 KrWG angewendet werden:

„§ 3 Begriffsbestimmungen

(23) Verwertung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen. (...)

(25) Recycling im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.“

Durch das Rezyklieren von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammmasche kann dieser wieder seinem ursprünglichen Ziel (beispielsweise Düngung) zugeführt werden. Somit entspricht die Herstellung von P-Rezyklaten einem Recycling gemäß § 3 Abs. 25 KrWG. Grundsätzlich entspräche ein Recycling auch der Definition einer Verwertung im Sinne von § 3 Abs. 23 KrWG. Dabei ist allerdings zu beachten, dass das Recycling erst vollzogen ist, wenn sich der Phosphor tatsächlich wieder im Wirtschaftskreislauf befindet. Demzufolge wäre die Bedingung für die Entlassung von P-Rezyklate aus dem Abfallrecht dann gegeben, wenn diese düngemittelrechtskonform verwendet werden könnten.

„§ 5 Ende der Abfalleigenschaft

(1) Die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes endet, wenn dieser ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

- *§ 5 Abs. 1 Nr. 1 KrWG - er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird“*

Die Verwendung von P-Rezyklaten als Substitution von anderen Phosphorquellen bei der Düngemittelproduktion erfüllt den konkreten Zweck der Sicherung der Bodenfruchtbarkeit.

- *„§ 5 Abs. 1 Nr. 2 KrWG - ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht“*

Grundsätzlich besteht für die zu substituierenden konventionell für die Düngemittelherstellung gewonnenen Rohphosphate ein Markt. Ginge es also rein um den Ersatz des Rohphosphats durch klärschlambürtigen Phosphor, wäre dieses Kriterium erfüllt. Bezüglich der Existenz eines Marktes für die P-Rezyklate ist die Lage komplizierter, da diese derzeit nicht oder nur

eingeschränkt auf dem Markt verfügbar sind. Die Existenz eines Marktes ist jedoch möglicherweise entkoppelt zu sehen von der Akzeptanz eines Produktes, die auch durch Marketingmaßnahmen beeinflusst werden kann.

Diese Einschätzung teilt auch das Umweltbundesamt mit der Aussage, dass eine gewisse Schwierigkeit durch die in § 5 Abs. 1 Nr. 2 KrWG geregelte Anforderlichkeit eines Marktes oder einer Nachfrage bei der erstmaligen Einführung eines Recyclingproduktes vorliegt. *„Nach einhelliger Auffassung in der Literatur ist diese Voraussetzung nämlich nicht erfüllt, wenn ein Markt oder eine Nachfrage erst noch geschaffen werden muss. Allerdings werden an das Vorliegen eines Marktes oder einer Nachfrage keine hohen Voraussetzungen gestellt, insbesondere soll es ausreichen, wenn die Nachfrage nur von einem Marktteilnehmer ausgeht.*

Damit ist das Problem der Markteinführung letztlich ein vorübergehendes mit geringer praktischer Bedeutung: Lässt sich – wovon im Fall der Phosphor-Rezyklate [sic!] auszugehen ist – eine Nachfrage durch geeignete Maßnahmen schaffen, sind nach kürzester Zeit die Anforderungen des § 5 Abs. 1 Nr. 2 KrWG erfüllt. Einer vertieften Auseinandersetzung mit dieser Frage bedarf es daher nicht (Umweltbundesamt, 2015).“

Somit formuliert § 5 Abs. 1 Nr. 2 KrWG ein Kriterium, welches nicht direkt mit der Eigenschaft der Rezyklate verknüpft ist und somit nicht als Ausschlusskriterium für die Entlassung von P-Rezyklaten aus dem Abfallrecht angesehen werden kann.

- *„§ 5 Abs. 1 Nr. 3 KrWG - er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt“*

§ 5 Abs. 1 Nr. 3 KrWG bezieht sich auf die tatsächliche Vereinbarkeit der Produkteigenschaften der einzelnen P-Rezyklate mit den gesetzlichen Normen und Vorgaben des Produktrechts (hier: Düngemittelrecht). Dies betrifft sowohl die technischen wie auch die chemischen Eigenschaften der Rezyklate. Da der Düngemittelmarkt das größte Potential für die Abnahme von Rezyklaten darstellt, ist in diesem Fall das europäische, bzw. nationale Düngemittelrecht maßgebend. Somit müssen die einzelnen P-Rezyklate auf ihre Vereinbarkeit (z. B. Grenzwerte bei Schwermetallen) mit den Vorgaben des nationalen Rechts, insbesondere des Düngegesetzes und der Düngemittelverordnung, für verkehrsfähige Düngemittel geprüft werden (Umweltbundesamt, 2015).

- *„§ 5 Abs. 1 Nr. 4 KrWG - seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt“*

In § 5 Abs. 1 Nr. 4 KrWG wird eine Entlassung der P-Rezyklate aus dem Abfallrecht ausgeschlossen, wenn diese schädlich für Mensch und Umwelt sind. Im Sinne des KrWG ist eine Verwendung schadlos, wenn „nach der Beschaffenheit der Abfälle, dem Ausmaß der Verunreinigungen und der Art der Verwertung Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit nicht zu erwarten sind, insbesondere keine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf erfolgt (BMU, 2018).“

Es handelt sich hierbei somit um eine Erweiterung der in § 5 Abs. 1 Nr. 3 KrWG getroffenen Kriterien für die Produkteigenschaft der Rezyklate. Es soll ausgeschlossen werden, dass Recyclingprodukte schädlichere Einflüsse auf Mensch und Umwelt ausüben als ihre substituierten Stoffe. Wichtig dabei ist, dass dies nicht gleichbedeutend mit der Forderung ist, dass sie weniger schädlich als die zu substituierenden Stoffe sein sollen.

Werden die Kriterien von § 5 „Ende der Abfalleigenschaft“ erfüllt, verlassen die etwaigen P-Rezyklate das Abfallrecht und können im Anschluss auf ihre mögliche Verkehrstauglichkeit als Düngemittel geprüft werden.

3.3 Verfahren zur Inverkehrbringung von P-Rezyklaten als Düngemittel

Verknüpft mit der Entlassung aus dem Abfallrecht, müssen Rezyklate auch den Anforderungen der Düngemittel entsprechen. Hierbei ist ebenfalls eine Abfolge von Kriterien für die entsprechende Genehmigung gegeben.

Die Inverkehrbringung von Düngemitteln ist durch das Düngegesetz (DüngG, 2017), die Düngemittelverordnung (DüMV, 2017) und die EG-Düngemittelverordnung geregelt.

Die EG-Düngemittelverordnung legt hierbei die Bestimmungen von mineralischen Düngemitteln fest, welche das Ziel verfolgen, frei in der Europäischen Union gehandelt werden zu dürfen (Siebert, 2010). Da es sich in dem Gutachten um eine Betrachtung von Absatz- und Vermarktungsmöglichkeiten von Phosphorrezyklaten in Hessen handelt, wird die Inverkehrbringung gemäß DüngG und DüMV beschrieben.

Im Düngegesetz ist unter §3 Abs. 1 Nr. 1f DüngG die Voraussetzung für eine Anwendung von Düngern geregelt:

„(1) Stoffe nach § 2 Nr. 1 und 6 bis 8 dürfen nur angewandt werden, soweit sie

- 1. einem durch einen unmittelbar geltenden Rechtsakt der Europäischen Gemeinschaft der Europäischen Union über den Verkehr mit oder die Anwendung von Düngemitteln zugelassenen Typ oder*
- 2. den Anforderungen für das Inverkehrbringen nach einer Rechtsverordnung auf Grund des § 5 Abs. 2 oder 5 entsprechen.“*

Mit der angesprochenen Rechtsverordnung ist im Düngegesetz konkret die Düngemittelverordnung (DüMV) gemeint (Hüther, 2017).

Das Inverkehrbringen von Düngemitteln ist somit in der „Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln“ (Düngemittelverordnung - DüMV) verankert. Hierbei wird im Geltungsbereich der DüMV in § 2 Abs. 1 beschrieben, dass die Verordnung nur das Inverkehrbringen von Düngemitteln regelt, die nicht als EG-Düngemittel bezeichnet sind.

In der Düngemittelverordnung ist die Inverkehrbringung von Düngemitteln beschrieben. Dazu heißt es in § 3 DüMV:

„§ 3 Zulassung von Düngemitteltypen

(1) Düngemittel dürfen vorbehaltlich des § 5 Absatz 1 des Düngegesetzes nur in den Verkehr gebracht werden,

wenn sie einem durch diese Verordnung zugelassenen Düngemitteltyp entsprechen. Die in Anlage 1 festgelegten Düngemitteltypen werden mit der Maßgabe zugelassen, dass

- 1. sie auch hinsichtlich ihrer nicht typbestimmenden Bestandteile bei sachgerechter Anwendung die Fruchtbarkeit des Bodens, die Gesundheit von Menschen, Tieren und Nutzpflanzen nicht schädigen und den Naturhaushalt nicht gefährden,*

2. für die Herstellung

a) als Ausgangsstoffe nur Stoffe verwendet worden sind, die die Fruchtbarkeit des Bodens, die Gesundheit von Menschen und Tieren und Nutzpflanzen nicht schädigen und den Naturhaushalt nicht gefährden und

aa) einen pflanzenbaulichen, produktions- oder anwendungstechnischen Nutzen haben oder

bb) dem Bodenschutz sowie der Erhaltung und Förderung der Fruchtbarkeit des Bodens dienen.“

Somit müssen Rezyklate Anforderungen an Schadstoffgehalte erfüllen und müssen einen pflanzenbaulichen, produktions- oder anwendungstechnischen Nutzen haben, oder dem Bodenschutz sowie der Erhaltung und Förderung der Fruchtbarkeit des Bodens dienen (Hüther, 2017).

Zudem müssen sie in der Anlage 1 bereits als Ein- (Abschnitt 1) oder Mehrstoffdünger (Abschnitte 2 und 3) gelistet sein.

Tabelle 10: Auszug aus der Anlage 1, Tabelle 1.2 DüMV Vorgaben der Phosphatdünger (DüMV, 2017)

Typenbezeichnung	Mindestgehalte	Typbestimmende Bestandteile; Nährstoffformen und Nährstofflöslichkeiten	Angaben zur Nährstoffbewertung; weitere Erfordernisse	Wesentliche Zusammensetzung; Art der Herstellung	Besondere Bestimmungen, Hinweise
1	2	3	4	5	6
1.2.1 Dicalciumphosphat mit Magnesium	20 % P ₂ O ₅ 6 % MgO	Alkalisches-ammonocitrat-lösliches Phosphat Gesamt magnesiumoxid	Phosphat bewertet als alkalisch-ammonocitrat-lösliches P ₂ O ₅ ; Siebdurchgang: 98 % bei 0,63 mm 90 % bei 0,16 mm Toleranzen: P ₂ O ₅ 0,8 %-Punkt MgO 0,9 %-Punkt	Dicalciumphosphat, Magnesiumphosphat; Fällungen mineralischer Phosphate, auch von aus Knochen gelöster Phosphorsäure Zugabe von Magnesiumcarbonat Magnesiumsulfat	Der Gehalt an wasserlöslichem Magnesiumoxid darf angegeben sein.
1.2.2 Dicalciumphosphat mit Tricalciumphosphat	8 % P ₂ O ₅	Gesamtphosphat	Phosphat bewertet als Gesamtphosphat Toleranzen: P ₂ O ₅ 0,8 %-Punkt	Dicalciumphosphat, Tricalciumphosphat; Fällungen mineralischer Phosphate	
1.2.3 Phosphat mit Silicium	8 % P ₂ O ₅	Gesamtphosphat, wasserlösliches Phosphat	Phosphat bewertet als Gesamtphosphat, 50 % des angegebenen Gehaltes an P ₂ O ₅ wasserlöslich Toleranzen: Gesamtphosphat: 0,8 %-Punkt wasserlösliches Phosphat: 0,9 %-Punkt	Siliciumoxide, Natriumhydrogenphosphate, Calciumphosphate, Natriumsulfat, Natriumsilicat; Aufschluss von Wasserglas mit Schwefel- und Phosphorsäure	Mindestgehalt an Silicat 20 %.
1.2.4 Teilaufgeschlossenes Rohphosphat mit Magnesium	16 % P ₂ O ₅ 6 % MgO	Gesamtphosphat, wasserlösliches Phosphat, Gesamt magnesiumoxid	Phosphat bewertet als Gesamtphosphat, mindestens 40 % des	Mono-, Tricalciumphosphat, Calciumsulfat, Magnesiumsulfat;	Ein Gehalt an wasserlöslichem Magnesiumoxid darf angegeben sein.

Dabei wird in Anlage 1, Zeile 1.2.9 eine Gruppierung von Phosphatdüngern vorgenommen, welche Teil der Anlage 2, Tabelle 6.2 sind.

Tabelle 11: Auszug aus der Anlage 1, Tabelle 1.2 DüMV „Vorgaben der Phosphatdünger aus Anlage 2 DüMV“ (DüMV, 2017)

Typenbezeichnung	Mindestgehalte	Typbestimmende Bestandteile; Nährstoffformen und Nährstofflöslichkeiten	Angaben zur Nährstoffbewertung; weitere Erfordernisse	Wesentliche Zusammensetzung; Art der Herstellung	Besondere Bestimmungen, Hinweise
1	2	3	4	5	6
1.2.9 Phosphatdünger aus [Bezeichnung nach Anlage 2, Tabelle 6.2]	10 % P ₂ O ₅	Gesamtphosphat	Phosphat bewertet als Gesamtphosphat Siebdurchgang: 98 % bei 0,63 mm 90 % bei 0,16 mm	Phosphathaltige Ausgangsstoffe nach Anlage 2 Tabelle 6.2; aus nur einem Stoff nach Anlage 2 Tabelle 6.2	In der Typenbezeichnung ist der Klammerausdruck durch die Bezeichnung nach Anlage 2 Tabelle

Die Anlage 2, Tabelle 6.2 macht Angaben zu den zulässigen Ausgangsstoffen für bestimmte mineralische Düngemittel nach Anlage 1.

Die Düngemittelverordnung definiert, welche Ausgangsstoffe unter Beachtung eventueller Einschränkungen für die Erzeugung von Düngemitteln eingesetzt werden dürfen.

Tabelle 12: Auszug aus Anlage 2, Tabelle 6.2 „Besondere Ausgangsstoffe für bestimmte mineralische Düngemittel“ (DüMV, 2017)

Die nachfolgenden als Hauptbestandteil für bestimmte Düngemittel eingesetzten Ausgangsstoffe sind häufig Rückstände aus Produktionsprozessen, die nicht auf die Erzeugung dieser Ausgangsstoffe ausgerichtet sind. Für diese Stoffe gelten deshalb ggf. zusätzliche besondere Auflagen in den jeweiligen Vorbemerkungen oder in den Vorgaben für einzelne Düngemitteltypen der Anlage 1.

	Ausgangsstoff, Stoffgruppe oder Herkunft	Einschränkung der zulässigen Ausgangsstoffe	Ergänzende Vorgaben und Hinweise
	1	2	3
6.2.3	Verbrennung von Klärschlämmen	Aschen von Klärschlämmen nach Tabelle 7.4 Nummer 7.4.3 nach Maßgabe von Zeile 7.3.16	In granulierter oder staubgebundener Form, Siebdurchgang - bei 0,1 mm max. 0,2 %, - bei 0,05 mm max. 0,05 %, - bei 0,01 mm max. 0,005 %.
6.2.4	Phosphatfällung	Fällen mineralischer Phosphate mit <ul style="list-style-type: none"> • Calciumchlorid, • Kalkmilch, • Magnesiumchlorid, • Magnesiumoxid oder -hydroxid 	Soweit nicht Düngemittel nach Anlage 1 Abschnitt 1.2 Nummer 1.2.1 oder Nummer 1.2.2.
6.2.5	Schmelzvergasung	Stoffe nach Tabelle 7	Prozesstemperatur ≥ 1450 °C Keine Zugabe von Stoffen nach Tabelle 8.3.

Hierbei sind für Aschen von Klärschlämmen noch zusätzliche Einschränkungen der zulässigen Ausgangsstoffe beschrieben, welche in Tabelle 7.4, Nummer 7.4.3 DüMV nach Maßgabe von 7.3.16 näher konkretisiert sind:

Tabelle 13: Auszug aus Tabelle 7 DüMV Ausgangsstoffe mit beschriebenen Einschränkungen der zulässigen Ausgangsstoffe (DüMV, 2017)

	Ausgangsstoff, Stoffgruppe oder Herkunft	Einschränkung der zulässigen Ausgangsstoffe	Ergänzende Vorgaben und Hinweise
	1	2	3
7.3.16	Aschen aus [Stoff nach Tabelle 7.1, 7.2 oder Tabelle 7.4]	Verbrennung von Stoffen nach Tabelle 7.1, 7.2 oder 7.4, auch in Mischung. Keine Aschen aus dem Rauchgasweg, ausgenommen aus der ersten filternden Einheit. Keine Kondensatfilterschlämme.	Abgabe in granulierter oder staubgebundener Form. Siebdurchgang: bei 0,1 mm max. 0,2 %, bei 0,05 mm max. 0,05 %, bei 0,01 mm max. 0,005 %. Aschen aus Tabelle 7.4 müssen vor einer Granulierung oder Staubbinding einen Siebdurchgang von 98 % bei 0,63 mm und 90 % bei 0,16 mm aufweisen.

Zeile 7.3.16 regelt explizit, dass keine Aschen aus dem Rauchgasweg, ausgenommen aus der ersten filternden Einheit und keine Kondensatfilterschlämme in dem Ausgangsstoff zur Erzeugung von Düngemitteln herangezogen werden dürfen.

Für Aschen gelten zudem weitere Vorgaben gem. Tabelle 7.4, Ziffer 7.4.3:

Tabelle 14: Auszug aus Tabelle 7 DüMV Ausgangsstoffe mit beschriebenen Einschränkungen für Klärschlämme (DüMV, 2017)

	Ausgangsstoff, Stoffgruppe oder Herkunft	Einschränkung der zulässigen Ausgangsstoffe	Ergänzende Vorgaben und Hinweise
	1	2	3
7.4.3	Klärschlämme	Klärschlämme gemäß AbfklärV, die für eine Aufbringung nach AbfklärV zulässig sind.	Zugabe von Kalk nur in einer Qualität, die zugelassenen Düngemitteln entspricht. Zugabe von Bioabfällen, nur im Rahmen der Aufbereitung (z. B. im Faulturm) und nur in einer Qualität, die der Bioabfallverordnung entspricht. Aufbereitung der Ausgangsstoffe nur mit Stoffen, die der notwendigen Abwasser- und Schlammbehandlung einschließlich Hygienisierung oder sonstigen notwendigen Behandlung dienen (siehe auch Tabelle 8.1). Keine Rückführung von Rechengut, Sandfanggut; keine Rückführung von Flotaten oder Fettabscheiderinhalten aus fremden Klärwerken (jeweils auch nicht im Rahmen der Schlammaufbereitung). Angabe der bei der Aufbereitung zugegebenen Stoffe und des jeweiligen Zwecks der Zugabe (z. B. zur Konditionierung, Hygienisierung, Fällung), bei der Zugabe von Kalken Angabe des zugegebenen Anteils in %.

Sind P-Rezyklate keinem Düngemitteltyp gem. Anlage 1 zuzuordnen, muss eine gesonderte Prüfung erfolgen.

Für die Prüfung der Verkehrsfähigkeit der Rezyklate als Düngemittel ist das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) zuständig, welches auf Grundlage von fachlichen Beurteilungen durch den Wissenschaftlichen Beirat für Düngungsfragen des BMEL entscheidet. Der Wissenschaftliche Beirat für Düngungsfragen berät das BMEL durch gutachterliche Stellungnahmen. Seine Mitglieder werden durch das BMEL auf Grundlage des Düngegesetzes berufen.

Hierzu heißt es vom BMEL: *„Für die Zulassung von Düngemitteln ist kein formales "Antragsverfahren" vorgesehen. Hersteller oder Inverkehrbringer von "neuen" Düngemitteln können Anfragen zur Änderung/Ergänzung düngemittelrechtlicher Vorschriften an das BMEL richten, um neue Produkte als Düngemittel, Bodenhilfsstoff, Kultursubstrat oder Pflanzenhilfsmittel in den Verkehr bringen zu dürfen.*

Zur Beurteilung dieser Anfragen werden die Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen gehört. Wird ein neues Produkt vom Wissenschaftlichen Beirat zur Aufnahme in die Düngemittelverordnung empfohlen, erfolgt in unbestimmten Zeitabständen eine von der Zustimmung des Bundesrates abhängige Änderung der Düngemittelverordnung. Ein Anspruch auf Zulassung besteht nicht“ (BMEL, 2018).

3.3.1 Qualitäts- und Hygienevorschriften

Neben der Typisierung der Rezyklate nach verkehrsfähigen Düngemitteln, bzw. einer etwaigen Antragsstellung auf Aufnahme einer neuen Düngemitteltypkategorie durch das BMEL, müssen Rezyklate für eine Inverkehrbringung generellen Ansprüchen der Vorschrift in Qualitäts- und Hygienebelangen entsprechen.

Hierbei sind Vorgaben in den Bereichen Schadstoffbelastung, Löslichkeiten der Nährstoffe und der Hygiene von der DüMV getroffen.

3.3.2 Schadstoffe

In Anlage 2, Tabelle 1.4 DüMV ist sind die Grenzwerte für Schadstoffe in Düngemitteln beschrieben. Diese müssen erfüllt werden, um Rezyklate als Düngemittel in den Verkehr zu bringen.

Bei den Schadstoffen sind vor allem Schwermetalle aufgelistet. Ferner sind unter 1.4.9 und 1.4.10 der DüMV Grenzwerte für Perfluorierte Tenside (PFT), Dioxine und dl-PCB (WHO-TEQ (2005)) festgesetzt.

Tabelle 15: Auszug aus Anlage 2 DüMV, Kennzeichnungsschwelle und Grenzwerte Teil 1 (DüMV, 2017)

1.4 ... Schadstoffe					
	Nebenbestandteil	Kennzeichnung ab ... mg/kg TM oder andere angegebene Einheit	Toleranz in % des gekennzeichneten Wertes jeweils bis zu	Grenzwert mg/kg TM oder andere angegebene Einheit	Einschränkungen/Ergänzungen der Kennzeichnung/Hinweise
	1	2	3	4	5
1.4.1	Arsen (As)	20	50 %	40	
1.4.2	Blei (Pb)	100	50 %	150	
1.4.3	Cadmium (Cd) Cadmium (Cd) für Düngemittel ab 5 % P ₂ O ₅ (FM)	1,0 20 mg/kg P ₂ O ₅	50 %	1,5 50 mg/kg P ₂ O ₅	Für die Anwendung von Rindenprodukten im Garten- und Landschaftsbau, ausgenommen Nahrungsmittelerzeugung, sowie für die Anzucht und Pflege von Zierpflanzen und Ziergehölzen gilt als Grenzwert 2,5 mg Cd/kg TM. Im Rahmen der Hinweise zur sachgerechten Anwendung Kennzeichnung mit dem Hinweis: „Nur für die Anwendung im Garten- und Landschaftsbau und für die Anzucht und Pflege von Zierpflanzen und Ziergehölzen und keine Anwendung in Verfahren, die der Erzeugung von Nahrungsmitteln dienen.“
1.4.4	Chrom (ges.)	300	50 %	-	
1.4.5	Chrom (Cr ^{VI})	1,2	50 %	2	Brennraumaschen aus der Verbrennung von naturbelassenem Rohholz sind vom Grenzwert nach Spalte 4 ausgenommen, wenn durch deutliche Kennzeichnung auf ihre ausschließliche Rückführung auf forstliche Standorte hingewiesen wird.
1.4.6	Nickel (Ni)	40	50 %	80	Bei Gesteinsmehlen kann der Grenzwert nach Spalte 4 um 50 % überschritten werden.
1.4.7	Quecksilber (Hg)	0,5	50 %	1,0	
1.4.8	Thallium (Tl)	0,5	50 %	1,0	
1.4.9	Perfluorierte Tenside (PFT)	0,05		0,1	Summe aus Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonat (PFOS).
1.4.10	Summe der Dioxine und dl-PCB (WHO-TEQ 2005) ¹			30 ng	Bei Anwendung auf Grünland zur Futtergewinnung und auf Ackerfutterflächen mit nichtwendender Bodenbearbeitung nach der Aufbringung, ausgenommen Maisanbauflächen, gilt ein Grenzwert von 8 ng. Bei Überschreitung des Grenzwertes von 8 ng ist im Rahmen der Hinweise zur sachgerechten Anwendung wie folgt zu kennzeichnen: „Keine Anwendung auf Grünland zur Futtergewinnung und auf Ackerfutterflächen mit nichtwendender Bodenbearbeitung nach der Aufbringung, ausgenommen Maisanbauflächen.“

3.3.3 Löslichkeit

Für die Inverkehrbringung als Düngemittel müssen Rezyklate Vorgaben bezüglich ihrer Löslichkeit erfüllen. In Anlage 2, Tabelle 4 DüMV über „zulässige Phosphorverbindungen und Phosphatlöslichkeiten“ werden hierfür die entsprechenden Phosphatlöslichkeiten wie beispielsweise Ziffer 4.2.4 „ausschließlich mineralsäurelösliches Phosphat“ aufgeführt.

Tabelle 16: Anlage 2, Tabelle 4 DüMV, zulässige Phosphorverbindungen und Phosphatlöslichkeiten (DüMV, 2017)

4.1 Phosphorverbindungen	
4.1.1	Phosphat (P ₂ O ₅)
4.2 Phosphatlöslichkeiten	
4.2.1	wasserlösliches Phosphat
4.2.2	neutral-ammoncitratlösliches Phosphat
4.2.3	neutral-ammoncitratlösliches und wasserlösliches Phosphat
4.2.4	ausschließlich mineralsäurelösliches Phosphat
4.2.5	alkalisch-ammoncitratlösliches Phosphat (Petermann)
4.2.6	in 2 %iger Zitronensäure lösliches Phosphat
4.2.7	Gesamtphosphat, davon mindestens 75 % des angegebenen Gehaltes an P ₂ O ₅ in alkalischem Ammoncitrat (Joulie) löslich
4.2.8	Gesamtphosphat, davon mindestens 55 % des angegebenen Gehaltes an P ₂ O ₅ in 2 %iger Ameisensäure löslich
4.2.9	Gesamtphosphat, davon mindestens 45 % des angegebenen Gehaltes an P ₂ O ₅ in 2 %iger Ameisensäure löslich, mindestens 20 % des angegebenen Gehaltes an P ₂ O ₅ wasserlösliches Phosphat
4.2.10	in 2 %iger Zitronensäure und in alkalischem Ammoncitrat (Petermann) lösliches Phosphat
4.2.11	Gesamtphosphat (Methode: mineralsäurelösliches Phosphat)

Auf diese Ziffern wird anschließend in Anlage 2 Tabelle 5 der DüMV „Gehaltsangaben und weitere Erfordernisse für den Phosphatbestandteil“ Bezug genommen.

Je nach Einordnung der Rezyklate in die unterschiedlichen Löslichkeitsgruppen ergeben sich somit konkrete Anforderungen an die Verfügbarkeit. Wird ein Rezyklat beispielsweise gem. 5.7 (Tabelle 17) eingestuft, muss die Wasserlöslichkeit 2,5 %, die Löslichkeit in neutralem Ammoniumcitrat 5 % und die ausschließliche Mineralsäure-Löslichkeit (in Mineralsäure 2 %) betragen, allerdings gemäß § 10 Abs. 5 DüMV erst ab 1. Juni 2020. Die Erfüllung der geforderten Mindestlöslichkeiten ist Voraussetzung für eine etwaige Inverkehrbringung als Düngemittel in der entsprechenden Düngemittelgruppe.

Tabelle 17: Anlage 2 Tabelle, 5 DüMV, Gehaltsangaben und weitere Erfordernisse für den Phosphatbestandteil (DüMV, 2017)

	Mineralische Mehrnährstoffdünger mit	Der Typenbezeichnung müssen nachfolgende Angaben angefügt sein	Mindest- löslichkeit (Masseprozent)	Nicht enthalten sein dürfen:
	1	2	3	4
5.1	a) weniger als 2 % wasser- löslichem P ₂ O ₅ ¹ b) 2 % und mehr wasser- löslichem P ₂ O ₅ ¹			Thomasphosphat, Glühphosphat, Aluminiumcalciumphosphat, teilaufgeschlossenes Rohphosphat, Rohphosphat
5.2	Rohphosphat mit wasserlöslichem Anteil	„mit Rohphosphat mit wasserlöslichem Anteil“	Löslichkeit 4.2.1: 2 %	andere Phosphatarten
5.3	Thomasphosphat, Konverterkalk mit Phosphat, daneben Glühphosphat, Monocalciumphosphat oder Dicalciumphosphat	verwendete Phosphatarten		andere als in Spalte 1 genannte Phosphatarten
5.4	Dicalciumphosphat	„mit Dicalciumphosphat“		andere Phosphatarten
5.5	Rohphosphat	„mit Rohphosphat“	Löslichkeit 4.2.1: 2,5 % Löslichkeit 4.2.3: 5 % Löslichkeit 4.2.4: 2 %	Thomasphosphat, Glühphosphat, Aluminiumcalciumphosphat
5.6	teilaufgeschlossenem Rohphosphat	„mit teilaufgeschlossenem Rohphosphat“	Löslichkeit 4.2.1: 2,5 % Löslichkeit 4.2.3: 5 %	Thomasphosphat, Glühphosphat, Aluminiumcalciumphosphat
5.7	Phosphatdünger aus [Angabe nach Tabelle 6.2]	„mit Phosphatdüngern aus [Stoff nach Tabelle 6.2]“	Löslichkeit 4.2.1: 2,5 % Löslichkeit 4.2.3: 5 % Löslichkeit 4.2.4: 2 %	andere Phosphatarten
5.8	weicherdigem Rohphosphat	„mit weicherdigem Rohphosphat“	Löslichkeit 4.2.1: 2,5 % Löslichkeit 4.2.3: 5 % Löslichkeit 4.2.4: 2 %	andere Phosphatarten

¹ Der Anteil an ausschließlich minersäurelöslichem P₂O₅ darf 2 % nicht überschreiten.

3.3.4 Hygieneparameter

Die Hygienisierung ist besonders bei Rezyklaten aus Klärschlämmen zu beachten, welche keiner thermischen Behandlung unterzogen wurden. In § 5 DüMV „Anforderungen an die Seuchen- und Phytohygiene“ werden beispielsweise konkrete Anforderungen zur Belastung mit Salmonellen formuliert. Hierzu heißt es:

„(1) Die Erfüllung der Anforderungen nach § 3 Absatz 1 Nummer 1 und nach § 4 Absatz 1 Nummer 1 setzt voraus, dass keine Krankheitserreger, Toxine oder Schaderreger enthalten sind, von denen Gefahren für die Gesundheit von Menschen, Tieren und Nutzpflanzen ausgehen.“

(2) Die Anforderungen nach Absatz 1 gelten als nicht eingehalten:

1. hinsichtlich seuchenhygienischer Eigenschaften, wenn in 50 Gramm Probenmaterial Salmonellen gefunden werden“

Klärschlammaschen sind durch ihre thermische Behandlung hinsichtlich ihrer hygienischen Eigenschaften zumeist als unkritisch anzusehen. Dennoch muss ein entsprechender Nachweis von den Rezyklatproduzenten erbracht werden.

Sind alle Kriterien erfüllt, ist eine generelle Verkehrsfähigkeit von P-Rezyklaten als Düngemittel möglich.

3.3.5 Ausblick der rechtlichen Situation

Am 20.11.2018 veröffentlichten die Verhandlungsführer des Europäischen Parlaments und des Rates eine Pressemitteilung über eine vorläufige Einigung bei der Novellierung der Europäischen Düngemittelverordnung, welche nun von Repräsentanten der EU-Mitgliedstaaten und dem parlamentarischen Binnenmarktausschuss bestätigt werden muss. Der Verordnungsentwurf wird im Anschluss vom Plenum des Parlaments in einer der nächsten Plenarsitzungen zur Abstimmung gestellt und vom EU-Ministerrat formell genehmigt.

In der künftigen EU-Düngemittelverordnung soll neben der Einführung eines einheitlichen Cadmiumgrenzwerts von 60 mg/kg, geltend für Phosphatdünger, vor allem ein verstärkter Einsatz abfallbürtiger Düngemittel ermöglicht werden.

Hierzu soll die Verwendung von rezyklierten Materialien zur Herstellung von Düngemitteln gefördert werden und zu einer Entwicklung der Kreislaufwirtschaft und einer gleichzeitigen Reduktion von Importabhängigkeiten (z. B. Rohphosphatgestein) führen.

Die EU erhofft sich dadurch, bis zu zwei Millionen Tonnen Phosphor aus Klärschlamm, biologisch abbaubaren Abfällen, Fleisch- und Knochenmehl oder Gülle zu gewinnen (Europäisches Parlament, 2018).

Die neue EU-Düngemittelverordnung wird somit die aktuell geltenden EU-Düngemittelverordnung von 2003 ersetzen und mittelfristig auch auf die deutsche Düngemittelverordnung Einfluss nehmen.

4 Aktueller Bedarf und Vermarktung von Phosphaten sowie Phosphorsäure in Hessen

Um die potenziellen Vermarktungswege von P-Rezyklaten beschreiben zu können, werden vorab der aktuelle Bedarf von Phosphaten sowie Phosphorsäure in Hessen sowie die aktuellen Vermarktungswege erläutert.

4.1 Inlandsabsatz an Phosphatdüngemitteln in Hessen

Der Absatz an Phosphatdüngemitteln in Hessen betrug in den Jahren 2007 bis 2017 zwischen 2.242 Mg P₂O₅/a und 9.029 Mg P₂O₅/a (Tabelle 18). Der durchschnittliche hessische Inlandsabsatz betrug in diesem Zeitraum 5.776,8 Mg P₂O₅ im Jahr (2521 Mg P/a), bzw. 7,5 kg P₂O₅ pro Hektar landwirtschaftlicher Fläche (3,3 kg P/ha·a). Dieser Wert stellt den mittleren Bedarf der letzten zehn Jahre an Phosphat in der Landwirtschaft dar und wird in diesem Gutachten auch als künftiger Anhaltswert für den Bedarf an Phosphat in der Landwirtschaft angesehen.

Die Ermittlung dieser Daten beruht auf veröffentlichten Zahlen des Statistischen Bundesamtes und des Hessischen Statistischen Landesamtes (Tabelle 18). Der Inlandsabsatz umfasst laut Qualitätsbericht der Düngemittelstatistik die Gesamtheit der im jeweiligen Land ansässigen Produzenten und Importeure von mineralischen Düngern. Die Erhebung der Daten erfolgt jährlich in einer Totalerhebung per Internetfragebogen, mit Auskunftspflicht für die Unternehmen (Statistisches Bundesamt, 2018b).

Tabelle 18: Gesammelte Inlandsabsätze von Phosphat in Hessen, kombiniert mit den jeweiligen landwirtschaftlich genutzten Flächen

Jahr		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Landwirtsch. genutzte Fläche (LF)	[in 1.000 ha]	783,9 ¹⁾	774,7 ²⁾	777,8 ²⁾	766,4 ¹⁾	768,1 ³⁾	763,1 ³⁾	771,9 ⁴⁾	768,0 ⁵⁾	769,5 ⁵⁾	767,3 ⁶⁾	772,3 ⁶⁾
Inlandsabsatz Phosphat	[Mg/a]	6.269 ¹⁾	2.242 ⁷⁾	4.123 ⁷⁾	5.006 ¹⁾	9.029 ⁸⁾	8.490 ⁸⁾	5.346 ⁹⁾	5.547 ¹⁰⁾	5.877 ¹¹⁾	6.761 ¹¹⁾	4.855 ¹²⁾
Phosphat je ha LF	[kg P ₂ O ₅ /ha*a]	8,0	2,9	5,3	6,5	11,8	11,1	6,9	7,2	7,6	8,8	6,3
Ø Inlandsabsatz Phosphat	[Mg/a]	5.776										
Ø Phosphat je ha LF	[kg P ₂ O ₅ /ha*a]	7,5										

1) (Hessisches Statistisches Landesamt, 2012); 2) (Statistisches Bundesamt, 2009); 3) (Hessisches Statistisches Landesamt, 2012b); 4) (Statistisches Bundesamt, 2015); 5) (Hessisches Statistisches Landesamt, 2017); 6) (Hessisches Statistisches Landesamt, 2018); 7) (Statistisches Bundesamt, 2010); 8) (Statistisches Bundesamt, 2013); 9) (Statistisches Bundesamt, 2015b); 10) (Statistisches Bundesamt, 2016); 11) (Statistisches Bundesamt, 2017); 12) (Statistisches Bundesamt, 2018)

Bei den Inlandsabsätzen von Phosphat ist der Preis eine wichtige Einflussgröße. In den Jahren 2008 bis 2012 schwankte der Inlandsabsatz besonders stark von 2,9 kg P₂O₅/(ha*a) bis 11,8 kg P₂O₅/(ha*a). Diese Schwankungen basierten auf der weltweiten Finanzkrise und dem kurzfristigen Anstieg des Rohphosphates von ca. 50 \$ auf bis zu ca. 250 \$ pro Mg Phosphatgestein (Abbildung 10) in den Jahren 2008 und 2010 mit entsprechenden Auswirkungen auf die Düngemittelpreise (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2015). Bei hohen Düngemittelpreisen halten sich die Landwirte mit den Düngemittelgaben zunächst zurück.

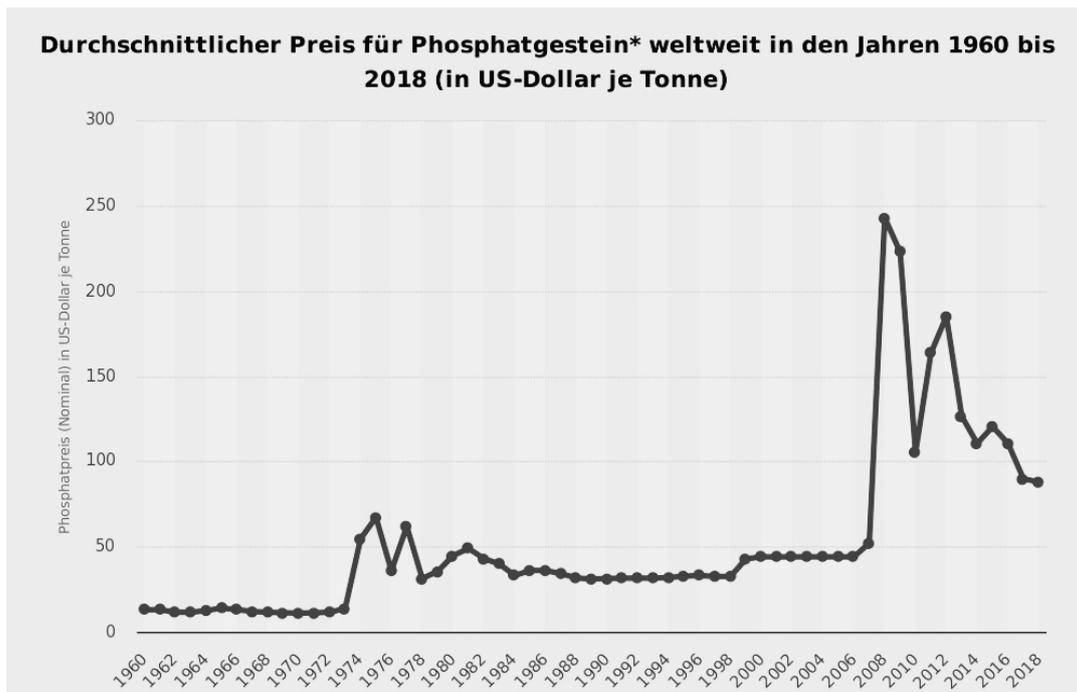


Abbildung 10: Durchschnittlicher Preis für Phosphatstein weltweit in den Jahren 1960 bis 2018 (in US-Dollar je Tonne) (Statista, 2019)

4.2 Bedeutung des Ökolandbaus in Deutschland und Hessen für den Bedarf von Phosphorrezyklaten

Die Entwicklung des ökologischen Landbaus in Hessen zeigt seit 1994, kommend von 12.866 ha, bis 2017 mit 104.608 ha, starke Zuwächse und eine zunehmende Bedeutung im Sektor Landwirtschaft (Abbildung 11).

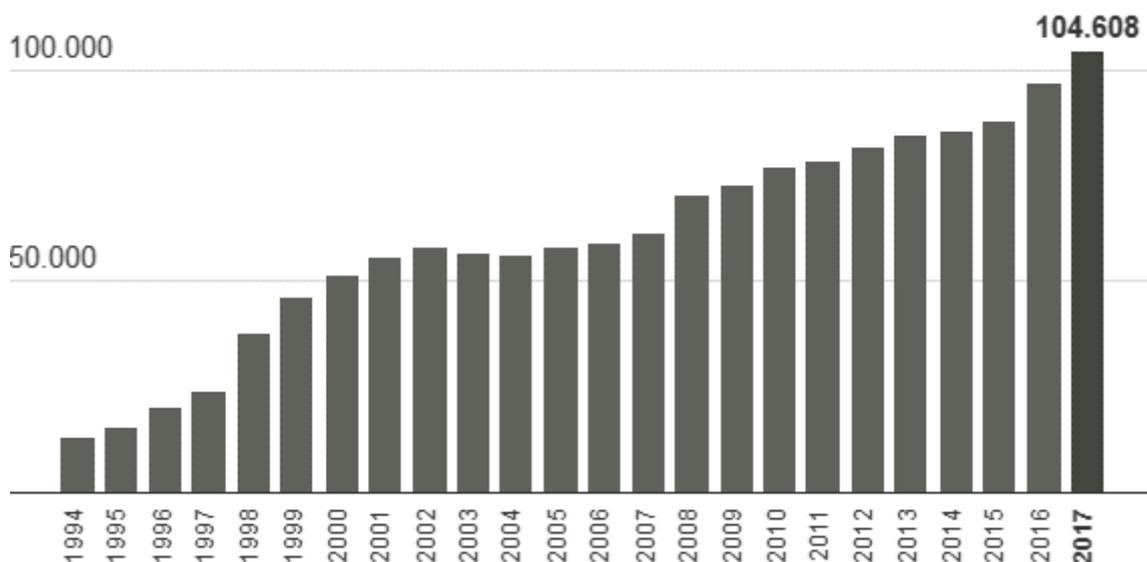


Abbildung 11: Ökologisch bewirtschaftete Fläche in Hessen (ha) (Hessisches Umweltministerium, 2018)

In den Jahren 2003 bis 2017 nahm der Anteil ökologisch bewirtschafteter Landfläche von ca. 7,4 % (entspr. 55.600 ha) auf ca. 13,5 % (entspr. ca. 104.600 ha) der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche zu.

Tabelle 19: Bodennutzung landwirtschaftlicher Betriebe in Hessen mit prozentualen Anteil ökologisch bewirtschafteter Fläche in Hessen von 2003 bis 2017 (Hessisches Umweltministerium, 2018) (Hessisches Statistisches Landesamt, 2017b)

Nutzungsart		2003	2007	2010	2013	2014	2015	2016	2017
Landwirtschaftlich genutzte Fläche (LF)	[in 1.000 ha]	763,3 ¹⁾	783,9 ¹⁾	766,4 ¹⁾	771,9 ¹⁾	768,0 ¹⁾	769,5 ¹⁾	767,3 ¹⁾	772,3 ¹⁾
Ökologisch bewirtschaftete Fläche	[in 1.000 ha]	56,6 ²⁾	61,5 ²⁾	76,9 ²⁾	84,3 ²⁾	85,9 ²⁾	87,9 ²⁾	96,7 ²⁾	104,6 ²⁾
Anteil der ökologisch bewirtschafteten Fläche	[%]	7,4	7,8	10,0	10,9	11,2	11,4	12,6	13,5

¹⁾ (Hessisches Statistisches Landesamt, 2017b), ²⁾ (Hessisches Umweltministerium, 2018)

Die Betriebe im ökologischen Landbau sind hierbei zumeist in Verbänden organisiert, welche den Landwirten Richtlinien bezüglich ihrer Produktion von Gütern vorgeben (Tabelle 20).

Tabelle 20: Ökologischer Landbau nach Verbänden 2017 (Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft, 2017)

Ökologischer Landbau nach Verbänden	Betriebe 1.1.2017	Betriebe 1.1.2018	Veränderung absolut	Veränderung	Fläche 1.1.2017	Fläche 1.1.2018	Veränderungsfläche	Veränderung
	Anzahl	Anzahl	Anzahl	[%]	[ha]	[ha]	[ha]	[%]
Biokreis	1.142	1.222	80	7,0	48.435	56.588	8.153	16,8
Bioland	6.861	7.305	444	6,5	343.489	387.980	44.491	13,0
Biopark	535	525	-10	-1,9	107.709	105.103	-2.606	-2,4
Demeter	1.509	1.529	20	1,3	77.824	81.841	4.017	5,2
Ecoland	41	42	1	2,4	2.362	2.338	-24	-1,0
Ecovin	236	233	-3	-1,3	2.380	2.356	-24	-1,0
Gäa	380	392	12	3,2	32.391	34.632	2.241	6,9
Naturland	3.127	3.448	321	10,3	164.970	181.428	16.458	10,0
Verbund Ökohöfe	141	134	-7	-5,0	15.997	17.804	1.807	11,3
gesamt	13.972	14.830	858	6,1	795.557	870.070	74.513	9,4

Die drei Verbände Bioland, Naturland und Demeter stellen mit 75 % Flächenanteil den größten Anteil. Zudem sind sie die mitgliederstärksten Verbände in Deutschland (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2015). Der viertgrößte Verband Biokreis ist vorwiegend in Bayern und NRW aktiv und verfügt erst seit 2009 über eine eigene Niederlassung in Hessen (Wiesbaden).

Somit werden für das weitere Gutachten verstärkt die Verbände Naturland, Bioland und Demeter berücksichtigt.

Die Bedeutung des ökologischen Landbaus für die Abnahme von P-Rezyklaten ist mit den in den Richtlinien erlaubten Düngemitteln verknüpft.

Folgende mineralischen Ergänzungsdünger sind bei den Verbänden für ökologischen Landbau Demeter, Bioland und Naturland in den jeweiligen Richtlinien zugelassen:

Demeter (Demeter, 2018):

- natürliche schwermetallarme Phosphate (Rohphosphate)

Bioland (Bioland, 2019):

- Rohphosphat (gemahlen, weicherdig, nicht teilaufgeschlossen)
- Thomasphosphat

Naturland (Naturland, 2019):

- schwermetallarme Rohphosphate
- Thomasphosphat

Thomasphosphat, auch bekannt unter der Begrifflichkeit Thomasmehl, ist ein phosphatreiches Düngemittel aus Thomas-Stahlwerkschlacke. Dieser Dünger wurde bis in die 1980er Jahre vermehrt in West-Deutschland als Nebenprodukt der Stahlerzeugung gewonnen. Heute ist Thomasphosphat im Handel jedoch praktisch nicht mehr erhältlich (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2015).

Auf Grund der geringen Marktverfügbarkeit von Thomasphosphat steht den Landwirten der ökologischen Landwirtschaft in der Regel nur das Rohphosphat als mineralische Phosphorquelle zur Verfügung. Rohphosphate verfügen jedoch über eine schlechte P-Verfügbarkeit, mit Ausnahme des Einsatzes in sauren Böden oder bei entsprechender Fruchtfolge mit P-mobilisierenden Pflanzen wie Raps, Weißlupine und anderen Leguminosen (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2015).

Phosphorrezyklate als Düngemittel sind aktuell in den Richtlinien nicht vorgesehen; somit dürfen Verbandsmitglieder diese ohne eine Anpassung der Richtlinien nicht verwenden. Ein Abnahmepotential ist folglich zumindest aktuell nicht vorhanden.

4.3 Weitere potenzielle Vermarktungswege für P-Rezyklate

Als hauptsächlicher potenzieller Vermarktungsweg für P-Rezyklate wird die Substitution von Rohphosphat in der Düngemittelproduktion prognostiziert. Dennoch besteht auch außerhalb dieses Marktsegments ein Vermarktungspotential für Rezyklate, insbesondere für Phosphorsäuren mit technischer Qualität.

Insgesamt beträgt der Bedarf an Phosphorsäuren in Deutschland 40.000 - 50.000 Mg P_2O_5/a . Für die Phosphatproduktion außerhalb der Düngemittel- und Futtermittelproduktion (z. B. Flammschutzmittel) kommen in Deutschland noch ca. 100.000 - 150.000 Mg P_2O_5/a hinzu (DPP, 2018).

Das international tätige Chemieunternehmen ICL hat sich mit ihrer Tochtergesellschaft ICL Fertilizers bezüglich einer Nutzung von Rezyklaten positioniert. Dazu heißt es: „*ICL Fertilizers*

hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2025 auf alternative Rohstoffe umzusteigen und Rohphosphat vollständig zu substituieren (Adam, 2018, S. 175).“

Zusätzlich wurden von der Deutschen Phosphor-Plattform Akteure aus der chemischen Industrie bzw. dem chemischen Handel zu einer etwaigen Verwendung von rezyklierten Phosphorsäuren befragt. Die DPP formuliert die Ergebnisse in schriftlichen Mitteilungen wie folgt (DPP, 2018):

Zur Chemische Fabrik Budenheim:

„Es heißt seitens der Chemischen Fabrik Budenheim KG, dass dort nicht mit recycelter P-Säure gearbeitet werden wird, zumindest mit dem Blickwinkel der heutigen Sicht (Mitteilung vom 03.12.2018).“

Zum Chemiedistributor Brenntag GmbH:

„Die Firma (Anm. d. Verf. Brenntag) weiß, dass bald Phosphorsäure aus Recyclingverfahren auf den Markt kommt. Sie steht mit mehreren zukünftigen Produzenten auch schon in Kontakt, u.a. Remondis. Sie möchte gerne konkretere Gespräche führen, das ist von Seiten der Produzenten aktuell nicht möglich, da noch keine genauen Aussagen getroffen werden können über Mengen und Qualität. Bis jetzt gibt es noch kein verfügbares Material am Markt. Brenntag selbst ist sehr interessiert an der recycelten Phosphorsäure, aber wieviel sie zukünftig abnehmen werden, hängt von der Qualität des Produktes ab und den verfügbaren Mengen bzw. dem Preis. Ihrer Meinung nach fehlt die Transparenz im Moment und so ist es nicht möglich konkrete Aussagen zu treffen (Mitteilung vom 18.12.2018).“

Eine weitere Einschätzung der potenziellen Vermarktungswege von P-Rezyklaten außerhalb der Düngemittelindustrie wird durch die DWA-Arbeitsgruppe KEK.1-1 „Wertstoffrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm“ abgegeben. Hierzu heißt es von der Arbeitsgruppe:

„Auch wenn Phosphor vorrangig als Nährstoff wahrgenommen wird, ist einer Vermarktung und damit ein Recycling auch außerhalb des Düngemittelsektors möglich. Je nach Marktsegment ist hier eine deutlich höhere Wertschöpfung erzielbar als bei der Erzeugung eines Düngemittels. Der Vermarktungsweg wird maßgeblich von der Art und der Reinheit des P-Rezyklats abhängen. Es ist jedoch anhand des Marktvolumens wahrscheinlich, dass Phosphor letztendlich in seiner essentiellen Funktion als Nährstoff in der landwirtschaftlichen Anwendung recycelt werden wird (DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1, 2018, S. 715).“

5 Identifikation der wesentlichen relevanten Organisationen zur zukünftigen Vermarktung von Phosphorrezyklaten in Hessen

Es wird zunächst ein Überblick über die generellen Vermarktungs- und Vertriebswege von Düngemitteln gegeben. Zudem wurde eine Fragebogenaktion zu Anforderungen an eine zukünftige Vermarktung von P-Rezyklaten durchgeführt, welche beschrieben und ausgewertet wird. Im Anschluss werden gesondert das Meinungsbild gegenüber P-Rezyklaten von den Verbänden für ökologischen Landbau Bioland und Demeter beschrieben.

5.1 Identifizierung von Vermarktungsorganisationen und Vermarktungswegen

Die Vermarktung von P-Rezyklaten kann über verschiedene Vertriebswege geschehen. An erster Position der Vermarktungskette steht der Rezyklat-Produzent (Abbildung 12). Das kann je nach Rückgewinnungsverfahren eine Kläranlage oder ein externer Produktionsstandort (z. B. Monoverbrennungsanlage) sein.

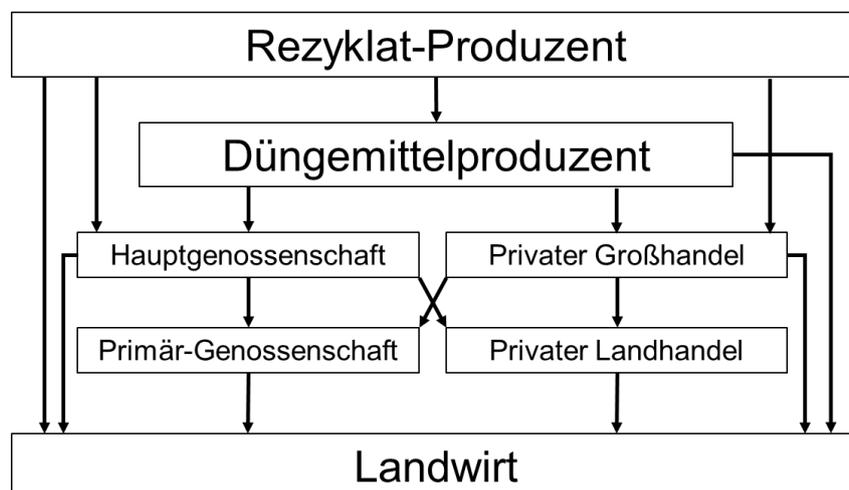


Abbildung 12: Vermarktungswege von P-Rezyklaten

Das P-Rezyklat kann im Anschluss bei geeigneter Form (Bsp. MAP, Brushit) direkt an die Hauptgenossenschaft (z. B. AGRAVIS, RWZ Raiffeisen), an einen privaten Großhandel (z. B. Beiselen GmbH, Agro Agrargroßhandel GmbH & Co. KG) oder direkt vermarktet an den Landwirt abgegeben werden.

Des Weiteren können Rezyklate an Düngemittelproduzenten für eine Substitution von Rohphosphat abgegeben werden. Diese Düngemittelproduzenten (z. B. YARA, ICL, Euro-Chem) können auf Basis der Rezyklate fertige Düngemittel produzieren und dieses ebenfalls an eine Hauptgenossenschaft oder einen privaten Großhandel veräußern. Teilweise treten Düngemittelproduzenten auf dem Markt auch in Doppelfunktion als Händler auf und streben ebenfalls eine Direktvermarktung in die Landwirtschaft an.

Die sekundäre Vermarktungsebene von Rezyklaten gestaltet sich über die Hauptgenossenschaften und die privaten Großhändler. Die Hauptgenossenschaften vermarkten Düngemittel in Ausnahmen ebenfalls direkt an große Landwirtschaftsbetriebe. Im Normalfall agieren sie jedoch im Sinne eines Großhandels und beliefern ihre regionalen Vertretungen, welche auch als Primär-genossenschaften betitelt werden. Die landwirtschaftlichen

Primärgenossenschaften im klassischen Sinne sind die Orts- bzw. Lokalgenossenschaften. Diese treten regional als Bezugs- und Absatzgenossenschaft auf und bilden die sogenannte Primärstufe (Mändle, 2018).

Einen ähnlichen Vermarktungsweg stellt der private Vermarktungssektor von Düngemitteln dar. Auch hier wird zwischen einem sekundären und primären Handel unterschieden. Der private Landhandel und somit die primäre Stufe der Vermarktungsstruktur, bildet als Einzelhandel das Bindeglied zwischen Landwirtschaft und dem Großhandel. Der Großhandel tritt jedoch zuletzt immer häufiger auch als einstufige Handelsgesellschaft auf und übernimmt eine direkte Vermarktung in die Landwirtschaft.

5.2 Auswertung Befragung zu Anforderungen an eine zukünftige Vermarktung von P-Rezyklaten

Der versendete Fragebogen ist im Anhang enthalten. Die Fragebögen wurden an folgende Adressaten verschickt:

Adressaten der Fragebögen

Bauernverband Gießen/ Wetzlar/ Dill e.V.

Kreisbauernverband Marburg-Kirchhain-Biedenkopf e.V.

Kreisbauernverband Vogelsberg e.V.

Regionalbauernverband Wetterau-Frankfurt am Main e.V.

Kreisbauernverband Fulda-Hünfeld e.V.

Regionalbauernverband Kurhessen e.V.

- Geschäftsstelle Hofgeismar
- Geschäftsstelle Ziegenhain

Kreisbauernverband Waldeck e.V.

Kreisbauernverband Kassel e.V.

Kreisbauernverband Werra-Meißner e.V.

Kreisbauernverband Hersfeld-Rotenburg e.V.

Kreisbauernverband Main-Kinzig e.V.

Kreisbauernverband Hochtaunus e.V.

Kreisbauernverband Rheingau-Taunus e.V.

Kreisbauernverband Wiesbaden e.V.

Regionalbauernverband Wetterau-Frankfurt am Main e.V.

ORD Oberhessische Recycling Dienste GmbH

Mitarbeiter der Justus-Liebig-Universität, Professur für Landschafts-, Wasser- und Stoffhaushalt

Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL)

Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH)

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI)

Verband Chemiehandel e.V. (VCH)

Lhoist Germany - Rheinkalk GmbH

Bioland Hessen e.V.

Öko-Beratungsgesellschaft mbH (Naturland)

Demeter e.V.

Hessische Staatsdomäne Gladbacherhof, Lehr- und Versuchsbetrieb für ökologischen Landbau der Justus-Liebig-Universität Gießen
Raiffeisen Waren-Zentrale Rhein-Main eG
Hessenmühle GmbH
Verschiedene landwirtschaftliche Betriebe

Zudem erfolgte eine Versendung des Fragebogens durch:

- Prof. Dr. Dietrich Steffens, Institut für Pflanzenernährung, Justus-Liebig-Universität: Adressaten sind führende Düngemittelproduzenten, u.a. ICL Deutschland Vertriebs GmbH, YARA GmbH & Co. KG, EuroChem Agro GmbH.
- Dr. Daniel Frank, Deutsche Phosphor-Plattform e.V.: Adressaten sind Marktteilnehmer der chemischen Industrie.

5.2.1 Anforderungen an P-Rezyklate

Im ersten Fragenblock des Fragebogens wurden gezielt die Anforderungen an P-Rezyklate abgefragt (Abbildung 13).

Hierfür wurde bei Frage 3.1 nach der Relevanz von Wasser- und Ammoncitratlöslichkeit gefragt (Wertung in Schulnoten 1 bis 6, 1 sehr relevant, 6 nicht relevant). Die Relevanz für die einzelnen Befragten zeigt deutliche Unterschiede. So geben sechs Befragte für die Wasserlöslichkeit die Note 1 und 2 an und erachten diese somit als sehr relevant bzw. relevant. Gegenteilig dazu vergaben ein Verband für ökologischen Landbau und ein Versuchsbetrieb die Noten 6 und 5.

Ein ähnlicher Trend setzt sich bei der Ammoncitratlöslichkeit fort, welche im Durchschnitt mit der Note 2,0 bewertet worden ist. Auch hier wurde von einem Verband für ökologischen Landbau mit der Note 4 die schlechteste Bewertung abgegeben.

Simultan dazu wurde in der Frage 3.2 nochmals expliziter nach der gewünschten Pflanzenverfügbarkeit gefragt. Zur Auswahl standen die Antwortmöglichkeiten

- sofort/vollständig,
- mittelfristig/gut
- langfristig/gut.

Für eine sofortige und vollständige Pflanzenverfügbarkeit sprachen sich, bis auf einen Verband für ökologischen Landbau und ein Versuchsbetrieb, alle Beteiligten aus. Für mittelfristig/gut ergab sich eine homogene Durchschnittsnote von 2,4, für langfristig/gut eine Note von 4,25. Hier wurden von einem Verband für ökologischen Landbau und einem Versuchsbetrieb mit der Note 2 die besten Noten vergeben.

Dies zeigt auf, dass der Großteil der Befragten gerne schnell und gut pflanzenverfügbaren Dünger haben möchte. Für einige Anwendungen ist auch ein mittelfristig und gut wirkender Dünger erwünscht. Ausschließlich ein Verband für ökologischen Landbau und ein Versuchsbetrieb sprechen sich für langfristig wirkende Dünger aus.

Die weitergehende Frage 3.3.1, ob P-Rezyklate, welche den aktuellen Anforderungen der gültigen Düngemittelverordnung DüMV entsprechen, dem Qualitätsanspruch im Bereich der Befragten genügen, wurde von 75 % der Befragten mit „Ja“ beantwortet. Auch hier wurde die

Frage von einem Verband für ökologischen Landbau und den Biolandwirtschaftsbetrieben mit „Nein“ beantwortet, mit dem Verweis, dass die Düngemittel zusätzlich der EU-Öko-Verordnung und den jeweiligen Verbandsrichtlinien entsprechen müssen.

		Bitte eintragen
3.1	Bewerten Sie bitte folgende Aussagen in ihrer Relevanz (in Schulnoten 1 bis 6; 1 sehr relevant, 6 nicht relevant):	
	Die Rezyklate müssen eine hohe Wasserlöslichkeit aufweisen.	<input type="text"/>
	Die Rezyklate müssen eine hohe Ammonicitratlöslichkeit aufweisen.	<input type="text"/>
3.2	Die Pflanzenverfügbarkeit der P-Rezyklate sollte sein (in Schulnoten 1 bis 6; 1 wichtig, 6 unwichtig):	
	sofort/vollständig	<input type="text"/>
	mittelfristig/gut	<input type="text"/>
	langfristig/gut	<input type="text"/>
3.3.1	P-Rezyklate aus kommunalem Klärschlamm entsprechen den Anforderungen an Düngemittel entsprechend der aktuell gültigen Düngemittel-Verordnung vom 26.05.2017. Ist dieses Qualitätskriterium für den Einsatz in Ihrem Bereich ausreichend?	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
3.3.2	Wenn nein, welche zusätzlichen Anforderungen stellen Sie an Düngemittel?	
3.4	Über welche Lager- und Transporteigenschaften müssen die P-Rezyklate für Ihre Zwecke verfügen?	
3.5	Welche Eigenschaften müssen die P-Rezyklate im Falle einer Direktanwendung in der Landwirtschaft aufweisen, um den maschinentechnischen Ausbringungsmöglichkeiten der Landwirte möglichst zu entsprechen?	

Abbildung 13: Auszug aus dem Fragebogen, Anforderungen an P-Rezyklate

Eine sehr detaillierte Auskunft gaben die Befragten bei Frage 3.4, welche sich mit den generell gewünschten Lager- und Transporteigenschaften befasst.

Beschrieben wird ein sehr konkreter Anforderungskatalog:

- stabile Granulierung/Pelletierung
- schütffähig
- Lagerungsfähigkeit für 12 Monate muss gewährleistet sein
- Lagerungsdauer sollte keinen Einfluss auf eine Stabilität des Düngers haben
- staubfreie Umlagerung
- nicht hygroskopisch
- gleichmäßige Korngrößenfraktionierung

- hohe Nährstoffkonzentration / wenig Transportvolumen
- generell fester Dünger
- Mischung oder Kombination mit Harnstoff muss möglich sein

Bei Frage 3.5 wurden die Anforderungen für die Ausbringung ebenfalls konkret vorgegeben. Neben den verknüpften, bereits in 3.4 aufgelisteten Anforderungskriterien sprachen sich die Befragten für folgende Ausbringungsmöglichkeiten aus:

- mit betriebsüblichem Düngerstreuer mit Breitstreuwerk bzw. Scheibenstreuer auszubringen
- gute Flugeigenschaft, Arbeitsbreiten von mind. 27 Metern müssen realisierbar sein

5.2.2 Einschätzung zu Vermarktung und Vermarktungswegen von P-Rezyklaten in Hessen

Der vierte Fragenblock beschäftigt sich mit der generellen Einschätzung zu Vermarktung und Vermarktungswege von P-Rezyklaten in Hessen.

		Bitte eintragen	
4.1	Wie schätzen Sie das Abnahmepotenzial von P-Rezyklaten vom Produzent der Rezyklate ein (in Schulnoten 1 bis 6; 1 sehr gut, 6 sehr schlecht) ?		
	Direktabnahme der Landwirtschaft als fertiges Düngemittel	<input type="text"/>	
	Direktabnahme der Düngemittelindustrie für die Substitution von zugekauftem mineralischem Import-Phosphor	<input type="text"/>	
4.2.1	Als P-Rezyklat kann auch 75%ige Phosphorsäure mit einer technischen Qualität erzeugt werden. Sehen Sie Vermarktungsmöglichkeiten für die Phosphorsäure außerhalb der Düngemittelindustrie (z.B. zur Reinigung von Molkereianlagen, Tierfutterproduktion etc.)?	<input type="text"/>	Ja
		<input type="text"/>	Nein
4.2.2	Wenn ja, welche:		
4.3	Bewerten Sie bitte folgende Punkt nach ihrer Relevanz für die zukünftige Vermarktung (in Schulnoten 1 bis 6; 1 sehr relevant, 6 nicht relevant):		
	Die Genehmigungsverfahren für P-Rezyklate als Düngemittel müssen vereinfacht werden.	<input type="text"/>	
	Eine Beimischquote von P-Rezyklaten sollte bei konventionellen Düngemitteln eingeführt werden.	<input type="text"/>	
	P-Rezyklate müssen kontinuierlich verfügbar sein.	<input type="text"/>	
	P-Rezyklate müssen über eine gleichbleibende Qualität verfügen.	<input type="text"/>	
	Der Preis für Phosphor aus Rezyklaten muss gleich oder niedriger sein als der Preis für Phosphor aus Rohphosphat.	<input type="text"/>	

Abbildung 14: Auszug aus dem Fragebogen, Einschätzungen zu Vermarktung und Vermarktungswege von P-Rezyklaten in Hessen

Hierzu wurde mit der Frage 4.1 nach einer Einschätzung gefragt, ob die Rezyklate vom Produzenten durch eine Direktabnahme der Landwirtschaft oder durch eine Abnahme der Düngemittelindustrie als Substitution von zugekauftem mineralischem Importphosphor geschieht. Hierbei ergab sich mit eine Durchschnittnote von 2.5 (1 sehr gut, 6 sehr schlecht) für

Direktabnahme der Landwirtschaft bzw. 2.61 für die Direktabnahme der Düngemittelindustrie, keine eindeutige Tendenz.

Als weiterer Betrachtungspunkt wurde nach der Einschätzung zu weiteren Vermarktungswegen außerhalb der Düngemittelindustrie für Phosphorsäure mit einer technischen Qualität gefragt. Dabei gab die Mehrheit der Befragten an, dass sie sich eine Vermarktung von Phosphorsäure in anderen Zweigen der Industrie vorstellen können. Bei der Nachfrage, welche Industriezweige das sein könnten, wurde die Frage jedoch nur von einer Person mit dem Hinweis, dass die Phosphorsäure zum Phosphatieren in der Metallindustrie eingesetzt werden kann, beantwortet.

Im Anschluss folgte ein Block mit insgesamt fünf Aussagen, bei denen eine Relevanz (mit Schulnoten, 1 sehr relevant, 6 nicht relevant) von den Beteiligten bewertet werden sollte.

Hierbei zeigte sich bei der ersten Aussage, ob Genehmigungsverfahren für P-Rezyklate vereinfacht werden müssen, mit einer Durchschnittsnote von 3,0 eine mäßige Relevanz der Befragten.

Eine ähnliche Tendenz mit einer Durchschnittsnote von 2,89 ergab sich bei den Aussagen, dass eine Beimischquote von P-Rezyklaten bei Düngemitteln, ähnlich dem Bioethanol bei dem Benzingemisch E10, eingeführt werden soll.

Eine deutlichere Relevanz sahen die Befragten mit einer Durchschnittsnote von 1,56 bei der kontinuierlichen Verfügbarkeit und einer Durchschnittsnote von 1,33 für die gleichbleibende Qualität von P-Rezyklaten.

Interessant ist die Betrachtung der letzten Aussage, bei der es um die Preisgestaltung von P-Rezyklaten ging. Die Befragten gaben mit einer Durchschnittsnote von 2,22 an, dass der Preis von Rezyklaten niedriger oder entsprechende dem Phosphor aus Rohphosphat sein sollte. Nur ein Verband für ökologischen Landbau und ein Versuchsbetrieb gaben mit einer Note 5 das Zeichen, dass der Preis für Verbände für ökologischen Landbau evtl. eine untergeordnete Rolle einnimmt.

5.2.3 Vermarktungswege anfallender P-Rezyklate in der Landwirtschaft

Im Fragenblock 5 wurde nach den möglichen Vermarktungswegen anfallender P-Rezyklate in der Landwirtschaft gefragt.

In Frage 5.1 wurde hierfür gefragt, welche Vertriebswege die Landwirte der Einschätzung der Befragten nach für den Erhalt der P-Rezyklate wählen würden. Hierbei gaben 33,3 % der Befragten an, dass ein Direktvertrieb durch die Produzenten erwünscht wäre. Zudem gaben 88,9 % der Befragten an, dass mögliche P-Rezyklate über den Landhandel vertrieben werden müssen und ebenfalls 88,9 % in Frage 5.2.1, dass eine Lieferung zum Hof gegeben sein muss. Im Gegensatz gaben nur 22,5 % der Befragten eine Akzeptanz zur Selbstabholung an.

Bei der Selbstabholung sollte zudem die Fahrstrecke nicht mehr als 30 km betragen. Dies weist darauf hin, dass an den bestehenden Strukturen des Düngemittelvertriebs festgehalten werden sollte und ein Vertrieb über den Landhandel als sinnvoll erachtet wird.

In Frage 5.3 wurde nach der Relevanz der maschinentechnischen Ausbringungsmöglichkeit für die Vermarktung der P-Rezyklate gefragt. Hierbei gaben alle Befragten an, dass dieser Punkt sehr relevant, bzw. relevant ist.

Somit ist bei der Schaffung einer Marktakzeptanz ein besonderes Augenmerk auf die Beschaffenheit der Düngemittel zu legen.

		Bitte eintragen
5.1	Bitte geben Sie an, welchen Vertriebsweg die Landwirte Ihrer Einschätzung nach bevorzugt für den Erhalt der P-Rezyklate wählen würden:	
	Direktvertrieb durch den Produzenten	<input type="text"/>
	Vertrieb über den Landhandel	<input type="text"/>
5.2.1	Wie sollte die Versorgung mit P-Rezyklate gegeben sein?	<input type="text"/> Lieferung <input type="text"/> Selbstabholung
5.2.2	Bei Selbstabholung: Welche Strecken (Fahrweg) wäre ein Landwirt Ihrer Einschätzung nach bereit zur Abholung der P-Rezyklate zurückzulegen (in km)?	<input type="text"/>
5.3	Für wie relevant halten Sie die maschinentechnischen Ausbringungsmöglichkeiten (Düngung) der Landwirte für die Vermarktung von P-Rezyklate (in Schulnoten 1 bis 6; 1 sehr relevant, 6 nicht relevant)?	<input type="text"/>

Abbildung 15: Auszug aus dem Fragebogen, Vermarktungswege anfallender P-Rezyklate in der Landwirtschaft

5.2.4 Akzeptanz von Produkten aus der Klärschlammaufbereitung

Im Zuge der Befragung wurde ebenfalls um eine Einschätzung zur Akzeptanz von Produkten aus der Klärschlammaufbereitung gebeten. Bei der Frage Nr. 6.1.1, ob nach der Meinung der Befragten Produkte aus der Klärschlammaufbereitung ein Akzeptanzproblem haben könnten, bejahten dies 77,8 % der Befragten.

Bei der weiterführenden Frage 6.1.2, welche Vorbehalte gegenüber von Produkten aus der Klärschlammaufbereitung vorhanden sind, wurde zumeist die Befürchtung vor zu hohen Schwermetallkonzentrationen angeführt. Als weitere Schadstoffgruppe werden pharmazeutische Produkte als Hauptkritikpunkte gegenüber Produkten aus der Klärschlammaufbereitung angeführt.

		Bitte eintragen
6.1.1	Sind sie der Meinung, dass Produkte aus der Klärschlammaufbereitung ein Akzeptanzproblem haben könnten?	<input type="text"/> Ja <input type="text"/> Nein
6.1.2	Wenn ja, welche Vorbehalten sind gegenüber Produkten aus der Klärschlammaufbereitung vorhanden?	
6.2	Welche Maßnahmen könnten Ihrer Meinung nach für die Verbesserung der Akzeptanz getroffen werden?	

Abbildung 16: Auszug aus dem Fragebogen, Akzeptanz von Produkten aus der Klärschlammaufbereitung

Diese Vorbehalte sind insoweit interessant, da ein möglicher Einsatz von Rezyklaten generell durch die Düngemittelverordnung DüMV geregelt sein müsste und dementsprechend diese

Vorbehalte egalisiert werden. Dies wird auch von einem landwirtschaftlichen Betrieb beschrieben: *„Der Ruf des Klärschlammes ist nicht gerade gut. Ich denke jedoch, dass durch neue Verfahren es möglich sein sollte, die biologischen Schadstoffe im Dünger zu eliminieren und die Schwermetallgehalte deutlich zu reduzieren. Dadurch werden die Akzeptanz und die Nachfrage deutlich steigen.“*

Diese Aussage setzt sich in ihrer Tendenz in der Frage 6.2 fort, welche Maßnahmen für die Verbesserung der Akzeptanz getroffen werden können.

Hierbei wird zumeist darauf hingewiesen, dass Transparenz bei der Aufbereitung der Klärschlämme gefordert wird. Dabei beziehen sich die Befragten häufig darauf, dass eine gezielte Öffentlichkeitsarbeit für eine Akzeptanzsteigerung erforderlich ist.

Ein interessanter Aspekt wird von einem Mitarbeiter eines Düngemittelproduzenten angeführt; er ist der Meinung, dass *„der Biolandbau eine entscheidende Einflussgröße auf die Vermarktung von P-Rezyklaten ausübt.“* Sollte ein Verband für ökologischen Landbau P-Rezyklate als Düngemittel zulassen, würde der restliche Markt der konventionellen Landwirtschaft diesem Trend folgen.

5.2.5 Rückmeldung der Kreisbauernverbände Hessen

Insgesamt wurden im Zuge der Akzeptanzbefragung gegenüber abwasserbürtigen P-Rezyklaten 17 Kreisbauernverbände kontaktiert. Keiner der Kreisbauernverbände sendete einen ausgefüllten Fragebogen zurück.

Als Gründe für die ausbleibende Resonanz wurden vorwiegend nicht vorhandene Zeitkapazitäten angeführt. Zudem beriefen sich einige Verbände darauf, dass sie die Fragen auf Grund fehlender Informationskenntnisse bzw. stellvertretend für die landwirtschaftlichen Betriebe nicht beantworten könnten.

5.3 Beschreibung von Akzeptanz gegenüber P-Rezyklaten im Ökolandbau

Die Verbände für ökologischen Landbau Naturland e.V., Bioland e.V. und Demeter e.V. verfügen über die größten Marktanteile im ökologischen Landbau und können mit ihrem Einfluss eine prägende Position in der Diskussion über die Akzeptanz gegenüber P-Rezyklaten einnehmen. Zudem steigt ebenfalls ihr Marktanteil in der Gesamtbetrachtung der kommerziellen Landwirtschaft. Durch die fehlende Zulassung von P-Rezyklaten in den Richtlinien der Verbände ist eine Akzeptanzstudie, in Hinsicht auf eine potenzielle Überarbeitung der Statuten, interessant und kann zu einer Öffnung eines neuen Vertriebsweges von P-Rezyklaten führen.

Naturland hat sich mit den im Fragebogen abgegebenen Aussagen bezüglich einer Akzeptanz gegenüber P-Rezyklaten im Ökolandbau bereits positioniert.

Demeter reagierte in Form eines Statements auf die Akzeptanzbefragung. Um ganzheitlich die größten drei Verbände für ökologischen Landbau mit ihren Einstellungen bezüglich P-Rezyklaten abzubilden, wird in den folgenden zwei Kapiteln anhand einer Literaturrecherche die bisherig veröffentlichte Akzeptanzbeschreibung von Bioland und das Statement von Demeter wiedergegeben.

5.3.1 Bioland e.V.

Für eine Einschätzung der Akzeptanz des Verbands für organisch-biologischen Landbau Bioland e.V. werden Veröffentlichungen von Fischinger, von 2013 bis 2018 Geschäftsbereichleiterin Forschung und Entwicklung der Bioland Beratung GmbH (BBG), betrachtet.

In den Richtlinien von Bioland sind als phosphathaltige Mineraldünger Rohphosphat und Thomasphosphat zugelassen. Da Thomasphosphat auf dem aktuellen Düngemittelmarkt in größeren Mengen praktisch nicht vorhanden ist (Kapitel 4.2), bezieht Bioland seine Äußerungen auf Rohphosphat.

Hierzu heißt es bei Fischinger, Möller, Römer und Steffens (2014, S. 12):

„Die Nutzung von Rohphosphat ist unter ökologischen Aspekten jedoch bedenklich. Die Lagerstätten sind endlich, neueste Hochrechnungen gehen von einer Verfügbarkeit für die nächsten vier bis acht Generationen aus. Doch schon heute sind die Vorräte immer schwerer zu erschließen, stark steigende Phosphorpreise sind die Folge. Nicht nur die Endlichkeit der Ressource lässt diesen Weg wenig nachhaltig erscheinen, auch die derzeitige Abbaupraxis und der Transport erfordern viel Energie und verursachen in den Abbauregionen teilweise erhebliche Umweltschäden. Zudem können Rohphosphate Cadmium und Uran enthalten, die mit der Düngung in die Böden eingetragen werden. Die derzeitige Düngepraxis wird daher weder dem Nachhaltigkeitsanspruch noch dem Kreislaufgedanken gerecht.“

Basierend auf dieser Aussage wird weitergehend beschrieben, dass eine Rückführung abfallbürtigen Phosphors den konsequenten Kreislaufgedanken, welcher den Pionieren des ökologischen Landbaus bereits bis in die 70er Jahre vertraut war, entspricht, jedoch aktuell nicht zulässig ist (Fischinger, Möller, Römer & Steffens, 2014).

Aufbauend hierauf wurde 2015 eine Studie erstellt, mit dem zentralen Interesse, die Akzeptanz der Landwirte im ökologischen Landbau als potenzielle Abnehmer von rezykliertem P-Dünger zu ermitteln. Dies geschah in einer Fokusgruppe unter Leitung von Jedelhauser (Referent für Kreislaufwirtschaft beim NABU) und unter Beteiligung von Fischinger.

Für die Befragung wurden im Vorfeld von dieser Fokusgruppe, welche auch acht Landwirte von Bioland umfasste, folgende neun potenziell relevante Akzeptanzkriterien identifiziert, welche von den Adressaten einem Ranking (Reihenfolge der Wichtigkeit) unterzogen werden sollten (Jedelhauser, et al., 2015, S. 3):

- „Schadstofffreiheit: Der recycelte P-Dünger ist frei von jeglichen Schadstoffen (Schwermetalle, Hormon-, Antibiotika-, Medikamentenrückstände, etc.).
- Pflanzenbauliche Wirkung: Der recycelte P-Dünger entspricht einer natürlichen bzw. organischen Düngeform und ist demnach nicht wasserlöslich.
- Preis: Der Preis des recycelten P-Düngers ist niedrig.
- Streufähigkeit: Der recycelte P-Dünger kann mit den gängigen Maschinen gut ausgebracht werden.
- Äußerlich erkennbarer Unterschied zu chemisch-synthetischen Mineraldüngern: Das äußere Erscheinungsbild des recycelten P-Düngers unterscheidet sich von konventionellen Mineraldüngern, wodurch Verwechslungen ausgeschlossen werden.
- Energieaufwand: Der Energieaufwand der Herstellung des recycelten P-Düngers ist gering.

- **Transparenz des Herstellungsprozesses:** Die Art und der Ablauf des Herstellungsverfahrens wird offengelegt und ist klar nachvollziehbar.
- **Image:** Durch die Aufklärung der Öffentlichkeit ist eine Akzeptanz der Verbraucher und somit ein positives Image des recycelten P-Düngers erreicht.
- **Rechtliche Zulässigkeit:** Der recycelte P-Dünger ist nach EG-Öko-Verordnung zulässig und entspricht Bioland-Richtlinien.“

Der Fragebogen wurde als Online-Befragung ca. 3.000 Betrieben von Bioland gesendet. Die Rücklaufquote lag mit 319 beantworteten Fragebögen bei ca. 10 %. Hierbei mussten 180 Fragebögen auf Grund von Unvollständigkeit oder zu hoher Inkonsistenz aussortiert werden. Folglich umfasste die Auswertung die Ergebnisse von 139 Fragebögen (Jedelhauser, et al., 2015).

Eine rechtliche Zulassung der Rezyklate wurde für etwaige Akzeptanz der Landwirte vorausgesetzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Schadstofffreiheit der Rezyklate mit 27,3 % das wichtigste Kriterium für die Befragten der Bioland-Betriebe darstellt, gefolgt von der Düngewirkung (17,6 %) und des Energieaufwands bei der Produktion der rezyklierten Phosphate (13,5 %) (Tabelle 21).

Tabelle 21: Gewichtetes Ranking der Akzeptanzkriterien, Akzeptanzstudie von Bioland (Jedelhauser et al., 2015)

Ranking	Kriterium	Gewichtung
-	Rechtliche Zulassung	unbedingte Voraussetzung
1	Schadstofffreiheit	27,30 %
2	Wirkung	17,60 %
3	Energieaufwand	13,50 %
4	Transparenz	10,90 %
5	Streufähigkeit	9,10 %
6	Preis	9,00 %
7	Image	8,10 %
8	Äußerlicher Unterschied zu chemisch-synthetischen Mineraldüngern	4,50 %

Die vier weiteren Kriterien Transparenz bei der Produktionskette, Streufähigkeit der Produkte, Preis der Rezyklate und das Image von abfallbürtigen P-Quellen nehmen mit 8,1 % bis 10,9 % eine ähnliche Gewichtung in der Auswertung ein. Besonders das Ranking des Kriteriums „Preis“ auf Position 6 zeigt auf, dass Vertreter der ökologischen Landwirtschaft von Bioland bereit sind, höhere Preise für Rezyklate zu zahlen, wenn die vorangegangenen Kriterien erfüllt sind. Mit 4,5 % Gewichtung auf dem Rankingplatz 8 liegend, schließt das Kriterium „äußerlicher Unterschied zu chemisch-synthetischen Mineraldüngern“ als untergeordnetes Akzeptanzmerkmal ab.

Die Schlussfolgerung der Befragung zeigt somit deutlich, dass vor allem die Schadstofffreiheit und die Düngewirkung von gesonderter Bedeutung für die Akzeptanz von P-Rezyklaten in der ökologischen Landwirtschaft von Bioland sind.

5.3.2 Demeter e.V.

Im Zuge des Gutachtens wurde der Demeter e.V. bezüglich seiner Akzeptanz gegenüber P-Rezyklaten befragt. Der Verein bezog sich in seiner Antwort auf eine aktuell fehlende Position bezüglich zukünftiger Anforderungen an Rezyklate für einen Düngereinsatz auf den Landflächen der Verbandsmitglieder. Hierzu heißt es in einer schriftlichen Mitteilung von Dr. Brock (Demeter-Forschungskordinator) vom 07.12.2018:

„Im Demeter e.V. ist die Anwendung von P-Rezyklaten aktuell verboten. Die Diskussion zum Thema Nährstoffkreisläufe wird im Verband geführt. Wir sind aber noch nicht an dem Punkt, an dem wir Anforderungen an P-Recyclingdünger formulieren können. Ich möchte dem an dieser Stelle nicht vorgreifen und bitte um Ihr Verständnis.“

6 Schlussbewertung

Phosphorpotential in Hessen

Zu Beginn des Gutachtens wurde eine Ermittlung des hessischen Mengenpotentials an abwasserbürtigem Phosphorrezyklat auf der Grundlage des vom ISA (2016) erstellten Gutachtens durchgeführt.

Im Anschluss wurde auf Basis der Datensätze der THM (erhoben in den Jahren 2015 bis 2017) zu Klärschlammengen und Klärschlammanalysen aus der Region Mittelhessen ein theoretisches Phosphorpotential für Mittelhessen ermittelt. Das Ergebnis wurde dem Potential derselben Abwasserreinigungsanlagen des ISA-Gutachtens gegenübergestellt.

Bei der Beschreibung des theoretisch im Klärschlamm enthaltenen Phosphorpotentials und bei der Wahl der Entsorgungswege zeigen sich Unterschiede. Nach den Daten der THM ist das Phosphorpotential in der Vergleichsgruppe der Anlagen in der Region Mittelhessen um etwa 10 % geringer. In mindestens einem Fall wurde festgestellt, dass der Klärschlamm, durch die Inbetriebnahme einer Klärschlammvererdung als rückgewinnbares Potential nicht mehr zur Verfügung steht.

Weiterhin wurden die Szenarien 1 bis 3 des ISA-Gutachtens beschrieben und das in Hessen zu erwartende Mengenpotential an rezyklierbarem Phosphor abgeschätzt.

Alle Anlagen die bodenbezogen verwerten dürfen, werden von einer P-Rückgewinnung möglicherweise nicht erfasst.

Nach dem damals geltenden Entwurf der AbfKlärV 2015 umfasst diese Gruppe Kläranlagen bis zu einer Ausbaugröße von 10.000 EW, wobei im ISA-Gutachten aber Kläranlagen der GK 3 bei einer Rückgewinnung mitberücksichtigt wurden, insofern diese eine Phosphorkonzentration von ≥ 20 g P/kg TM im Klärschlamm aufweisen. Wie im Kapitel 2.1.1 und insbesondere in der Tabelle 2 beschrieben, beträgt die Klärschlammmenge aus der Gruppe der „nicht relevanten“ Kläranlagen, die nach dem ISA-Gutachten noch bodenbezogen verwerten dürfen, ca. 25.000 Mg TM/a. Das theoretische P-Potential im Klärschlamm dieser Anlagen im Jahr 2025 wird mit etwa 400 Mg P/a angegeben.

Durch die Novelle der Klärschlammverordnung (AbfKlärV 2017) wird sich die Anzahl der Kläranlagen, die noch bodenbezogen verwerten dürfen, verändern. Hierin ist eine bodenbezogene Verwertung erst ab einer Ausbaugröße von mehr als 50.000 EW ab dem Jahr 2032 untersagt. Einerseits wird sich dadurch die Anzahl der Anlagen, die zur P-Rückgewinnung verpflichtet sind, verringern, andererseits werden viele Kläranlagen erst in den nächsten Jahren entscheiden, ob sie langfristig die bodenbezogene Klärschlammverwertung verfolgen (können) oder doch den Weg einer thermischen Entsorgung mit einer P-Rückgewinnung aus der KS-Asche oder dem Schlamm(-wasser) gehen. Einzelne Anlagen werden auch – wie bisher – die Klärschlamm Entsorgung regelmäßig neu ausschreiben und so von Fall zu Fall über die Verwertung entscheiden.

Annahmen über das Rückgewinnungspotential sind somit nur sehr schwer zu treffen, da nicht absehbar ist, welcher Entsorgungsweg im Einzelnen beschritten wird.

Es ist aber davon auszugehen, dass die Mitverbrennung und damit verbunden eine Abreicherung aus dem nassen Klärschlamm bzw. dem Schlammwasser auf den Kläranlagen zunehmen und auch der Bau weiterer Kapazitäten zur Monoverbrennung stattfinden wird.

Dies alles verdeutlicht, dass für eine detailliertere Aussage über das tatsächliche Rückgewinnungspotential von Phosphor aus Klärschlamm in Hessen weiterer Untersuchungsbedarf besteht. Hierfür wird eine regelmäßige Erfassung und Auswertung von Klärschlammengen und deren Phosphor-Gehalte vorgeschlagen. Die Ermittlung der genauen Entsorgungswege aller Kläranlagen sollte ebenfalls periodisch erfolgen. Nur dadurch lässt sich das Phosphor-Rückgewinnungspotential durch die zukünftigen Entwicklungen auf den P-Gehalt der Klärschlämme, deren Menge sowie die Veränderungen der Entsorgungswege der Klärschlämme, genauer abbilden.

Die in Hessen aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen zur Verfügung stehende P-Rezyklatmenge wird aus unserer Sicht nach Umsetzung aller Maßnahmen, die in der AbfKlärV 2017 gefordert werden, im Jahr 2032 ca. 2.200 bis 2.800 Mg P/a betragen.

Diese Menge entspricht einer Phosphat-Menge von ca. 5.000 bis 6.400 Mg P_2O_5/a .

Beschreibung der Rezyklate

Bei der Betrachtung der Produkteigenschaften der P-Rezyklate kann festgestellt werden, dass die Recyclingprodukte nicht nur untereinander, sondern teilweise auch innerhalb ihrer Verfahrensproduktgruppe erhebliche Schwankungen in ihrer Löslichkeit und in der Düngewirkung aufweisen. In Bezug auf die Schwermetallkonzentrationen sowie der Belastung mit organischen Schadstoffen der P-Rezyklate findet sich dieselbe Situation vor. Die Auswertung erschwert sich durch mangelnde Transparenz bezüglich der Herkunft des Klärschlammes, der Charge des Rezyklats und dem Innovationsstand des angewandten Verfahrens. Eine Vergleichbarkeit ist folglich nur bedingt gegeben. Dies wird in jeder herangezogenen Literaturstudie beschrieben.

Entlassung aus dem Abfallrecht und Verkehrsfähigkeit als Düngemittel

Sowohl die Entlassung aus dem Abfallrecht wie auch eine Inverkehrbringung als Düngemittel gestaltet sich aktuell für P-Rezyklate kompliziert. Die Düngemittelverordnung von 2017 ist nicht auf eine Kriterienprüfung für die Verkehrsfähigkeit von abfallbürtigen P-Rezyklaten abgestimmt. Als Beispiel hierfür kann der Umstand aufgezeigt werden, dass Produzenten etwaiger P-Rezyklate, welche sich keinem bereits als verkehrsfähig eingestuftem Düngertyp zuordnen lassen, einem Verfahren des BMEL zur Aufnahme in die deutsche Düngemittelverordnung unterwerfen müssen. Diese Aufnahmeverfahren können aufwendig und langwierig sein und stehen nicht im Einklang mit der Forderung nach zeitnah umgesetzten, großtechnischen Anwendungsverfahren. Es empfiehlt sich eine Novellierung der entsprechenden Verordnungen, mit einer Vereinfachung des Verfahrens zur Inverkehrbringung von rezyklierten P-Düngemitteln, welche bereits im Entwurf der EU-Düngemittelverordnung von November 2018 auf europäischer Ebene eingeleitet wurde.

Bedarf an P-Rezyklaten in Hessen

Der Absatz an mineralischem Phosphat in Hessen als gemittelter Wert der Jahre 2007 bis 2017 wurde mit 5.776 Mg P_2O_5 pro Jahr (2521 Mg P/a), bzw. 7,5 kg P_2O_5 pro Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche und Jahr (3,3 kg P/ha·a) ermittelt (Kapitel 4.1). Dieser Bedarf war abgesehen von Schwankungen im Zeitraum 2008 bis 2011 relativ konstant und kann auch als

zukünftiger Anhaltswert für den Phosphatbedarf der hessischen Landwirtschaft angesehen werden.

Verglichen mit der ermittelten verfügbaren P-Rezyklatmenge von ca. 5.000 bis 6.400 Mg P_2O_5/a zeigt dieser Wert, dass eine Versorgung der hessischen Landwirtschaft mit P-Rezyklaten aus Klärschlamm möglich ist.

Akzeptanz gegenüber P-Rezyklaten

Zur Ermittlung potenzieller Absatz- und Vermarktungswege von Phosphorrezyklaten aus der Klärschlammbehandlung wurde eine Fragebogenaktion durchgeführt.

Bemerkenswert ist hierbei die Aussage von fast 80 % aller Befragten, dass Produkte aus der Klärschlammaufbereitung über ein Akzeptanzproblem, sprich ein schlechtes Image verfügen.

Besonders aufgeführt wird hierbei die Befürchtung, dass P-Rezyklate hohen Schadstoffbelastungen im Bereich Schwermetalle aufweisen könnten. Das ist insofern unbegründet, da in Kapitel 3.1.4 aufgezeigt wird, dass Rezyklate die Grenzwerte zumeist einhalten und zudem durch die Prüfung einer Verkehrstüchtigkeit die gesetzlichen Grenzwerte generell eingehalten werden müssen. Hierbei wird jedoch erkenntlich, dass eine unmissverständliche Aufklärung und Transparenz bezüglich dieser Befürchtungen geschaffen werden muss.

Dieser Problematik sollte sich aus diesen Gründen in Form von frühzeitigen Kampagnen mit einem gezielten Marketing angenommen werden, um den Markteinstieg der Rezyklate zu vereinfachen.

Des Weiteren kann die ökologische Landwirtschaft in der Vermarktung und der Marktakzeptanz eine Schlüsselrolle einnehmen. Werden P-Rezyklate in den Statuten der jeweiligen Verbände als mineralische Phosphatdünger zugelassen und von den Betrieben eingesetzt, wird die konventionelle Landwirtschaft folgen, wenn die restlichen äußeren Konditionen (z. B. Preis, Aufbringbarkeit, etc.) eine Verwendung nicht ausschließen. Zudem wird von den ökologisch orientierten Landwirten eine Bereitschaft gezeigt, höhere Preise für Rezyklate zu akzeptieren, da diese dem Kreislaufwirtschaftsgedanken und der Umweltbilanz förderlich sind und über agronomische Vorteile gegenüber dem bisher eingesetzten Rohphosphat verfügen. Dies kann besonders bei der Markteinführung und den potenziell zu Beginn erhöhten Preisen von Vorteil sein.

Vertriebswege für P-Rezyklate

Die bereits bestehenden Vermarktungswege und Vertriebsstrukturen von Düngemitteln sind in der Landwirtschaft etabliert (Kapitel 5.1). Dies wurde auch in der durchgeführten Fragebogenaktion festgestellt, in der sich 88,9 % der Befragten dafür aussprachen, P-Rezyklate über den Landhandel zu erstehen. Somit empfiehlt es sich, die produzierten P-Rezyklate ebenfalls über bestehende Vertriebswege zu veräußern.

Gießen, im Juli 2019



(Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen)

7 Literaturverzeichnis

- AbfklärV. (2017). *Klärschlammverordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist*. Berlin: BMJV.
- Adam. (2018). Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. In O. Holm, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, & S. Kopp-Assenmacher, *Verwertung von Klärschlamm* (S. 165 - 182). Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag, ISBN 987-3-944310-43-5.
- Bayrisches Landesamt für Umwelt. (2015). *Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen - Abschlussbericht*. Augsburg: Bayrisches Landesamt für Umwelt, (LfU). Abgerufen am 19. Dezember 2018 von [https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:15007,AARTxNR:lfu_abfall_00221,AARTxNODENR:344856,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:15007,AARTxNR:lfu_abfall_00221,AARTxNODENR:344856,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X) <https://www>
- BBodSchV. (2017). *Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 4 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist*. Berlin: BMJV.
- Bioland. (2019). *Bioland Richtlinien*. Abgerufen am 20. Juli 2019 von https://www.bioland.de/fileadmin/dateien/HP_Dokumente/Richtlinien/Bioland_Richtlinien_18_Maerz_2019.pdf
- BMEL. (2018). Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. *Inverkehrbringung neuer Düngemittel*. Abgerufen am 12. Dezember 2018 von https://www.bmel.de/DE/Ministerium/Organisation/Beiraete/_Texte/Duenglinverkehrbringen.html
- BMU. (2018). Leitfaden zur Anwendung der Abfallhierarchie nach § 6 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) - Hierarchiestufen Recycling und sonstige Verwertung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Abgerufen am 10. Dezember 2018 von https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/krwg_leitfaden_abfallhierarchie_bf.pdf
- Bogner, & Ortwein. (2018). Phosphorrückgewinnung - Geeignete Verfahren hinsichtlich der neuen Anforderungen. In O. Holm, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, & S. Kopp-Assenmacher, *Verwertung von Klärschlamm* (S. 419 - 426). Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag, ISBN 987-3-944310-43-5.
- Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft. (2017). Bio-Umsatz knackt die 10. Mrd. € und jeder 10. deutsche Hof macht Bio. Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft. Abgerufen am 20. Dezember 2018 von <https://www.boelw.de/themen/zahlenfakten/landwirtschaft/artikel/oeko-flaeche-und-bio-betriebe-2017-1/>
- Demeter. (2018). *Allgemeine Regelungen Erzeugung, 7.15. Anhänge - Anhang 1 - Zugelassene Düngemittel und Mulchmaterialien*. Abgerufen am 20. Juli 2019 von https://www.demeter.de/sites/default/files/richtlinien/richtlinien_anhang-1-duenger.pdf

- DPP. (2018). Schriftliche Mitteilungen. (D. Frank, Interviewer) Frankfurt: Deutsche Phosphor-Plattform DPP e.V.
- DüMV. (2017). *Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305) geändert worden ist*. Berlin: BMJV.
- DüngG. (2017). *Düngegesetz vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54, 136), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1068) geändert worden ist*. Berlin: BMJV.
- DüV. (2017). *Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305)*. Berlin: BMJV.
- DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1. (2018). Phosphor: Von der Rückgewinnung zum Recycling - Dritter Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1. In *Korrespondenz Abwasser, Abfall (8/18)* (S. 710-717). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., GFA, ISSN:1866-0029.
- DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5. (2018). Auswirkungen der Klärschlammverordnung auf die Klärschlamm Entsorgung. In *Korrespondenz Abwasser, Abfall (8/18)* (S. 703 - 709). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., GFA , ISSN: 1866-0029.
- Europäisches Parlament. (2018). *Fertilisers/cadmium: Parliament and Council negotiators reach provisional deal*. (P. E. Parlament, Hrsg.) Abgerufen am 13. Dezember 2018 von <http://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20181119IPR19407/fertilisers-cadmium-parliament-and-council-negotiators-reach-provisional-deal>
- Fischinger, Möller, Römer, & Steffens. (2014). Phosphor im Kreislauf. *Bioland-Fachmagazin für den ökologischen Landbau; Pflanzenbau & Technik - Dezember*, S. 11 - 13. Abgerufen am 17. Januar 2019 von https://www.bioland.de/fileadmin/dateien/Newsletter_Landbau/bioland_12_2014_Phosphor_im_Kreislauf.pdf
- Hessisches Statistisches Landesamt. (2012). *Landwirtschaft in Hessen 1949 bis 2010*. Wiesbaden: Hessisches Statistisches Landesamt. Abgerufen am 17. Dezember 2018 von https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/CIVS_j10.pdf
- Hessisches Statistisches Landesamt. (2012b). *Statistische Berichte - Bodennutzung in Hessen 2012 - Endgültige Ergebnisse*. Wiesbaden: Hessisches Statistisches Landesamt. Abgerufen am 17. Dezember 2018 von https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/HEHeft_derivate_00001082/CI1_j12.pdf;jsessionId=A520475E7E09411FBC257CF1DF4F3B87
- Hessisches Statistisches Landesamt. (2013). *Statistisches Jahrbuch Hessen 2013/2014 - Band 1 - Wirtschaft, Erwerbstätigkeit und Umwelt*. Wiesbaden: Hessisches Statistisches Landesamt. Abgerufen am 10. Januar 2019 von https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/JB-2013-14_Band_1.pdf
- Hessisches Statistisches Landesamt. (2017). *Bodennutzung nach ausgewählten Hauptnutzungs- und Kulturarten in den landwirtschaftlichen Betrieben Hessen 2003 bis 2017*. Wiesbaden: Hessisches Statistisches Landesamt. Abgerufen am 10. Januar

- 2019 von
https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/HEHeft_derivate_00007435/CI1_j17_a.pdf;jsessionid=C525DB97B9BA19CB7FF6D80B0972592A.
- Hessisches Statistisches Landesamt. (2017b). *Bodennutzung nach ausgewählten Hauptnutzungs- und Kulturarten in den landwirtschaftlichen Betrieben Hessens 2003 bis 2017*. Wiesbaden: Hessisches Statistisches Landesamt. Abgerufen am 11. Januar 2019 von
https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/L_Bodennutzung_03-18.xlsx
- Hessisches Statistisches Landesamt. (2018). *Ausgewählte Daten der hessischen Landwirtschaft*. Abgerufen am 15. Januar 2019 von
https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/Landwirtschaft_Grunddatenblatt_Stand_13122018.pdf
- Hessisches Umweltministerium. (2018). *Ökologischer Landbau*. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Abgerufen am 13. Dezember 2018 von <https://umwelt.hessen.de/landwirtschaft/oekologischer-landbau>
- Hüther. (2017). *Zulassung von Rezyklaten als Düngemittel*. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Referat VII, Frankfurt am Main. Abgerufen am 18. Dezember 2018 von
https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/2017-09-19_huether_phosphordialog.pdf
- Jedelhauser, Aschenbrenner, Vjestica, Wierer, Fischinger, & Binder. (2015). Kriterien für die Akzeptanz von recyceltem Phosphatdünger aus Abwasser und Klärschlamm - Ergebnisse einer Praxisbefragung von ökologisch wirtschaftenden Landwirten. In *13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*. Abgerufen am 13. Dezember 2018 von http://orgprints.org/26773/1/26773_jedelhauser.pdf
- Kratz, & Schnug. (2009). Zur Frage der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor in Düngemitteln. *Journal für Kulturpflanzen*, 2-8. Abgerufen am 15. November 2018 von https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00007720#
- Kratz, Adam, & Vogel. (2018). Pflanzenverfügbarkeit und agronomische Effizienz von klärschlambasierten Phosphor (P)-Recyclingdüngern. In O. Holm, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, & S. Kopp-Assenmacher, *Verwertung von Klärschlamm* (S. 391-407). Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, ISBN 987-3-944310-43-5.
- KrWG. (2017). *Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist*. Berlin: BMJV.
- Mändle. (2018). *Wirtschaftslexikon*. Abgerufen am 19. Dezember 2018 von Primärstufe:
<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/primaerstufe-42085>
- Montag, Bastian, & Pinnekamp. (2016). *Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammmasche*. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Abgerufen am 10. Oktober 2018 von
https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/.../gutachten_der_rwth_aachen.pdf

- Naturland. (2019). *Naturland Richtlinien - Erzeugung*. Abgerufen am 20. Juli 2019 von https://www.naturland.de/images/Naturland/Richtlinien/Naturland-Richtlinien_Erzeugung.pdf
- Schaaf. (2018). *Bestimmung der Pflanzenverfügbarkeit von ausgewählten Recycling-Phosphaten aus Klärschlämmen und Klärschlammaschen*. Kassel: Landesbetrieb Hessisches Landeslabor. Abgerufen am 8. November 2018 von https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/abschlussbericht_01062018.pdf
- Schiebold. (2018). Rechtliche Rahmenbedingungen der Klärschlamm Entsorgung. In O. Holm, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, & S. Kopp-Assenmacher, *Verwertung von Klärschlamm* (S. 31-42). Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, ISBN 987-3-944310-43-5.
- Siebert. (2010). Was sind EG-Düngemittel? *Humuswirtschaft & Kompost aktuell*(1/2 2010). Abgerufen am 29. November 2018 von https://www.kompost.de/fileadmin/news_import/Was_sind_EG-Duengemittel_9_1_1_10.pdf
- Statista. (2019). *Durchschnittlicher Preis für Phosphatgestein* weltweit in den Jahren 1960 bis 2018 (in US-Dollar je Tonne)*. Abgerufen am 17. Januar 2019 von Statista: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/432915/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-phosphat-weltweit/>
- Statistisches Bundesamt. (2009). *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 18. Januar 2019 von https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00004299/2030312097004.pdf;jsessionid=F1403B9D52627159980115CA20180C1A
- Statistisches Bundesamt. (2010). *Produzierendes Gewerbe - Düngemittelversorgung, 2008/2009*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 18. Januar 2019 von https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00005478/2040820107004.pdf;jsessionid=5DF34136A900AB542E283ECFE7EBB000
- Statistisches Bundesamt. (2013). *Produzierendes Gewerbe - Düngemittelversorgung, 12/13*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 10. Januar 2019 von https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000074
- Statistisches Bundesamt. (2015). *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 18. Januar 2019 von https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Bodennutzung/BodennutzungErzeugung2030300147004.pdf?__blob=publicationFile
- Statistisches Bundesamt. (2015b). *Produzierendes Gewerbe - Düngemittelversorgung, 2014/2015*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 18. Januar 2019 von https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Fachstatistik/DuengemittelversorgungJ2040820157004.pdf;jsessionid=929D08F83F24C47D26029617CCAD601F.InternetLive2?__blob=publicationFile
- Statistisches Bundesamt. (2016). *Produzierendes Gewerbe - Düngemittelversorgung 2015/2016*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 24. Januar 2019 von

- https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Fachstatistik/DuengemittelversorgungJ2040820167004.pdf;jsessionid=929D08F83F24C47D26029617CCAD601F.InternetLive2?__blob=publicationFile
- Statistisches Bundesamt. (2017). *Produzierendes Gewerbe - Düngemittelversorgung*. Abgerufen am 21. Januar 2019 von https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Fachstatistik/DuengemittelversorgungJ2040820177004.pdf;jsessionid=929D08F83F24C47D26029617CCAD601F.InternetLive2?__blob=publicationFile
- Statistisches Bundesamt. (2018). *Produzierendes Gewerbe - Düngemittelversorgung; 2017/18*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 18. Januar 2019 von https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Fachstatistiken/duengemittelversorgung-jahr-2040820187004.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Statistisches Bundesamt. (2018b). *Qualitätsbericht Düngemittelstatistik*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 18. Januar 2019 von https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Fachstatistiken/duengemittelversorgung-jahr-2040820187004.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Steckenmesser. (2017). *Effect of various types of thermochemical processing of sewage sludge on the fate of heavy metals and polycyclic organic hydrocarbons*. Waste Management, Elsevier.
- Steckenmesser, Vogel, & Steffens. (2016). P-Verfügbarkeit von Recyclingprodukten. In V. D.-u. Forschungsanstalten, *VDLUFA - Schriftenreihe 73* (S. 57-73). Darmstadt: VDLUFA. Abgerufen am 7. Februar 2019 von https://www.vdlufa.de/kongress2016/SR073_2016_Kongressband.pdf
- Umweltbundesamt. (2015). *Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abgerufen am 22. Februar 2019 von https://www.bmu.de/fileadmin/.../fkz_3713_26_301_phosphorrueckgewinnung_bf.pdf

8 Anhang

Fragebogen

3. Anforderungen an die P-Rezyklate

Bitte eintragen

3.1	<p>Bewerten Sie bitte folgende Aussagen in ihrer Relevanz (in Schulnoten 1 bis 6; 1 sehr relevant, 6 nicht relevant):</p> <p>Die Rezyklate müssen eine hohe Wasserlöslichkeit aufweisen.</p> <hr/> <p>Die Rezyklate müssen eine hohe Ammoncitratlöslichkeit aufweisen.</p>	<input type="text"/> <input type="text"/>
3.2	<p>Die Pflanzenverfügbarkeit der P-Rezyklate sollte sein (in Schulnoten 1 bis 6; 1 wichtig, 6 unwichtig):</p> <p>sofort/vollständig</p> <hr/> <p>mittelfristig/gut</p> <hr/> <p>langfristig/gut</p>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
3.3.1	<p>P-Rezyklate aus kommunalem Klärschlamm entsprechen den Anforderungen an Düngemitteln entsprechend der aktuell gültigen Düngemittel-Verordnung vom 26.05.2017.</p> <p>Ist dieses Qualitätskriterium für den Einsatz in Ihrem Bereich ausreichend?</p>	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
3.3.2	<p>Wenn nein, welche zusätzlichen Anforderungen stellen Sie an Düngemittel?</p>	
3.4	<p>Über welche Lager- und Transporteigenschaften müssen die P-Rezyklate für Ihre Zwecke verfügen?</p>	
3.5	<p>Welche Eigenschaften müssen die P-Rezyklate im Falle einer Direktanwendung in der Landwirtschaft aufweisen, um den maschinentechnischen Ausbringungsmöglichkeiten der Landwirte möglichst zu entsprechen?</p>	

4. Generelle Einschätzungen zu Vermarktung und Vermarktungswege von P-Rezyklaten in Hessen

		Bitte eintragen	
4.1	Wie schätzen Sie das Abnahmepotenzial von P-Rezyklaten vom Produzent der Rezyklate ein (in Schulnoten 1 bis 6; 1 sehr gut, 6 sehr schlecht)?		
	Direktabnahme der Landwirtschaft als fertiges Düngemittel	<input type="text"/>	
	Direktabnahme der Düngemittelindustrie für die Substitution von zugekauftem mineralischem Import-Phosphor	<input type="text"/>	
4.2.1	Als P-Rezyklat kann auch 75%ige Phosphorsäure mit einer technischen Qualität erzeugt werden. Sehen Sie Vermarktungsmöglichkeiten für die Phosphorsäure außerhalb der Düngemittelindustrie (z. B. zur Reinigung von Molkereianlagen, Tierfutterproduktion etc.)?	<input type="text"/>	Ja
		<input type="text"/>	Nein
4.2.2	Wenn ja, welche:		
4.3	Bewerten Sie bitte folgende Punkt nach ihrer Relevanz für die zukünftige Vermarktung (in Schulnoten 1 bis 6; 1 sehr relevant, 6 nicht relevant):		
	Die Genehmigungsverfahren für P-Rezyklate als Düngemittel müssen vereinfacht werden.	<input type="text"/>	
	Eine Beimischquote von P-Rezyklaten sollte bei konventionellen Düngemitteln eingeführt werden.	<input type="text"/>	
	P-Rezyklate müssen kontinuierlich verfügbar sein.	<input type="text"/>	
	P-Rezyklate müssen über eine gleichbleibende Qualität verfügen.	<input type="text"/>	
	Der Preis für Phosphor aus Rezyklaten muss gleich oder niedriger sein als der Preis für Phosphor aus Rohphosphat.	<input type="text"/>	

5. Vermarktungswege anfallender P-Rezyklate in der Landwirtschaft

		Bitte eintragen
5.1	Bitte geben Sie an, welchen Vertriebsweg die Landwirte Ihrer Einschätzung nach bevorzugt für den Erhalt der P-Rezyklate wählen würden:	
	Direktvertrieb durch den Produzenten	<input type="text"/>
	Vertrieb über den Landhandel	<input type="text"/>
5.2.1	Wie sollte die Versorgung mit P-Rezyklate gegeben sein?	<input type="text"/> Lieferung <input type="text"/> Selbstabholung
5.2.2	Bei Selbstabholung: Welche Strecken (Fahrweg) wäre ein Landwirt Ihrer Einschätzung nach bereit zur Abholung der P-Rezyklate zurückzulegen (in km)?	<input style="width: 150px; height: 20px;" type="text"/>
5.3	Für wie relevant halten Sie die maschinentechnischen Ausbringungsmöglichkeiten (Düngung) der Landwirte für die Vermarktung von P-Rezyklate (in Schulnoten 1 bis 6; 1 sehr relevant, 6 nicht relevant)?	<input style="width: 40px; height: 20px;" type="text"/>

6. Akzeptanz von Produkten aus der Klärschlammaufbereitung

		Bitte eintragen
6.1.1	Sind sie der Meinung, dass Produkte aus der Klärschlammaufbereitung ein Akzeptanzproblem haben könnten?	<input type="text"/> Ja <input type="text"/> Nein
6.1.2	Wenn ja, welche Vorbehalten sind gegenüber Produkten aus der Klärschlammaufbereitung vorhanden?	
6.2	Welche Maßnahmen könnten Ihrer Meinung nach für die Verbesserung der Akzeptanz getroffen werden?	