

Machbarkeitsstudie

Klärschlammverwertung und Phosphorrecycling für die Region Nord-Ost-Hessen (RePhoNOH)



Endbericht

**Gefördert mit Mitteln des Hessischen Ministeriums
für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz**

Fördermittelbescheid vom 31. Oktober 2019, Geschäftszeichen I 1 - 003d 10
Bewilligungszeitraum: bis 15.03.2021

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XII
1 Veranlassung und Ziele	1
2 Rechtliche Rahmenbedingungen	3
2.1 Aktuelle Rechtslage (Stand 2020)	3
2.2 Rechtslage ab 31.12.2023	4
2.3 Rechtslage ab 01.01.2029 bzw. 01.01.2032	4
3 Zusammenstellung und Konkretisierung der für die Studie notwendigen Basisdaten	8
3.1 Kläranlagen und Betreiber in der Region NOH mit Ausbaugrößen sowie Anschlussgrößen	8
3.2 Erhebung von spezifischen Angaben jeder Kläranlage mittels Fragebogen	11
3.3 Verifizierung der Daten mit den Daten aus dem Hessischen AbwasserAnlagen-Kataster HAA	12
3.4 Auswertung der Fragebögen	13
3.4.1 Kläranlagen und Anschlussgrößen	13
3.4.2 Interesse an einer Klärschlammkooperation	14
3.4.3 Klärschlamm Entsorgung bzw. -verwertung bis 2020	19
3.4.3.1 Entsorgungswege im Regierungsbezirk Kassel sowie den Landkreisen	19
3.4.3.2 Entsorgungspreise in den Jahren 2017 bis 2019	21
3.5 Auswertung der Klärschlammanalysen, Konkretisierung und Bewertung der jeweiligen Klärschlammzusammensetzung in Bezug auf DüMV, AbfKlärV 23	
3.5.1 Schadstoffgehalte	23
3.5.2 Phosphor-Potential	29
3.6 Annahmen und Randbedingungen für die weitere Planung	31
3.7 Konkretisierung und Festlegung der zu verwertenden / entsorgenden Klärschlamm mengen für die weitere Planung	32
4 Typisierung der Kläranlagen in Nordost-Hessen	34
4.1 Teichanlagen und Klärschlammvererdungsanlagen, diskontinuierliche Entsorgung	34

4.2	Phosphorelimination	35
4.3	Schlammstabilisierung, simultan aerob oder anaerob (Faulung)	38
5	Auswirkungen des Maßnahmenprogramms zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie	42
6	Stand der Technik und Wissenschaft des Phosphor-Recyclings, Vorbehandlung, Vor- und Nachteile	43
6.1	Übersicht und Grundsätze der Bewertung verschiedener P-Rückgewinnungsverfahren	43
6.1.1	Übersicht	43
6.1.2	Grundsätze zur Bewertung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung	45
6.2	Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser-(teil)strömen (z.B. Zentrat) und/oder Klärschlamm	46
6.2.1	MAP-Fällung (Struvit) aus Schlammwasser / Zentrat	47
6.2.2	Brushit-Fällung aus Schlammwasser / Zentrat	50
6.3	Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche	51
6.4	Vortrocknung vor thermischer Verwertung und Phosphor-Rückgewinnung aus der Klärschlammasche	55
6.4.1	Technologien zur Klärschlamm-trocknung	55
6.4.2	Bewertung der Rückbelastung der Abwässer aus Klärschlamm-Trocknungsanlagen bei den verschiedenen Trocknungstechnologien	60
6.4.2.1	Abwassermengen aus der Klärschlamm-trocknung	60
6.4.2.2	Abwasserzusammensetzung bei der Klärschlamm-trocknung	62
6.4.2.3	Rückbelastung bei Einleitung der Brüdenkondensate aus der Klärschlamm-trocknung, CSB- und NH ₄ -N-Frachten	63
6.4.3	Auswirkungen der Klärschlamm-trocknung auf den Heizwert	64
6.5	Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung	66
6.5.1	Übersicht	66
6.5.2	Wirbelschichtverfahren	67
6.5.3	Staubfeuerung, Fa. Carbotechnik GmbH	68
6.5.4	Drehrohr-Technik, am Beispiel des 2-stufigen thermochemischer Aufschluss nach dem EuPhoRe®-Verfahren	69

6.5.5	KlärschlammReformer, Fa. Thermo-System	71
6.5.6	Bewertungskriterien für Verfahren der thermischen Klärschlammbehandlung	74
6.6	Gas- und staubförmige Emissionen aus der thermischen Klärschlammbehandlung, Emissionsminderung	75
6.7	Eigenschaften von virtuellen Klärschlammaschen nach thermischer Umsetzung des Klärschlammes aus dem Einzugsgebiet	78
7	Chemische Zusammensetzung und Beschreibung der P-Rezyklate aus den aktuell wichtigsten Rückgewinnungsverfahren	82
7.1	Löslichkeit von P-Rezyklaten	83
7.2	Agronomische Effizienz von P-Rezyklaten	86
7.3	Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit der P-Rezyklate	89
7.4	Schwermetallgehalte und organische Schadstoffbelastung von P-Rezyklaten	94
7.4.1	Schwermetallbelastungen in Phosphor-Rezyklaten	95
7.4.2	Organische Schadstoffe in Phosphor-Rezyklaten	95
7.5	Zusammenfassende Betrachtung zur Düngewirksamkeit und Schadstoffbelastung von P-Rezyklaten	97
8	Vermarktung der Phosphor-Rezyklate (Phosphorsäure / Düngemittel), Qualität, Pflanzenverfügbarkeit	99
8.1	Verwertung von Phosphorsäure	99
8.2	Verwertung von Fällungsprodukten (Struvit (MAP), Brushit)	99
8.3	Direkte Verwertung von Aschen aus der Klärschlammverbrennung in der Düngemittelindustrie	99
8.4	Aufbereitung von Aschen aus der Klärschlammverbrennung, Fertigung eines verkaufsfähigen Düngers	100
8.5	Anforderungen und Akzeptanz der Phosphor-Rezyklate	100
8.5.1	Anforderungen der Düngemittelindustrie	101
8.5.2	Anforderungen der Landwirte	101
8.5.3	Akzeptanz und Anforderungen gegenüber P-Rezyklaten im Ökolandbau	103
8.5.4	Anforderungen des Lebensmittelhandels, hier Fa. tegut ... gute Lebensmittel GmbH & Co. KG	104

8.5.5	Zusammenfassung, Strategien zur Verwertung des P-Rezyklats in der Düngemittelindustrie, Rückführung des Sekundärrohstoffes in die regionale Landwirtschaft über regionale Düngemittelvermarkter	106
8.6	Verfahren zur Inverkehrbringung von P-Rezyklaten als Düngemittel	107
8.6.1	Qualitäts- und Hygienevorschriften	112
8.6.2	Schadstoffe	112
8.6.3	Löslichkeit	113
8.6.4	Hygieneparameter	115
8.6.5	Ausblick der rechtlichen Situation	115
9	Ausarbeitung verschiedener Szenarien zur Klärschlammverwertung und zum Phosphor-Recycling in Nordost-Hessen	116
9.1	Übersicht	116
9.2	Bewertung und Ausarbeitung von Realisierungsvorschlägen (Szenarien)	118
9.2.1	Szenario 1: Bodenbezogene Verwertung und Rückführung des im Schlamm gebundenen P in die Landwirtschaft	118
9.2.1.1	Zukünftige Schlamm-mengen in der landwirtschaftlichen Verwertung	118
9.2.1.2	Szenario 1.1: Bodenbezogene Verwertung als Nassschlamm	119
9.2.1.3	Szenario 1.2: Bodenbezogene Verwertung entwässerter Schlämme	120
9.2.2	Szenario 2: Dezentrale P-Rückgewinnung aus Klärschlamm, Abreicherung auf < 2 % P, Nutzung der Fällungsprodukte als Düngemittel, thermische Schlammverwertung in der Mitverbrennung	121
9.2.2.1	Szenario 2.1: Betrieb von mobilen Phosphor-Rückgewinnungsanlagen zur Phosphor-Abreicherung auf < 2 % P	123
9.2.2.2	Szenario 2.2: Bau von fest installierten Phosphor-Rückgewinnungsanlagen zur Phosphor-Abreicherung auf < 2 % P	125
9.2.2.3	Thermische Verwertung des P-abgereicherten Schlamms	129

9.2.3	Szenario 3: Dezentrale Trocknung und Verbrennung in Klein-Verbrennungsanlagen, Nutzung der Asche als Rohstoff für die Düngemittelindustrie	131
9.2.4	Szenario 4: Dezentrale Trocknung und zentrale Verbrennung in Kassel, Phosphor-Rückgewinnung aus der Asche	138
9.2.5	Szenario 5: Zentrale Verbrennung und Phosphorrückgewinnung aus der Asche, Städtische Werke Energie + Wärme GmbH, Kassel	143
9.2.5.1	Ascheaufbereitung zur Phosphorsäure nach Verfahren A	144
9.2.5.2	Ascheaufbereitung zur Phosphorsäure nach Verfahren B	145
9.3	Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Szenarien	146
9.3.1	Kosten der Klärschlammlogistik	146
9.3.1.1	Transportkosten Nassschlamm	147
9.3.1.2	Transportkosten entwässerte Schlämme	147
9.3.1.3	Transportkosten getrocknete Schlämme und Aschen	147
9.3.2	Investitionen	148
9.3.3	Betriebskosten	149
9.3.4	Jahreskosten	149
9.3.5	Kostenvergleich der verschiedenen Szenarien	150
9.4	Entscheidungskriterien	158
9.4.1	Kriterium Kostenvergleich	158
9.4.2	Kriterium Einhaltung der Grenz- und Höchstwerte der Düngemittelverordnung	158
9.4.3	Kriterium Pflanzenverfügbarkeit und Schadstoffbelastung	158
9.4.4	Kriterium Inverkehrbringung des P-Rezyklates und Entlassung aus dem Abfallrecht	159
9.4.5	Kriterium Platzbedarf	160
9.4.6	Kriterium Genehmigungsumfang	160
9.4.7	Kriterium Ausfallrisiko bez. Erfüllung P-Recyclingpflicht	161
9.4.8	Kriterium Erfordernis zum Aufbau von Vertriebsstrukturen	161
9.4.9	Kriterium Erfüllungsgrad des Regionalitätsanspruchs der P-Rückgewinnung	162
9.4.10	Kriterium technologischer Reifegrad	162

9.5	Bewertung der Szenarien	162
9.6	Integrierte Bewertung der verschiedenen Szenarien	165
10	Vorschläge für ein Gesamtkonzept und weitere Planungsschritte für die Region Nordost-Hessen	167
10.1	Ziele	167
10.2	Positionsbestimmung zur Berichtspflicht auf Ebene der einzelnen Kläranlagen	167
10.3	Umsetzungskonzept	168
10.4	Festlegung der Mengengerüste zur Konkretisierung und Detaillierung der Angebote für das P-Recycling	168
10.5	Empfehlung für die Ableitung von Realisierungsvorschlägen bei semidezentralen Anlagen	169
10.6	Empfehlung für das weitere Vorgehen, Planungsschritte	170
11	Literatur	172
12	Anhang	178
12.1	Liste der Partnerkommunen, Stand 20.05.2020	178

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Zentrale Elemente der Machbarkeitsstudie RePhoNOH inkl. Systemgrenze der Betrachtung (gestrichelte Linie) (weitere Elemente siehe Text)	2
Abb. 2-1:	Übersicht der Neuordnung der Klärschlammverwertung ab dem Jahr 2029/32 (LAGA, 2020)	7
Abb. 3-1:	Aufteilung der Ausbaugrößen (EW) der Größenklassen	10
Abb. 3-2:	Aufteilung der Anschlussgrößen (EW) der Größenklassen	14
Abb. 3-3:	Prozentuale Aufteilung der Interessensbekundungen, Anzahl der jeweiligen Kläranlagen (Grundgesamtheit 297 Kläranlagen); Klärschlammmenge der Anlagen ohne Rückmeldung ermittelt anhand der Ausbaugröße der Anlagen multipliziert mit einem mittleren Klärschlammfall von 13,5 kg TM/(EW*a)	16
Abb. 3-4:	Prozentuale Aufteilung der Interessensbekundungen, Klärschlammengen (Mittelwerte der Jahre 2017 – 2019, 22.641 t TM/a);	16
Abb. 3-5:	Kläranlagen der Region Nordost-Hessen; Kreisdurchmesser zeigen die anfallenden Klärschlammengen (als t TM/a), ohne Maßstab, Basis: HLNUG, Kommunale Abwasserbehandlungsanlagen in Hessen - Lagebericht 2018 (HLNUG, 2018)	20
Abb. 3-6:	Zuteilung der Phosphor-Mengen zu Clustern der P-Konzentration in den Schlämmen	30
Abb. 3-7:	Klärschlammaufkommen in den Landkreisen des Regierungsbezirks Kassel, Original-Substanz (OS), umgerechnet auf 25 % TM sowie Trockenmasse (TM)	33
Abb. 4-1:	Beispiel für einen regionalen Klärschlammverbund, Übersicht über die Klärschlämme der Kläranlagen des Klärschlammverbundes Schlitz ab 2020, die über die Faulung der Kläranlage Schlitz angenommen werden (als t TM/a)	41
Abb. 4-2:	Beispiel für einen regionalen Klärschlammverbund, Übersicht über die im Klärschlammverbund Schlitz angenommenen sowie in der Faulung behandelten Co-Substrate ab 2020 (als t TM/a)	41
Abb. 6-1:	Verfahrensgruppen und -familien zur P-Rückgewinnung jenseits der direkten bodenbezogenen Verwertung (in Anlehnung an Kabbe und Rinck-Pfieffer, 2019)	43
Abb. 6-2:	Verfahrensbild AirPrex-Verfahrens (http://www.cnp-cycles.de/verfahren/airprex , aufgerufen 15.01.2021)	49
Abb. 6-3:	Verfahrensbild CalPrex®-Verfahren (http://www.cnp-cycles.de/verfahren/calprex , aufgerufen 15.01.2021)	50
Abb. 6-4:	Blockbild TetraPhos®-Verfahren, Fa. Remondis Aqua GmbH, (verändert nach Ruscheweyh, 2020)	52
Abb. 6-5:	Vereinfachtes Verfahrensschema PARFORCE-Core, (Eschment, Fröhlich, 2021)	53
Abb. 6-6:	Einordnung verschiedener Trocknerarten (nach Tomalla, 2017)	59

Abb. 6-7:	Abhängigkeit des Heizwertes von Klärschlamm vom TM-Gehalt sowie Glühverlust (entspr. oTM-Gehalt) (Dünnebeil, 2017)	64
Abb. 6-8:	Einordnung eines entwässerten Schlamms mit i.M. 27 % TM, 54,3 % oTM (in der TM) im Brennstoff-Dreiecksdiagramm inkl. Kennzeichnung des selbstgängigen autarken Verbrennungsbereiches (gilt für Wirbelschichtverbrennungsanlagen) (nach Heindl et. al., 2020)	65
Abb. 6-9:	Thermische Verfahren der Klärschlammbehandlung, Darstellung in Anlehnung an (nach Franck, Schröder, 2015, S. 463, erweitert).	66
Abb. 6-10:	Kraftwirkung am Feststoffpartikel (Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 4)	68
Abb. 6-11:	Verfahrensfließbild für die thermische Umsetzung von entwässertem Klärschlamm in einer Staubfeuerung (Schöfmann, Eder, 2019)	69
Abb. 6-12:	Drehrohr-Ofen mit außen liegender Beheizung, Fa. IBU-tec advanced materials AG, Weimar, Homepage www.IBU-tec.de (IBU-tec, 2020)	70
Abb. 6-13:	Verfahrenskonzept zur dezentralen thermischen Verwertung von Klärschlamm aus vorgeschalteter Trocknung und mehrstufiger Verbrennung (KlärschlammReformer (Thermo-System, 2020)	71
Abb. 6-14:	Verfahrenskomponenten der KlärschlammReformer-Anlage (Thermo-System, 2020)	72
Abb. 6-15:	KlärschlammReformer, Fa. Thermo-System auf der Kläranlage Renningen (Thermo-System, 2020)	73
Abb. 6-16:	KlärschlammReformer-Halle mit Annahmehunker, Rauchgasreinigung und BigBag-Befüllstation, Fa. Thermo-System auf der Kläranlage Renningen (Thermo-System, 2020)	73
Abb. 6-17:	Einteilung der Verfahren zur Minderung saurer Schadgase (Löschau, 2014, S. 233)	77
Abb. 6-18:	Virtuelle Aschen in der Region NOH (exemplarisch), Ausschöpfung der Grenz-, Maximal- bzw. Kennzeichnungswerte der deutschen Düngemittelverordnung	80
Abb. 7-1:	P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Wasser (Kratz, Adam, Vogel, 2018)	84
Abb. 7-2:	P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Neutralammoniumcitrat (Kratz, Adam, Vogel, 2018)	85
Abb. 7-3:	P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Zitronensäure (Kratz, Adam, Vogel, 2018)	85
Abb. 7-4:	P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Ameisensäure (Kratz, Adam, Vogel, 2018)	86
Abb. 7-5:	Komponenten der Phosphatdynamik im Boden	87
Abb. 7-6:	Relative agronomische Brutto-Effizienz (Brutto RAE-P) verschiedener P-Rezyklate (% des wasserlöslichen Referenzdüngers) (Kratz, Adam, Vogel, 2018)	88
Abb. 7-7:	Relative agronomische Netto-Effizienz (Netto RAE-P) verschiedener P-Rezyklate (% des wasserlöslichen Referenzdüngers) (Kratz, Adam, Vogel, 2018)	88

Abb. 7-8:	Gefäßversuche zur Bewertung der Pflanzenverfügbarkeit (Steffens, Phosphor-Dialog des HMUKLV, Gießen, 25.10.2019)	90
Abb. 7-9:	CAL-lösliches P in Bodenproben nach der Keimung des Weidelgrases in Abhängigkeit von Düngungsvariante und Bodensubstrat. Varianten „ohne Additive“, „2,25 % MgCl ₂ “ und „2,25 % Polychlorid“: Verbrennungsgasche aus Klärschlamm Schlitz; Varianten weitere Verbrennungsgaschen „GRU/AS“ und „REN/AS“	92
Abb. 7-10:	Einfluss der Phosphor-Düngung (75 mg P/kg Substrat) auf die in drei Schnitten erzielte Sprosstrockenmasse (g TM/Gefäß) von Welschem Weidelgras in Abhängigkeit von Düngungsvariante und Bodensubstrat. Varianten „ohne Additive“, „2,25 % MgCl ₂ “ und „2,25 % Polychlorid“: Verbrennungsgasche aus Klärschlamm Schlitz; Varianten weitere Verbrennungsgaschen „GRU/AS“ und „REN/AS“	93
Abb. 7-11:	Abhängigkeit der apparenten Düngeneffizienz für Welsches Weidelgras in Abhängigkeit von der Düngungsvariante und dem Bodensubstrat. Varianten „ohne Additive“, „2,25 % MgCl ₂ “ und „2,25 % Polychlorid“: Verbrennungsgasche aus Klärschlamm Schlitz; Varianten weitere Verbrennungsgaschen „GRU/AS“ und „REN/AS“	94
Abb. 9-1:	Phosphor-Abreicherung durch P-Rücklösung und Ausfällung als MAP / Struvit (nach Turek, Bouché, MSE GmbH, 2019)	123
Abb. 9-2:	P-Rücklösung in Abhängigkeit des pH-Wertes bei Fe- und Al-gefällten Schlämmen (nach Turek, Bouché, MSE GmbH, 2019)	125
Abb. 9-3:	Blockschema zum Brushit-Verfahren zur P-Rückgewinnung auf einer Kläranlage mit 32.000 EW	128
Abb. 9-4:	Baugrößen Klärschlammbehandlung Schneckenrockner plus Drehrohrkessel; je Modul Auslegung auf 500 kW _{th} sowie Betriebsdauer von 7.150 h/a	132
Abb. 9-5:	Szenario 3.1, Massenstrom Klärschlamm ca. 6.000 t/a entw. Schlamm, 27 % TM, Auslegung auf 500 kW _{th} , Betriebsdauer ca. 7.150 h/a	134
Abb. 9-6:	Szenario 3.2, Massenstrom Klärschlamm, Input ca. 12.000 t/a entw. Schlamm 25 % TM,; Auslegung auf 1.000 kW _{th} , Betriebsdauer ca. 7.550 h/a,	135
Abb. 9-7:	Annahmehunker (vorne), Paddeltrockner (Container hinten links) Ablufttechnik (hellgrau) sowie Stahlhalle für Verbrennungstechnik, Referenzanlage 6.000 t/a, 25 % TM, Foto: Anbieter	136
Abb. 9-8:	Trockner mit Abluftbehandlung, Referenzanlage, Foto: Anbieter	137
Abb. 9-9:	Drehrohröfen mit Abgasreinigung, Referenzanlage, Foto: Anbieter	137
Abb. 9-10:	Investitionen der Klärschlamm-trocknung bei verschiedenen Trocknungstechnologien sowie Jahresdurchsätzen.	141
Abb. 9-11:	Investitionen bei Bandtrocknern, Bau- und Planungskosten sowie Kosten für Maschinen und E-MSR-Technik bei verschiedenen Jahresdurchsätzen.	141

Abb. 9-12:	Spezifische Kosten der Klärschlamm-trocknung für entwässerten Klärschlamm mit 25 % TM bei verschiedenen Trocknungstechnologien sowie Jahresdurchsätzen.	142
Abb. 9-13:	Spezifische Kosten der beschriebenen Szenarien in €/t Originalsubstanz (OS), Kosten Szenario 1.2 – 5.2 ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m ³ entspr. 100 – 240 €/t TM	157
Abb. 9-14:	Spezifische Kosten der beschriebenen Szenarien in €/t Trockenmasse (TM), Kosten Szenario 1.2 – 5.2 ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m ³ entspr. 100 – 240 €/t TM	157
Abb. 9-15:	Spezifische Kosten der beschriebenen Szenarien in €/kg zurückgewonnenem Phosphor (P _{rec}), Kosten Szenario 1.2 – 5.2 ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m ³ entspr. 100 – 240 €/t TM	158

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Regelungen zur P-Rückgewinnung nach der novellierten Klärschlammverordnung (Quelle: Vortrag Roskosch, A., DPP-FORUM, 2020).	5
Tab. 3-1:	Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Aufteilung auf die Landkreise	8
Tab. 3-2:	Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Aufteilung auf die Größenklassen	9
Tab. 3-3:	Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Ausbaugrößen und Größenklassen in den einzelnen Landkreisen	10
Tab. 3-4:	Rückmeldungen auf die Fragebogenaktion in den einzelnen Landkreisen	11
Tab. 3-5:	Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Anschlussgrößen in den einzelnen Landkreisen	13
Tab. 3-6:	Ergebnis der Fragebogenaktion, Interessensbekundungen, Anzahl der jeweiligen Kläranlagen sowie zugeordnete Klärschlammmenge (t TM/a)	14
Tab. 3-7:	Interesse an Klärschlammkooperation Nordost-Hessen	18
Tab. 3-8:	Klärschlammverwertung bzw. -entsorgung in den einzelnen Landkreisen, zugeordnet nach landwirtschaftlicher Verwertung, Landschaftsbau, Mono- und Mit-Verbrennung sowie Klärschlammvererdung, Mittelwerte in den Jahren 2017 – 2019 (in t TM/a)	19
Tab. 3-9:	Entsorgungspreise Landwirtschaft, Nassschlamm	21
Tab. 3-10:	Entsorgungspreise Landwirtschaft, entwässerter Schlamm	22
Tab. 3-11:	Entsorgungspreise Landschaftsbau	22
Tab. 3-12:	Entsorgungspreise Verbrennung (Mono- und Mitverbrennung)	23
Tab. 3-13:	Anforderungen an Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost auf oder in den Boden gemäß AbfKlärV, 2017, DüMV, 2019, EU-Düngemittelverordnung 2019	25
Tab. 3-14:	Anzahl Kläranlagen in den einzelnen Landkreisen mit Überschreitungen von Kennzeichnungs- und Grenzwerten ausgewählter Schadstoffe lt. Düngemittelverordnung	28
Tab. 3-15:	Jährliche Schlammengen (t TM/a) mit bodenbezogener Verwertung in den Landkreisen von Kläranlagen, in denen in den Jahren 2017 – 2019 einzelne Analysenwerte oberhalb der Kennzeichnungs- oder Grenzwerte gemäß Düngemittelverordnung festgestellt wurden	28
Tab. 3-16:	Phosphor-Potential (in kg P/a) in den einzelnen Landkreisen, Zuordnung zu Clustern der P-Konzentrationen	30
Tab. 3-17:	Klärschlammengen (in t TM/a) in den einzelnen Landkreisen, Zuordnung zu Clustern der P-Konzentrationen	31
Tab. 3-18:	Phosphor-Potential (in kg P/a) in den einzelnen Landkreisen, Zuordnung zu den Klärschlammmentsorgungspfaden	31
Tab. 3-19:	Klärschlammengen in den Landkreisen des Regierungsbezirks Kassel als Mittelwerte der Jahre 2017 bis 2019	32

Tab. 4-1:	Klärschlammvererdungsanlagen sowie Teichkläranlagen im Regierungsbezirk Kassel	35
Tab. 4-2:	Anforderungen an die P-Ablaufwerte an kommunale Kläranlagen in betroffenen Einzugsgebieten (aus Maßnahmenprogramm 2015 – 2021, HMUKLV, 2015)	36
Tab. 4-3:	Gegenüberstellung der Anforderungen an die P-Ablaufwerte an kommunale Kläranlagen GK 4 und 5 (aus Maßnahmenprogramm 2015 – 2021, (HMUKLV, 2015), sowie dem Entwurf des Maßnahmenprogramms 2021 – 2027, (HMUKLV, 2020))	37
Tab. 4-4:	Kläranlagen mit Faulbehältern (anaerobe Schlammstabilisierung) im Regierungsbezirk Kassel, Rechnerische Raumbelastung	40
Tab. 6-1:	Zusammenstellung von grundsätzlichen Bewertungskriterien zum Einsatz von Klärschlamm-trocknungs-Technologien	56
Tab. 6-2:	Zusammenstellung von grundsätzlichen Anlagendaten verschiedener Klärschlamm-trocknungs-Technologien (Geyer, J., 2013), http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2013_eaa/2013_EaA_927_948_Geyer.pdf	56
Tab. 6-3:	Zusammenstellung von grundsätzlichen Anlagendaten verschiedener Klärschlamm-trocknungs-Technologien (Geyer, J., 2013), http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2013_eaa/2013_EaA_927_948_Geyer.pdf	57
Tab. 6-4:	Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen verschiedener Trocknungstechnologien (DWA Merkblatt M 379, Entwurf 2019)	58
Tab. 6-5:	Vergleich von Kontakt-trocknung und Band-trocknung [modifiziert nach (Heindl et al., 2020) sowie (Roskosch, Heidecke, 2018)]	60
Tab. 6-6:	Zusammenstellung verschiedener Analysen-Werte von Brüdenkondensaten aus der Klärschlamm-trocknung	62
Tab. 6-7:	Technische Daten der aktuell von Thermo-System angebotenen Baugröße des Klärschlamm-Reformers (Thermo-System, 2020)	74
Tab. 6-8:	Wirk- und Reaktionsprinzipien zur Abscheidung von Schadstoffen in der Abgasreinigung, [Fink, 2019, Darstellung in Anlehnung an: [Löschau, 2014, S. 93]]	76
Tab. 6-9:	Zusammensetzung der virtuellen Asche nach Einzugsgebiet (Stadt Kassel, Landkreise), für Gesamt-NOH sowie für die derzeitig vertraglich zur Verbrennung bei den Städtischen Werken fixierten Klärschlämme im Vergleich zu Grenz. bzw. Maximalwerten des deutschen und europäischen Düngemittelrechtes	81
Tab. 7-1:	Zusammenstellung der wichtigsten aktuell gehandelten mineralischen P-Düngemittel	82
Tab. 7-2:	Gesamt-Phosphat-Konzentrationen sowie absolute und relative P-Konzentrationen in 2%iger Zitronensäure und Neutralammoniumcitrat-Lösung von Klärschlamm und Verbrennungaschen sowie die Gesamt-Eisen-Konzentration in den Rezyklaten aus Klärschlamm	91

Tab. 7-3:	Summengehalte an PAK, PCDD/F und dl-PCB (nach den Toxizitätsäquivalenten der WHO bewertet) in Klärschlammaschen im Vergleich zu den (PCDD/F + dl-PCB)-Grenzwerten der Düngemittelverordnung (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015)	96
Tab. 7-4:	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 (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015)	96
Tab. 8-1:	Auszug aus der Anlage 1, Tabelle 1.2 DüMV Vorgaben der Phosphatdünger (DüMV, 2017)	109
Tab. 8-2:	Auszug aus Anlage 2, Tabelle 6.2 „Besondere Ausgangsstoffe für bestimmte mineralische Düngemittel“ (DüMV, 2017)	110
Tab. 8-3:	Auszug aus Tabelle 7 DüMV Ausgangsstoffe mit beschriebenen Einschränkungen der zulässigen Ausgangsstoffe (DüMV, 2017)	110
Tab. 8-4:	Auszug aus Tabelle 7 DüMV Ausgangsstoffe mit beschriebenen Einschränkungen für Klärschlämme (DüMV, 2017)	111
Tab. 8-5:	Auszug aus Anlage 2 DüMV, Kennzeichnungsschwelle und Grenzwerte Teil 1 (DüMV, 2017)	112
Tab. 8-6:	Anlage 2, Tabelle 4 DüMV, zulässige Phosphorverbindungen und Phosphatlöslichkeiten (DüMV, 2017)	113
Tab. 8-7:	Anlage 2 Tabelle, 5 DüMV, Gehaltsangaben und weitere Erfordernisse für den Phosphatbestandteil (DüMV, 2017)	114
Tab. 9-1:	Mögliche Massenströme zur Verwertung ab 2029 / 2031 im Vergleich mit den aktuellen Verwertungswegen (in t TM/a)	118
Tab. 9-2:	Potentielle Standorte für stationäre Anlagen zur Phosphor-Abreicherung aus Klärschlamm	126
Tab. 9-3:	Annahmekriterien der Zementindustrie (Auszug), siehe auch Kap. 12.4	131
Tab. 9-4:	Kostenzusammenstellung Szenario 1 „Bodenbezogene Verwertung“, bei Szenario 1.2 ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m ³ Nassschlamm entspr. 100 – 240 €/t TM	152
Tab. 9-5:	Kostenzusammenstellung Szenarien 2 „Dezentrale P-Rückgewinnung“ ggf. zzgl. ca. 4 – 9,5 €/m ³ Nassschlamm für die Entwässerung mit mobilen oder stationären Aggregaten berücksichtigen.	153
Tab. 9-6:	Kostenzusammenstellung Szenarien 3 „Dezentrale thermische Behandlung, Verwertung der Asche in der Düngeproduktion“, ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m ³ Nassschlamm entspr. 100 – 240 €/t TM.	154
Tab. 9-7:	Kostenzusammenstellung Szenarien 4 „Dezentrale Trocknung und Zentrale Verbrennung und P-Rückgewinnung aus der Asche“, ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m ³ Nassschlamm entspr. 100 – 240 €/t TM	155

Tab. 9-8:	Kostenzusammenstellung Szenarien 5 „Zentrale Trocknung und Verbrennung sowie P-Rückgewinnung aus der Asche“, ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m ³ Nassschlamm entspr. 100 – 240 €/t TM	156
Tab. 9-9:	Kriterienkatalog für die Entlassung des P-Rezyklats aus dem Abfallrecht	160
Tab. 9-10:	Im Rahmen der Verfahrensauswahl zu berücksichtigende Aspekte	163

1 Veranlassung und Ziele

Mit der im Oktober 2017 in Kraft getretenen Novelle der AbfKlärV (2017) sowie den Änderungen in der Düngegesetzgebung hat sich die Verwertung von Klärschlamm drastisch geändert. In absehbarer Zeit endet für viele auch kleinere Kläranlagen die Möglichkeit der landwirtschaftlichen Klärschlamm-Verwertung, für Anlagen größer 50.000 EW ist die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm zu erfüllen. Weiterhin bedingt die Reduzierung des Stickstoffeintrages in landwirtschaftlich genutzte Flächen eine unmittelbare Konkurrenz zwischen landwirtschaftlich verwertbaren Klärschlämmen und anderen Nährstoffträgern wie Gülle, Festmist oder flüssigen Gärresten aus Biogasanlagen. Für viele Kläranlagen, besonders im ländlichen Raum, existiert daher gegenwärtig keine gesicherte und zukunftsfähige Klärschlammverwertungsmöglichkeit.

Auf Initiative von KASSELWASSER, Eigenbetrieb der Stadt Kassel, hat sich eine Gruppe von insgesamt 37 Kommunen, zum Teil vertreten durch ihre Stadtwerke, Eigenbetriebe oder Abwasserverbände, zusammengetan, um beim Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) die Co-Finanzierung dieser Machbarkeitsstudie zu beantragen. 21 Kommunen aus dem Landkreis Waldeck-Frankenberg werden in dieser Gruppe von der KRV Waldeck-Frankenberg mbH, c/o Maschinenring Waldeck-Frankenberg, vertreten. Die Liste der „Partnerkommunen“ ist in der Anlage enthalten. Das HMUKLV bewilligte die Förderung dieser Machbarkeitsstudie mit Bescheid vom 31.10.2019.

Mit Datum 12.05.2020 beauftragte KASSELWASSER die TransMIT GmbH mit der Erstellung einer Machbarkeitsstudie zur Klärschlammverwertung und Phosphorrecycling für die Region Nord-Ost-Hessen (RePhoNOH). Projektleiter der TransMIT GmbH sind Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen, Prof. Dr. rer. nat. Harald Weigand und Prof. Dr. Diedrich Steffens.

Das Vorhaben verfolgt das Ziel, für die im Regierungsbezirk Kassel betriebenen kommunalen Kläranlagen Konzepte für eine dauerhafte Entsorgungssicherheit für die regionalen Klärschlämme mit nachgelagerter Phosphorrückgewinnung aufzuzeigen. In dieser Studie werden daher verschiedene Szenarien entwickelt und vorgeschlagen, die im Nachgang für jeden Kläranlagenbetreiber und jede Kläranlage konkretisiert werden müssen.

An dieser Stelle wird bereits darauf hingewiesen, dass alle Klärschlammerzeuger bis zum 31.12.2023 über ihre geplanten und eingeleiteten Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung, zur bodenbezogenen Verwertung oder zur sonstigen Klärschlammentsorgung der zuständigen Behörde berichten müssen.

Die Machbarkeitsstudie für die Region Nordost-Hessen dient der Entwicklung eines zukunftssicheren kommunalen Konzeptes im Rahmen der Ressourcenschutz-Strategie des Landes Hessen und leistet einen Beitrag zur Daseinsvorsorge im Bereich der Klärschlammentsorgung. Der Ressourcenschutz umfasst dabei den Schutz des Bodens und des Grundwassers sowie die effiziente Rückgewinnung von Phosphor und den Ausbau der regenerativen Energieversorgung.

Ziele des durch das HMUKLV geförderten Klärschlammverwertungskonzeptes RePhoNOH sind also vorrangig

- eine nachhaltige Verwertung der Klärschlämme

- eine weitestgehende Nutzung des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors durch Phosphorrückgewinnung oder bodenbezogene Verwertung
- eine bedarfsgerechte Bereitstellung und Produktion von phosphorhaltigen Dünge- oder Rohstoffen auf regionaler Ebene in Nord-Ost-Hessen (NOH).
- eine hohe Entsorgungssicherheit für die Kläranlagenbetreiber unter Berücksichtigung der Anforderungen der Klärschlammverordnung mit den in 2023 sowie 2029 bzw. 2032 in Kraft tretenden Änderungen sowie der Düngegesetzgebung,
- stabile marktgerechte Entsorgungspreise für die beteiligten Kläranlagenbetreiber,
- eine insgesamt möglichst geringe CO₂-Emission, auch unter Berücksichtigung von Transportaufwendungen.

Zentrale Komponenten der Machbarkeitsstudie fasst die Abb. 1-1 grafisch zusammen, weitere Elemente sind im Text beschrieben.

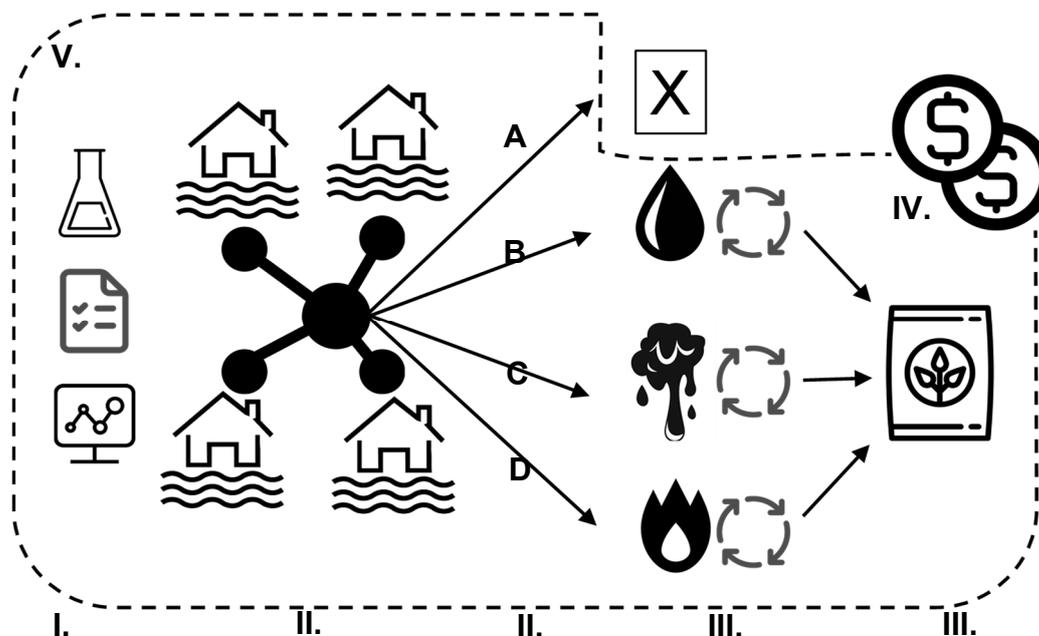


Abb. 1-1: Zentrale Elemente der Machbarkeitsstudie RePhoNOH inkl. Systemgrenze der Betrachtung (gestrichelte Linie) (weitere Elemente siehe Text)

- I. Datenabfrage bei den Anlagenbetreibern der Region (Klärschlammaufkommen und Qualität, Anlagentechnik, örtliche Gegebenheiten etc.) sowie aus FIS-HAA
- II. Typisierung und Clusterung der Anlagen in die Typen A, B, C und D.
Typ A: kann aufgrund der Ausbaugröße bzw. der P-Gehalte im Schlamm weiterhin bodenbezogen verwerten bzw. ist nicht P-rückgewinnungspflichtig;
Typen B, C und D: Prüfung P-Recycling aus Abwasser, Klärschlamm bzw. Asche
- III. Bewertung der Rezyklate, Eingang in den sekundären P-Kreislauf von NOH, Berücksichtigung der Produktqualitäten und des regionalen P-Bedarfes.
- IV. Ausarbeitung von Szenarien, Bewertung in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht unter Berücksichtigung der Logistik,
- V. Ausblick / weitere Planungsschritte

2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Der nachfolgende Abschnitt wurde im Wesentlichen von der Deutschen Phosphor-Plattform DPP e.V. veröffentlicht (DPP, 2020). Der Text der DPP stammt aus dem Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

Mit Inkrafttreten am 27. September 2017 wurde im Bundesgesetzblatt 2017, Teil I, Nr.65, vom 02. Oktober 2017, S. 3465 ff eine sog. Artikelverordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung veröffentlicht. Diese Verordnung enthält folgende Artikel:

Artikel 1 (BGBl 2017, I, Nr. 65, S. 3465 – 3503) :

Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung – AbfKlärV), Inkrafttreten 27.09.2017, mit 5 Teilen sowie 3 Anlagen; dieser Artikel 1 entspricht mit einigen v.a. redaktionellen Änderungen der aktuell gültigen Fassung der Klärschlammverordnung

Artikel 2 (BGBl 2017, I, Nr. 65, S. 3504):

Änderung der Deponieverordnung, mit u.a. Ergänzungen zu Begriffen zur thermischen Vorbehandlung sowie Klärschlammverbrennung

Artikel 3 (BGBl 2017, I, Nr. 65, S. 3504 - 3505):

Folgeänderungen, u.a. der Bioabfallverordnung sowie der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung

Artikel 4 (BGBl 2017, I, Nr. 65, S. 3505 - 3506):

Änderungen der Klärschlammverordnung, u.a. mit Berichtspflichten für alle Klärschlammherzeuger bis spätestens 31. Dezember 2023

Artikel 5 (BGBl 2017, I, Nr. 65, S. 3506 - 3506):

Weitere Änderungen des Artikels 4 der Klärschlammverordnung (siehe oben), u.a. mit Inkrafttreten der Phosphor-Rückgewinnungspflicht für Anlagen mit > 100.000 EW zum 01.01.2029

Artikel 6 (BGBl 2017, I, Nr. 65, S. 3511):

Weitere Änderungen des Artikels 4 der Klärschlammverordnung (siehe oben), u.a. mit Inkrafttreten der Phosphor-Rückgewinnungspflicht für Anlagen mit > 50.000 EW zum 01.01.2032

Artikel 8 (BGBl 2017, I, Nr. 65, S. 3511):

Inkrafttreten / Außerkrafttreten (siehe Artikel 4 bis 6)

2.1 Aktuelle Rechtslage (Stand 2020)

Die Aktuelle Rechtslage entspricht dem Artikel 1 der AbfKlärV vom 27. September 2020 mit aktuellen Änderungen, zuletzt geändert durch Artikel 137 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328). Gemäß § 3 Abs. 1 AbfKlärV hat der Klärschlammherzeuger den in seiner Abwasserbehandlungsanlage anfallenden Klärschlamm **möglichst hochwertig zu verwerten**, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist (S. 1). Dabei sind die **Phosphorrückgewinnung und die Rückführung des gewonnenen Phosphors anzustreben** (S. 2).

Es besteht derzeit **keine Pflicht zur Phosphorrückgewinnung**. Eine bodenbezogene Verwertung ist für alle Kläranlagen-Ausbaugrößen möglich, sofern die Anforderungen der Düngegesetzgebung, insbesondere der Düngemittelverordnung, eingehalten werden.

Die derzeitigen Diskussionen zur Phosphor-Rückgewinnung beziehen sich auf die Änderungen der Klärschlammverordnung zum 31.12.2023, 01.01.2029 sowie 01.01.2032 (siehe unten).

2.2 Rechtslage ab 31.12.2023

Gemäß Artikel 4 der AbfKlärV vom 27.09.2017 (BGBl 2017, I, Nr. 65, S. 3505 - 3506) müssen alle Klärschlammherzeuger bis zum 31.12.2023 der zuständigen Behörde über ihre geplanten und eingeleiteten Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung, zur bodenbezogenen Verwertung oder zur sonstigen Klärschlammbehandlung berichten. Diesem Bericht müssen Analyseergebnisse des Klärschlammes auf den Phosphorgehalt sowie den Gehalt an basisch wirksamen Stoffen (als CaO) beigefügt werden.

2.3 Rechtslage ab 01.01.2029 bzw. 01.01.2032

Ab dem 01.01.2029 findet § 3 AbfKlärV in einer geänderten Fassung Anwendung (gemäß Artikel 5 der AbfKlärV vom 27.09.2017) (BGBl 2017, I, Nr. 65, S. 3506 - 3506). Insbesondere wird der § 3 durch die § 3 a bis 3e ergänzt.

§ 3a: Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

§ 3b: Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche oder aus kohlenstoffhaltigen Rückständen

§ 3c: Untersuchungspflichten

§ 3d: Nachweispflichten

§ 3e: Registerpflicht bei Phosphorrückgewinnung

Ab 01.01.2029 sind gemäß § 3 n.F. (neue Fassung) grundsätzlich alle Betreiber von kommunalen Abwasserbehandlungsanlage unabhängig von der jeweiligen Ausbaugröße

- zu einer **Phosphorrückgewinnung verpflichtet, wenn die Klärschlamm-Trockenmasse einen Phosphorgehalt $\geq 2\%$ aufweist** oder
- einer **thermischen Vorbehandlung in einer Klärschlammverbrennungsanlage oder einer Klärschlammmitverbrennung zuzuführen**. Die Betreiber der Klärschlammverbrennungsanlage oder der Klärschlammmitverbrennung müssen dann **die Asche einer Phosphorrückgewinnung** oder einer stofflichen Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehalts der Asche zuführen.

Kläranlagen mit Klärschlamm mit einem **Phosphorgehalt $< 2\%$** sind also **nicht von den Regelungen zur Phosphorrückgewinnung betroffen**.

Bezüglich der Pflicht zur Phosphorrückgewinnung gelten dann folgende Regelungen:

Der Klärschlammherzeuger hat den anfallenden Klärschlamm entweder:

- einer **Phosphorrückgewinnung** zuzuführen

oder

- einer **thermischen Vorbehandlung** in einer Klärschlamm(mit)verbrennungsanlage zuzuführen (vgl. Art. 5 § 3 Abs. 1 i.V.m. § 2 Abs. 11a und b AbfKlärV).

Die Betreiber einer solchen Anlage haben in der Folge die Klärschlammverbrennungsasche und den kohlenstoffhaltigen Rückstand, die im Rahmen der genannten Vorbehandlung anfallen, (nach § 3 Abs. 2 S. 1 AbfKlärV n. F.) entweder:

- einer **Phosphorrückgewinnung** zuzuführen

oder

- einer stofflichen Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehalts zuzuführen (nach Maßgabe des § 3 b Abs. 1 AbfKlärV n. F.).

Abweichend von der Phosphorrückgewinnungspflicht (nach § 3 Abs.1 Nr. 1 und Nr. 2 AbfKlärV n. F.) **dürfen Klärschlammherzeuger**, die eine Abwasserbehandlungsanlage mit einer genehmigten Ausbaugröße von **bis zu 50.000 EW (bzw. bis zum 31.12.2031 noch bis zu 100.000 EW)** betreiben (gemäß § 3 Abs. 3 S. 1 AbfKlärV n. F.) den in der Anlage anfallenden Klärschlamm **unabhängig vom Phosphorgehalt** (nach Maßgabe v. Anlage 2 und 3) entweder:

- **bodenbezogen verwerten**

oder

- nach Zustimmung der zuständigen Behörde einer **anderen Abfallverwertung** im Sinne des KrWG zuzuführen.

Die Regelungen sind in Tab. 2-1 nach Jahren und Kläranlagenausbaugrößen differenziert dargestellt.

Tab. 2-1: Regelungen zur P-Rückgewinnung nach der novellierten Klärschlammverordnung (Quelle: Vortrag Roskosch, A., DPP-FORUM, 2020).

Ausbaugröße	≤ 50.000 EW	> 50.000 - 100.000 EW	> 100.000 EW
bisher	bodenbezogene Verwertung möglich		
in 2023	Berichtspflicht zu Maßnahmen der geplanten P-Rückgewinnung, zur bodenbezogenen Verwertung oder sonstigen Entsorgung		
	Pflicht zu Untersuchungen auf P-Gehalt (u. basisch wirksame Stoffe)		
ab 01.01.2029	bodenbezogene Verwertung möglich	bodenbezogene Verwertung möglich	bodenbezogene Verwertung nicht zulässig
	P-Rückgewinnungspflicht (≥ 2 % P)	P-Rückgewinnungspflicht (≥ 2 % P)	P-Rückgewinnungspflicht (≥ 2 % P)
ab 01.01.2032	bodenbezogene Verwertung möglich	bodenbezogene Verwertung nicht zulässig	bodenbezogene Verwertung nicht zulässig
	P-Rückgewinnungspflicht (≥ 2 % P)	P-Rückgewinnungspflicht (≥ 2 % P)	P-Rückgewinnungspflicht (≥ 2 % P)

Ab 01.01.2029 besteht für **Klärschlammherzeuger** einer Abwasserbehandlungsanlage mit einer genehmigten Ausbaugröße von **mehr als 100.000 EW** (nach § 3 Abs. 4 S. 1 AbfKlärV n. F.) die Möglichkeit, den in der Anlage anfallenden Klärschlamm einer **anderweitigen Abfallentsorgung** zuzuführen, sofern der Klärschlamm entweder:

- einen Phosphorgehalt von weniger als 20 Gramm je Kilogramm TM aufweist
- oder
- bereits einer Phosphorrückgewinnung nach § 3 Abs.1 Nr. 1 AbfKlärV n. F. unterzogen wurde.

Eine Verwertung des Klärschlammes auf oder in Böden ist in diesem Fall nicht zulässig (§ 3 Abs. 4 S. 2 AbfKlärV n. F.).

Gleiches gilt **ab 01.01.2032** für **Klärschlammherzeuger** einer Abwasserbehandlungsanlage mit einer genehmigten Ausbaugröße von **mehr als 50.000 EW**.

Sofern ein **Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm** eingesetzt wird, muss eine **Reduzierung des Phosphorgehaltes** des behandelten Klärschlammes entweder

- um mindestens 50 Prozent oder
- auf weniger als 20 g P / kg Trockenmasse

gewährleistet sein (§ 3a Abs. 1 AbfKlärV n. F.).

Für Konzepte, bei denen Klärschlämme verschiedener Kläranlagen gemeinsam behandelt werden, ist zudem noch wichtig, dass eine **Vermischung der Klärschlämme** vor Durchführung von Phosphor-Rückgewinnungsverfahren **nur zulässig** ist, sofern der zugemischte Klärschlamm einen Phosphor-Gehalt von **mehr als 20 g P / kg TM** aufweist. (§ 3a Abs. 2 AbfKlärV n. F.).

Eine Reduzierung des P-Gehaltes eines Klärschlammes durch Zumischung von anderen Klärschlammern mit einem P-Gehalt von weniger als 20 g P / kg TM ist also nicht zugelassen.

Die gemeinsame Behandlung von Klärschlammern zum Zwecke der Phosphor-Rückgewinnung ist zudem nur zulässig nach Abschluss eines Vertrages zwischen den Parteien.

Die verschiedenen Verwertungswege von Klärschlamm gemäß Neuordnung der AbfKlärV ab dem Jahr 2029/32 sind in der nachfolgenden Abb. 2-1 aus den LAGA-Vollzugshinweisen zur Umsetzung der Klärschlammverordnung sehr anschaulich dargestellt.

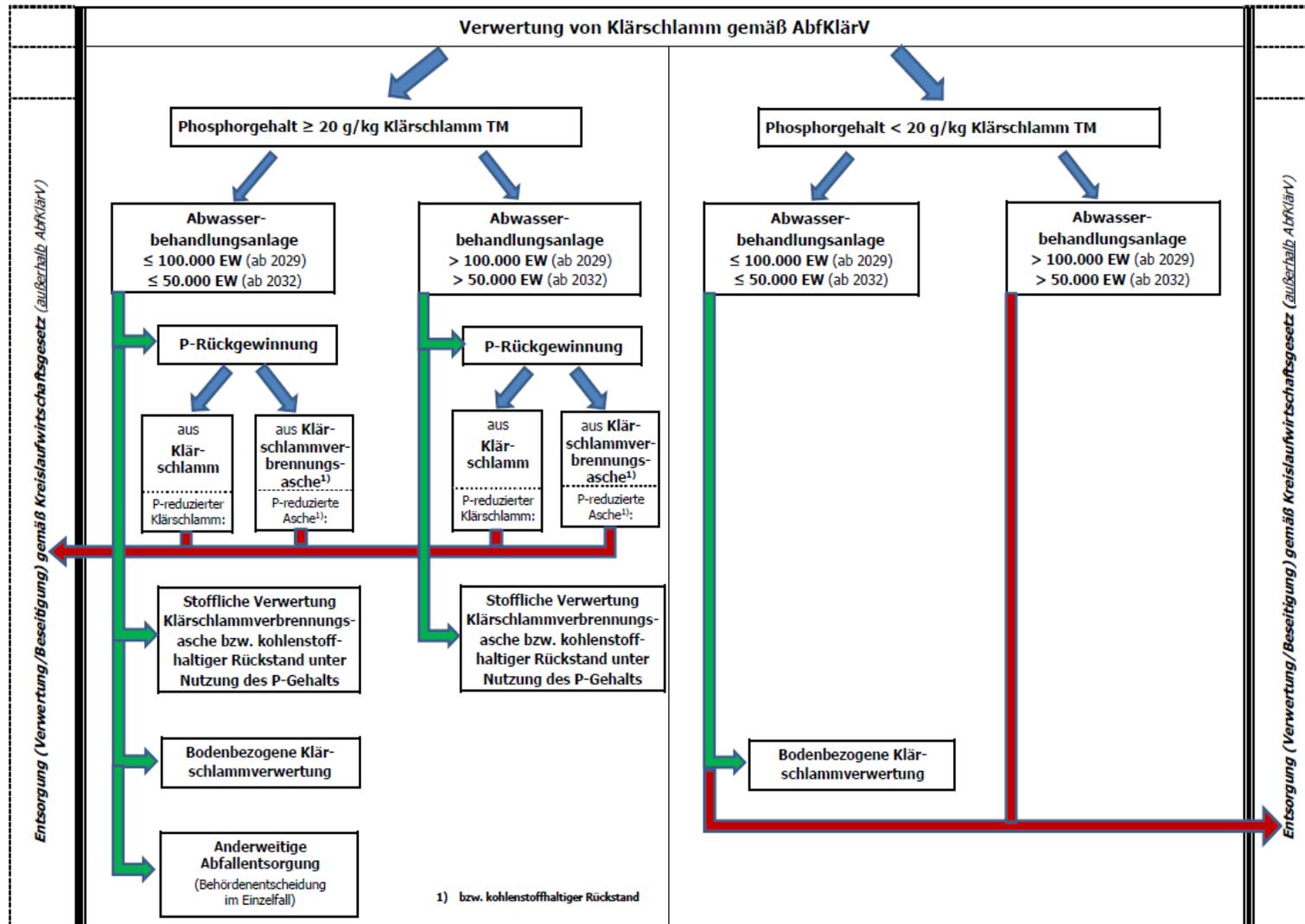


Abb. 2-1: Übersicht der Neuordnung der Klärschlammverwertung ab dem Jahr 2029/32 (LAGA, 2020)

3 Zusammenstellung und Konkretisierung der für die Studie notwendigen Basisdaten

Die Region Nordost-Hessen (NOH) umfasst den gesamten Regierungsbezirk Kassel. Kläranlagen befinden sich in den Kommunen der Landkreise Kassel, Hersfeld-Rotenburg, Waldeck-Frankenberg und Fulda, im Werra-Meißner-Kreis, im Schwalm-Eder-Kreis sowie in der kreisfreien Stadt Kassel. In der Region leben ca. 1,22 Mio. Einwohner auf ca. 8.289km².

3.1 Kläranlagen und Betreiber in der Region NOH mit Ausbaugrößen sowie Anschlussgrößen

Auf der Grundlage des aktuellen Lageberichts des HMUKLV „Beseitigung von kommunalen Abwässern – Lagebericht 2018“ (HMUKLV, 2019) wurden alle Kläranlagen sowie die Betreiber (Kommunen, Verbände) im Bereich des Regierungsbezirks Kassel (NOH) zusammengestellt. Auf der Basis des Lageberichts werden auf dieser Ebene typisiert:

- Verteilung der Kläranlagen auf die Landkreise des Regierungsbezirks Kassel
- Betreiber
- Ausbaugröße (EW)
- grundsätzliche Verfahrenstechnik der biologischen Abwasserreinigung sowie der Phosphorelimination

Im Regierungsbezirk Kassel werden derzeit insgesamt 297 Kläranlagen betrieben.

Tab. 3-1 zeigt die Aufteilung der Anlagen auf die Landkreise. Die Gesamt-Ausbaugröße aller Kläranlagen beläuft sich auf ca. 2 Mio. EW. Um genauere Daten zu angeschlossenen Einwohnerwerten, Klärschlammengen sowie der aktuellen Klärschlammentsorgung zu erhalten, wurden alle Kläranlagenbetreiber angeschrieben und um entsprechende Daten gebeten. Nach Auswertung der Fragebögen sowie der übermittelten Eigenkontrollberichte kann davon ausgegangen werden, dass an die 297 Kläranlagen ca. 1,81 Mio. EW angeschlossen sind (siehe auch Tab. 3-1).

Tab. 3-1: Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Aufteilung auf die Landkreise

Kreis-Nr.	Kreis	Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel				
		Anzahl KA	Ausbaugröße [EW]	Anteil an Gesamt	Anschlussgröße [EW]	Anteil an Gesamt
611	Stadt Kassel	1	340.000	17,2%	340.000	18,7%
631	Kreis Fulda	54	369.210	18,6%	358.666	19,8%
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	41	204.410	10,3%	215.029	11,8%
633	Kreis Kassel	37	257.850	13,0%	235.015	12,9%
634	Kreis Schwalm-Eder	69	307.285	15,5%	267.493	14,7%
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	61	314.065	15,8%	259.776	14,3%
636	Kreis Werra-Meißner	34	189.090	9,5%	138.985	7,7%
	Summe	297	1.981.910	100,0%	1.814.964	100,0%

Im gesamten Reg.-Bez. Kassel werden lediglich 2 Kläranlagen (Kassel und Fulda) mit der Größenklasse 5 betrieben, die also bereits zum 01.01.2029 die Anforderungen der AbfKlärV mit einer Phosphorrückgewinnungspflicht erfüllen müssen. Zwei weitere Kläranlagen (Bad Hersfeld und Eschwege) sind der Größenklasse 4b mit einer Ausbaugröße zwischen 50.000 und 100.000 EW zuzuordnen, die die Anforderungen ab dem 01.01.2032 erfüllen müssen (siehe auch Tab. 3-2)

Diese 4 Anlagen der Größenklassen 5 und 4b stellen mit einer Ausbaugröße von insgesamt 606.600 EW ca. 30,6 % der Gesamt-Ausbaugröße von 1.981.910 EW und mit einer Anschlussgröße von 590.000 EW ca. 32,5 % der Gesamt-Anschlussgröße von 1.814.964 EW im Regierungsbezirk Kassel dar (siehe auch Abb. 3-2). Für diese 4 Kläranlagen gilt also unmittelbar die Phosphor-Rückgewinnungspflicht (siehe Kap. 2.3) durch

- Anwendung eines Verfahrens zur Reduzierung des Phosphorgehalts auf < 20 g P / kg TM oder um mind. 50 % oder
- Zuführung zu einer thermischen Vorbehandlung in einer Klärschlammverbrennungsanlage oder einer Klärschlammmitverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus der Asche oder stofflicher Nutzung des Phosphorgehalts der Asche

Die Tab. 3-2 zeigt auch, dass insgesamt 222 Anlagen, also ca. 75 % aller Anlagen, den Größenklassen 1 und 2 (bis 5.000 EW) zuzuordnen sind.

Tab. 3-2: Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Aufteilung auf die Größenklassen

Kreis-Nr.	Kreis	Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Größenklassen						
		Anzahl KA	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4a	GK 4b	GK 5
611	Stadt Kassel	1	0	0	0	0	0	1
631	Kreis Fulda	54	19	20	8	6	0	1
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	41	15	19	2	4	1	0
633	Kreis Kassel	37	5	14	13	5	0	0
634	Kreis Schwalm-Eder	69	39	15	7	8	0	0
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	61	18	32	6	5	0	0
636	Kreis Werra-Meißner	34	16	10	2	5	1	0
	Summe	297	112	110	38	33	2	2

In der Tab. 3-3 sind die Kläranlagen den jeweiligen Größenklassen und den Landkreisen zugeordnet. In den Landkreisen Kassel, Schwalm-Eder sowie Waldeck-Frankenberg gibt es keine Anlagen, die unmittelbar gemäß den Anforderungen der Klärschlammverordnung ab 2029 bzw. 2032 einer Phosphorrückgewinnungspflicht mit technischen Verfahren unterliegen. In den übrigen Landkreisen ist es auch jeweils nur eine Anlage. Die Summe der Ausbaugrößen in Zuordnung zu den Größenklassen ist dann in Abb. 3-1 dargestellt.

Tab. 3-3: Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Ausbaugrößen und Größenklassen in den einzelnen Landkreisen

Kreis-Nr.	Kreis	Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Anschlussgrößen [EW]							Summe
		Anzahl KA	GK 1	GK2	GK3	GK4a	GK4b	GK5	
611	Stadt Kassel	1	0	0	0	0	0	340.000	340.000
631	Kreis Fulda	54	7.079	44.955	57.850	98.782	0	150.000	358.666
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	41	5.683	38.812	13.186	87.348	70.000	0	215.029
633	Kreis Kassel	37	2.300	38.640	84.047	110.028	0	0	235.015
634	Kreis Schwalm-Eder	69	22.375	45.390	45.313	154.415	0	0	267.493
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	61	6.911	62.794	38.351	151.720	0	0	259.776
636	Kreis Werra-Meißner	34	4.922	22.113	17.500	64.450	30.000	0	138.985
	Summe	297	49.270	252.704	256.247	666.743	100.000	490.000	1.814.964

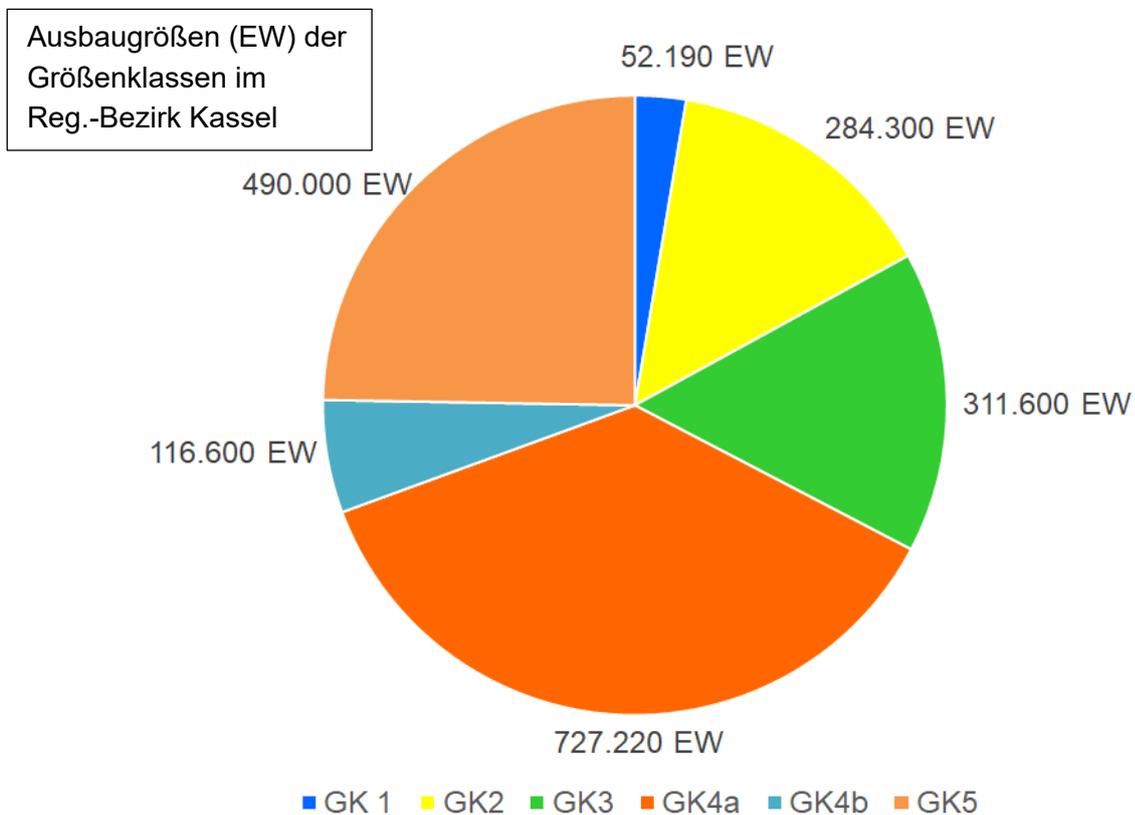


Abb. 3-1: Aufteilung der Ausbaugrößen (EW) der Größenklassen

3.2 Erhebung von spezifischen Angaben jeder Kläranlage mittels Fragebögen

KASSELWASSER stellte die Kontaktdaten der 37 assoziierten Kommunen zur Verfügung. Seitens des Regierungspräsidiums Kassel wurden zudem E-Mail-Adressen aller Kommunen im Regierungsbezirk Kassel zur Verfügung gestellt, die auch bei üblichen Informationsschreiben des Regierungspräsidiums Verwendung finden.

Mittels der Kontaktdaten aller Kläranlagen und Betreiber wurden von jeder Kläranlage / jedem Betreiber mittels eines Fragebogens / Steckbriefs detaillierte spezifische Angaben erfragt, die in eine Datenbank eingepflegt wurden. Bestandteil des Fragebogens war auch die Abfrage, ob kurzfristiges, langfristiges Interesse oder kein Interesse an einem gemeinsamen Klärschlammverwertungs-Konzept mit Phosphor-Recycling besteht.

Die Daten aus den Fragebögen bilden die Grundlage für die weitere Anlagentypisierung, Aufstellung der Mengengerüste mit Quantitäten und Qualitäten in den folgenden Arbeitspaketen.

Weiterhin wurden Eigenkontrollberichte (EKVO-Berichte) der Jahre 2017 bis 2019 erbeten, aus denen ergänzend die entsorgten bzw. verwerteten Klärschlammengen entnommen wurden.

Die 297 Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel werden von insgesamt 117 Kommunen und Verbänden betrieben. Einige Anlagen werden auch von externen Betriebsführern betrieben, z. B. dem Wasserverband Peine, dem Wasser- und Abwasserzweckverband Solling, EAM Netz GmbH.

Insgesamt konnten Rückmeldungen der Betreiber von 256 der 297 Kläranlagen ausgewertet werden, entsprechend von ca. 86,2 % aller Kläranlagen. Dieser sehr hohe Rücklauf entspricht ca. 1,68 Mio. angeschlossene EW entspr. ca. 92,6 %. Von den meisten Kläranlagen konnten die abgefragten Daten erhoben werden.

Tab. 3-4: Rückmeldungen auf die Fragebogenaktion in den einzelnen Landkreisen

Kreis-Nr.	Kreis	Rückmeldung				keine RM	
		Anzahl KA	%	Anschlussgröße [EW]	%	Anzahl KA	Anschlussgröße [EW]
611	Stadt Kassel	1	100%	340.000	100%	0	0
631	Kreis Fulda	48	89%	322.456	90%	6	36.210
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	28	68%	172.149	80%	13	42.880
633	Kreis Kassel	36	97%	232.115	99%	1	2.900
634	Kreis Schwalm-Eder	53	77%	224.143	84%	16	43.350
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	61	100%	259.776	100%	0	0
636	Kreis Werra-Meißner	31	91%	129.585	93%	3	9.400
	Summe	258	86,9%	1.680.224	92,6%	39	134.740

Die Klärschlammverwertung der Kläranlagen wird von insgesamt 92 Körperschaften und Organisationen durchgeführt (Kommunen, Verbände, Betreiber (wie z.B. der EAM Netz GmbH, Bebra, früherer Energienetz Mitte GmbH), Organisationen (wie z.B. KRV Waldeck-Frankenberg)). Von diesen 92 Betreibern haben sich im Rahmen der Fragebogenaktion über 80 zurückgemeldet.

3.3 Verifizierung der Daten mit den Daten aus dem Hessischen Abwasser-Anlagen-Kataster HAA

Die oben genannten Daten werden mit den offiziellen Daten aus dem Hessischen Abwasser-Anlagen-Kataster HAA (gepflegt durch das HLNUG bzw. das Regierungspräsidium) abgeglichen. Diese Daten wurden durch das HLNUG zur Verfügung gestellt. Weiterhin wurden Ergebnisse der Datenerhebung zum Klärschlammbericht einbezogen, die durch das Regierungspräsidium Kassel zur Verfügung gestellt wurden sowie Analysedaten der KA aus NOH, über die das Regierungspräsidium Kassel aufgrund der bodenbezogenen Klärschlammverwertung verfügt. Die genannten Daten dienen zur Ergänzung der eigenen Recherchen im Rahmen der bei den Anlagenbetreibern abgefragten Klärschlammanalysen und Anlagensteckbriefe

3.4 Auswertung der Fragebögen

3.4.1 Kläranlagen und Anschlussgrößen

Zur Bewertung der anfallenden Klärschlammmengen ist unter anderem die tatsächliche Anschlussgröße der Kläranlagen von Bedeutung. In der nachfolgenden Tab. 3-5 sind wiederum bezogen auf die Landkreise im Regierungsbezirk Kassel die Anschlusswerte in den Größenklassen zusammengefasst. Bei den Anlagen, von denen keine Rückmeldung kam, wurde die Anschlussgröße gleich der Ausbaugröße gesetzt.

Die Abb. 3-2 zeigt die Zuordnung der Anschlussgrößen (EW) zu den Größenklassen, die den Ausbaugrößen entsprechen.

Tab. 3-5: Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Anschlussgrößen in den einzelnen Landkreisen

		Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel, Anschlussgrößen [EW]							
Kreis-Nr.	Kreis	Anzahl KA	GK 1	GK2	GK3	GK4a	GK4b	GK5	Summe
611	Stadt Kassel	1	0	0	0	0	0	340.000	340.000
631	Kreis Fulda	54	7.079	44.955	57.850	98.782	0	150.000	358.666
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	41	5.683	38.812	13.186	87.348	70.000	0	215.029
633	Kreis Kassel	37	2.300	38.640	84.047	110.028	0	0	235.015
634	Kreis Schwalm-Eder	69	22.375	45.390	45.313	154.415	0	0	267.493
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	61	6.911	62.794	38.351	151.720	0	0	259.776
636	Kreis Werra-Meißner	34	4.922	22.113	17.500	64.450	30.000	0	138.985
	Summe	297	49.270	252.704	256.247	666.743	100.000	490.000	1.814.964

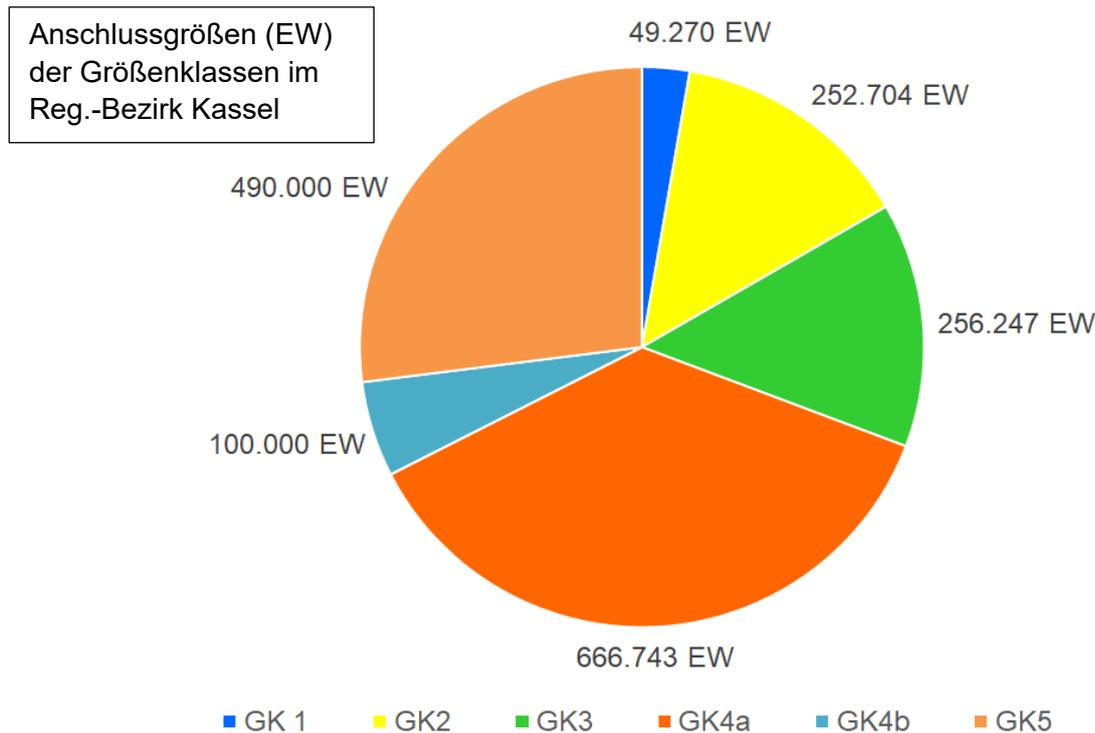


Abb. 3-2: Aufteilung der Anschlussgrößen (EW) der Größenklassen

3.4.2 Interesse an einer Klärschlammkooperation

In dem Fragebogen wurde zunächst von den Betreibern der Kläranlagen Informationen über ein grundsätzliches Interesse an einer zukünftigen Klärschlammkooperation abgefragt.

Frage 3:	Interesse an einer Klärschlammkooperation
<input type="checkbox"/>	Wir haben grundsätzliches Interesse an einer regionalen Klärschlammkooperation und würden von Beginn an teilnehmen wollen.
<input type="checkbox"/>	Wir haben grundsätzliches Interesse an einer regionalen Klärschlammkooperation und würden erst in einigen Jahren teilnehmen wollen, weil wir derzeit einen längerfristigen Entsorgungsvertrag haben.
<input type="checkbox"/>	Wir haben derzeit kein Interesse an einer regionalen Klärschlammkooperation, möchten Sie aber bitten, uns weiterhin zu informieren.
<input type="checkbox"/>	Wir haben kein Interesse an einer regionalen Klärschlammkooperation.

Tab. 3-6: Ergebnis der Fragebogenaktion, Interessensbekundungen, Anzahl der jeweiligen Kläranlagen sowie zugeordnete Klärschlammmenge (t TM/a)

¹ Betreiber von Klärschlammvererdungsanlagen haben ein langfristiges Interesse bekundet, sind aber in der Auswertung nicht im Cluster „langfristiges Interesse“ enthalten

² Klärschlammmenge der Anlagen ohne Rückmeldung ermittelt anhand der Ausbaugröße der Anlagen multipliziert mit einem mittleren Klärschlammanfall von 13,5 kg TM/(EW*a)

Kooperationsinteresse	Anzahl	KS-Menge (t TM / a)
kurzfristig	189	15.123
davon EAM Netz GmbH	23	1.011
langfristig	54	4.234
Vererdung (langfr. Interesse) ¹	8	1.500
kein Interesse	7	489
keine Rückmeldung ²	39	1.294
erfasste KA	297	22.641
KA mit Interesse	251	20.858
	84,5%	92,1%

Die Kommunen und Betreiber, die explizit kein Interesse an einer Kooperation haben, wurden im Folgenden nicht weiter betrachtet. 6 Kläranlagen aus den Landkreisen Fulda und Hersfeld-Rotenburg haben sich bereits für eine Kooperation mit den Stadtwerken Schlitz, Vogelsbergkreis, entschieden und werden daher hier nicht weiter betrachtet.

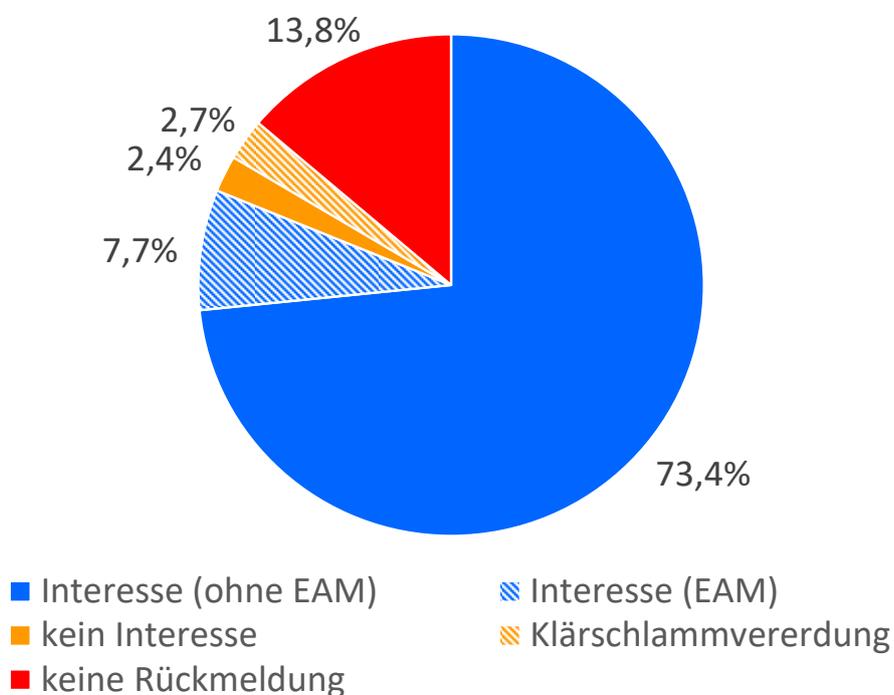


Abb. 3-3: Prozentuale Aufteilung der Interessensbekundungen, Anzahl der jeweiligen Kläranlagen (Grundgesamtheit 297 Kläranlagen); Klärschlammmenge der Anlagen ohne Rückmeldung ermittelt anhand der Ausbaugröße der Anlagen multipliziert mit einem mittleren Klärschlammfall von 13,5 kg TM/(EW*a)

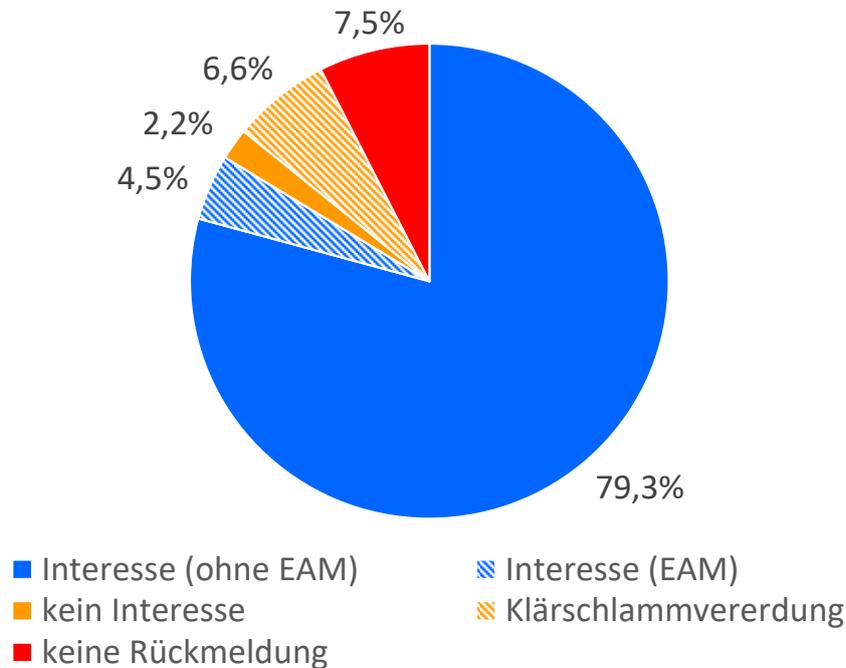


Abb. 3-4: Prozentuale Aufteilung der Interessensbekundungen, Klärschlamm-mengen (Mittelwerte der Jahre 2017 – 2019, 22.641 t TM/a);

Von einigen Kläranlagen liegt zwar eine Rückmeldung mit Interessensbekundung vor, allerdings wurden keine Klärschlamm-mengen sowie Klärschlamm-analysen angegeben. Die Klärschlamm-menge dieser Anlagen ohne Rückmeldung wurden anhand der Anschlussgröße der Anlagen multipliziert mit einem mittleren Klärschlammfall von 13,5 kg TM/(EW*a) ermittelt. Dieser Wert ergibt sich aus dem gewichteten Mittel aller Angaben und entspricht einem spezifischen Schlammfall von ca. 37 g TM/(EW*d).

Die genaue Aufteilung der Interessenten auf die Landkreise ist Tab. 3-7 zu entnehmen.

Der Klärschlamm, der derzeit in den Klärschlammvererdungsanlagen behandelt wird, bleibt auch zukünftig Klärschlamm, so dass die jeweils nach einigen Jahren geräumte „Klärschlamm-erde“ rechtlich als Klärschlamm entsorgt und verwertet werden muss. Die Betreiber von Klärschlammvererdungsanlagen haben überwiegend ein langfristiges Interesse an einer Kooperation im Hinblick auf die Phosphor-Rückgewinnung bekundet. Bei Klärschlammvererdungsanlagen ist zu bedenken, dass aufgrund des weitgehenden Abbaus der organischen Substanz des Klärschlammes in den Vererdungsbecken die Schwermetallkonzentrationen in der zu entsorgenden Klärschlamm-erde voraussichtlich ansteigen werden. Sollte eine landwirtschaftliche Verwertung der Klärschlamm-erde dann zukünftig nicht möglich sein, bleibt eine thermische Verwertung. Neben

den Kosten für die Klärschlammausbringung auf landwirtschaftliche Flächen bzw. für die Verbrennung sind Kosten für die Räumung der Klärschlammbeete sowie eine ggf. erforderliche Aufbereitung / Siebung zu berücksichtigen.

Eine betriebsbegleitende Qualitätssicherung zur Überprüfung des prognostizierten Abbaus organischer Substanz, des Entwässerungserfolges und der qualitativen Eigenschaften des Materials (Nährstoffgehalte, Schadstoffgehalte, Abbau organischer Schadstoffe, ggf. Akkumulation anorganischer Schadstoffe) ist ebenso anzuraten wie die Bildung von ausreichenden Rückstellungen für eine spätere Entsorgung der Klärschlammmerde.

Reststoffe aus Klärschlammvererdungsanlagen können sowohl getrocknet als auch direkt in verschiedenen Typen von Verbrennungsanlagen thermisch behandelt werden. Maßgeblicher Faktor ist die Förderfähigkeit des Materials, weshalb der Einsatz wenig störstoffanfälliger Fördertechniken sinnvoll ist. Sofern die Verfahrenstechnik für eine thermische Behandlung ein weitgehend störstofffreies Material erfordert, sind die größeren Pflanzenteile und Rhizome (Wurzeln) durch Zerkleinerung, Siebung, Lagerung oder ähnlich aufzubereiten.

Der Heizwert der Reststoffe aus Klärschlammvererdungsanlagen entspricht dem von gut ausgefaultem Klärschlamm. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5, 2019).

Tab. 3-7: Interesse an Klärschlammkooperation Nordost-Hessen

Kreis-Nr.	Kreis	kurzfristiges Interesse			langfristiges Interesse			EAM Netz GmbH		Kein Interesse		SW Schlitz		Klärschlammvererdung		keine Rückmeldung	
		Anzahl KA	Anschlussgröße [EW]	%	Anzahl KA	Anschlussgröße [EW]	%	Anzahl KA	Anschlussgröße [EW]	Anzahl KA	Anschlussgröße [EW]	Anzahl KA	Anschlussgröße [EW]	Anzahl KA	Anschlussgröße [EW]	Anzahl KA	Anschlussgröße [EW]
611	Stadt Kassel	1	340.000	100%	0	0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631	Kreis Fulda	32	255.879	71%	5	12.518	3%	6	20.571	4	22.660	4	22.660	1	10.828	6	36.210
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	6	73.215	34%	3	7.800	4%	14	16.086	2	9.500	2	9.500	3	65.548	13	42.880
633	Kreis Kassel	18	120.528	51%	16	98.927	42%	0	0	1	7.000	0	0	1	5.660	1	2.900
634	Kreis Schwalm-Eder	30	101.859	38%	20	118.934	44%	0	0	0	0	0	0	3	33.850	16	43.350
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	61	259.776	100%	0	0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
636	Kreis Werra-Meißner	18	89.944	65%	10	36.770	26%	3	2.871	0	0	0	0	0	0	3	9.400
Summe		166	1.241.201	68%	54	274.949	15%	23	39.528	7	39.160	6	32.160	8	115.886	39	134.740

3.4.3 Klärschlamm Entsorgung bzw. -verwertung bis 2020

3.4.3.1 Entsorgungswege im Regierungsbezirk Kassel sowie den Landkreisen

In den Jahren 2017 bis 2019 sind jeweils im Mittel ca. 22.641 t Klärschlamm-Trockenmasse (TM) im Regierungsbezirk Kassel angefallen (siehe Tab. 3-6). Der Klärschlamm von 7 Anlagen mit ca. 489 t TM/a wird nicht weiter betrachtet. Von 39 Anlagen gibt es keine Rückmeldung, so dass die dort angegebenen ca. 1.294 t TM/a mit spezifischen Werten hochgerechnet sind. Ob diese Schlämme zukünftig in einer Kooperation berücksichtigt werden müssen, ist unklar. Es sind ausschließlich die tatsächlich nachgewiesenen Klärschlämme aufgeführt. Die Verwertungswege der 39 Anlagen, von denen keine Rückmeldungen erhalten wurden, sind nicht aufgeführt.

Die Entsorgung bzw. Verwertung der verbleibenden ca. 20.857 t TM/a erfolgte vorwiegend in der Landwirtschaft (12.505 t TM/a entspr. ca. 60 %) sowie im Landschaftsbau (1.334 t TM/a entspr. ca. 6,4 %). Die Schlämme der Kläranlage Kassel komplett sowie die Schlämme von 4 weiteren Kläranlagen zum Teil gehen in die Mono- bzw. Mitverbrennung (Zementwerk).

Tab. 3-8: Klärschlammverwertung bzw. -entsorgung in den einzelnen Landkreisen, zugeordnet nach landwirtschaftlicher Verwertung, Landschaftsbau, Mono- und Mit-Verbrennung sowie Klärschlammvererdung, Mittelwerte in den Jahren 2017 – 2019 (in t TM/a)

Nur nachgewiesene Klärschlamm-mengen von 251 der 297 Kläranlagen

Kreis-Nr.	Kreis	Klärschlammverwertung 2017 - 2019 (t TM/a)						Summe
		Landwirtschaft		Landschaftsbau	Verbrennung		KS-Vererdung	
		Nassschlamm	entw. Schlamm		Mono-V.	Mit-V.		
611	Stadt Kassel	0	0	0	0	4.519	0	4.519
631	Kreis Fulda	397	2.849	0	0	457	126	3.829
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	209	522	0	0	70	881	1.683
633	Kreis Kassel	625	1.993	0	110	0	76	2.803
634	Kreis Schwalm-Eder	792	1.508	218	0	361	416	3.294
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	1.358	881	0	0	0	0	2.239
636	Kreis Werra-Meißner	54	1.319	1.116	0	0	0	2.490
	Summe	3.434	9.072	1.334	110	5.407	1.500	20.857
		12.505		1.334		5.517	1.500	
		20.857						

Daraus ist zu erkennen, dass im Regierungsbezirk Kassel ca. 66 % der Gesamt-TM-Menge in der Landwirtschaft bzw. im Landschaftsbau verwertet werden. Ca. 26,5 % gehen derzeit in die Verbrennung und ca. 7,2 % werden in Klärschlammvererdungsanlagen behandelt.

Folgende Besonderheiten sind zu benennen:

- Die Kläranlage Kassel entsorgt zu 100 % in der Verbrennung, dem Fernheizwerk der Städtischen Werke Kassel.

- Im Landkreis Waldeck-Frankenberg wird der gesamte Klärschlamm bodenbezogen verwertet.
- In den Landkreisen Kassel, Hersfeld-Rotenburg sowie Schwalm-Eder werden einige Klärschlammvererdungsanlagen betrieben, ansonsten wird auch in diesen Landkreisen der weit überwiegende Teil der Klärschlämme in der Landwirtschaft verwertet.

Die Kläranlagen der Region Nordost-Hessen sind in der nachfolgenden Abb. 3-5 dargestellt. Die Kreis-Durchmesser stellen die aktuell anfallenden Klärschlamm-mengen (in t TM/a) dar, ohne dass exakt der Durchmesser einer Klärschlammmenge entspricht.

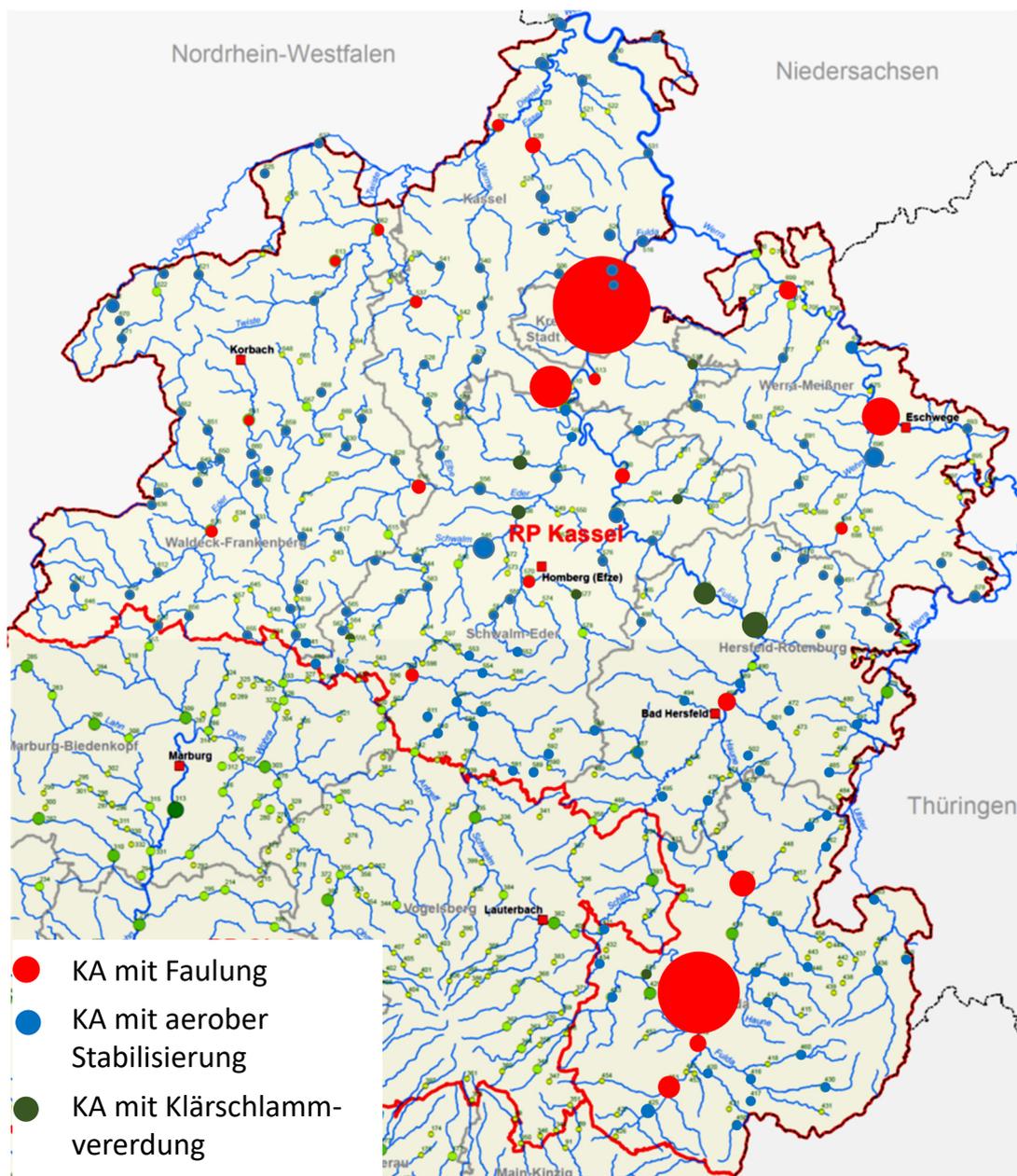


Abb. 3-5: Kläranlagen der Region Nordost-Hessen; Kreisdurchmesser zeigen die anfallenden Klärschlamm-mengen (als t TM/a), ohne Maßstab, Basis: HLNUG, Kommunale Abwasserbehandlungsanlagen in Hessen - Lagebericht 2018 (HLNUG, 2018)

3.4.3.2 Entsorgungspreise in den Jahren 2017 bis 2019

Mit den Fragebögen wurden auch die Entsorgungspreise in den vergangenen Jahren 2017 bis 2019 abgefragt. In den nachstehenden Tab. 3-9 bis Tab. 3-12 sind die in den Fragebögen angegebenen Entsorgungspreise für die Kategorien Landwirtschaft Nassschlamm, Landwirtschaft entwässerter Schlamm, Landschaftsbau sowie Klärschlammverbrennung angegeben. Die jeweils angegebenen Preise sind zudem auf den Preis pro t TM umgerechnet, um die Entsorgungswege miteinander vergleichen zu können.

Die Angaben zeigen jeweils eine erhebliche Spannweite, beispielsweise bei der Nassschlammverwertung zwischen 11,00 €/m³ und 29,90 €/m³, im Mittel ca. 20,00 €/m³. Die Mittelwerte zeigen, dass von 2017 bis 2018 ein z.T. deutlicher Preisanstieg zu verzeichnen war; zwischen 2018 und 2019 blieben die Preise in etwa gleich.

Der Vergleich der angegebenen Preise auch in einem Cluster ist schwierig. Es ist im Einzelnen nicht nachzuvollziehen, ob z.B. folgende Kosten mit in den genannten Preisen enthalten sind:

- MwSt. (netto oder brutto)
- Handling auf der Kläranlage (z.B. Verladen in Container)
- Containergestellung
- Preis ab Kläranlage (Regelfall) oder zzgl. Transport (Transportentfernung)
- Klärschlammanalytik (ist bei Klärschlammverbänden i.d.R. mit inbegriffen)
- Bei landwirtschaftlicher Verwertung:
 - Einarbeitung in den Boden
 - Bodenprobenahme, Bodenprobe (Analytik)
 - Lieferscheinverfahren nach AbfKlärV
 - Düngbedarfsermittlung, Stoffstrombilanz, Düngegeratung
 - Jahresabfuhr- und Ausbringungsplan
- Begleitscheinverfahren mit Annahmeerklärung, Übernahmeschein, Transporterlaubnis
- Meldung an die Wasserbehörde

Tab. 3-9: Entsorgungspreise Landwirtschaft, Nassschlamm

	Landwirtschaft Nassschlamm					
	2017		2018		2019	
	€/t OS	€/t TM	€/t OS	€/t TM	€/t OS	€/t TM
Min.	8,00	105,56	14,00	283,78	11,00	189,19
Max	21,87	1.215,00	29,90	1.080,00	29,90	1.080,00
Mittelwert	14,96	461,30	20,02	569,41	19,85	526,36
Median	15,00	392,68	19,45	520,91	19,58	466,00

Tab. 3-10: Entsorgungspreise Landwirtschaft, entwässerter Schlamm

	Landwirtschaft entwässerter Schlamm					
	2017		2018		2019	
	€/t OS	€/t TM	€/t OS	€/t TM	€/t OS	€/t TM
Min.	16,50	66,00	25,00	83,33	27,00	120,54
Max	130,00	653,27	130,00	557,94	130,00	653,27
Mittelwert	62,37	217,91	73,36	264,08	73,90	281,12
Median	59,60	224,41	69,90	236,35	69,00	234,22

Tab. 3-11: Entsorgungspreise Landschaftsbau

	Landschaftsbau					
	2017		2018		2019	
	€/t OS	€/t TM	€/t OS	€/t TM	€/t OS	€/t TM
Min.	46,00	139,39	60,00	171,43	65,00	196,97
Max	85,44	260,09	85,80	322,56	85,80	330,00
Mittelwert	65,72	199,74	72,90	246,99	75,40	263,48
Median	65,72	199,74	72,90	246,99	75,40	263,48

Bei der Bewertung der angegebenen spezifischen Kosten für die landwirtschaftliche Verwertung pro t TM (€/t TM) fällt auf, dass die Entsorgung des entwässerten Schlammes in der Landwirtschaft mit i.M. ca. 260 – 280 €/t TM deutlich günstiger ist als die Entsorgung des Nassschlammes, die auf ca. 530 – 570 €/t TM kommt und damit doppelt so teuer ist. Es ist jedoch zu bedenken, dass eine Entwässerung auf ca. 22 – 27 % TM auch erhebliche Kosten erfordert. Als Orientierung können Kosten für eine mobile Entwässerung in Höhe von ca. 9 – 11 €/m³ Nassschlamm (inkl. Gestellung, Energie, Polymer, Personal) sowie bei stationär installierten Entwässerungsaggregaten von ca. 4 bis 8 €/m³ Nassschlamm (inkl. Kapitalkosten, Reparatur, Wartung, Energie, Polymer, Personal) angenommen werden. Bei Ansatz von ca. 4 % TM im zu entwässernden Nassschlamm ergeben sich für die Entwässerung spezifische Kosten von ca. 200 – 300 €/t TM bei mobilen Anlagen sowie ca. 100 – 200 €/t TM bei stationären Anlagen (ist für jede Anlage gesondert zu bestimmen).

Im Einzelfall ist zu prüfen, ob eine Entwässerung z.B. mit mobilen Aggregaten wirtschaftlich sinnvoll ist und technisch machbar. Hier sind verschiedene Aspekte zu prüfen:

- Ist ein genügend großer Nassschlammespeicher vorhanden? Die Kosten einer mobilen Entwässerung setzen sich naturgemäß aus Fixkosten (An- und Abtransport, Vorhaltekosten) sowie variablen Kosten (Polymer, Strom, Personal) zusammen. Je größer die zu entwässernde Charge ist, desto geringer wird der spezifische Anteil der Fixkosten und damit die Entwässerungskosten.

- Macht es ggf. Sinn, Nassschlämme aus benachbarten Kläranlagen an einem zentralen Ort zusammenzubringen und dort gemeinsam mit einer mobilen Anlage zu entwässern? Hier sind Kooperationen der Kläranlagenbetreiber erforderlich.
- Ist die Kläranlage, auf der die mobile Entwässerung erfolgt, hinsichtlich der biologischen Reinigung sowie auch der Nährstoffelimination (Stickstoff- und Phosphor) in der Lage, die Schlammwässer / Zentratspeicherung zu verarbeiten? Ggf. ist ein Zentratspeicher erforderlich, um Frachtspitzen aus der Entwässerung abzuf puffern.

Tab. 3-12: Entsorgungspreise Verbrennung (Mono- und Mitverbrennung)

	Verbrennung (Mono- und Mitverbrennung)					
	2017		2018		2019	
	€/t OS	€/t TM	€/t OS	€/t TM	€/t OS	€/t TM
Min.	85,00	248,57	87,00	248,57	80,92	229,24
Max	121,38	379,31	294,65	1.339,32	306,85	1.394,77
Mittelwert	94,71	298,43	160,82	615,37	146,73	542,06
Median	86,22	282,92	139,80	504,69	139,80	517,78

Bei den Kosten der thermischen Verwertung (siehe Tab. 3-12) gab es von 2017 auf 2018 einen deutlichen Preisanstieg. Dies war eine bundesweite Entwicklung, die durch das Inkrafttreten der Klärschlammverordnung sowie der Düngemittelverordnung und der Düngeverordnung bedingt war. Von 2018 auf 2019 und nach Ausschreibungsergebnissen aus 2020 fortlaufend haben die Preise für die thermische Verwertung wieder etwas nachgegeben. Ausschreibungsergebnisse aus Mittelhessen ergaben zuletzt Preise von ca. 85 – 110 €/t entwässerten Schlamm für 2021 ansteigend ca. 90 bis 115 €/t entwässerten Schlamm für 2023 für Jahresmengen von ca. 2.000 t/a, jeweils inkl. Containergestellung und Transport zzgl. MwSt.

3.5 Auswertung der Klärschlammanalysen, Konkretisierung und Bewertung der jeweiligen Klärschlammzusammensetzung in Bezug auf DüMV, Abf-KlärV

3.5.1 Schadstoffgehalte

Gemäß § 8, Abs. 1, der AbfKlärV, 2017, ist die „Auf- oder Einbringung des Klärschlammes auf oder in den Boden nur zulässig, wenn die Untersuchungen nach § 5 Absatz 1 und 2 ergeben, dass die Grenzwerte nach Anlage 2 Tabelle 1.4 Spalte 4 der Düngemittelverordnung sowie die zusätzlichen Grenzwerte nach Anlage 1 nicht überschritten werden. Für das Schwermetall Kupfer gilt als Grenzwert der zulässige Höchstgehalt nach Anlage 1 Abschnitt 4.1 Nummer 4.1.1 Spalte 6 Absatz 2 der Düngemittelverordnung.“ Die entsprechenden Grenzwerte der AbfKlärV, 2017, und der DüMV, 2019, sind in der nachfolgenden Tab. 3-13 zusammengestellt.

Die EU hat am 25. Juni 2019 die neue EU-Düngemittelverordnung 2019/1009 für das Inverkehrbringen von Düngemitteln auf dem EU-Markt in Kraft gesetzt. Mit dieser Verordnung sollen die Anforderungen an Düngemittel harmonisiert werden, die aus organischen oder sekundären Rohstoffen in der EU hergestellt werden, wodurch sich neue Möglichkeiten für ihre Herstellung und Vermarktung im großen Maßstab eröffnen.

Als wesentliche Unterschiede zur deutschen Düngemittelverordnung sind die deutlich verschärften Grenzwerte für Kupfer und Zink zu sehen. Beim Kupfer müssen zukünftig 300 mg/kg TM bei organischen Düngemitteln und 600 mg/kg TM bei anorganischen Düngemitteln im Vergleich zum Grenzwert von 900 mg/kg TM in der deutschen Düngemittelverordnung eingehalten werden. Für Zink gelten EU-Grenzwerte von 800 mg/kg TM bei organischen Düngemitteln und 1.500 mg/kg TM bei anorganischen Düngemitteln im Vergleich zum deutschen Grenzwert von 5.000 mg/kg TM. Ob und ggf. wann diese Grenzwerte der EU-Düngemittelverordnung in deutsches Recht umgesetzt werden, ist unbekannt.

Insgesamt wurden 990 Klärschlammanalysen der Kläranlagen aus dem Bereich des Reg.-Bezirks Kassel aus den Jahren 2017, 2018, 2019 ausgewertet und mit den Anforderungen an die Verwertung von Klärschlamm auf oder in den Böden gem. der AbfKlärV von 2017 und der DüMV von 2019 sowie der EU-DüMV von 2019 verglichen. Aufgrund der Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Betreibern der Kläranlagen sind die detaillierten Ergebnisse hier nicht veröffentlicht. Einige Analysen umfassten nicht alle Parameter. Von einigen Anlagen wurden keine Analysen zur Verfügung gestellt.

Tab. 3-13: Anforderungen an Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost auf oder in den Boden gemäß AbfKlärV, 2017, DüMV, 2019, EU-Düngemittelverordnung 2019

		AbfKlärV v. 27.09.2017 BGBl. I S. 3465)	DüMV v. 26.5.2017, Verordn. 02.10.2019 (BGBl. I S. 1414)		EU-DüMV Verordnung (EU) 2019/1009 v. 5. Juni 2019	
		gem. Anlage 1 (zu § 8 Absatz 1)	gem. Anlage 2 Tabelle 1.4 Spalte 2 und 4		Veröff. am 25.06.2019 im EU- Amtsblatt L 170	
			Kennzeich- nung	Grenzwert	Organisches Düngemittel	Anorganisches Makronähr- stoff- Dünge- mittel
Arsen	mg / kg TM		20	40	40	40
Blei	mg / kg TM		100	150	120	120
Cadmium	mg / kg TM		1	1,5	1,5	3,0
Chrom	mg / kg TM		20 mg/kg P ₂ O ₅	50 mg/kg P ₂ O ₅		50 mg/kg P ₂ O ₅
Chrom (VI)	mg / kg TM		300	-		
Chrom (VI)	mg / kg TM		1,2	2,0	2,0	2,0
Kupfer	mg / kg TM			0,09 % bez. auf TM / 900	300	600
Nickel	mg / kg TM		40	80	50	100
Quecksilber	mg / kg TM		0,5	1,0	1,0	1,0
Thallium	mg / kg TM		0,5	1,0		
Zink	mg / kg TM	4.000		0,5 % bez. auf TM / 5.000	800	1.500
PFT	mg / kg TM		0,05	0,1		
AOX	mg / kg TM	400				
PCB je Kongener	mg / kg TM	0,1				
Benzo(a)pyren	mg / kg TM	1				
Σ Dioxine und dl-PCB	ng / kg TM			30		

Zusammengefasst ergaben sich folgende Bewertungen der analysierten Klärschlammproben für die verschiedenen Schadstoffe (siehe Tab. 3-13):

- Arsen:** 848 Analysen ausgewertet:
6 Analysen (0,6 %) oberhalb des Kennzeichnungswertes von 20 mg/kg TM,
Maximalwert 31 mg/kg TM,
Mittelwert: 6,0 mg/kg TM
Median: 5,7 mg/kg TM
- Blei:** 989 Analysen ausgewertet:
1 Analyse (0,1 %) oberhalb des Kennzeichnungswertes von 100 mg/kg TM
Maximalwert 110 mg/kg TM,
Mittelwert: 42,0 mg/kg TM
Median: 41,6 mg/kg TM
- Cadmium:** 985 Analysen ausgewertet:
327 Analysen (33,2 %) oberhalb des Kennzeichnungswertes von 1,0 mg/kg TM,
21 Analysen (2,1 %) oberhalb des Grenzwertes von 1,5 mg/kg TM,
Maximalwert 8,0 mg/kg TM,
Mittelwert: 0,9 mg/kg TM
Median: 0,9 mg/kg TM
- Chrom (VI):** 383 Analysen ausgewertet:
keine Überschreitung des Kennzeichnungswertes
Maximalwert 0,9 mg/kg TM,
Mittelwert: 0,3 mg/kg TM
Median: 0,3 mg/kg TM
- Chrom:** 988 Analysen ausgewertet:
5 Analysen (0,5 %) oberhalb des Kennzeichnungswertes von 300 mg/kg TM,
Maximalwert 610 mg/kg TM,
Mittelwert: 45 mg/kg TM
Median: 38 mg/kg TM
- Kupfer:** 989 Analysen ausgewertet:
keine Analyse oberhalb des Grenzwertes der DüMV (0,09 % der TM)
433 Analysen oberhalb des Grenzwertes der EU-DüMV von 300 mg/kg für organische Düngemittel, 5 Analysen oberhalb des Grenzwertes der EU-DüMV von 600 mg/kg für anorganische Düngemittel
Maximalwert 838 mg/kg TM,
Mittelwert: 295 mg/kg TM
Median: 288 mg/kg TM
- Nickel:** 988 Analysen ausgewertet:
189 Analysen (19,1 %) oberhalb des Kennzeichnungswertes von 40 mg/kg TM,
22 Analysen (2,2 %) oberhalb des Grenzwertes von 80 mg/kg TM,
Maximalwert 140 mg/kg TM,

	Mittelwert: 34 mg/kg TM
	Median: 30 mg/kg TM
Quecksilber:	979 Analysen ausgewertet: 124 Analysen (12,7 %) oberhalb des Kennzeichnungswertes von 0,5 mg/kg TM, 4 Analysen (0,4 %) oberhalb des Grenzwertes von 1,0 mg/kg TM, Maximalwert 2,1 mg/kg TM, Mittelwert: 0,32 mg/kg TM Median: 0,28 mg/kg TM
Thallium:	650 Analysen ausgewertet: 2 Analysen (0,3 %) oberhalb des Kennzeichnungswertes von 0,5 mg/kg TM, keine Analysen oberhalb des Grenzwertes von 1,0 mg/kg TM, Maximalwert 0,54 mg/kg TM, Mittelwert: 0,08 mg/kg TM Median: 0,02 mg/kg TM
Zink:	985 Analysen ausgewertet: keine Überschreitungen des Grenzwertes gem. AbfKlärV (4.000 mg/kg) bzw. DüMV (5.000 mg/kg) 694 Analysen (70,5 %) oberhalb des Grenzwertes der EU-DüMV von 800 mg/kg TM für organische Düngemittel, 36 Analysen (3,6 %) oberhalb des Grenzwertes der EU-DüMV von 1.500 mg/kg TM für anorganische Düngemittel Maximalwert 2.206 mg/kg TM, Mittelwert: 959 mg/kg TM Median: 952 mg/kg TM
AOX:	968 Analysen ausgewertet: 12 Analysen (1,2 %) oberhalb des Grenzwertes von 400 mg/kg TM, Maximalwert 724 mg/kg TM, Mittelwert: 170 mg/kg TM Median: 155 mg/kg TM
Σ TCDD Äq.	283 Analysen ausgewertet: 12 Analysen (4,2 %) oberhalb des Grenzwertes von 30 ng/kg TM, Maximalwert 86 ng/kg TM, Mittelwert: 13 ng/kg TM Median: 11 ng/kg TM
Σ PFT	264 Analysen ausgewertet: keine Überschreitungen des Kennzeichnungswertes von 0,5 mg/kg TM, Maximalwert 0,06 mg/kg TM, Mittelwert: 0,01 mg /kg TM Median: 0,01 mg /kg TM (1,0 mg/kg)

Auf einer Kläranlage im Schwalm-Eder-Kreis wurden bis 2019 deutliche Überschreitungen des Wertes zur Kennzeichnungspflicht der DüMV beim Parameter Chrom mit Werten von 415 bis 670 mg/kg TM (jeweils im Jahresmittel) festgestellt. Nach Aussage des Kläranlagenbetriebs war das auf ein dort verwendetes Fällmittel zurückzuführen, das aber seit Anfang 2020 nicht mehr eingesetzt wird. Seitdem werden dort Chrom-Konzentrationen von i.M. 66 mg/kg TM gemessen, also deutlich unterhalb des Kennzeichnungswertes von 300 mg/kg. Die hohen Werte der Jahre 2017 bis 2019 wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Tab. 3-14: Anzahl Kläranlagen in den einzelnen Landkreisen mit Überschreitungen von Kennzeichnungs- und Grenzwerten ausgewählter Schadstoffe lt. Düngemittelverordnung

Kreis-Nr.	Kreis	Anzahl Kläranlagen mit Überschreitungen von Kennzeichnungs- (KzW) bzw. Grenzwerten											
		Arsen		Cadmium		Chrom		Nickel		Quecksilber		AOX	∑ TCDD
		KzW	GW	KzW	GW	KzW	GW	KzW	GW	KzW	GW	GW	GW
611	Stadt Kassel	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
631	Kreis Fulda	0	0	10	0	0	0	10	1	3	0	0	0
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	1	0	4	0	0	1	4	1	2	1	0	0
633	Kreis Kassel	0	0	9	1	0	0	0	0	9	0	0	0
634	Kreis Schwalm-Eder	0	0	13	1	0	0	10	1	5	0	0	2
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	0	0	24	3	0	0	26	1	10	1	2	1
636	Kreis Werra-Meißner	2	0	5	0	0	0	2	0	0	0	0	1
	Summe	3	0	66	5	0	1	52	4	30	2	2	4

Tab. 3-15: Jährliche Schlammengen (t TM/a) mit bodenbezogener Verwertung in den Landkreisen von Kläranlagen, in denen in den Jahren 2017 – 2019 einzelne Analysenwerte oberhalb der Kennzeichnungs- oder Grenzwerte gemäß Düngemittelverordnung festgestellt wurden

Kreis-Nr.	Kreis	Bodenbezogene Verwertung (t TM/a) bei Kläranlagen mit einzelnen Überschreitungen von			
		Kennzeichnungswerten (DüMV)		Grenzwerten (DüMV)	
		Nassschlamm	entwässerter Schlamm	Nassschlamm	entwässerter Schlamm
611	Stadt Kassel	0	0		
631	Kreis Fulda	316	1.516		22
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	33	431		91
633	Kreis Kassel	373	616		60
634	Kreis Schwalm-Eder	565	273	50	
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	985	500	48	103
636	Kreis Werra-Meißner	10	787		
	Summe	2.282	4.123	98	276

3.5.2 Phosphor-Potential

Anhand der Klärschlammengen sowie der Zusammensetzung (Angaben in den Fragebögen sowie Klärschlammanalysen) wurden die Phosphor-Frachten in den Schlämmen der einzelnen Kläranlagen ermittelt (siehe Tab. 3-16). Insgesamt werden ca. 546 t P/a in 20.857 t TM/a entsorgt bzw. verwertet. Die mittlere Phosphor-Konzentrationen im Klärschlamm des Regierungsbezirks Kassel beträgt damit 2,61 % P entspr. 6,0 % P₂O₅

Von einigen Kläranlagen liegen keine oder nur sehr wenige Klärschlammanalysen und auch keine belastbaren Angaben über die entsorgten Klärschlammengen vor. Zur Ermittlung der Phosphor-Frachten dieser Anlagen wurden folgende Werte angenommen:

- Mittlere spezifische Klärschlammmenge: 13,5 kg TM / (EW*a)
- Mittlere Phosphor-Konzentrationen (ungewichtet) im Klärschlamm in den einzelnen Landkreisen:
 - Kreis Fulda 3,63 % P entspr. 8,31 % P₂O₅
 - Kreis Hersfeld-Rotenburg 2,38 % P entspr. 5,44 % P₂O₅
 - Kreis Kassel 2,68 % P entspr. 6,14 % P₂O₅
 - Kreis Schwalm-Eder 2,25 % P entspr. 5,15 % P₂O₅
 - Kreis Waldeck-Frankenberg 2,67 % P entspr. 6,12 % P₂O₅
 - Kreis Werra-Meißner 1,87 % P entspr. 4,26 % P₂O₅

Die Phosphor-Fracht dieser Anlagen mit unzureichender Datenlage wird so auf insgesamt ca. 30.700 kg P/a geschätzt. Diese P-Fracht ist in der nachfolgenden Aufstellung enthalten.

Die Auswertung der Fragebögen sowie der Klärschlammanalysen ergibt für die insgesamt zur Verfügung stehende Phosphor- und Phosphat-Fracht (P₂O₅) im Reg.-Bezirk Kassel folgendes Bild (siehe Tab. 3-16 und Abb. 3-6):

- Gesamt-P-Fracht ca. 546 t P /a entspr. ca. 1.250 t P₂O₅/a
- davon
 - langfristig in KS-Vererdungsanlagen: ca. 41 t P /a entspr. ca. 94 t P₂O₅/a
 - in Schlämmen mit < 2 % P: ca. 87 t P /a entspr. ca. 198 t P₂O₅/a

Das kurzfristig verfügbare Phosphor-Potential bei Nutzung des gesamten anfallenden Klärschlammes ohne den Schlamm in den Vererdungsanlagen liegt also bei ca. 505 t P / a entspr. ca. 1.157 t P₂O₅ / a.

Insgesamt ca. 323 t P/a entsprechend ca. 59 % der gesamten P-Fracht bzw. 64 % der P-Fracht ohne die Klärschlammvererdungsanlagen sind in Schlämmen gebunden, die bodenbezogen (Landwirtschaft oder Landschaftsbau) verwertet werden (siehe Tab. 3-18).

Insgesamt ca. 87 t P/a sind in Schlämmen gebunden, in denen die P-Konzentration unter 2 % P analysiert wurde. Diese Schlämme sind gemäß den Anforderungen der AbfKlärV nicht verpflichtet den Phosphor zurückzugewinnen bzw. bodenbezogen zu verwerten (siehe Tab. 3-16).

Rechtlich derzeit noch unklar ist, wie mit Kläranlagen, deren Schlämme z.B. P-Gehalte im Mittel < 2 % aufweisen, aber in einzelnen Chargen doch P-Gehalte > 2 % analysiert werden.

Tab. 3-16: Phosphor-Potential (in kg P/a) in den einzelnen Landkreisen, Zuordnung zu Clustern der P-Konzentrationen

Kreis-Nr.	Kreis	Cluster P-Konzentrationen						P in KS-Vererdung	Summe	
		< 1,5 % P	1,5 - 2,0 % P	2,0 - 2,5 % P	2,5 - 3,0 % P	3,0 - 3,5 % P	> 3,5 % P		kg P/a	%
		P-Frachten in den Landkreisen des Reg.-Bez. Kassel (kg P/a)								
611	Stadt Kassel	0	0	0	0	0	163.889	0	163.889	30,0%
631	Kreis Fulda	12.933	3.834	5.629	5.320	60.066	0	3.182	90.964	16,7%
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	1.941	578	1.506	14.878	0	0	26.191	45.094	8,3%
633	Kreis Kassel	1.128	17.996	6.325	13.525	22.678	2.117	1.857	65.625	12,0%
634	Kreis Schwalm-Eder	4.727	9.262	22.094	2.564	25.654	0	9.716	74.017	13,6%
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	561	4.581	17.664	13.002	20.417	3.539	0	59.763	10,9%
636	Kreis Werra-Meißner	113	29.111	12.211	5.073	0	0	0	46.508	8,5%
	Summe	21.404	65.362	65.428	54.362	128.815	169.545	40.946	545.861	
		86.766		119.790		298.359				
		504.915						40.946	545.861	

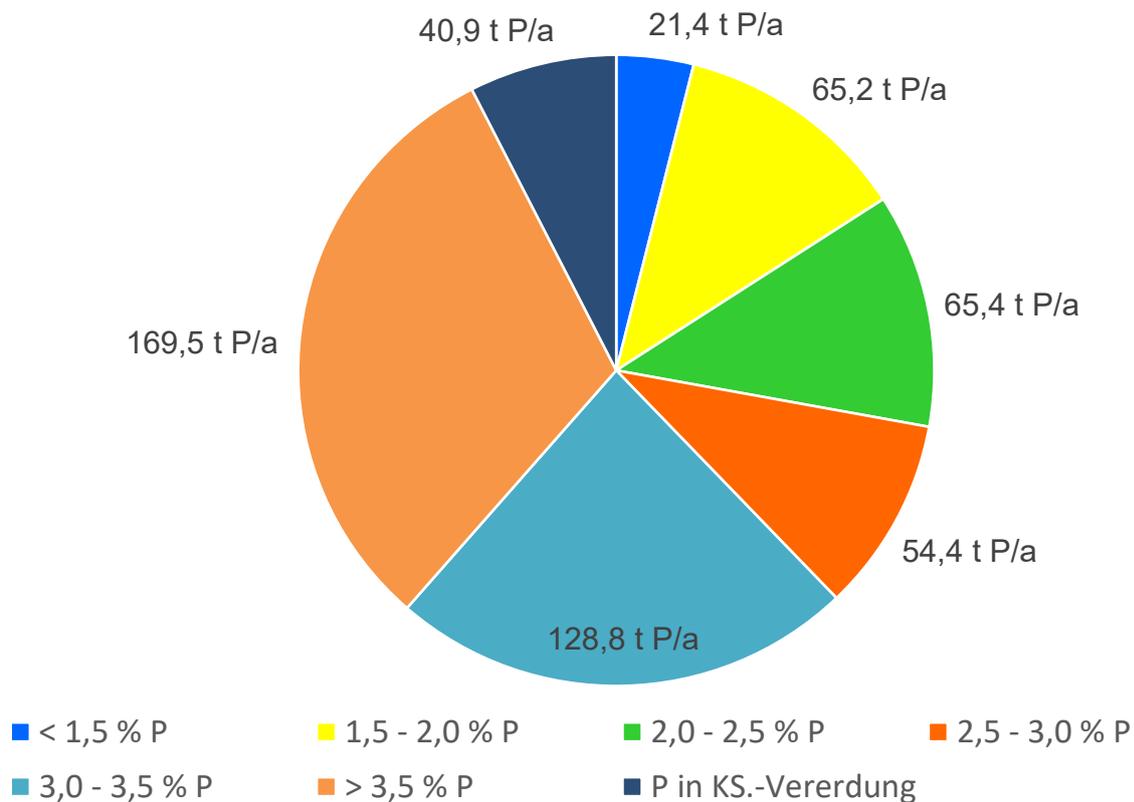


Abb. 3-6: Zuteilung der Phosphor-Mengen zu Clustern der P-Konzentration in den Schlämmen

Tab. 3-17: Klärschlamm-mengen (in t TM/a) in den einzelnen Landkreisen, Zuordnung zu Clustern der P-Konzentrationen

Kreis-Nr.	Kreis	Cluster P-Konzentrationen						P in KS-Vererdung	Summe	
		< 1,5 % P	1,5 - 2,0 % P	2,0 - 2,5 % P	2,5 - 3,0 % P	3,0 - 3,5 % P	> 3,5 % P		t TM/a	%
Klärschlamm-mengen mit entMprechenden P-Gehalten (t TM/a)										
611	Stadt Kassel	0	0	0	0	0	4.519	0	4.519	21,7%
631	Kreis Fulda	1.219	198	250	203	1.833	0	126	3.829	18,4%
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	198	33	69	501	0	0	881	1.683	8,1%
633	Kreis Kassel	128	1.062	270	496	712	60	76	2.803	13,4%
634	Kreis Schwalm-Eder	379	569	1.036	97	798	0	416	3.295	15,8%
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	59	258	756	449	618	99	0	2.239	10,7%
636	Kreis Werra-Meißner	10	1.759	532	189	0	0	0	2.490	11,9%
	Summe	1.993	3.880	2.913	1.934	3.960	4.677	1.500	20.858	
		5.873		4.848		8.637				
		19.358							1.500	20.858

Tab. 3-18: Phosphor-Potential (in kg P/a) in den einzelnen Landkreisen, Zuordnung zu den Klärschlamm-mengensorgungspfaden

Kreis-Nr.	Kreis	Phosphoranteile (kg P/a)						Summe
		Landwirtschaft		Landschaftsbau	Verbrennung		KS-Vererdung	
		Nassschlamm	entw. Schlamm		Mono-V.	Mit-V.		
611	Stadt Kassel	0	0	0	0	163.889	0	163.889
631	Kreis Fulda	8.213	64.592	0	0	14.978	3.182	90.964
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	2.871	16.032	0	0	0	26.191	45.094
633	Kreis Kassel	17.480	43.305	0	2.983	0	1.857	65.625
634	Kreis Schwalm-Eder	20.151	29.892	6.648	0	7.611	9.716	74.017
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	34.387	25.377	0	0	0	0	59.763
636	Kreis Werra-Meißner	1.039	27.006	18.464	0	0	0	46.508
	Summe	84.140	206.202	25.112	2.983	186.477	40.946	545.861
		290.343		25.112	189.460		40.946	
		545.861						

3.6 Annahmen und Randbedingungen für die weitere Planung

Für die weiteren Planungen (Mengengerüste bzw. stoffliche Eigenschaften der Klärschlämme und virtuellen Klärschlamm-maschen) wurden diejenigen Kläranlagen berücksichtigt, die im Rahmen der abgefragten Steckbriefe ein kurz- oder langfristiges Kooperationsinteresse bekundet hatten. Alle weiteren Anlagen wurde ausgeschlossen. Dies gilt auch für die Vererdungsanlagen, bei denen mit einem diskontinuierlichen Klärschlamm-anfall erst im Laufe der nächsten Jahre zu rechnen ist.

Anlagen, die ihre Klärschlämme zur Weiterbehandlung (z.B. Faulung) bzw. zur Entsorgung im Verbund an andere Kläranlagen abgeben, wurden ebenfalls nicht als eigenständige Produzenten geführt. Dies berücksichtigt den Umstand, dass die entsprechenden Klärschlämme sowohl bez. der Menge als auch bez. der stofflichen Zusammensetzung eine Untermenge der jeweils entsorgenden Kläranlage darstellen. Auf diese Weise wurde eine doppelte Berücksichtigung vermieden.

Im Hinblick auf die stofflichen Eigenschaften der Klärschlämme wurden sämtliche vorgelegten Klärschlammanalysen berücksichtigt, einzeln für jeden Analyseparameter hinterlegt, zu Jahresmittelwerten zusammengefasst und (sofern vollständig vorhanden) als Mittelwert der letzten 3 Jahre weiterverarbeitet.

Bei denjenigen Anlagen, die Interesse an einer kurz- bzw. langfristigen Beteiligung bekundet hatten, für die jedoch keine Klärschlammanalysen im Rahmen der Abfrage bei den Betreibern erfolgt war, wurden Datenlücken anhand der durch das Regierungspräsidium Kassel bereit gestellten Daten vorgenommen. War dies nicht möglich, wurden die Stoffdaten anhand des Landkreismittelwerts für den jeweiligen Parameter abgeschätzt.

Vorrang für die weiteren Schritte der Machbarkeitsstudie (Aufbau der Verwertungsszenarien, Kategorisierung der Klärschlämme, Berechnung der virtuellen Aschen etc.) hatten somit die seitens der Anlagenbetreiber zur Verfügung gestellten Primärdaten.

3.7 Konkretisierung und Festlegung der zu verwertenden / entsorgenden Klärschlammengen für die weitere Planung

Die Klärschlämme werden derzeit entweder als Nassschlamm direkt in der Landwirtschaft oder als entwässerter Schlamm in der Landwirtschaft, dem Landschaftsbau oder der Klärschlammverbrennung verwertet bzw. entsorgt. Weiterhin werden zur Zeit noch ca. 1.500 t TM/a in Klärschlammvererdungsanlagen behandelt. Diese werden diskontinuierlich geräumt und stehen dann zur Entsorgung bzw. Verwertung an. Die Entsorgungswege in den einzelnen Landkreisen ist bereits in Kap. 3.4.3 erläutert. In der nachfolgenden Tab. 3-19 sind die gesamten Klärschlammengen noch einmal zusammengestellt und in Abb. 3-7 grafisch dargestellt.

Tab. 3-19: Klärschlammengen in den Landkreisen des Regierungsbezirks Kassel als Mittelwerte der Jahre 2017 bis 2019

Kreis-Nr.	Kreis	Klärschlammengen 2017 - 2019 (t/a)							
		Originalsubstanz			umgerechnet 25 % TM	KS- Vererdung t TM/a	Trocken- masse TM		
		Nassschlamm	entw. Schlamm	Summe					
611	Stadt Kassel	0	17.331	26,08%	17.331	18.077	0	4.519	
631	Kreis Fulda	25.677	i.M. 1,54%	14.724	22,45%	40.401	14.808	126	3.829
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	14.391	i.M. 1,45%	4.726	12,54%	19.117	3.207	881	1.683
633	Kreis Kassel	16.689	i.M. 3,74%	7.229	29,08%	23.918	10.908	76	2.803
634	Kreis Schwalm-Eder	26.275	i.M. 3,01%	9.238	22,59%	35.513	11.514	416	3.294
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	39.056	i.M. 3,48%	2.859	30,81%	41.915	8.955	0	2.239
636	Kreis Werra-Meißner	1.262	i.M. 4,29%	7.364	33,08%	8.625	9.958	0	2.490
	Summe	123.349		63.471		186.820	77.427	1.500	20.857
				186.820					20.857

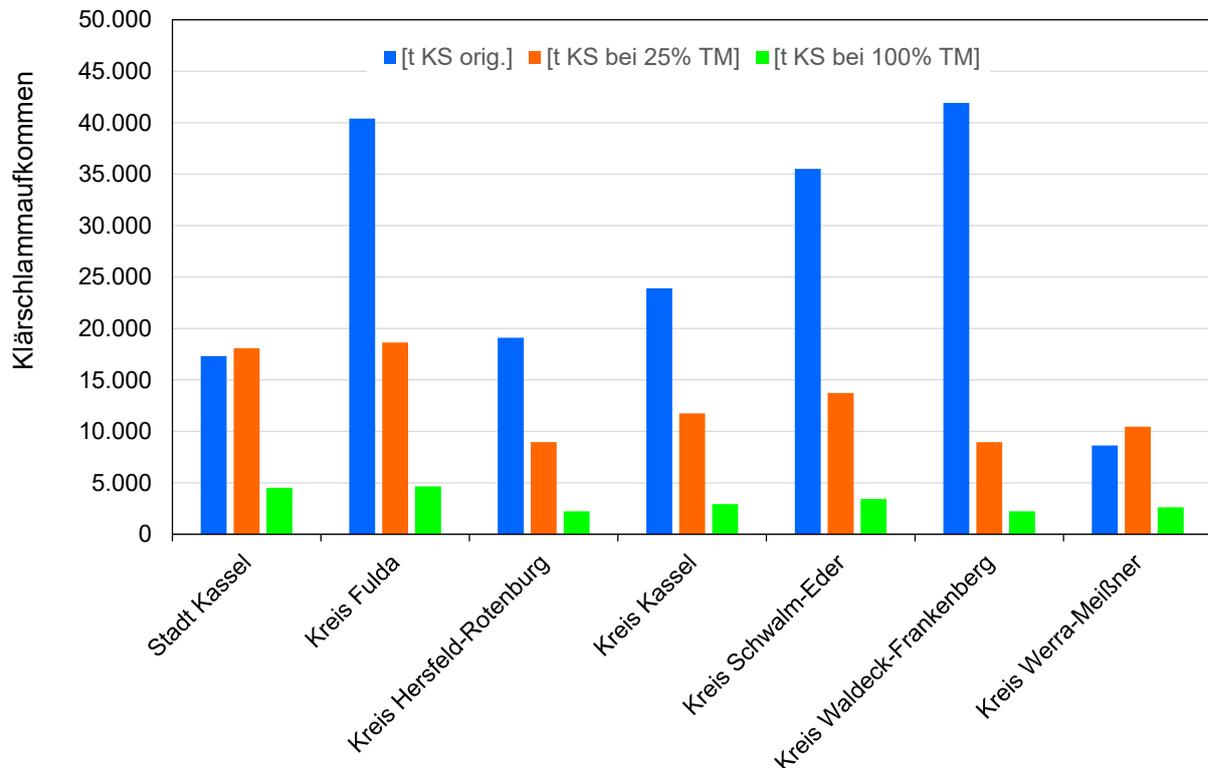


Abb. 3-7: Klärschlammaufkommen in den Landkreisen des Regierungsbezirks Kassel, Original-Substanz (OS), umgerechnet auf 25 % TM sowie Trockenmasse (TM)

Das Phosphor-Potential in den Klärschlämmen wurde bereits in Kap. 3.5.2 zusammengestellt. Danach ergibt die Auswertung der Fragebögen sowie der Klärschlammanalysen folgende insgesamt zur Verfügung stehende Phosphor- und Phosphat-Fracht (P_2O_5):

- Gesamt-P-Fracht ca. 546 t P /a entspr. ca. 1.250 t P_2O_5 /a
- davon
 - langfristig in KS-Vererdungsanlagen: ca. 41 t P /a entspr. ca. 94 t P_2O_5 /a
 - in Schlämmen mit < 2 % P: ca. 87 t P /a entspr. ca. 198 t P_2O_5 /a

Das kurzfristig verfügbare Phosphor-Potential bei Nutzung des gesamten anfallenden Klärschlammes ohne den Schlamm in den Vererdungsanlagen liegt also bei ca. 505 t P / a entspr. ca. 1.157 t P_2O_5 / a.

4 Typisierung der Kläranlagen in Nordost-Hessen

Auf Basis der Bestandsaufnahme werden die Abwasserbehandlungsanlagen (ABA) anhand von typischen Randbedingungen gruppiert, um im regionalen Kontext die Entwicklungsszenarien innerhalb der ABA-Gruppen aufzuzeigen und Empfehlungen für entsprechende Maßnahmen hin zu einem integrierten Klärschlamm-Verwertungs- und P-Rückgewinnungskonzept geben zu können.

Folgende Typisierungen wurden geprüft:

- Schlammmenge, Phosphor-Gehalt und Phosphor-Menge der ABA
- Stabilisierungsgrad (über oTM-Gehalt) und Stabilisierungsform (aerob / anaerob)
- Phosphor-Gehalt (unter Berücksichtigung der Anforderungen an eine P-Rückgewinnung gemäß AbfKlärV bzw. LAGA-Vollzugshilfe zur Umsetzung der AbfKlärV (Berücksichtigung der Grenze 20 g P/kg TM)
- Schlammmentwässerung, Möglichkeit zum Einsatz mobiler Schlammmentwässerung
- Schlammbehandlung ohne bzw. mit Faulung (Diese Information ist erforderlich, um einschätzen zu können, ob eine P-Rückgewinnung über MAP-Fällung möglich ist, weil Zentraten nach einer Entwässerung von ausgefaultem Schlamm vorliegen)

Für die verschiedenen Gruppen / Typen der Abwasserbehandlungsanlagen werden exemplarisch dezentrale oder semizentrale Szenarien zur Phosphorrückgewinnung entwickelt.

4.1 Teichanlagen und Klärschlammvererdungsanlagen, diskontinuierliche Entsorgung

Bei den im Regierungsbezirk betriebenen 61 Teichkläranlagen (Angaben des HLNUG sowie RP Kassel (Schwenzer, 2021)) ist naturgemäß die Erfassung der zu verwertenden Klärschlamm-mengen schwierig. Die Angaben der Betreiber dieser Anlagen sind in die Auswertung eingeflossen, allerdings werden Abwasserteiche in der Regel nur in Abständen mehrerer Jahre geräumt, so dass die gebildeten Mittelwerte der Jahre 2017 bis 2019 nur Anhaltswerte sein können. Gemäß Tab. 4-1 wird das Abwasser von ca. 70.000 EW in Teichkläranlagen behandelt. Unter Ansatz der bereits oben erläuterten spezifischen Schlammmenge von 13,5 kg TM/(EW*a) ergibt sich eine zu entsorgende Schlammmenge von ca. 935 t TM/a, entsprechend ca. 4,5 % der gesamten Schlammmenge.

Von vielen Teichkläranlagen liegen keine Klärschlammanalysen vor, so dass hier nur mit mittleren Konzentrationen gerechnet werden kann. Bei Ansatz der mittleren P-Konzentration in den Schlämmen des Regierungsbezirks Kassel von 2,61 % sind in den Schlämmen der Teichkläranlagen ca. 24,5 t P/a enthalten

Tab. 4-1: Klärschlammvererdungsanlagen sowie Teichkläranlagen im Regierungsbezirk Kassel

Kreis-Nr.	Kreis	Klärschlammvererdung			Teichkläranlagen		
		Anzahl KA	Ausbaugröße [EW]	Anschlussgröße [EW]	Anzahl KA	Ausbaugröße [EW]	Anschlussgröße [EW]
611	Stadt Kassel	0	0	0	0	0	0
631	Kreis Fulda	1	6.500	10.828	15	18.330	17.927
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	3	59.300	65.548	14	22.640	20.233
633	Kreis Kassel	1	7.500	5.660	5	6.200	6.200
634	Kreis Schwalm-Eder	3	36.250	33.850	14	11.200	11.200
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	0	0	0	13	18.750	13.633
636	Kreis Werra-Meißner	0	0	0	0	0	0
	Summe	8	109.550	115.886	61	77.120	69.193

In den 8 Klärschlammvererdungsanlagen der Größenklasse 4a werden ca. 1.500 t TM/a behandelt, in denen etwa 41 t P/a gebunden sind. Durch den Abbau der organischen Substanz in der „Klärschlammterde“ wird der P-Gehalt ansteigen, aber auch die Schwermetallkonzentrationen erhöhen sich. Die Verwertung der in Abständen von einigen Jahren geräumten „Klärschlammterde“ muss von Fall zu Fall gesondert betrachtet werden.

4.2 Phosphorelimination

Die Antworten in Hinblick auf die Phosphorelimination in den Fragebögen waren sehr lückenhaft, zumal auch nicht für jede einzelne Kläranlage ein Fragebogen abgegeben wurde. Unter Hinzuziehung der Angaben aus dem FIS-HAA wurden insgesamt 15 Anlagen festgestellt, die über eine gezielte Biologische P-Elimination (Bio-P) verfügen. Auf 180 Anlagen (Auswertung der FIS-HAA-Daten sowie der Fragebögen) wird zudem eine chemische Fällung durchgeführt. Angaben zum Fällmittel wurden nur von 40 Anlagen gemacht, wovon 27 Anlagen mit Fällmittel auf Eisen-Basis und 13 Anlagen mit Mischprodukten, in der Regel Aluminium-Eisen-Mischprodukte arbeiten.

Die aktuellen Überwachungswerte sowie Einleitungswerte anhand der EKVO-Berichte wurden nicht ausgewertet. Die Phosphor-Ablaufwerte der Kläranlagen in Hessen sind zunächst über die Anforderungen des Maßnahmenprogramms 2015 – 2021 zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Hessen und über die entsprechenden Bescheide der Überwachungsbehörden für jede Kläranlage festgelegt. Die grundsätzlichen Anforderungen sind in der nachfolgenden Tab. 4-2 (nach HMUKLV, 2015) zusammengestellt.

Im Entwurf der Fortschreibung des Maßnahmenprogramms 2021 – 2027 (HMUKLV, 2020) sind weitere Regelungen auch zu zusätzlichen Anforderungen an die P-Ablaufwerte von Kläranlagen aufgenommen worden, die derzeit diskutiert werden.

Tab. 4-2: Anforderungen an die P-Ablaufwerte an kommunale Kläranlagen in betroffenen Einzugsgebieten (aus Maßnahmenprogramm 2015 – 2021, HMUKLV, 2015)

Nr.	GK *)	Detaillierte Spezifikation	Anzahl betroffener Anlagen je GK	Anzahl Anlagen, die die Anforderungen wahrscheinlich nicht einhalten (St 2014)	Anforderung
1	5	-	8	8	P_{ges} (2 h-Probe), Überwachungswert: 0,4 mg/L Arithm. Monatsmittelwert P_{ges} (24h-Probe) der Eigenkontrolle: 0,2 mg/l
2	4	Einzugsgebiete von Schwarzbach (Ried), Rodau und Urselbach Einzelne Talsperren (Eder-, Diemel- und Kinzig-Talsperre).	16	15	P_{ges} (2 h-Probe)), Überwachungswert: 0,4 mg/l Arithm. Monatsmittelwert P_{ges} (24h-Probe) der Eigenkontrolle: 0,2 mg/l
3	4	Alle übrigen Anlagen der Größenklasse 4, die nicht unter Nr. 2 fallen.	140	111	P_{ges} (2 h-Probe) Überwachungswert: 0,7 mg/l Arithm. Monatsmittel P_{ges} (24h-Probe) der Eigenkontrolle: 0,5 mg/l Grenzwert für ortho-Phosphat-P (24h-Probe): 0,2 mg/l
4	2, 3	-	292	212	P_{ges} (2 h-Probe; qualifizierte Stichprobe), Überwachungswert: 2,0 mg/l Ziel P_{ges} : Jahresmittelwert von 1,0 mg/l der Eigenkontrolle

Im Anhang 6 des aktuell gültigen Maßnahmenprogramms 2015 – 2021 und auch des Entwurfes zur Fortschreibung des Maßnahmenprogramms 2021 – 2027 zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Hessen sind zudem jeweils Listen der kommunalen Kläranlage enthalten, die zusätzliche Anforderungen an die Phosphoremissionen einhalten sollen.

Der Entwurf des Maßnahmenprogramms 2021 – 2027 zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie sieht für einige Kläranlagen gegenüber dem Maßnahmenprogramm 2015 – 2021 weitere erhöhte Anforderungen vor. Insgesamt 157 Kläranlagen im Reg.-Bez. Kassel sollen neue Überwachungswerte für P_{ges} sowie bei den Anlagen der Größenklassen 4 und 5 zusätzlich Anforderungen für P_{ges} -Monatsmittelwerte (auf der Basis der Eigenkontrolle der 24-h-Mischproben) und bei Anlagen der Größenklassen 1, 2 und 3 P_{ges} -Jahresmittelwerte (auf der Basis der Eigenkontrolle mit qualifizierten Stichproben/2 Std.-Mischproben) erhalten (siehe auch Tab. 4-3 und Kap. 5):

- 2 Kläranlagen der GK 5
- 21 Kläranlagen der GK 4
- 15 Kläranlagen der GK 3
- 61 Kläranlagen der GK 2
- 60 Kläranlagen der GK 1

Tab. 4-3: Gegenüberstellung der Anforderungen an die P-Ablaufwerte an kommunale Kläranlagen GK 4 und 5 (aus Maßnahmenprogramm 2015 – 2021, (HMUKLV, 2015), sowie dem Entwurf des Maßnahmenprogramms 2021 – 2027, (HMUKLV, 2020))

Kläranlage	EW	GK	P _{ges} (mg/l) Überwachungswert		P _{ges} (mg/l) Eigenüberwachung (Monatsmittel)	
			MP 2015 - 2021	MP 2021 - 2027 (Entwurf)	MP 2015 - 2021	MP 2021 - 2027 (Entwurf)
allgemeine Regelung		5	0,40		0,20	
Einzugsgebiet Eder- Diemeltalsperre		4/3	0,40		0,20	
allgemeine Regelung		4	0,70		0,50	
Fulda / Gläserzell	150.000	5	0,40	0,30	0,20	0,20
Kassel / Wolfsanger	340.000	5	0,40	0,30	0,20	0,20
Allendorf (Eder) / Haine	13.000	4	0,40	0,30	0,20	0,20
Arolsen	25.000	4	0,70	0,60	0,50	0,40
Bad Hersfeld	56.600	4	0,70	0,50	0,50	0,35
Bad Sooden-Allendorf	15.000	4	0,70	0,60	0,50	0,40
Bad Wildungen / Wega	36.670	4	0,70	0,65	0,50	0,45
Baunatal / Kirchbauna	40.000	4	0,70	0,50	0,50	0,35
Bebra	25.000	4	0,70	0,65	0,50	0,45
Borken / Gombeth	18.000	4	0,70	0,45	0,50	0,30
Edermünde / Grifte	22.000	4	0,70	0,65	0,50	0,45
Eichenzell / Löschenrod	12.000	4	0,70	0,60	0,50	0,40
Eschwege	60.000	4	0,70	0,60	0,50	0,40
Felsberg	18.500	4	0,70	0,65	0,50	0,45
Flieden	17.000	4	0,70	0,65	0,50	0,45
Frankenberg (Eder)	29.000	4	0,40	0,30	0,20	0,20
Fritzlar	28.000	4	0,70	0,65	0,50	0,45
Fulda / Malkes	12.000	4	0,70	0,60	0,50	0,40
Fuldatal / Simmershausen	17.500	4	0,70	0,65	0,50	0,45
Gudensberg / Maden	19.950	4	0,70	0,30	0,50	0,20
Heringen	12.000	4	0,70	0,45	0,50	0,30
Hessisch-Lichtenau	18.500	4	0,70	0,65	0,50	0,45
Hofgeismar	25.000	4	0,70	0,50	0,50	0,35
Homburg (Efze)	19.000	4	0,70	0,60	0,50	0,40
Hünfeld	30.000	4	0,70	0,45	0,50	0,30
Kirchheim	10.100	4	0,70	0,70	0,50	0,50
Liebenau / Lamerden	12.000	4	0,70	0,70	0,50	0,50
Melsungen	30.000	4	0,70	0,50	0,50	0,35
Neuhof	17.000	4	0,70	0,65	0,50	0,45
Neukirchen / Riebelsdorf	13.500	4	0,70	0,70	0,50	0,50
Petersberg	23.000	4	0,70	0,60	0,50	0,40
Rotenburg / Braach	34.000	4	0,70	0,60	0,50	0,40
Schwalmstadt Treysa	22.000	4	0,70	0,50	0,50	0,35
Sontra	15.000	4	0,70	0,70	0,50	0,50
Vöhl / Thalitter	50.000	4	0,40	0,30	0,20	0,20
Volkmarsen	23.000	4	0,70	0,60	0,50	0,40
Wehretal / Reichensachsen	19.000	4	0,70	0,70	0,50	0,50
Willingen / Schwalefeld	17.000	4	0,40	0,30	0,20	0,20
Witzenhausen	13.500	4	0,70	0,60	0,50	0,40
Wolfhagen	22.000	4	0,70	0,50	0,50	0,35
Summe	1.380.820					

4.3 Schlammstabilisierung, simultan aerob oder anaerob (Faulung)

Von den insgesamt 297 Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel sind lt. FIS-HAA 32 Kläranlagen mit einer anaeroben Schlammbehandlung (Faulung) ausgerüstet (siehe Tab. 4-4). Das FIS-HAA gibt leider keine Auskunft über die Größe der jeweiligen Faulbehälter aus; diese Daten wurden aus den Fragebögen entnommen. Allerdings wurden nicht für alle Faulbehälter die Größen angegeben.

Untersuchungen an Faulbehältern im Regierungsbezirk Gießen hatten bereits ergeben, dass dort alle Faulbehälter erhebliche Reserven haben, berücksichtigt man die rechnerische organische Feststoff-Raubelastung. Dieser Wert wurde zwar im Fragebogen abgefragt, nur gab es sehr wenige Rückmeldungen.

Um dennoch Aussagen über mögliche Reserven zur Aufnahme externer Schlämme von anderen Kläranlagen treffen zu können, wurde die organische Feststoffraumbelastung $B_{R,oTM}$ (kg oTM/ $m^3 \cdot d$) rechnerisch abgeschätzt. Hierfür wurde zwei Berechnungsansätze verfolgt:

Berechnung 1 über die Angaben der entsorgten TM-Menge sowie des oTM-Gehaltes des entsorgten Schlammes (siehe Klärschlammanalysen)

- Aus den Fragebögen sowie den zur Verfügung gestellten Schlammanalysen werden die entsorgten Schlammengen (TM-Mengen) sowie die oTM-Anteile verwendet, um die entsorgte oTM-Menge pro Jahr zu ermitteln
- Aus den Angaben der Jahre 2017 bis 2019 werden Mittelwerte gebildet.
- Detaillierte Angaben zu den Input-oTM-Frachten in die Faulungsanlagen sind in den Fragebögen nicht abgefragt worden und müssten in jeden einzelnen Fall aus den Betriebsdaten der Kläranlagen ausgewertet werden. Dies war im Rahmen dieser Studie nicht vorgesehen.
- Unter der Annahme, dass in den Faulungsanlagen ca. 50 % der oTM-Fracht abgebaut wird, wird in dieser Studie die jeweilige Input-oTM-Fracht in die Faulungsanlagen durch Multiplikation der entsorgten oTM-Menge mit dem Faktor 2 ermittelt.
- Eine mittlere oTM-Raubelastung $B_{R,oTM}$ der Faulbehälter wird ermittelt zu

$$B_{R,oTR} = \frac{\text{entsorgte oTM - Fracht [kg oTM/a]} * 2}{(V_{\text{Faulbehälter}} [m^3] * 365 [d/a])}$$

- Bei einer Raumbelastung von $B_{R,oTM} < 2$ kg oTM/ $[m^3 \cdot d]$ ist davon auszugehen, dass der Faulbehälter noch Reserven zur Aufnahme externer Schlämme oder Co-Substrate aufweist.
- Die so ermittelte mittlere Raumbelastung weist naturgemäß aufgrund der o.g. Annahmen erhebliche Unsicherheiten auf, so dass die Berechnung für jede Anlage aufgrund der Betriebstagebücher überprüft werden muss.

Berechnung 2 über die Angaben der Angaben der angeschlossenen Einwohnerwerte sowie der spezifischen Schlammengen gemäß DWA-Merkblatt M 368

- Anhand der in den Fragebögen angegebenen Anschlusswerte (angeschlossene EW) wird unter Annahme der spezifischen Schlammengen gemäß DWA-Merkblatt M 368 „Biologische Stabilisierung von Klärschlamm“, Tab. 6, S. 25 u. 26, für Primär- und Überschussschlamm (Ansatz der 50-Percentile) die jeweiligen Schlammengen ermittelt.
- Als Grunddaten werden angenommen:
 - Aufenthaltszeit in der Vorklärung: $t_{VK} = 1,0 \text{ h}$
 - Belebungsanlage mit N-Elimination, $t_{VK} = 1,0 \text{ h}$, $t_{TS, Bem.} = 10 \text{ d}$, $T = 15 \text{ °C}$
 - Ansatz der 50-Percentil-Werte
- Daraus ergeben sich folgende spezifische Ansätze:

Primärschlamm:	28,0 g TM/(E*d) mit GV = 75 %	entspr. 21,0 g oTM/(E*d)
Überschussschlamm:	32,9 g TM/(E*d) mit GV = 72 %	entspr. 23,7 g oTM/(E*d)
Summe	60,9 g TM/(E*d) mit GV = 73,4 %	entspr. 44,7 g oTM/(E*d)

Als Orientierungswert für eine im Regelbetrieb nicht zu überschreitende organische Feststoffraumbelastung kann ein Wert von $B_{R, oTM} = 2,0 \text{ kg oTM}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ angenommen werden.

Die Ergebnisse der Berechnungen der organischen Feststoffraumbelastung zeigen, dass bis auf den Faulbehälter der Kläranlage Witzenhausen, bei dem ein Wert von $B_{R, oTM} = 2,2 \text{ kg oTM}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ errechnet wurde, für alle Faulbehälter zum Teil erheblich geringere Raumbelastungen ermittelt wurden. Das bedeutet, dass jeweils Reserven zur anaeroben Behandlung von externen Schlämmen oder auch Co-Substraten vorhanden sind.

Diese überschlägigen Berechnungen müssen für jeden Einzelfall / jede Kläranlage nach Auswertung der Betriebstagebücher überprüft werden.. Neben der organischen Feststoffraumbelastung $B_{R, oTM}$ ist zudem die rechnerische Aufenthaltszeit im Faulbehälter zu überprüfen.

Diese Reserven könnten jeweils genutzt werden, um Schlämme aus umliegenden meist kleineren Kläranlagen anzunehmen und in den Faulbehältern anaerob zu behandeln. Das dabei entstehende zusätzliche Faulgas kann zur erhöhten Eigenstromversorgung dieser Kläranlage genutzt werden.

Die anliefernden Kläranlagen können den Betrieb von einer simultan aeroben Stabilisierung mit entsprechend langem Schlammalter von $t_{TS} > 25$ Tage auf kürzere Schlammalter umstellen, und so den Strombedarf für die Belüftung deutlich reduzieren.

So können sich Klärschlamm-Verwertungsverbände bilden, in denen dann auch eine Phosphor-Rückgewinnung aus dem Klärschlamm realisiert werden könnte (siehe Szenario 2, Kap. 9.2.2).

Als Beispiel kann der Klärschlammverbund um die Stadtwerke Schlitz genannt werden, an dem sich auch verschiedene Kommunen aus dem Regierungsbezirk Kassel beteiligen (siehe Abb. 4-1 und Abb. 4-2).

Tab. 4-4: Kläranlagen mit Faulbehältern (anaerobe Schlammstabilisierung) im Regierungsbezirk Kassel, Rechnerische Raumbelastung

Kläranlage	Größe		P-Elimination		Faulbehälter		Raumbelastung $B_{R,OTR}$		
	Ausbau	Anschluss	Bio-P	Fällmittel	Anzahl	Volumen	Berechnung	Berechnung	
	[EW]	(lt. Frageb.) [EW]				[m ³]	1	2	
	[kg oTR/(m ³ *d)]								
Arolsen	25.000	21.600	nein	Fe	1	750	0,59	1,29	
Bad Hersfeld	56.600	70.000	nein	Fe	2	3.000	0,47	1,04	
Bad Sooden-Allendorf	15.000	10.500	nein	Al/Fe	1	außer Betr.			
Bad Wildungen / Wegg	36.670	26.289	ja	Fe	1	1.500	0,45	0,86	
Baunatal / Kirchbauna	40.000	38.000	ja	Al/Fe	1	1.700	0,90	1,05	
Bebra	25.000	31.248	nein	Al	2	2.340	0,43	0,60	
Edermünde / Grifte	22.000	k.A.	k.A.	k.A.	1	k.A.			
Eschwege / Niederhor	60.000	30.000	nein	k.A.	1	2.200	0,74	0,65	
Felsberg	18.500	23.000	nein	Al/Fe	1	1.130	0,15	0,93	
Frankenberg (Eder)	29.000	29.414	ja	k.A.	2	1.500	0,41	0,88	
Fritzlar	28.000	13.000	nein	Al/Fe	1	1.100	0,51	0,53	
Fulda / Gläserzell	150.000	150.000	nein	Fe	2	8.000	0,70	1,03	
Fuldabrück / Dennhaus	9.800	9.800	nein	Fe	1	700	0,47	0,63	
Fuldatal / Simmershau	17.500	15.328	nein	Fe	1	k.A.			
Hessisch Lichtenau / Fürstenhagen	18.500	14.850	k.A.	k.A.	1	1.500	0,38	0,46	
Hofgeismar	25.000	k.A.	k.A.	k.A.	1	k.A.			
Homburg (Efze)	19.000	11.165	nein	Al/Fe	1	1.000	0,64	0,57	
Hünfeld	30.000	k.A.	k.A.	k.A.	1	k.A.			
Immenhausen	7.000	5.316	ja	Fe	1	k.A.			
Kassel / Wolfsanger	340.000	340.000	x	k.A.	3	22.500	0,63	0,68	
Liebenau / Lamerden	12.000	20.000	nein	Al/Fe	1	500	0,67	1,79	
Melsungen	30.000	k.A.	k.A.	k.A.	1	k.A.			
Neuhof	17.000	13.500	nein	Fe	1	1.300	0,38	0,64	
Oberweser / Gieselwe	5.000	k.A.	k.A.	k.A.	1	k.A.			
Rotenburg a. d. Fulda	34.000	34.000	k.A.	k.A.	1	2.000	0,49	0,77	
Schauenburg / Breiten	4.900	3.700	k.A.	k.A.	1	k.A.			
Schwalmstadt / Treysa	22.000	21.500	nein	Fe	1	1.200	0,86	0,94	
Sontra	15.000	8.000	nein	Al/Fe	1	750	0,37	0,55	
Vöhl / Thalitter	50.000	46.500	nein	k.A.	1	2.400	0,12	0,87	
Volkmarsen	23.000	27.917	nein	k.A.	1	1.200	0,22	1,04	
Witzenhausen	13.500	13.500	nein	Al/Fe	1	500	2,26	2,21	
Wolfhagen	22.000	19.000	nein	Al/Fe	1	510	1,09	1,84	

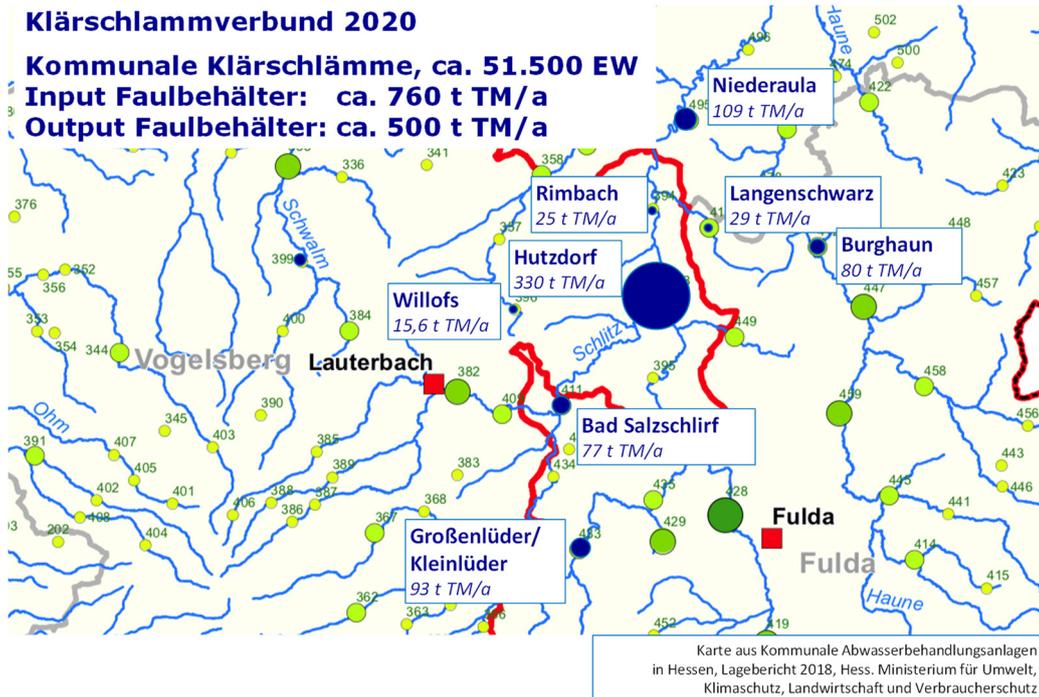


Abb. 4-1: Beispiel für einen regionalen Klärschlammverbund, Übersicht über die Klärschlämme der Kläranlagen des Klärschlammverbundes Schlitz ab 2020, die über die Faulung der Kläranlage Schlitz angenommen werden (als t TM/a)

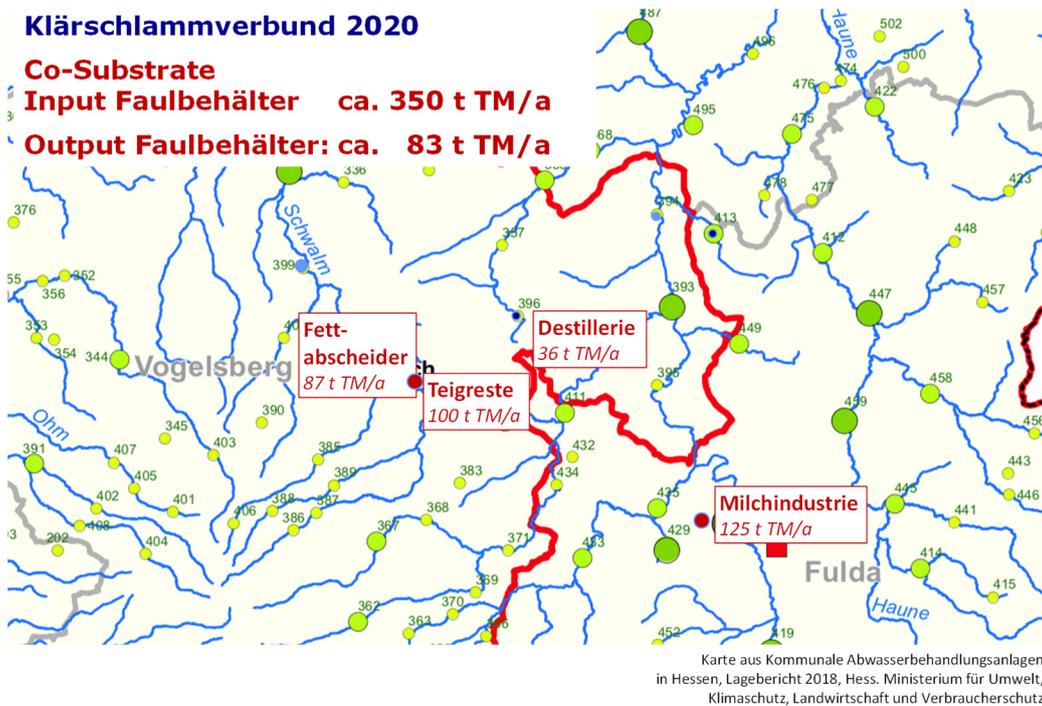


Abb. 4-2: Beispiel für einen regionalen Klärschlammverbund, Übersicht über die im Klärschlammverbund Schlitz angenommenen sowie in der Faulung behandelten Co-Substrate ab 2020 (als t TM/a)

5 Auswirkungen des Maßnahmenprogramms zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie

Ziel des Schwerpunktes Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm der Ressourcenschutzstrategie Hessen des HMUKLV ist die weitgehende Rückgewinnung und Bereitstellung des im Klärschlamm gebundenen Phosphors. Um das Gesamt-Potential des im Abwasser enthaltenen Phosphors nutzen zu können, muss zunächst die Phosphor-Elimination aus dem Abwasser optimiert werden. Hier wird im Hessischen Maßnahmenprogramm 2015 – 2021 zur Reduzierung der Phosphorkonzentration in Gewässern zur Erreichung eines guten ökologischen Zustandes der Gewässer für einige Kläranlagen vorgesehen, dass die „Umsetzung von notwendigen und sicher wirksamen Maßnahmen zur weiteren Verbesserung der Elimination von Phosphor ...“ erfolgt.

Wie in Kap. 4.2 bereits erläutert, sieht der Entwurf des Maßnahmenprogramms 2021 – 2027 (HMUKLV, 2020) für insgesamt 157 Kläranlagen weitere erhöhte Anforderungen an die P_{ges} -Ablaufkonzentrationen sowohl der Überwachungswerte als auch der Monats- bzw. Jahresmittelwerte (gem. Eigenüberwachung) vor. Dieser Entwurf wurde am 22.12.2020 veröffentlicht und befindet sich zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Studie noch im Beteiligungsfahren.

Eine überschlägige Ermittlung der erhöhten Anforderungen des neuen Entwurfs des Maßnahmenprogramms 2021 – 2027 gegenüber dem Maßnahmenprogramm 2015 – 2021 (MP 2015 – 2021) hat für die insgesamt 37 Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 (Ausbaugrößen Summe ca. 1,33 Mio. EW) folgende Reduzierung der P-Emissionen in die Gewässer ergeben:

P_{ges} -Ablauffracht in die Gewässer aus den Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5:

- MP 2015 – 2021: ca. 37.000 kg P / a
- Entwurf MP 2021 – 2027: ca. 31.000 kg P / a
- Reduzierung ca. 6.000 kg P / a entspr. ca. 16 %

Die Berechnung erfolgte überschlägig unter Ansatz einer spezifischen Abwassermenge (Schmutzwasser und Fremdwasser) von 200 l/(EW*d) sowie der gemäß Maßnahmenprogramm für jede Kläranlage zu erreichenden Monatsmittelwerte der Eigenkontrolle (24-h-Monatsmittelwerte bzw. Jahresmittelwerte) (siehe Tab. 4-3). Eine genaue Errechnung könnte unter Heranziehung der Betriebstagebücher erfolgen.

Für insgesamt 120 der 260 Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 3 wurden in dem Entwurf des Maßnahmenprogramms 2021 – 2027 ebenfalls erhöhte Anforderungen an die P_{ges} -Ablaufwerte gestellt.

Eine entsprechende Auswertung für alle Kläranlagen im Bereich des Regierungsbezirks Kassel wurde nicht durchgeführt. Eine erste Abschätzung kann anhand der Gesamt-Ausbaugröße aller 297 Kläranlagen von insgesamt 1,98 Mio. EW erfolgen. Unter Ansatz einer vergleichbaren Reduzierung der P_{ges} -Ablauffrachten von 16 % auch für Größenklassen 1 bis 3 ergäbe sich eine Reduzierung der Gesamt- P_{ges} -Ablauffracht aus den Kläranlagen im Regierungsbezirk Kassel von ca. 8.900 kg P/a. Diese P-Fracht würde dann im Klärschlamm entnommen werden und stünde der Phosphor-Rückgewinnung bzw. der bodenbezogenen Verwertung zusätzlich zur Verfügung.

Damit ergäbe sich eine Erhöhung des P-Potentials um 1,6 % auf ca. 554 t P/a.

6 Stand der Technik und Wissenschaft des Phosphor-Recyclings, Vorbehandlung, Vor- und Nachteile

6.1 Übersicht und Grundsätze der Bewertung verschiedener P-Rückgewinnungsverfahren

6.1.1 Übersicht

Neben der Zusammenfassung durch Kabbe und Rinck-Pfieffer (2019) wurde der Stand der Entwicklungen bei Phosphorrückgewinnungsverfahren in adäquater Weise auch durch die Deutsche Phosphor Plattform dokumentiert und ist als Sammlung von Verfahrenskennblättern über eine Web-Anwendung abrufbar (DPP Deutsche Phosphor Plattform, 2018). Die dort dokumentierte Bewertung wurde durch die umfangreichen Literaturkenntnis und persönlichen Kontakte der Bearbeiter zu ausgewählten Verfahrensanbietern ergänzt.

Die Ansätze zur Phosphorrückgewinnung jenseits der direkten bodenbezogenen Verwertung lassen sich grob in zwei Verfahrensgruppen einteilen, innerhalb derer unterschiedliche Verfahrensfamilien anzusiedeln sind (vgl. nachstehende Abbildung). Erstere unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ansatzpunkte, die entweder in den Prozess der Abwasserbehandlung integriert sind und im Wesentlichen am Schlamm(wasser) ansetzen (blau dargestellt) bzw. die in eine nachgelagerte thermische Behandlung integriert werden (orange dargestellt).

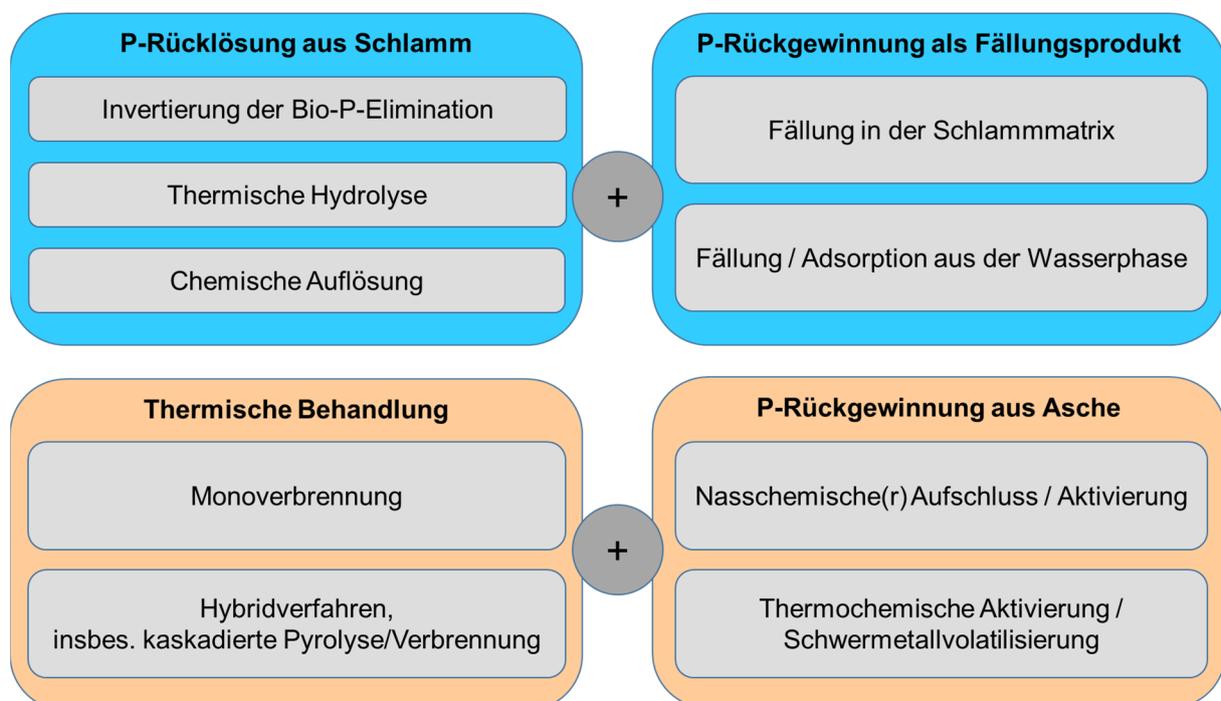


Abb. 6-1: Verfahrensgruppen und -familien zur P-Rückgewinnung jenseits der direkten bodenbezogenen Verwertung (in Anlehnung an Kabbe und Rinck-Pfieffer, 2019)

Jede Verfahrensgruppe umfasst je zwei Prozessschritte, die gegebenenfalls verschiedenartig miteinander kombiniert werden können.

Prozessschritte der schlamm-/schlammwasserbasierte Verfahrensgruppe:

Erster Prozessschritt ist hier die Rücklösung des in der Schlammmatrix festgelegten Phosphors in die wässrige Phase. Dies kann durch Invertierung des Prozesses der biologischen P-Elimination unter anoxischen Bedingungen vor der Faulung erfolgen (z.B. *CalPrex*-Verfahren), durch thermische Hydrolyse (z.B. *CAMBI*-, *LysoTherm*-Verfahren) oder durch chemische Auflösung (z.B. *Stuttgarter* Verfahren).

Zweiter Prozessschritt ist die Fällung des rückgelösten Phosphors. Diese kann z.B. in Form von Struvit innerhalb der ausgefaulten Schlammmatrix vor der Entwässerung erfolgen (z.B. *AirPrex*-Verfahren), wodurch die Entwässerbarkeit des Schlamm deutlich verbessert werden kann. Alternativ kann die Fällung des P-Rezyklats auch nach der Entwässerung erfolgen (z.B. *Pearl*-, *STRU-VIA*, *CalPrex*-Verfahren).

Insofern als die entsprechenden Verfahren innerhalb der Kläranlage umgesetzt werden, erfolgt das P-Recycling innerhalb des Wasserrechts. Dies ist insoweit von Bedeutung als bei einer Unterschreitung des Schwellenwerts von 20 g P/kg TM die abgereicherten Klärschlämme nicht der Phosphorrückgewinnungsverpflichtung unterliegen.

Prozessschritte der Verfahrensgruppe zur nachgelagerten Behandlung:

Erster Prozessschritt der nachgelagerten Behandlungsverfahren ist die thermische Umsetzung des entwässerten bzw. getrockneten Klärschlamm. Verbrennungsverfahren beruhen in Deutschland weitestgehend auf der Wirbelschichttechnologie. Bei der Verbrennung wird der Klärschlamm mineralisiert, organische Inhaltsstoffe zerstört sowie der Phosphor und weitere nichtflüchtige Elemente entsprechend in der Asche aufkonzentriert. Die in der Abbildung dargestellten Hybridverfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung (z.B. *EuPhoRe*[®] Drehrohr-Verfahren, *Werkstätten Heating Systems*) verfolgen einen Ansatz der kaskadierten Pyrolyse und Verbrennung. Anders als bei der Pyrolyse (PYREC) oder der hydrothermalen Carbonisierung wird in der Verbrennungsstufe der Hybridverfahren die Organik ebenfalls vollständig eliminiert.

Zweiter Prozessschritt ist die Aufbereitung der Asche – sofern diese nicht wie im *EuPhoRe*[®]-Verfahren infolge einer Additivzugabe in den Mineralisationsprozess bereits düngemittelgängig ist. Wird nicht der Klärschlamm, selber sondern die Asche zusammen mit Chlordonatoren erhitzt so erfolgt die Volatilisierung in einem separaten Prozess (*AshDec*-Verfahren). Die übrigen Ascheaufbereitungsverfahren beruhen im Wesentlichen auf deren nasschemischem Aufschluss, bei dem entweder Phosphorsäure, Superphosphat oder Tripel-Superphosphat das Endprodukt darstellen.

Insofern als die entsprechenden Verfahren außerhalb des Abwasserreinigungsprozesses umgesetzt werden, erfolgt das P-Recycling innerhalb des Abfallrechtes.

6.1.2 Grundsätze zur Bewertung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung

Prämisse eines P-Recyclings in NOH ist die weitest gehende Ausschöpfung des P-Potenzials ohne eine Vorfestlegung auf eine der o.g. Verfahrensgruppen. Trotz der bei Verfahren zur P-Rückgewinnung aus dem Schlamm direkt bzw. dem Schlammwasser limitierten Rückgewinnungsrate von maximal 50 % (eher 20 – 40 %) wurden diese in die Machbarkeitsstudie (und in die betrachteten Szenarien) einbezogen. Diese Vorgehensweise entspricht einerseits der Auftragspezifikation und berücksichtigt andererseits auch Besonderheiten des dabei geltenden rechtlichen Rahmens.

Grundsätzlich sind aschebasierte Verfahren im Vergleich zur P-Rückgewinnung aus dem Abwasser oder aus Abwasserströmen (z.B. dem Schlammwasser bzw. Filtrat der Schlammentwässerung) eine deutlich höhere Rückgewinnungsquote aufweisen. Für das Ziel einer weitestgehenden Phosphorrückgewinnung wäre den Verfahren mit thermischer Verwertung der regionalen Klärschlämme und nachgeschalteter Aufbereitung der Asche der Vorzug zu geben. Diese haben auch den Vorteil, dass infolge der vorgelagerten Mineralisierung der Phosphor gegenüber dem Abwasser bzw. dem Klärschlamm aufkonzentriert wird und dass die organische Schadstofffracht keine Rolle mehr spielt.

Weiterhin ist zu beachten, dass nach der aktuell gültigen Düngemittelverordnung (DüMV, 2019), Anlage 2, Tabelle 6, Nr. 6.2.3 Phosphatdünger aus der Verbrennung von Klärschlämmen als „Besonderer Ausgangsstoff für bestimmte mineralische Düngemittel“ nach Anlage 1 der DüMV, Pkt. 1.2.9 Vorgaben für Phosphatdünger: Phosphatdünger aus Aschen von Klärschlämmen eingesetzt werden kann. Dafür muss die Asche einen Mindest-Phosphat-Gehalt von 10 % P_2O_5 haben.

Die im Zuge dieser Machbarkeitsstudie rechnerisch ermittelten „virtuelle“ Asche erfüllt auf Ebene der meisten Landkreise wie auch für die Gesamtregion NOH dieses Kriterium. Insofern als die Aschen auch die Höchst- und Grenzwerte der Düngemittelverordnung einhalten, könnten sie bei entsprechender Pflanzenverfügbarkeit direkt als Düngemittel bzw. als besonderer Ausgangsstoff für mineralische Düngemittel eingesetzt werden.

Die Verfahren werden theoretisch anhand von Literaturdaten sowie Informationen der Anbieter und Anwender betrachtet. Die Bewertung der Verfahren ist unter diesen Rahmenbedingungen ergebnisoffen und berücksichtigt unter anderem die folgenden Aspekte:

- Phosphor-Rückgewinnungspotentiale
- technische Aspekte wie Betriebserfahrungen und -risiken, Betriebsaufwand, vor allem auch vor dem Hintergrund des Betriebs einer kleinen Anlage im ländlichen Raum
- Etwaige Auswirkungen der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung auf den Kläranlagenbetrieb
- Wirtschaftlichkeit der Verfahren, hierfür Einholung von Richtpreisangeboten, Investitionen und Betriebskosten, Jahreskosten sowie spezifische Kosten €/t Klärschlamminput

6.2 Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser-(teil)strömen (z.B. Zentrat) und/oder Klärschlamm

Die Erfordernisse der Klärschlammvorbehandlung richten sich sehr anlagenspezifisch nach der Frage, ob eine P-Rückgewinnung dem Grundsatz nach erforderlich ist, welche Technik hierzu eingesetzt wird und ob es sich um eine dezentralen oder einen semidezentralen Ansatz handelt.

Die rechtlich verankerte P-Rückgewinnung sowie die zu realisierende Rückgewinnungsquote richtet sich wiederum nach einem Satz sehr unterschiedlicher Kriterien. Diese umfassen

- die Einwohnerwerte der jeweiligen Anlage und
- die P-Gehalte im Klärschlamm

als Kriterien dafür, ob die bodenbezogene Verwertung weiterhin möglich ist, bzw. ob die P-Rückgewinnung geboten ist. Ist letzteres der Fall, so ist hinsichtlich der Ansatzpunkte der P-Rückgewinnung zu unterscheiden ob diese am

- Abwasser bzw. Schlamm ansetzt und eine Rückgewinnungsquote von 50% oder mehr zu erfüllen ist bzw. < 2 % P erreicht wird, oder ob sie
- an der Asche aus der Monoverbrennung des Klärschlammes ansetzt und eine Rückgewinnungsquote von 80% oder einschlägig ist.

Die Bearbeitung des Arbeitspaketes erfolgt entsprechend in einer hierarchisch strukturierten iterativen Form, bei der eine Rückgewinnung aus den Aschen der Monoverbrennung als diejenige Variante angesehen wird, die die umfangreichste Vorbehandlung v.a. im Sinne einer zentralen/dezentralen Trocknung sowie Mischung von Klärschlämmen unterschiedlicher Herkunft zur Gewährleistung homogener Inputeigenschaften (P-Gehalte, Metalle, Heizwerte) erfordert.

Ausgehend von den Basisdaten zu Klärschlammqualität und Quantität sowie von den aus FIS-HAA erhaltenen und im Rahmen der Anlagensteckbriefe abgefragten Daten werden zunächst diejenigen Anlagen ausgeschieden, die keine rechtliche Verpflichtung zu P-Rückgewinnung haben. Als eine Untermenge werden Anlagen geführt, die im Rahmen der Fragebögen Interesse an der Beteiligung an einer Verbundlösung bekundet haben, obwohl eine Verpflichtung zur P-Rückgewinnung nicht besteht. Die Erfahrungen aus der Machbarkeitsstudie für Mittelhessen haben deutlich gemacht, dass dies mit Blick auf die rückläufigen Kapazitäten bei der bodenbezogenen Verwertung bei einer relevanten Anzahl von Kläranlagen der Fall sein kann.

Aus den verbleibenden Anlagen wurden anhand der erfolgten Typisierung diejenigen ausgeschieden, für die mit vergleichsweise geringem Aufwand eine Rückgewinnung aus dem Wasserpfad bzw. dem Schlamm unter Berücksichtigung der geforderten Quote machbar erscheint. Diese Vorgehensweise berücksichtigt, dass eine P-Rückgewinnung aus dem Abwasser bzw. Schlamm (i) sehr gut für dezentrale Lösungen geeignet ist und (ii) für die Kläranlagenbetreiber die maximale Flexibilität bez. der weiteren Schlammentsorgung bedeutet. So wäre z.B. eine Co-Verbrennung des abgereicherten Schlammes dann auch weiterhin möglich.

Aus dem hierarchischen Ansatz folgt, dass für die verbleibende Anlagenzahl nur eine P-Rückgewinnung aus der Asche nach Monoverbrennung des Klärschlammes in Frage kommt. Für diese Untermenge werden die folgenden Teilaufgaben bearbeitet:

- Recherche existenter zentraler und dezentraler Standorte für Trocknungsanlagen inkl. Bewertung hinsichtlich der Verfügbarkeit von „Abfall“-Wärme, Größe, Erreichbarkeit, Kosten, Infrastruktur, Entfernung zu anschließender Phosphorrückgewinnung (Standortfindung war nicht Bestandteil des Angebots)
- Abschätzung der für die Trocknung erforderlichen sowie an den jeweiligen Standorten zur Verfügung stehenden Wärmemengen in Hinblick auf den zu erreichenden Trockenrückstand des zu verbrennenden Klärschlammes
- Einholung von belastbaren Richtpreisangeboten für Anlagen zur Klärschlamm-trocknung (vorzugsweise Bandtrocknung und Solar-unterstützte Trocknung)
- Bewertung der Rückbelastung der Abwässer aus den Trocknungsanlagen bei den verschiedenen Trocknungstechnologien (Abwassermengen, -zusammensetzung)
- Ausarbeitung von Massenstrom-Diagrammen sowie Aufstellungsvorschlägen
- Erarbeitung eines Realisierungsvorschlags (Szenarienbetrachtung)

6.2.1 MAP-Fällung (Struvit) aus Schlammwasser / Zentrat

Wie andere Ansätze der in die Abwasserreinigung integrierten Verfahrensgruppe bedarf die MAP-Fällung einer Schlammdesintegration. Diese kann wie beim LysoTherm[®]-Verfahren der Fa. Eliquo Stulz thermisch erfolgen, wobei eine Aufheizung auf ca. 155 °C beispielsweise über ein BHKW vollzogen werden kann. Vorteile dabei ist eine Verbesserung der biologischen Verfügbarkeit / anaerobe Abbaubarkeit und damit einhergehend eine Erhöhung der Faulgasproduktion und eine Reduzierung der zu entsorgenden Klärschlammmenge (TM-Reduktion).

Dies führt zu

- Einer Erhöhung der Rücklösung an organischen Schlamminhaltsstoffen sowie an Stickstoffverbindungen
- Einer Erhöhung des gelösten Phosphats, damit eine Erhöhung des fällbaren Phosphats z.B. als MAP,

Beispiel

- großtechnischer Betrieb Kläranlage Lingen: Thermische Hydrolyse + gezielte MAP-Fällung im Schlamm + Vakuum-Entgasung (Hüer, 2020)
 - TM-Gehalt im Faulschlamm (nach Faulung) 25,4 g TM/l = 2,54 %
ca. 12 g oTM/l
 - Gesamt-P im Faulschlamm (nach Faulung): 940 mg/l (37 g P / kg TM, 3,7 %)
 - Lösliches Phosphat PO₄-P ohne Desintegration: 230 mg/l
 - Lösliches Phosphat PO₄-P mit Desintegration: 330 mg/l
 - Lösliches Phosphat PO₄-P nach MAP-Fällung und Vakuum-Entgasung: 65 mg/l

- Keine Abtrennung der MAP-Kristalle aus dem Schlamm-Gemisch
- Steigerung der Faulgasproduktion von 530 auf 620 m³ / kg oTM_{zu}
- Reduzierung der TM-Masse durch erhöhten oTM-Abbau um ca. 11 %
- Dadurch Erhöhung der P-Konzentration im Schlamm auf ca. 41 g P / kg TM (4,1 %)
- Steigerung der Entwässerbarkeit von 23 % TM auf 29 % TM

Problematisch erscheint die erforderliche Abtrennung des Schlammwassers, um dann im Zentrat das gelöste Phosphat über MAP-Fällung binden zu können. Der hydrolysierte Schlamm ist aber nur sehr schwer entwässerbar, so dass ein feststoffarmes Zentrat kaum zu erreichen ist. Wenn es gelänge, das Zentrat aus dem Schlamm abzutrennen und anschließend zu 100 % als MAP auszufällen, würde sich der P-Gehalt im Schlamm

von 940 mg P/l, 25,4 g TM/l entspr. 37 g P / kg TM (3,7 % P)

auf 675 mg P/l, 22,6 g TM/l entspr. 30 g P / kg TM (3,0 % P)

erhöhen.

Ergebnisse von Versuchen mit der Thermo-Druck-Hydrolyse führten zu einer deutlichen Verringerung des TM-Gehaltes und auch der P-Fracht im Schlamm, aber – aufgrund des Faktors TM im Nenner - zu einer Erhöhung der spezifischen P-Gehaltes in der Schlamm-Trockensubstanz (Einheit g P / kg TM). Beispiel von 3,5 % P in der TM Erhöhung auf 4,2 % P

Ein Anbieter der Verfahrenskombination aus thermischer Hydrolyse, MAP-Fällung und Vakuummentgasung, Fa. Eliquo Stulz GmbH, bietet dieses Verfahren nicht mehr als ein Verfahren zur P-Rückgewinnung an, sondern ausschließlich zur Erhöhung der Faulgasausbeute, damit Verbesserung des Klimaschutzes, sowie zur Verbesserung der Entwässerungseigenschaft und damit zur Reduzierung der zu entsorgenden Klärschlammengen an (Knörle, 2021, SELLERING, 2021).

Das Ziel, einen Schlamm mit einem P-Gehalt von < 2 % P (20 g P / kg TM) zu produzieren, ist nach Angabe von Knörle, (2021) und SELLERING (2021) mit diesem Verfahren nicht zu erreichen.

Mit dem AirPrex®-Verfahren (vgl. nachstehende Abbildung) lassen sich die o.g. negativen Auswirkungen weitgehend vermindern. Der ausgefaulte Schlamm wird nach dem Faulbehälter in den AirPrex®-Reaktor geführt und dort einer Luftstrippung unterzogen. Durch das Ausgasen von CO₂ steigt der pH-Wert des Schlammes deutlich an. Gleichzeitig führt die Zugabe einer geeigneten Magnesiumquelle zur kontrollierten Bildung und Ausfällung von Magnesium-Ammonium-Phosphat (Struvit). Die Kristalle integrieren sich homogen in die Schlammmatrix oder werden als Struvit-Kristalle ausgeschleust. Struvit ist sehr gut pflanzenverfügbar und kann als nachhaltiger Langzeitdünger verwendet werden.

Das AirPrex® Macro-Verfahren basiert neben der verbesserten Rückgewinnung von Struvit auf einer vermehrten Rücklösung des Phosphats aus dem Schlamm durch einen zweiten anaeroben Reaktor. Dort erfolgt weiteres Kristallwachstum sowie Rückgewinnung von Mikrokristallen.

Folgende Vorteile werden erwartet:

- Verringerte Entsorgungskosten durch um bis zu 4%-ige Erhöhung der TM im entwässerten Schlamm
- Geringere ortho-Phosphat-Rückbelastung (um bis zu 95 %)
- Geringere Betriebskosten durch Reduktion von Ablagerungen in Leitungen und bei der Entwässerung
- Verbesserte Rücklösung von ortho-Phosphat
- Erzeugung von Struvit-Makrokristallen
- Höhere Rückgewinnungsraten (bis 50% des gebildeten Struvits) ggf. bis zur Erreichung von $P < 20 \text{ g/kg TM}$ (2 %) (gilt nur für P-Gehalte im Ausgangs-Schlamm bis 30 g / kg TM).

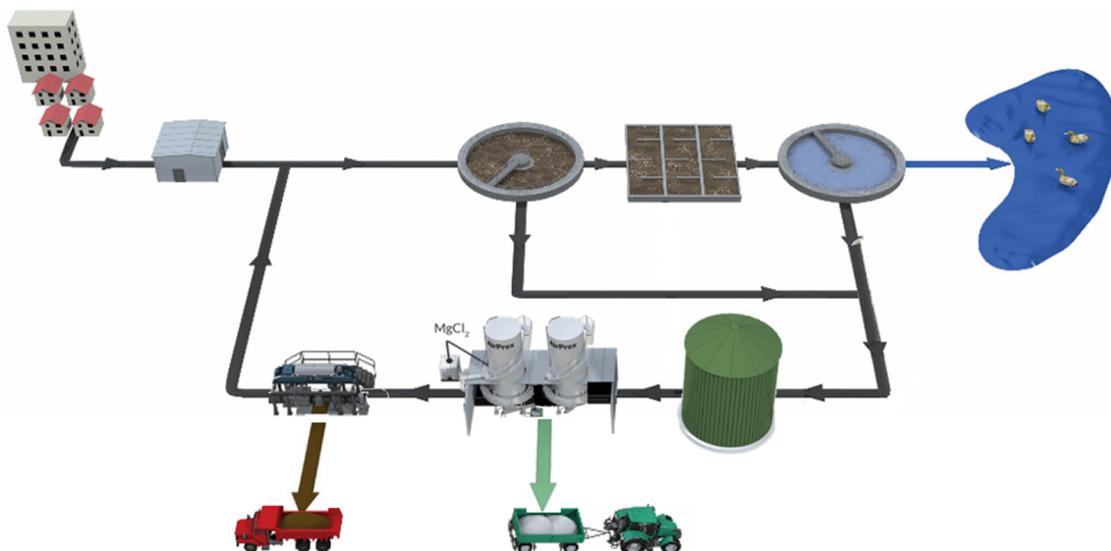
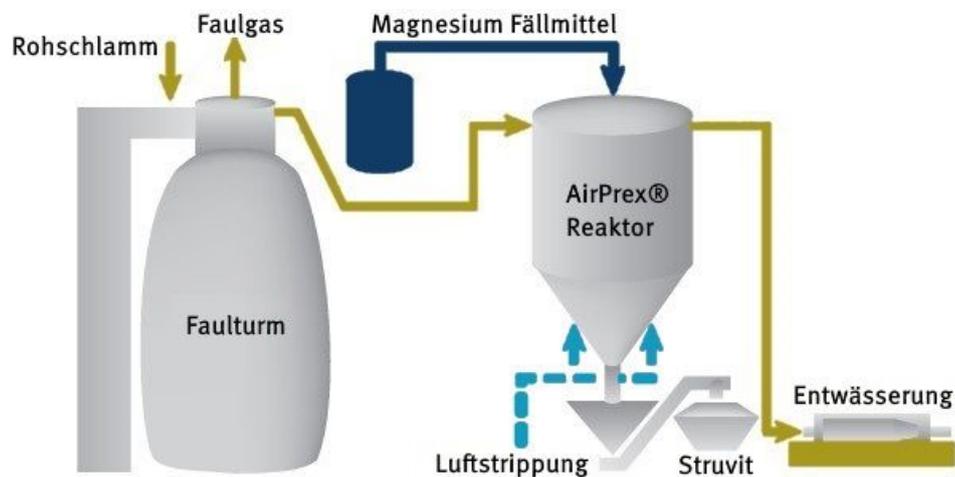


Abb. 6-2: Verfahrensbild AirPrex-Verfahrens (<http://www.cnp-cycles.de/verfahren/airprex>, aufgerufen 15.01.2021)

6.2.2 Brushit-Fällung aus Schlammwasser / Zentrat

Ein zum Struvit alternatives P-Rückgewinnungsprodukt kann in Form von Brushit ($\text{Ca}[\text{PO}_3(\text{OH})] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, = Calciumhydrogenphosphat dihydrat) aus Schlammwasser bzw. Zentrat gewonnen werden. Neuere Entwicklungen führen in Richtung der Reaktionsführung im homogenen Wirbelbett-Kristallisationsreaktor, der ohne Zugabe von Kristallisationskeimen auskommt und zu sehr hohen Produktreinheiten führt (Caddarao et al., 2018).

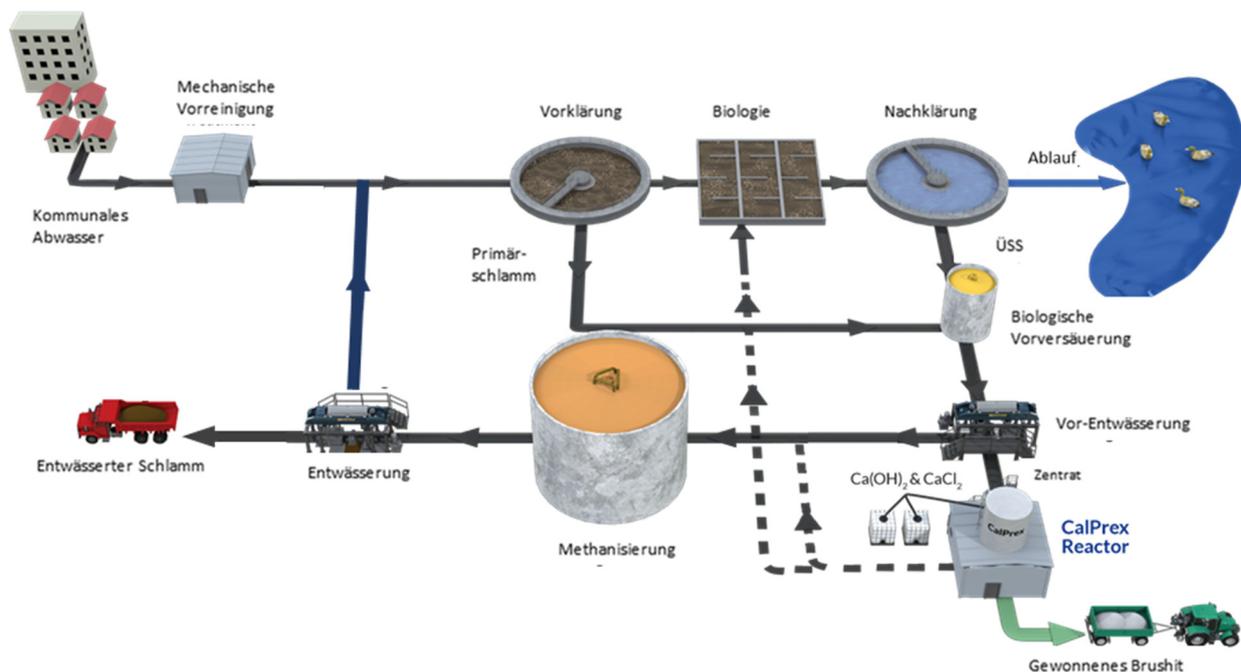


Abb. 6-3: Verfahrensbild CalPrex®-Verfahren (<http://www.cnp-cycles.de/verfahren/calprex>, aufgerufen 15.01.2021)

Kommerziell angeboten wird das sog. CalPrex®-Verfahren. In dem Verfahren wird eine weitestgehende Rücklösung des durch Bio-P gebundenen Polyphosphats im Rahmen einer mesophilen anaeroben Vorversäuerung vor der Faulung realisiert. Der vorversäuerte Schlamm wird entwässert, so dass sich der Großteil des rückgelösten Phosphats im Zentrat befindet. Unter Zugabe von $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaCl}_2$ erfolgt unter schwach sauren Bedingungen die Ausfällung des ortho-Phosphats als Brushit.

Nach der Abtrennung des Brushits wird das phosphatabgereicherte Zentrat teilweise oder vollständig wieder mit dem entwässerten Schlamm vermischt und der Faulung zugeführt. Dabei kann die hydraulische Belastung der Faulung durch Erhöhung der TM im Zulauf reduziert werden, falls der Schlamm nur teilweise mit Zentrat wieder vermischt wird. Ammoniumarmes Zentrat mit einem hohen Anteil an organischen Säuren wird in die Bio-P-Stufe zurückgeführt.

6.3 Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

Bei Verfahren zum Phosphor-Recycling aus Klärschlammasche muss zunächst geprüft werden, ob und wie Abwärme aus einer thermischen Nutzung des organischen Anteils (Klärschlammverbrennung) genutzt werden kann. Der Standort Kassel mit der Verbrennungsanlage der Kasseler Verkehrs- und Versorgungs-GmbH (KVV) / Städtische Werke Energie + Wärme GmbH, verfügt über eine eigene Trocknungsanlage. Allein an diesem Standort werden große Mengen Asche anfallen, für die eine Aufbereitung mit Phosphorrecycling erforderlich wird. Für den Standort Kassel ist zu beachten, dass hier eine Co-Verbrennung von Klärschlamm und Altholz vorgesehen ist. Dies reduziert die Freiheitsgrade bez. der P-Rückgewinnungstechnologie erheblich, da eine düngemitteltechnische Verwertung der Aschen ausscheidet. Im Rahmen der Szenarien wurde daher ein Recycling in Form von Phosphorsäure betrachtet.

Neben Kassel können an weiteren Standorten in der Region NOH könnten kleinere semidezentrale Klärschlammverbrennungsanlagen mit vorgeschalteter Trocknung realisiert werden, deren Asche dann direkt in der Düngemittelindustrie verarbeitet werden kann. Entsprechend skalierbare Verbrennungsanlagen sind am Markt verfügbar und können entsprechend der für die Region Schlitz gewonnenen Erkenntnisse durchaus wirtschaftlich betrieben werden. Interessant sind semidezentrale Lösungen insbesondere dann, wenn sie zu Aschen führen, die aufgrund der Inputzusammensetzung bereits Eigenschaften eines P-Düngemittels aufweisen bzw. die in die Düngemittelproduktion abgegeben werden können.

Die auf einen nachchemischen Aufschluss bzw. eine nachchemische Aktivierung der Asche abziehende Verfahrensfamilie greift historisch gesehen auf das Patent zur Herstellung von Superphosphat aus Knochenmehl durch Sir John Bennet Lawes aus dem Jahr 1840 zurück. Alternativ zur Schwefelsäure kann entsprechend des Nassaufschlussverfahren für Rohphosphat auf Phosphorsäure zurückgegriffen werden (*RecoPhos*-Verfahren). Damit erhält man einen Phosphatdünger, der in etwa vergleichbar mit einem handelsüblichen Tripel-Superphosphat ist. Allerdings muss die Phosphorsäure zugekauft werden, was das Verfahren wiederum der Importabhängigkeit unterwirft, sofern es nicht gelingt, Recycling-Phosphorsäure für das Verfahren zu nutzen. Zudem können nur Klärschlammaschen eingesetzt werden, die bereits auf der Inputseite die Vorgaben der DüMV bezüglich der Schadstoffgehalte einhalten.

Anders stellt sich die Situation dar wenn die P-Rückgewinnung in Form von Phosphorsäure erfolgt. Diese ist ein universeller Rohstoff darstellt, der sowohl für die Erzeugung von Düngemitteln eingesetzt werden als auch für andere Chemieprodukte. Auch die Wertschöpfung stellt sich günstiger dar als bei der Produktion von Düngemitteln, denn bereits für Phosphorsäure in der Qualität *Merchant Grade Acid* lassen sich sehr hohe Verkaufserlöse erzielen. Werden zur Phosphorsäureproduktion Salpeter- oder Salzsäure verwendet, dann müssen die während des Aufschlusses gebildeten Calciumsalze (CaCl_2 bzw. $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) aus der Rohsäure entfernt werden. Während $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ein wertvoller Nitratdünger ist, fehlen Anwendungen für CaCl_2 ; dieses Salz muss entsorgt werden (Greb et al., 2016). Die Aufreinigung der Rohphosphorsäure kann nach dem Stand der Technik erfolgen (z.B. *Parforce*-Verfahren).

Die Fa. Remondis Aqua GmbH betreibt seit ca. 1 Jahr (2019) gemeinsam mit der Hamburger Stadtentwässerung als Unternehmen „Hamburger Phosphorrecyclinggesellschaft mbH“ eine Anlage nach dem TetraPhos®-Verfahren. Ein grobes Blockbild ist in der Abb. 9-13 zu sehen.

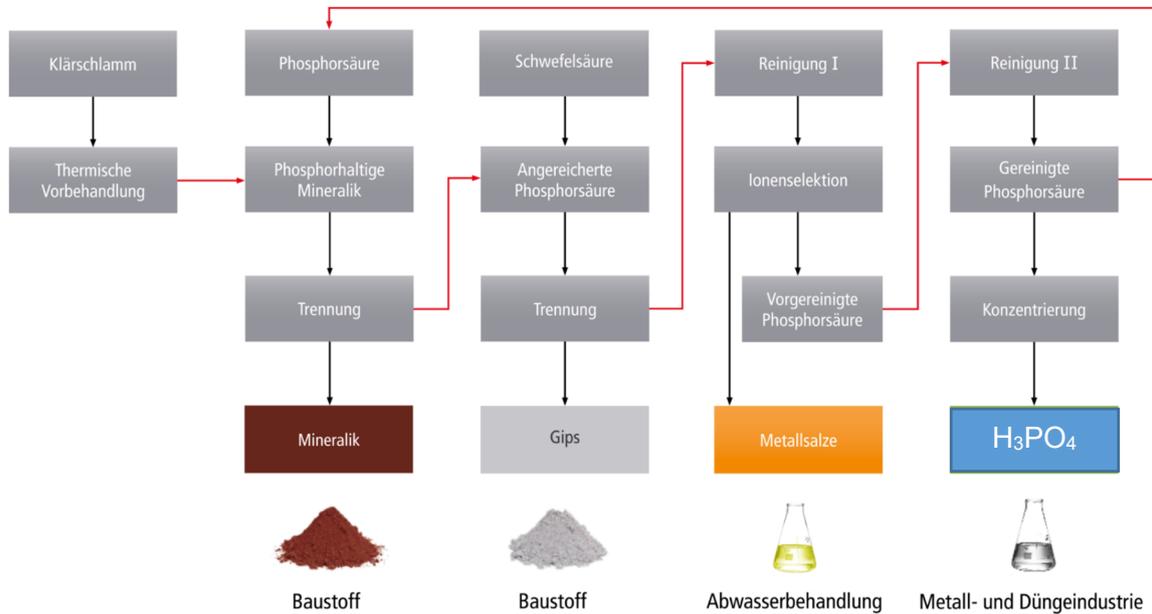


Abb. 6-4: Blockbild TetraPhos®-Verfahren, Fa. Remondis Aqua GmbH, (verändert nach Rutscheweyh, 2020)

Als weiteres patentiertes nass-chemisches, Power-to-Chemicals-Verfahren zur Gewinnung von Phosphorsäure aus primären und sekundären, phosphathaltigen Rohstoffen steht die PARFORCE-Technologie zur Verfügung.

Das Verfahren besteht aus einer Kerntechnologie „PARFORCE-Core“, die für jeden der unterschiedlichen Einsatzstoffe identisch ist. Je nach Einsatzstoff und Verfahrensausrichtung können oder müssen weitere Verfahrensstufen integriert oder ergänzt werden.

Diese Core-Technologie besitzt vier wesentliche Verfahrensschritte:

- (1) Mobilisierung der Phosphate im Einsatzstoff durch Säureaufschluss: Als Aufschlussäure kann Salzsäure (HCl) oder Salpetersäure (HNO₃) verwendet werden. Die Säuren kommen in relativ niedriger Konzentration von ca. 15%iger HCl bzw. 30%iger HNO₃ zum Einsatz.
- (2) Fest-Flüssig-Trennung der Aufschluss suspension: Die Feststoffe (silikatische Rückstände) in der Aufschluss suspension werden durch auf die vorliegenden Korngrößen abgestimmte Filtermethoden wie Bandfilter, Filterpressen oder Zentrifugen abgeschieden, um ein klares Filtrat zu erhalten.
- (3) Abtrennung der Chlorid- bzw. Nitrat-Ionen (bei Aufschluss mit HNO₃) von der Rohphosphorsäure durch elektrochemischen Membranprozess (Elektrodialyse): Dieser innovative Verfahrensschritt unterscheidet sich vom bisherigen Stand der Technik der Phosphorsäuregewinnung aus primären und sekundären Calcium-phosphaten. Anstelle einer Calciumsulfatfällung

(Gips) zur Abtrennung der Calcium-Ionen mittels Schwefelsäure, erfolgt die Abtrennung im PARFORCE-Verfahren über eine Elektrodialyse, durch die auch gleichzeitig Magnesium abgetrennt wird. In der Elektrodialyse wird ein Diluat (Rohphosphorsäure) und ein Konzentrat (Lösung abgetrennter Salze) gewonnen.

- (4) Konzentrierung der Rohphosphorsäure auf handelsübliche Form durch Vakuumverdampfung: Die Rohphosphorsäure (Diluat), die durch die Elektrodialyse gewonnen wird, besitzt je nach Phosphorgehalt des Einsatzstoffes eine Konzentration zwischen 5% und 20%. Handelsüblich ist eine Konzentration von ca. 75%.

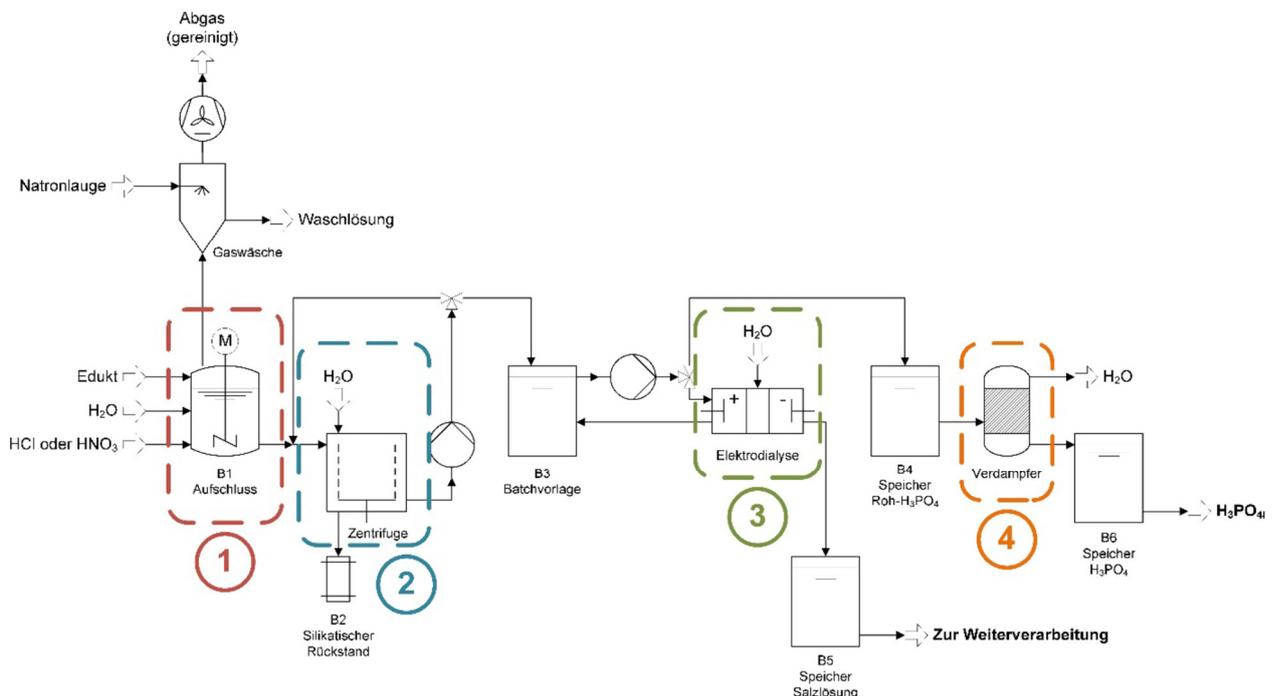


Abb. 6-5: Vereinfachtes Verfahrensschema PARFORCE-Core, (Eschment, Fröhlich, 2021)

Beim Einsatz von Salzsäure zum Aufschluss entsteht bei calciumhaltigen Ausgangsstoffen als Nebenprodukt eine Calciumchlorid-Lösung, die durch jeweils zusätzliche Verfahrensschritte entweder zu Streusalz nach DIN EN 16811-2 (Regelfall) oder zu Löschkalk (Ca(OH)₂) und Salzsäure weiterverarbeitet werden kann.

Der wesentliche Prozessschritt der PARFORCE-Technologie ist die Elektrodialyse. In der elektrodialytischen Umsetzung der Aufschluss suspension erfolgt im Wesentlichen die Abtrennung der ein- und zweiwertigen Kationen (u. a. Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) und einwertigen Anionen, insbesondere Cl⁻ aus dem Aufschluss mit Salzsäure. Somit werden auch die meisten der mitgelaugten Schwermetalle (Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺), aus der Rohphosphorsäure in die Salzlösung überführt und können gezielt ausgeschleust werden.

Bei der Verarbeitung von Klärschlammaschen, die auch Phosphatgehalte kleiner 10 Gew.-% P₂O₅ aufweisen können, wird/werden in der Regel auf Grund von hohen Eisen- und Aluminiumgehalten der Elektrodialyse eine oder zwei Extraktionsstufen vorgeschaltet, um diese Metalle

(Störstoffe) zu entfernen. Die Verarbeitung von Klärschlammaschen, die letztendlich die konzentrierte Schadstoffsene des Abwasserreinigungsprozesses darstellen, sind generell aufgrund der Aschemineralogie und chemischer Gesetzmäßigkeiten technisch aufwändig und damit auch kostenintensiv. Durch die Verbrennung wird zwar das im Klärschlamm enthaltene Phosphat aufkonzentriert; dies betrifft aber auch alle anderen anorganischen Inhalts- und Schadstoffe.

Je nach Gehalt an Phosphor (5 ... 10 Gew.-%) werden aus einer Tonne Klärschlammasche zwischen 200 ... 380 kg einer 75%igen Phosphorsäure gewonnen.

Bei den hier vorliegenden (modellhaften) Aschen werden aus einer Tonne Klärschlammasche rund 305 kg H_3PO_4 (75%ig) gewonnen.

Aus der Extraktion von Fe und Al und der Regeneration der Extraktionsmedien werden Eisen- und Aluminiumsalze zurückgewonnen, die als erneutes P-Fällmittel in der Kläranlage wiederverwendet werden können (Kreislaufführung). Diese Salze fallen zunächst im Prozess als ca. 2%ige Lösung an.

Aufgrund der großen Klärschlammmenge, die zukünftig in Kassel thermisch behandelt werden soll, werden deutlich größere Fe- und Al-Mengen anfallen, als diese im Klärwerk Kassel als Fällungsmittel benötigt werden. Daher wird es erforderlich sein, diese Salzlösungen zu entsorgen, ggf. weiter einzudampfen und dann zu vermarkten.

Die Nebenprodukte Streusalz und Fällsalze haben keine wesentliche wirtschaftliche Bedeutung, sondern sind vielmehr prozesstechnisch bedingt und folgen dem Kreislaufwirtschaftsgedanken. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist die Entsorgung mit betrachtet.

Wesentlicher Reststoff der P-Rückgewinnung sind die silikatischen Rückstände, die zwischen 500 ... 650 kg/t KSA anfallen werden. Im Weiteren wird von einer Deponierung ausgegangen. Mögliche weitere Wege könnte die Verwertung in der Zementindustrie als Zuschlagstoff sein. Für die Entsorgung der Reststoffe auf DK1-Deponien wurden Entsorgungskosten von 50 €/t angesetzt.

Schwermetalle, die als Spurenelemente in den Aschen vorliegen und durch den Säureaufschluss mobilisiert wurden, werden prozesstechnisch aus der Weiterverarbeitung der Salzlösung durch gezielte Fällung ausgeschleust. Die Mengen, die hier nach Deponieklasse 4 zu entsorgen sind, fallen in sehr geringem Umfang ($<<1$ kg/t KSA) an. Auch diese Entsorgung ist preislich bewertet.

Die an der Asche ansetzenden Verfahren der Phosphor-Rückgewinnung lassen sich grob in drei Verfahrensfamilien einteilen. Diese sind:

- Thermochemische Ansätze
(z.B. EuPhoRe[®], AshDec)

Diese Verfahrensgruppe sind eigentlich thermische Verfahren, die direkt einen Grundstoff für die Düngemittelindustrie produzieren. Die Verfahren machen sich zunutze, dass mit Hilfe von Chlordonatoren (z.B. $MgCl_2$) Schwermetalle als Schwermetallchloride volatilisiert werden und damit die Asche entfrachtet wird. Desweiteren soll durch eine 2-stufige reduktiv-oxidative Verfahrensweise die Pflanzenverfügbarkeit verbessert werden. Die Asche kann dann – bei Unterschreiten der Anforderungen der DüMV - direkt als Grundstoff in der Düngemittelindustrie Verwendung finden.

- Leaching Ansätze mit nachgelagerter Aufbereitung der Flüssigphase (z.B. PARFORCE, TetraPhos®)
Diese Verfahrensgruppe transferiert die Metalle sowie den Phosphor zunächst in eine saure Flüssigphase, aus der dann die selektive Rückgewinnung des Phosphors bzw. die Abtrennung von Schadstoffen erfolgt.
- Aufschlussverfahren ohne Separation der Asche-Matrix (z.B. Seraplant/RecoPhos, pontes pabuli)
In dieser Verfahrensgruppe erfolgt der Ausschluss bei einem möglichen engen fest/flüssig Verhältnis mit nachgelagerter Verdampfung der Flüssigphase. Die Aschematrix geht quantitativ in das Endprodukt über.

6.4 Vortrocknung vor thermischer Verwertung und Phosphor-Rückgewinnung aus der Klärschlammasche

6.4.1 Technologien zur Klärschlamm-trocknung

Bei allen thermischen Verfahren ist die Kopplung mit einer vorgeschalteten Klärschlamm-trocknung zu beachten. Daher wird hier geprüft, ob ggf. regenerativ erzeugte Wärme oder nicht mehr nutzbare Abwärme aus anderen (industriellen) Prozessen zur Trocknung eingesetzt werden kann. Somit stünde der Wärmeinhalt des getrockneten Schlammes z.B. für eine Fernwärmenutzung quantitativ zur Verfügung, was sich in der Gesamtbilanz der Verfahrenskette niederschlagen würde.

Umfangreiche Angaben zu verschiedenen Trocknungstechnologien sind dem ATV-DVWK-Merkblatt M 379 „Klärschlamm-trocknung (ATV-DVWK, 2004) sowie dem derzeit im Entwurf vorliegenden DWA-Merkblatt M 379 „Klärschlamm-trocknung“ zu entnehmen (DWA, 2019). Auf eine detaillierte Darstellung der verschiedenen Technologien wird daher in diesem Rahmen verzichtet. Die Tab. 6-1 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener Klärschlamm-trocknungs-Technologien sowie eine grundsätzliche Bewertung anhand einiger wesentlicher Kriterien. Die hier mit + und – bewerteten Kriterien müssen in einer konkretisierten Studie genauer bewertet werden.

Tab. 6-1: Zusammenstellung von grundsätzlichen Bewertungskriterien zum Einsatz von Klärschlamm-trocknungs-Technologien

	Trommel- trockner	Wirbelschicht- trockner	Scheiben- trockner / Dünnschicht- trockner	Band- trockner	Solartrockner	
					ohne Abwärme	mit Abwärme
Investitionen	-	-	+	+	++	+
el. Energiebedarf	o	o	o	o	++	+
Wartung/ Verschleiß	-	-	+	+	++	++
Erforderliches Wärmeniveau	-- (Abgas)	O (Th.-Öl 300 °C)	O (150-300 °C)	+	+++ (75-120°C)	++ (55-90°C)
Platzbedarf	+	+	++	o	---	-(-)
Abluftbehandlung	--	-	-	+-	++	+
Stäube	-	--	--	+	++	+

Tab. 6-2: Zusammenstellung von grundsätzlichen Anlagendaten verschiedener Klärschlamm-trocknungs-Technologien (Geyer, J., 2013), http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2013_eaa/2013_EaA_927_948_Geyer.pdf

Parameter	Einheit	konventionelle Trocknung	Bandtrocknung	Niedertemperatur-/ Solartrocknung
Schlammthroughsatz	tTS/a	> 2.500	1.000 – 2.500 (20.000)	200 – 500
Wasserverdampfung	t/h	Trommeltr.: 3 – 11 Scheibentr.: < 6 Dünnschichttr.: < 4 Wirbelschichttr.: 1 – 11	0,5 – 2 mit Trockengut- rückführung bis 10	Kaltlufttr.: 0,3 – 1 Solartrockner:
Endproduktfeuchte	% TS	> 90	70 – 90	50 – 70 (90)
Trocknungstemperatur	°C	> 85	60 – 70	10 – 40
Energie: thermisch	kWh/t _{H2O}	750 – 950	750 – 950	0
elektrisch	kWh/t _{H2O}	60 – 100	60 – 100	30
Abluft	m ³ /h	Kontakttr.: 100 – 200 Konvektionstr. 5.000	5.000 – 80.000	> 100.000

Tab. 6-3: Zusammenstellung von grundsätzlichen Anlagendaten verschiedener Klärschlamm-trocknungs-Technologien (Geyer, J., 2013), http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2013_eaa/2013_EaA_927_948_Geyer.pdf

	Scheibentrockner	Trommeltrockner	Dünnschichttrockner	Wirbelschichttrockner	Bandtrockner	Solartrockner
Beheizung	Erd-, Faulgas, Heizdampf < 11 bar, Abgase > 160 °C	Erd-, Faulgas, Abgase > 350 °C	Erd-, Faulgas, Heizdampf < 11 bar, Abgase > 160 °C	Erd-, Faulgas, Heizdampf > 5 bar, Abgase > 160 °C	Erd-, Faulgas Heizdampf, Abgase, Warmwasser	Sonnenstrahlung ggf. Warmwasser für Fußbodenheizung
Wärmeträger	Heizdampf < 11 bar, Thermoöl	Abgas 350 – 600 °C	Heizdampf < 11 bar, Thermoöl	Heizdampf 6 – 40 bar Thermoöl 130 – 250 °C	Luft < 130 °C	Sonnenstrahlung, Luft, Warmwasser
mögliche Wasserverdampfungsleistung	1.000 – 6.000 kg/h	1.000 – 11.000 kg/h	1.000 – 4.000 kg/h	1.000 – 11.000 kg/h	500 – 10.000 kg/h	
Trocknungstemperatur	110 °C	90 °C	110 °C	85/115 °C	60 – 70 °C	< 40 °C
Energieverbrauch • thermisch • elektrisch	850 kWh/tH ₂ O 60 kWh/tH ₂ O	850 kWh/tH ₂ O 60 kWh/tH ₂ O	850 kWh/tH ₂ O 60 kWh/tH ₂ O	810 kWh/tH ₂ O 70 kWh/tH ₂ O	950 kWh/tH ₂ O 85 kWh/tH ₂ O	0 kWh/tH ₂ O 30 kWh/tH ₂ O
Abgasmenge	200 m ³ /h	3.000 – 5.000 m ³ /h	200 m ³ /h	150 m ³ /h	5.000 – 80.000 m ³ /h	groß
Schlamm eintrag • Teiltrocknung < 85 % TS • Volltrocknung > 85 % TS	Direkteintrag < 45 % TS Trockengut-Rückführung	nein Trockengut-Rückführung	Direkteintrag < 45 % TS mit nachgeschalteter Trocknungsstufe	nein Direkteintrag oder TG-Rückführung	Direkteintrag < 85 % TS Direkteintrag über Matrizen oder TG-Rückführung	mittels Wendeinrichtungen < 70 % TS möglich bei sehr langen Trocknungszeiten
Endproduktqualität	> 90 % TS, hoher Staubanteil	Granulat 2 – 4 mm, > 90 % TS	nur teiltrocknet	Granulat 1 – 4 mm > 90 % TS	Spaghetti 75 – 85 % TS Granulat: 90 % TS	50 – 70 % TS

Deklariertes Ziel ist es eine Klärschlamm-trocknung vor der Verbrennung möglichst mit nicht anderweitig nutzbarer Abfallwärme von z.B. Blockheizkraftwerken oder auch aus dem Rücklauf der Fernwärmeversorgung durchzuführen. Daher werden nachfolgend in Betrachtung potenzieller Trocknungsstandorte ausschließlich Bandtrockner sowie Solartrockner (mit Abwärmeunterstützung) betrachtet.

Um eine selbstgängige Verbrennung des Klärschlammes zu erreichen, ist grundsätzlich eine Vortrocknung von ca. 25 % TM auf mind. 42-45 % TM erforderlich. Diesbezüglich bestehen grundsätzlich 2 Möglichkeiten:

- Teiltrocknung der gesamten Klärschlammmenge im Vollstrom auf den erforderlichen TM-Gehalt, z.B. mit Solartrocknungsanlagen, mit Scheibentrocknern, Dünnschichttrocknern oder Schneckentrocknern, auf jeden Fall unterhalb der 45 % TM (Gefahr der Leimphase oberhalb 45 % TM)
- Voll-Trocknung auf ca. 90 % TM einer Teilmenge des Schlammes im Teilstrom (z.B. mit Bandtrocknern) und kontrollierte Mischung mit entwässertem Schlamm (27 % TM) auf den notwendigen TM-Gehalt von 40 – 45 %

Tab. 6-4: Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen verschiedener Trocknungstechnologien (DWA Merkblatt M 379, Entwurf 2019)

Typ	Vorteile	Nachteile
Bandrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Probleme m. Leimphase - Geringer Verschleiß - Produktqualität gut einstellbar - Abwärme im Nieder- und Mitteltemperaturbereich bis 150 °C gut nutzbar - Geringer Staubanteil im Prozess und im Trockengranulat 	<ul style="list-style-type: none"> - Größerer Grundflächenbedarf als Kontakttrocknung - Strukturierung des entwässerten Schlamms notwendig - Im Vergleich zu Kontakttrocknern höhere Abluftmengen (z.B. bei Kondensationstrockner ~ 4.000 m³/h)
Dünnschichtrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Robustes Verfahren - Keine Probleme m. Leimphase - Unproblematisches An- und Abfahrverhalten durch kleine Schlammmasse im Trockner - Gut geeignet für Teiltrocknung 	<ul style="list-style-type: none"> - Volltrocknung energetisch ungünstig - erfordert in der Regel eine zweite Trocknungsstufe - Verschleißanfälligkeit bei Volltrocknung
Schneckenrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Einfach im Aufbau - Kleiner Grundflächenbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmeträgertemperaturen > 200 °C erforderlich - Gefahr von örtlichen Überhitzungen (Geruch, Pyrolyseprodukte im Kondensat)
Scheibentrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Kompakte Bauweise - Gut geeignet für Teiltrocknung 	<ul style="list-style-type: none"> - Bei Volltrocknung: <ul style="list-style-type: none"> o Rückmischungserfordernis o Probleme bei hohem Faseranteil o Staubbildung o verschleißanfällig - Teiltrocknung nur bis Leimphase
Paddeltrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Kompakte Bauweise - Gut geeignet für Teiltrocknung 	<ul style="list-style-type: none"> - Probleme bei hohem Faseranteil - Hoher Staubbildung - Verschleißanfällig bei Volltrocknung
Trommelrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Robustes Verfahren - Gut geeignet für große Wasserverdampfungsleistungen - Einstellbare Produktqualität 	<ul style="list-style-type: none"> - Inertisierung notwendig - Rückmischungserfordernis - In der Regel Primärenergie notwendig
Wirbelschichtrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Keine bewegten Teile - Geringer Verschleiß - Keine Probleme m. Leimphase - Gleichmäßige Produktstruktur 	<ul style="list-style-type: none"> - Druckverlust der Wirbelschicht bedingt erhöhten Stromverbrauch - Inertisierung notwendig
Solar-/Hallentrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Spezif. geringe Energiekosten - Einfache Verfahrenstechnik - Abwärmenutzung auf niedrigem Temperaturniveau - Gutmütiges Betriebsverhalten - Keine zeitkritischen Betriebszustände, diskontinuierlicher Betrieb möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Flächenbedarf groß - Wasserverdunstung witterungsabhängig - Lange Trocknungszeiten bei rein solarer Trocknung - Saisonalität - Ungleichmäßige Struktur und Feuchtigkeit des Produkts

Die Wärmeversorgung von Solartrocknungsanlagen erfolgt in der Regel mit Niedertemperatur-Wärme, z.B. der Abwärme aus Blockheizkraftwerken oder auch Abwärme aus der Klärschlammverbrennung. Gleiches gilt auch für Bandtrockner, die als Konvektionstrockner ebenfalls mit Temperaturen von $< 100\text{ °C}$ (häufig $< 80\text{ °C}$) mit Abwärme aus Blockheizkraftwerken betrieben werden. Kontakttrockner wie Scheibentrockner, Dünnschichttrockner benötigen Hochtemperatur-Wärme mit Temperaturen deutlich $> 100\text{ °C}$, die als Dampf unter erhöhtem Druck oder über Thermoöl bereitgestellt wird. Hierfür kann die Abhitze der Klärschlammverbrennung genutzt werden.

Im Bereich der Klärschlamm-trocknung können unterschiedliche Trocknertypen unterschieden werden, welche abhängig von der jeweiligen Art der Wärmeübertragung als Kontakttrockner, Konvektionstrockner oder Strahlungstrockner bezeichnet werden (vgl. Abb. 6-4).

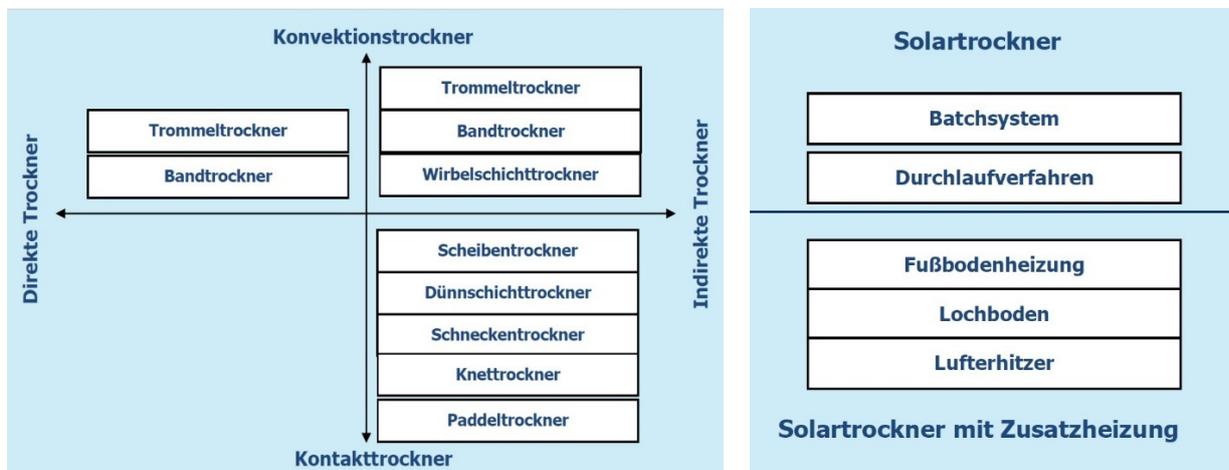


Abb. 6-6: Einordnung verschiedener Trocknerarten (nach Tomalla, 2017)

Im Jahr 2018 waren in Deutschland 203 Trocknungsanlagen für kommunale Klärschlämme installiert, wovon 44 % als Solartrockner ausgeführt wurden, die jedoch weniger als 10 % des in Deutschland getrockneten Klärschlammes umgesetzt haben. Deutlich größere Durchsätze haben dagegen Band-, Dünnschicht- und Scheibentrockner (Roskosch, Heidecke, 2018).

Solartrockner haben zudem den Nachteil, dass sie je nach Auslegung unterschiedlich auf die Einstrahlung von Wärmeenergie aus der Sonneneinstrahlung angewiesen sind. Das kann – wie z.B. in Schlitz – dazu führen, dass rein solar ohne Zusatzheizung betriebene Solartrockner im Winter ganz außer Betrieb genommen werden müssen.

Konvektions- oder Kontakttrockner werden häufig für eine kontinuierliche Trocknung größerer Schlammmengen in Anbindung an eine Klärschlammverbrennungsanlage oder an ein angrenzendes Kraftwerk bevorzugt, da nicht zuletzt aus dem Verbrennungsprozess die für die Trocknung erforderliche Wärme ausgekoppelt werden kann (vgl. Tab. 6-5).

Tab. 6-5: Vergleich von Kontakt Trocknung und Band Trocknung [modifiziert nach (Heindl et. al., 2020) sowie (Roskosch, Heidecke, 2018)]

Verfahren	Kontakt trockner mit Kondensation	Band trockner mit Kondensation	Band trocknung im Zu-/Abluftbetrieb ohne Kondensation
Temperatur Wärmeträger	>160 °C	< 80 – 150 °C	< 80 – 150 °C
Wärmeträger	Dampf (~ 5 - 11 bara)	Luft	Luft
Spez. Abluftanfall [m³/kg Wasserverdampfung]	ca. 0,1 bis 0,2 (abh. von Dichtigkeit des Systems)	ca. 1-10	ca. 6-25
Abluftkomponenten nach der Kondensation	NH ₃ bis 10.000 ppm CH ₃ -SH bis 65 ppm C ₂ H ₅ -SH bis 60 ppm H ₂ S bis 60 ppm	NH ₃ 300-600 ppm CH ₃ -SH bis 3 ppm H ₂ S bis 5 ppm	NH ₃ 100-200 ppm CH ₃ -SH bis 1 ppm H ₂ S bis 2 ppm

Bei Einsatz eines Mischungssystems (Mischers) ist auch die Zumischung von teilgetrockneten Schlämmen mit anderen TM-Gehalten (z.B. 50 – 70 % TM aus Solartrocknern) möglich. Das Mischaggregat benötigt dann eine angepasste Messtechnik (kontinuierliche TM-Messung) sowie Gewichtsmessung der Teilströme.

In allen Fällen muss die sog. Leimphase berücksichtigt werden, die bei vielen Schlämmen im Bereich zwischen 45 und 60 % TM zu schwer handhabbaren Schlämmen mit klebrig-viskosem Verhalten führt.

Je nach Trocknungstechnologie ist zudem zu beachten, dass teilweise der Heizwert des Schlammes reduziert wird; so können biologische Abbauvorgänge z.B. bei Solartrocknungsanlagen zu einer Reduzierung des organischen Anteils und damit des Heizwertes führen.

6.4.2 Bewertung der Rückbelastung der Abwässer aus Klärschlamm-Trocknungsanlagen bei den verschiedenen Trocknungstechnologien

6.4.2.1 Abwassermengen aus der Klärschlamm Trocknung

Je nach Trocknungstechnologie muss von unterschiedlichen Abwassermengen und auch unterschiedlichen Abwasserzusammensetzungen ausgegangen werden. Konservativ ist davon auszugehen, dass das gesamte in der Klärschlamm Trocknung zu verdampfende Wasser als Brüden anfällt, je nach Abluftbehandlungstechnologie zu Abwasser kondensiert wird.

Die bei der Klärschlamm Trocknung anfallende Abwassermenge ist abhängig von

- dem Input-TM-Gehalt des Schlammes in der Zuführung zur Trocknung sowie dem zu erzielenden Output-TM-Gehalt
- der Kondensation der Brüden in der Abluftbehandlung
- der Abluftbehandlungstechnik

Exemplarisch wird nachfolgend für eine Schlammmenge von ca. 6.000 t/a mit einem TM-Gehalt nach Vorentwässerung (Input-TM-Gehalt) von 25 % TM je nach zu erreichendem Trocknungsgrad (TM-Gehalt nach der Trocknung) folgende Wassermengen freigesetzt:

- bei Teiltrocknung: Trocknung von 25 % auf 50 % TM:
6.000 t/a mit 25 % TM auf 3.000 t/a mit 50 % TM: = $3.000 \text{ m}^3/\text{a} = 8,2 \text{ m}^3/\text{d}$
- bei Volltrocknung: Trocknung von 25 % auf 90 % TM:
6.000 t/a mit 25 % TM auf 1.667 t/a mit 90 % TM: $6.000 - 1.667 = 4.333 \text{ m}^3/\text{a} = 11,9 \text{ m}^3/\text{d}$

Ein Teil des verdampften Wassers wird als Wasserdampf nach der Abluftbehandlung in die Atmosphäre entlassen, fällt also nicht als Abwasser an. Dies gilt insbesondere bei Niedertemperatur-Konvektionstrocknern, bei denen z.T. keine Kondensation des Wasserdampfes erfolgt. Dies ist z.B. bei Solartrocknern der Fall, bei denen die Feuchtigkeit mit einem großen erwärmten Luftstrom aus dem Trocknungssystem ausgetragen wird.

Die Fa. Thermo-System GmbH, Anbieter von Solar-Trocknern und abwärmegestützten Solartrocknern, gibt als zu behandelnde Brüdenmenge (Abwassermenge aus der Abluftbehandlung) ca. 10 % der verdampften Wassermenge an. Demnach gehen ca. 90 % als Wasserdampf nach der Abluftbehandlung an die Atmosphäre.

Je nach Ausführung und Konstruktion ist dies auch bei Bandtrocknern der Fall. Hier werden Systeme mit Kondensationsbetrieb und entsprechendem Abwasseranfall und mit Abluftbetrieb mit nur geringen Abwassermengen angeboten. So soll die Anlage der Fa. Sludge2Energy zur Klärschlammbehandlung inkl. Phosphor-Rückgewinnung in Halle-Lochau mit einer geplanten Durchsatzmenge von ca. 10.700 t TM/a (42.800 t/a mit 25 % TM), bei der ein Bandtrockner der Fa. Huber eingesetzt werden soll „quasi-abwasserfrei“ betrieben werden (Wiesgickl, 2019). Die mit dem Wasserdampf beladene Abluft des Trockners wird in diesem Fall der Zuluft zur Wirbelschicht-Verbrennungsanlage zugeführt, so dass in diesem Fall auch die Abluftbehandlung entfallen kann.

Insbesondere bei den Verfahren der Kontakttrocknung werden die aus der Trocknung ausgetragenen Brüden in der Regel kondensiert, um den Gesamt-Energiebedarf der Trocknung zu minimieren. In den Brüden ist ein Großteil der für die Trocknung eingesetzten thermischen Energie enthalten. Sie lässt sich durch verschiedene Verfahren der Wärmerückgewinnung relativ einfach nutzen, wenn entsprechender Bedarf für Niedertemperatur-Wärme vorhanden ist. Dies kann z.B. zur Vorwärmung des flüssigen Schlammes vor der Entwässerung sinnvoll sein, um die mechanische Entwässerung zu optimieren.

Für die weitere Betrachtung der entsprechenden Szenarien wird von folgenden Abwassermengen / Mengen an Brüdenkondensaten ausgegangen, die weiterbehandelt werden müssen:

- Kontakttrockner: bis 100 % der Wasserverdampfung (vollständige Kondensation der Brüden)
- Bandtrockner: bis 100 % der Wasserverdampfung (vollständige Kondensation der Brüden), Verfahren auch abwasserarm bei Abluft-Wärmetauschern
- abwärmegestützter Solartrockner mit Biofilter: ca. 10 % der Wasserverdampfung

6.4.2.2 Abwasserzusammensetzung bei der Klärschlamm Trocknung

Die Belastung des bei der Abluft-/Brüdenbehandlung anfallenden Brüdenkondensats oder Waschwassers hängt dabei von folgenden Faktoren ab:

- Schlammzusammensetzung (kommunale und industrielle Anteile)
- Schlammbehandlung (ohne oder mit Faulung: bei Klärschlämmen, die in einer Faulung behandelt wurden, erfolgt durch den anaeroben Abbau in der Faulung ein teilweiser Aufschluss der Zellmasse und damit eine Freisetzung insbesondere von Ammoniak / Ammonium und auch von organischen Verbindungen)
- Trocknungstemperatur (je höher die Trocknungstemperatur ist, desto höher sind die Ammonium-Konzentrationen im Kondensat)
- Staubanteile (Trocknungstechnologie, bei Kontaktrocknern (Dünnschichtrockner, Scheibentrockner) ist der Staubaustrag und damit der Staubeintrag in das Kondensat höher; damit einher geht in der Regel auch ein Anstieg des CSB)
- Abluftbehandlung

In der nachfolgende Tab. 6-6 sind verschiedene CSB- und NH₄-N-Analysen-Werte von Brüdenkondensaten aus der Klärschlamm Trocknung zusammengestellt. Die Tab. dokumentiert einen sehr großen Wertebereich, so dass allgemein gültige Aussagen zur Rückbelastung durch die Brüden nicht machbar sind.

Tab. 6-6: Zusammenstellung verschiedener Analysen-Werte von Brüdenkondensaten aus der Klärschlamm Trocknung

Konzentrationen Brüdenkondensate Trocknung				
Anlage	Trockner	Quelle	CSB	NH ₄ -N
			mg/l	mg/l
Backnang	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	2.376	80
Backnang	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	1.333	649
Backnang	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	411	360
Backnang	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	930	200
Straubing	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	5.765	1.008
Straubing	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	9.647	3.110
Nova Gorica	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	4.050	k.A.
Bereich	Bandrockner	Fa. Wehrle, 2019	2.090-7.520	39-3.000
Italien	Bandrockner	Fa. Wehrle, 2019	3.100	2.070
Moerdijk, NL	Scheibentrockner	Sijstermans, SNB, 2019	1.800-7.000	700-3.000
Bereich	keine Spezifikation	DWA-M 379 (Entwurf), 2019	300-9.000	300-1.500
Minimum			300	39
Maximum			9.647	3.110
Mittelwert			3.452	1.068

6.4.2.3 Rückbelastung bei Einleitung der Brüdenkondensate aus der Klärschlamm-trocknung, CSB- und NH₄-N-Frachten

In dem nachfolgend betrachteten Szenario 4, in dem dezentrale Trocknungsanlagen unter Nutzung von regenerativer Abwärme z.B. aus Biogasanlagen betrachtet werden (siehe Kap. 9.2.4), werden Konzepte mit Trocknungsanlagen vor Verbrennungsanlagen erläutert. Der zu erzielende Trocknungsgrad beträgt sowohl bei der Monoverbrennung als auch bei der Mitverbrennung in Zementwerken > 90 %. Derzeit ist nicht klar, ob die in der Region Nordost-Hessen eingesetzten Trocknungsanlagen mit oder ohne eine Brüdenkondensation betrieben werden sollen.

Bei Trocknungsanlagen mit Brüdenkondensation muss aufgrund der o.g. CSB- und NH₄-N-Konzentrationen (siehe Tab. 6-6) mit folgenden CSB- und NH₄-N-Frachten gerechnet werden, die als Rückbelastung in einer lokalen Kläranlage behandelt werden müssen:

Trocknungskapazität 6.000 t/a (z.B. Standort Volkmarsen)

Trocknung von 6.000 t/a mit 25 % TM auf 1.667 t/a mit 90 % TM: 4.333 m³/a = 11,9 m³/d

- CSB: (120 g CSB/EW*d)
Mittelwert: 11,9 m³/d * 3.452 g/m³ = 40.983 g CSB/d entspr. 341 EW_{CSB}
Maximum: 11,9 m³/d * 9.647 g/m³ = 114.530 g CSB/d entspr. 955 EW_{CSB}
- NH₄-N: (10 g NH₄-N/EW*d bzw. 11 g TKN/EW*d)
Mittelwert: 11,9 m³/d * 1.068 g/m³ = 12.679 g NH₄-N/d entspr. 1.268 EW_N
Maximum: 11,9 m³/d * 3.110 g/m³ = 36.922 g NH₄-N/d entspr. 3.692 EW_N

Unter Berücksichtigung der mittleren Konzentrationen wäre die zusätzliche Rückbelastung aus der Brüdenkondensation mit 1.268 EW_N und 341 EW_{CSB} erheblich.

Trocknungskapazität 17.000 t/a (z.B. Standort Sontra),

Trocknung von 17.000 t/a mit 25 % TM auf 4.722 t/a mit 90 % TM: 12.278 m³/a = 33,6 m³/d

- CSB: (120 g CSB/EW*d)
Mittelwert: 33,6 m³/d * 3.452 g/m³ = 116.117 g CSB/d entspr. 967 EW_{CSB}
Maximum: 33,6 m³/d * 9.647 g/m³ = 324.503 g CSB/d entspr. 2.704 EW_{CSB}
- NH₄-N: (10 g NH₄-N/EW*d bzw. 11 g TKN/EW*d)
Mittelwert: 33,6 m³/d * 1.068 g/m³ = 35.925 g NH₄-N/d entspr. 3.592 EW_N
Maximum: 33,6 m³/d * 3.110 g/m³ = 104.613 g NH₄-N/d entspr. 10.461 EW_N

Unter Berücksichtigung der mittleren Konzentrationen wäre die zusätzliche Rückbelastung aus der Brüdenkondensation mit 3.592 EW_N und 967 EW_{CSB} erheblich.

Aufgrund des CSB/N-Verhältnisses von ca. 3,1:1 verschlechtert sich bei einer Einleitung der Brüdenkondensate in den Zulauf zur Kläranlage zudem das Nährstoffverhältnis, welches für eine weitgehende Stickstoffelimination (insbesondere für die Denitrifikation) bei ca. 6-7:1 liegen sollte.

Daher sollte wenn möglich weitgehend auf eine Kondensation der Brüden in der Trocknung verzichtet werden. Dies hat aber Auswirkungen auf die Abluftbehandlung, die bei Anlagen ohne Brüdenkondensation aufgrund des dann deutlich größeren Abluftvolumenstroms auch entsprechend aufwendiger wird.

Eine gesonderte Brüdenbehandlung und Ausschleusung insbesondere der erheblichen Ammonium-Frachten sowie der schwefelgebundenen Geruchsstoffe (Schwefelwasserstoff, Mercaptane) ist dann erforderlich. Zur Abluftbehandlung wird dann in der Regel eine saure Wäsche (Einsatz z.B. von Schwefelsäure, Bindung des Ammoniaks zu Ammoniumsulfat-Lösung (ASL)), eine kombinierte saure und alkalische Wäsche und ggf. noch Nachbehandlung in einem Biofilter realisiert. Die Ammonium-Sulfat-Lösung kann ggf. in der Landwirtschaft verwertet werden.

Der Aspekt der Brüdenbehandlung muss im Weiteren nach Festlegung auf ein Trocknungsverfahren detailliert betrachtet werden.

6.4.3 Auswirkungen der Klärschlamm-trocknung auf den Heizwert

Der Klärschlamm des Region Nordost-Hessen hat im Mittel in etwa folgende Zusammensetzung haben (nach der Entwässerung):

TM	ca. 25 – 28 %
oTM:	ca. 54 %
mTM:	ca. 46 %

Nach Dünnebeil (2017) (siehe Abb. 6-5) ergibt sich für einen entwässerten Schlamm mit 25 % TM, 54 % oTM, ein Heizwert von ca. 1.200 kJ/kg. Bei Volltrocknung auf ca. 90 % TM erhöht sich der Heizwert auf ca. 11.500 kJ/kg.

Abhängigkeit des Heizwertes vom Trockenmassegehalt (TM) und Glühverlust (oTM)

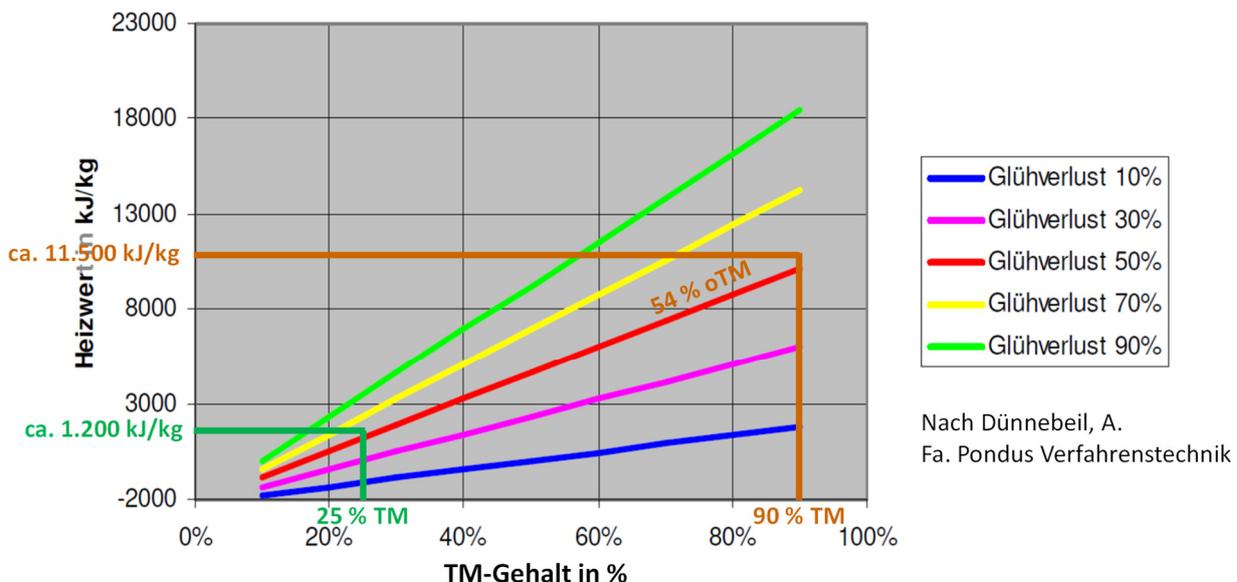


Abb. 6-7: Abhängigkeit des Heizwertes von Klärschlamm vom TM-Gehalt sowie Glühverlust (entspr. oTM-Gehalt) (Dünnebeil, 2017)

Die Abb. 6-6 zeigt das Brennstoff-Dreiecksdiagramm inkl. Kennzeichnung des selbstgängigen autarken Verbrennungsbereichs (nach Heindl et. al., 2020). Eingetragen ist ein entwässerter Klärschlamm mit 27 % TM.

Für eine selbstgängige Verbrennung von Klärschlamm in einer (Wirbelschicht-)Verbrennungsanlage ist nach Heindl et. al, 2020, ein Heizwert von mind. 4,0 bis 4,5 MJ/kg vor dem Eintrag in die Feuerung erforderlich.

Die Zementindustrie fordert bei Annahme von getrockneten Klärschlämmen mindestens einen Heizwert von 11 MJ/kg (siehe Anhang 12.4.1). Dieser wird z.B. mit einer Trocknung auf 70-80 %, wie sie in Solartrocknungsanlagen erreicht wird, unterschritten.

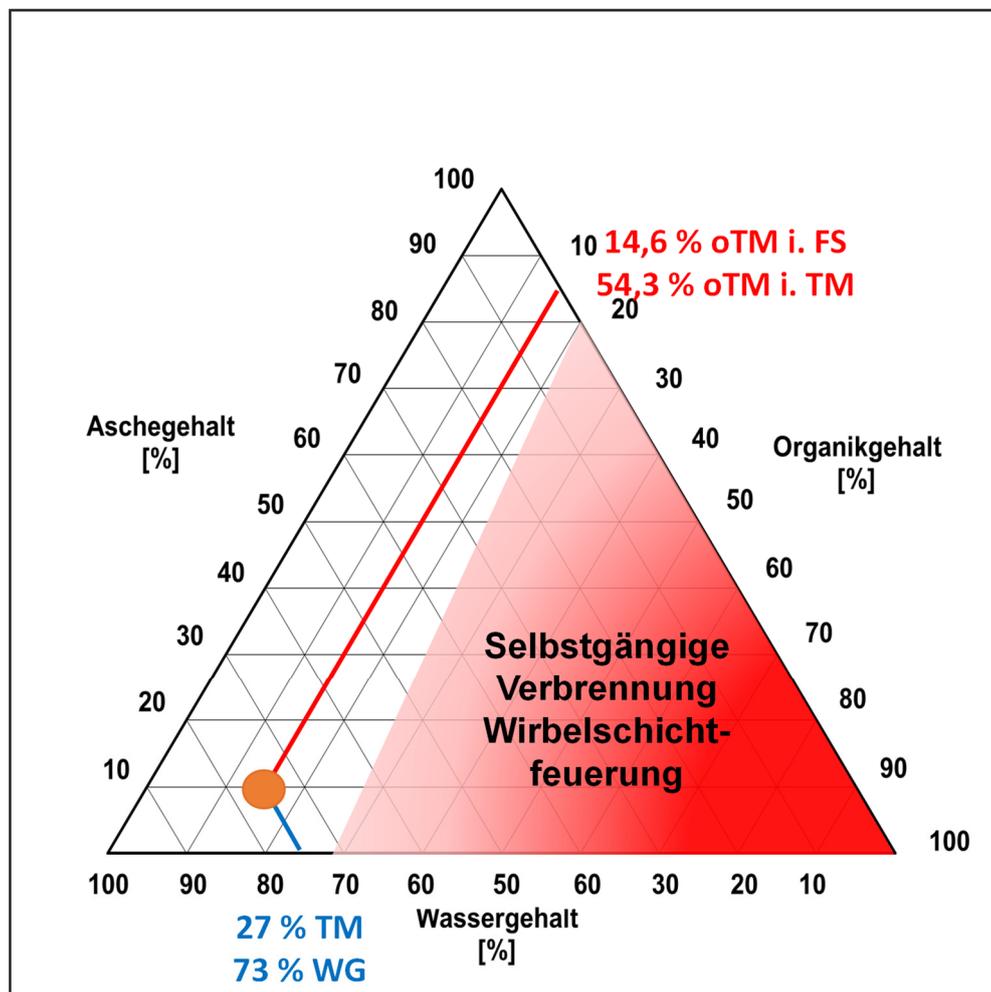


Abb. 6-8: Einordnung eines entwässerten Schlamms mit i.M. 27 % TM, 54,3 % oTM (in der TM) im Brennstoff-Dreiecksdiagramm inkl. Kennzeichnung des selbstgängigen autarken Verbrennungsbereiches (gilt für Wirbelschichtverbrennungsanlagen) (nach Heindl et. al., 2020)

6.5 Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung

6.5.1 Übersicht

Die thermische Vorbehandlung von Klärschlamm zum nachgelagerten P-Recycling kann entweder in einer Klärschlammverbrennungsanlage (KSVA) oder in einer thermischen Klärschlammvorbehandlungsanlage (KSVorA) erfolgen (Franßen, 2018). Eine Rückgewinnung aus der Asche von Mitverbrennungsanlage (KSMitVA) ist hingegen nicht vorgesehen. Dieser Weg ist für solche Klärschlämme geeignet, bei denen zuvor eine Rückgewinnung aus dem Wasser bzw. aus dem Schlamm erfolgt ist. Die Mitverbrennung wird unter anderem in Kohlekraftwerken, Zementwerken sowie Abfallverbrennungsanlagen angewendet.

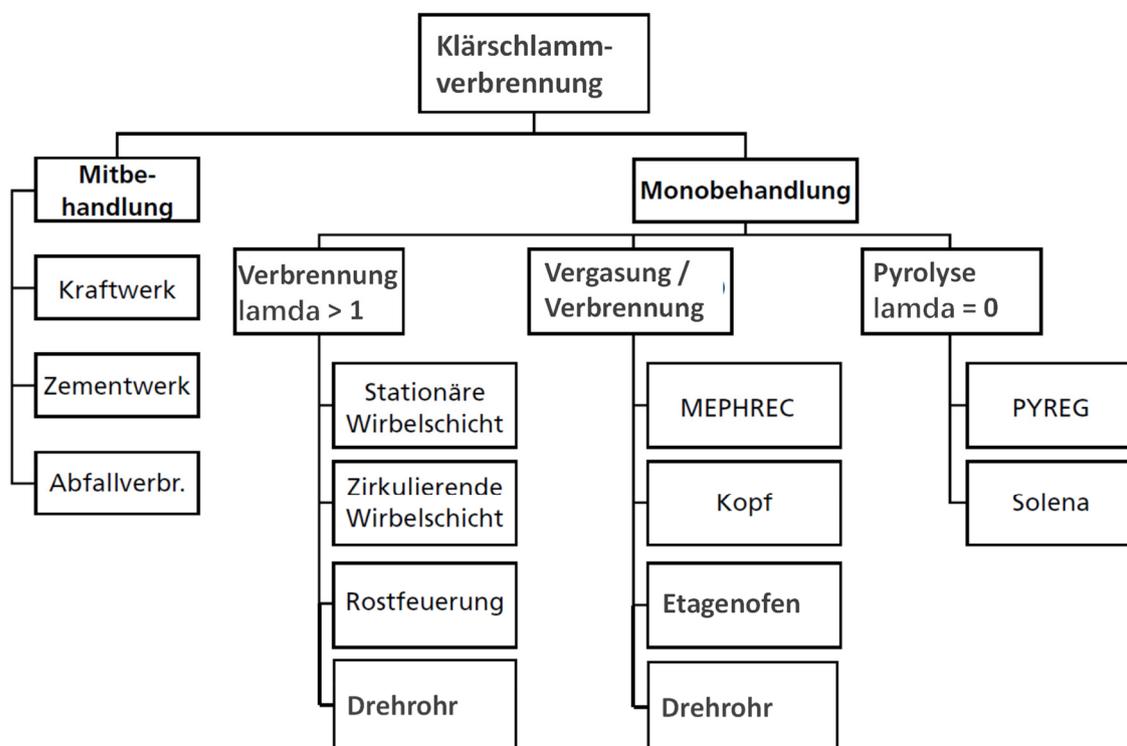


Abb. 6-9: Thermische Verfahren der Klärschlammbehandlung, Darstellung in Anlehnung an (nach Franck, Schröder, 2015, S. 463, erweitert).

Verfahren zur thermischen Klärschlammvorbehandlung (z.B. Pyrolyse, Hochtemperaturkarbonisierung) sind dadurch gekennzeichnet, dass das entstehende Produkt innerhalb der Anlage nicht verbrannt wird, da die Umsetzung bei unterstöchiometrischem Sauerstoffangebot durchgeführt wird (bis $\lambda = 0$) wohingegen bei der Verbrennung mehr Sauerstoff zur Verfügung gestellt wird ($\lambda > 1$), als zur stöchiometrisch vollständigen Oxidation der Brennstoffe notwendig ist. Eine Hybridform der Monobehandlung stellen das EuPhoRe[®]- und auch das KlärschlammReformer-Verfahren der Fa. Thermo-System GmbH dar, da hierbei zonierte eine reduktive (Pyrolyse) mit einer oxidativen Behandlung gekoppelt wird. Diese Verfahren sind in Kap. 6.5.4 und 6.5.5 aufgeführt. Entscheidend für deren Zuordnung zur Gruppe der KSVA ist, dass am Ende des Prozesses ein vollständig mineralisierter Rückstand und damit eine Asche vorliegt.

Nach deutschem Düngemittelrecht ist anders als bei Aschen aus KSVa der Einsatz von Klärschlammkohlen aus KSVorA in Düngemitteln nicht zulässig; für anderweitige R-Recyclingverfahren (i. W. Phosphorsäureproduktion) wäre eine vorherige Mineralisierung erforderlich. Aus diesem Grund werden KSVorA im Weiteren nicht berücksichtigt.

Pyrolyseverfahren sowie Verfahren mit der hydrothermalen Carbonisierung von Klärschlamm werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Pyrolysekoks und Karbonisate von Klärschlamm aus HTC-Anlagen weisen aktuell keine düngerechtliche Zulassung gemäß DüMV auf. Beide Verfahren könnten daher ausschließlich als Vorstufe zu einer Verbrennung eingesetzt werden. Damit wären sie Alternativen zur Klärschlamm-trocknung, sind aber spezifisch deutlich teurer.

Eine Studie des Ing.-Büros umwelttechnik + ingenieure GmbH (Rebling et al., 2020) im Auftrag des Bundesverbandes Hydrothermale Carbonisierung bv-htc e.V. hat einen Gesamt-Energetischen Vorteil bei Vorschaltung einer HTC-Anlage für einen Teilstrom von entwässertem Schlamm vor der Klärschlammverbrennung ermittelt. Die Energiebilanz wurde für eine Anlagengröße (Verbrennungsanlage) von 38.000 t TM/a entsprechend ca. 150.000 t/a entwässerten Klärschlamm ermittelt. Der Energievorteil ergibt sich aus der verbesserten Entwässerbarkeit der HTC-Kohle nach dem HTC-Prozess, welcher sich in geringere Transportaufwendungen sowie in einen Energie-Überschuss bei der Verbrennung des Klärschlamm-HTC-Kohle-Gemisches gegenüber einer reinen Verbrennung des entwässerten Schlammes ergibt.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde in der Studie (Rebling et al. 2020) nicht durchgeführt.

6.5.2 Wirbelschichtverfahren

Das am häufigsten eingesetzte Verfahren ist die stationäre Wirbelschichtfeuerung. Etwa 73 % der in Betrieb befindlichen Anlagen nutzen dieses Verfahren. In der heutigen Verfahrenstechnik reicht der Einsatz der Wirbelschicht-Technologien der von der Kohlefeuerung bis hin zu Trocknungsverfahren und Kaffeeröstungen (Bittermann, 2013). Der erste europäische Wirbelschichtofen zur Schlammverbrennung von Raffinerieschlamm ging 1964 in Betrieb.

Der Aufbau dieser Verfahrenstechnik ähnelt meist einer zylindrischen oder konisch-zylindrisch stehenden Brennkammer. Zur Ausbildung der Wirbelschicht dient ein Düsenboden. (Vater, 1996). Mit steigender Anströmgeschwindigkeit der zugeführten Luft lockert sich die Schüttung zunehmend, bis sich diese im Kräftegleichgewicht zwischen Auftriebskraft und Schwerkraft befindet. Wird die Anströmgeschwindigkeit weiter erhöht, expandiert die Schüttung bis sich eine statische Wirbelschicht ($F_T = F_W$) einstellt. Wird der Luftstrom weiter erhöht und der Austragspunkt überschritten, werden die Feststoffpartikel in Abhängigkeit von ihrer Größe und Masse aus dem Reaktor getragen (Thomé-Kozmiensky, 2013).

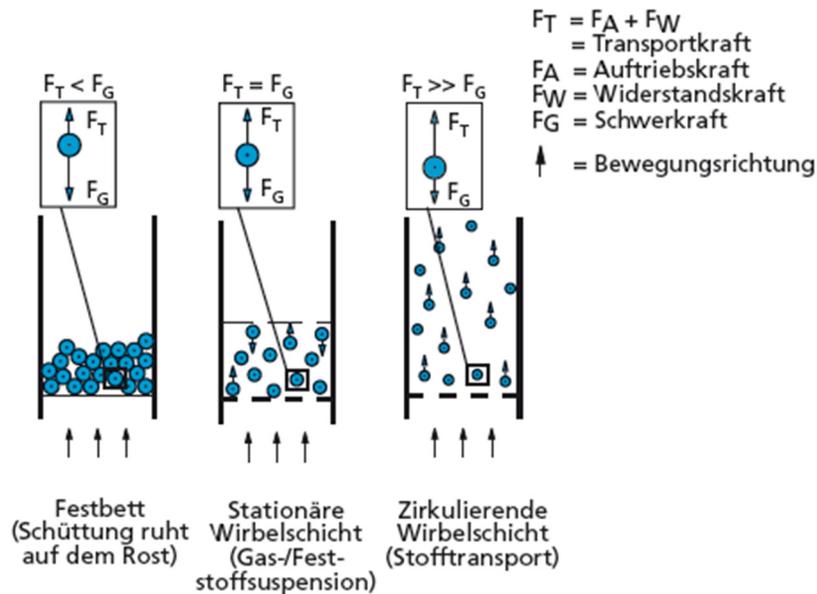


Abb. 6-10: Kraftwirkung am Feststoffpartikel (Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 4)

Beim Anfahren der Wirbelschicht ist eine externe Vorwärmung des Bettmaterials notwendig bevor die Brennstoffzufuhr gestartet wird. Über die Zufuhr der Primärluft werden die Feststoffe dreidimensional bewegt und damit in horizontaler und vertikaler Richtung vermischt. Die energetische Umsetzung des Brennstoffes findet in einem inerten Sand-Asche-Gemisch in einem Temperaturbereich von 850 bis hin zu 950 °C in der Brennkammer statt. Die Verbrennungstemperatur muss unterhalb des Ascheschmelzpunktes liegen. Die Regulierung der Verbrennungstemperatur geschieht durch den eingebrachten Luft- und Brennstoffmassenstrom. Das Wirbelbett besteht aus einer 70 bis 100 cm hohen Sandschicht mit einer Körnung von 0,2 bis 4 mm, die durch Einblasen der Verbrennungsluft in Schwebelage gehalten wird.

Für die geplante Klärschlammverbrennung der Städtischen Werke Kassel steht eine bis dato noch mit Braunkohle betriebene Wirbelschicht-Verbrennung zur Verfügung.

6.5.3 Staubfeuerung, Fa. Carbotechnik GmbH

Die Firma Carbotechnik bietet ein nach Herstellerangabe (Schöfmann, Eder, 2019) ein flexibel skalierbares System auf Basis einer Staubfeuerung an, welches auch für kleinere Anlagen ab ca. 7.000 t/a entwässertem Klärschlamm wirtschaftlich betreibbar ist. Brenner mit bis zu 40 W Feuerleistung sind baulich realisierbar.

Inputstrom in die Anlage ist getrockneter Klärschlamm mit > 90 % TM. Eine Rückbelastung tritt nicht auf, da der Brüden nach Luftwäsche an die Atmosphäre abgegeben wird. Der getrocknete Klärschlamm wird gemahlen und pneumatisch der Staubfeuerung (Impulsbrenner) zugeführt. Gemäß Aussage des Technologieanbieters wird ein Teil der erzeugten Wärme zur Trocknung des Klärschlammes eingesetzt, die verbleibende Wärme kann gewandelt oder beispielsweise in ein Wärmenetz eingespeist werden. Der Ascheabzug erfolgt vor der Rauchgasreinigung abgezogen, sodass bez. einer Verwertung in der Düngemittelproduktion die Vorgabe des Ausschlusses von Material aus der letzten filternden Einheit gemäß Düngemittelverordnung eingehalten sein dürfte.

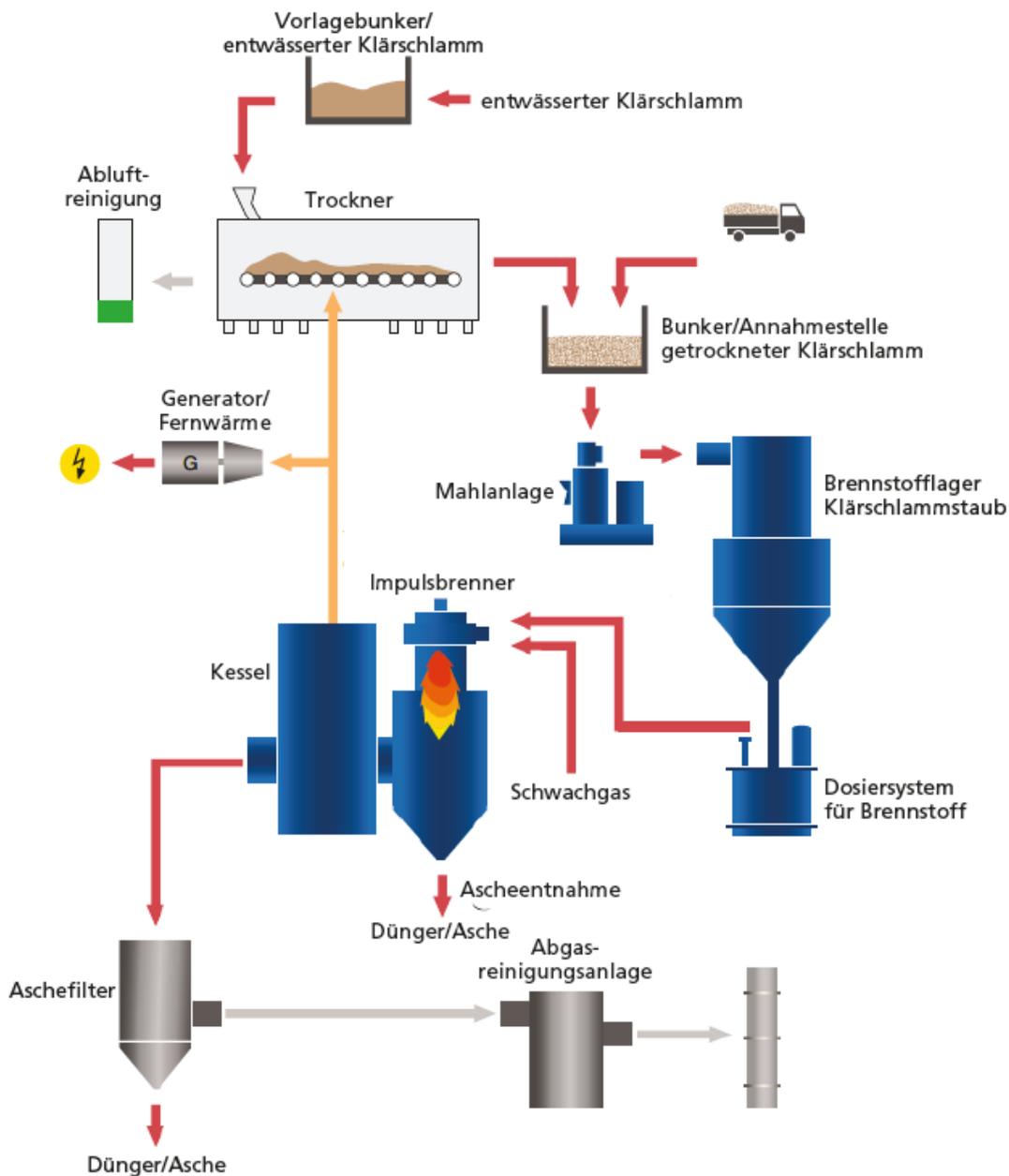


Abb. 6-11: Verfahrensfließbild für die thermische Umsetzung von entwässertem Klärschlamm in einer Staubfeuerung (Schöfmann, Eder, 2019)

6.5.4 Drehrohr-Technik, am Beispiel des 2-stufigen thermochemischer Aufschluss nach dem EuPhoRe®-Verfahren

Alternativ zur oben vorgestellten Wirbelschicht-Verbrennung, die in der Regel nur für größere Klärschlamm-mengen > 5.000 t TM/a wirtschaftlich einzusetzen ist, werden hier Drehrohröfen betrachtet, die anhand der Referenzlage auch bei kleineren Durchsätzen – wie in NOH bei etwaigen dezentralen Lösungen – eingesetzt werden können.

Ein Beispiel ist das 2-stufige thermochemische Behandlungsverfahren der Fa. EuPhoRe[®]-GmbH, in dem einerseits der thermische Energiegehalt des eingesetzten Klärschlammes genutzt werden kann, andererseits – nach Angabe des Verfahrensanbieters – das im Klärschlamm enthaltene Phosphat in eine besser pflanzenverfügbare Form gebracht werden und zudem durch Zugabe von Additiven eine Schwermetallentfrachtung erfolgen soll. Das Verfahren soll auch für kleinere Klärschlamm-mengen mit < 1.000 t TM/a wirtschaftlich einsetzbar sein.

Die Klärschlammbehandlung nach dem EuPhoRe[®]-Verfahren erfolgt innerhalb eines Drehrohrreaktors. Der erste thermische Behandlungsschritt ist die Erhitzung des Klärschlammes und die Entgasung der flüchtigen Bestandteile unter reduzierenden Bedingungen bei Temperaturen zwischen 650 und 750 °C. Unter diesen Bedingungen werden bereits leicht- bis mittelflüchtige Schwermetalle in Gegenwart von Salzen (Chloridonatoren) in die Gasphase überführt.

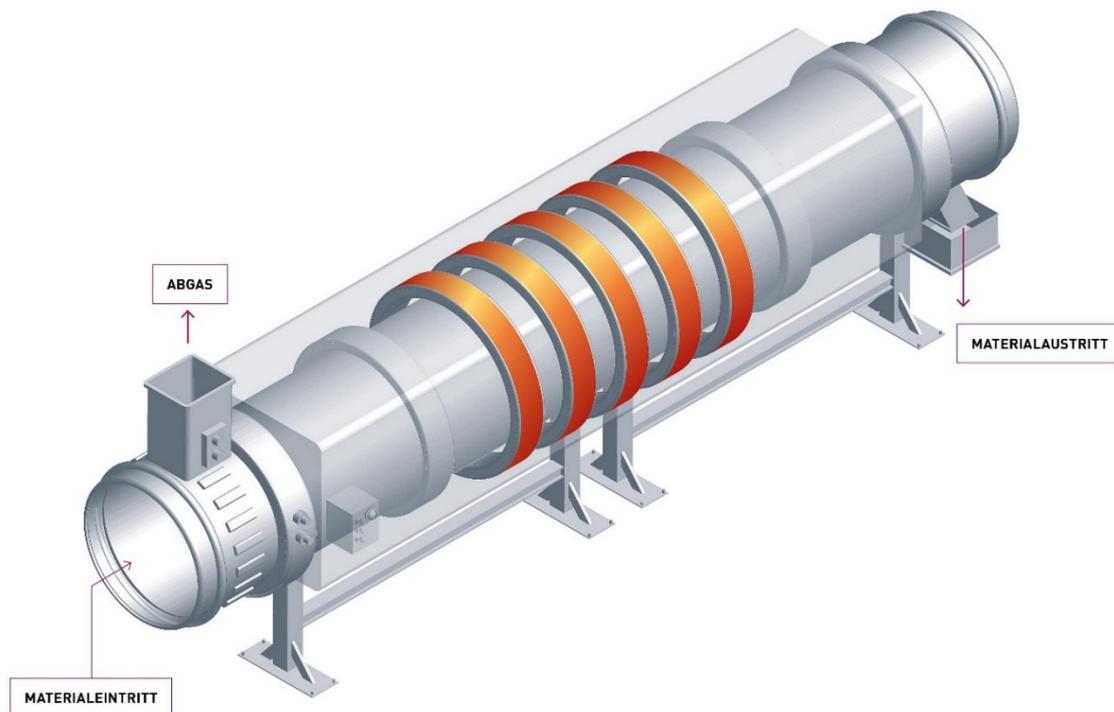


Abb. 6-12: Drehrohr-Ofen mit außen liegender Beheizung, Fa. IBU-tec advanced materials AG, Weimar, Homepage www.IBU-tec.de (IBU-tec, 2020)

In der unmittelbar folgenden oxidativen Nachverbrennung des entstandenen fixen Kohlenstoffs setzt sich die Volatilisierung auch schwerer flüchtiger Metalle bei Temperaturen zwischen 900 und 1.000 °C fort. Additive werden in Form von Alkali- und/oder Erdalkalisalzen (z.B. Magnesiumchlorid $MgCl_2$ oder auch Mehr-Komponenten-Chloride (sog. Polychlorid)) dem Klärschlamm zugegeben. Die volatilisierten Schwermetalle werden in der Gasreinigung aus dem Abgasstrom entfernt und bilden den einzigen verbleibenden bisher nicht verwertbaren Rest.

Neben der Schwermetallentfrachtung führt die Additivierung ist nach Aussage der EuPhoRe[®]-GmbH zu einer signifikanten Erhöhung des pflanzenverfügbaren Phosphates.

Das mittels EuPhoRe[®]-Verfahren aus Klärschlamm erzeugte Ascheprodukt ist Ausgangsstoff zur Herstellung von Einzel- und Mehrnährstoffdüngern, wobei im Prinzip – je nach Schwermetallkonzentrationen – bereits nach der Feinvermahlung und Staubbindung ein mineralischer P-Dünger vorliegt.

Das Verfahren lässt sich als autarkes System betreiben, wobei die gemäß BImSchG erforderlichen Rauchgasreinigungsanlagen vergleichbar zu einer Wirbelschichtverbrennungsanlage realisiert werden müssen.

Sofern bereits am Standort eine Feuerungsanlage mit entsprechender Rauchgasreinigung vorhanden ist – z.B. eine Müllverbrennungsanlage oder EBS-Verbrennungsanlage –, kann die EuPhoRe[®]-Anlage in der Regel an dieses Rauchgasreinigungs-System und auch an die Wärmeauskoppelung angeschlossen werden.

Für NOH käme eine Technologie jenseits der vorhandenen Wirbelschicht-Feuerung nur für eine dezentrale / semi-dezentrale Lösung in Frage. Eine Ankopplung an eine bestehende Rauchgasreinigung scheidet damit aus, sodass eine autarke Anlage obligatorisch wäre.

6.5.5 KlärschlammReformer, Fa. Thermo-System

Ein weiteres für kleinere Klärschlamm-mengen einsetzbares thermisches System ist der der sog. „KlärschlammReformer“ der Fa. Thermo-System GmbH. Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine mehrstufige Verbrennungsanlage, bei der eine Trennung von Gas- und Schlammverbrennungszone mit gezielter Einstellung der Prozessbedingungen in den unterschiedlichen Stufen möglich sein soll.

Das Verfahren wurde bisher auf den Kläranlagen Renningen, Baden-Württemberg, und Grünstadt, Rheinland-Pfalz, eingesetzt und daher mit vergleichsweise geringen Schlamm-mengen betrieben. Reale Aschen ausgewählter Anlagen wurden im Rahmen einer anderen Machbarkeitsstudie analytisch untersucht.

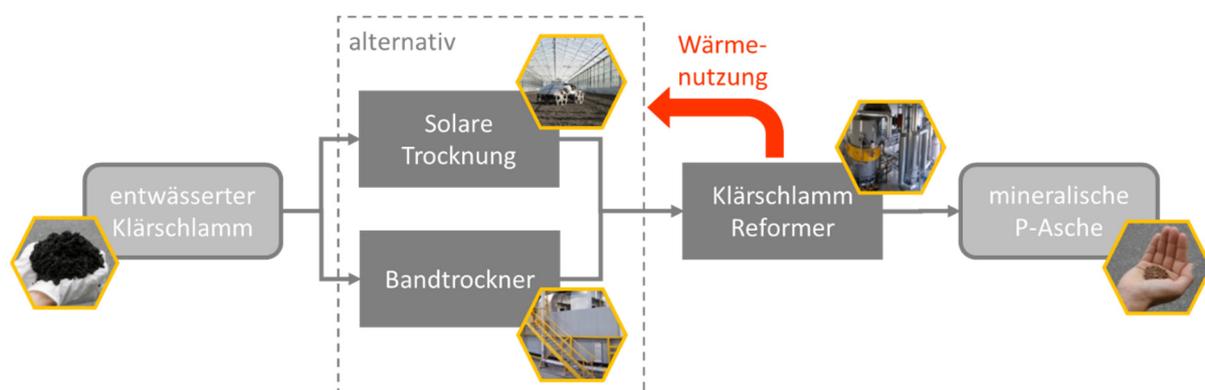


Abb. 6-13: Verfahrenskonzept zur dezentralen thermischen Verwertung von Klärschlamm aus vorgeschalteter Trocknung und mehrstufiger Verbrennung (KlärschlammReformer (Thermo-System, 2020)

Im KlärschlammReformer wird der getrocknete Klärschlamm in einem mehrstufigen Verbrennungsprozess thermochemisch umgesetzt. Der Reaktor besteht aus einer Pyrolysezone und einer Oxidationszone für den Schlamm sowie einer Gasbrennkammer zur Verbrennung der entstehenden Pyrolysegase. Das Verfahrenskonzept basiert auf einer räumlichen Trennung der verschiedenen Zonen und ermöglicht dadurch eine unabhängige Regelung der Prozessbedingungen. Die Gasbrennkammer wird bei einer Temperatur von etwa 900°C betrieben. Das entstehende Rauchgas wird in einem Wärmetauscher abgekühlt und durchläuft zur Einhaltung der Grenzwerte der 17. BImSchV eine 3-stufige Gasreinigung bestehend aus Staubfilter, Rauchgaswäscher und Polizeifilter. Die Prozesswärme wird über den Rauchgaswärmetauscher ausgekoppelt und zur Trocknungsanlage übertragen.

Der Klärschlamm wird beim Durchlaufen des Reaktors in mehreren Stufen unter kontrollierten Bedingungen vollständig zu einer mineralischen Asche umgesetzt. Organische Schadstoffe werden durch die hohen Brennraumtemperaturen sicher zerstört. Schwermetalle wie Quecksilber, Cadmium und Thallium werden ausgetrieben und in der Rauchgasreinigung abgefangen. Als Produkt entsteht eine phosphathaltige mineralische Asche.

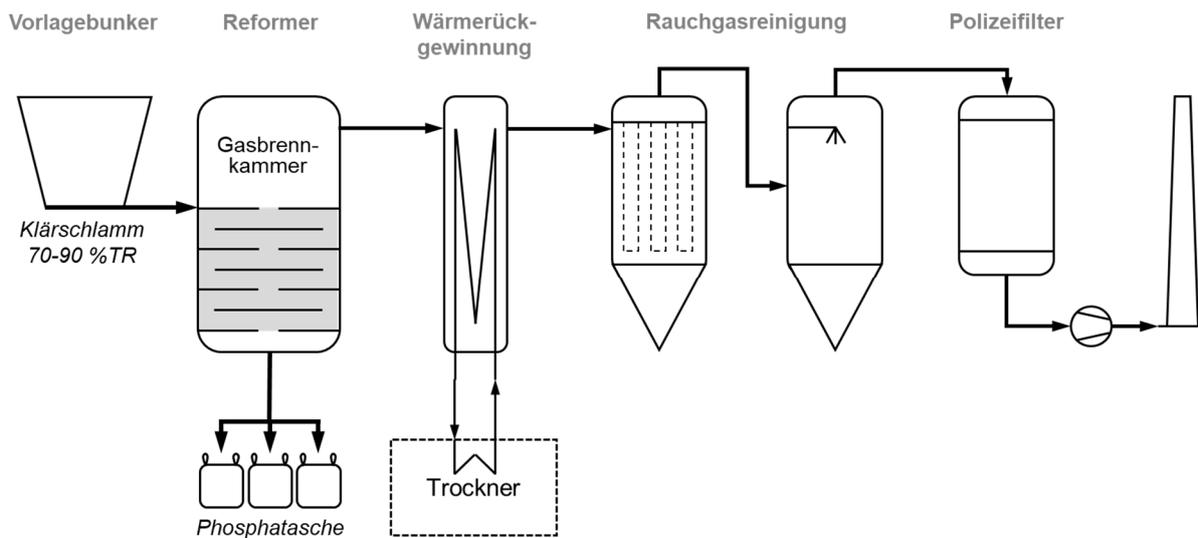


Abb. 6-14: Verfahrenskomponenten der KlärschlammReformer-Anlage (Thermo-System, 2020)

Der mehrstufige Verbrennungsprozess läuft mit dem vorgetrockneten Klärschlamm selbstgänglich und benötigt keine Zufeuerung. Gas wird lediglich für das Anfahren des Reaktors aus dem kalten Zustand benötigt.

Der Annahmebunker kann per Radlader oder mit einer Förderschnecke beschickt werden und verfügt über eine Aufnahmekapazität von etwa 3 Tagen, so dass ein Betrieb über Wochenende ohne Nachbeschickung möglich ist. Aus dem Bunker wird der Schlamm mit Förderschnecken zum KlärschlammReformer transportiert, wo die thermochemische Umwandlung des Klärschlammes stattfindet. Die entstehende Asche wird abgekühlt und anschließend für eine weitere Verarbeitung bereitgestellt.

Der KlärschlammReformer sowie die gesamte Peripherie mit Annahmehunker, Rauchgasreinigung und Ascheabsackung werden in einer geschlossenen Halle untergebracht (siehe Abb. 6-14).



Abb. 6-15: KlärschlammReformer, Fa. Thermo-System auf der Kläranlage Renningen (Thermo-System, 2020)

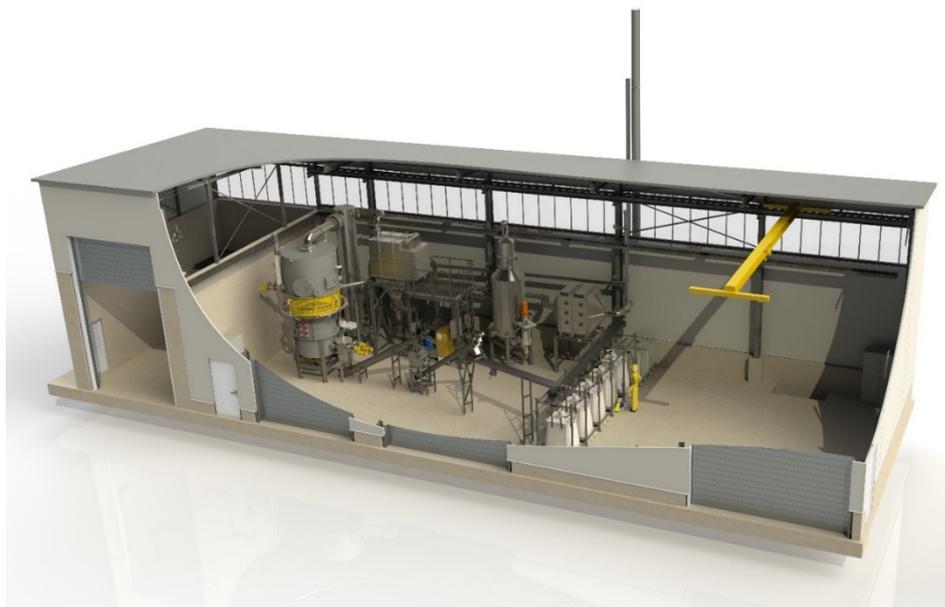


Abb. 6-16: KlärschlammReformer-Halle mit Annahmehunker, Rauchgasreinigung und Big-Bag-Befüllstation, Fa. Thermo-System auf der Kläranlage Renningen (Thermo-System, 2020)

Der aktuell angebotene Baugröße des KlärschlammReformers besitzt eine maximale Feuerungsleistung von ca. 600 kW. Je nach Schlammigenschaften (Feuchtegehalt, Organikgehalt, Heizwert) entspricht dies einer Durchsatzmenge an getrocknetem Schlamm von ca. 1.200 - 2.000 t/a bzw. der Schlammmenge von ca. 50.000 -100.000 EW.

Dem KlärschlammReformer muss eine Trocknungsanlage vorgeschaltet werden, die auf mind. 70 % TM (besser 80-90 % TM) vortrocknet.

Tab. 6-7: Technische Daten der aktuell von Thermo-System angebotenen Baugröße des KlärschlammReformers (Thermo-System, 2020)

KlärschlammReformer-Anlage

Anlagengröße (Einwohnerwerte) *	50.000 - 100.000 EW
Schlammmenge getrocknet Input *	1.200 - 2.000 t/a (ca. 80-90 % TM)
TM-Gehalt *	70 - 90 % TM *)
Organikgehalt des Schlamms *	45 - 60 %TM *)
Heizwert des Schlamms Hu (min.)	7 MJ/kg *)
Feuerungsnennwärmeleistung	600 kW
Aschemenge *	500 - 1.000 t/a *)
Rauchgasreinigung	3-stufig
Gebäudefläche (mit Bunker), ohne Trocknung	300 m ²

*) abhängig von den Schlammeigenschaften

6.5.6 Bewertungskriterien für Verfahren der thermischen Klärschlammbehandlung

Grundsätzlich ist festzustellen, dass Anbieter unterschiedlichster Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung am Markt verfügbar sind. Diese sind in unterschiedlichem Maße skalierbar. Je nach Gesamtsituation kommen sie daher eher für Konzepte in Frage, bei denen die Klärschlämme aus einem größeren Einzugsgebiet zusammengezogen und an einem zentralen Standort behandelt werden (z.B. Wirbelschicht Städtische Werke Energie + Wärme GmbH Kassel), oder auch Konzepte, die sich für den dezentralen Betrieb eignen (z.B. Drehrohr, Staubfeuerung). Aus diesem Grund ist eine von der konkreten Umsetzungssituation einer thermischen Klärschlammbehandlung (und der nachgelagerten Prozessschritte) losgelöste Bewertung nicht machbar.

Grundsätzlich kann unterstellt werden, dass eine Monoverbrennungsanlage für kommunalen Klärschlamm vorzugsweise dann errichtet wird, wenn die Phosphorrückgewinnung nicht aus dem Abwasser oder aus dem Klärschlamm erfolgen soll bzw. kann. Skalierbare und damit potenziell auch dezentral umsetzbare Lösungen bieten für die entsorgungspflichtige Kläranlage den Vorteil einer autonomen vom Entsorgungsmarkt unabhängigen Lösung, die es aber erforderlich macht, die nachgelagerten Prozessschritte mit zu bedenken. Dies sind insbesondere eigene Lösungen zur Realisierung der P-Rückgewinnung aus der Asche (z.B. Aufbereitungs-/Aufreinigungsschritte sofern die Asche nicht als solche bereits die Anforderungen der Düngemittelverordnung einhält). Ferner ist zu beachten, dass Abnahmewege für das Endprodukt selber erschlossen werden bzw. Abnehmer identifiziert werden müssen.

Kriterien, die bei der Wahl der konkreten Strategie und damit der Bewertung geeigneter Technologien eine Rolle spielen sind damit:

- Stoffliche Eigenschaften des Klärschlammes (TM-Gehalt, P-Gehalt, Schadstoffkonzentration)
- Stoffliche Eigenschaften der Klärschlammmasche (insbes. hinsichtlich der Kriterien der Düngemittelverordnung)
- Grad des Bestrebens nach einer autonomen und damit von Annahmepreisen unabhängigen Entsorgungslösung
- Standortverhältnisse / Platzbedarf und Bereitschaft zu Aktivitäten jenseits des Kerngeschäfts Abwasserbehandlung
- Vorhandene Abnehmer für die Asche bzw. Bereitschaft deren Konfektionierung zum Rezyklat in Eigenregie zu übernehmen
- Bereitschaft zum Durchlaufen des genehmigungsrechtlichen Prozesses

6.6 Gas- und staubförmige Emissionen aus der thermischen Klärschlammbehandlung, Emissionsminderung

Gelangen feste, flüssige oder gasförmige Stoffe in die Luft, wird dadurch ihre natürliche Zusammensetzung verändert und es wird von Luftverunreinigung gesprochen. Zum Schutz vor Luftverunreinigungen wurde am 15.03.1974 in Deutschland das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) bzw. die darauf aufbauenden Bundes-Immissionsschutz-Verordnungen (BImSchV) erlassen. Ziel des Gesetzes ist der Schutz von Flora, Fauna und Habitat (Schutzgüter) vor schädlichen Luftverunreinigungen, Geräuschen, Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch den Ausstoß von Rauch, Ruß, Staub, Gasen, Aerosolen, Dämpfen oder Geruchsstoffen.

Grundsätzlich muss in zwei potenzielle Wirkweisen von Luftschadstoffen unterschieden werden. Zum einen in die Emission und zum anderen in die Immission. Nach dem BImSchG sind Emissionen, die von einer Anlage ausgestoßenen Luftverunreinigungen, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und Geräusche. Unter Immission wird die Einwirkung auf den Menschen, das Tier oder die Pflanze nach der Verteilung, dem Transport oder der Verdünnung der Schadstoffe in der Luft, verstanden. (Fritz, Kern, 1990, S. 13 – 18)

Zu den typischen Luftschadstoffen zählen:

- Partikel (Staub)
- Kohlenstoffverbindungen
- Stickstoffverbindungen
- Schwefelverbindungen
- Halogenwasserstoffe
- Organische Schadstoffe

Eine Emissionsminderung ist auf Grundlage primärer und sekundärer Maßnahmen möglich:

Zu den Primärmaßnahmen zählen alle Methoden, mit denen der Verbrennungsprozess beeinflusst wird (z. B. konstruktive Änderung sowie Änderung der Prozessführung). Der Schwerpunkt der Primärmaßnahmen liegt üblicherweise in der Reduktion von Stickstoffoxiden, Kohlenstoffmonoxiden und Kohlenwasserstoffverbindungen.

Bei den Sekundärmaßnahmen handelt es sich um die dem Verbrennungsprozess nachgeschalteten Maßnahmen. Das bedeutet, das Abgas wird mithilfe additiver technischer Maßnahmen gereinigt, ohne die eigentliche Verbrennung zu beeinflussen (Hartmann, H. et. al., 2016). Für die Abscheidung der Emissionen kommen im Sekundärbereich die in der nachfolgenden Tab. 6-8 dargestellten Wirk- und Reaktionsprinzipien zum Einsatz.

Tab. 6-8: Wirk- und Reaktionsprinzipien zur Abscheidung von Schadstoffen in der Abgasreinigung, [Fink, 2019, Darstellung in Anlehnung an: [Löschau, 2014, S. 93]]

Schadstoff	Verfahren	Wirkprinzip
Partikel (Staub)	Zyklon	Fliehkraft
	Filternde Abscheider	Filtration
	Elektroabscheider	Elektrische Anziehungskraft
NO _x	Nassabscheider	Heterokoagulation (Ein- und Anlagerung an Flüssigkeitströpfchen)
	Selektive nichtkatalytische Reduktion (SNCR)	Gasphasenreaktion
	Selektive katalytische Reduktion (SCR)	Heterogene Katalyse (Chemische Adsorption)
HCl, HF, SO ₂ , SO ₃	Nassverfahren	Absorption
	Quasitrockenverfahren	Absorption und Adsorption
	Trockenverfahren	Chemische Adsorption
Organische Schadstoffe, Schwermetallverbindungen	Flugstromadsorber Fest- oder Wanderbettadsorber	Physikalische Adsorption

Durch Zugabe von natrium- oder calciumbasierter Sorptionsmittel lassen sich saure Schadgase wie Chlorwasserstoff (HCl), Schwefeloxid (SO_x) und Fluorwasserstoff (HF) chemisch binden (Chemisorption) (siehe Abb. 6-15).

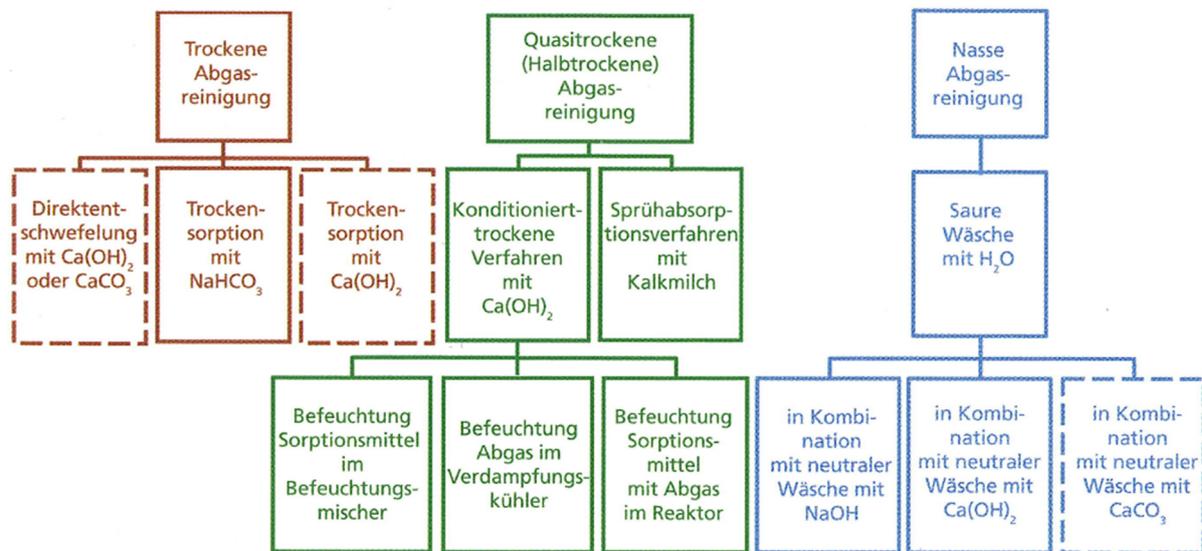


Abb. 6-17: Einteilung der Verfahren zur Minderung saurer Schadgase (Löschau, 2014, S. 233)

Für viele Emissionsminderungsverfahren wird als Sorptionsmittel Kalkhydrat verwendet. Dieses wird durch das Mischen von gemahlenem Branntkalk mit Wasser hergestellt und fällt als trockenes, sehr feines Pulver an. Die Reaktion des Branntkalks mit Wasser ist stark exotherm und wird als Kalklösch bezeichnet.

Das Kalkhydrat wird in das heiße Abgas eingeblasen und im Anschluss über einen Gewebefilter abgeschieden. Die optimale Reaktionstemperatur liegt dabei zwischen 130 – 140 °C. Für eine hinreichende Abscheidung der Schademission wird mit einem Stöchiometriefaktor zwischen 2 bis 3 gearbeitet (Löschau, 2014, S. 297).

Auch bei der trockenen Sorption spielt die hohe Lösungsgeschwindigkeit in wässrigen Lösungen eine wichtige Rolle. Das im Rauchgas enthaltene Wasser bindet um den $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Partikel eine Hydrathülle, wodurch die Reaktionskinetik gegenüber der eben beschriebenen reinen Trockensorption mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ deutlich verbessert wird.

Ein von der Rauchgasfeuchte unabhängiges Behandlungsverfahren für saure Schadgase ist der Einsatz von Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3) als Additiv. Natriumhydrogencarbonat ist als Backtriebmittel bekannt und ein ungiftiger Stoff, der als weißes, geruchloses, kristallines Pulver vorliegt. Für eine effektive Abscheidung ist die Partikelgröße des Korns ausschlaggebend, da hierdurch die für die Reaktion zur Verfügung stehende Kontaktfläche beeinflusst wird.

Die für die Abscheidung erforderlichen Additivmengen liegen nicht viel höher als die benötigte Stöchiometrie, oftmals genügt eine 0,1 – 0,4-fache stöchiometrische Zugabe. (Conrad, Y., Karpf, R., 2014; Löschau, 2014).

6.7 Eigenschaften von virtuellen Klärschlammaschen nach thermischer Umsetzung des Klärschlammes aus dem Einzugsgebiet

Um die Eigenschaften der Asche aus der thermischen Verwertung der Klärschlämme beurteilen zu können, wurde deren Zusammensetzung rechnerisch ermittelt. Es ergibt sich quasi eine virtuelle Asche. Nicht berücksichtigt sind Volatilisierungen einzelner Schadstoffe, insbesondere der Metalle. Ausgangspunkt bildeten die durch die Anlagenbetreiber zur Verfügung gestellten Klärschlamm- und Jahrestonnage, die jede Anlage in eine etwaige Verbrennung einspeisen würde. Anhand des Glühverlustes wurde für jede Anlage die Aschemenge nach vollständiger Mineralisation und deren Elementarzusammensetzung ermittelt. Der Asche-Massenstrom jeder einzelnen Kläranlage dient als Gewichtungsfaktor für die Charakterisierung der Elementarzusammensetzung der virtuellen Mischasche aus der jeweiligen Herkunftsregion.

Berechnung des Gewichtungsfaktors

$$f_i = \frac{(1 - GV_i) \cdot \dot{M}_i^{KS}}{\sum_{i=1}^n (1 - GV_i) \cdot \dot{M}_i^{KS}}$$

f_i = Gewichtungsfaktor Ascheanteil der Anlage i

GV = Glühverlust des Klärschlammes der Anlage i (entspricht dem organischen Anteil der Trockenmasse (oTM))

\dot{M}_i^{KS} = Massenstrom trockener Klärschlamm der Anlage i

Berechnung des Elementgehalts in der Asche der einzelnen Anlagen

$$E_i^{Asche} = (1 - GV_i)^{-1} \cdot E_i^{KS}$$

E_i^{Asche} = Elementgehalt in der Asche der Anlage i

E_i^{KS} = Elementgehalt im Klärschlamm der Anlage i

Berechnung des Elementgehalts in der Asche eines Klärschlammverbundes

$$E_{Region}^{Asche} = \sum_{i=1}^n f_i \cdot E_i^{Asche}$$

Auf Basis der aufbereiteten Analysedaten der Bestandskläranlagen sowie der avisierten Partneranlagen wurde die Zusammensetzung der virtuellen Mischasche berechnet. Die dabei ermittelten Schwermetallgehalte sind relevant für die Weiterverarbeitung der Asche zu einem Düngemittel, denn sie bestimmen, ob die Grenzwerte der Düngemittelverordnung inkl. der Inputhöchstwerte, 2017, sowie der EU-Düngemittelverordnung, 2019, eingehalten werden. Anzumerken ist, dass es sich bei der Berechnung der Ascheeigenschaften um eine worst-case Abschätzung handelt, da davon ausgegangen wird, dass das sämtliche Elemente in der Asche verbleiben und keine Volatilisierungsverluste auftreten.

Die ermittelte Zusammensetzung der virtuellen Asche zeigt Tab. 6-9.

Vergleicht man die virtuellen Aschen mit den Grenzwerten bzw. Höchstwerten der deutschen Düngemittelverordnung, so werden diese bis auf den Parameter Quecksilber sämtlich eingehalten. Vereinzelt Überschreitungen bei letzterem ergeben sich aus dem konservativen Berechnungsansatz, bei dem eine Volatilisierung, wie sie gerade bei Quecksilber auftritt, vernachlässigt wurde. Es ist damit zu erwarten, dass eine Verarbeitung der virtuellen Aschen zu Düngemitteln auf Basis der Klärschlammzusammensetzung nichts entgegensteht.

Da die Grenzwerte der DüMV durchgehend eingehalten sind, ergäbe sich potenziell die Möglichkeit, je nach Düngewirksamkeit bereits für die Asche einen Produktstatus darzustellen. Damit könnte dessen Weiterverarbeitung (z. B. Konfektionierung) evtl. bereits außerhalb des Abfallrechtes erfolgen.

Beim Vergleich der Zusammensetzung der virtuellen Aschen mit der europäischen Düngemittelverordnung muss je nach Einzugsgebiet differenziert werden. Die virtuellen Aschen überschreiten den europäischen Grenzwert für Zink bei Stadt Kassel sowie den Kreisen Fulda und Waldeck-Frankenberg, der Gesamtregion und auch im Fall der bereits vertraglich für eine Verbrennung vorgesehenen Klärschlämme. Beim Parameter Kupfer führt die Verschärfung im europäischen gegenüber dem deutschen Düngemittelrecht zu Überschreitungen bei Stadt Kassel sowie den Kreisen Fulda und Waldeck-Frankenberg und bei den bereits vertraglich für eine Verbrennung fixierten Klärschlämme. Die Aschen der Gesamtregion halten den Grenzwert hingegen ein.

Bezüglich der herkunftsspezifischen P_2O_5 -Gehalte ergibt sich aus der Berechnung der virtuellen Aschen, dass die Gesamtasche NOH dem Kriterium für „Phosphatdünger aus Aschen von Klärschlämmen“ gem. Düngemittelverordnung entspricht (Mindest-Phosphat-Gehalt von 10 % P_2O_5). Für die virtuellen Aschen aus den Landkreisen Hersfeld-Rotenburg und Kassel ist dies nicht gegeben.

Die DüMV sieht nur eine Verwendung von Aschen aus der Verbrennung von naturbelassenen Hölzern vor (BayLfU, 2009). Dies schränkt die o.g. Aussagen für die Untersuchungsregion NOH im Falle einer zentralen Verbrennung bei den Städtischen Werken Kassen nach derzeitigem Stand der Planung ein. Stand der Überlegungen ist hier, künftig kommunalen Klärschlamm zusammen mit Altholz zu verbrennen. Damit wäre eine Verarbeitung der Asche zu einem Düngemittel nach derzeitiger Einschätzung nicht zulässig und unabhängig von der Einhaltung von Höchst- und Grenzwerten ein P-Recycling nur in Form von Phosphorsäure möglich.

Virtuelle Aschen: Ausschöpfung Grenz-, Maximal-, Kennzeichnungswerte, D-DüMV

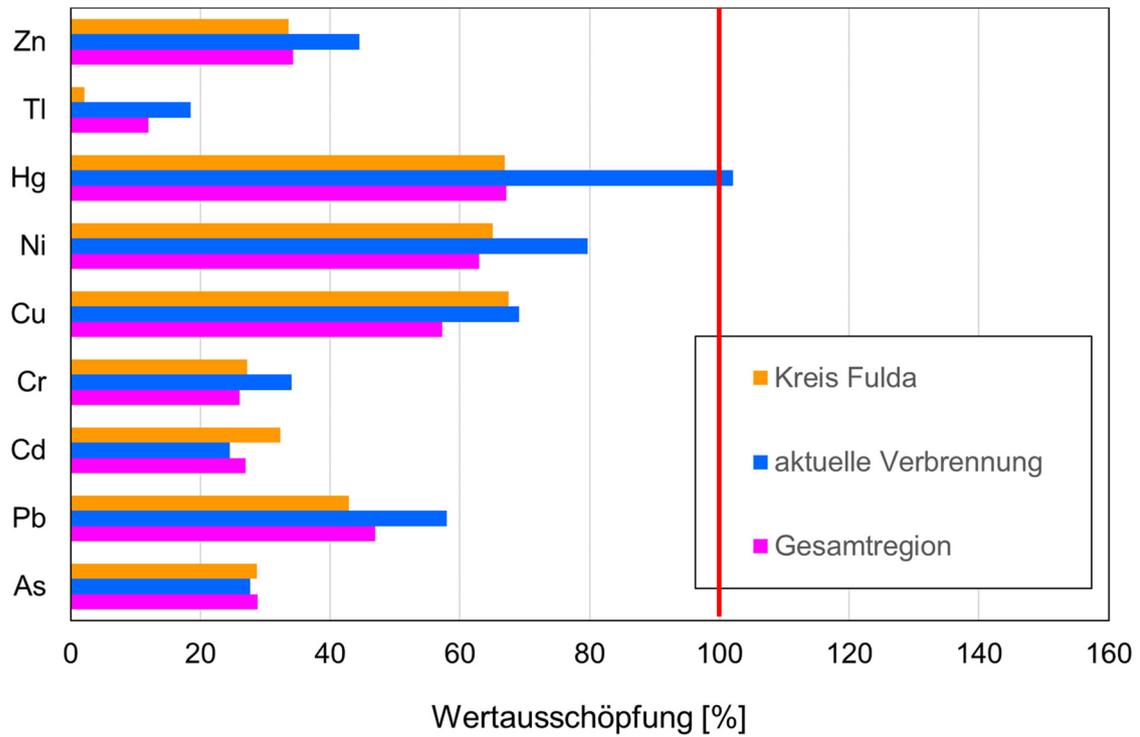


Abb. 6-18: Virtuelle Aschen in der Region NOH (exemplarisch), Ausschöpfung der Grenz-, Maximal- bzw. Kennzeichnungswerte der deutschen Düngemittelverordnung

Tab. 6-9: Zusammensetzung der virtuellen Asche nach Einzugsgebiet (Stadt Kassel, Landkreise), für Gesamt-NOH sowie für die derzeitig vertraglich zur Verbrennung bei den Städtischen Werken fixierten Klärschlämme im Vergleich zu Grenz. bzw. Maximalwerten des deutschen und europäischen Düngemittelrechtes

Herkunft	Masse t TM/a	P %	P₂O₅ %	P₂O₅ kg/kg TM	As mg/kg TM	Pb mg/kg TM	Cd mg/kg TM	Cr mg/kg TM	Cu mg/kg TM	Ni mg/kg TM	Hg mg/kg TM	Tl mg/kg TM	Zn mg/kg TM
Stadt Kassel	1.928,2	8,5	19,5	0,19	15,12	102,5	2,29	128,0	769,5	75,55	1,28	0,27	2.733
Fulda	1.795,1	4,6	10,5	0,11	11,50	64,4	1,70	81,6	608,0	52,08	0,67	0,02	1.677
Hersfeld-Rotenburg	1.199,1	3,7	8,6	0,09	14,33	44,4	0,85	87,3	356,8	37,74	0,54	0,19	1.500
Kassel	1.438,8	4,3	9,9	0,10	7,56	62,5	1,43	53,6	412,0	40,71	0,61	0,03	1.383
Schwalm-Eder	1.641,8	4,5	10,3	0,10	6,43	64,3	1,29	59,0	352,5	44,98	0,48	0,05	1.417
Waldeck-Frankenberg	1.032,5	5,7	13,1	0,13	11,70	85,6	1,81	92,4	728,8	66,31	0,72	0,30	1.941
Schwalm-Eder	1.468,5	4,5	10,3	0,10	6,43	64,3	1,29	59,0	352,5	44,98	0,48	0,05	1.417
NOH gesamt	10.503,9	4,9	11,3	0,11	11,55	70,5	1,53	78,3	515,2	50,42	0,67	0,12	1.714
Aktuelle Verbrennung	2.763,2	6,8	15,6	0,16	11,06	87,0	1,92	102,1	622,3	63,73	1,02	0,19	2.227
Grenz-/Max. Wert DüMV					40	150	50	300	900	80	1	1	5.000
Grenz-/Max. Werte EU						120	mg/kg P₂O₅	-	600	100	1	-	1.500

7 Chemische Zusammensetzung und Beschreibung der P-Rezyklate aus den aktuell wichtigsten Rückgewinnungsverfahren

Weltweit erfolgt die mineralische P-Düngung mit den in der Tab. 7-1 aufgeführten mineralischen P-Düngemitteln. Diese Düngemittel werden hier kurz vorgestellt, um die nachstehenden Ausführungen über die P-Rezyklate aus den aktuell wichtigsten Rückgewinnungsverfahren nachzuvollziehen.

Tab. 7-1: Zusammenstellung der wichtigsten aktuell gehandelten mineralischen P-Düngemittel

P-Düngertyp	Name	Bindungsform	Nebenbestandteile	Gesamt-P Konzentration in % P ₂ O ₅
nicht-aufgeschlossen	Weicherdiges Rohphosphat	Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH, Cl, F	Kalk, Mikro-nährstoffe	16-32
teil-aufgeschlossen	Novaphosphat	50% Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH 50% Ca(H ₂ PO ₄) ₂		
voll-aufgeschlossen	Superphosphat	Ca(H ₂ PO ₄)	Gips	18
	Tripelsuperphosphat	Ca(H ₂ PO ₄)		46
	Mono-Ammoniumphosphat	NH ₄ H ₂ PO ₄	Ammonium	46
	Di-Ammoniumphosphat	(NH ₄) ₂ H ₂ PO ₄	Ammonium	46
	Di-Calciumphosphat	CaHPO ₄		

Bei den nicht-aufgeschlossenen P-Düngemitteln handelt es sich um weicherdiges Rohphosphat, welches so fein vermahlen werden muss, dass mindestens 90% der Partikel einen Durchmesser < 0,063 mm aufweisen. Das Produkt weist im Gegensatz zu den harterdigen Rohphosphaten einen isomorphen Ersatz zwischen Phosphat und Carbonat in der Kristallstruktur auf. Weicherdige Rohphosphate werden hauptsächlich auf Standorten gedüngt, deren pH-Werte unter 5,5 liegen. Sie sind mangels chemischer Behandlung für den Einsatz im ökologischen Landbau zugelassen.

Bei Herstellung der voll-aufgeschlossenen P-Düngemittel Super-, Tripelsuper- sowie Mono- und Diammonium- und Ca Hydrogenphosphat wird das Rohphosphat mit Säuren behandelt. Zur Herstellung von Superphosphat wird Rohphosphat mit Schwefelsäure zu Ca(H₂PO₄) und CaSO₄ aufgeschlossen. Beim Tripelsuperphosphat wird anstelle der Schwefelsäure Phosphorsäure verwendet, um reines Ca(H₂PO₄) herzustellen.

Mono- und Di-Ammonium-Phosphat werden durch Einleiten von NH₃-Gas oder NH₄OH-Lösung in Phosphorsäure produziert:



Dicalciumphosphat erhält man durch Einleiten von Phosphorsäure in Kalkmilch.



Dicalciumphosphat ist zwar nicht wasserlöslich aber dennoch sehr gut pflanzenverfügbar; im Prinzip ist es genauso verfügbar wie wasserlösliches Monocalciumphosphat.

Zu den voll-aufgeschlossenen P-Düngemitteln zählten auch das Thomasphosphat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \times \text{Ca}_2\text{SiO}_4$) ein Beiprodukt der Verhütung von P-reichen Eisenerzen, und das Rhenaniaphosphat ($\text{CaNaPO}_4 \times \text{Ca}_2\text{SiO}_4$). Rhenaniaphosphat (auch Sinterphosphat genannt), wurde früher aus Rohphosphaten mit Zusatz von Soda und Silikat in einem Drehrohrofen thermisch zu einem Ca-Na-Phosphat, welches eine sehr gute Pflanzenverfügbarkeit aufweist, aufgeschlossen. Die Produktion in Deutschland wurde eingestellt.

Bei den teil-aufgeschlossenen P-Düngern wird Schwefel- oder Phosphorsäure unterstöchiometrisch zudosiert, so dass diese P-Düngemittel aus Dicalcium-/Monocalciumphosphat und dem nicht aufgeschlossenem Rohphosphat bestehen.

Phosphor wird von Pflanzen je nach pH-Wert als $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$ (ortho-P), aufgenommen. Im Boden liegt jedoch nur ein sehr geringer Anteil als ortho-P 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 der Kristallinität ab. Weiterhin wird sie durch die Anwesenheit anderer Elemente wie Al, Fe und Ca beeinflusst (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 dominieren anorganische P-Verbindungen mit diesem Elementen, während bei der biologischen P-Elimination überwiegend Polyphosphate vorliegen.

7.1 Löslichkeit von P-Rezyklaten

Die Düngemittelverordnung definiert Qualitätsmerkmale für mineralische P-Düngemittel. Ein Merkmal ist der Gesamt-P-Gehalt der Düngemittel, die mittels Säureaufschluss bestimmt und formal als P_2O_5 angegeben werden. Ein weiteres Merkmal ist die Löslichkeit des Phosphors in verschiedenen Extraktionsmitteln (z.B. 2% Zitronensäure, 2% Ameisensäure, Ammoncitrat-Lösung, Neutral-Ammoncitratlösung oder Wasser). Die Angabe des in Zitronen- und Ameisensäure löslichen Anteils berücksichtigt, dass sowohl Pflanzenwurzeln als auch Mikroorganismen Kohlen-säuren ausscheiden, um P im Boden oder aus Düngemitteln zu mobilisieren.

Allgemein gilt, dass Mono-Calciumphosphat ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) wasserlöslich ist. Dagegen ist Struvit (MgNH_4PO_4) nicht wasserlöslich, aber sehr gut löslich in 2% Zitronen- und Ameisensäure sowie in einer Neutral-Ammoncitratlösung.

Klärschlammaschen weisen aufgrund der apatitartigen Mineralform nur sehr geringe Anteile an wasserlöslichem P auf. Entsprechende P-Rezyklate besitzen jedoch relativ gute P-Löslichkeiten in 2% Zitronen- bzw. Ameisensäure. Ferner ist eine Löslichkeit in einer Neutral-Ammoniumcitratlösung vorhanden, wobei letztere gem. Vogel et. al. (2017) und Kratz et. al. (2019) die Pflanzenverfügbarkeit nicht unbedingt richtig charakterisiert.

Generell handelt es sich bei den Löslichkeitsuntersuchungen handelt es sich um statische Methoden, welche die komplexen Wechselwirkungen zwischen Nährstoff, Boden und Pflanzenwurzel nur begrenzt abbilden. Zudem variiert die Korngröße der Rezyklate und damit die P-Löslichkeit auch herstellungsbedingt.

Die Abb. 7-1 bis Abb. 7-4 fassen Ergebnisse von Kratz, Adam und Vogel (2018) zur Löslichkeitsverschiedener P-Rezyklate auf Basis zahlreicher Literaturangaben zusammen. Unabhängig vom verwendeten Lösemittel weisen die Werte der Rezyklate in der Produktgruppe, wie auch im Vergleich untereinander, eine hohe Spannweite auf.

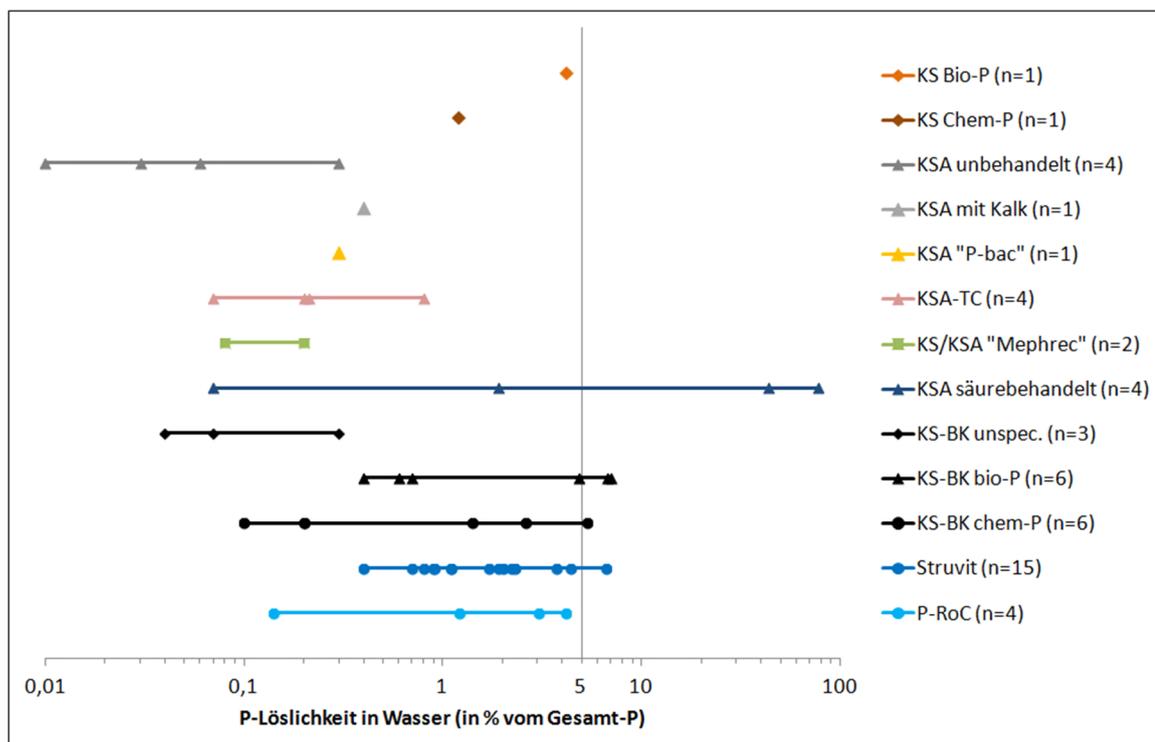


Abb. 7-1: P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Wasser (Kratz, Adam, Vogel, 2018)

Die Wasserlöslichkeiten aller untersuchten Klärschlämme, P-Rezyklate und Aschen sind (mit Ausnahme der mit Säure aufgeschlossenen Aschen) gering. Die Abb. 7-2 zeigt, dass, dass im Vergleich zu unbehandeltem Klärschlamm die P-Löslichkeiten der untersuchten Rezyklate in Neutralammoniumcitrat (NAC) etwas geringer sind. Eine hohe Spannweite der Ergebnisse, auf insgesamt mittlerem bis hohem Niveau, weisen auch die P-Löslichkeiten der untersuchten Rezyklate in Zitronensäure auf (siehe Abb. 7-3). Dieses gilt auch für die Werte innerhalb einer Produktgruppe. Methodische Schwierigkeiten bestehen bei der Zitronensäurelöslichkeit insofern als mehrbasische Ca-Phosphate wie Whitlockit in Lösung gehen, obwohl sie nachweislich nicht pflanzenverfügbar sind.

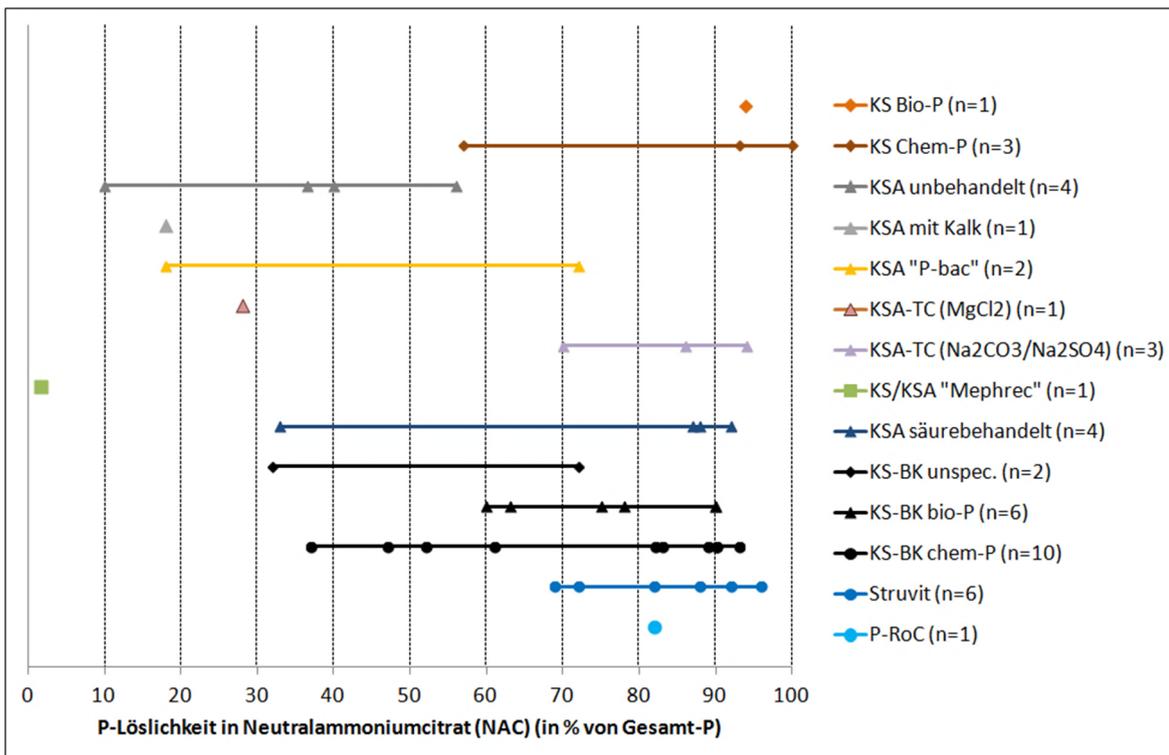


Abb. 7-2: P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Neutralammoniumcitrat (Kratz, Adam, Vogel, 2018)

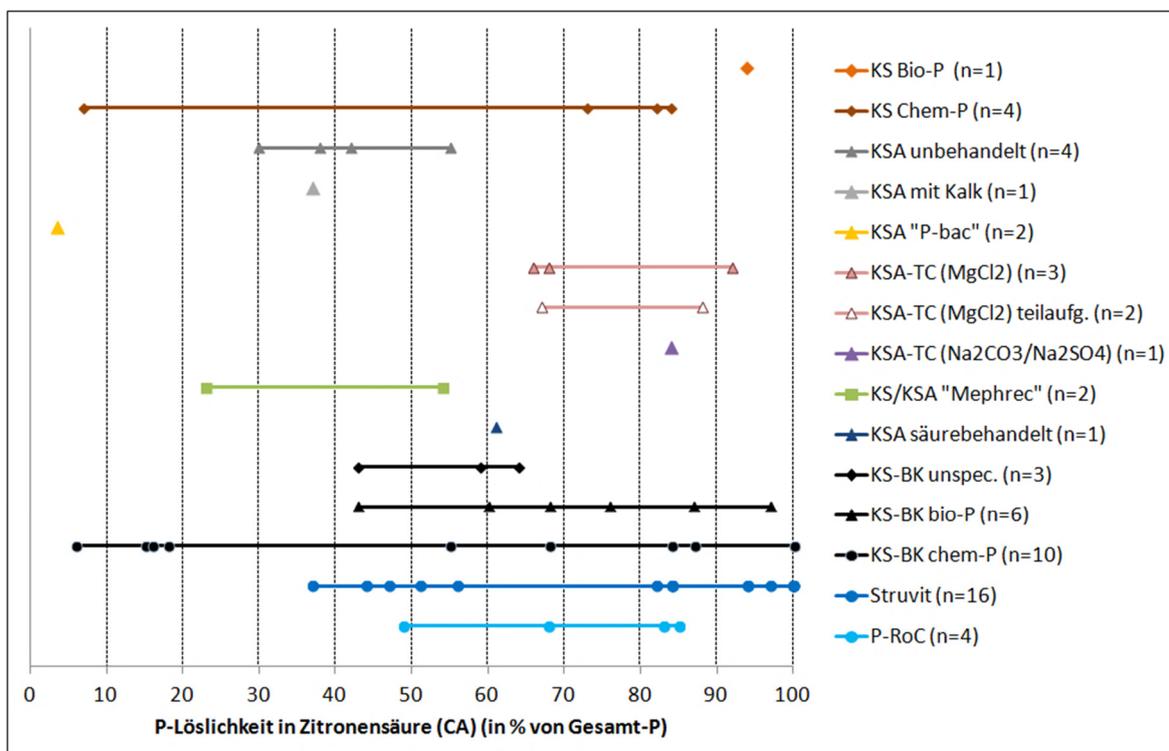


Abb. 7-3: P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Zitronensäure (Kratz, Adam, Vogel, 2018)

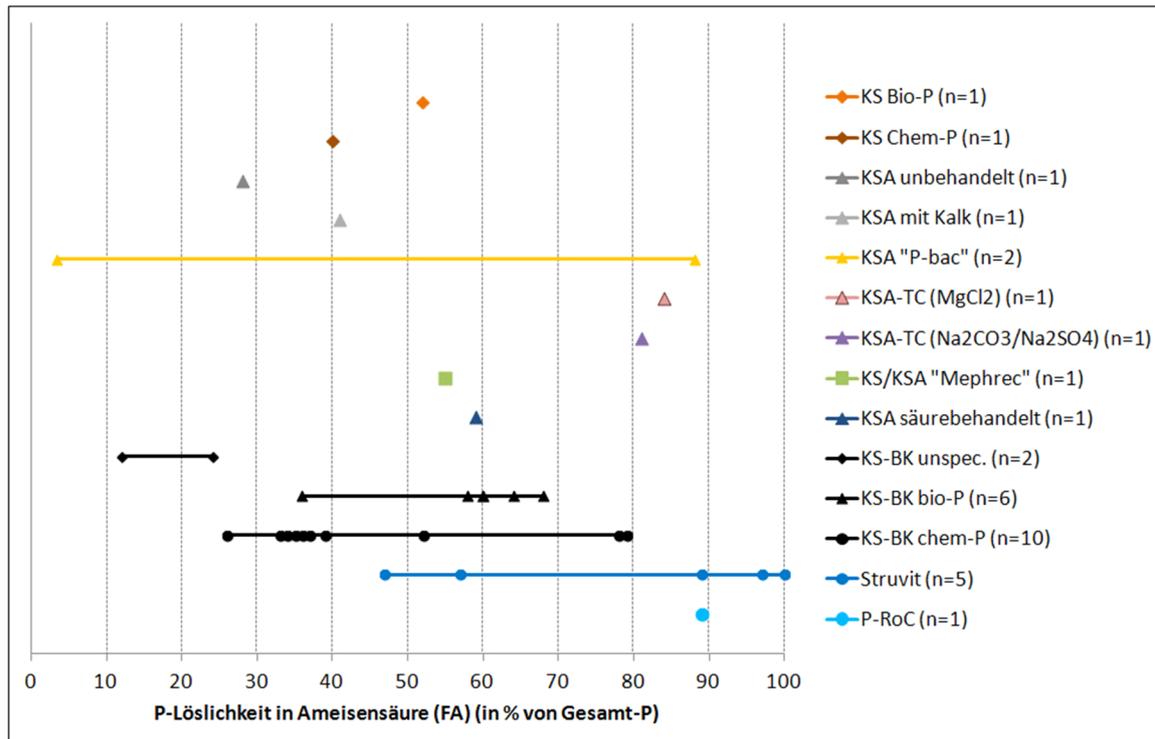


Abb. 7-4: P-Löslichkeit verschiedener Rezyklate in Ameisensäure (Kratz, Adam, Vogel, 2018)

Bei allen Extraktionsmitteln ist eine große Spannweite der Ergebnisse festzustellen, selbst innerhalb eines Rezyklattyps. Die Gründe liegen zum einen in der zeitlichen und räumlichen Variabilität des Klärschlammes und zum anderen in den sich stetig verändernden Produktionsbedingungen durch die Weiterentwicklung der Behandlungsverfahren.

In Versuchen im Institut für Pflanzenernährung der Justus-Liebig-Universität Gießen wurde die Gesamt-P Konzentration sowie die relativen P-Löslichkeiten von zwei verschiedenen Klärschlamm-maschen untersucht. Die Produkte wiesen eine relativ geringe P-Konzentration auf, zeigten einen vernachlässigbar geringen wasserlöslichen P-Anteil und auch die relative Löslichkeit in den angewandten Extraktionsmitteln war gering. Dies spiegelte sich in der Wirkung auf das Pflanzenwachstum wieder.

Ein Maß für die Pflanzenverfügbarkeit ist auch die relative Ausnutzung des gedüngten Phosphats (s. Kapitel 7.2). Diese beträgt bei Tripelsuperphosphat 38%, bei den genannten den Klärschlamm-maschen lediglich 3% bzw. 6%. Diese Ergebnisse standen im Einklang mit dem in Ameisensäure löslichen P-Anteil. Dieser Befund legt nahe, dass die einfache Klärschlammverbrennung keine Produkte erzeugt, die Phosphor in einer pflanzenverfügbaren Form enthalten

7.2 Agronomische Effizienz von P-Rezyklaten

Der Begriff P-Verfügbarkeit umfasst die unterschiedlichsten Prozesse im System Boden-Mikroorganismen-Düngemittel-Pflanze, die dazu führen, dass in diesem System Pflanzen in ausreichendem Umfang mit Phosphor ernährt werden. Unter Verfügbarkeit versteht man eine chemische,

physikalische und biologische Verfügbarkeit von Phosphor im Boden. Dieses bedeutet, dass durch physiko-chemische und biologische Prozesse der in den verschiedenen Formen gebundene Phosphor zu HPO_4^{2-} bzw. H_2PO_4^- umgewandelt wird, um so von Pflanzen und Mikroorganismen aus der Bodenlösung aufgenommen zu werden (Abb. 7-5).

Die Freisetzung von Phosphat aus den verschiedenen Fraktionen in die Bodenlösung erfolgt über Austausch-, Lösungs- und Mineralisationsprozesse. Entscheidend für die P-Verfügbarkeit ist die Rate mit der das Phosphat in die Bodenlösung bzw. an die Wurzeloberfläche der Pflanze transportiert wird. Sie wird neben dem Stoffbestand des Bodens und dem Gefügebau des Bodens auch durch die Witterungsbedingungen beeinflusst.

Neben den o.g. chemischen Extraktionsverfahren bietet sich die sog. relative agronomische Effizienz (RAE) zur Charakterisierung der Düngewirkung von Rezyklaten an. 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 Tripelsuperphosphat, herangezogen.

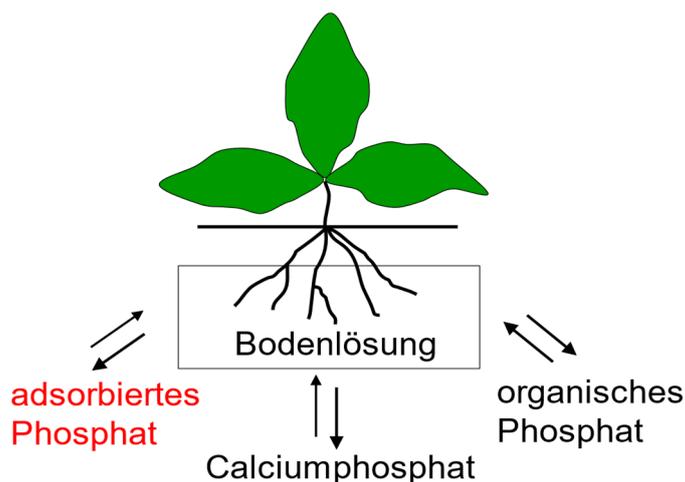


Abb. 7-5: Komponenten der Phosphatdynamik im Boden

Auch die RAE von P-Rezyklaten weist eine hohen Spannweite auf; dies gilt selbst innerhalb der einzelnen P-Rezyklat-Typen (Abb. 7-6 und Abb. 7-7).

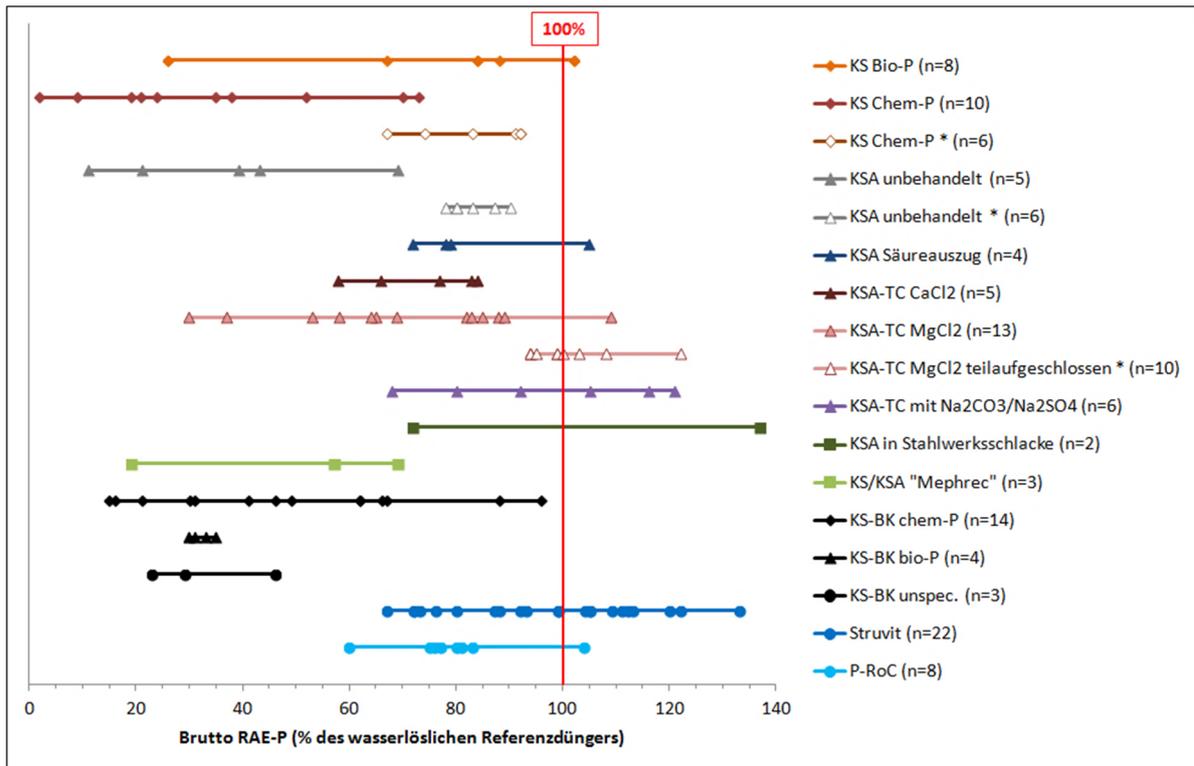


Abb. 7-6: Relative agronomische Brutto-Effizienz (Brutto RAE-P) verschiedener P-Rezyklate (% des wasserlöslichen Referenzdüngers) (Kratz, Adam, Vogel, 2018)

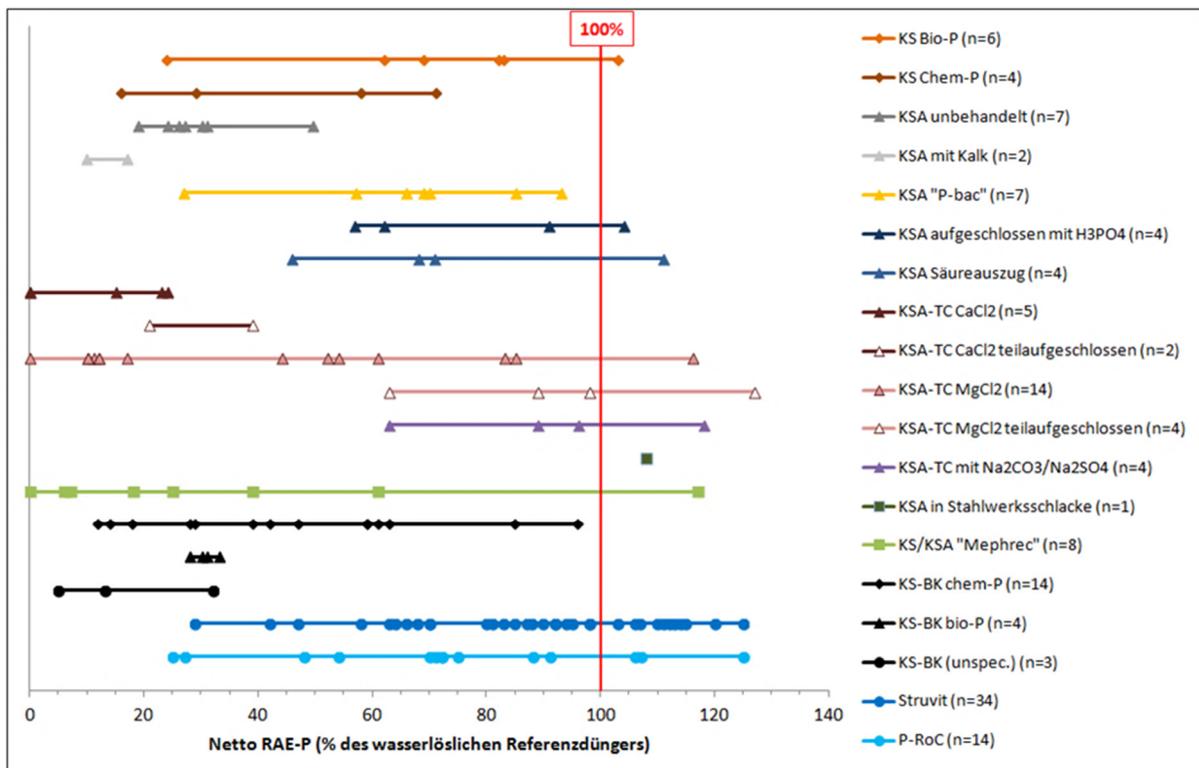


Abb. 7-7: Relative agronomische Netto-Effizienz (Netto RAE-P) verschiedener P-Rezyklate (% des wasserlöslichen Referenzdüngers) (Kratz, Adam, Vogel, 2018)

Bereits das Ausgangsmaterial Klärschlamm weist eine erhebliche Spannweite der Ergebnisse auf. Schlämme aus Kläranlagen mit chemischer Fällung weisen erwartungsgemäß eine geringere Düngewirkung auf als solche aus Anlagen mit vermehrter biologischer P-Elimination.

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 Düngeneffizienz auf. Erst durch eine thermochemische Nachbehandlung der Aschen (bei etwa 1.000 °C) mit $MgCl_2$, Na_2CO_3 oder Na_2SO_4 oder durch chemischen Aufschluss der Asche mit Mineralsäuren (z.B. H_3PO_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). Ebenfalls zu einer Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit bis in den Bereich der thermochemisch behandelten Aschen führt eine Behandlung von Klärschlammaschen durch Säureaufschluss.

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. Nach Steckenmesser, Vogel und Steffens (2016) ist die Pflanzenverfügbarkeit von Rezyklaten aus Pyrolyseprozessen maßgeblich vom Ausgangsklärschlamm abhängig, da die dort enthaltenen Phosphate (Aluminium-, Eisen- oder Calciumphosphate) nur wenig verändert werden.

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 Düngeneffizienzen 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).

7.3 Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit der P-Rezyklate

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie für den Klärschlammverbund Region Schlitz wurden Verbrennungsversuche mit verschiedenen Technologien durchgeführt und die dabei erzeugten Rezyklate im Rahmen von Ertragsuntersuchungen geprüft (Abb. 7-8). Bewertet wurde die Qualität der Rezyklate für die Nutzung als Vorprodukt in der Düngemittelindustrie, deren direkte Anwendung als Düngemittel sowie für die Produktion von Recycling-Phosphorsäure für die chemische Industrie.

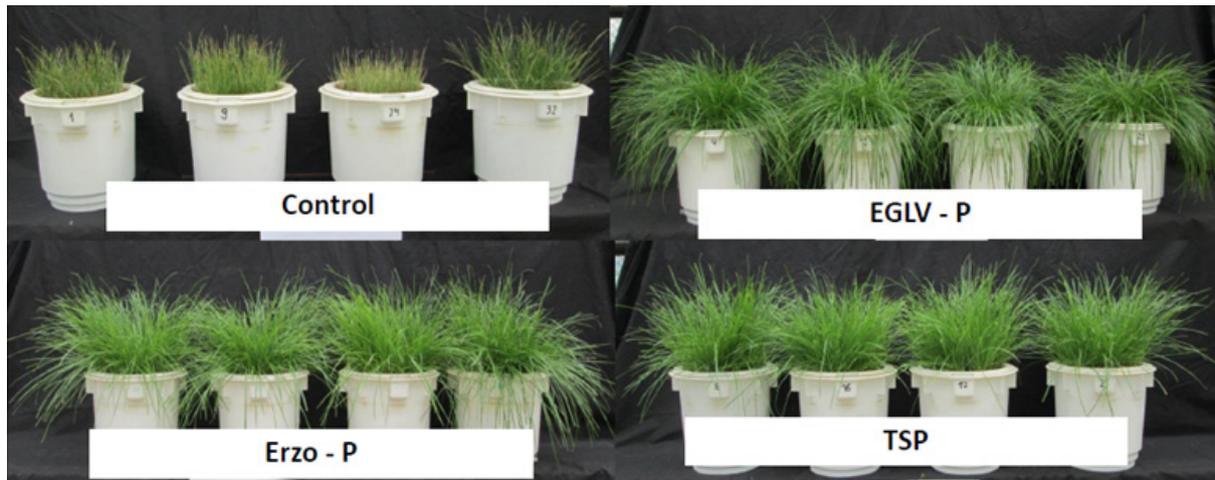


Abb. 7-8: Gefäßversuche zur Bewertung der Pflanzenverfügbarkeit
(Steffens, Phosphor-Dialog des HMuKLV, Gießen, 25.10.2019)

Die Ertragsversuche erfolgten in Klimakammern des Instituts für Pflanzenernährung der Justus-Liebig-Universität unter definierten Bedingungen mit Weidelgras mit zwei verschiedenen Boden-substraten:

- einem sehr nährstoffarmen Sandboden (Standard-Boden) zur Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen z.B. des LHL sowie
- einem speziellen Substrat, welches an der Universität Bonn (Prof. Dr. Goldbach) für Standard-Versuche entwickelt wurde (sog. HGoTech-Substrat, Mischung aus Sand und Vermiculit (Schichtsilikat aus der Mineralklasse der „Silikate und Germanate“, gehört zu den Tonmineralen).

Eingesetzt wurden vermahlene Rezyklat-Proben, deren Gesamt-P Gehalte in der Originalsubstanz bei Anlage der Düngeversuche berücksichtigt wurden. Die P-Düngung betrug einheitlich 75 mg P/kg Boden bzw. Substrat der Firma HGoTECH. Da der Versuchsboden relativ viel CAL-extrahierbares Phosphat enthielt (0,8 mg P/100 g Boden) wurde dieser Boden mit Quarzsand im Verhältnis 1:1 gemischt. Ferner wurde dieses Boden/Sand-Gemisch mit kohlensaurem Kalk auf einen pH-Wert (CaCl_2) von 6 aufgekalkt.

Wichtige Kenngrößen zur Charakterisierung der chemischen Verfügbarkeit der Klärschlammrezyklate sind in der Tab. 7-2 aufgeführt.

Tab. 7-2: Gesamt-Phosphat-Konzentrationen sowie absolute und relative P-Konzentrationen in 2%iger Zitronensäure und Neutralammoniumcitrat-Lösung von Klärschlamm und Verbrennungsaschen sowie die Gesamt-Eisen-Konzentration in den Rezyklaten aus Klärschlamm

Rezyklat Herkunft	P _{total} (=100 %)	in 2%iger Zitronensäure lösliches P	in Neutral-Ammonium- citrat lösliches P	Fe-Gehalt der Asche
	% P in der Originalsubstanz			g Fe / kg
Klärschlamm (Schlitz)	2,05	1,65 (= 80,5%)	2,27 (= 110,7%)	39,6
Verbrennungs- asche ohne Addi- tiv (Schlitz)	6,50	3,14 (= 48,3%)	4,45 (= 68,5%)	101
Verbrennungs- asche (Schlitz) mit Additiven + 2,25% MgCl₂	6,63	4,67 (= 70,4%)	5,41 (= 81,6%)	101
Verbrennungs- asche (Schlitz) mit Additiven +2,25 Poly-Chlorid	6,63	3,97 (= 59,9%)	4,49 (= 67,7%)	101
Verbrennungs- asche GRU/AS,	7,03	4,67 (=66,4%)	5,67 (= 80,7%)	74,5
Verbrennungs- asche KA REN/AS	5,67	5,67 (= 100%)	4,32 (= 76,2%)	122

Mit den aufgeführten Produkten wurden Gefäßversuche zur Ermittlung der Düngewirksamkeit angesetzt. Die Untersuchung erfolgte vergleichend zu mineralischen Handelsdüngern (Rohphosphat (Hyperphos), Ca(H₂PO₄)₂) sowie hinsichtlich der Abhängigkeit der Düngewirkung vom Bodensubstrat in den folgenden Versuchsvarianten:

- Variante 1: P0, Kontrolle, keine Phosphordüngung
- Variante 2: Rohphosphat (Hyperphos)
- Variante 3: Ca(H₂PO₄)₂ Calciumdihydrogenphosphat
- Variante 4: Verbrennungasche KA Schlitz, ohne Additive
- Variante 5: Verbrennungasche KA Schlitz, plus 2,25% MgCl₂
- Variante 6: Verbrennungasche KA Schlitz, plus 2,25% Polychlorid
- Variante 7: Verbrennungasche KA GRU/AS, P-Fällung mit Aluminium
- Variante 8: Verbrennungasche KA REN/AS, P-Fällung mit Eisen

Neben Phosphat wurden alle anderen Pflanzennährstoffe im Optimum gedüngt. Die Inkubation erfolgte zunächst bei 60% der Wasserhaltekapazität, um dann auf 40% der Wasserhaltekapazität abzutrocknen. Danach erfolgte die Aussaat von Weidelgras (*Lolium multiflorum* L, cv. Zebu).

Infolge der P-Düngung stieg das CAL-extrahierbare Boden-P an, wobei die deutlichste Zunahme in der TSP-Variante ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) zu verzeichnen war. Die Prüfprodukte wirken auf das CAL-extrahierbare Boden-P sämtlich besser als Rohphosphat. Dies ist ein erstes Indiz dafür, dass die thermische Umsetzung des Klärschlammes unter den konkreten Bedingungen zu einer Verbesserung der P-Verfügbarkeit führte.

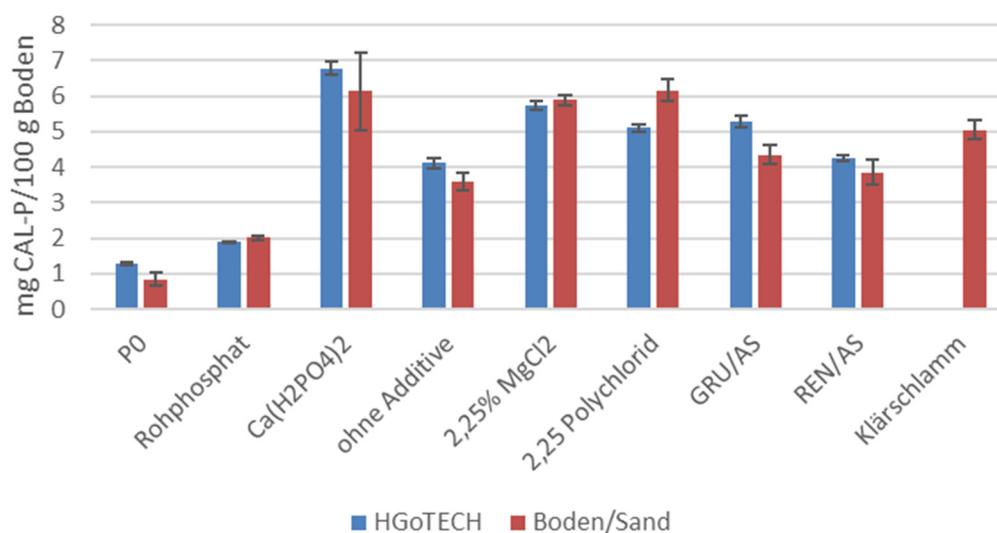


Abb. 7-9: CAL-lösliches P in Bodenproben nach der Keimung des Weidelgrases in Abhängigkeit von Düngungsvariante und Bodensubstrat. Varianten „ohne Additive“, „2,25 % MgCl_2 “ und „2,25 % Polychlorid“: Verbrennungssasche aus Klärschlamm Schlitz; Varianten weitere Verbrennungssaschen „GRU/AS“ und „REN/AS“

Die Pflanzen wurden 3 mal geschnitten, um die Biomassenproduktion und die Wirksamkeit der Recycling-Phosphate im Vergleich zu herkömmlichen P-Düngern sicher bestimmen zu können. In der Abb. 7-10 ist die Summe der Trockenmasseerträge aus den drei Weidelgrasschnitten dargestellt. Wie erwartet, wurde auf dem HGoTECH-Substrat und dem Boden/Sandgemisch der höchste Ertrag in der $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ -Variante erzielt, wobei die Erträge auf dem Boden/Sandgemisch höher ausfielen als auf dem HGoTECH-Substrat. Eine Ursache könnte der höhere pH-Wert des letzteren sein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die unterschiedliche Löslichkeit des in den Rezyklaten gebundenen P besser in den auf dem HGoTECH-Substrat erzielten Erträgen widerspiegelt als in dem Boden/Sandgemisch.

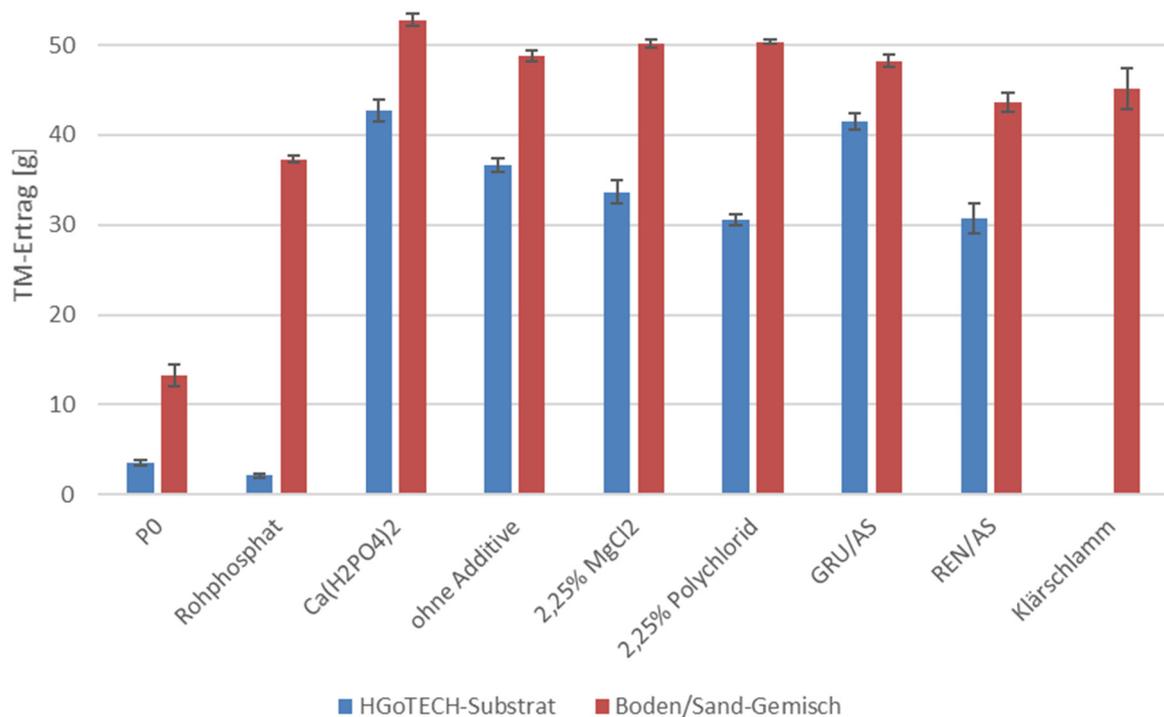


Abb. 7-10: Einfluss der Phosphor-Düngung (75 mg P/kg Substrat) auf die in drei Schnitten erzielte Sprosstrockenmasse (g TM/Gefäß) von Welschem Weidelgras in Abhängigkeit von Düngungsvariante und Bodensubstrat. Varianten „ohne Additive“, „2,25 % MgCl₂“ und „2,25 % Polychlorid“: Verbrennungsasche aus Klärschlamm Schlitz; Varianten weitere Verbrennungsaschen „GRU/AS“ und „REN/AS“

Der Grad der Phosphornutzung in Abhängigkeit von der Düngungsform wurde anhand der die apparenten Düngeeffizienz $aPDE$ berechnet. Diese ergibt sich aus dem Quotienten der zugegebenen und netto in die Biomasse aufgenommenen P-Menge. Die Ergebnisse zeigten, dass unabhängig vom Verbrennungsverfahren (mit/ohne Cl-Donatoren) die Düngeeffizienz der Rezyklate deutlich höher war als die einer niveaugleichen Rohphosphatdüngung. Beim Boden/Sand-Gemisch kann sogar von einer vergleichbaren – allenfalls geringfügig niedrigeren – Düngewirkung der eingesetzten Rezyklate im Vergleich zur Düngung mit Ca(H₂PO₄)₂ Calciumdihydrogenphosphat gesprochen werden.

Die Ergebnisse mit dem HGoTECH-Substrat zeigen weitgehend geringere Erträge. In den Gefäßen ohne P-Zugabe konnte fast kein Wachstum festgestellt werden, auch bei Düngung mit Rohphosphat ergab sich nur eine vernachlässigbare Wirkung.

Die in dieser Studie geprüften Rezyklate zeigten in beiden Bodensubstraten eine deutliche Wirkung auf das Wachstum und die P-Aufnahme von Weidelgras. Diejenigen Rezyklate, die unter Zugabe von MgCl₂ bzw. Poly-Chlorid (50% aus HCl und 50% aus MgCl₂) hergestellt wurden, zeigten im HGoTECH-Substrat eine verminderte, im Boden/Sand-Gemisch jedoch eine gesteigerte Düngeeffizienz.

Insgesamt weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die Verbrennungaschen aus Sicht der Pflanzenernährung durchaus einem Kalkdüngemittel als P-Quelle zugemischt werden können (erdfeuchte Kalkdüngemittelkette). Die Düngewirksamkeit dieses Produktes wäre jedoch idealerweise erneut zu prüfen.

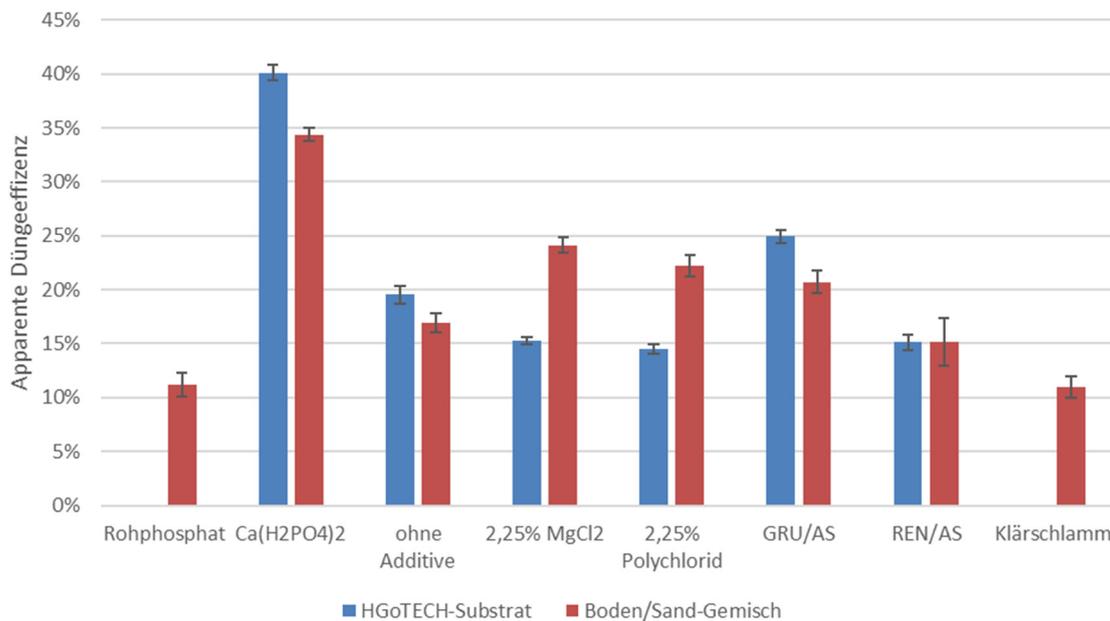


Abb. 7-11: Abhängigkeit der apparenten Düngeneffizienz für Welsches Weidelgras in Abhängigkeit von der Düngungsvariante und dem Bodensubstrat.
Varianten „ohne Additive“, „2,25 % MgCl₂“ und „2,25 % Polychlorid“: Verbrennungsasche aus Klärschlamm Schlitz;
Varianten weitere Verbrennungaschen „GRU/AS“ und „REN/AS“

Die Ergebnisse der Wachstumsversuche mit den beiden Aschen GRU/AS und REN/AS lassen den Rückschluss zu, dass eine Phosphat-Fällung nur mit Eisensalzen (bei REN/AS Eisen-III-Chlorid) zu einer insgesamt schlechteren Phosphor-Verfügbarkeit führt. Die Ergebnisse mit der Asche REN/AS mit einem Aluminium-Eisen-gefällten Schlamm sind deutlich besser. Weiterhin könnte die höhere Verbrennungstemperatur dieser Verbrennungsanlage zu einer stärkeren Bindung des Phosphors in der Aschematrix führen. Die chemischen Analysen (Zitronensäure-Löslichkeit und Neutral-Ammoniumcitrat-Löslichkeit ließen hier keine Rückschlüsse zu.

7.4 Schwermetallgehalte und organische Schadstoffbelastung von P-Rezyklaten

Im Klärschlamm 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 sofern keine thermische Zerstörung der Substanzen erfolgt. 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.

7.4.1 Schwermetallbelastungen in Phosphor-Rezyklaten

Eine Kontamination von P-Rezyklaten ergibt sich durch die Schwermetallbelastung in den für die P-Rückgewinnung eingesetzten Klärschlämmen. Hohe Schwermetallkonzentrationen in den Klärschlämmen führen auch zu hohen Schwermetallkonzentrationen in den Rezyklaten (siehe Kap. 3.5).

Die thermischen Verfahren AshDec oder EuPhoRe® nutzen entweder Natriumsulfat, Natriumcarbonat oder Chloride in Form von $MgCl_2$ oder HCl , um Schwermetalle in den thermo-katalytischen Prozessen zu sublimieren. Diese Abreicherung gelingt für einzelne Elemente unterschiedlich gut. Sehr geringe Belastungen weist Calciumdihydrogenphosphat, welches nach dem „ash to phos“ Prinzip aus Klärschlammasche durch Schwefelsäure-Aufschluss und nachgeschalteter Schwermetallfällung mit Sulfid produziert wird, auf. Selbiges kann für die nach dem TetraPhos®- oder dem PARFORCE-Verfahren aus Klärschlammaschen hergestellte Phosphorsäure angenommen werden.

Die Schwermetallgehalte des in der Regel aus Klärschlamm oder Schlammwasser gefällten/kristallisierten Struvits (MAP) sind im Vergleich zu anderen Rezyklaten im Allgemeinen als eher gering einzustufen. Nachteilig ist hier die bei nahezu allen Verfahren zwingende Voraussetzung einer vermehrten biologischen Phosphorelimination (Bogner & Ortwein, 2018) (Adam, 2018).

Unterliegt die Asche keiner weiteren Aufbereitung, so kann insbesondere in Regionen mit geogener Belastung mit einer Schwermetall-Kontamination gerechnet werden. Dies wurde im Rahmen der Berechnung der Zusammensetzung der sog. virtuellen Aschen berücksichtigt (Kap. 6.7 enthalten ist).

7.4.2 Organische Schadstoffe in Phosphor-Rezyklaten

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 und auch Mikro- bzw. Nanoplastik diskutiert. Die Verbrennung von Klärschlamm führt zu deren weitgehenden Eliminierung. Auch im Abschlussbericht des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2015) kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die thermische Behandlung entsprechend den Vorgaben der 17. BImSchV die Gehalte organischer Schadstoffe herabsetzt (Tab. 7-3). Über eine mögliche Neuentstehung von PCDD/F oder PAK in Klärschlammverbrennungsanlagen und bei der thermischen Nachbehandlung der Aschen lieferte diese Studie aber keine Erkenntnisse. So wurden in Klärschlammaschen und auch P-Rezyklaten unterschiedlicher Entstehungs- oder Verfahrensweise organische Schadstoffe gefunden (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015).

Tab. 7-3: Summengehalte an PAK, PCDD/F und dl-PCB (nach den Toxizitätsäquivalenten der WHO bewertet) in Klärschlammaschen im Vergleich zu den (PCDD/F + dl-PCB)-Grenzwerten der Düngemittelverordnung (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015)

Klärschlammasche	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	-	-

Tab. 7-4: 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 (Bayerisches 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 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. 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 %. 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 % (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015).

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.

Auch in die Untersuchung des Landesbetriebs Hessisches Landeslabor „Bestimmung der Pflanzenverfügbarkeit von ausgewählten Recycling-Phosphaten aus Klärschlämmen und Klärschlammaschen“ wurden Einzelproben von Rezyklaten aus den Verfahren einbezogen. 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 (0,10 mg/kg TM bzw. 0,05 mg/kg TM (Schaaf, 2018).

Bezüglich der Neuentstehung organischer Schadstoffe zeigten Untersuchungen von Steckmesser et al. (2018), dass bei der Pyrolyse von Klärschlämmen bei Temperaturen bis ca. 500°C ökotoxikologisch wirksame PAKs gebildet werden können.

7.5 Zusammenfassende Betrachtung zur Düngewirksamkeit und Schadstoffbelastung von P-Rezyklaten

Die Löslichkeiten von P-Rezyklaten schwanken sowohl in Abhängigkeit vom angewendeten Verfahren als 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. Dies gilt auch dann wenn die Zeiträume der Untersuchungen eng zusammen liegen (Umweltbundesamt, 2015).

Auch Kratz, Adam und Vogel (2018) sehen in der Heterogenität der P-Rezyklate, selbst innerhalb einer Gruppe, einen wichtigen Grund für die große Spannbreite der Ergebnisse zur Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit, die möglicherweise auch für die nicht immer signifikante Korrelation zwischen chemischem Lösungsverhalten und Pflanzenaufnahme im Vegetationsversuch verantwortlich ist.

Dennoch lässt sich bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit folgendes feststellen:

- Pflanzenverfügbarkeit nach P-Rezyklatart:
 - MAP/Struvit hoch bis sehr hoch
 - Mg-Phosphate mittel bis hoch
 - Ca-Phosphate gering bis hoch
 - Fe-/Al-Phosphate gering

- Pflanzenverfügbarkeit nach Herstellungsverfahren:
 - Fällungs-/Kristallisationsprodukte mittel bis hoch
 - Klärschlammasche (säurebehandelt) mittel bis hoch
 - Klärschlammasche (Th.-chem., alkalisch) mittel bis hoch
 - Klärschlammasche (Th.-chem., CaCl₂) gering bis mittel
 - Klärschlammasche (unbehandelt) gering

Auch die Schadstoffbelastung der Rezyklate schwankt nicht sowohl in Abhängigkeit von Verfahren und Eingangsstoffes als auch innerhalb der Verfahrens- oder Produktgruppe, wobei viele der untersuchten Proben aus verschiedene Entwicklungsstadien der Verfahren stammen. In jedem Fall spielt aber die Ausgangsbelastung der behandelten Stoffströme für die Belastung der P-Rezyklate eine Rolle.

Zusätzlich zur Einhaltung der verschiedenen Grenzwerte sowie zu Anforderungen bez. der Pflanzenverfügbarkeit fordert der Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 (2018) die Berücksichtigung eines hohen und stabilen P-Gehalts. Ferner sei besonderes Augenmerk auf die Metalle Eisen und Aluminium zu richten. Diese Elemente tragen dazu Phosphor im Boden festzulegen und haben damit einen ungünstigen Einfluss auf die Pflanzenverfügbarkeit.

Die Rezyklate sollten entweder für eine direkte Ausbringung geeignet sein oder eine Mischbarkeit bei der Düngemittel-Konfektionierung gewährleisten. 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 Düngemitteln 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 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.

Alle P-Rezyklate sind für Pflanzen verfügbar. Allerdings ist die Rate der P-Freisetzung aus der Mineralphase in die Bodenlösung unterschiedlich. Reine Klärschlammaschen sind für den direkten Düngeinsatz eher ungeeignet. Struvit sowie Thermo-katalytisch behandelte Aschen aus einer Monoverbrennung sind, sofern schadstoffarm hingegen zur P-Ernährung der Pflanzen geeignet. Die wohl erfolversprechendsten P-Rezyklate sind die sauer aufgeschlossenen Klärschlammaschen (ggfs. mit nachgelagerter Schwermetallabreicherung) bzw. die Phosphorsäure, die mit dem TetraPhos®- oder PARFORCE-Verfahren hergestellt werden.

8 Vermarktung der Phosphor-Rezyklate (Phosphorsäure / Düngemittel), Qualität, Pflanzenverfügbarkeit

Zwingende Voraussetzung für die Schließung des P-Kreislaufs ist, dass die P-Rezyklate am Markt platzierbar sind. Wesentlich dazu ist die chemische und physikalische Beschaffenheit der Rezyklate.

8.1 Verwertung von Phosphorsäure

Saure Extraktionsverfahren wie das TetraPhos®-Verfahren oder das PARFORCE-Verfahren können die in Klärschlammaschen enthaltenen Phosphate zu Phosphorsäure (H_3PO_4) umsetzen. Diese ist ein vielseitig einsetzbares Produkt, mit dem unter anderem auch Düngemittel, wie Mono- und Diammoniumphosphat oder Tripelsuperphosphat, P-haltige Düngertlösungen für die Fertigation (Ausbringen von flüssigen oder wasserlöslichen Düngern) hergestellt werden können. In der Industrie wird Phosphorsäure sehr vielfältig eingesetzt, u.a. zum Phosphatieren von Eisen und Zink. Nach weiterer Aufbereitung kann Phosphorsäure in Lebensmittelqualität produziert werden.

8.2 Verwertung von Fällungsprodukten (Struvit (MAP), Brushit)

Struvit wird z.B. bei dem „Stuttgarter-Verfahren“ hergestellt und kann sehr gut von Pflanzen genutzt werden kann. Damit aber eine gute P-Düngerwirkung erzielt wird, sollte das in den Land- oder Gartenbau abzugebende MAP fein vermahlen werden. Auch Brushit kann direkt als mineralisches P-Düngemittel verwendet werden. Für beide Substanzen gilt, dass sie sowohl als Einzel-P-Düngemittel oder als Mischkomponenten für Mehrnährstoffdünger (NPK +S) eingesetzt werden können.

8.3 Direkte Verwertung von Aschen aus der Klärschlammverbrennung in der Düngemittelindustrie

Dieser Nutzungsweg orientiert sich an der Festlegung der Düngemittelverordnung (DüMV, 2019), Anhang 2, Tabelle 6 Nr. 6.2.3, wonach Aschen aus der Verbrennung von Klärschlamm direkt als Düngemittel in Verkehr gebracht werden dürfen, sofern sie die Anforderungen der DüMV in Bezug auf Schadstoffgehalte erfüllen. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie für die Kläranlage Schlitz wurde diese direkte Verwertung von Aschen in der regionalen Düngemittelindustrie genau betrachtet. Ziel hier war die Herstellung eines Kalk-Phosphat-Düngers. Diese Verwertungsmöglichkeit muss weiter diskutiert und konkretisiert werden. Insbesondere sind folgende Fragen offen:

- genaue Zusammensetzung, insbesondere P-Gehalt und Schwermetallkonzentrationen der Asche
- Status der Asche: Produkt, Vorprodukt, Abfall
- ggf. erforderliche Aufwendungen zum chemischen Aufschluss des Phosphates sowie zur Schadstoffabreicherung
- erforderliche Aufwendungen zur Weiterverarbeitung (z.B. Mahlen)
- erforderliche Aufwendungen zur Konfektionierung (z.B. Einmischung in den Düngekalk)

Als Verbrennungstechnologie kann eine dezentrale Klärschlammverbrennungstechnologie z.B. ein Etagen-Verbrennungsofen oder ein Drehrohrfen eingesetzt werden.

Die Asche würde zu einem regionalen Düngemittel-Produzenten transportiert und dort in die Düngemittelproduktion eingespeist. Die Erfüllung der Auflagen zur Phosphorrückgewinnung gem. AbfKlärV erfolgt durch den Betreiber der dortigen Anlage. Die genehmigungsrechtlichen Erfordernisse am Standort der Verbrennungsanlage erstrecken sich somit auf die Errichtung des Klärschlammaglers, der Trocknungsanlage und der Verbrennung.

Sofern die Anforderungen der Düngemittelverordnung für die Asche eingehalten werden, insbesondere die Grenzwerte für Schadstoffe, könnte bereits für die Asche ein Produktstatus erwirkt werden.

8.4 Aufbereitung von Aschen aus der Klärschlammverbrennung, Fertigung eines verkaufsfähigen Düngers

Dieser Verwertungsweg bedarf eines chemischen Aufschlusses der Asche und Herauslösung des Phosphates aus der Aschematrix und weist die höchste Verarbeitungstiefe auf, da sie in ein verkaufsfähiges Düngemittel mündet. Verfahrenskern ist der saure Aufschluss der Asche, um das darin enthaltene Tricalciumphosphat in eine wasserlösliche und damit deutlich bessere pflanzenverfügbare Form zu überführen. Die Wasserphase wird nach einer Fest-Flüssigtrennung im Kreis geführt, wobei die Option besteht, Schwermetalle auszuschleusen. Der Feststoff wird (bedarfsweise unter Zusatz weiterer Nährstoffträger) granuliert und getrocknet.

Die Verfahren arbeiten vielfach ohne Separation der Aschematrix. Dies bedingt, dass die aus dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammmasche resultierende P-Fracht quantitativ in das Produkt eingebracht wird. Geringfügige Verluste treten allenfalls dann auf, wenn es aus der Produkt-Perspektive erforderlich sein sollte, Feinmaterial zur Unterbindung der Staubproduktion aus dem Prozess auszuschleusen und dessen Rückführung in den Prozess nicht möglich ist.

Eine Umsetzung erscheint derzeit v.a. in zentralen Anlagen sinnvoll, da eine chemietechnische Anlage mit Einsatz und Lagerung größerer Mengen an Chemikalien (v.a. Säure) zu installieren ist, deren Betrieb mit entsprechendem Personalaufwand und der entsprechenden Sicherheitstechnik verbunden ist.

8.5 Anforderungen und Akzeptanz der Phosphor-Rezyklate

Die Produktion von Phosphor-Rezyklaten ist nur sinnvoll, wenn die Produkte anschließend auch verwertet werden können. Hierzu ist eine entsprechende Akzeptanz der P-Rezyklate in der Landwirtschaft erforderlich. Neben der chemischen Qualität der Rezyklate (Schadstoffarmut, Einhalten der Kennzeichnungs- bzw. Grenzwerte der Düngemittelverordnung) und der Pflanzenverfügbarkeit ist dabei vor allem auch das Handling und die Einsatzfähigkeit als Dünger (Streufähigkeit, Ausbringungsbreiten, Kornfestigkeit etc.) von Bedeutung.

8.5.1 Anforderungen der Düngemittelindustrie

Auf dem in 2020 in Frankfurt durchgeführten Forum der Deutschen Phosphor-Plattform DPP e.V. berichtete Heene, M. (2020) als Vertreter eines der größten Produzenten von Düngemitteln in Deutschland (ICL Fertilizers Deutschland GmbH folgende Anforderungen :

- Hoher Nährstoffgehalt.
- Schadstoffgehalt maximal wie vergleichbare Rohstoffe.
- Bevorzugt Rezyklate aus Ca-Fällung.
- Wettbewerbsfähiger Preis.
- Gleichmäßige Verfügbarkeit über das ganze Jahr.
- Gleichmäßige Zusammensetzung, daher Monoverbrennungsaschen zu bevorzugen.
- Bevorzugt Materialien mit Produktstatus (REACH Registrierung).

In der regionalen Düngemittelindustrie besteht Bedarf an eher mittel- bis langfristig pflanzenverfügbaren P-Rezyklaten zur Produktion eines Kalk-Phosphat-Mischdüngers. Die Vermarktung der Produkte für die Landwirtschaft würde wie auch heute schon fast ausschließlich über den Landhandel bzw. Großhandel erfolgen. Der Mengenbedarf kann derzeit noch nicht festgelegt werden. Weitere Anforderungen wurden wie folgt formuliert:

- Die eingesetzten P-Rezyklate aus kommunalem Klärschlamm müssen den Vorgaben des Düngemittelgesetzes entsprechen.
- Die eingesetzten Rezyklate müssen eine hohe Pflanzenverfügbarkeit aufweisen, die durch eine hohe Zitronensäurelöslichkeit und eine mittlere bis hohe Ammoniumcitrat-Löslichkeit charakterisiert wird..
- Das Genehmigungsverfahren zur Zulassung als Düngemittel muss deutlich vereinfacht werden.
- Die P-Rezyklate müssen sich physikalisch mit dem kohlen-sauren Kalk des Unternehmens verarbeiten und in die erdfeuchte Kalkstreu-kette integrieren lassen.
- Die P-Rezyklate (Aschen) müssen vor dem Vermischen mit den Kalken gemahlen werden, um eine hohe Pflanzenverfügbarkeit zu erzielen. Dies kann im Düngemittelwerk erfolgen.
- Das Endprodukt – ein Kalk-Phosphat-Mischdünger – muss sich durch die Landwirte mit ihren vorhandenen Aggregaten gut ausbringen lassen.

8.5.2 Anforderungen der Landwirte

Um die Akzeptanz für den Einsatz von Phosphor-Rezyklaten in der Landwirtschaft zu diskutieren, wurden ebenfalls Gespräche u.a. mit dem Bauernverband geführt. Zudem berichtete Münchhoff, K. (2020) auf dem in Frankfurt durchgeführten Forum der DPP e.V. als praktischer Landwirt und

Vertreter der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft DLG über Anforderungen und Akzeptanz an die in Zukunft auf den Markt kommenden P-Rezyklate. Diese lauten wie folgt:

- Die Rezyklate müssen den Vorgaben der Düngemittelverordnung entsprechen.
- P-Verfügbarkeit für die Pflanzen muss nachgewiesen sein.
- Das Produkt muss granuliert und streubar sein; es darf nicht stauben.
- Das Produkt muss über längere Zeit gleichmäßig in seiner Zusammensetzung sein.
- Die Granulate müssen sich auch im Boden auflösen.
- Der Preis muss marktfähig sein.

Weiterhin sollten P-Rezyklate zertifiziert und gütegesichert werden. Hierfür ist aber zunächst ein Verfahren zu entwickeln, für das Münchhoff die Einrichtung einer Prüfkommision mit Mitgliedern aus Wissenschaft, Herstellern von Phosphor-Rezyklaten, Landtechnik, Landwirten, Landwirtschaftsverbänden und Beratern vorschlägt. Die Prüf- und Qualitätskriterien sollten vergleichbar mit anderen Zertifikaten formuliert werden. Ein RAL-Gütezeichen ist anzustreben.

Sofern diese genannten Anforderungen erfüllt sind, können P-Rezyklate eine bestimmte Akzeptanz finden. Allerdings haben viele Landverpächter immer noch die Klausel in den Pachtverträgen stehen, dass die Flächen nicht mit Klärschlamm oder mit Produkten aus Klärschlamm gedüngt werden dürfen. Diese Klausel trifft auch für manche Abnehmer und Verarbeiter von landwirtschaftlichen Primärprodukten zu.

Als Ergebnis eines Dialoges mit Landwirten kann festgehalten werden:

- Der Bauernverband erwartet Vorbehalte bei der Verwendung von Düngemitteln, bei denen der Ursprung Klärschlamm bekannt und erkennbar ist. Es wurde darauf hingewiesen, dass verschiedene Abnehmer landwirtschaftlicher Produkte die Verwendung von Klärschlamm zu Dünge Zwecken ausschließen.
- Grundbedingung ist die Einhaltung sämtlicher rechtlicher Vorschriften sowie die Zulassung der Produkte als Düngemittel gemäß DüMV
- Es wurde empfohlen, eine Zulassung eines Recycling-Düngers zu erwirken, in der die Herkunft Klärschlamm nicht mehr ersichtlich ist.
- Regionale Aspekte wie z.B. der Hinweis auf die Verwendung regional produzierter Düngemittel scheinen eine untergeordnete Rolle zu spielen. Es wurde zudem auf die Wettbewerbssituation insbesondere mit Wirtschaftsdüngern (Gülle, Gärreste aus Biogasanlagen) hingewiesen, deren Akzeptanz höher als die von Klärschlamm und Produkten aus Klärschlamm liegt.
- Sofern die Recycling-Produkte z.B. durch den Bioland-Verband zur Verwendung in Bioland-Betrieben zugelassen werden, steht nach Auffassung des Kreisbauernverbandes einer Verwendung in der konventionellen Landwirtschaft nichts mehr im Weg.
- Neben der Ertragswirkung sind die Randbedingungen der Ausbringungstechnik zu beachten. In der modernen Landwirtschaft erfolgt die Düngung häufig mit Wurfstreuern. In der

mittleren Leistungsklasse lassen sich damit Arbeitsbreiten von 18 bis 36 m realisieren. Um die Verteilung des Düngemittels mit den Wurfstreuern zu gewährleisten, müssen erforderlichen physikalischen Eigenschaften des Düngers (Kornoberfläche, Kornfestigkeit, Korngrößenspektrum usw.) erfüllt werden. Es ist also erforderlich, dass das Düngemittel entsprechend konfektioniert wird (Granulation). Hier sind entsprechende Aggregate am Markt erhältlich.

- Die Kosten des P-Rezyklats können sich an den Kosten herkömmlicher mineralischer Düngemittel orientieren, sofern die o.g. Bedingungen erfüllt sind

8.5.3 Akzeptanz und Anforderungen gegenüber P-Rezyklaten im Ökolandbau

Der ökologische Ackerbau hat einen großen Phosphor-Bedarf, der derzeit nicht aus nachhaltigen Quellen gedeckt werden kann. Jedes neue Düngemittel, das im Ökolandbau eingesetzt werden darf, muss zunächst sowohl in der EU-Düngemittelverordnung als auch in der EU-Ökoverordnung zugelassen sein.

Im Ökologischen Landbau sind aktuell nur weicherdige Rohphosphate, Thomas- und bestimmte Aluminiumphosphate zugelassen. Ansonsten erfolgt die P-Versorgung der Pflanzen über organische Düngemittel (Stallmist, Gülle, Komposte, Hornmehle, Leguminosensamen usw.). Bislang ist P-Rezyklat für den Ökologischen Landbau zugelassen worden. Es deutet sich aber an, dass Struvit (MAP) in naher Zukunft von Bioland und möglicherweise auch von Naturland zur Düngung zugelassen werden wird. Dazu müssen die endgültigen Entscheidungen auch von der EU noch abgewartet werden müssen.

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 ihr Marktanteil insgesamt. Bioland e.V. sieht auch ein Ziel darin, regionale Rückgewinnungs- und Rezyklierungsstrukturen aufzubauen und damit auch die regionale Wertschöpfung weiter zu stärken.

In einer Studie unter Beteiligung von Bioland e.V. wurden neun potenziell relevante Akzeptanzkriterien in folgender Reihenfolge identifiziert (Jedelhauser, et al., 2015, S. 3):

- **Rechtliche Zulässigkeit:** Der recycelte P-Dünger muss nach EG-Öko-Verordnung zulässig sein und entspricht Bioland-Richtlinien. Kein Einsatz von Recyclingprodukten im Ökolandbau ohne Aufnahme in Positivliste und Überarbeitung der EU-Richtlinien.
- **„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.
- **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.
- Streufähigkeit: Der recycelte P-Dünger kann mit den gängigen Maschinen gut ausgebracht werden.
- Preis: Der Preis des recycelten P-Düngers ist niedrig.
- Image: Durch die Aufklärung der Öffentlichkeit ist eine Akzeptanz der Verbraucher und somit ein positives Image des recycelten P-Düngers erreicht.
- Äußerlich erkennbarer Unterschied zu chemisch-synthetischen Mineraldüngern: Das äußere Erscheinungsbild des recycelten P-Düngers unterscheidet sich von konventionellen Mineraldüngern, wodurch Verwechslungen ausgeschlossen werden.

Der Verband Demeter e.V. positioniert sich derzeit noch zurückhaltend:

„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.“

8.5.4 Anforderungen des Lebensmittelhandels, hier Fa. tegut ... gute Lebensmittel GmbH & Co. KG

Es ist zu erkennen, dass sogar große Discounter-Ketten (z.B. Lidl) vermehrt auf nachhaltig produzierte Lebensmittel Wert legen. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie für Schlitz wurde ein intensiver Dialog mit der Fa. Tegut... gute Lebensmittel GmbH & Co KG, Fulda, geführt, der hier exemplarisch mit eingebracht wird.

Mit rund 290 Supermärkten in 6 Bundesländern vor allem aber in Hessen, Thüringen und Bayern und ca. 6.800 Mitarbeiter/-innen steht tegut... gute Lebensmittel GmbH & Co. KG als regionale Gruppe stellvertretend für den regionalen Lebensmittelhandel mit einem umfangreichen Produktsortiment. tegut ... mit Verwaltungssitz in Fulda orientiert sich lt. Homepage www.tegut.com an 7 Grundprinzipien:

- Natürlichkeit mit ca. 3.800 Produkten, die „im Einklang mit der Natur“ hergestellt werden; viele Produkte sind nach Kriterien von Bioland, Demeter oder Naturland hergestellt.
- Regionalität mit vielen Produzenten aus der Region
- Fairness gegenüber Mitarbeiter/-innen und Produzenten
- Transparenz in Bezug auf die Nachvollziehbarkeit der Produktionsketten
- Verantwortung gegenüber den Produzenten und den Mitarbeiter/-innen
- Entwicklung bei zukünftigen Märkten (Wachstum) und Produkten nur unter Berücksichtigung der Grundprinzipien
- Freude beim Einkaufen und dem Konsum der Produkte

tegut ... erscheint daher für den Absatz von Produkten, die mit einem regional erzeugten Phosphor-Rezyklats hergestellt wurden, interessant. Dies gilt insbesondere bez. der Grundprinzipien Regionalität und Natürlichkeit. Tegut ... wird damit als Schlüsselunternehmen bez. der Frage nach der Möglichkeit oder gar Förderlichkeit der Verwendung des Rezyklats in der Landwirtschaft gesehen.

Anders als der Mühlenverband, Vertreter der Getreidemühlen, der gegenüber einer Düngung mit Sekundärphosphaten (nicht jedoch gegenüber einer Düngung Klärschlamm) aufgeschlossen ist, scheint eine Platzierung von Produkten, die mit Recycling-Phosphat aus Klärschlamm erzeugt wurden, insbesondere von Obst und Gemüse bei tegut... nicht unproblematisch.

Hintergrund ist, dass tegut... von allen Produzenten für frische/s Obst, Gemüse und Kartoffeln eine Zertifizierung nach GLOBALG.A.P. fordert. GLOBALG.A.P. kann bei tegut... nicht ersetzt werden und stellt die Basisanforderung für alle Produkte und Produzenten im Bereich Obst und Gemüse dar. Auch Bioland-, Demeter- oder Naturland-Betriebe als Lieferanten müssen dieser Zertifizierung entsprechen. GLOBALG.A.P. ist auch der Standard an dem sich MIGROS Zürich als Mutterkonzern der tegut ... GmbH orientiert. Dieser Standard schließt für das genannte Produktsegment den Einsatz von bearbeitetem/unbearbeitetem Klärschlamm aus. Insofern ist die Akzeptanz von Produkten bei tegut..., die mit Sekundärphosphat-Düngemitteln aus Klärschlamm produziert wurden, keine politische und keine reine wissenschaftliche Frage, sondern eine emotionale und Systemfrage. Hierbei wird jedoch grundsätzlich ein konservativer Risikoansatz zum Schutz des Kunden gewählt.

GLOBALG.A.P. wurde in 1997, als EUREPGAP, auf Initiative von Einzelhändlern, die der Euro-Retailer Produce Working Group angehörten, ins Leben gerufen, um Sorgen der Verbraucher um Lebensmittelsicherheit, Umweltschäden, sowie um die Gesundheit, Sicherheit und die sozialen Belange von Arbeitern und den Tierschutz zu begegnen und ein Zertifizierungssystem zu etablieren. Die EUREPGAP Standards halfen Erzeugern, europaweite Kriterien für Lebensmittelsicherheit, nachhaltige Produktionsmethoden, soziale Belange von Arbeitern, Tierschutz und verantwortlichen Umgang mit Wasser, Mischfutter sowie Saat- und Pflanzgut einzuhalten. Diese Kriterien sind mittlerweile als „GLOBALG.A.P.“ der **weltweit führende Standard für die landwirtschaftliche Unternehmensführung**, der die Bedürfnisse der Verbraucher auf die gute Agrarpraxis überträgt.

Die Zertifizierung von GLOBALG.A.P.“ erfolgt mittlerweile für folgende Bereiche der landwirtschaftlichen Produktion

- Aquakultur
- Pflanzen
- Landwirtschaftliche Nutztiere
- Zertifizierung der Lieferkette
- Standard für Mischfutterherstellung
- Transport für landwirtschaftliche Nutztiere
- Standard für Vermehrungsmaterial

Dies gilt eben in diesem Kontext besonders auch in der politisch und wissenschaftlich begründeten Forderung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV, 2017/2020) zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm. „Nur weil der Einsatz von Rezyklaten über die Düngemittelverordnung legal ist, ist er noch lange nicht für unsere Produzenten und Lieferanten möglich“ (Frölich, 2020).

GLOBAL G.A.P. selbst zeigte sich grundsätzlich offen gegenüber dem mit einem Sekundärphosphat-Düngemittel verbundenen Nachhaltigkeitsaspekt und signalisierte, die Frage nach dem Einsatz von Phosphor-Rezyklaten in die entsprechenden internen Diskussionen einbringen zu wollen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Befassung mit dem Thema Sekundärphosphat-Düngemittel bei GLOBALG.A.P ein längerer Prozess ist.

Möglicherweise ist der o.g. Wechsel des Systemrahmens geeignet, die Abgrenzung des Sekundärphosphat-Düngemittel vom „Düngemittel aus Klärschlamm“ zu vollziehen.

Es erscheint daher unumgänglich, dass das aus Klärschlamm produzierte Rezyklat sowie die daraus produzierten Düngemittel im Zertifizierungsprozess von GLOBALG.A.P. Berücksichtigung finden und akzeptiert werden.

Der Erfolg des Einsatzes von Sekundärphosphat zur Düngung auch von Obst und Gemüse ist dann auch eine Frage des Marketings. **Der Begriff „Klärschlamm“ ist dringend zu vermeiden.** Daher erscheint es besonders wichtig, dass ein Phosphor-Rezyklat als Produkt unabhängig von seiner Herkunft zu platzieren ist.

Ein regionaler Ursprung des Sekundärphosphates ist für tegut... von untergeordneter Bedeutung.

Als Alternative zur Abgrenzung ist eine Produkteinschränkung und damit ein Ausschluss von Obst und Gemüse beim Einsatz von Phosphor-Rezyklaten aus Klärschlamm zu erwägen.

8.5.5 Zusammenfassung, Strategien zur Verwertung des P-Rezyklats in der Düngemittelindustrie, Rückführung des Sekundärrohstoffes in die regionale Landwirtschaft über regionale Düngemittelvermarkter

Rezyklate können bei Erfüllung der o.g. Stakeholder-Positionen regional in der Landwirtschaft verwertet werden. Hierfür ist eine Aufbereitung in ein durch die Landwirte handhabbares Düngemittel durchzuführen. Neben einer Granulation kann auch die Produktion eines Mehrkomponenten-Düngers erfolgen. Die Akzeptanz zum Einsatz von Recyclingprodukten aus Klärschlamm als Sekundär-Düngemittel in der regionalen Landwirtschaft wird wesentlich von folgenden Punkten abhängen:

- Das aus den P-Rezyklaten hergestellte Düngemittel muss zwingend die rechtlichen Anforderungen der nationalen Düngemittelverordnung (DüMV, 2019) sowie der europäischen Düngemittelverordnung erfüllen.
- Das aus den P-Rezyklaten hergestellte Düngemittel muss als Düngemittel bzw. als Grundstoff für die Düngemittelproduktion zugelassen werden.
- Eine Güte-Zertifizierung muss angestrebt werden.

- Der Ursprung Klärschlamm soll weitestgehend nicht erkennbar sein. Klärschlamm sowie Produkte aus Klärschlamm sind immer negativ besetzt.
- Eine hohe Pflanzenverfügbarkeit des Phosphats im P-Rezyklat ist Grundvoraussetzung. Die Pflanzenverfügbarkeit der P-Rezyklate soll eher mittel- bis langfristig sein.
- Eine Konditionierung der P-Rezyklate bzw. der Düngeprodukte für den Einsatz mit herkömmlichen landwirtschaftlichen Maschinen ist erforderlich.
- Es erscheint unumgänglich, dass das aus Klärschlamm produzierte Rezyklat sowie die daraus produzierten Düngemittel im Zertifizierungsprozess von GLOBAL G.A.P., Bioland sowie weiteren Zertifizierungssystemen (GMP+ etc.) Berücksichtigung finden und akzeptiert werden.
- Eine regionale Herkunft und der Einsatz in der Region erscheinen bei Düngemitteln von untergeordneter Bedeutung.
- Die Vermarktung der aus P-Rezyklaten hergestellten Düngemittel sollte über entsprechende Vermarktungsorganisationen (wie z.B. Raiffeisen, örtlicher Landhandel) erfolgen; eine Direktvermarktung sollte der Ausnahmefall bleiben.

Damit hängt der Erfolg der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm im regionalen Umfeld eher an Aspekten der Akzeptanz als an technischen Fragen.

Eine politische Diskussion dieser Aspekte sowie übergeordnete Initiativen zur Zulassung der Rezyklate sowie zur Zertifizierung bei verschiedenen Zertifizierungsagenturen ist unumgänglich.

8.6 Verfahren zur Inverkehrbringung von P-Rezyklaten als Düngemittel

Verknüpft mit der Entlassung aus dem Abfallrecht, müssen Rezyklate den Anforderungen an Düngemittel entsprechen. Die Inverkehrbringung von Düngemitteln ist durch das Düngegesetz, die Düngemittelverordnung (DüMV, 2017) und die EG-Düngemittelverordnung geregelt.

Die EG-Düngemittelverordnung legt hierbei die Bestimmungen für mineralischen Düngemittel fest, die frei in der Europäischen Union gehandelt werden zu dürfen (Siebert, 2010). Für die Betrachtung von Absatz- und Vermarktungsmöglichkeiten von Phosphorrezyklaten in Hessen ist die Inverkehrbringung gemäß DüngG und DüMV zu beachten.

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.

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.

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.“*

Rezyklate müssen neben Anforderungen an Schadstoffgehalte auch einen pflanzenbaulichen, produktions- oder anwendertechnischen Nutzen erfüllen, oder dem Bodenschutz sowie der Erhaltung und Förderung der Fruchtbarkeit des Bodens dienen. Zudem müssen Rezyklate in der Anlage 1 bereits als Ein- (Abschnitt 1) oder Mehrstoffdünger (Abschnitte 2 und 3) gelistet sein.

Tab. 8-1: 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-ammoncitrat-lösliches Phosphat Gesamt magnesiumoxid	Phosphat bewertet als alkalisch-ammoncitrat-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; Fälln 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; Fälln 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.
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

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

Tab. 8-2: 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:

Tab. 8-3: 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 der DüMV 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 gemäß Tabelle 7.4, Ziffer 7.4.3:

Tab. 8-4: 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).

8.6.1 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.

8.6.2 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.

Tab. 8-5: 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 %	-	

8.6.3 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.

Tab. 8-6: 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	Gesamtposphat, davon mindestens 75 % des angegebenen Gehaltes an P ₂ O ₅ in alkalischem Ammoncitrat (Joulie) löslich
4.2.8	Gesamtposphat, davon mindestens 55 % des angegebenen Gehaltes an P ₂ O ₅ in 2 %iger Ameisensäure löslich
4.2.9	Gesamtposphat, 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	Gesamtposphat (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 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.

Tab. 8-7: 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 mineralsäurelöslichem P₂O₅ darf 2 % nicht überschreiten.

8.6.4 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.

8.6.5 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 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.

9 Ausarbeitung verschiedener Szenarien zur Klärschlammverwertung und zum Phosphor-Recycling in Nordost-Hessen

9.1 Übersicht

Aufgrund der Anforderungen der novellierten AbfKlärV, der DüV sowie der DüMV sowie der sich weiter ausprägenden Flächenkonkurrenzen um landwirtschaftlich bzw. bodenbezogen zu verwendende Wirtschaftsdünger, Kompost, Gülle, Gärreste und Klärschlämme wird es in den kommenden Jahren zu einer weiteren Veränderung der Verwertungs- bzw. Entsorgungswege von Klärschlämmen kommen.

Die sich einstellenden zukünftigen Verwertungswege sind kaum vorherzusehen und hängen von vielen verschiedenen Aspekten ab. Auch die weitere Akzeptanz von landwirtschaftlichen Produkten von mit Klärschlamm gedüngten Feldern spielt hier eine sehr wichtige Rolle (siehe Kap. 8.5.4).

Auf Basis der Anlagentypisierung und der Kenntnis der Menge und Qualität der Klärschlämme werden die Technologien zum P-Recycling clusterspezifisch bewertet. Dabei werden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- der P-Rückgewinnungsgrad unter Berücksichtigung der Vorgaben aus der AbfKlärV,
- der Technologiereifegrad und die künftige Entwicklung im Hinblick auf die großmaßstäbliche Realisierbarkeit, insbesondere die Existenz von Referenzanlagen für die Rückgewinnungsverfahren,
- die Qualität der gewinnbaren Rezyklate unter Berücksichtigung der Inputzusammensetzung,
- die Auswirkungen etwaiger Prozesswässer aus dem P-Recycling auf die Rückbelastung der Kläranlage,
- die Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung einer statischen Betrachtung von Jahreskosten (Kapitalkosten sowie Betriebskosten),
- die verfahrensspezifischen Konsequenzen für die Entlassung des P-Rezyklats aus dem Abfallrecht.

Es werden Szenarien betrachtet, die für die zentrale, semizentrale und dezentrale Phosphor-Rückgewinnung in Nord-Ost-Hessen in Frage kommen. Es wird dabei unterschieden in Verfahren, die auf einzelnen Kläranlagen realisiert werden könnten, Verfahren, die nur im Verbund mit anderen im regionalen Umkreis befindlichen Verfahren sinnvoll sind, und Verfahren, die nur im großen Maßstab z.B. für die gesamte Region eingesetzt werden sollten.

Die Betrachtung baut auf dem Status Quo der heutigen Entsorgungs-/Verwertungssituation auf, wie sie in den Fragebögen durch die Kläranlagenbetreiber dokumentiert wurden.

Nachfolgend werden verschiedene Szenarien zur Klärschlammverwertung mit Phosphor-Rückgewinnung bzw. bodenbezogener Verwertung betrachtet.

Szenario 1: Bodenbezogene Verwertung

Szenario 1.1: Nassschlamm

Szenario 1.2: entwässerter Schlamm

Szenario 2: Dezentrale P-Abreicherung aus dem Klärschlamm, Entwässerung und thermische Verwertung in der Mit-Verbrennung (Zementwerk)

Szenario 2.1: mobile Anlage zur P-Abreicherung, Verfahren 1

Szenario 2.2: stationäre Anlage, Verfahren 2

Szenario 3: Entwässerung, dezentrale Trocknung und Monoverbrennung (Drehrohr-ofen), direkte Verwertung der Asche in der Düngemittelindustrie

Szenario 3.1: 6.000 t/a entwässerter Schlamm

Szenario 3.2: 12.000 t/a entwässerter Schlamm

Szenario 4: Entwässerung, dezentrale Trocknung, zentrale thermische Verwertung in der Monoverbrennung Kassel, P-Rückgewinnung aus der Asche

Szenario 4.1: 6.000 t/a entwässerter Schlamm

Szenario 4.2: 16.000 t/a entwässerter Schlamm

Szenario 5: Entwässerung, Transport zur Monoverbrennung Kassel, P-Rückgewinnung aus der Asche

Szenario 5.1: 17.500 t/a entwässerter Schlamm

Szenario 5.2: 8.000 t/a entwässerter Schlamm

In der Region Nordost-Hessen werden nach Aussage der Maschinenringe Waldeck-Frankenberg und Schwalm-Eder zukünftig voraussichtlich deutlich geringere Mengen an kommunalen Klärschlämmen in der Landwirtschaft bodenbezogen verwertet werden können. Nach ersten Abschätzungen wird die bodenbezogene Verwertung um ca. 50 % reduziert werden müssen.

In dieser Studie werden basierend auf den aktuellen Verwertungswegen und -mengen in der Region Nordost-Hessen folgende Veränderungen prognostiziert:

Nassschlämme (aktuell Landwirtschaft)

- 50 % werden auch zukünftig bodenbezogen verwertet (siehe Szenario 1.1)
- 50 % werden zukünftig auf eine P-Konzentration < 2 % abgereichert, anschließend entwässert und in der Mitverbrennung (z.B. Zementindustrie) verwertet. (siehe Szenario 2.1 oder 2.2)

Entwässerte Schlämme (aktuell Landwirtschaft und Landschaftsbau)

- 50 % werden auch zukünftig bodenbezogen verwertet (siehe Szenario 1.2)
- 50 % werden zukünftig in Monoverbrennungsanlagen mit Phosphor-Rückgewinnung aus der Asche verwertet. Diese Schlämme werden entweder über kleinere dezentrale Monoverbrennungs-Anlagen (siehe Szenario 3) oder über große zentrale Einheiten (wie Fernwärmeheizkraftwerk Kassel) verwertet; bei der zentralen Verbrennung werden noch die

Varianten einer dezentralen Vor-Trocknung (Szenario 4) oder der Aufgabe in einer zentralen Trocknung vor der Verbrennung (siehe Szenario 5.2) betrachtet.

Entwässerte Schlämme (aktuell Mitverbrennung)

- Die thermische Verwertung der Schlämme, die aktuell im Fernwärmeheizkraftwerkes Kassel mitverbrannt werden (v.a. die Schlämme des Klärwerks Kassel), werden zukünftig als Schlämme in der Monoverbrennung betrachtet; die Asche der Monoverbrennung wird zukünftig einem P-Recycling unterzogen. (Szenario 5)

Die möglichen Massenströme ab 2029 / 2031 sind in der nachfolgenden Tab. 9-1 aufgeführt.

Tab. 9-1: Mögliche Massenströme zur Verwertung ab 2029 / 2031 im Vergleich mit den aktuellen Verwertungswegen (in t TM/a)

Kreis-Nr.	Kreis	Klärschlammverwertung 2017-2019 sowie ab 2029/2031 (t TM/a)										KS-Vererdung
		bodenbezogen						Verbrennung				
		Nassschlamm		entw. Schlamm		Landschaftsbau		Monoverbrennung		Mitverbrennung		
2017-2019	ab 2031 - 50 %	2017-2019	ab 2031 - 50 %	2017-2019	ab 2031	2017-2019	ab 2031	2017-2019	ab 2031			
611	Stadt Kassel	0	0	0	0	0	0	0	4.519	4.519	0	0
631	Kreis Fulda	397	198	2.849	1.424	0	0	0	1.424	457	655	126
632	Kreis Hersfeld-Rotenburg	209	105	522	261	0	0	0	261	70	175	881
633	Kreis Kassel	625	312	1.993	996	0	0	110	1.106	0	312	76
634	Kreis Schwalm-Eder	792	396	1.508	863	218	0	0	1.224	361	396	416
635	Kreis Waldeck-Frankenberg	1.358	679	881	441	0	0	0	441	0	679	0
636	Kreis Werra-Meißner	54	27	1.319	1.218	1.116	0	0	1.218	0	27	0
	Summe	3.434	1.717	9.072	5.203	1.334	0	110	10.193	5.407	2.244	1.500

Nachfolgend werden zunächst für alle Szenarien gültige spezifische Kosten für den Klärschlammtransport sowie die Klärschlammmentwässerung betrachtet.

9.2 Bewertung und Ausarbeitung von Realisierungsvorschlägen (Szenarien)

Nachfolgend werden die bereits in Kap. 9.1 kurz benannten Szenarien zur Klärschlammverwertung und zum Phosphor-Recycling in Nordost-Hessen erläutert. Diese berücksichtigen zum Teil bereits formulierte und vertraglich fixierte Kooperationen, zum Teil werden auch theoretisch mögliche Konzepte entwickelt.

9.2.1 Szenario 1: Bodenbezogene Verwertung und Rückführung des im Schlamm gebundenen P in die Landwirtschaft

9.2.1.1 Zukünftige Schlammengen in der landwirtschaftlichen Verwertung

Aktuell werden im Regierungsbezirk Kassel bodenbezogen verwertet:

- als Nassschlamm:
3.434 t TM/a mit i.M. 3,45 % TM entspr. ca. 100.000 t/a OS und 2,4 % P

- als entwässerter Schlamm in der Landwirtschaft
9.032 t TM/a mit i.M. 26,5 % TM entspr. ca. 34.100 t/a OS und 2,3 % P
- als entwässerter Schlamm im Landschaftsbau
1.334 t TM/a mit i.M. 37,5 % TM entspr. ca. 3.560 t/a OS und 1,9 % P

Nach Aussagen der KRV Klärschlamm- und Reststoffverwertungs-GmbH Waldeck-Frankenberg, c/o Maschinenring Waldeck-Frankenberg e.V. sowie des Maschinenrings Schwalm-Eder wird auch langfristig ca. 50 % des bisher landwirtschaftlich und bodenbezogenen Klärschlammes weiterhin bodenbezogen verwertet werden kann.

Im Szenario 1 werden also zukünftig im Bereich des RP Kassel verwertet:

- Szenario 1.1: als Nassschlamm ca. 50.000 t/a (m^3/a) mit i.M. 3,45 % TM und 2,4 % P
- Szenario 1.2: als entwässerter Schlamm ca. 20.000 t/a OS, i.M. 26,5 % TM und 2,3 % P
- Der Landschaftsbau wird nicht gesondert, sondern ebenfalls als „bodenbezogene Verwertung“ betrachtet.

9.2.1.2 Szenario 1.1: Bodenbezogene Verwertung als Nassschlamm

Die in Kap. 3.4.3.2 genannten Kosten (Angaben in den Fragebögen für die bodenbezogene Verwertung) lagen in den vergangenen Jahren zwischen ca. 11,00 €/m³ und 30,00 €/m³, wobei keine detaillierten Auskünfte darüber gegeben wurden, welche Kostenanteile jeweils enthalten waren bzw. welche Kosten noch hinzugefügt werden müssten.

Die Preise sind zudem sehr volatil; bei der bodenbezogenen Verwertung müssen folgende Kostenanteile berücksichtigt werden:

- Handling auf der Kläranlage (z.B. Verladen in Container)
- Preis ab Kläranlage (Regelfall) oder zzgl. Transport (Transportentfernung)
- Klärschlammanalytik (ist bei Klärschlammverbänden i.d.R. mit inbegriffen)
- Bei landwirtschaftlicher Verwertung:
 - Einarbeitung in den Boden
 - Bodenprobenahme, Bodenprobe (Analytik)
 - Lieferscheinverfahren nach AbfKlärV
 - Düngbedarfsermittlung, Stoffstrombilanz, Düngeberatung
 - Jahresabfuhr- und Ausbringungsplan
- Begleitscheinverfahren mit Annahmeerklärung, Übernahmeschein, Transporterlaubnis
- Meldung an die Wasserbehörde

Um insbesondere Transportkosten zu minimieren sollte das Ziel sein, den Schlamm bereits auf der Kläranlage möglichst auf 4 – 5 % TM einzudicken.

Als realistischer Preis für die Nassschlammverwertung in der Landwirtschaft (bodenbezogene Verwertung) mit allen oben genannten Kostenanteilen und Erfordernissen kann derzeit ein Bereich zwischen ca. 23 bis 30 €/m³ angenommen werden. In der abschließenden Kostengegenüberstellung der Szenarien wird ein spezifischer Preis von 27,50 €/m³ bei Transportentfernungen von bis zu 15 km angesetzt.

Daraus ergeben sich folgende spezifische Kosten pro t TM:

- bei ca. 3,5 % TM: 657 – 857 €/t TM, i.M. ca. 785 €/t TM
- bei ca. 4,5 % TM: 511 – 666 €/ t TM, i.M. ca. 610 €/t TM

9.2.1.3 Szenario 1.2: Bodenbezogene Verwertung entwässerter Schlämme

Bei größeren Transportentfernungen oder sofern die Kläranlagen über eigene Schlammentwässerungsanlagen verfügen, werden die entwässerten Schlämme direkt ab Kläranlage der landwirtschaftlichen Verwertung zugeführt.

Die in Kap. 3.4.3.2 genannten Kosten anhand der Angaben in den Fragebögen für die bodenbezogene Verwertung von entwässerten Schlämmen lagen in den vergangenen Jahren zwischen ca. 27,00 €/t und 130,00 €/t, wobei auch hier keine detaillierten Auskünfte darüber gegeben wurden, welche Kostenanteile jeweils enthalten waren bzw. welche Kosten noch hinzugefügt werden müssten. Hier gelten vergleichbare Einschränkungen und Anmerkungen wie in Kap. 9.2.1.2.

Sofern Nassschlamm an den Kläranlagen zur weiteren Verwertung bzw. Entsorgung entwässert werden müssen, werden in der Regel mobile Entwässerungsanlagen eingesetzt. Die Kosten für den Einsatz der mobilen Anlagen setzen sich zusammen aus:

- Fixkosten für Antransport, Einrichtung und Abtransport der Anlagen (einmalige Kosten, je Einsatz)
- Spezifischen Entwässerungskosten inkl. Personalstellung sowie Einsatz von Polymeren, als spezifische Behandlungskosten (€/m³ Nassschlamm)
- Stromkosten (Bereitstellung durch den Kläranlagenbetreiber)

Die Kosten sind abhängig von verschiedenen Faktoren wie

- zu entwässernde Nassschlammmenge je Entwässerungseinsatz
- TM-Gehalt des Nassschlammes
- Entwässerbarkeit
- Bedarf an Hilfsmitteln (Polymeren)

Überschlägig können für die Entwässerung Kosten von ca. **8 bis 10 €/m³ Nassschlamm** angenommen werden. Der erreichbare TM-Gehalt im entwässerten Schlamm ist – wie in fest installierten Entwässerungsaggregaten – von den Klärschlammigenschaften abhängig und liegt in der Regel zwischen 22 und 27 % TM.

Für weitere Kostenbetrachtungen der einzelnen Kläranlagen sollten konkrete Angebote eingeholt werden oder es werden – für erste Abschätzungen folgende Kosten angesetzt:

- Entwässerung 8,50 €/m³ Nassschlamm
- Stromkosten 3,5 kWh/m³ * 0,25 €/kWh = 0,875 €/m³ Nassschlamm

Der Anlass für die Machbarkeitsstudie sind die geänderten Rahmenbedingungen aufgrund der novellierten AbfKlärV sowie der DüV / DüMV. Die Klärschlammmentwässerung ist davon nicht betroffen und wird daher in den nachfolgenden Kostenbetrachtungen nicht berücksichtigt. Sofern für einzelne Kläranlagenbetreiber, die aktuell noch Nassschlamm in der Landwirtschaft verwenden, zukünftig Verfahren erforderlich werden, für die entwässerte Schlämme benötigt werden, sind die Entwässerungskosten (in Höhe von ca. 9,50 €/m³ Nassschlamm entsprechend ca. 190 – 270 €/t TM) den nachfolgend aufgeführten Kosten hinzuzuaddieren.

Kläranlagen, die über eine stationär installierte Schlammmentwässerung verfügen, müssen zur gesamten Kostenbetrachtung und auch im Vergleich mit Anlagen, die den Nassschlamm verwerten, Kosten von ca. 4 – 8 €/m³ Nassschlamm veranschlagen. Hierin enthalten sind die Kapitalkosten für die Schlammmentwässerung inkl. erforderlichem Gebäude, Betriebskosten wie Strom, Polymer, Personalaufwand und auch Kosten für Wartung und Ersatzteile. Daraus ergeben sich spezifische Kosten von ca. 100 – 200 €/t TM (ist für jede Anlage gesondert zu bestimmen).

Des Weiteren sind in diesem Fällen die erhöhten Aufwendungen zur Mitbehandlung der Zentrante aus der Schlammmentwässerung in der Kläranlage zu berücksichtigen. Der verfahrenstechnische Aufwand und damit die Kosten sind sehr individuell und müssen für jeden Einzelfall betrachtet werden.

Zur weiteren Orientierung dient das Ergebnis einer aktuellen Ausschreibung aus dem Bereich Mittelhessen, in der für die landwirtschaftliche oder landschaftsbauliche Verwertung Preise zwischen 85 und 120 €/t entwässertem Klärschlamm mit 25 % TM (entspr. 340 – 480 €/t TM) ab Kläranlage inkl. Containergestellung angeboten wurden. Für die gleiche Leistung in 2022 wurden Preise mit einer Preissteigerung zwischen 0 und 4 % angeboten.

Realistische aktuelle Preise zur bodenbezogenen Verwertung von entwässerten Schlämmen inkl. Containergestellung, Einbauen in den Boden sowie erforderliche Bodenanalysen liegen bei ca. 90 €/t (bei 25 % TM).

9.2.2 Szenario 2: Dezentrale P-Rückgewinnung aus Klärschlamm, Abreicherung auf < 2 % P, Nutzung der Fällungsprodukte als Düngemittel, thermische Schlammverwertung in der Mitverbrennung

Die Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (2017) sieht im Artikel 5 zur „Weiteren Änderung der Klärschlammverordnung“ (Inkrafttreten am 01. Januar 2029) u.a. vor, dass gemäß dem zukünftig gültigem § 3a ab dem 01. Januar 2029 bei Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm ein Verfahren anzuwenden ist, das eine Reduzierung des Phosphor-Gehalts des behandelten Klärschlammes um mindestens 50 % oder auf weniger als 20 g P / kg TM gewährleistet.

Der so P-abgereicherte Schlamm kann dann anschließend in einer Mitverbrennung, z.B. Müllverbrennung oder Zementindustrie, thermisch verwertet werden.

Dies gilt grundsätzlich zunächst für Schlämme aus Kläranlagen mit > 100.000 EW (ab dem 01. Januar 2029) bzw. > 50.000 EW (ab dem 01. Januar 2029).

Sofern aber Klärschlämme aus kleineren Kläranlagen zukünftig (ab dem 01.01.2029 bzw. 01.01.2032) nicht bodenbezogen verwerten können sondern ebenfalls thermisch verwertet werden sollen, ist analog auch eine P-Abreicherung um mindestens 50 % oder auf weniger als 20 g P / kg TM entspr. 2 % P zu gewährleisten.

Vor Durchführung der Phosphorrückgewinnung ist eine Vermischung verschiedener Klärschlämme nur zulässig, sofern jeder zugemischter Klärschlamm einen Phosphorgehalt von 20 Gramm oder mehr je kg Trockenmasse aufweist. Dies bedeutet auch, dass Anlagen, in denen eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm durchgeführt wird, keine weiteren Schlämme mit einem Phosphor-Gehalt von < 2 % P annehmen dürfen.

In dem hier beschriebenen Szenario 2 werden daher Verfahrenskombinationen betrachtet, in der Schlämme mit einem P-Gehalt > 2 % P mittels chemischer Verfahren auf Werte < 2 % P abgereichert werden.

Bei den Verfahren zur Phosphor-Abreicherung des Klärschlammes werden die biologisch als Poly-Phosphate festgelegte und die chemisch gefällten Phosphate (nach Fällung mit Eisen- und/oder Aluminium-Salzen) insbesondere durch Ansäuerung rückgelöst und anschließend durch Komplexbildung und Zugabe z.B. von Magnesiumoxid zu Magnesium-Ammonium-Phosphat MAP (Struvit) oder von Calciumhydroxid oder Calciumchlorid zu Calcium-Phosphat $\text{Ca}[\text{PO}_3(\text{OH})] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Brushit) ausgefällt.

Bei der Ansäuerung (Verfahren 1) oder der anaeroben Vorversäuerung vor der Faulung zur Rücklösung des durch Bio-P gebundenen Polyphosphats (Verfahren 2) wird aber nicht nur das Phosphat herausgelöst, sondern auch der Feststoff des Klärschlammes zum Teil zerstört. Damit ist nicht exakt klar, ob bzw. inwieweit bei Reduzierung der P-Fracht und gleichzeitiger Reduzierung der TM-Fracht die P-Konzentration im Feststoff, also g P / kg TM auch tatsächlich die geforderte Reduzierung von 50 % bzw. P-Konzentrationen < 2 % P im Feststoff erreicht.

Die Verfahren des Szenarios 2 können nur dann sicher eingesetzt werden, wenn der Ausgangsschlamm bereits im Bereich von 2 – 2,5 % P liegt.

Hier wäre ein hoher Anteil an biologisch gebundenem Phosphor und nicht an gefälltem Phosphor von Vorteil, da die Rücklösung der biologisch gebundenen Polyphosphate deutlich einfacher erfolgt als die der Metallsalz-gefällten mineralischen Phosphate.

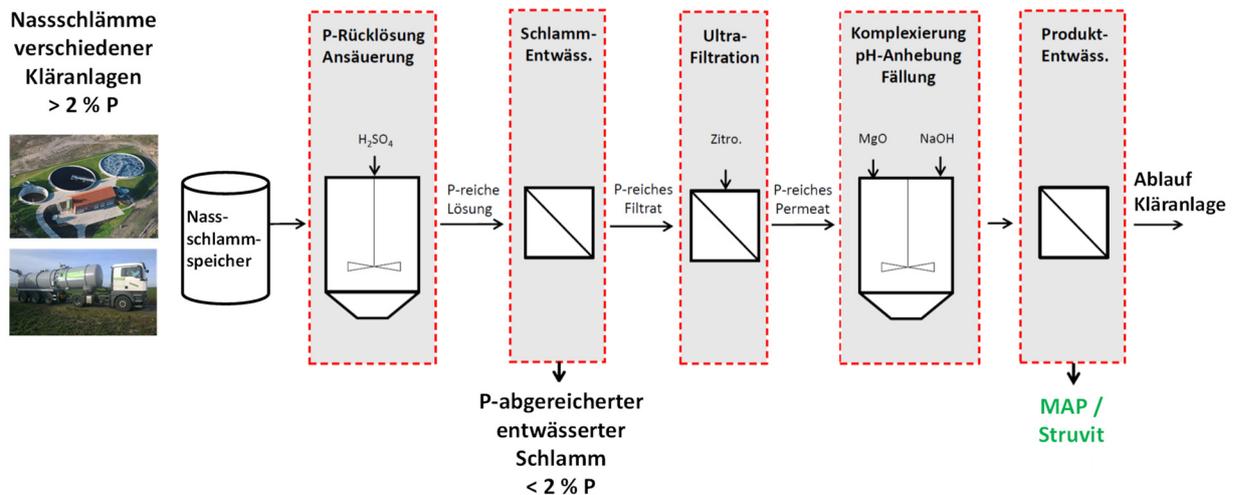


Abb. 9-1: Phosphor-Abreicherung durch P-Rücklösung und Ausfällung als MAP / Struvit (nach Turek, Bouché, MSE GmbH, 2019)

Die nachfolgend beschriebenen Szenarien 2.1 und 2.2 stehen daher unter Vorbehalt. Für dieses Szenario 2 werden nachfolgend folgende Unter-Szenarien beschrieben:

Szenario 2.1:

Betrieb von mobilen Phosphor-Rückgewinnungsanlagen zur Phosphor-Abreicherung auf < 2 % P, vorrangig auf Kläranlagen der Größenklassen 3 und 4a, bei gemeinsamer Behandlung von Schlämmen aus mehreren Kläranlagen, die zukünftig nicht mehr über eine bodenbezogene Klärschlammverwertung verfügen.

Szenario 2.2:

Bau von fest installierten Phosphor-Rückgewinnungsanlagen zur Phosphor-Abreicherung auf < 2 % P auf Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5 mit Phosphor-Rückgewinnungspflicht bzw. Anlagen der Größenklassen 3 und 4a, die zukünftig nicht mehr über eine bodenbezogene Klärschlammverwertung verfügen.

9.2.2.1 Szenario 2.1: Betrieb von mobilen Phosphor-Rückgewinnungsanlagen zur Phosphor-Abreicherung auf < 2 % P

Insbesondere bei Klärschlammverbänden aus mehreren kleineren Kläranlagen, bei denen eine landwirtschaftliche Klärschlammverwertung aufgrund der Düngverordnung sowie der Flächenbeschränkungen (Wasserschutzgebiete) zukünftig zurückgeht bzw. ausgeschlossen ist, können mobile Anlagen zur Rücklösung des Phosphors aus dem Nassschlamm und damit zur P-Abreicherung des Schlamms auf < 2 % P als eine Möglichkeit in Frage kommen. Damit können die Anforderungen zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm flexibel erfüllt werden. Diese Anlagen werden vergleichbar mit mobilen Entwässerungsanlagen angeboten.

Die Nassschlämme aus verschiedenen umliegenden Kläranlagen werden zu einem Standort transportiert, auf dem die mobile Anlage installiert wird. Dieser Standort muss sorgfältig ausge-

sucht werden, zumal das Schlammwasser / Zentrat aus der Schlammmentwässerung in der Kläranlage des Entwässerungsstandortes behandelt werden muss. In einem ersten Verfahrensschritt wird der angelieferte Nassschlamm durch Zugabe von Säure – in der Regel aus Kostengründen Schwefelsäure – auf pH-Werte von 4,0 bis 2,5 angesäuert, wobei sich bei Reaktionsdauern von ca. 1 Std. das gebundene Phosphat zurücklöst (siehe Abb. 9-2). Dabei benötigen Eisen-gefällte Phosphate „lediglich“ pH-Werte von < 3,5, Aluminium-gefällte Phosphate hingegen bereits einen pH-Wert von < 2,5, also deutlich größere Säuremengen, was zu entsprechend höheren Betriebskosten führt.

Im Gegensatz zu den Metallsalz-gefällten Phosphaten benötigt biologisch gebundener Phosphor (Poly-Phosphate) z.B. aus einer Bio-P-Stufe deutlich höhere pH-Werte zur Rücklösung (pH ca. 6) und damit deutlich geringere Säuremengen.

Der angesäuerte Nassschlamm wird anschließend mit einer Schlammmentwässerungsanlage, deren Aggregate säureresistent sein müssen, entwässert. Bei Etablierung des Verfahrens mit einer bereits existenten stationären Schlammmentwässerung muss daher in der Regel das Schlammmentwässerungsaggregat angepasst oder sogar ausgetauscht werden. Das Filtrat, in dem nach der P-Rücklösung aus der Schlammmatrix ein erheblicher Anteil des Phosphors als Phosphat gelöst ist, wird anschließend durch Zugabe von Magnesiumoxid (MgO) sowie pH-Anhebung durch Natronlauge (NaOH) behandelt, so dass Magnesium-Ammonium-Phosphat MAP (Struvit) ausfällt und abgetrennt werden kann.

Durch die Bildung von Magnesium-Ammonium-Phosphat MAP wird zudem die Ammonium-Fracht in der Rückbelastung aus der Schlammmentwässerung reduziert. Der P-abgereicherte Schlamm mit P-Gehalten < 2 % P wird entwässert und kann anschließend in der Zementindustrie entsorgt werden.

Im Szenario 2.1 sind also die Schlammmentwässerungskosten in Höhe von ca. 9,50 €/m³ Nassschlamm zu berücksichtigen (siehe Kap.9.2.1.3).

Als Rücklöserate geben Turek und Bouché (2019) Werte von > 50 % an; bei den in Nordost-Hessen vorhandenen Schlämmen ist damit das Unterschreiten der Anforderung < 2 % P im der Schlamm-Trockenmasse wahrscheinlich.

Für das Verfahren gibt Turek, 2020, eine Kostenspanne von ca. 15 bis 30 € / m³ Nassschlamm an, zzgl. den Kosten für die Schlammmentwässerung. Die Kosten sind insbesondere abhängig von der erforderlichen Chemikaliendosierung (Säure, Magnesiumoxid, Natronlauge), die wiederum abhängig sind von der Pufferkapazität des Schlamms, dem P-Gehalt sowie dem eingesetzten Fällmittel zur P-Elimination in der Kläranlage (siehe auch Abb. 9-2).

Nachfolgend wird mit spezifischen Kosten von 25 €/m³ Nassschlamm für die P-Rücklösung in einer mobilen Anlage gerechnet, zzgl. Kosten für die Schlammmentwässerung und die Entsorgung des entwässerten Schlammes in der Zementindustrie. Genauere Angaben zu den erforderlichen Chemikalien-Dosierungen und auch zu den erreichbaren P-Konzentrationen im Schlamm (ob < 2 % P erreicht werden kann) können erst nach Vorversuchen mit den relevanten Schlämmen gemacht werden.

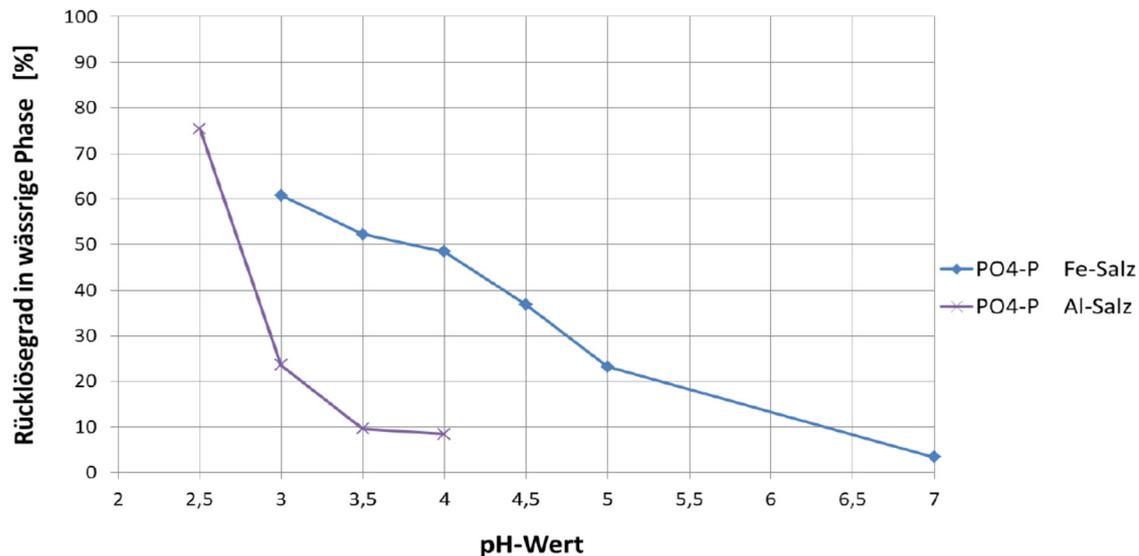


Abb. 9-2: P-Rücklösung in Abhängigkeit des pH-Wertes bei Fe- und Al-gefällten Schlämmen (nach Turek, Bouché, MSE GmbH, 2019)

9.2.2.2 Szenario 2.2: Bau von fest installierten Phosphor-Rückgewinnungsanlagen zur Phosphor-Abreicherung auf < 2 % P

Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5 mit Phosphor-Rückgewinnungspflicht bzw. Anlagen der Größenklassen 4a, die zukünftig nicht mehr über eine bodenbezogene Klärschlammverwertung verfügen, können gemäß zukünftig gültigem § 3a der AbfKlärV Verfahren einsetzen, mit denen der Phosphor-Gehalt des behandelten Klärschlammes um mindestens 50 % oder auf weniger als 20 g P / kg TM gewährleistet ist.

Es wird aber hier darauf hingewiesen, dass eine Abreicherung auf < 2 % P nicht dem politischen Ziel einer weitestgehenden Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm entspricht.

Für größere Kläranlagen sind hierfür stationäre Anlagen bei > 25.000 EW denkbar, wobei detaillierte Kostenschätzungen und Wirtschaftlichkeitsberechnungen für jeden Einzelfall erforderlich sind. Diese potentiellen Standorte können zusätzliche Schlämme aus dem direkten Umfeld annehmen, um die zu installierende Anlage zur P-Rückgewinnung besser auslasten zu können. Die Leistungsfähigkeit der übrigen Baugruppen der Kläranlage bei Annahme zusätzlicher Schlämme ist natürlich im Einzelfall zu überprüfen. Hierzu gehören u.a.

- Lagerbehälter / Schlammspeicher für von extern angenommene Schlämme
- Belebungsanlage: Nachrechnung und Überprüfung aufgrund erhöhter Rückbelastung (insbesondere Stickstoffverbindungen)
- Faulbehälter: Nachrechnung und Überprüfung des Faulbehältervolumens aufgrund erhöhter organischer Belastung (organische Raumbelastung) sowie größerer Schlamm-mengen (Aufenthaltszeit)
- Gasverwertung: Nachrechnung und Überprüfung aufgrund größerer Faulgasmengen bei Annahme externer Schlämme

Denkbar sind Verfahren zur MAP-Fällung bzw. zur Brushit-Fällung.

Potentielle Standorte für stationäre Anlagen, auf denen größere Schlammengen anfallen und die ggf. weitere externe Schlämme zur Mit-Verarbeitung angenommen werden könnten, sind in der nachfolgenden Tab. 9-2 aufgeführt. Es ist zu sehen, dass verschiedene Kläranlagen wie Baunatal und Eschwege mit den mittleren Phosphor-Konzentrationen bereits unterhalb der genannten 2 % P liegen und daher nicht zu einer Phosphor-Rückgewinnung verpflichtet sind. Diese Kläranlagen können den Klärschlamm zukünftig ohne Berücksichtigung der P-Rückgewinnung verwerten oder entsorgen. Der Klärschlamm der Kläranlage Bebra weist eine mittlere Konzentration von 2,05 % P auf; da die Kläranlage Bebra über eine Klärschlammvererdungsanlage verfügt, wird durch den Abbau der organischen Trockensubstanz die P-Konzentration ansteigen.

Tab. 9-2: Potentielle Standorte für stationäre Anlagen zur Phosphor-Abreicherung aus Klärschlamm

Kläranlage	Größe		P-Elimination		Schlammengen (Mittelwerte lt. Fragebögen)			Phosphor (Mittelwerte)	
	Ausbau	Anschluss (lt. Frageb.)	Bio-P	Fällmittel	TM	Nassschl. 4% TM	entwäss. Schl. 25% TM	Konz.	Menge
	[EW]	[EW]			[tTM/a]	[m³/a]	[t/a]	[% P]	[kg P/a]
Bad Hersfeld	56.600	70.000	nein	Fe	501	12.530	2.005	2,97	14.878
Bad Wildungen / Wegg.	36.670	26.289	ja	Fe	241	6.026	964	2,92	7.033
Baunatal / Kirchbauna	40.000	38.000	ja	Al/Fe	937	23.416	3.747	1,67	15.642
Bebra	25.000	31.248	nein	Al	487	12.163	1.946	2,05	9.993
Eschwege / Niederhor	60.000	30.000	nein	k.A.	1.116	27.909	4.465	1,65	18.464
Frankenberg (Eder)	29.000	29.414	ja	k.A.	214	5.361	858	3,30	7.085
Fulda / Gläserzell	150.000	150.000	nein	Fe	1.833	45.819	7.331	3,28	60.066
Hünfeld	30.000	k.A.	k.A.	k.A.	499	12.469	1.995	k.A.	k.A.
Rotenburg a. d. Fulda	34.000	34.000	k.A.	k.A.	394	9.861	1.578	4,11	16.198
Vöhl / Thalitter	50.000	46.500	nein	k.A.	94	2.352	376	3,10	2.915
Volkmarsen	23.000	27.917	nein	k.A.	99	2.466	394	3,59	3.539

Die in der Tab. 9-2 aufgeführten Anlagen verfügen nach einer ersten Abschätzung alle über ausreichende Kapazitäten in der Faulungsanlage zur Annahme weiterer extern angelieferter Schlämme.

Weiterhin verfügen einige dieser Kläranlagen auch über eine weitergehende biologische P-Elimination (Bio-P), die den Einsatz der hier betrachteten Verfahren möglich erscheinen lässt.

Für das Szenario 2.2 wurden stationäre Anlagen nach zwei alternativen Verfahren genauer untersucht.

Beide Verfahren erscheinen nur möglich, wenn die zu behandelnden Schlämme aus Kläranlagen stammen, in denen eine weitgehende biologische P-Elimination (Bio-P) betrieben wird. Bei Schlämmen mit ausschließlicher P-Elimination durch Fällung ist die erforderliche pH-Wert-Abenkung so groß, dass auch wesentliche Feststoffmengen reduziert werden und damit die P-Konzentration im anschließend zu entsorgenden Schlamm nicht stabil unter 2 % abgesenkt werden kann.

Bei einem der untersuchten stationären Verfahren ist eine nur geringe P-Entfrachtung in der Größenordnung 15 – 20 % möglich, so dass auch mit diesem Verfahren eine sichere Unterschreitung der P-Konzentration im Feststoff < 2 % P nicht gegeben ist.

Beim anderen Verfahren wird mittels einer mesophilen anaeroben Vorversäuerung vor der Faulung die Rücklösung des durch Bio-P gebundenen Polyphosphats weitestgehend ermöglicht. Der vorversäuerte Schlamm wird entwässert, so dass sich der Großteil des rückgelösten Phosphats im Zentrat befindet. Unter Zugabe von $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaCl}_2$ erfolgt unter leicht sauren Bedingungen die Ausfällung des ortho-Phosphats als Brushit.

Nach der Abtrennung des Brushits wird das phosphatabgereicherte Zentrat teilweise oder vollständig entweder der Bio-P-Stufe zugeführt oder wieder mit dem entwässerten Schlamm vermischt und der Faulung zugeführt. Dabei kann die hydraulische Belastung der Faulung durch Erhöhung der TM im Zulauf reduziert werden, falls der Schlamm nur teilweise mit Zentrat wieder vermischt wird. Ammonium-abgereichertes Zentrat mit einem hohen Anteil an organischen Säuren kann in die Bio-P-Stufe zurückgeführt werden und diese stabilisieren.

Auch hierbei ist ein Unterschreiten der P-Konzentration von 2 % P im zu entsorgenden Schlamm nur dann möglich, wenn die P-Elimination in der Kläranlage weitgehend über Bio-P-Verfahren und nur zu einem geringen Teil über P-Fällung erfolgt.

Die Abb. 9-3 zeigt ein Massenstromdiagramm zum Einsatz des Brushit-Verfahrens exemplarisch für eine Kläranlage mit 32.000 EW, z.B. für Klärschlämme aus dem Kreis Hersfeld-Rotenburg. Die Schlämme aus Hersfeld-Rotenburg weisen im Mittel nur P-Gehalte von ca. 2,38 % (23,8 g P/kg TM) auf. Zur Abschätzung der Stoffströme wurde die spezifischen Frachten nach DWA-A 131 herangezogen (CSB 120 g/(EW*d), N 11 g/(EW*d)). Für die spezifische P-Fracht wurden allerdings nur 1,2 g P/(EW*d) (anstatt 1,8 g P/(EW*d)) angesetzt, da nur mit dieser geringen P-Fracht sich der P-Gehalt von 2,38 % P im Feststoff des Klärschlammes errechnet.

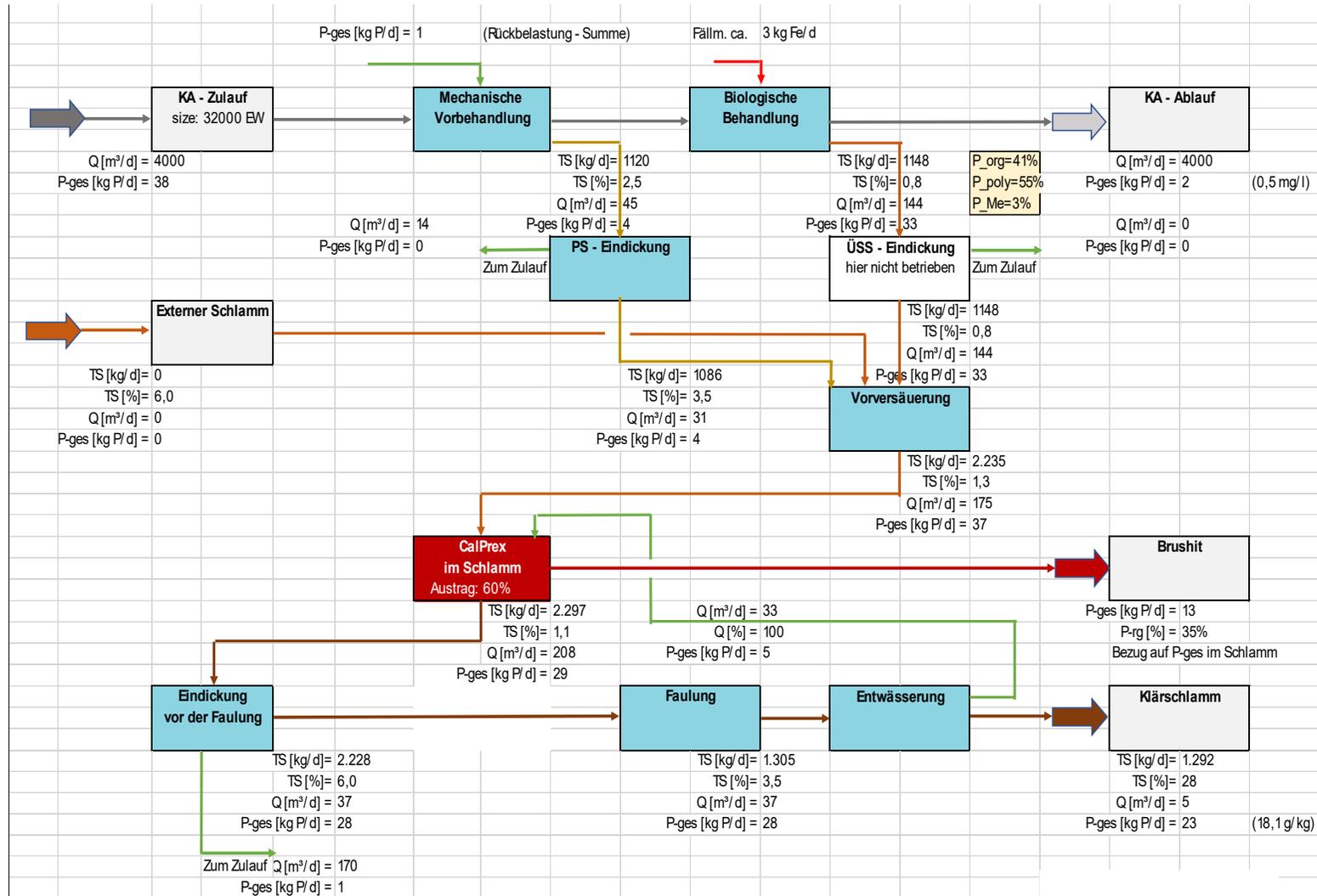


Abb. 9-3: Blockschema zum Brushhit-Verfahren zur P-Rückgewinnung auf einer Kläranlage mit 32.000 EW

Für dieses Szenario 2.2 gibt der Verfahrensanbieter einen Richtpreis von ca. 500.000 Euro an (zzgl. Bau- und Planungsleistungen).

Hierin berücksichtigt sind folgende Hauptpositionen:

- Vorversäuerungsreaktor 250 m³ mit Rührwerk
- Reaktor mit etwa 40 m³ mit Rührwerk
- Bedienbühne
- Pumpenaggregate
- Filtratrückführung
- Brushit-Abscheider
- Dosieranlage CaCl₂ / Ca(OH)₂ über IBCs
- Verrohrung
- Verkabelung
- Steuerung / Steuerschrank
- Messtechnik
- Montage Inbetriebnahme
- Planung/Konstruktion/Projektleitung

Es wird davon ausgegangen, dass eine Überschussschlammeindickungsanlage (Vorentwässerung) sowie auch eine Klärschlamm-Entwässerungsanlage vorhanden ist und somit weiterverwendet wird. Eine Neuanlage zur Eindickung vor der Faulungsanlage ist daher nicht eingerechnet worden.

9.2.2.3 Thermische Verwertung des P-abgereicherten Schlamm

Der Phosphor-abgereicherte Schlamm wird nachfolgend entwässert. Nach Angaben der Anbieter der Verfahren ist der Schlamm nach der chemischen Behandlung und P-Abreicherung besser entwässerbar als ohne den Abreicherungs-schritt. Für die weitere Betrachtung wird eine Entwässerung auf 28 % TM angesetzt.

Um den Kostenaufwand für die Entwässerung abzuschätzen, werden die bereits in Kap. 9.2.1 angesetzten spezifischen Kosten von 8,50 €/m³ Nassschlamm zzgl. 3,5 kWh/m³ Strom angesetzt.

Der so abgereicherte Schlamm kann gemäß § 3a AbfKlärV einer Mitverbrennung zugeführt werden. Nachfolgend wird die Mitverbrennung in der Zement-Industrie angesetzt. Hier liegen folgende Angebote vor:

Zementwerk 1,

- Werk A: Entfernung nach Osthessen (Kreis HEF) ca. 230 km
- Werk B: Entfernung nach Osthessen (Kreis HEF) ca. 150 km

- Gesamt-Akkommodationskapazität ca. 500.000 t/a entwässerter Schlamm
- Zementwerke konditionieren ihre Brennstoffe selbst, eigene Trockner sind installiert und arbeiten mit eigener Abwärme
- Annahme von getrockneten Schlämmen eher Ausnahme
- Annahmepreis Gate Fee
 - 55 – 65 €/t entwässerter Schlamm (23 – 33 % TM)

Zementwerk 2,

- Werk A: Entfernung nach Waldeck-Frankenberg ca. 60 km
- Werk B: Entfernung nach Osthessen (Kreis HEF) ca. 210 km
- Keine eigene P-Rückgewinnung
- Werk C
 - Bau eigene Trocknung 2 * 35.000 t/a entwässerter Schlamm
 - Ziel: Annahme entwässerte Schlämme (18 – 35 % TM)
 - Ca. 75 €/t entwässerter Schlamm (Gate Fee)

Weitere Möglichkeiten der Mitverbrennung (außerhalb der Zementproduktion) bestehen u.a.:

- Kohlekraftwerk D: ca. 60 €/t entwässerter Schlamm, aber geplante Stilllegung des Kraftwerks Ende 2025
- Industriekraftwerk E: ca. 60 €/t entwässerter Schlamm

Neben den spezifischen Anforderungen der einzelnen Zementwerke in Bezug auf die Annahme von entwässertem oder getrocknetem Schlamm liegen auch weitere Anforderungen z.B. hinsichtlich der Maximal-Konzentrationen von Schadstoffen im anzunehmenden Schlamm vor. Diese sind auszugsweise in Tab. 9-3 und ausführlich im Anhang in Kap. 12.4 zusammengestellt.

Im Vergleich der Grenzwerte der Zementindustrie mit den Grenzwerten der Düngemittelverordnung fällt auf, dass die Maximal-Konzentrationen der Zementindustrie bei verschiedenen Metallen, z.B. Arsen, Chrom, Zink sowie auch Kupfer, geringer sind als die der Düngemittelverordnung.

Sofern Kläranlagenbetreiber das hier beschriebene Szenario 2 mit einer Phosphor-Abreicherung auf unter 2 % P in Betracht ziehen, ist die ggf. anschließende Mitverbrennung in der Zementindustrie diesbezüglich im Einzelfall zu prüfen.

Tab. 9-3: Annahmekriterien der Zementindustrie (Auszug), siehe auch Kap. 12.4

		AbfklärV	DüMV		Zementindustrie		
		v. 27.09.2017 BGBl. I S. 3465)	v. 26.5.2017, Verordn. 02.10.2019 (BGBl. I S. 1414)		geocycle / Holcim	HeidelbergCement	
		gem. Anlage 1 (zu § 8 Absatz 1)	gem. Anlage 2 Tabelle 1.4 Spalte 2 und 4			Werk Höver (Hannover) (TM > 90 %)	Werk Gesecke Anforderungen bez. auf TM
		Kennzeichnung	Grenzwert				
Arsen	mg/kg TM		20	40	13	20	20 mg/kg OS
Blei	mg/kg TM		100	150	200	300	300 mg/kg OS
Cadmium	mg/kg TM		1	1,5	9	3,5	3,5 mg/kg OS
	mg/kg TM		20 mg/kg P ₂ O ₅	50 mg/kg P ₂ O ₅			
Chrom	mg/kg TM		300	-	120	400	400 mg/kg OS
Chrom (VI)	mg/kg TM		1,2	2			
Kupfer	mg/kg TM			0,09 % bez. auf TM/ 900	500	950	950 mg/kg OS
Nickel	mg/kg TM		40	80	160	120	120 mg/kg OS
Quecksilber	mg/kg TM		0,5	1	1,2	1,5	1,5 mg/kg OS
Thallium	mg/kg TM		0,5	1	2	2	2 mg/kg OS
Zink	mg/kg TM	4.000		0,5 % bez. auf TM / 5.000	2000		
PFT	mg/kg TM		0,05	0,1			
AOX	mg/kg TM	400					
PCB je Kongener	mg/kg TM	0,1					
Benzo(a)pyren	mg/kg TM	1					
Σ Dioxine und dl-PCB	ng/kg TM			30	10		

9.2.3 Szenario 3: Dezentrale Trocknung und Verbrennung in Klein-Verbrennungsanlagen, Nutzung der Asche als Rohstoff für die Düngemittelindustrie

Im Szenario 3 werden Wärme-autarke dezentrale Anlagen zur Trocknung und anschließenden Verbrennung der Klärschlämme betrachtet. Die Asche aus den Verbrennungsanlagen kann als Grundstoff direkt in der Düngemittelindustrie verarbeitet werden. Aufgrund der Standardisierung dieser Anlagen erscheint es möglich, derartige dezentrale Anlagen zu vergleichbaren Kosten betreiben zu können wie die thermische Verwertung in zentralen Verbrennungsanlagen (Beispiel Fernwärme-Heizkraftwerk Kassel).

Nachfolgend werden aufbauend auf der Auswertung im Klärschlammverbund Schlitz zwei „Unter-Szenarien“ betrachtet, wobei standardisierte Baugrößen eines Anbieters verwendet werden. Im „Standard-Modul“ dieses Konzeptes wird als zentrale Baugruppe ein Drehrohkkessel mit einer Feuerungs-Wärmeleistung von 500 kW eingesetzt. Die Vortrocknung als Schnecken-trocknung in Container-Bauweise verarbeitet ca. 6.000 t/a entwässerten Klärschlamm mit 25 bis 27 % TM je Modul.

Für dieses Szenario 3 werden folgende Verfahrensgruppen beschrieben und bewertet:

- Mobile Entwässerung von Nassschlamm aus einem Umkreis von im Mittel 15 km (0 bis 30 km)
- Transport der entwässerten Schlämme von verschiedenen Kläranlagen zum Betriebsstandort der Trocknung und Verbrennung
- Annahmehöfe mit Schubbodensystem sowie Schneckenförderung, 1- oder 2-straßig

- Bau und Betrieb einer Trocknungsanlage als Container-Anlage mit Abluftbehandlung (Wäscher mit Biofilter) auf ca. 90 % TM, 1- oder 2-straßig
- Bau und Betrieb eines Drehrohrofens zur Verbrennung des getrockneten Klärschlammes mit Rauchgasreinigung, 1- oder 2-straßig
- Transport der Klärschlammmasche zur regionalen Düngemittelproduktion
- Ascheaufbereitung und Einarbeitung in erdfeuchte Düngekalk-Produkte

Folgende Unterszenarien werden betrachtet:

Szenario 3.1: 6.000 t/a entwässerter Klärschlamm

Beispiel-Standorte:

- Landkreis Waldeck-Frankenberg (Volkmarsen)
- Osthessen (Sontra oder Bebra mit Schlämmen aus den Landkreisen Hersfeld-Rotenburg sowie Werra-Meißner)

Szenario 3.2: 12.000 t/a entwässerter Klärschlamm

Beispiel-Standort:

- Fulda mit Schlämmen der Stadt Fulda (ca. 8.000 t/a) sowie aus den Landkreisen Fulda und Hersfeld-Rotenburg

In den folgenden Kostenbetrachtungen sind Angaben eines Verfahrensanbieters eingeflossen. Dieser konzipiert ein standardisiertes Gesamtsystem mit Vortrocknung (Schneckenrockner) bis auf 90 % TM sowie einem Drehrohrofen, dessen Abwärme für die Trocknung des Klärschlammes im Schneckenrockner eingesetzt wird, für eine Baugröße von je ca. 6.000 t/a entwässerten Klärschlamm. Die zentrale Drehrohrotechnik wird aktuell standardisiert mit einer Feuerungsleistung von 500 kW_{th} realisiert. Das führt zu festen Baugrößen und einer standardisierten Konstruktion und Fertigung. Eine Anpassung an größere Klärschlamm-mengen wird derzeit ausschließlich über die Anzahl der Trockner realisiert (siehe Abb. 9-4). Z.B. würden bei einer Klärschlamm-menge von ca. 12.000 t/a 2 baugleiche Trockner realisiert werden.

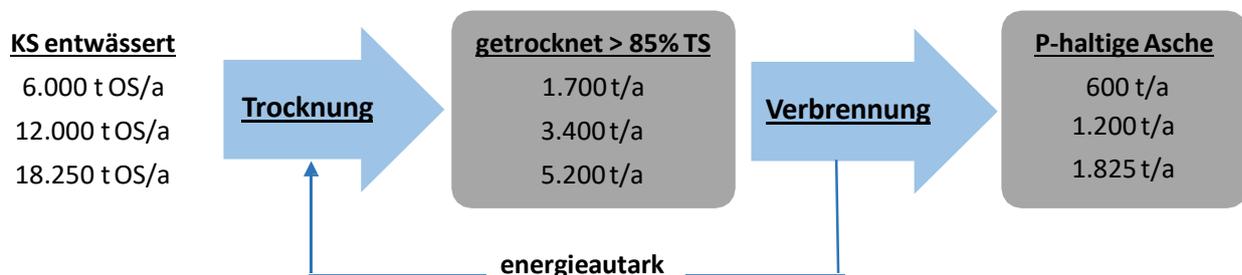


Abb. 9-4: Baugrößen Klärschlammbehandlung Schneckenrockner plus Drehrohrkessel; je Modul Auslegung auf 500 kW_{th} sowie Betriebsdauer von 7.150 h/a

Für das Konzept eines Anbieters sind folgende Maßnahmen mit den nachfolgend erläuterten Baugruppen erforderlich:

- Annahmehunker, ca. 100 m³ (in den Boden eingelassen) neben der Anlagentechnik
- Beschickung Trockner (Schubboden und Schneckenrotorförderung)
- Trocknungsanlage inkl. Eintragsschnecke und Filtereinheit als Containeranlage (siehe Abb. 9-7), Trocknungsleistung ca. 3.690 t/a entspr. i.M. ca. 460 kg/h.
- Abluftwäsche und Biofilter (siehe Abb. 9-8)
- Vorlage und Beschickung für getrockneten Klärschlamm
- Drehrohrkessel, Nachbrennkammer, Wärmeauskopplung 0,5 MW_{th}, (siehe Abb. 9-9)
- Rauchgasreinigung (Multizyklon, Filtereinheiten), Entaschung
- Rauchgasführung und Kamin
- Elektrotechnik, Steuerung und Messtechnik
- Stahlhalle ca. 15 * 10 m, 10 m hoch

Die Energie- und Massenstromdiagramme für die beiden Szenarien 3.1 und 3.2 sind in den nachfolgenden Abb. 9-5 für 6.000 t/a und Abb. 9-6 für 12.000 t/a dargestellt.

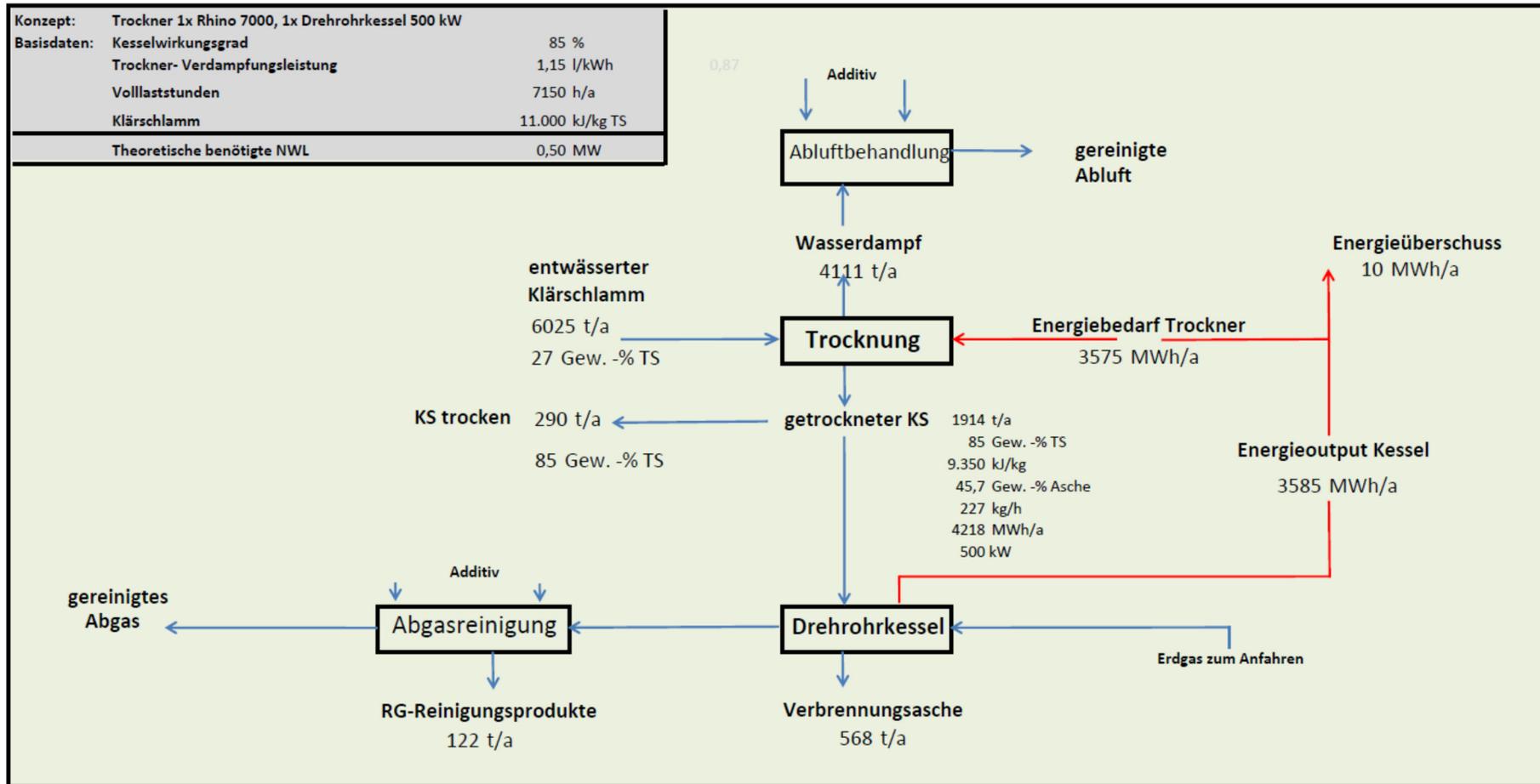


Abb. 9-5: Szenario 3.1, Massenstrom Klärschlamm ca. 6.000 t/a entw. Schlamm, 27 % TM, Auslegung auf 500 kW_{th}, Betriebsdauer ca. 7.150 h/a

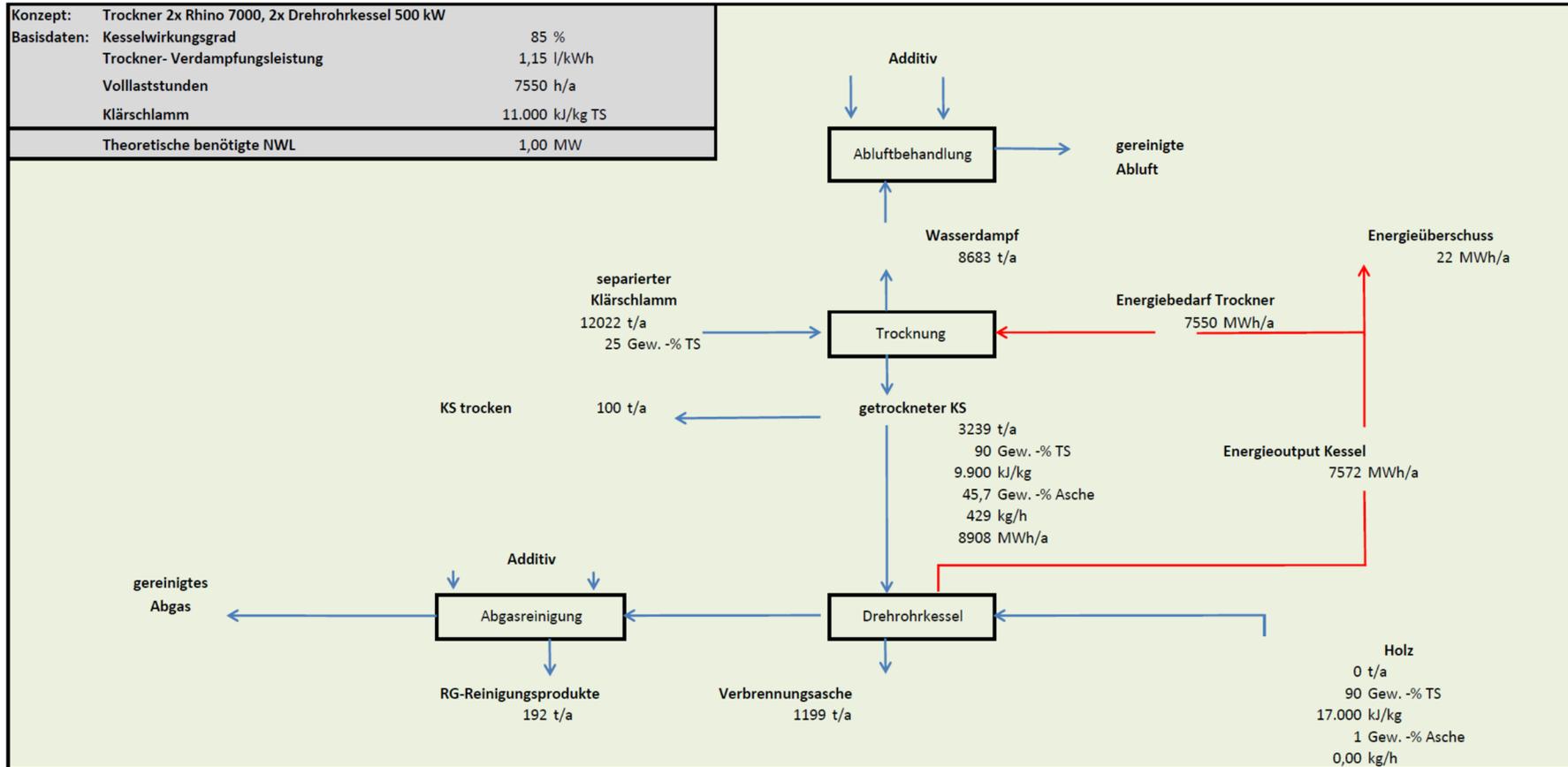


Abb. 9-6: Szenario 3.2, Massenstrom Klärschlamm, Input ca. 12.000 t/a entw. Schlamm 25 % TM,; Auslegung auf 1.000 kW_{th}, Betriebsdauer ca. 7.550 h/a,

Die produzierte Klärschlammmasche kann – bei Einhaltung der gültigen Grenz- bzw. Höchstwerte – direkt in der regionalen Düngemittelindustrie verwertet werden und dort in einem Mischdünger (Kalk-Phosphat-Dünger) für die Landwirtschaft verarbeitet werden.

Eine vergleichbare Drehrohr-Anlage ist seit Anfang 2020 im Betrieb. Die nachfolgenden Abb. 9-7 bis Abb. 9-9 zeigen Eindrücke der Referenzanlage.

Die Kostenbetrachtungen haben voraussichtliche spezifische Behandlungskosten von ca. 120 €/t (netto zzgl. MwSt.) entwässerten Klärschlamm ergeben.



Abb. 9-7: Annahmehunker (vorne), Paddeltrockner (Container hinten links) Ablufttechnik (hellgrau) sowie Stahlhalle für Verbrennungstechnik, Referenzanlage 6.000 t/a, 25 % TM, Foto: Anbieter



Abb. 9-8: Trockner mit Abluftbehandlung, Referenzanlage, Foto: Anbieter



Abb. 9-9: Drehrohrföfen mit Abgasreinigung, Referenzanlage, Foto: Anbieter

9.2.4 Szenario 4: Dezentrale Trocknung und zentrale Verbrennung in Kassel, Phosphor-Rückgewinnung aus der Asche

Im Regierungsbezirk Kassel werden bereits jetzt und werden zukünftig von verschiedenen Betreibern dezentrale Trocknungsanlagen für Klärschlamm betrieben. Für die Verwertung der getrockneten Schlämme aus diesen Anlagen gibt es unter Berücksichtigung der Anforderungen der AbfKlärV seitens der Betreiber noch keine konkreten Konzepte. An den nachfolgend aufgeführten Standorten zur dezentralen Klärschlamm-trocknung wurden bisher keine Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung konzipiert.

Folgende Standorte von dezentralen Trocknungsanlagen sind realisiert, im Bau, in der Planung bzw. in der Diskussion:

- Bad Wildungen, seit 2016
 - dezentrale Trocknungsanlage für ca. 3.600 t/a (22 - 28 % TM), ca. 800 – 1.000 t TM/a
 - Bandtrockner
 - Regenerative Wärme aus benachbarter Biogasanlage
 - thermische Energie 2.500 MWh/a, Abwärme BHKW
 - Zulieferung des Klärschlamm von aktuell 2 Klärschlammverwertern (8 Kläranlagen)
 - Verwertung aktuell in der Zementindustrie
 - Überlegungen zur thermische Eigenverwertung, lokale Nutzung
- Fritzlar – Lohne, voraussichtlich ab Sommer 2021:
 - dezentrale Trocknungsanlage für ca. 3.600 t/a (25 % TM), ca. 900 t TM/a
 - Vergleichbar mit Bad Wildungen
- Volkmarsen, Inbetriebnahme voraussichtlich 2022
 - dezentrale Trocknungsanlage für ca. 6.500 t/a (25 % TM), ca. 1.625 t TM/a
 - Zulieferung der Klärschlämme aus den Kläranlagen des LK Waldeck-Frankenberg
 - Konzept inklusive mobile Entwässerung der anzuliefernden Nassschlämme
 - Abwärme von 2 Biogasanlagen in Volkmarsen
- Sontra, Inbetriebnahme noch unklar
 - dezentrale Trocknungsanlage für ca. 17.000 t/a (25 % TM), ca. 4.250 t TM/a
 - Regenerative Wärmeerzeugung aus Hackschnitzel sowie Siebüberläufen aus Vergärung und Kompostierung
 - Zulieferung des Klärschlamm aus Gesellschafterkommunen der EAM sowie weiterer zu akquirierender Kommunen (Werra-Meißner-Kreis, Schwalm-Eder-Kreis und LK Hersfeld-Rotenburg)
 - Logistik-Organisation: Maschinenringe

Die Betreiber dieser Trocknungsanlagen konnten bzw. wollten keine Angaben zu spezifischen Kosten machen. Auch wurden keine genauen Angaben zu den eingesetzten Trocknungstechnologien gemacht.

Da insbesondere bei den Anlagen Bad Wildungen, Lohra und Volkmarsen die Wärmeversorgung mit der Abwärme der Blockheizkraftwerke von Biogasanlagen realisiert wird, können Niedertemperatur-Trocknungsanlagen eingesetzt werden.

In den Fragebögen an die Betreiber der Kläranlagen wurde zudem abgefragt, ob in den jeweiligen Kommunen Anlagen oder Anbieter mit einem Abwärmeangebot vorhanden sind. Folgende Angaben wurden gemacht:

- Gemeinde Rasdorf: Nahwärmenetz zum Anschluss von 300 Grundstücken mit der Option zum Anschluss einer Trocknungsanlage wird aktuell geplant, keine Angabe über die zur Verfügung stehende Wärmemenge
- Stadtwerke Rotenburg a.d. Fulda: Abwärme aus einer Biogasanlage, keine belastbare Angabe über die zur Verfügung stehende Wärmemenge
- Stadt Wolfhagen, keine detaillierten Angaben
- Gemeinde Willingshausen, Energie Wasenberg eG, Energieversorgung durch EAM EnergiePlus GmbH mittels 4 BHKW, keine Angaben über Wärmeangebot

Da keine konkreten Angaben zu dem tatsächlichen Wärmeangebot an den einzelnen Standorten gemacht wurden, wurden diese Standorte nicht weiter betrachtet.

Das Szenario 4 beinhaltet daher exemplarisch eine dezentrale Trocknung auf 70 bzw. 90 % TM mit anschließendem Transport zur zentralen Verbrennung im Fernwärmeheizkraftwerk mit dortiger Phosphor-Rückgewinnung. Aufgrund konkreter Planungen wurden folgende Szenarien wirtschaftlich bewertet:

Szenario 4.1: 6.000 t/a entwässerter Klärschlamm

Beispiel-Standorte:

- Landkreis Waldeck-Frankenberg (Volkmarsen)
- Osthessen (Sontra oder Bebra mit Schlämmen aus den Landkreisen Hersfeld-Rotenburg sowie Werra-Meißner)

Szenario 4.2: 16.000 t/a entwässerter Klärschlamm

Beispiel-Standort:

- Osthessen (Sontra mit Schlämmen aus den Landkreisen Hersfeld-Rotenburg sowie Werra-Meißner)

Um für dieses Szenario belastbare Kosten anzusetzen, wurden Richtpreisangebote verschiedener Hersteller zu verschiedenen Durchsatzmengen abgefragt, um Szenarien der dezentralen Trocknung darstellen zu können. Dabei wurde davon ausgegangen, dass der Klärschlamm-Input als entwässerter Schlamm mit einem TM-Gehalt von 25 % vorliegt und das Trocknungsziel bei ca. 70 bzw. 90 % TM liegt. Bei weiter fortschreitender Planung des gesamten Projekts müssen die

Input-Daten und damit die Angebote konkretisiert werden. Es wurden Angebote verschiedener Anbieter berücksichtigt:

- abwärmegestützte Solartrocknungsanlagen, Trocknungsziel 70 % TM
Ein Trocknungsziel von 90 % TM kann mit Solartrocknungsanlagen nicht betriebsstabil erreicht werden, wird daher hier nicht weiter betrachtet
- Bandtrocknungsanlagen, Trocknungsziel 70 bzw. 90 % TM

Bei der Betrachtung der Kosten wurden folgende Anteile abgeschätzt:

- Grundstück
- Stahlhalle in der erforderlichen Größe
- Erd- und Betonbauarbeiten
- Aufwendungen für Schlammannahme
- Verfahrenstechnik (M+E)
- Ablufführung und Abluftbehandlung
- Klärschlammstilo für den getrockneten Klärschlamm
- erforderliche Fläche zum Bau der Trocknungsanlage (50 €/m²)
- Sicherheit, Schnittstellen: zzgl. 15 %
- Planung, Projektsteuerung: zzgl. 15 + 5 %

Die Kosten (Investitionen und Betriebskosten) für die Trocknungsanlagen sind in Anhang 12.5 enthalten. In den nachfolgenden Abb. 9-10 und Abb. 9-12 sind die Kosten dargestellt.

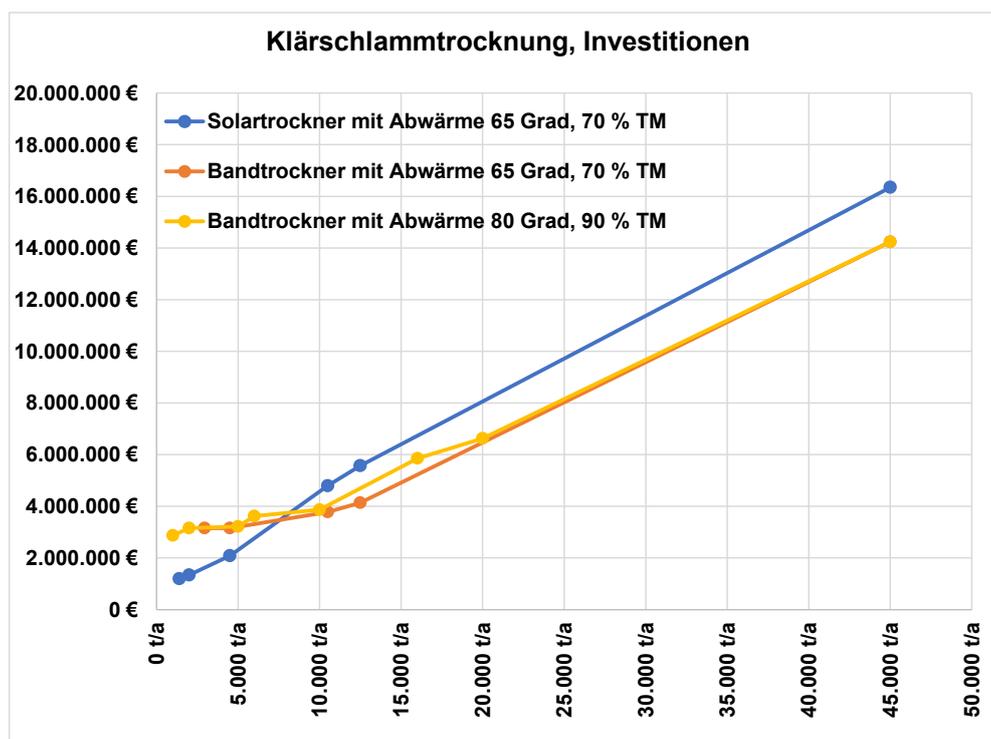


Abb. 9-10: Investitionen der Klärschlamm-trocknung bei verschiedenen Trocknungstechnologien sowie Jahresdurchsätzen.

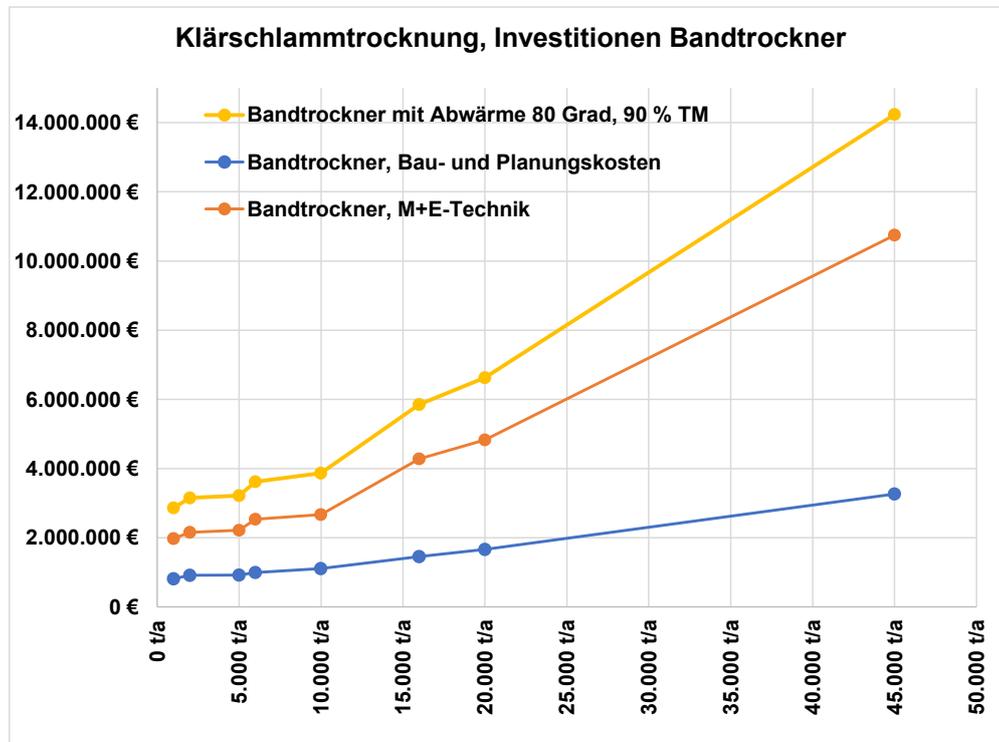


Abb. 9-11: Investitionen bei Bandrocknern, Bau- und Planungskosten sowie Kosten für Maschinen und E-MSR-Technik bei verschiedenen Jahresdurchsätzen.

Die Jahreskosten wurden über eine statische Kostenberechnung mit den oben genannten Ansätzen als Summe aus Kapitalkosten, festen und variablen Betriebskosten ermittelt (Ansätze siehe Kap. 9.3).

Für die Ermittlung der spezifischen Kosten wurde davon ausgegangen, dass die erforderliche Niedertemperatur-Wärme kostenlos zur Verfügung steht.

Als Quotient aus Jahreskosten und zu verarbeitender Klärschlammmenge ergeben sich daraus die spezifischen Kosten für die Klärschlamm-trocknung pro t entwässerten Klärschlamm (mit 25 % TM) (siehe Abb. 9-12).

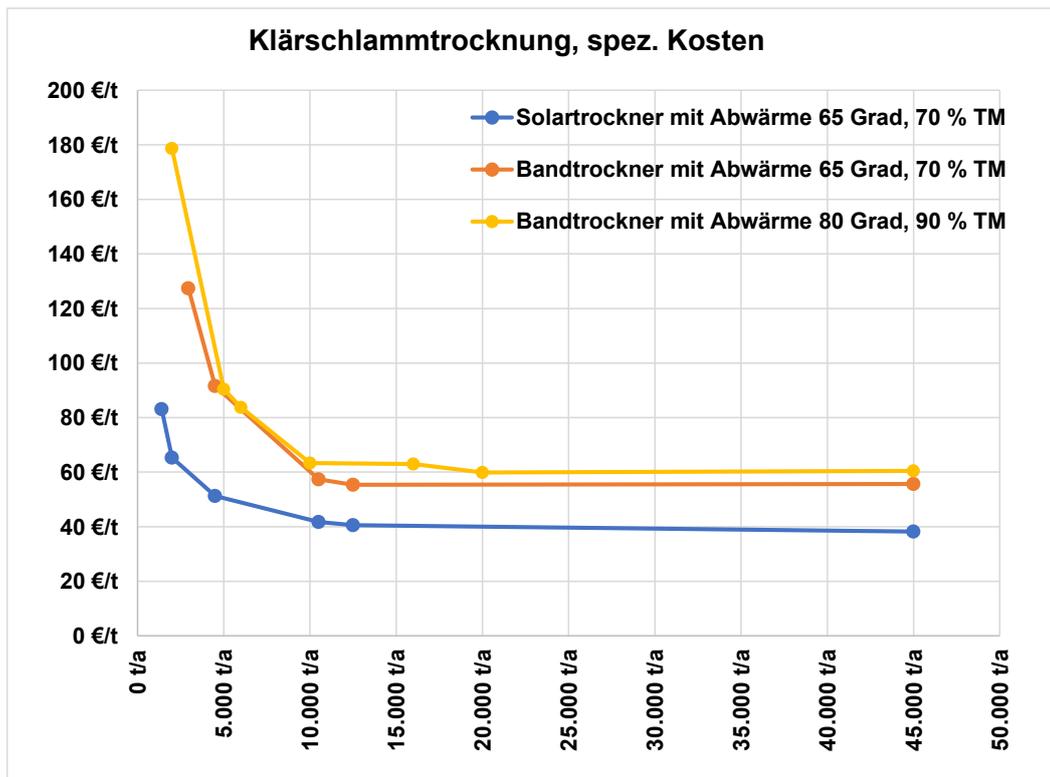


Abb. 9-12: Spezifische Kosten der Klärschlamm-trocknung für entwässerten Klärschlamm mit 25 % TM bei verschiedenen Trocknungstechnologien sowie Jahresdurchsätzen.

Diese Kostenschätzung zeigt, dass Solartrockner mit Abwärme-Unterstützung grundsätzlich kostengünstiger arbeiten als Bandrockner. Es muss aber bedacht werden, dass der Flächenbedarf insbesondere bei großen zu verarbeitenden Klärschlamm-mengen erheblich größer ist. Desweiteren ist festzustellen, dass Trocknungsanlagen mit einem Durchsatz von weniger als 10.000 t/a nur zu spezifisch sehr hohen Kosten (€/a) zu betreiben sind. Die den Abb. 9-10 und Abb. 9-12 zugrundeliegenden Angaben und Ansätze müssen bei Konkretisierung der Vorhabens ausdetailliert werden, um die tatsächlich zu trocknende KS-Menge zu berücksichtigen.

Für den Transport des getrockneten Klärschlammes nach Kassel werden die in Kap. 9.3.1.3 genannten Kosten berücksichtigt:

- Szenario 4.1: Standort Volkmarsen, 6.000 t/a: Entfernung 40 km: 8,00 €/t
- Szenario 4.2: Standort Sontra, 16.000 t/a: Entfernung 60 km: 10,00 €/t

Für die weitere Kostenbetrachtung der Szenarien 4.1 und 4.2 werden die Kosten für Bandtrockner angesetzt, die einen Trocknungsgrad von 90 % erreichen, vergleichbar mit der Trocknungsanlage, die in Kassel realisiert wurde.

Die thermische Verwertung (Verbrennung) in Kassel für diesen auf 90 % getrockneten Schlamm wird mit spezifischen Kosten von 25,- € / t getrocknetem Klärschlamm als Substitut für fossile Energieträger eingepreist (siehe Kap. 9.2.5).

Für die Phosphorrückgewinnung aus der Asche werden die in Kap. 9.2.5 erläuterten Kosten von 290 €/t Asche berücksichtigt.

9.2.5 Szenario 5: Zentrale Verbrennung und Phosphorrückgewinnung aus der Asche, Städtische Werke Energie + Wärme GmbH, Kassel

Das Szenario 5 steht für die Schlämme, die entwässert zur zentralen Verbrennungsanlage in Kassel transportiert und dort thermisch verwertet werden. Der in den Schlämmen enthaltene Phosphor soll zukünftig über die Asche zurückgewonnen.

Die Verbrennungsanlage in Kassel nimmt aktuell bereit ca. 65.000 t/a entwässerten Klärschlamm von verschiedenen Betreibern und Lieferanten, u.a. von KASSELWASSER mit ca. 20-35 % TM an. Ziel ist es, die Wärmeversorgung in Kassel bis 2025 völlig frei von fossilen Quellen betreiben zu können. Hierfür sollen in Kassel zukünftig insgesamt 220.000 t/a Klärschlämme angenommen werden, davon

- Ca. 70.000 t/a entwässertes Schlamm (25-30 % TM) werden in der neu errichteten betriebseigenen Trocknung auf ca. 90 % TM getrocknet, der getrocknete Schlamm (ca. 19.000 t/a, 90 % TM) wird über die vorhandene pneumatische Förderung in die Verbrennung gegeben.
- Weiterhin sollen Schlämme entweder entwässert oder (teil-)getrocknet angenommen werden und direkt gegeben

Zur Klärschlamm-trocknung wurde eine Bandtrockner-Anlage (2 parallele Einheiten) mit einer Trocknungskapazität von 2 * 5 t/h (25 – 30 % TM auf ca. 85 – 95 % TM) derzeit (2020/2021) in Betrieb genommen.

Aufgrund der großen zu trocknenden Schlammmenge wurde bei der Trocknungsanlage auf eine Brüdenkondensation verzichtet, um die abzuleitende und zu behandelnde Abwassermenge zu reduzieren. Die Wärmerückgewinnung aus der Abluft wird über Abluft-Frischluft-Wärmetauscher realisiert. Die verdampfte Wassermenge wird über die Abluft in die Umgebung abgegeben; Kondensationen sollen durch gezielte zwischenzeitliche Aufheizungen vermieden werden. Ergänzend soll Altholz der Kat. A1 bis A3 angenommen und verbrannt werden.

Konkrete Annahmepreise für entwässerten und getrockneten Klärschlamm wurden seitens des Betreibers nicht genannt. Daher kann nur auf Ergebnisse von Ausschreibung bzw. auf Angaben von Anliefer-Kommunen zurückgegriffen werden.

Demnach müssen folgende Annahmepreise (an Fernwärmewerk) kalkuliert werden:

- Annahme entwässerter Schlamm: ca. 85 € / t entwässerter Schlamm
- Annahme getrockneter Schlamm (als Substitut der Braunkohle):
ca. 25 €/t Klärschlammgranulat mit ca. 90 – 95 % TM

Der Preis von 85,- €/t entwässertem Klärschlamm angeliefert an der Verbrennungsanlage erscheint hoch, zumal als Marktpreis das Ergebnis einer aktuellen Ausschreibung aus dem Bereich Mittelhessen vorliegt, in der für die thermische Verwertung Preise zwischen 85 und 120 €/t entwässertem Klärschlamm mit 25 % TM (entspr. 340 – 480 €/t TM) ab Kläranlage inkl. Containerstellung und Transport angeboten wurden. Für die gleiche Leistung in 2022 wurden Preise mit einer Preissteigerung zwischen 0 und 4 % angeboten.

Hinsichtlich der Phosphor-Rückgewinnung aus der Asche sind noch keine Entscheidungen gefallen; verschiedene Verfahren sind in Kap. 6.3 erläutert

In dieser Machbarkeitsstudie wird ein Verfahren zur Produktion von marktfähiger Phosphorsäure aus der Klärschlamm-Asche betrachtet. Diese Festlegung erfolgte u.a. unter Berücksichtigung des Einsatzes von Altholz in der Verbrennung. Derartige Verfahren werden derzeit durch zwei Anbieter am Markt beworben.

9.2.5.1 Ascheaufbereitung zur Phosphorsäure nach Verfahren A

Der Anbieter des Verfahren A war nicht bereit, ein Richtpreisangebot für diese Machbarkeitsstudie abzugeben. Es wurde auf die Aussage im Manuskript eines Vortrags des Geschäftsführers verwiesen:

„Beim umgesetzten Verfahren entstehen hochwertige Produkte u.a. für die Metall- und Düngemittelindustrie. Die damit generierten Erlöse finanzieren die [...]Anlage, ohne den Gebührenhaushalt zu belasten.“

Die Aussage konnte in weiteren Gesprächen konkretisiert werden. Danach werden die Kosten der Anlage (Verfahren A) (Kapital- und Betriebskosten) durch die Erlöse aus der Vermarktung der Produkte (Phosphor-Säure, Eisen- und Aluminium-Salz-Lösung als Fällmittel, Gips als Baustoff) sowie den ersparten Entsorgungskosten der Asche finanziert.

Eine bestehende Anlage nach Verfahren A wurde für einen Massenstrom von 20.000 t/a Asche aus der Klärschlamm-Monoverbrennung realisiert. Im Prozess ergeben sich folgende Teilströme:

- Input: 20.000 t/a Asche trocken
- 55 % der Asche werden gelöst und wiederverwertet als
 - Phosphorsäure (ca. 85 % des P-Input),

- 2 %-ige Lösung von Eisen- und Aluminium-Salzen, werden direkt kontinuierlich dem Zulauf der vorgelagerten Kläranlage als Fällmittel zugegeben, entsprechend ca. 40-50 % des Fällmittelbedarfs
- Gips
- 9.000 t TM/a mineralischer Rest:
 - wird entwässert auf ca. 55 % entspr. ca. 17.000 t/a entwässerter mineralischer Schlamm
 - Entsorgungskosten:
 - ohne P-Rückgewinnung (vor Inbetriebnahme der Anlage nach Verfahren A): Asche musste angefeuchtet werden, aus 20.000 t/a Asche wurden 24.000 t/a feuchter Kuchen, Ablagerung auf einer Deponie,
 - mit P-Rückgewinnung (nach Inbetriebnahme der Anlage nach Verfahren A): entwässerter Schlamm 17.000 t/a, Ablagerung auf der einer Deponie
 - Ersparnis: (entspr. Einnahme der P-Rückgewinnungsanlage) ergibt sich aus der eingesparten zu deponierenden Mineral-Schlammmenge:
24.000 t/a – 17.000 t/a = 7.000 t/a

9.2.5.2 Ascheaufbereitung zur Phosphorsäure nach Verfahren B

Für die Investitionen einer schlüsselfertigen Anlage mit ca. 50.000 t/a Aschemenge (vergleichbar mit der Prognose für Kassel) nach Verfahren B werden Investitionen von ca. 1.000 – 1.100 € pro t/a Aschedurchsatz angegeben. Das wären für die Anlage in Kassel ca. 50 – 55 Mio. €. Nach einem ersten Ansatz teilen sich diese Kosten in ca. 20 % Bau-Kosten und 80 % Maschinen- und E-MSR-Technik auf.

Hinzu kommen – wie bei allen betrachteten Szenarien – Kosten für Planung von 15 % und Projektsteuerung von 5 % der Investitionssumme.

Die Betriebskosten sind von einer Reihe standortspezifischer Faktoren wie Energiepreise, Nutzungsentgelte, Chemikalienverfügbarkeit, Lohnniveau etc. abhängig.

Angesetzt sind hier folgende spezifische Kosten:

- Strom 0,14 €/kWh
- Dampf/Wärme 0,04 €/kWh
- Personalkosten 60.000 €/P zzgl. AG-Anteil
- Entsorgung DK1 50 €/t

Daraus ergeben sich folgende Preisannahmen (Kostenschätzung) wesentlicher Kostenanteile:

- Variable Kosten (Chemikalien und Energie; Entsorgung) 200 - 220 €/t KSA
- Semivariable Kosten (Personal, Wartung & Instandhaltung) 40 - 50 €/t KSA

Die Entsorgungskosten werden in der Kostenbetrachtung der Phosphor-Rückgewinnung nicht explizit berücksichtigt, da die Entsorgung der mineralischen Reststoffe aus der Klärschlammverbrennung ja bereits in den Annahmepreisen für die Verbrennung des Klärschlammes eingepreist sind. Hier dürfte es aufgrund der Reduzierung der zu entsorgenden Reststoffmengen durch die P-Rückgewinnung sogar noch einen Benefit geben, der hier aber nicht berücksichtigt ist (s Anmerkungen zu Verfahren A zur Phosphorsäureproduktion).

Unter Ansatz der in Kap. 9.3 erläuterten Kapitalkostenberechnung ergibt sich ein spezifischer Aufbereitungspreis gem. Verfahren B von

- ca. 290 € / t Klärschlammasche
- entspr. ca. 160 € / t TM
- entspr. ca. 40 € / t Klärschlamm (25 % TM)

Bei der Kalkulation wurde eine Vergütung zurückgewonnener Fällmittel nicht berücksichtigt. Das Betriebsgebäude ist in den Kosten eingeschlossen.

9.3 Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Szenarien

Die **Wirtschaftlichkeit** der verschiedenen Szenarien mit Gesamtkosten wird unter Einbeziehung der oben gemachten spezifischen Ansätze zunächst für die jeweiligen angesetzten Massen als Jahreskosten ermittelt und anschließend zum Vergleich der verschiedenen Szenarien in spezifische Kosten (in €/t Originalsubstanz, €/t TM, €/kg P_{rec}) umgerechnet.

9.3.1 Kosten der Klärschlammlogistik

Eine optimierte Transportlogistik ist aufgrund weiter Entfernungen in ländlich geprägten Regionen wie NOH unerlässlich. Die Region ist geprägt durch wenige Großklärwerke (GK 5 Kassel, Fulda), zwei Kläranlagen der GK 4b und viele Kläranlagen der GK 4a, 3, 2 und 1 im ländlichen Raum.

Die Logistik und die damit zusammenhängenden Kosten sind abhängig von verschiedenen Faktoren:

- dem zu transportierenden Schlamm (Nassschlamm, entwässerter Schlamm, getrockneter Schlamm),
- der Schlammbereitstellung auf den Kläranlagen (Flüssigschlamm Lager, Schlamm Lager für entwässerte Schlämme, Container-Bereitstellung durch die Kläranlage oder den Transporteur, Befüllung der Transport-Lkw), Befüllung der Transport-Lkw auf den Kläranlagen, z.B. mit eigenem Radlader
- Zwischenlagerung z.B. von bodenbezogen zu verwertendem Schlamm am Feld
- dem eingesetzten Transport-Fahrzeug (Tank-Anhänger („Gülle-Fass“), Tank-Lkw, Container-Lkw, Transport-Mulde, Silo-Lkw für granulierten Schlämme)
- bei Transporten zu Mono- oder Mitverbrennungsanlagen, den Anforderungen an die Entladung.

Die Logistik-Varianten sind dabei sehr vielfältig und für jede Kläranlage anders. Eine anlagenspezifische Betrachtung für alle 297 Kläranlagen im Bereich NOH ist im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie nicht möglich, zumal auch nicht für jede Kläranlage eindeutige sinnvolle Verwertungswege festzulegen sind. Daher werden nachfolgend verschiedene Logistik-Szenarien erläutert, die dann in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Szenarien zur Klärschlammverwertung und zum Phosphor-Recycling eingehen.

9.3.1.1 Transportkosten Nassschlamm

Der Transport von Nassschlamm erfolgt bei kurzen Wegen in der Regel mit landwirtschaftlichen Gülle- bzw. Silo-Anhänger, bei größeren Entfernungen mit Tank-Aufliegern. Zum Teil werden zur Zwischenlagerung am Feld sog. Feldrandcontainer eingesetzt, aus denen die Entnahme für die Verteilung auf dem Feld erfolgt. Kosten für den ausschließlichen Transport von Nassschlamm werden nicht angegeben. Die Maschinenringe geben Kosten für die Logistik von Nassschlamm von den Kläranlagen auf die Felder inkl. Verteilung mit Schleppschuh von ca. 9,50 €/m³ (bei Entfernungen bis 15 km) bis ca. 10,50 €/m³ (bei Entfernungen bis 25 km) an. Zu diesen reinen Transport- und Aufbringungskosten müssen weitere Kosten für die Einarbeitung, Bodenprobe- und -Analytik, Lieferscheinverfahren, Düngbedarfsermittlung, Abfuhrpläne etc. in der Größenordnung von ca. 15-17 €/m³ Nassschlamm addiert werden.

Für den reinen Transport im Silo-Lkw bzw. Güllewagen werden nachfolgend Kosten von ca. 5,00 €/m³ (bei Entfernungen bis 15 km) bis ca. 7,50 €/m³ (bei Entfernungen bis 25 km) angesetzt.

9.3.1.2 Transportkosten entwässerte Schlämme

Für entwässerte Schlämme mit ca. 22 bis 30 % TM (hier betrachtet 25 % TM) gibt es im Wesentlichen 3 Möglichkeiten

- Kippsattelaufleger (frei Kippsattel verladen) 35 - 38 m³ entspr. ca. 27 – 28 t / Transport
- Mulden-Abrollcontainer mit 20 – 30 m³ entspr. ca. 18 - 21 t / Transport
- Containerabsetzmulden mit 7 – 10 m³, die dann überwiegend im 2er oder 3er Zug transportiert werden, entspr. ca. 18 - 21 t / Transport

Der Frachtpreis (Kostengrundlage 2021) mit Kippsattelaufliegern zzgl. Beladung mit Radlader wird kalkuliert mit :

- Entfernung 150 km: 18,50 €/t
- Entfernung 100 km: 12,50 €/t
- Entfernung 60 km: 8,00 €/t

Die Beladung der Lkw ist individuell und nicht mitberechnet.

9.3.1.3 Transportkosten getrocknete Schlämme und Aschen

Getrockneter Schlamm mit > 90 % TM, wie er von Zementfabriken gefordert wird, wird mit Silo-Lkw ca. 60 m³ entspr. ca. 24 – 25 t transportiert. Hier sind folgende Preise anzusetzen (frei Silo-Lkw verladen):

- Entfernung 150 km: 24,00 €/t

- Entfernung 100 km: 17,00 €/t
- Entfernung 60 km: 10,00 €/t
- Entfernung 15 km: 6,00 €/t

Die Beladung der Lkw ist individuell und nicht mitberechnet.

9.3.2 Investitionen

Für die Szenarien 2.2, 3 und 4 wurden Investitionskosten anhand von Richtpreisangeboten verschiedener Anbieter abgeschätzt. Hier wird unterschieden in Investitionen für

- Bautechnik (bautechnische und anlagenbautechnische Peripherie (Grundstück, Erschließung, Ver- und Entsorgung, Baugrund/Gründung, Tiefbau, Hochbau))
- Verfahrenstechnik (Maschinen- und E-MSR-Technik)
- Planung
- Projektsteuerung

Die Richtpreisangebote der Technologien verschiedener Anbieter wurden erhoben für

- Anlagen zum P-Recycling aus Klärschlamm (z.B. Verfahren 1 und 2),
- Trocknungsanlagen (Solarunterstützte und Band-Trockner, Paddeltrockner in Kombination mit Drehrohrofen),
- thermische Behandlung für dezentrale Anlagen als Drehrohrofen,
- P-Recycling-Verfahren (aus der Klärschlammasche)

Die Investitionen für die betrachteten Szenarien wurden auf der Basis von Richtpreisangeboten verschiedener Anbieter erstellt. Alle Richtpreisangebote beinhalten ausschließlich die Verfahrenstechnik (Beschickung mit entwässertem Klärschlamm, Trockner, Verbrennung, Ascheaustrag, Abluft- und Abgasreinigung, Fördertechnik). Die zusätzlich erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen sowie Baumaßnahmen (Herrichten der Baufläche, Abbau der vorhandenen kleinen Trocknungshalle, Vorrats- und Beschickungsbunker für die angelieferten entwässerten Klärschlämme, Betriebsgebäude bzw. Stahlhalle für die Verfahrenstechnik) wurden abgeschätzt.

Weiterhin wurde ein pauschaler Sicherheits-Aufschlag für die noch nicht vorhandene Projektplanungstiefe von 15 % der Investitionskosten angesetzt.

Zur Ermittlung der Gesamt-Kosten sowie für den Kostenvergleich, zur Ermittlung der Jahreskosten und der spezifischen Kosten (€/t) (siehe auch Kap. 9.3.4) wurden folgende spezifische Kostenansätze verwendet:

Kapitalkosten:

- Basis sind Richtpreisangebote verschiedener Hersteller von Trocknungsanlagen, Verbrennungsanlagen, Phosphor-Rückgewinnungsanlagen
- spezifischer Grundstückspreis 50 €/m²

- Sicherheits-Aufschlag für noch nicht vorhandene
Projektplanungstiefe 15 % der Investition
- Kosten für Planung, Gebühren pschl. 15 % der Investition
Projektsteuerung pschl. 5 % der Investition
- Zinsen 1 %/a
- Nutzungsdauer
 - Maschinen- und EMSR-Technik: 15 Jahre, Annuitätenfaktor $a = 0,07212$
 - Bautechnik und Planung: 30 Jahre, Annuitätenfaktor $a = 0,03875$

9.3.3 Betriebskosten

Die erforderlichen Betriebsmittel und Betriebskosten wurden ebenfalls nach den Angaben der Verfahrensanbieter zusammengestellt. Angaben hierzu finden sich bereits in den Kapiteln zu den einzelnen Szenarien.

Folgende spezifische Ansätze z.B. für Reparatur, Wartung, Unterhalt, Personalbedarf auf Basis von Erfahrungswerten sowie Betriebsmittel wurden für alle Verfahren vergleichbar gewählt:

Feste Betriebskosten

- Reparatur / Wartung / Unterhalt: 1 % der Investition Bautechnik / a
3 % der Investition M+E / a
- Personalkosten: 50.000 €/(P*a)
- Elektrische Energie: 0,25 €/kWh
- Thermische Energie: 0,05 €/kWh (Abwärme aus Biogasanlagen)
- Analysenkosten für prozess-
relevante Analytik: 5,00 bzw. 20,00 €/t TM
- Chemikalien Ansätze der Richtpreisangebote,
Marktpreise
- Reststoffentsorgung:
 - Rauchgasreinigungsrückstände 200,00 €/t (DK4-Deponie)
 - Reststoffe aus der P-Aufbereitung 55,00 €/t (DK1-Deponie)
- Verwertung der P-Rezyklate angesetztter Ertrag:
 - Direktnutzung Asche (Szenario 3) 50,00 € pro t P₂O₅ als Düngemittel
 - Produktion H₃PO₄ (Szenarien 4 u. 5) 650,00 € pro t Phosphorsäure

Weitere Kosten wie z.B. Managementkosten etc. für die extern angenommenen Klärschlämme wurden nicht angesetzt.

9.3.4 Jahreskosten

Die Jahreskosten werden über eine statische Kostenberechnung mit den oben genannten Ansätzen als Summe aus Kapitalkosten, festen und variablen Betriebskosten ermittelt. Die genaue

Kostenermittlung ist im Anhang enthalten. Eine Projektkostenbarwertberechnung nach LAWA unter Annahme von unterschiedlichen Kostensteigerungen z.B. von Energiekosten und sonstigen Betriebskosten (z.B. Personalkosten) über den Betrachtungszeitraum ist in diesem Projektstadium nicht sinnvoll.

Alle nachfolgend dargestellten Kosten sind als Netto-Kosten zzgl. der ges. MwSt. zu verstehen.

9.3.5 Kostenvergleich der verschiedenen Szenarien

Auf der Basis der oben erläuterten Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung haben wir für jedes Szenario die zu erwartenden Kosten abgeschätzt und spezifisch auf die Tonne Originalsubstanz, Trockenmasse sowie den recycelten Phosphor bezogen.

Die detaillierten Kostenzusammenstellungen und Berechnungen der Jahreskosten und spezifischen Kosten finden sich im Anhang 12.6. In den nachfolgenden Tab. 9-4 bis Tab. 9-8 sind Zusammenfassungen der Investitionen sowie Jahreskosten aus Kapitalkosten, festen und variablen Betriebskosten der betrachteten Szenarien dargestellt.

Die spezifischen Kosten sind anschließend in den Abb. 9-15 (spezifische Kosten je t Originalsubstanz €/t OS), Abb. 9-16 (spezifische Kosten je t Trockenmasse €/t TM) und Abb. 9-17 (spezifische Kosten je kg rückgewonnenem Phosphor €/kg P_{rec}) grafisch dargestellt.

Ein realistischer Kostenvergleich lässt sich nur bei Betrachtung der spezifischen Kosten je t Trockenmasse durchführen.

Die Gegenüberstellung zeigt in diesem Fall, dass eine landwirtschaftliche Verwertung von entwässertem Schlamm (**Szenario 1.2**) ohne Berücksichtigung der Entwässerungskosten die deutlich wirtschaftlichste Variante auch der Phosphor-Verwertung ist. In diesem Fall wird der gesamte im Schlamm gebundene Phosphor dem Boden zugeführt.

Im direkten Vergleich mit der Nassschlammverwertung müssen aber Kosten für die Entwässerung der Schlämme berücksichtigt werden, die bei Ansatz einer mobilen Entwässerung in der Größenordnung von ca. 9,50 €/m³ Nassschlamm entsprechend ca. 270 €/t TM liegen. Diese Entwässerungskosten relativieren sich bei Vorhandensein einer stationären Entwässerungsanlage. Kläranlagen, die über eine stationär installierte Schlammentwässerung verfügen, müssen zur gesamten Kostenbetrachtung Kosten von ca. 4 – 8 €/m³ Nassschlamm veranschlagen. Hierin enthalten sind die Kapitalkosten für die Schlammentwässerung inkl. erforderlichem Gebäude, Betriebskosten wie Strom, Polymer, Personalaufwand und auch Kosten für Wartung und Ersatzteile. Daraus ergeben sich spezifische Kosten von ca. 100 – 200 €/t TM (ist für jede Anlage gesondert zu bestimmen).

Eine Nassschlammverwertung schneidet hier deutlich schlechter ab; es müssen ca. 785 €/t TM (bei 3,5 % TM im Nassschlamm) angesetzt werden. Diese hohe Kosten lassen sich durch eine bessere Eindickung reduzieren.

Verfahren der Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm (**Szenario 2**) sind demgegenüber deutlich teurer und zudem nicht sicher in der Unterschreitung der Anforderungen der AbfKlärV. Hier wären Versuche erforderlich.

Die direkte thermische Behandlung von entwässertem Schlamm inkl. Phosphor-Rückgewinnung aus der Asche (**Szenario 5**) kommt auf ähnliche Behandlungskosten von ca. 100 bis 110 €/t entwässertem Schlamm (370 bis 470 €/t TM, je nach Transportentfernung) wie die landwirtschaftliche Verwertung des entwässerten Schlamms.

Eine vorgeschaltete Trocknung des Schlamms in dezentralen kleineren Trocknungsanlagen (**Szenario 4**) führt insgesamt gegenüber dem Szenario 5 zu spezifisch höheren Kosten, trotz geringer Transportkosten und niedrigerer Annahmepreisen für getrocknete Schlämme in der zentralen Verbrennungsanlage. Die Kosten für dezentrale Trocknungsanlagen führen aufgrund der daraus resultierenden Kapitalkosten aber auch der Betriebskosten der Trocknungsanlagen zu entsprechend hohen spezifischen Gesamt-Behandlungskosten von ca. 130 – 155 €/t entwässerten Schlamm (525 bis 620 €/t TM, je nach Größe des Trockners und Transportentfernung).

Dezentrale standardisierte Verbrennungsanlagen mit direkter Verwertung der Asche in der Düngemittelindustrie (**Szenario 3**) weisen Kosten von ca. 125 – 130 €/t entwässertem Schlamm (495 bis 515 €/t TM) auf und können für regionale Konzepte Sinn machen, bei denen die regionale Wertschöpfung und die langfristige Unabhängigkeit von größeren thermischen Verwertungseinrichtungen im Entscheidungsprozess eine Rolle spielt. Die Mehrkosten gegenüber der zentralen Verbrennung sind überschaubar. Das Szenario 3 bietet zudem noch den Vorteil, dass neben der Unabhängigkeit auch kein Erfordernis besteht, die Klärschlammentsorgung regelmäßig neu auszuschreiben.

Tab. 9-4: Kostenzusammenstellung Szenario 1 „Bodenbezogene Verwertung“, bei Szenario 1.2 ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m³ Nassschlamm entspr. 100 – 240 €/t TM

	Szenario 1 Bodenbezogene Verwertung				
	Szenario 1.1 Nassschlamm		Szenario 1.2 Nassschlamm - Entwässerter Schlamm		
Klärschlammmenge entwässert		50.000 t/a		20.000 t/a	
TR-Gehalt		3,50% TM		26,5% TM	
Klärschlammmenge TM		1.750 t TM/a		5.300 t TM/a	
oTR		55,0%		55,0%	
Asche-Menge					
P-Gehalt	im Schlamm	2,41%	im Schlamm	2,27%	
P-Menge		42,2 t P/a		120,3 t P/a	
P2O5-Menge		96,6 t P2O5/a		275,7 t P2O5/a	
INVESTITIONEN					
Grundstück		0 €		0 €	
Bautechnik Anlage		0 €		0 €	
Maschinen-, EMSR-Technik, Anlage		0 €		0 €	
Planung, Projektsteuerung		0 €		0 €	
SUMME INVESTITIONEN		0 €		0 €	
JAHRESKOSTEN					
Kapitalkosten		0,00 €/a		0,00 €/a	
Feste Betriebskosten		0,00 €/a		0,00 €/a	
Variable Betriebskosten		1.375.000,00 €/a		1.800.000,00 €/a	
SUMME JAHRESKOSTEN		1.375.000,00 €/a		1.800.000,00 €/a	
SPEZIFISCHE KOSTEN					
	je t OS	50.000 t OS/a	27,50 €/t OS	20.000 t OS/a	90,00 €/t OS
	Umrechnung je t KS (25 % TM)	7.000 t KS/a	196,43 €/t KS	21.200 t KS/a	84,91 €/t KS
	Umrechnung je t TM	1.750 t TM/a	785,71 €/t TM	5.300 t TM/a	339,62 €/t TM
	erford. Kosten für Entwässerung		0,00 €/t TM		271,43 €/t TM
	je kg P _{rec.}	42,2 t P/a	32,60 €/kg Prec	120,3 t P/a	14,96 €/kg Prec

Tab. 9-5: Kostenzusammenstellung Szenarien 2 „Dezentrale P-Rückgewinnung“ ggf. zzgl. ca. 4 – 9,5 €/m³ Nassschlamm für die Entwässerung mit mobilen oder stationären Aggregaten berücksichtigen.

Szenario 2 Dezentrale P-Rückgewinnung aus dem Schlamm Anforderung 50 % Reduzierung oder < 2 % P nicht gesichert				
P-Abreicherung, Entwässerung auf ca. 30 % TS, Entsorgung in der Zementindustrie				
	Szenario 2.1 mobile Anlage, Beispiel-Standort LK Waldeck-Frankenberg		Szenario 2.2 stationäre Anlage, Beispiel-Standort LK Werra-Meißner	
	Beispielgröße	20.000 t/a	Beispielgröße	2.340 t/a
Klärschlammmenge entwässert				
TR-Gehalt		3,50% TM		24,0% TM
Klärschlammmenge TM		700 t TM/a		562 t TM/a
oTR		55,0%		55,0%
Asche-Menge		315,0 t/a		252,7 t/a
P-Gehalt	im Schlamm	2,60%	im Schlamm	2,38%
P-Menge		18,2 t P/a		13,4 t P/a
P2O5-Menge		41,7 t P2O5/a		30,6 t P2O5/a
INVESTITIONEN				
Grundstück		0 €		35.000 €
Bautechnik Anlage		0 €		402.500 €
Maschinen-, EMSR-Technik, Anlage		0 €		575.000 €
Planung, Projektsteuerung		0 €		195.500 €
SUMME INVESTITIONEN		0 €		1.208.000 €
JAHRESKOSTEN				
Kapitalkosten		0,00 €/a		65.998,73 €/a
Feste Betriebskosten		0,00 €/a		73.718,75 €/a
Variable Betriebskosten		764.120,16 €/a		155.336,81 €/a
SUMME JAHRESKOSTEN		764.120,16 €/a		295.054,29 €/a
SPEZIFISCHE KOSTEN				
je t OS	20.000 t OS/a	38,21 €/t OS	2.340 t OS/a	126,09 €/t OS
Umrechnung je t KS (25 % TM)	2.800 t KS/a	272,90 €/t KS	2.246 t KS/a	131,35 €/t KS
Umrechnung je t TM	700 t TM/a	1091,60 €/t TM	562 t TM/a	525,38 €/t TM
erford. Kosten für Entwässerung		271,43 €/t TM		Entwässerung vorhanden
je kg P _{rec.}	6,4 t P/a	119,96 €/kg Prec	4,7 t P/a	63,07 €/kg Prec

Tab. 9-6: Kostenzusammenstellung Szenarien 3 „Dezentrale thermische Behandlung, Verwertung der Asche in der Düngeproduktion“, ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m³ Nassschlamm entspr. 100 – 240 €/t TM.

	Szenario 3			
	Dezentrale Thermische Behandlung			
	Bereitstellung der Asche zur Düngerproduktion			
	Szenario 3.1 6.000 t/a		Szenario 3.2 12.000 t/a	
	Beispiel-Standort		Beispiel-Standort	
	LK Hersfeld-Rotenburg		LK Fulda	
	Beispielgröße	6.000 t/a	Beispielgröße	12.000 t/a
Klärschlammmenge entwässert		25,00% TM		25,0% TM
TR-Gehalt		1.500 t TM/a		3.000 t TM/a
Klärschlammmenge TM		55,0%		55,0%
oTR		675,0 t/a		1.350,0 t/a
Asche-Menge		2,60%		2,60%
P-Gehalt	im Schlamm	39,0 t P/a	im Schlamm	78,0 t P/a
P-Menge		89,4 t P2O5/a		178,7 t P2O5/a
P2O5-Menge				
INVESTITIONEN				
Grundstück		70.000 €		100.000 €
Bautechnik Anlage		920.000 €		1.552.500 €
Maschinen-, EMSR-Technik, Anlage		2.415.000 €		4.715.000 €
Planung, Projektsteuerung		667.000 €		1.253.500 €
SUMME INVESTITIONEN		4.072.000 €		7.621.000 €
JAHRESKOSTEN				
Kapitalkosten		238.384,55 €/a		452.665,64 €/a
Feste Betriebskosten		139.987,50 €/a		247.643,75 €/a
Variable Betriebskosten		396.287,21 €/a		785.111,92 €/a
SUMME JAHRESKOSTEN		774.659,26 €/a		1.485.421,31 €/a
SPEZIFISCHE KOSTEN				
	je t OS	6.000 t OS/a	129,11 €/t OS	12.000 t OS/a
				123,79 €/t OS
	Umrechnung je t KS (25 % TM)	6.000 t KS/a	129,11 €/t KS	12.000 t KS/a
				123,79 €/t KS
	Umrechnung je t TM	1.500 t TM/a	516,44 €/t TM	3.000 t TM/a
				495,14 €/t TM
	erford. Kosten für Entwässerung		Entwässerung vorhanden	Entwässerung vorhanden
	je kg P_{rec.}	35,1 t P/a	22,07 €/kg Prec	70,2 t P/a
				21,16 €/kg Prec

Tab. 9-7: Kostenzusammenstellung Szenarien 4 „Dezentrale Trocknung und Zentrale Verbrennung und P-Rückgewinnung aus der Asche“, ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m³ Nassschlamm entspr. 100 – 240 €/t TM

	Szenario 4 Dezentrale Trocknung Zentrale Verbrennung Kassel			
	P-Rückgewinnung aus der Asche			
	Szenario 4.1 6.000 t/a Beispiel-Standort LK Waldeck-Frankenberg		Szenario 4.2 16.000 t/a Beispiel-Standort LK Werra-Meißner	
	Beispielgröße	6.000 t/a	Beispielgröße	16.000 t/a
Klärschlammmenge entwässert		6.000 t/a		16.000 t/a
TR-Gehalt		25,00% TM		25,0% TM
Klärschlammmenge TM		1.500 t TM/a		4.000 t TM/a
oTR		54,0%		52,0%
Asche-Menge		690,0 t/a		1.920,0 t/a
P-Gehalt	im Schlamm	2,36%	im Schlamm	2,50%
P-Menge		35,4 t P/a		100,0 t P/a
P2O5-Menge		81,1 t P2O5/a		229,1 t P2O5/a
INVESTITIONEN				
Grundstück		85.750 €		113.750 €
Bautechnik Anlage		534.750 €		707.250 €
Maschinen-, EMSR-Technik, Anlage		2.535.750 €		4.283.750 €
Planung, Projektsteuerung		614.100 €		998.200 €
SUMME INVESTITIONEN		3.770.350 €		6.102.950 €
JAHRESKOSTEN				
Kapitalkosten		230.726,30 €/a		379.450,81 €/a
Feste Betriebskosten		114.096,25 €/a		198.062,50 €/a
Variable Betriebskosten		589.173,91 €/a		1.516.506,35 €/a
SUMME JAHRESKOSTEN		933.996,46 €/a		2.094.019,66 €/a
SPEZIFISCHE KOSTEN				
je t OS	6.000 t OS/a	155,67 €/t OS	16.000 t OS/a	130,88 €/t OS
Umrechnung je t KS (25 % TM)	6.000 t KS/a	155,67 €/t KS	16.000 t KS/a	130,88 €/t KS
Umrechnung je t TM	1.500 t TM/a	622,66 €/t TM	4.000 t TM/a	523,50 €/t TM
erford. Kosten für Entwässerung		Entwässerung vorhanden		Entwässerung vorhanden
je kg P _{rec.}	30,1 t P/a	31,04 €/kg Prec	85,0 t P/a	24,64 €/kg Prec

Tab. 9-8: Kostenzusammenstellung Szenarien 5 „Zentrale Trocknung und Verbrennung sowie P-Rückgewinnung aus der Asche“, ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m³ Nassschlamm entspr. 100 – 240 €/t TM

Szenario 5 Zentrale Trocknung und Zentrale Verbrennung Kassel					
P-Rückgewinnung aus der Asche					
		Szenario 5.1 17.500 t/a Kassel	Szenario 5.2 8.000 t/a Fulda		
Klärschlammmenge entwässert		17.500 t/a		8.000 t/a	
TR-Gehalt		26,10% TM		23,0% TM	
Klärschlammmenge TM		4.568 t TM/a		1.840 t TM/a	
oTR		57,3%		56,3%	
Asche-Menge		1.950,3 t/a		804,1 t/a	
P-Gehalt	im Schlamm	3,63%		3,30%	
P-Menge		165,8 t P/a		60,7 t P/a	
P2O5-Menge		379,9 t P2O5/a		139,1 t P2O5/a	
INVESTITIONEN					
Grundstück		0 €		0 €	
Bautechnik Anlage		0 €		0 €	
Maschinen-, EMSR-Technik, Anlage		0 €		0 €	
Planung, Projektsteuerung		0 €		0 €	
SUMME INVESTITIONEN		0 €		0 €	
JAHRESKOSTEN					
Kapitalkosten		0,00 €/a		0,00 €/a	
Feste Betriebskosten		0,00 €/a		0,00 €/a	
Variable Betriebskosten		1.693.701,03 €/a		860.007,19 €/a	
SUMME JAHRESKOSTEN		1.693.701,03 €/a		860.007,19 €/a	
SPEZIFISCHE KOSTEN					
	je t OS	17.500 t OS/a	96,78 €/t OS	8.000 t OS/a	107,50 €/t OS
	Umrechnung je t KS (25 % TM)	18.270 t KS/a	92,70 €/t KS	7.360 t KS/a	116,85 €/t KS
	Umrechnung je t TM	4.568 t TM/a	370,82 €/t TM	1.840 t TM/a	467,40 €/t TM
	erford. Kosten für Entwässerung		Entwässerung vorhanden		Entwässerung vorhanden
	je kg P _{rec.}	140,9 t P/a	12,02 €/kg Prec	51,6 t P/a	16,66 €/kg Prec

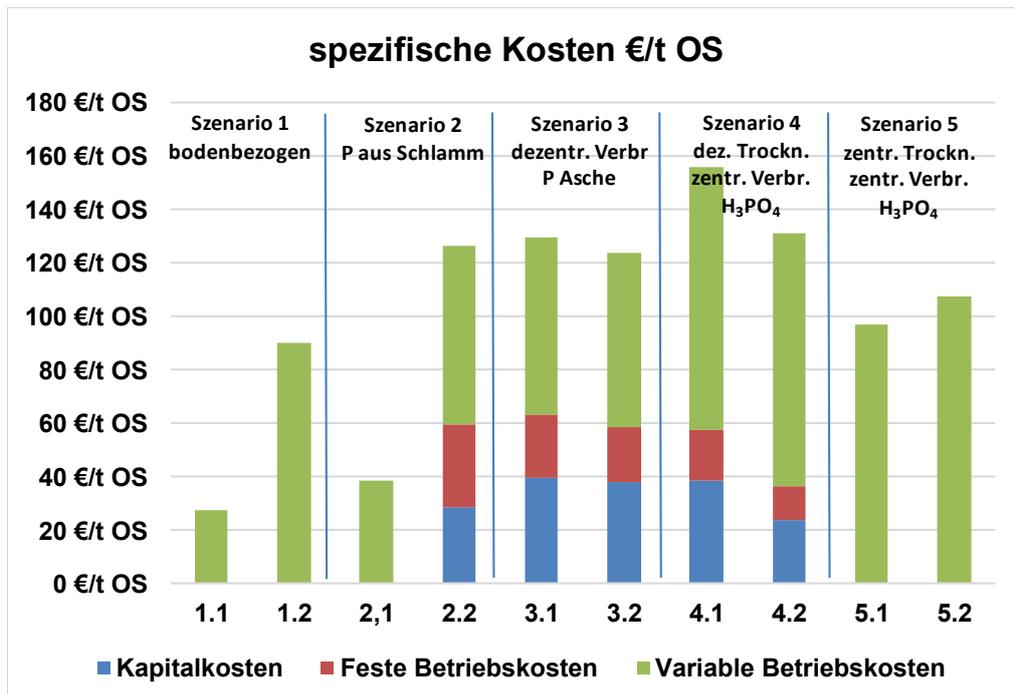


Abb. 9-13: Spezifische Kosten der beschriebenen Szenarien in €/t Originalsubstanz (OS), Kosten Szenario 1.2 – 5.2 ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m³ entspr. 100 – 240 €/t TM

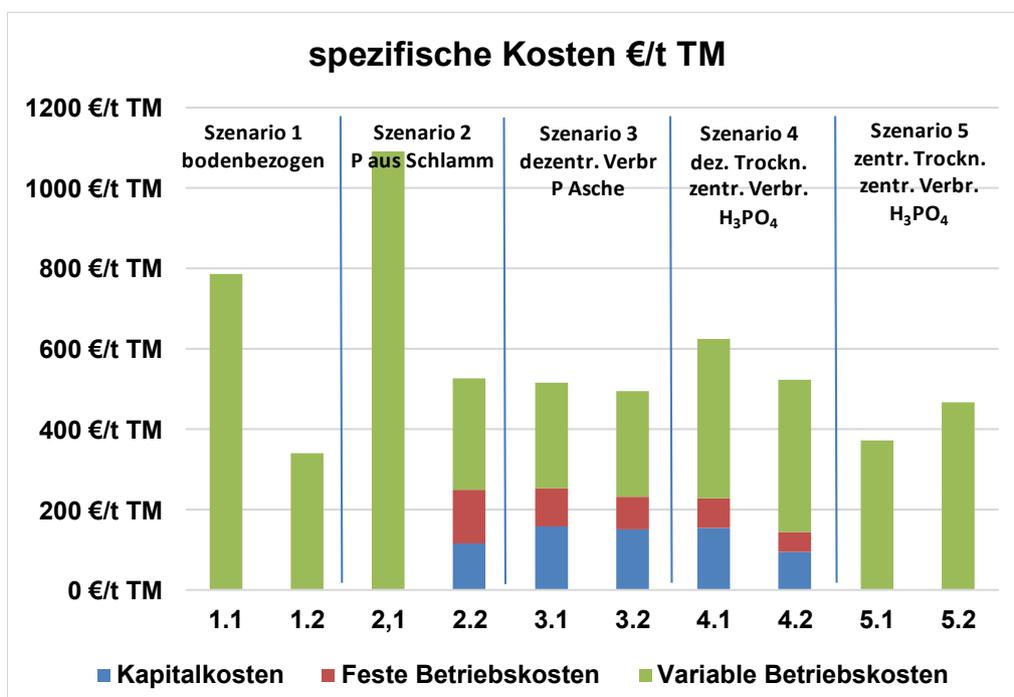


Abb. 9-14: Spezifische Kosten der beschriebenen Szenarien in €/t Trockenmasse (TM), Kosten Szenario 1.2 – 5.2 ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m³ entspr. 100 – 240 €/t TM

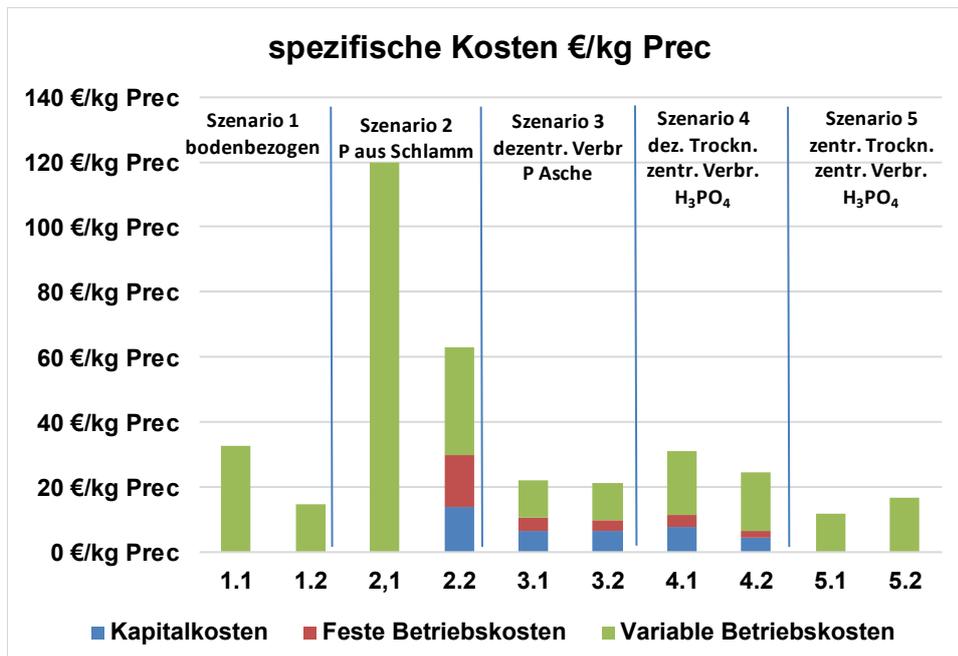


Abb. 9-15: Spezifische Kosten der beschriebenen Szenarien in €/kg zurückgewonnenem Phosphor (P_{rec}), Kosten Szenario 1.2 – 5.2 ggf. zzgl. mobile oder stationäre Entwässerung ca. 4 – 9,5 €/m³ entspr. 100 – 240 €/t TM

9.4 Entscheidungskriterien

9.4.1 Kriterium Kostenvergleich

Die Jahreskosten wurden über eine statische Kostenberechnung mit den oben genannten Ansätzen als Summe aus Kapitalkosten, festen und variablen Betriebskosten ermittelt (siehe 9.3).

9.4.2 Kriterium Einhaltung der Grenz- und Höchstwerte der Düngemittelverordnung

Die für die Erstellung der Machbarkeitsstudie vorliegenden Klärschlammanalysen führen rechnerisch zu Konzentrationen, die unterhalb der Grenz- und Höchstwerte der deutschen Düngemittelverordnung, Anlage 2, Tabelle 1.4 liegen. Da die Einhaltung der Grenzwerte der Düngemittelverordnung nicht nur für das in Verkehr gebrachte Düngemittel, sondern auch für die Ausgangsstoffe gilt, wurde hierauf besonderes Augenmerk gelegt. Berücksichtigt man die EU-Düngemittelverordnung, sind die zulässigen Höchstwerte für Kupfer (Cu) und Zink (Zn) teilweise überschritten, wobei dies eine Frage der konkreten Asche und damit der Herkunft der Klärschlämme ist.

9.4.3 Kriterium Pflanzenverfügbarkeit und Schadstoffbelastung

Es ist bekannt, dass die thermischen Verfahren zur Klärschlammbehandlung in Abhängigkeit von einer etwaigen Additivierung zu Aschen führen können, die als solche bereits eine Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors aufweisen. Entsprechende Untersuchungen mit realen Phosphor-Rezyklaten aus Klärschlammaschen wurden in der Vergangenheit am Institut für Pflanzenernährung der Justus-Liebig-Universität Gießen, Prof. Dr. Steffens, durchgeführt. Der in Zitronensäure und Neutral-Ammoniumcitrat lösliche P-Anteil ließ sich im Drehrohr-Reaktor durch die Zugabe

von Chlorid-Additiven etwas verbessern; gleichzeitig wurde eine deutliche Volatilisierung einiger Schwermetalle erzielt.

In Weidelgras-Pflanzversuchen waren die Ergebnisse abhängig vom Bodensubstrat (HGoTECH- bzw. Boden/Sandgemisch, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 6,5). Sie zeigten jedoch in der Tendenz eine gegenüber Rohphosphat verbesserte Wachstumswirkung. Insgesamt ergaben sich Hinweise darauf, dass die Aschen aus Sicht der Pflanzenernährung durchaus einem Kalkdüngemittel als P-Quelle zugemischt werden könnten, wobei die Wirkung dieser Kalk/P-Rezyklat-Gemische in weiteren Pflanzenversuchen zu überprüfen wäre. Eine weitere Erhöhung des pflanzenverfügbaren Phosphoranteils lässt sich dann erzielen, wenn die Asche in einem nachgelagerten Schritt durch Säurezugabe aufgeschlossen wird (RecoPhos bzw. pontes pabuli-Verfahren). Bei einer nach dem Parforce-Verfahrens hergestellten Phosphorsäure ist eine extrem hohe Pflanzenverfügbarkeit des probaten Aufschlussmittels für die Produktion sog. Triple-Superphosphate vorauszusetzen. Allerdings ergäben sich hierbei jenseits der Verarbeitung zum Düngemittel auch weitaus interessantere Vermarktungsansätze für das Rezyklat.

Insgesamt führen die im Rahmen der Machbarkeitsstudie betrachteten Verfahren inkl. derjenigen die am Schlamm bzw. Schlammwasser ansetzen zu Rezyklaten, deren P-Gehalt zumindest in Teilen pflanzenverfügbar ist und die die Kriterien der deutschen Düngemittelverordnung bez. der Schadstoffobergrenzen einhalten.

9.4.4 Kriterium Inverkehrbringung des P-Rezyklates und Entlassung aus dem Abfallrecht

Das Inverkehrbringen von Düngemitteln ist sowohl nach dem europäischen Recht (EG-Düngemittelverordnung) als auch nach nationalem Recht (Düngegesetz, Düngemittelverordnung - DüMV) möglich. Das Dezernat Landwirtschaft, Fischerei des RP Kassel stellte am 15.07.2019 auf Anfrage der Unterzeichner in einer mit dem RP Gießen abgestimmten Stellungnahme fest, dass Klärschlämme, Klärschlammaschen sowie teilweise deren P-Rezyklate bereits jetzt zulässige Düngemittel nach Düngemittelverordnung DüMV seien, sofern sie deren Anforderungen in der Zusammensetzung und Schadlosigkeit erfüllen. Sie verlören ihre Abfalleigenschaften mit der ordnungsgemäßen Aufbringung auf den Boden.

Bei einer düngemitteltechnischen Verwertung von Aschen und Fällungsprodukten sollte angestrebt werden das Ende der Abfalleigenschaft gem. § 5 Kreislaufwirtschaftsgesetz zu erreichen. Neben positiven Marketingaspekten wäre damit eine freie Handelbarkeit des Produkts (Wegfall der Verbleibskontrolle) gegeben. Wichtige Kriterien dazu sind die Absicht zur Produktverwendung, die bewusste Herstellung mit dem Ziel wirtschaftlicher Nutzung, die Schaffung sekundärer Ressourcen, der prozessbedingte Wegfall abfallspezifischer Gefährlichkeit bzw. die produktäquivalente Gefährlichkeit, die Eignung zur direkten Entlassung in den Wirtschaftskreislauf, die Abgrenzung des Produkts vom Abfall, die Produktwürdigung der Abnehmer (z.B. im Rahmen von Lieferverträgen). Laut Giesberts und Kleve (2008) sollte ein Kriterienkatalog zur Bestimmung des Endes der Abfalleigenschaft darauf fußen, dass dieses spiegelbildlich zur Begründung der Abfalleigenschaft aufzufassen ist (Tab. 9-9).

Tab. 9-9: Kriterienkatalog für die Entlassung des P-Rezyklats aus dem Abfallrecht

Spiegelbild des subjektiven Entledigungswillens	
• Absicht zur Produktverwendung	➤ Ziel Düngemittel-/Grundstofferzeugung
• Bewusste Herstellung mit dem Ziel wirtschaftlicher Nutzung	➤ Einsatz hochwertiger Chemikalien, Einsatz in komplexem Prozess
Spiegelbild des objektiven Entledigungswillens	
• Schaffung sekundärer Ressourcen	➤ Substitution Düngemittel/Grundchemikalien
• Wegfall abfallspezifischer Gefährlichkeit, produktäquivalente Gefährlichkeit	➤ Bei Einhaltung der DüMV-Grenzwerte Werte wie konventioneller P-Dünger
• Endprodukt kann direkt in Wirtschaftskreislauf entlassen werden	➤ Konfektionierung im Werk, Abgabe über Direkt-/Zwischenvermarktung
• Abgrenzung des Produkts vom Abfall	➤ P nach Prozess pflanzenverfügbar
• Produktwürdigung der Abnehmer	➤ Verknappungsgetriebene Nachfrage
• Lieferverträge / Qualitätsanforderungen der Abnehmer	➤ Entweder mit Direkt- oder Zwischenabnehmern

9.4.5 Kriterium Platzbedarf

Der Platzbedarf ergibt sich für Szenario 1 allein aus der landwirtschaftlichen Ausbringungsfläche. Der zusätzliche Platzbedarf für die Szenarien 2 bis 5 ergibt sich aus der zu errichtenden technischen Infrastruktur und ist entsprechend der anvisierten Kapazität der zentralen Verbrennungsanlage bei den Städtischen Werken Kassel am größten, wobei der Bedarf nur zu etwa 5% auf die Schlamme der Region NOH entfällt. Da bei diesem Szenario die Errichtung der Anlage durch einen externen Dritten erfolgt, ist auch das Kriterium Platzbedarf externalisiert.

9.4.6 Kriterium Genehmigungsumfang

Der genaue Umfang und die Dauer des Genehmigungsverfahrens ist abhängig von der tatsächlich realisierten Technologie zur Klärschlammbehandlung und Phosphor-Rückgewinnung.

Bei Realisierung der Phosphorrückgewinnung werden je nach Standort und Verfahrenskonzept für folgende Baugruppen Genehmigungen eingeholt werden müssen:

- Klärschlamm-Zwischenlager als Kurzzeitlager
- P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm und Schlammwasser auf dem Gelände der Kläranlagen
- Klärschlamm-trocknung
- Klärschlammverbrennung mit Phosphor-Rückgewinnung

- Lager für Klärschlammasche (als Ausgangsstoff für die Düngemittelindustrie) als Kurzzeitlager

Das Genehmigungsverfahren wird für diese Baugruppen gemeinsam eingeholt.

Die Lagerung des entwässerten Klärschlammes als Vorlage für Trocknung und Verbrennung erfolgt lediglich für einige Tage bis max. 1 Monat, so dass Lagerkapazitäten für eine Größenordnung von max. 500 t vorgesehen werden sollten. Diese Größe ist entsprechend der Konkretisierung der Szenarien in der Planungsphase anzupassen.

Klärschlamm gilt nicht als gefährlicher Abfall, daher erfolgt die Genehmigung der Klärschlamm-Zwischenlager gemäß 4. BImSchV, Nr. 8.12.2, gemäß § 19 des BImSchG nach dem vereinfachten Verfahren ohne Öffentlichkeitsbeteiligung

Bei Szenario 3 liegt der Durchsatz der Trocknung bei ca. 6.000 t/a (Szenario 3.1) bzw. 12.000 t/a (Szenario 3.2) (entspr. ca. 16,5 t/d bzw. 33 t/d, auf jeden Fall < 50 t/h, der Durchsatz der Verbrennung ebenfalls bei einem Durchsatz von < 3 t/h, kann die gesamte Verfahrenskombination ebenfalls nach dem vereinfachten Genehmigungsverfahren (nach § 19 BImSchG) gemäß der 4. BImSchV (bei Klärschlamm-trocknung gemäß Pkt. 8.10.2.2, bei Verbrennungsanlagen gemäß Pkt. 8.1.1.4) ohne Öffentlichkeitsbeteiligung genehmigt werden.

Auch die Klärschlammasche wird nicht als gefährlicher Abfall angesehen, so dass auch die Kurzzeitlagerung der Asche vor Weitertransport zur Düngemittelproduktion oder Aufbereitung im Rahmen des vereinfachten Verfahrens genehmigt werden kann.

Mit Ausnahme von wasserrechtlichen Erlaubnissen und Bewilligungen schließt die immissionsschutzrechtliche Genehmigung andere die Anlage betreffende behördliche Entscheidungen ein, insbesondere die Baugenehmigung nach der hessischen Bauordnung (HBO). Die Genehmigungskosten ergeben sich aus der Höhe der Gesamtinvestition (bis 50 Mio. €) zu 1,2 % der Investitionssumme. Die Dauer des Genehmigungsverfahrens beträgt laut Gesetz bis zu sieben Monate ab Vollständigkeit der Antragsunterlagen.

9.4.7 Kriterium Ausfallrisiko bez. Erfüllung P-Recyclingpflicht

Der Betreiber einer Verbund-Klärschlammbehandlungsanlage tritt in die Pflicht ein, den Nachweis über „die geplanten und eingeleiteten Maßnahmen zur Sicherstellung der ... durchzuführenden Phosphorrückgewinnung, zur Aufbringung der Einbringung von Klärschlamm auf oder in Böden oder zur sonstigen Klärschlamm-entsorgung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes vorzulegen“ (siehe Artikel 4, § 3a AbfKlärV 2017). Das Risiko einer Betriebsunterbrechung oder des Ausfalls der neu zu errichtenden Klärschlammbehandlungsanlage muss rechtlich hinsichtlich der Auswirkungen auf die Entsorgung des eigenen und der angenommenen Fremdschlämme bewertet werden.

9.4.8 Kriterium Erfordernis zum Aufbau von Vertriebsstrukturen

Ob am jeweiligen Standort ein Zwischenprodukt oder ein Endprodukt aus dem Klärschlamm hergestellt wird, beeinflusst etwaige Überlegungen eigene Vertriebsstrukturen aufzubauen. Sofern

ein vermarktungsfähiges P-Rezyklat als Endprodukt hergestellt wird, ist eine Vermarktung in eigener Regie zu erwägen. Möglich wäre auch eine Vermarktung über den Großhandel, alternativ könnte die Produktionsmenge auch an den Landhandel abgegeben werden. Eine Direktvermarktung wäre für alle bislang involvierten Akteure ein vollkommen neues Geschäftsfeld und ist u.E. nur in Kleinmengen für die Bürger denkbar. Auch ist es im Zusammenhang mit der Produktakzeptanz ggfs. von Vorteil, wenn dieses durch die Landwirte über die ihnen bislang vertrauten Vertriebswege zugänglich gemacht wird.

Es wird hier vorgeschlagen, die Asche bzw. deren Verarbeitungsprodukte sowie etwaige Fällungsprodukte direkt der Düngemittelindustrie zur Verfügung zu stellen und somit keine eigene Verwertung mit eigenen Vertriebsstrukturen aufzubauen. Dies gilt auch für die gem. Szenario 5 produzierte Phosphorsäure. In Bezug auf die betrachteten Szenarien bestehen 2 bis 5 bestehen aus jetziger Sicht somit keine Unterschiede.

9.4.9 Kriterium Erfüllungsgrad des Regionalitätsanspruchs der P-Rückgewinnung

Der Regionalitätsanspruch des P-Recyclings ist bei allen Szenarien prinzipiell gegeben. Im Fall der Phosphorsäureproduktion aus den Aschen der zentralen Verbrennung in Kassel steht die evtl. erforderliche überregionale Vermarktung im Einklang mit der überregionalen Herkunft der als Brennstoff eingesetzten Klärschlämme.

9.4.10 Kriterium technologischer Reifegrad

Der technologische Reifegrad beeinflusst das Risikoempfinden des Investors in seiner Entscheidung für eine Technologie. Hierzu ist festzuhalten, dass für die einzelnen Verfahrenstechniken der betrachteten Szenarien Referenzanlagen existieren.

9.5 Bewertung der Szenarien

Die Szenarien zur P-Rückgewinnung unterscheiden sich in der Qualität und der Pflanzenverfügbarkeit des Produktes, der regionalen Realisierungstiefe, den anlagentechnischen Erfordernissen, den Erfordernissen hinsichtlich der Genehmigung und dem erforderlichen Investitionsvolumen sowie den spezifischen Kosten. In der nachfolgenden Tab. 9-10 sind die zu berücksichtigenden Kriterien mit einer entsprechenden Bewertung zusammengestellt.

Tab. 9-10: Im Rahmen der Verfahrensauswahl zu berücksichtigende Aspekte

Kriterium	Szenario 1.1 Bodenbez. Verwertung Nassschlamm	Szenario 1.2 Bodenbez. Verwertung entw. Schlamm	Szenario 2 Dezentr. P-RW aus Schlamm + Mitverbrennung	Szenario 3 Dezentr. Verbrenn. + Asche in Dünger- produktion	Szenario 4 Dezentr. Trocknung + Zentr. Verbrenn. +H ₃ PO ₄ -Produktion	Szenario 5 Zentr. Verbrenn. + H ₃ PO ₄ -Produktion
P-Recycling- quote	maximal (100 %)	maximal (100 %)	mittel (max. 40%)	sehr hoch (> 90 %)	sehr hoch (> 90 %)	sehr hoch (> 90 %)
Pflanzen- verfügbarkeit	mittel	mittel	hoch	mittel	Sehr hoch bzw. irrelevant	Sehr hoch bzw. irrelevant
Genehmigungs- umfang	irrelevant	irrelevant	Schlamm- lager, Kristallisations- reaktor	Schlamm- lager, Trocknung, Verbrennung, Aschelager	Schlamm- lager, Trocknung,	Schlamm- lager
Ausfallrisiko bez. Erfüllung P-Recyc- lingpflicht	irrelevant	irrelevant	vollständig kontrol- lierbar	nicht voll kontrollier- bar (z.B. Kündigung durch Abnehmer	vollständig kontrol- lierbar (Trocknung) bzw. externalisiert	externalisiert
Rechtsrahmen	Abfallrecht	Abfallrecht	Wasserrecht / Düngemittelrecht	Abfallrecht / Düngemittelrecht	Abfallrecht / Chemikalienrecht	Düngemittelrecht Chemikalienrecht

Im Rahmen der Verfahrensauswahl zu berücksichtigende Aspekte (Fortsetzung)

Kriterium	Szenario 1.1 Bodenbez. Verwertung Nassschlamm	Szenario 1.2 Bodenbez. Verwertung entw. Schlamm	Szenario 2 Dezentr. P-RW aus Schlamm + Mitverbrennung	Szenario 3 Dezentr. Verbrenn. + Asche in Dünger- produktion	Szenario 4 Dezentr. Trocknung + Zentr. Verbrenn. +H ₃ PO ₄ -Produktion	Szenario 5 Zentr. Verbrennung + H ₃ PO ₄ -Produktion
Investitionen Schlammbeh., P-Recycling 0 = keine 3 = höchste	0	0	1	3	2	0
Spezif. Kosten Schlammbeh., P-Recycling 1 = niedrigste 5 = höchste im Variantenmittel	5	1	5	3	4	2
Erfordernis zum Aufbau Vertriebs- wegen	nein	nein	ja	ja	nein (externalisiert)	nein (externalisiert)
Regionalität P-Recyclings	ja	ja	ja	ja	nein	nein

9.6 Integrierte Bewertung der verschiedenen Szenarien

In den für die Kreislaufwirtschaft relevanten globalen Phosphorflüssen sind drei Kompartimente zu unterscheiden. Das erste Kompartiment (*Abbau*) betrifft die Gewinnung und die anschließende Aufbereitung von Phosphaterzen als primäre P-Ressource. Das zweite Kompartiment (*Verarbeitung*) betrifft die Produktion, bei der der Phosphor auf verschiedene (Teil)stoffströme aufgegliedert wird (z. B. in landwirtschaftliche Düngemittel, Futter- und Lebensmittelzusätzen, Waschmittel und anderen industriellen Produkte). Über den Abwasserpfad wird der Großteil der mit dem zweiten Kompartiment verbundenen P-Flüsse den Kläranlagen zugeführt und dort zum Schutz der Gewässerökosysteme in den Klärschlamm überführt. Dies gilt nicht für die mit Gülle und Festmist verbundenen P-Flüsse, die als Wirtschaftsdünger auf die landwirtschaftlichen Produktionsflächen zurückgehen. Am Klärschlamm setzt das dritte Kompartiment (*Recycling*) an. Innerhalb dessen setzt – gegebenenfalls über weitere Zwischenschritte – das mit der Novelle der Klärschlammverordnung verankerte P-Rückgewinnungsgebot an, welches im Falle großer Kläranlagen und bei P-Gehalten von größer als 20 g/kg TM jenseits der direkten bodenbezogenen Verwertung liegen soll. An den Schnittstellen der Kompartimente kommt es zu dissipativen Verlusten (z.B. in Form von P-Restkonzentrationen im Phosphorgips aus der Phosphorsäureproduktion oder in Form der die Kläranlagen verlassenden P-Frachten).

Ziel des Kompartiments *Recycling* ist es, soweit als möglich die Intensität von Prozessen im Kompartiment *Abbau* (Erzgewinnung und Aufbereitung, Transport zum Ort der Verarbeitung) und die mit diesen Prozessen verbundenen Umweltauswirkungen zu reduzieren. Insoweit als das Recycling erst abgeschlossen ist, wenn das Ende der Abfalleigenschaft erreicht und Produktstatus erlangt wurde, ragen die Aktivitäten des Recyclings aber auch in das Kompartiment *Verarbeitung* hinein. Es ist offensichtlich, dass die Umweltentlastung im Bereich des Kompartiments *Abbau* umso deutlicher ausfällt, je höher die Ausbeute beim Recycling (also die Rückgewinnungsquote) ist.

Bemerkenswert bei diesem Sachverhalt ist, dass die in der Vergangenheit vielfach praktizierte direkte bodenbezogene Verwertung des kommunalen Klärschlammes unabhängig von Fragen der P-Pflanzenverfügbarkeit eine sehr hohe Ausbeute hat, da der Phosphor auf diese Art und Weise i.W. ohne Aufbereitungsverluste in den Stoffkreislauf zurückgeführt wird. In diesem Zusammenhang muss konstatiert werden, dass die primäre Absicht des Ordnungsgebers bei der Novelle der AbfKlärV nicht in der Intensivierung des P-Recycling gelegen hat sondern darin, die Schadstoffbelastung von Agrar- und Gewässerökosystemen zu minimieren. Das verankerte Rückgewinnungsgebot ist daher nicht vorrangig ein Anstoß zum Recycling. Vielmehr ist es als Maßnahme zu werten, die einem Abschneiden des P-Kreislaufs (und damit einer weiteren **Steigerung** der Aktivitäten in den Kompartiment *Abbau und Verarbeitung*) nach dem Zurückdrängen der bodenbezogenen Verwertung entgegenwirken soll. Eine Bewertung, in welcher Relation die faktisch bei nahezu jedem P-Recyclingprozess im Vergleich zur direkten bodenbezogenen geringere P-Ausbeute zum ökologischen Nutzen der vermiedenen Schadstoffeinträge steht, ist jenseits des Horizonts dieser Machbarkeitsstudie.

Für eine fundierte ganzheitliche Betrachtung des P-Recyclings in NOH ist sowohl eine Festlegung der Mengengerüste für jeden Klärschlammstrom als deren Zuweisung zu einzelnen oder einer gemeinsamen Phosphorrückgewinnungstechnologie erforderlich. Letzteres ergibt sich aus

der o.g. Verzahnung der Kompartimente *Recycling* und *Verarbeitung* und der entsprechend erforderlichen Vergleichbarkeit von Primär- und Recycling-Produkten.

Die im Rahmen der Szenarien betrachteten Verfahren werden durch die Technologieanbieter am Markt aktiv beworben. Daraus ist zu schließen, dass der volle technologische Reifegrad gegeben ist und das auf dieser Ebene Verfahrensparität angesetzt werden kann.

Aufgrund der zugrundgelegten P-Ausbeuten und deren Proportionalität zu den vermeidbaren Umweltauswirkungen in der Vorkette kann in erster Näherung erwartet werden, dass die Ökoeffizienz **bezogen auf den P-Stoffstrom** in der Reihenfolge

- i. bodenbezogene Verwertung
- ii. aschebasierte Verfahren
- iii. schlamm-basierte Verfahren

abnimmt. Dies deckt sich tendenziell mit einer Zusammenschau von Ökobilanzstudien von Smol, et al (2020). Eine detaillierte ökobilanzielle Bewertung der verschiedenen Szenarien lässt sich aber erst dann erstellen, wenn für jede Kläranlage eine konkrete Zuordnung zu den beschriebenen Szenarien vorliegt (s. weitere Planungsschritte).

Interessanterweise deckt sich oben genannte Reihung mit der Reihung, die sich aus einer reinen Betriebskostenbetrachtung ergibt, wobei festzuhalten ist, dass aufgrund der Vorgaben der Düngerverordnung und der Düngemittelverordnung eine freie Entscheidung für das Szenario „bodenbezogene landwirtschaftliche Verwertung“ nur für einen Teil der Anlagenbetreiber möglich ist.

xx

10 Vorschläge für ein Gesamtkonzept und weitere Planungsschritte für die Region Nordost-Hessen

10.1 Ziele

Die vorrangigen Ziele der Klärschlammverwertung und eines ggf. zu bildenden Verbundes sind:

- eine hohe Entsorgungssicherheit für die beteiligten Kläranlagenbetreiber,
- stabile marktgerechte Entsorgungspreise für die beteiligten Kläranlagenbetreiber,
- eine Phosphorrückgewinnung unter Berücksichtigung der rechtlich vorgegebenen Rahmenbedingungen
- der Einsatz des Rezyklats im (über)regionalen Wirtschaftskreislauf

Die näher betrachteten, am Markt befindlichen Technologien wurden auf Basis einer Clusterung der an einer Kooperation interessierten Anlagenbetreiber zu exemplarischen Szenarien zusammengeführt und unter verschiedenen Gesichtspunkten unter anderem auch monetär bewertet. In den exemplarisch aufgezeigten Szenarien wurden die o.g. Ziele berücksichtigt.

10.2 Positionsbestimmung zur Berichtspflicht auf Ebene der einzelnen Kläranlagen

Um der zum 31.12.2023 zu erfüllenden Berichtspflicht gemäß Artikel 4 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017, § 3a entsprechen zu können, ist es zwingend erforderlich, dass jede einzelne Kläranlage sehr zeitnah eine Positionsbestimmung vornimmt und ggfs. vor dem Hintergrund der dargelegten Szenarien den präferierten künftigen Entsorgungsweg für den kommunalen Klärschlamm ausweist.

Die im Rahmen der Berichtspflicht darzulegenden Aspekte betreffen insbesondere:

- geplanten Maßnahmen / Zeitplan / Kooperationen; bei letzterem z.B. Verbund, in dem eine semidezentrale oder zentrale Behandlung erfolgen soll
- bereits eingeleitete Maßnahmen / Zeitplan / Kooperationen

Es wird davon ausgegangen, dass diejenigen Kläranlagen, die weiterhin in eine direkte bodenbezogene Verwertung gehen können, diesen Weg auch bevorzugt anstreben werden. An dieser Stelle ist zu klären, ob entsprechende Abnehmer existieren und ob dieser Entsorgungsweg auch langfristig Bestand hat.

Unsicherheit besteht derzeit darin, wie mit Klärschlämmen zu verfahren ist, die das Kriterium P-Gehalt < 20 g/kg TM gelegentlich überschreiten aber z.B. mangels vorhandener Ausbringungsflächen nicht in die bodenbezogene Verwertung gehen können. Als konservative Option könnte es ratsam sein, derartige Schlämme nicht einer Mitverbrennung zuzuführen, sondern einer semi-dezentralen Monoverbrennung mit einer düngemitteltechnischen Verwertung der Aschen. Dabei dürfte die Attraktivität dieser Schlämme für den Anlagenbetreiber geringer sein als die von Schlämmen mit einem hohen P-Gehalt, was sich möglicherweise in der Preisgestaltung niederschlägt.

10.3 Umsetzungskonzept

Die Diversität der dargelegten Szenarien berücksichtigt neben der im Auftrag vorgesehenen Verfahrensoffenheit auch die Zwischentöne aus dem Austausch mit diversen Akteuren in der Region. Diese lassen den Schluss zu, dass es für NOH nicht die eine Lösung für das P-Recycling geben wird, sondern das eher unterschiedliche Konzepte parallel zueinander umgesetzt werden, in die neben den Bedürfnissen der Anlagenbetreiber auch die rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen einfließen.

Insofern als es nicht die eine Lösung gibt, gibt es gegenwärtig auch nicht das eine auf die Region insgesamt anwendbare Umsetzungskonzept. Dennoch machen insbesondere die dargelegten Szenarien klar, dass es durchaus auch dezentral wirtschaftlich umsetzbare Konzepte gibt – auch unter Einbeziehung einer thermischen Behandlung der Klärschlämme.

Die Region insgesamt profitiert von der vergleichsweise geringen geogenen und anthropogenen Belastung der Schlämme. Diese ermöglicht, dass für diejenigen Anlagen, die nicht vom Phosphorrückgewinnungsgebot betroffen sind, eine direkte bodenbezogene Verwertung (bis aus einige Ausnahmen) weiterhin möglich ist. Auch die Umsetzung einer dezentralen Monoverbrennungsanlage profitiert von der Zusammensetzung des Klärschlammes in NOH: Die im Rahmen der Studie vorgestellten Berechnungen zur Zusammensetzung der virtuellen Asche zeigen (auf Landkreisebene wie für die Gesamtregion NOH) eine Unterschreitung der Grenz- und Höchstwerte der deutschen Düngemittelverordnung. Damit steht einem Einsatz in der Düngemittelfertigung nichts im Wege.

Etwas weniger Freiheitsgrade ergeben sich für die geplante zentrale Klärschlammverbrennung. Infolge der vorgesehenen Mitverbrennung von Altholz, dürfte eine düngemitteltechnische Verwendung der Asche nicht möglich sein. Hier besteht jedoch mit der Option in die Phosphorsäureproduktion zu gehen eine durchaus attraktive und vom Düngemittelmarkt losgelöste Verwertungsperspektive, bei der das Zielgebiet der P-Rückführung in den Markt (wie ja auch die Herkunft der Klärschlämme) allerdings über die Region NOH hinausgehen dürfte.

Erwartungsgemäß sind die in den Szenarien abgebildeten Kosten sämtlich teurer als die bisherige (oder – wo möglich – auch zukünftige) direkte bodenbezogene Verwertung von entwässerten Schlämmen. Die Höhe der Mehrkosten bewegt sich in einem Rahmen von 10 € bis 30 € pro Tonne entwässertem Schlamm bei 25% TM inkl. der Verwertung des im Schlamm enthaltenen Phosphors. Zusammen mit dem Umstand, dass technologisch reife Verfahren betrachtet wurden, ergibt sich als Fazit, dass eine Klärschlammverwertung mit integriertem Phosphorrecycling in der Region Nord-Ost-Hessen eindeutig machbar ist und dass diese Machbarkeit auch dann gegeben ist, wenn nicht auf eine Strategie für die Gesamtregion – sondern wie für NOH wahrscheinlich zutreffender – auf kleinskaligere und parallel zu einander existierende Lösungen gesetzt wird.

10.4 Festlegung der Mengengerüste zur Konkretisierung und Detaillierung der Angebote für das P-Recycling

Neben der Vorbereitung der vorzulegenden Berichte dient die Positionsbestimmung auf Ebene der Kläranlagen auch zur Festlegung der Klärschlamm-mengen und -qualitäten, die in den unterschiedlichen Teilregionen bei Konkretisierung der Szenarien berücksichtigt werden. Im Austausch mit den Technologieanbietern wurde mehrfach betont, dass eine detailliertere und damit belastbarere Angebotserstellung im besten Fall anhand einer Untersuchung des Materials im

technischen Maßstab erfolgen sollte. Für entsprechende Versuche sind – wo erforderlich – aufkommensproportional zusammengesetzte repräsentative Mischproben bereitzustellen.

Da die Menge und Zusammensetzung der Schlämme unmittelbare Auswirkungen auf die Anlagendimensionierung, die Anlagenkonfiguration und die laufenden Kosten haben wird, ist es erforderlich, dass etwaige Kooperationen von Kläranlagen mit dem Ziel der Realisierung einer semi-dezentralen Lösung vertraglich fixiert werden, um einerseits Entsorgungssicherheit und andererseits technische und finanzielle Planungssicherheit zu erhalten. Dies kann dann auch überzeugend in die fortzuschreibenden Berichten zur Strategie der P-Rückgewinnung einfließen.

Weiterhin sollte auf dieser Planungsebene geklärt werden, welche Abnehmer für das generierte Zwischenprodukt bzw. Rezyklat zu welchen Konditionen zur Verfügung stehen bzw. welche Vertriebsstrukturen genutzt werden können oder aufgebaut werden müssen.

10.5 Empfehlung für die Ableitung von Realisierungsvorschlägen bei semi-dezentralen Anlagen

Sollten zukünftig dezentrale oder semizentrale Behandlungsanlagen realisiert werden, bei denen mehrere Kommunen und / oder Betreiber ihre Klärschlämme anliefern und behandeln, sind für den weiteren Entscheidungs- und Planungsprozess werden folgende Schritte empfohlen:

1. Exakte Festlegung der zukünftigen Partner in den jeweiligen Szenarien unter Berücksichtigung der Klärschlammzusammensetzung und –menge
2. vertragliche Fixierung eines Klärschlamm Entsorgungs- und Phosphorrückgewinnungsverbandes unter Berücksichtigung aktueller Rechtsprechung zur interkommunalen Zusammenarbeit (siehe auch EU-GH-Urteil vom 04.06.2020 in der Rechtssache REMONDIS ./ Abfallzweckverband Rhein-Mosel- Eifel; Rs. C-429/19)
3. Rechtliche Überprüfung der Verwertung der konkreten Asche als Grundstoff für die Düngemittelindustrie, insbesondere vor dem Hintergrund der Schadstoff- und P-Gehalte
4. Abstimmung und Fixierung zur Abnahme der Asche als Grundstoff in der Düngemittelindustrie
5. Klare Definition von Übergabeschnittstellen im jeweiligen Gesamtprozess
6. Einleitung des Genehmigungsverfahrens, Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde zu den vorzulegenden Unterlagen
7. Aufstellung eines Kriterienkataloges zur Wertung schlüsselfertiger Angebote (Wertungsmatrix)
8. Schlüsselfertige Ausschreibung der gesamten Verfahrens- und Bautechnik, um Schnittstellen zu minimieren mit Garantieabfrage der Betriebsmittelverbräuche sowie Garantie der Unterschreitung der Grenzwerte der DüMV
9. Einbeziehung eines Betreiber- oder Betriebsführungsvertrages, ggf. mit verlängertem Probebetrieb, um einerseits die Verfahrenstechnik optimal einstellen zu können und um das Betriebspersonal der Kläranlage optimal zu schulen

10.6 Empfehlung für das weitere Vorgehen, Planungsschritte

Eine konkrete Zuweisung der Klärschlämme einer jeden Kläranlage zu einem der oben beschriebenen Szenarien lässt sich – mit wenigen Ausnahmen – im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie nicht durchführen. Hierfür sind insbesondere politische Entscheidungen jeder Kommune erforderlich.

Es wird angeboten, den **Planungsschritt I** in einem übergeordneten Informationsprozess mit Workshop-Charakter unterstützend zu begleiten. Dabei sollen die unterschiedlichen im Bereich des Regierungspräsidiums Kassel aktiven verschiedenen Player eingebunden und deren Interessen gebündelt werden. Insbesondere sind zu berücksichtigen

- Kommunen mit Eigenbetrieben, Eigengesellschaften, Stadtwerke
- Abwasser- und Zweckverbände
- Maschinenringe in den Landkreisen
- Unternehmen aus der Energiewirtschaft bzw. deren Tochtergesellschaften

Aufgrund der durch die Berichtspflicht per 31.12.2023 bestehenden Dringlichkeit könnte dies auch zeitnah im Rahmen einer Videokonferenz erfolgen, bei der die Interessengruppen in rotierenden Break-Out Rooms interaktiv mittels virtueller Pinwandmoderation teilnehmen.

Die Abläufe zur Findung von organisatorischen Strukturen in der Region Nordost-Hessen für alle Betreiber der Kläranlagen werden in einem weiteren **Planungsschritt II** moderiert. Hier werden Wege entwickelt, wie die Klärschlammverwertung und die Phosphorrückgewinnung

- unter Berücksichtigung der Anforderungen der AbfklärV und der DüMV,
- langfristig mit hoher Entsorgungssicherheit,
- wirtschaftlich,
- mit klarer Sicherheit hinsichtlich des Vergaberechts

zukünftig erfolgen kann.

Von besonderer Bedeutung sind hier vergaberechtliche Fragen. Insbesondere die interkommunale Zusammenarbeit steht hier aufgrund des **EuGH-Urteils** vom 04.06.2020 **in der Rechtssache REMONDIS ./. Abfallzweckverband Rhein-Mosel- Eifel; Rs. C-429/19** vor großen und neuen Herausforderungen. Danach ist es für eine **vergabefreie interkommunale Zusammenarbeit nicht ausreichend**, wenn ein öffentlicher Auftraggeber eine ihm obliegende Aufgabe (als öff. rechtl. Entsorgungsträger örE), für deren Erledigung mehrere Arbeitsgänge notwendig sind, nicht vollständig selbst erledigt, sondern einen anderen, von ihm unabhängigen örE damit beauftragt, gegen Entgelt einen der notwendigen Arbeitsgänge auszuführen.

Neue Herausforderungen an eine rechtliche Absicherung und Ordnung der interkommunalen Zusammenarbeit sind hinsichtlich der wörtliche Auslegung des Begriffs der Zusammenarbeit im Sinne einer „**echten Zusammenarbeit**“ gesetzt. Die Grundlage der Zusammenarbeit muss ein „**kooperatives Konzept**“ sein, d.h. ein Zusammenwirken aller Parteien der Kooperationsverein-

barung für die zu erbringenden öffentlichen Dienstleistungen. Danach zeichne sich die Zusammenarbeit von Einrichtungen des öffentlichen Sektors durch eine „**kollaborative Dimension**“ aus, innerhalb derer die Parteien gemeinsam ihren Bedarf und die Lösungen dafür definieren müssen.

Dieser Schritt muss mit einem im europäischen Vergaberecht erfahrenen Rechtsanwalt begleitet werden.

Bezogen auf den folgenden **Planungsschritt III** erscheint insbesondere die Klärung der Frage nach den Rezyklatabnehmern und der entsprechenden Konditionen vordringlich, um die Rückführung des Phosphors in den Wirtschaftskreislauf von Anfang an in den Blick zu nehmen. Im Rahmen des bisherigen Austausches ist klargeworden, dass jenseits der ohnehin zu fordernden Düngemittelrechtskonformität insbesondere Akzeptanzfragen eine wesentliche Rolle spielen. Hier ist ein intensiver Austausch mit den einschlägigen Akteuren aus dem Bereich der vonnöten. Zu nennen sind insbesondere Vertreter der

- regionalen Düngemittelproduktion
- Anwender der Düngemittel (z.B. Kreisbauernverbände, Maschinenringe)
- Anbieter von Qualitätssicherungs- und Zertifizierungssystemen (z.B. GlobalGAP)

Die genannten Akteure stehen zwar dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft und des Ressourcenschutzes positiv gegenüber; teils bestehen jedoch gleichzeitig dezidierte Vorbehalte bezüglich der klärschlammbezogenen Herkunft der Rezyklate. Ohne eine entsprechende Einbindung und Aufklärungsarbeit dürfte der Markteintritt der Rezyklate und damit die faktische Schließung des Phosphorkreislaufs unabhängig von der Einhaltung sämtlicher rechtlicher Rahmenbedingungen nahezu unmöglich sein.

In einem **Planungsschritt IV** werden anschließend die einzelnen Kläranlagenbetreiber dahingehend begleitet, dass sich technisch und wirtschaftlich realisierbare Klärschlammverwertungsverbände unter der verantwortlichen Organisation eines Unternehmens, einer Kommune oder eines Verbandes bilden können. In diesem Planungsschritt IV werden zunächst die konkreten rechtlichen Rahmenbedingungen mit entsprechenden Verträgen für die Verbände geschaffen. Die Verträge müssen von den Gemeinderäten und Magistraten der jeweilig beteiligten Kommunen bestätigt werden. Ebenfalls in diesem Planungsschritt IV werden konkretere Entwurfs- und Genehmigungsplanungen für die technischen Anlagen angeschoben und durchgeführt.

Dieser Schritt muss wiederum mit einem im europäischen Vergaberecht erfahrenen Rechtsanwalt begleitet werden. Für die Planungsleistungen müssen entsprechende Planungsleistungen an Fach-Planungsbüros vergeben werden.

Der **Planungsschritt V** ist dann die technische Umsetzung der jeweilig zu realisierenden technischen Anlagen.

11 Literatur

- Abanades S, Flamant G, Gagnepain B, Gauthier D (2002): Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration. *Waste Manage Res.* 20 (2002) 55–68
- AbfKlärV (2017): Verordnung über die Neuordnung der Klärschlammverwertung (Klärschlammverordnung - AbfKlärV) vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465 ff), die zuletzt durch Artikel 137 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- Adam, Christian (2018): Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm, in Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P., Kopp-Assenmacher, S. (Hrsg.) *Verwertung von Klärschlamm*, Thomé-Kozmiensky-Verlag GmbH, Neuruppin, 2018, ISBN 978-3-944310-43-5
- BayLFU (2009): Merkblatt Verwertung und Beseitigung von Holzaschen, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2009: Augsburg, 19 S.
- 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\(artdtl.htm,APGxNO-DENR:15007,AARTxNR:lfu_abfall_00221,AARTxNODENR:344856,USERxBO-DYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNO-DENR:15007,AARTxNR:lfu_abfall_00221,AARTxNODENR:344856,USERxBO-DYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X) <https://www>
- Bittermann, P (2013): Folgeentwicklungen der Ammoniaksynthese. Die Mutter der Verfahrenstechnik. Online abrufbar unter: Chemietechnik, <http://www.chemietechnik.de/folgeentwicklungen-der-ammoniaksynthese/> (2013) [Zugriff am 27.11.2017]
- Caddarao PS, Garcia-Segura S, Ballesteros F, Huang Y-H, Lu M-C (2018): Phosphorous recovery by means of fluidized bed homogeneous crystallization of calcium phosphate. Influence of operational variables and electrolytes on brushite homogeneous crystallization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 83 (2018) 124–132
- Conrad Y, Karpf, R, (2014): Kennwerte zur Bewertung von Trockensorptionsverfahren auf Kalkbasis. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): *Energie aus Abfall*. Bd 11, Neuruppin: TK-Verlag, (2014), S. 633 – 648.
- Czarnecki, R.(2021): Remondis Aqua Stoffstrom GmbH & Co. KG, persönliche Information, 04.01.2021
- DPP Deutsche Phosphor-Plattform e.V., Verfahrenskennblätter: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/verfahrenskennblaetter-zu-methoden-der-phosphorrueckgewinnung/>
- DPP (2020) Deutsche Phosphor-Plattform e.V., Rechtslage Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm, https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2020/11/DPP_PRueck_Rechtslage.pdf, abgerufen am 17.01.2021
- DPP (2020): Forum “Zulassung und Vermarktung von Phosphor-Rezyklaten“, 24.09.2020, <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/veranstaltung/dpp-forum-2020/>

- DüMV (2019): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist
- Dünnebeil, A., (2017) Heizwert von Schlämmen, Firmeninformationen Pondus Verfahrenstechnik GmbH, Teltow, persönliche Mitteilung
- DWA (2019): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.) , Merkblatt M 379 „Klärschlamm Trocknung“ (Entwurf), Hennef, 2019
- DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5 (2019): Arbeitsbericht „Technische Hinweise zu bewährten Behandlungsverfahren für Klärschlamm“, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall · 2019 (66) Nr. 3, S. 210 – 218, Hennef, 2019
- DWA (2016a): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.), Verfahren und Trends in der Thermischen Klärschlammbehandlung – Teil 1, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.4 „Neue Technologien zur Schlammbehandlung“, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall · 2016 (63) Nr. 7, Hennef, 2016a
- DWA (2016): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.), Verfahren und Trends in der Thermischen Klärschlammbehandlung – Teil 2, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.4 „Neue Technologien zur Schlammbehandlung“, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2016 (63) Nr. 8, Hennef, 2016b
- EuPhoRe® GmbH (2020): Firmeninformationen, persönliche Information
- Fink M., (2019): Wirk- und Reaktionsprinzipien zur Abscheidung von Schadstoffen in der Abgasreinigung, persönliche Mitteilung
- Franck J., Schröder L., (2015): Zukunftsfähigkeit kleiner Klärschlammverbrennungsanlagen. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Energie aus Abfall. Bd. 12, Neuruppin: TK Verlag, S. 457 – 475.
- Franßen, G. (2018): Genehmigungsrechtliche Aspekte der Klärschlammverbrennung und Phosphorrückgewinnung. In Verwertung von Klärschlamm, Holm, O.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Kopp-Assenmacher, S. [Hrsg.], Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin, 2018, S. 252-263
- Fritz W., Kern H. (1990): Reinigung von Abgasen. Würzburg (1990): Vogel-Verlag.
- Frölich, G., (2020): tegut ... Qualitäts- und Lieferantentwicklung, persönliche Mitteilung, 25.05.2020
- Giesberts, L.; Kleve, G. (2008): Einmal Abfall – nicht immer Abfall: Das Ende der Abfalleigenschaft. Deutsches Verwaltungsblatt (DVBL) – Abhandlungen, 2008, 678–688.
- Greb, V., Fröhlich, P., Weigand, H., Schulz, B., Bertau, M., (2016): Phosphatrecycling aus Klärschlammaschen —warum Phosphorsäure der Königsweg ist. In: Kausch, P., Matschullat, J., Bertau, M., Mischo, H. [Hrsg.] Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung - Die nächsten 50 Jahre, Springer, 2016.

- Hartmann, H., Hofmann, H., Nussbaumer, T. (2016): Direkte thermochemische Umwandlung. In: Energie aus Biomasse. Berlin: Springer-Verlag,(2016), S. 815 – 1058.
- Heindl, A., Gröbl, Th., Görlich, M., Graf, M. (2020): Thermische Behandlung von Klärschlamm, Teil 1: Rechtliche Vorschriften, Eigenschaften und Trocknung von Klärschlamm, in KA Korrespondenz Abwasser – Abfall, 67. Jahrgang, Nr. 4, 2020, S. 286- 294
- HLNUG, (2018): HLNUG, Kommunale Abwasserbehandlungsanlagen in Hessen - Lagebericht 2018, Karte, https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/abwasser/kommunales_abwasser/Lagebericht_2018_Hessen_Internetversion.pdf
- HMUKLV, (2015): Maßnahmenprogramm 2021-2027 zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie vom 11. Dezember 2015, Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, ISBN 978-3-89274-380-4 <https://flussgebiete.hessen.de/information/massnahmenprogramm-2015-2021>
- HMUKLV, (2019): Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen – Lagebericht 2018, Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Juni 2019, https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmuclv/lagebericht_2018_hessen_internetversion.pdf
- HMUKLV, (2020): Entwurf des Maßnahmenprogramm 2021-2027 zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie vom 22. Dezember 2020, Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, <https://flussgebiete.hessen.de/oeffentlichkeitsarbeit/beteiligungsverfahren-2021-2027/offenlegung-bewirtschaftungsplan-und-massnahmenprogramm/entwurf-massnahmenprogramm-2021-2027>
- Hüer, L. (2020): Weitergehende Schlammbehandlung – Beispiel Lingen mit Schwerpunkt Vakuumentgasung, Vortrag DWA WebKonferenz LV Nord: Perspektiven der Klärschlammverwertung, 25. November 2020
- IBU-tec (2020): IBU-tec advanced materials AG, Weimar, Firmeninformationen, aufgerufen zuletzt am 10.03.2020 https://www.ibu-tec.de/anlagen/drehrohrofen/?gclid=Cj0KCQjw0pfzBRCOARIsANi0g0vUeqHVq6ir_Ooacm2DmawRoP7NYZbTI3_d8lwgf2i2Rr7oRfYlKflaAmJqEALw_wcB
- Ipsen, C. (2017): Mitverbrennung von Biobrennstoffen in zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen. Verfahrenstechnik, Umweltschutz, Wirtschaftlichkeit. Dissertation Zentrum für nachhaltige Entwicklung an der Europa-Universität Flensburg. (2016) Online abrufbar unter: ZHB Flensburg, <https://www.zhb-flensburg.de/fileadmin/content/spezial-einrichtungen/zhb/dokumente/dissertationen/ipsen/ipsen-christoph-2017-.pdf> [Zugriff am 17.12.2018].
- Kabbe, C., Rinck-Pfieffer, S. (2019): Global Water Reaseach Coalition: Global Compendium on Phosphorus Recovery from Sewage/Sludge/Ash, 2019, 71 S

- Karpf, R. (2006): Neueste Entwicklungen bei der trockenen und quasitrockenen AGR. Regensburger Fachtagung, 13./14. Juni 2006. ete.a GmbH Ingenieurbüro für Energie- und Umweltengineering & Beratung, Lich. Online abrufbar unter: http://www.ete-a.de/img/Vortraege/16_Neueste_Entwicklungen_bei_der_trockenen_und_quastrockenen_AGR.pdf [Zugriff am 17.12.2018]
- Knickel, T., Klose, S., Frank, D. (2020): Aktueller Sachstand der in großtechnischer Umsetzung befindlichen P-Rückgewinnungsverfahren in Deutschland, Vortrag auf dem DPP Forum "Zulassung und Vermarktung von Phosphor-Rezyklaten" 24.09.2020
- Knörle, U. (2021): Persönliche Information, Fa. Eliquo Technologies, 21.01.2021
- 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.
- Kraus, F., Zamzow, M., Hoffmann, C., Bessai, A.-K., Fischinger, S., Muskulus, A., Kabbe, C., (2019): Einsatzmöglichkeiten für Nährstoffrezyklate im Ökolandbau (nurec4org), Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) AZ 33651/01, https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-33651_01-Hauptbericht.pdf
- LAGA, (2020): Vollzugshinweise Klärschlammverordnung" der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Januar 2020, https://www.laga-online.de/documents/laga-m-39-vollzugshinweise-zur-klärschlammverordnung_stand-10-02-2020-_rederg_1601897506.pdf, aufgerufen am 17.01.2021
- Lind, T., Valmari, T., Kauppinen, E., Sfiris, G., Nilson, K., Meanhaut, W. (1999): Volatilization of the heavy metals during circulating fluidized bed combustion of forest residue. Environ. Sci. Technol. 33 (1999), 496-502.
- Löschau, M. (2014): Reinigung von Abgasen. Neuruppin: TK-Verlag (2014), [ISBN: 978-3-944310-13-8](https://www.tk-verlag.de/ISBN:978-3-944310-13-8)
- Marani, D., Braguglia, CM., Mininni, G., Maccioni, F. (2003): Behaviour of Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, and Zn in sewage sludge incineration by fluidised bed furnace. Waste Management 23 (2003) 117–124
- Meyer, U. (1997): Energetische Aspekte der thermischen Behandlung von Klärschlamm, Vortrag 12. ZAF-Seminar "Klärschlammbehandlung und Entsorgung - Erfahrungen und Perspektiven", Braunschweig, 18./19. Sept. 1997, Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der TU Braunschweig, Heft 12, 77/97.
- Münchhoff, K. (2020): Einstellung der DLG zu rezyklierten Nährstoffen. Zertifizierung von Rezyklaten für die Zulassung und Markterschließung, Vortrag auf dem Forum "Zulassung und Vermarktung von Phosphor-Rezyklaten", 24.09.2020, <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/veranstaltung/dpp-forum-2020/> (Vortrag nicht veröffentlicht)

- Roskosch, A.; Heidecke, P. (2018): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2018.
- Roskosch, A. (2020): Aktuelle Fragestellungen in der Umsetzung der Klärschlammverordnung, Vortrag auf dem Forum "Zulassung und Vermarktung von Phosphor-Rezyklaten", 24.09.2020, <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/veranstaltung/dpp-forum-2020/> (Vortrag nicht veröffentlicht)
- Ruscheweyh, R. (2020): Erstmalige Umsetzung des Phosphorrecyclings aus Klärschlamm nach dem REMONDIS TetraPhos®-Verfahren – ein Erfahrungsbericht, in Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P., Kopp-Assenmacher, S. Verwertung von Klärschlamm 3, ISBN 978-3-944310-52-7 Thome-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin, S. 407 – 416
- Schöfmann, P., Eder, E. (2019): Thermische Klärschlammverwertung mit patentiertem Staubbrenner. In Verwertung von Klärschlamm 2, Holm, O.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Kopp-Assenmacher, S. [Hrsg.], Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin, 2019, S. 252-263
- Schwenzer, U. (2021) Persönliche Mitteilung, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Dezernat W2 Gewässergüte, 01.02.2021
- Sellering, E. (2021): Persönliche Information, Fa. Eliquo Stulz GmbH, 10.01.2021
- Sijstermans, L.F.J. (2019): Energie- und Emissionsmaßnahmen der KSWA SNB Moerdijk 1997-2019, Vortrag auf den DWA-Klärschlammtagen, 21.-23.05.2019, Würzburg, DWA (Hrsg.), Hennef, 2019
- Smol, M.; Kulczycka, J.; Lelek, L.; Gorazda, K.; Wzorek, Z., (2020): Life Cycle Assessment (LCA) of the integrated technology for the phosphorus recovery from sewage sludge ash (SSA) and fertilizers production. Archives of Environmental Protection, 46 (2020), 42–52
- Steckenmesser, D., Vogel, C., Adam, C. und Steffens, D. (2017): Effect of various types of thermochemical processing of sewage sludges on phosphorus specification, solubility, and performance. Waste Management, 62: 194-203.
- Steckenmesser, D., Vogel, C., Böhm, L., Heyde, B. und Adam, C. (2018): Fate of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in sewage sludge carbonisates and ashes – a risk assessment to a thermochemical phosphorus-recycling process. Waste Management, 62: 194-203.
- Thermo-System GmbH (2020), Firmeninformationen, persönliche Information
- Thomé-Kozmiensky K. J. (2013): Verbrennung in Wirbelschichtreaktoren. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Energie aus Abfall. Bd. 10, Neuruppin: TK Verlag, (2013) S. 3 – 94
- Tomalla, M. (2017): Überblick über Trocknungsverfahren, Trocknerbauarten, Betriebserfahrungen mitthermischen Trocknungsanlagen, VDI Fachkonferenz „Klärschlammbehandlung, Rotenburg, 17.10.2017
- Turek, R., Bouché, M. (2019) Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, Vortrag auf dem 20. Kölner Kanal- und Kläranlagen-Kolloquium, 11./12. September 2019
- Turek, R. (2020), MSE Mobile Schlammentwässerungs GmbH, persönliche Information

- Rebling, T., Oldhafer, N., Klönk-Markowis, F., Hintz, D., (2020) Hydrothermale Carbonisierung (HTC) als Alternative zur Klärschlamm-trocknung? Eine energetische Betrachtung für Projekte zur Klärschlamm-monoverbrennung, umwelttechnik + ingenieure GmbH, Studie im Auftrag des Bundesverbandes Hydrothermale Carbonisierung bv-htc e.V., 2020 (unveröffentlicht)
- Vater, W. (1996): Thermische Verfahren. In: Hennef, Ernst & Sohn (Hrsg.). Klärschlamm. Bd. 4, Berlin: Verlag für Architektur und technische Wissenschaft GmbH, (1996), S. 405 – 471
- Vogel, C., Sekine, R., Steckenmesser, D., Lombi, E. Steffens, D. und Adam, C. (2017): Phosphorus availability of sewage sludges-based fertilizers determined by the diffusive gradients in thin films (DGT) technique. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 180: 594-601.
- Weigand, H., Bertau, M., Hübner, W., Bohndick, F., Bruckert, A. (2013): RecoPhos: Full-scale fertilizer production from sewage sludge ash. Waste Manage. 33 (2013), 540-544.
- Weigand, H., Bertau, M. (2013): Von der Klärschlammmasche zum Phosphordünger - RecoPhos P38 im Spannungsfeld von Abfall , Düngemittel- und Bodenschutzrecht. In: Kausch, P., Bertau, M., Gutzmer, J; Matschullat, J (Hrsg.) Strategische Rohstoffe — Risikovorsorge, Springer, Berlin, 2013.
- WERKSTÄTTEN Heating Systems GmbH (2020), Firmeninformationen, persönliche Information
- Wiesgickl, S. (2019), Thermisches Klärschlammverwertungskonzept am Standort Halle-Lochau, Vortrag auf den DWA-Klärschlammtagen, 21.-23.05.2019, Würzburg, DWA (Hrsg.), Hennef, 2019
- Zepke, F. (2020):, persönliche Information, EuPhoRe® GmbH, 2019 / 2020

12 Anhang

12.1 Liste der Partnerkommunen, Stand 20.05.2020

Stand 20.05.2020

Nr	Name, Vorname	Titel und/oder Funktion	Adresse	E-Mail	Festnetz	Mobil	Fax / URL
1	Neuschäfer, Uwe Köhler, Karsten Luschitz, Franziska	Betriebsleiter Stabsstellenleiter Öffentlichkeitsarbeit / Datenschutz / GfM / Presse Sozialgebietsleiterin Labor	KASSEL WASSER Eigenbetrieb der Stadt Gartenstraße 90 34125 Kassel	neuschaefer.u@kasselwasser.de koehler.k@kasselwasser.de lusch.netz_f@kasselwasser.de	+49 561 987 6543 +49 561 987 6427 +49 561 987 6620	+49 151 2032 6543 +49 151 2032 6427 +49 151 2032 6620	+49 561 987 6464 +49 561 987 6464 +49 561 987 6467
2 - 22	Emde, Friedhelm	GF	KRV Waldeck-Frankenberg mbH c/o Maschinenring Waldeck-Frankenberg e.V. Luisenpark 35066 Frankenberg Magister der Kreisstadt Eschwege	emde@tr-walfo.de	+49 6451-230 981-11		+49 6451-230 981-22
23	Bauer, Stephan	Betriebsleiter ZKW	Städt. Wasser- u. Abwasserbetrieb FB 32 Abwasserwirtschaft Thuringenstr. 3 37269 Eschwege	stephan.bauer@eschwege-rathaus.de	+49 5651 13900	+ 48 170 9097963	
24	Wolf, Michael	Stellv. BL Kläranlage	Kreisstadt Bad Hersfeld Abwasserbetrieb Kläranlage Am Entenreich 19 - 21 36251 Bad Hersfeld VAH Baunatal Verb. 1 AW-Beseitigung + HW-Schutz	ka.hel@online.de	+49 6621 74300		+ 49 6621 - 70529
25	Wicke, Harmut	Verbandsvorstand	Magistrat der Stadt Baunatal Fachbereich 80 Bauverwaltung, Abfallwirtschaft, Umweltschutz Marktplatz 14 34225 Baunatal	Harmut.Wicke@stadt-baunatal.de nathalie.bever@stadt-baunatal.de	+49 561 4892288 +49 561 48 92 259 (Büro Frau Nathalie Bever)		+49 561 48 92 - 2 70
26	Anacker, Thorsten	Stellv. der Betriebsleitung	Stadtwerke Rotenburg a.d. Fulda Baumbacher Straße 20 36199 Rotenburg a.d. Fulda	thorstenanacker@stadtwerke-rot.de	+49 6623 61 232 12		+49 6623 91 232 29 www.stadtwerke-rot.de
27	Knopp, Martin Volland, Herr	FB-Leiter Tiefbau	Betriebsleiter: Dipl.-Ing. (FH) Stephan Heckerath Der Gemeindevorstand Der Gemeinde Fulda Am Rathaus 9 34233 Fulda	martin.knopp@t.tdata.de	+49 561 98 18 0		
28	Mock, Gerald		Abwasserbetrieb der Stadt Bebra Wiesenweg 1 36179 Bebra	Gerald.Mock@stadtwerke-bebra.de Abwasserbetrieb@stadtwerke-bebra.de	+49 6622 9245 5345		+49 6622 9245 - 5350 http://www.stadtwerke-bebra.de
29	Helmer, Manfred	Dipl.-Ing.	Stadtwerke Witzenhausen Witzenhäuser Wasser Ver. u. Entsorgung Hinter dem Deich 9 37213 Witzenhausen	manfred.helmer@stadtwerke-witzenhausen.de carolin.anoer@stadtwerke-witzenhausen.de	Herr Helmer: +49 5542 5005 0 Sekretariat Technik Carolin Lange +49 5542 5005-151 Zentrale: +49 5542 5005-0		05542/5005-202 mail@stadtwerke-witzenhausen.de www.stadtwerke-witzenhausen.de
30	Neider, Benjamin	BL Technische Betriebe	Magistrat der Stadt Homburg (Ezze) Fachbereich Technische Betriebe- Rathausgasse 1 34576 Homburg (Ezze)	benjamin.neider@homburg-ezze.de	+49 5681 6090 18		+49 5681 609756
31	Heinemann, Janina		Magistrat der Stadt Hessisch Lichtenau Bauern, Völkner, Uwe Bergstraße 15 37235 Hessisch Lichtenau Gemeindevorstand der Gemeinde Neudorf	l.heinemann@hessisch-lichtenau.de b.ackermann@hessisch-lichtenau.de	+49 5602 807 151 Britta Ackermann: +49 5602-307-159		+ 49 5602-807-132 www.hessisch-lichtenau.de
32	Bug, Joachim	Abteilungsleiter Bauabteilung	Postanschrift: Postfach 1163 36116 Neuhof Hausanschrift: Lindplatz 4	Joachim.Bug@neuhof-fulda.de Melanie Schmaus mes@nt.de	+49 6655 970 48 Melanie Schmaus +49 6655 970 43		(06655) 970-51 www.neuhof-fulda.de

33	Oldeland, Klaus-Peter	Dipl.-Ing Bauwesen	36119 Neuhof Stadwerke Bad Sooden-Allendorf Werrastr. 24 37242 Bad Sooden-Allendorf	klauspeter.oldeland@stadwerke-bsa.de	+49 5652 9585 67	+49 5652 9585-56 www.stadwerke-bsa.de
34	Assemmacher, Andre	Dipl.-Ing. (TU) Bauverwaltung	Magistrat der Stadt Sontra FB 2 / Bauamt Andre Assemmacher Markplatz 6 36205 Sontra	andre.assemmacher@sontra.de	+49 5653 9777 27	+49 56 53 97 77 50 www.sontra.de
35	Henkel, Christian	Bürgermeister	Gemeinde Fließen Gemeindevorstand Hauptstraße 36 36103 Fließen	c.henkel@fliegen.de	+49 6655 796-201	+49 6655 796-353
36	Munser, Harald	Bürgermeister	MAGISTRAT der STADT LIEBENAU Harald Munser Bürgermeister Lacheweg 1 D-34396 Liebenau	harald.munser@stadt-liebenau.de	+49 170 369 1658	+49 5676 989 888 http://www.stadt-liebenau.de
37	Humbs, Kay	Abwassermeister	Fachbereich 3.7 Abwasserentsorgung Gemeinde Fuldabruck Am Rathaus 2 34277 Fuldabruck	klaeranlagefuldabruck@gmx.de	+49 561 471605	+49 561 475989 http://www.fuldabruck.de
Ministerium	Diehl, Holger		Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Referat 1.1 "Internationale Zusammenarbeit, Planungsangelegenheiten, fachübergreifende Umweltangelegenheiten" Mainzer Straße 80 65189 Wiesbaden	holger.diehl@umwelt.hessen.de		
			Apitz., Simone		simone.apitz@umwelt.hessen.de	+49 611 815 1262
TransMIT THM	Theilen, Ulf	Prof. Dr.-Ing. Verantwortlicher für die Studie	TransMIT GmbH Kerkraider Straße 3 35394 Gießen	ulf.theilen@bau.thm.de	+49 172 5118256	
			Prof. Dr.	Technische Hochschule Mittelhessen Wiesenstraße 19 35390 Gießen	harald.weigand@itm.thm.de	+49 641 309 2525 +49 641 309 2581
RP	Vicum, Otto Wilhelm	Dezernatsleiter des Dezernats 31.5 / Kommunales Abwasser, Gewässergüte, industrielles Abwasser, Wassergefährdende Stoffe	Regierungspräsidium Kassel Am Alten Stadtschloss 1 34117 Kassel	Otto.Vicum@pks.hessen.de	+49 561 106 3630	+49 611 327640913