

Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammmasche



Abschlussbericht 2016

für das

**Hessisches Landesamt für Naturschutz,
Umwelt und Geologie**

HAD-Referenz-Nummer: 4824/8



**RWTHAACHEN
UNIVERSITY**

Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Str. 1 • 52074 Aachen
Tel: 0241 80 25207 • Fax: 0241 80 22285
• isa@isa.rwth-aachen.de

Projektbearbeitung



Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen
Tel.: 0241 80 25207
Fax: 0241 80 22285
Email: isa@isa.rwth-aachen.de
www.isa.rwth-aachen.de

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. D. Bastian
Dr.-Ing. D. Montag
Ute Gerth, MaTA
Dipl.-Ing. S. Malms
Julian Firk, M.Sc.

Projektbegleitung

Institution

HMUKLV

HLNUG

HSL

LHL

RP Kassel

Personen

Herr Brunke, Herr Denk, Herr Diehl, Frau Ertl, Herr Frank,
Frau Göttlicher, Herr Dr. Hüther, Herr Porth, Frau Uhler

Herr Kummer, Frau Schwenzer

Herr Taege

Herr Dr. Schaaf

Frau Walper

Zitiervorschlag:

Montag, D.; Bastian, D.; Pinnekamp, J. (2016): Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammasche. Gerichtet an das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, HAD-Referenz-Nummer: 4824/8

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Bilder	I
Verzeichnis der Tabellen	V
Verzeichnis der Abkürzungen.....	VIII
1 Veranlassung und Zielsetzung	1
2 Umsetzung der Rechtsvorgaben aus dem Entwurf der Novelle der AbfKlärV in die Praxis	2
2.1 Darstellung der veränderten rechtlichen Situation.....	2
2.2 Auswirkungen für die kommunalen Klärschlammherzeuger und Entsorgungspflichtigen	3
2.3 Übergangsregelung für eine Langzeitlagerung von Klärschlammmonoverbrennungssaschen.....	3
2.4 Weitere Änderungen aufgrund der Düngemittelverordnung – Verbot des Einsatzes synthetischer Polymere	5
2.5 Herstellung des guten Zustandes von Gewässern nach Wasserrahmenrichtlinie – Änderung der Phosphorfrachten.....	6
2.5.1 Maßnahmen und Ziele der Wasserrahmenrichtlinie	6
2.5.2 Hessisches Maßnahmenprogramm zur Reduzierung der Phosphor-Konzentration in Gewässern	7
2.5.2.1 Punktquellen	7
2.5.2.2 Diffuse Quellen	9
3 Identifikation der relevanten Kläranlagen nach Novelle der AbfKlärV.....	10
3.1 Darstellung des Betrachtungsrahmens	10
3.2 Datengrundlage	11
3.3 Definition von Begriffen und Rechenwerten	12
3.3.1 Indirekt und direkt entsorgende Kläranlagen (Indirekt- und Direktentsorger)	12
3.3.2 Relevante Kläranlagen	13
3.3.3 Bezeichnungen der Phosphorgehalte und P-Massenströme	13
3.3.4 Ausbaugröße und Größenklassen.....	13

3.4	Übersicht über die Kläranlagen und die Klärschlamm Entsorgung in Hessen in den Jahren 2012 bis 2014	14
3.4.1	Maßgebliche Klärschlamm Massenströme von 2012 bis 2014	15
3.4.2	Entsorgungswege für Klärschlamm in Hessen	19
3.4.3	Maßgebliche Phosphor-Gehalte und -Frachten im Klärschlamm	21
3.4.4	Verfahrenstechnik zur Phosphorelimination auf den Kläranlagen	22
3.5	Identifikation der für die Phosphorrückgewinnung in Hessen relevanten Kläranlagen	25
3.5.1	Phosphor-Massenströme im Klärschlamm der relevanten Kläranlagen	28
3.5.2	Entsorgungswege für den Klärschlamm der relevanten Kläranlagen	30
3.6	Sensitivitätsanalyse zur Identifikation weiterer Rückgewinnungspotentiale von Phosphor aus Klärschlamm	30
3.7	Prognose der möglicherweise relevanten Kläranlagen ab dem Jahr 2025	32
3.7.1	Auswirkung des Maßnahmenprogramms zur Wasserrahmenrichtlinie	32
3.7.2	Sensitivitätsanalyse 2025	34
3.7.3	Regionale Bevölkerungsentwicklung in Hessen	35
3.8	Weitere Stoffströme (Aschen aus Biomasseverbrennung)	37
3.9	Zusammenfassung des Potentials zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm in Hessen	39
4	Technische Verfahren zur Phosphorrückgewinnung	40
4.1	Verfahrensbeschreibungen	40
4.1.1	PEARL-Prozess	40
4.1.2	P-RoC-Verfahren	42
4.1.3	Berliner Verfahren/ AirPrex-Verfahren	43
4.1.4	Stuttgarter Verfahren	46
4.1.5	Budenheimer Kohlensäure-Verfahren	49
4.1.6	Mephrec Verfahren	50

4.1.7 Phosphorrückgewinnung in Verbindung mit Hydrothormaler Carbonisierung: AVA cleanphos und TerraNova Ultra.....	53
4.1.8 Pyrolyse bzw. Vergasungsverfahren	56
4.1.9 PASCH Verfahren	58
4.1.10 LEACHPHOS Verfahren.....	59
4.1.11 TETRAPHOS Verfahren.....	60
4.1.12 ASH DEC/Outotec Verfahren	61
4.2 Pflanzenverfügbarkeit der erzeugten Rezyklate.....	62
4.2.1 Bestimmung der Phosphatlöslichkeit.....	62
4.2.2 Pflanzenversuche.....	64
4.2.3 Schlussfolgerungen zur Pflanzenverfügbarkeit.....	65
4.3 Gegenüberstellung der Verfahren.....	65
4.4 Zuordnung der Rückgewinnungsverfahren zu den Kläranlagen aufgrund technischer Gesichtspunkte.....	72
4.5 Synergieeffekte.....	74
5 Szenarien-Betrachtung zur Eingrenzung des empfohlenen Rückgewinnungskonzeptes.....	76
5.1 Szenario 1: Weitgehende Rückgewinnung auf Kläranlagenstandorten	79
5.2 Szenario 2: Maximierung der Phosphor-Rückgewinnung.....	89
5.3 Szenario 3: Rückgewinnung nach Mindestanforderungen der Novelle AbfKlärV....	99
5.4 Vergleich der Szenarien und Bewertung der Umsetzbarkeit	104
5.4.1 Phosphorrückgewinnungspotential.....	104
5.4.2 Aspekte der dezentralen oder zentralen Phosphorrückgewinnung	108
6 Kostenabschätzung der technischen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung	110
6.1 Kosten der Verfahren zur Rückgewinnung aus Klärschlamm.....	110
6.2 Zentrale Rückgewinnung aus Klärschlammasche anhand einer Beispielrückgewinnungsanlage mit einer Kapazität von 20.000 Mg Asche/a	112
6.2.1 Datenbasis.....	112

6.2.2	Auslegung der Anlagen und Festlegung der Randbedingungen.....	112
6.2.3	Kostenvergleich und mögliche Erlöse.....	114
7	Maßnahmen zur Umsetzung der Phosphorrückgewinnung in Hessen.....	117
7.1	Kurzfristige organisatorische und vorbereitende Maßnahmen.....	117
7.1.1	Datenerfassung und Bereitstellung.....	117
7.1.2	Information und Dialog mit den Kläranlagenbetreibern	118
7.2	Mittelfristige Maßnahmen.....	118
7.2.1	Demonstrationsvorhaben vielversprechender Verfahren innerhalb Hessens.....	119
7.2.2	Begleitung der Kläranlagen bei der Umsetzung der Maßnahmen nach WRRL auch hinsichtlich der P-Rückgewinnung	119
7.2.3	Prüfung der Notwendigkeit zur Einrichtung von Monokompartimenten auf Deponien der Klasse II	119
7.3	Langfristige Maßnahmen	120
8	Zusammenfassung	121
	Literaturverzeichnis	123
Anhang A	Zusammenstellung der Kläranlagen aus Sensitivitätsanalyse Kapitel 3.6 und 3.7.2	A-1
Anhang B	Weiterführende Grafiken zur Szenarienentwicklung.....	B-1
Anhang C	Kostenermittlung für PASCH.....	C-1
Anhang D	Darstellung der Kläranlagen, nach der Einteilung in Kapitel 3.5.1	D-1

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1:	Bestehende und potenzielle Monoverbrennungsanlagen in Deutschland (links) sowie Bevölkerungsdichte auf Kreisebene, Angabe in Einwohner/km ² (rechts) nach dem Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung, 2014 (PINNEKAMP et al., 2014).....	4
Bild 3.1:	Prozentuale Verteilung der Ausbaugrößen in den Landkreisen und kreisfreien Städten und räumliche Anordnung der Kläranlagen in Hessen nach Größenklasse.....	15
Bild 3.2:	Klärschlammströme von 2012 bis 2014 als Jahresreihen auf Kreisebene (Zahlenwerte in Tabelle 3.4).....	18
Bild 3.3:	Als maßgeblich ermittelter Klärschlammfall in Mg TS/a für die Jahre 2012 bis 2014 nach Größenklasse in Hessen.....	19
Bild 3.4:	Entsorgungswege für Klärschlamm nach Größenklasse (Entsorgungswege von 2014 mit maßgeblichen Klärschlammströmen aus Tabelle 3.4).....	20
Bild 3.5:	Trockensubstanzgehalte der Klärschlämme aus direkt entsorgenden Kläranlagen nach Entsorgungsweg und Anzahl der entsorgenden Kläranlagen (Doppelzählungen bei Teilentsorgung über mehrere Wege).....	21
Bild 3.6:	Anzahl der Kläranlagen mit Phosphorelimination nach Größenklasse.....	23
Bild 3.7:	Ausbaugröße der Kläranlagen mit Phosphorelimination nach Größenklasse.....	23
Bild 3.8:	P-Elimination nach Anzahl der Kläranlagen (oben) und nach Ausbaugröße (unten) für die GK 1 bis 5.....	24
Bild 3.9:	Nach Kriterien Novelle AbfKlärV relevante direkt entsorgende Kläranlagen der GK 3 bis 5 (Stand 2014).....	25
Bild 3.10:	Für die Phosphorrückgewinnung relevante Klärschlammströme [Mg TS/a] im Vergleich zum Klärschlammfall insgesamt nach GK (in Hessen).....	28
Bild 3.11:	Entsorgungswege der für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen in 2014.....	30

Bild 3.12:	Sensitivitätsanalyse der Kläranlagen GK 3 bis 5, die zum jetzigen Zeitpunkt P-Gehalte im Klärschlamm von 16 bis kleiner 20 g P/kg TM aufweisen bzw. relativ hohe P-Frachten im Klärschlamm aufweisen.....	31
Bild 3.13:	Nach AbfKlärV relevante direkt entsorgende Kläranlagen der GK 3 bis 5 bei Berücksichtigung des Maßnahmenprogramms WRRL 2015 bis 2021 (Prognose für das Jahr 2025).....	34
Bild 3.14:	Kläranlagen der GK 3 bis 5 die zukünftig (2025) relevant sein könnten, P-Gehalte im Klärschlamm von 16 bis kleiner 20 g P/kg TM aufweisen oder P-Frachten im Klärschlamm vorliegen haben werden, die größer als die der nach AbfKlärV relevanten Kläranlagen sind.....	35
Bild 3.15:	Kartografische Darstellung der Bevölkerungsprognose für das Land Hessen bis 2030 (Kreisebene) (HSL, 2016)	36
Bild 3.16:	Bevölkerungsprognose durch das HSL bis 2030 – Änderung der Bevölkerungszahlen auf Kreisebene in % (HSL, 2016)	37
Bild 3.17:	Zusammensetzung des Inputs zur Verbrennung der 20 befragten Biomasseheizkraftwerke (TIEMANN, 2015).....	38
Bild 4.1:	Verfahrensschema der PEARL-MAP-Kristallisationsanlage (ESEMAG, 2006).....	41
Bild 4.2:	Verfahrensschema des P-RoC-Verfahrens (SCHUHMAN, 2010)	43
Bild 4.3:	Verfahrensschema des Berliner Verfahrens (HEINZMANN und LENGEMANN, 2013).....	44
Bild 4.4:	Verfahrensschema des AirPrex-Verfahrens in Wieden-Echten, Niederlande (EWERT und WAGENBACH, 2013)	45
Bild 4.5:	Verfahrensschema des Stuttgarter Verfahrens (MEYER, 2013).....	47
Bild 4.6:	Verfahrensschema des modifizierten Stuttgarter Verfahrens; nach (MEYER, 2015).....	49
Bild 4.7:	Verfahrensschema des Budenheimer Kohlensäure-Verfahrens	49
Bild 4.8:	Verfahrensschema des Mephrec Verfahrens (SCHEIDIG et al., 2010)	51
Bild 4.9:	Verfahrensschema der Hydrothermalen Carbonisierung am Beispiel der der CS-HTC90TM-Anlage (CS, 2015)	54
Bild 4.10:	Verfahrensschema des AVA cleanphos Verfahrens	55

Bild 4.11:	Verfahrensschema des TerraNova® Ultra Verfahrens	56
Bild 4.12:	Verfahrensschema des PYREG®-Verfahrens (PYREG, 2015)	57
Bild 4.13:	Verfahrensschema des PASCH-Verfahrens (PINNEKAMP et al., 2011)	58
Bild 4.14:	Verfahrensschema des LEACHPHOS-Verfahrens	59
Bild 4.15:	Verfahrensschema des TETRAPHOS Verfahrens.....	60
Bild 4.16:	Verfahrensschema des ASH DEC Verfahrens	61
Bild 4.17:	Löslichkeit unterschiedlicher P-Recyclingprodukte in Wasser, Zitronensäure und alkalischem Ammoncitrat (alkal. AC) im Vergleich zu Rohphosphat und Triple Superphosphat (TSP).....	63
Bild 4.18:	Mittelwerte der Trockenmasseerträge der Rezyklate für Mais (LFU, 2015).....	64
Bild 4.19:	Auswahlschema des zur Zielerreichung nach Novelle AbfKlärV bestgeeigneten Rückgewinnungspfadess.....	73
Bild 4.20:	Relevante Kläranlagen nach Kapitel 3.9 mit und ohne geplante Maßnahmen zur Umsetzung der WRRL unter Angabe der Art der P-Elimination.....	75
Bild 5.1:	Verteilung von Abfallbehandlungsanlagen und Deponien innerhalb Hessens (HMUKLV, 2015a)	77
Bild 5.2:	Entsorgungswege der für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen in 2025 nach Szenario 1.....	82
Bild 5.3:	Kartographische Darstellung der Entsorgungswege der relevanten Kläranlagen in 2025 bei Anwendung von Szenario 1	83
Bild 5.4:	Identifikation von Kooperationspotentialen von Kläranlagen in Szenario 1	85
Bild 5.5:	Entsorgungswege der für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen in 2025 nach Szenario 2.....	90
Bild 5.6:	Kartographische Darstellung der Entsorgungswege der relevanten Kläranlagen in 2025 bei Anwendung von Szenario 2	91
Bild 5.7:	Räumliche Aufteilung der Klärschlammengen zur Monoverbrennung auf mögliche Verbrennungsstandorte (Kriterium: kürzester Transportweg)	94
Bild 5.8:	Standorte von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Deutschland nach PINNEKAMP et al. (2014).....	98

Bild 5.9:	Änderung der benötigten Rückgewinnungsquote zur Abreicherung des P-Gehaltes auf 16 g P/kg TM bei steigendem Ausgangsgehalt im Klärschlamm	100
Bild 5.10:	Aufteilung der Klärschlammströme zur Rückgewinnung anhand der P-Gehalte in den heute für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen (Szenario 3 - Status quo).....	101
Bild 5.11:	Kartographische Darstellung der P-Gehalts-Klassen unter Angabe der benötigten Rückgewinnungsquoten für die relevanten Kläranlagen bei Anwendung von Szenario 3	103
Bild 5.12:	Aufteilung der Klärschlammströme zur Rückgewinnung anhand der P-Gehalte in den relevanten Kläranlagen nach Umsetzung der Maßnahmen zur WRRL (Szenario 3 - Prognose)	104
Bild 5.13:	Abschätzung des möglichen monetären Erlöses je Szenario bei Verkauf des rückgewonnenen Phosphors	107
 <u>Anhang</u>		
Bild B.1:	Entsorgungswege aller hessischen Kläranlagen in 2025 nach Szenario 1 ...	B-1
Bild B.2:	Entsorgungswege aller hessischen Kläranlagen in 2025 nach Szenario 2 ...	B-1

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1: Anforderungen an kommunale Kläranlagen in betroffenen Einzugsgebieten (HMUKLV, 2015b).....	8
Tabelle 3.1: Definition der Größenklassen von Kläranlagen nach Anhang 1 der Abwasserverordnung (BMJV, 2014).....	14
Tabelle 3.2: Kläranlagen mit Anzahl und Ausbaugröße nach Größenklasse und in Summe	14
Tabelle 3.3: Festlegung des maßgeblichen Klärschlamm-trockenmassenstroms je Kläranlage für den Betrachtungszeitraum 2012 bis 2014	16
Tabelle 3.4: Summe der Klärschlamm-massenströme aller direkt entsorgenden Kläranlagen für die Jahre 2012 bis 2014 als Einzelwerte, Mittelwerte und als maßgebliche Werte aufgrund der Jahresreihenauswertung (Kreisebene)	17
Tabelle 3.5: Summe der Klärschlamm-massenströme der direkt entsorgenden Kläranlagen mit relevanten P-Gehalten im Klärschlamm und deren Anzahl (in Klammern) nach Größenklasse (Kreisebene).....	27
Tabelle 3.6: Phosphor-Massenstrom (und Anzahl) der relevanten Kläranlagen der GK 3 bis 5 für 2012 bis 2014 (Kreisebene).....	29
Tabelle 3.7: Fallbetrachtung zur Sensitivitätsanalyse für die Jahre 2012 bis 2014	31
Tabelle 3.8: Aufgrund prognostizierter zusätzlicher P-Fracht im Klärschlamm in 2025 positiv identifizierte Kläranlagen	33
Tabelle 3.9: Fallbetrachtung zur Sensitivitätsanalyse für das Jahr 2025	35
Tabelle 3.10: Phosphorgehalte von Aschen aus der Holzverbrennung (OBERNBERGER, 1997)	38
Tabelle 3.11: Zusammenfassung des Rückgewinnungspotentials	39
Tabelle 4.1: Pflanzenverfügbarkeit unterschiedlicher P-Fractionen aus Düngemitteln (zusammengefasst nach (KRATZ und SCHNUG, 2009)	62
Tabelle 4.2: Kläranlagen mit P-Gehalten im Klärschlamm von 20-28 g P/kg TM und vermehrter biologischer P-Elimination ohne Fällmitteldosierung	74
Tabelle 5.1: Anzahl der potentiellen Rückgewinnungsanlagen bei weitgehender Phosphorrückgewinnung am Kläranlagenstandort (Szenario 1) nach GK	84

Tabelle 5.2: Klärschlammmenge bei Kooperation verschiedener Kläranlagen [Mg TS/a] (vgl. Tabelle 5.3)	86
Tabelle 5.3: Kläranlagen der GK 5 und im 10 km-Radius befindliche Kläranlagen der GK 3 und 4, die dorthin Klärschlamm anliefern könnten.....	87
Tabelle 5.4: Anzahl der potentiellen Rückgewinnungsanlagen bei Maximierung der Phosphorrückgewinnung (Szenario 2) nach Größenklasse	92
Tabelle 5.5: Mögliche Kläranlagen-Kooperation zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm in Szenario 2.....	93
Tabelle 5.6: Klärschlammmassenströme im Input der Monoverbrennungsanlagen, voraussichtlicher Ascheanfall und geschätzter P-Gehalt in der Asche.....	97
Tabelle 5.7: Klasseneinteilung der Mindestrückgewinnungsquoten zu Abreicherung der Phosphor-Gehalte im Klärschlamm auf 16 g P/kg TS in Szenario 3	100
Tabelle 5.8: Anzahl der potentiellen Rückgewinnungsanlagen bei Rückgewinnung nach Mindestanforderungen der Novelle AbfKlärV (Szenario 3) nach Größenklasse.....	102
Tabelle 5.9: Vergleichende Übersicht über die mögliche P-Rückgewinnung aus Klärschlämmen der relevanten Kläranlagen innerhalb der Szenarien.....	105
Tabelle 6.1: Auslegungsparameter für die P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche (Basis: 20.000 Mg Asche/a)	113
Tabelle 6.2: Betriebsmittelbedarf, Produkt- und Abfallmassenstrom der Verfahren PASCH und ASH DEC im Vergleich (Basis: 20.000 Mg Asche/a)	113
Tabelle 6.3: Kostenabschätzung für die Verfahren PASCH und ASH DEC auf Basis einer P-Rückgewinnung aus 20.000 Mg Asche/a für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren	115
Tabelle 6.4: Potentielle Erlöse durch den Verkauf von Rezyklat und die Reduktion des Ascheanfalls zur Entsorgung.....	116

Anhang

Tabelle A.1: Sensitivität 2014 Fall 1: Kläranlagen mit P-Gehalten größer 80 % des Grenzwertes	A-1
Tabelle A.2: Sensitivität 2014 Fall 2: Kläranlagen mit geringen P-Gehalten aber höheren Frachten.....	A-2
Tabelle A.3: Sensitivität 2025 Fall 1: Kläranlagen mit P-Gehalten größer 80 % des Grenzwertes	A-3
Tabelle A.4: Sensitivität 2025 Fall 2: Kläranlagen mit geringen P-Gehalten aber höheren Frachten.....	A-4
Tabelle C.1: Kopie der Tabelle 8.1 aus dem Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben PASCH mit Angaben zu den benötigten Betriebsmitteln (PINNEKAMP et al., 2010)	C-1
Tabelle D.1: Relevante Kläranlagen (Messwerte > 20 g P/kg TM)	D-1
Tabelle D.2: Möglicherweise relevante Kläranlagen (Keine Messwerte; Frachtbetrachtung liefert Wert > 20 g P/kg TM).....	D-10
Tabelle D.3: Relevanz der Kläranlagen sollte geprüft werden (Messwerte nicht überschritten; Frachtbetrachtung liefert Wert > 20 g P/kg TM)	D-10

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
a	Jahr
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AC	Ammoncitrat
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BB	Belebungsbecken
Bio-P	Vermehrte biologische Phosphorelimination
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMJV	Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BSB ₅	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
BWB	Berliner Wasserbetriebe
CMM	Kompetenzzentrum für Materialfeuchte; competence centre for material moisture
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSH	Calcium-Silicat-Hydrat
d	Tag
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DCP	Dicalciumphosphat
DK	Deponieklasse
DüMV	Düngemittelverordnung

DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
E	Einwohner
EBS	Ersatzbrennstoff
EG	Europäische Gemeinschaft
EKVO	hessische Abwassereigenkontrollverordnung
EW	Einwohnerwert
FFM	Frankfurt am Main
FHM	Flockungshilfsmittel
GK	Größenklasse
HAA	Hessische Abwasseranlagen
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
HMUKLV	Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
HSL	Hessisches Statistisches Landesamt
HTC	hydrothermale Carbonisierung
HWG	Hessisches Wassergesetz
ISWA	Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart
KLA	Kläranlage
KS	Klärschlamm
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LHL	Landesbetrieb Hessisches Landeslabor
MAP; $MgNH_4PO_4$	Magnesium-Ammonium-Phosphat, Struvit
MCP	Monocalciumphosphat
Mg	Megagramm

MHKW	Müllheizkraftwerk
MitV	Mitverbrennung
MonoV	Monoverbrennung
MP	Maßnahmenprogramm
M _P	Phosphormassenstrom
M _{KS}	Klärschlammstrom
NF	Nanofiltration
OS	Originalsubstanz
RP	Regierungspräsidium; Rohphosphat
TCPP	Tris(2-chlorisopropyl)phosphat
TM	Trockenmasse
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz
TSP	Triplesuperphosphat
UBA	Umweltbundesamt
V	Volumen
V.unbek.	Verbrennungsweg unbekannt
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

1 Veranlassung und Zielsetzung

Phosphat ist ein lebensnotwendiger aber stark limitierter Rohstoff. Klärschlämme stellen mit relevanten Gehalten an Phosphat eine bedeutende Sekundärquelle dar. Wenn der Phosphorgehalt der Klärschlämme nicht mehr im Kreislauf genutzt werden kann sind Alternativen erforderlich.

Im Hinblick auf einen beabsichtigten Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung, der durch die als Referentenentwurf vorliegenden Novelle zur Klärschlammverordnung konkretisiert werden soll und auch verbindliche Regelungen zur Phosphorrückgewinnung enthalten wird, wird eine Umstrukturierung der gesamten Klärschlammverwertung erforderlich werden. Um dies sachgerecht umzusetzen, bedarf es der Entwicklung eines Entsorgungskonzeptes für kommunale Klärschlämme, das auch eine Phosphorrückgewinnung beinhalten muss, wie es auch der Koalitionsvertrag der CDU/SPD 2013 vorsieht.

Die Umsetzung der aktuell geplanten Novelle der AbfKlärV im Hinblick auf die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm ordnet sich innerhalb Hessens in die hier verfolgte Ressourcenschutzstrategie (KOALITIONSVERTRAG HESSEN, 2014 - 2019) ein. Diese bündelt „im Zusammenspiel mit der Wissenschaft, der Wirtschaft und den Verbänden Aktivitäten zum Schutze natürlicher Ressourcen, zur Ressourcenschonung und mehr Ressourceneffizienz [...]“ innerhalb des Bundeslandes. Sich daraus ergebende Maßnahmen, wie die gezielte, weitreichende Phosphorelimination in Kläranlagen der GK 2 bis 5 zur Herstellung des guten chemischen und ökologischen Zustandes der Gewässer nach Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), wurden innerhalb dieses Gutachtens berücksichtigt.

Dazu sind Phosphorrückgewinnungsverfahren für die unterschiedlichen Stoffströme Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche darzustellen und Empfehlungen zu deren möglichem Einsatz auf hessischen Kläranlagen zu erarbeiten. Ein zu erstellendes Klärschlammkonzept unter besonderer Berücksichtigung der Phosphorrückgewinnung soll die regionalen Strukturen berücksichtigen.

Hierfür sind zunächst umfangreiche Recherche- und Datenarbeiten vorzunehmen. So wird in einem ersten Schritt eine Datenbank erstellt, die abwassertechnische und betriebstechnische Daten von Kläranlagen, zum Klärschlammfall und -qualität, Entsorgungswegen u.a.m. verknüpft.

Das Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen wurde seitens des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie mit der Anfertigung eines „Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammasche“ beauftragt und legt hiermit seinen Bericht vor.

2 Umsetzung der Rechtsvorgaben aus dem Entwurf der Novelle der AbfKlärV in die Praxis

2.1 Darstellung der veränderten rechtlichen Situation

Die Bundesregierung aus CDU, CSU und SPD hat in Ihrem Koalitionsvertrag „Deutschlands Zukunft gestalten“ zur 18. Legislaturperiode den Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung vereinbart und die gezielte Rückgewinnung des Elementes Phosphor sowie anderer, nicht näher benannter Nährstoffe aus dem Klärschlamm beschlossen. (BUNDESREGIERUNG, 2013)

Die Verschärfungen der gesetzlichen Anforderungen an den Schadstoffgehalt von Düngemitteln durch die Düngemittelverordnung (DüMV 2012) gelten seit Beginn des Jahres 2015, was zum Anstieg der thermisch zu entsorgenden oder anderweitig stofflich zu verwertenden Klärschlammengen geführt hat.

Der Referentenentwurf zur Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (NOVELLE ABFKLÄRV, 2015) wurde mit Datum vom 18.08.2015 veröffentlicht. Der Referentenentwurf sieht ab dem 1. Januar 2025 den Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung für kommunale Kläranlagen der Ausbaugrößenklassen (GK) 4 und 5 vor, bei denen laut statistischen Erhebungen etwa 91 % der kommunalen Klärschlämme anfallen (STATISTISCHES BUNDESAMT und DWA KEK-1.2, 2014). Laut Artikel 5 § 3a des Referentenentwurfs hat der Klärschlammherzeuger zudem ab 2025 „eine Rückgewinnung von Phosphor aus dem in seiner Abwasserbehandlungsanlage anfallenden Klärschlamm durchzuführen, sofern der Klärschlamm einen Phosphorgehalt von 20 Gramm oder mehr je Kilogramm Trockenmasse aufweist“ (NOVELLE ABFKLÄRV, 2015). Dabei ist nach der aktuellen Begründung zur Verordnung bereits eine einmalige Überschreitung des Wertes von 20 g P/kg TM ausreichend. Eine Übergangsregelung ist nicht vorgesehen. Konkret müssen bei positiver Identifikation der Kläranlage anhand der Ausbaugröße und der im Klärschlamm enthaltenen Phosphorkonzentration Maßnahmen zur Minimierung dieser Konzentration bis unterhalb von 20 g P/kg TM im Klärschlamm ergriffen werden. Abweichend kann auch eine Reduktion des Phosphor-Ausgangsgehalts des Klärschlammes um mindestens 50 % vorgenommen werden. Die Begründung zum Referentenentwurf besagt:

Ohne eine derartige Regelung wäre es z. B. bei besonders hohen Phosphorgehalten (mehr als 40 g/kg TM) erforderlich, Klärschlämme einer mehrmaligen Phosphorabtrennung oder unmittelbar der Klärschlammverbrennung oder Klärschlammmitverbrennung nach § 3b zuzuführen. (vgl. BMUB, 2015).

Aufgrund der derzeit erreichten P-Rückgewinnungsquoten in klein- und halbtechnischen Anlagen von zumeist kleiner 50 % bei vertretbarem Chemikalieneinsatz (vgl.

Verfahrensbeschreibungen Kapitel 4.1), könnte sich die genannte technische Grenze von 40 g P/kg TM zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm in der Praxis als zu hoch erweisen.

2.2 Auswirkungen für die kommunalen Klärschlammherzeuger und Entsorgungspflichtigen

Für die Kläranlagenbetreiber der GK 4 und 5 bedeutet die Novelle der AbfKlärV bei Inkrafttreten konkret, dass bei Überschreitung des Grenzwertes von 20 g P/kg TM eine Rückgewinnung des Phosphors aus dem Klärschlamm vor der thermischen Entsorgung oder im Falle einer Monoverbrennung des Klärschlammes eine Rückgewinnung aus der anfallenden Asche zu erfolgen hat. Der Klärschlammherzeuger kann die Rückgewinnung selbst durchführen oder diese extern durchführen lassen.

In dem Referentenentwurf wird die Ausbaugrößenklasse als maßgeblich für die Identifikation der Kläranlagen genannt, die ab Inkrafttreten zum 1. Januar 2025 keine Klärschlämme zur bodenbezogenen Verwertung geben dürfen. Somit sind Kläranlagen der Größenklasse 4 (Ausbaugröße > 10.000 E), die aber eine tatsächliche Anschlussgröße kleiner 10.000 Einwohnerwerte (E) (siehe auch Tabelle 3.1) aufweisen, dennoch von der Verordnung betroffen.

Aus der angestrebten Rückgewinnungsquote von mindestens 50 % des Phosphors im Klärschlamm, bei Nicht-Erreichen eines P-Gehaltes von kleiner 20 g P/kg TM, ergeben sich nach derzeitigem Entwicklungsstand Einschränkungen für die Anwendbarkeit der in Kapitel 4.1 vorgestellten Verfahren zur Rückgewinnung aus Schlammwasser oder aus Klärschlamm.

2.3 Übergangsregelung für eine Langzeitlagerung von Klärschlammmonoverbrennungsaschen

Der derzeitige Entwurf der Novelle der AbfKlärV sieht eine bis zum 31.12.2035 begrenzte Ausnahmeregelung vor, nach der Monoverbrennungsaschen separat zwischengelagert werden können. Voraussetzung ist jedoch, dass die Aschen zu einer gezielten Phosphorrückgewinnung verwendet werden.

PINNEKAMP et al. (2014) untersuchten für die Bundesrepublik Deutschland anhand von Daten aus dem Jahr 2013 die Möglichkeit einer Zwischenlagerung von Klärschlammmonoverbrennungsaschen. Dabei wurde ein Anstieg der Klärschlammengen zur Verbrennung von ca. 1 Mio. Mg TS/a auf 1,7 Mio. Mg TS/a bis 2025 prognostiziert. Dies wurde neben der anstehenden Novelle der AbfKlärV auch durch das Verbot zur landwirtschaftlichen Ausbringung von nicht biologisch abbaubaren synthetischen Polymeren (Kapitel 2.4) erklärt. Eine Verdopplung der Monoverbrennungskapazitäten auf 1,2 Mio. Mg TS/a wurde angenommen. Die daraus anfallende Verbrennungsaschemenge zur P-Rückgewinnung ab 2025 würde mit dem angesetzten Ascheanteil von 35 % etwa 420.000 Mg Asche/a betragen.

Für diese Aschen wurde ein Zwischen- bzw. Ablagerungskonzept erstellt und Vorschläge zu möglichen Monoverbrennungsstandorten – unter anderem anhand der Bevölkerungsdichte im Einzugsbereich der Anlagen – gemacht, um die zusätzlich benötigte Verbrennungskapazität bis 2025 zu schaffen (Bild 2.1).

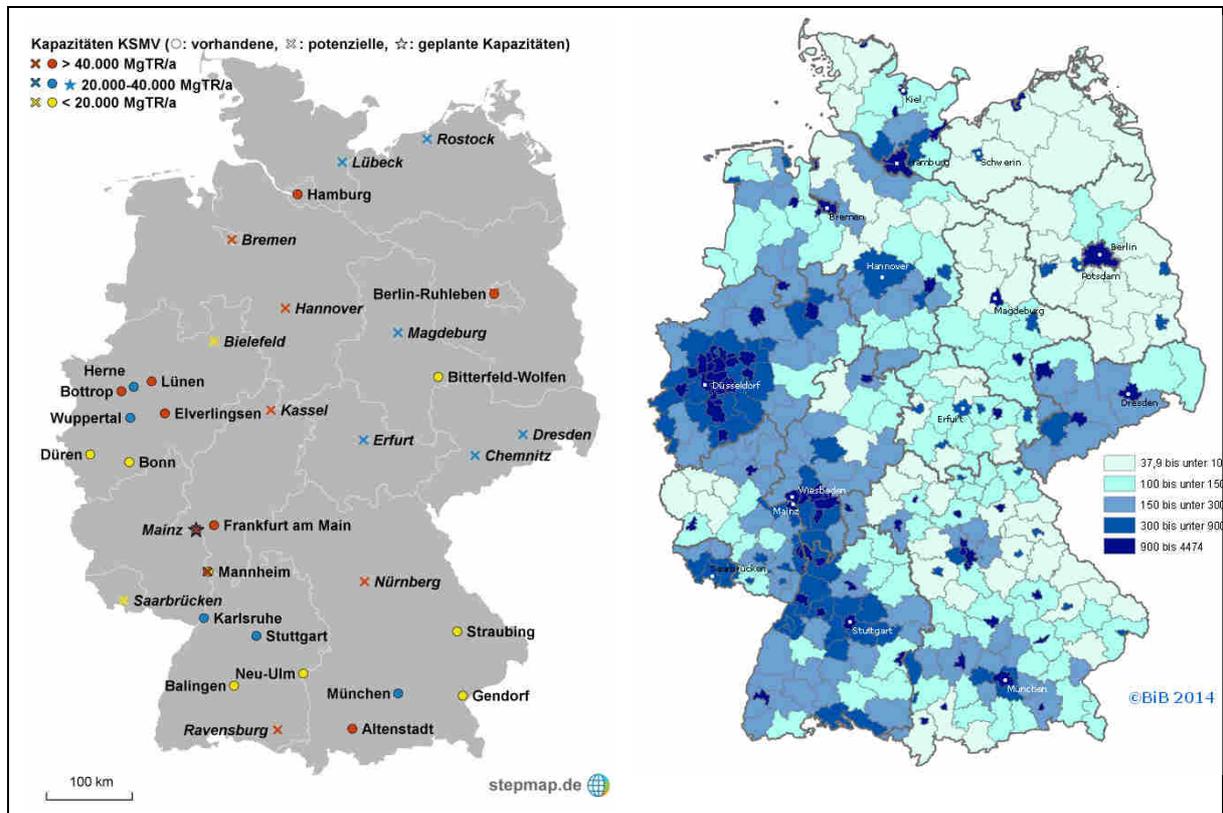


Bild 2.1: Bestehende und potenzielle Monoverbrennungsanlagen in Deutschland (links) sowie Bevölkerungsdichte auf Kreisebene, Angabe in Einwohner/km² (rechts) nach dem Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung, 2014 (PINNEKAMP et al., 2014)

Die deutschlandweiten Überlegungen zur Ermittlung möglicher Monoverbrennungsstandorte ab 2025 können zur Konzepterstellung für Hessen als Ausgangspunkt für weitere Betrachtungen herangezogen werden (siehe Kapitel 5).

2.4 Weitere Änderungen aufgrund der Düngemittelverordnung – Verbot des Einsatzes synthetischer Polymere

Aus der Novelle der DüMV (2012) geht hervor, dass der Einsatz synthetischer Polymere zur Klärschlammmentwässerung ab 2017 nur noch zulässig ist, wenn „sämtliche Bestandteile und das Endprodukt sich zu mindestens 20 % in zwei Jahren abbauen lassen.“ (Anlage 2 - Tabelle 8; Abschnitt 8.2.9; DüMV, 2012)

Synthetische Polymere, die ausschließlich in geschlossenen Systemen verwendet werden und anschließend einer Entsorgung angedient werden, sind von dieser Regelung ausgeschlossen. Somit ist die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen, die mit Hilfe synthetischer Polymere entwässert wurden, bereits ab 2017 nicht mehr möglich, sofern nicht die Anforderungen aus der DüMV erfüllt werden. Die vermehrte Verwendung von Kalk zur Entwässerung stuft der Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft aufgrund der erfolgenden pH-Anhebung des Klärschlammes als kritisch ein. (EUWID, 2014)

KOPP (2015) fasste die Diskussionspunkte bei den Klärschlammtagen in Potsdam mit dem Ergebnis zusammen, dass wichtige Erkenntnisse noch ausstehen. Dabei sind unter anderem die Untersuchungen zur Abbaubarkeit der Polymere durch die Polymer-Producer-Group zu nennen. Nach aktuellem Stand werden etwa 95 % der deutschen Klärschlämme mit synthetischen Polymeren entwässert und müssten, wenn keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen, ab 2017 thermisch entsorgt werden. Die Auswirkungen der Regelung aus der DüMV auf die Klärschlammmentsorgung in den nächsten Jahren sind derzeit nicht gesichert abzusehen. Ein Ausbau der thermischen Entsorgungskapazitäten in den Jahren bis 2025 erscheint aber als wahrscheinlich.

Zudem ist von der Entwicklung biologisch abbaubarer Polymere, bzw. dem teilweisen Nachweis der biologischen Abbaubarkeit bereits vorhandener Polymere in diesem Zeitraum auszugehen. So liegen seit Mitte März 2016 Ergebnisse eines von der Polymerindustrie in Auftrag gegebenen Forschungsprojektes zur Abbaubarkeit synthetischer Polymere vor, die noch im Sommer des Jahres dem BMEL bzw. dem dort angesiedelten Wissenschaftlichen Beirat für Düngungsfragen zugeleitet werden sollen, um eine entsprechende düngemittelrechtliche Zulassung zu erhalten (UNGEHEUER, 2016).

2.5 Herstellung des guten Zustandes von Gewässern nach Wasserrahmenrichtlinie – Änderung der Phosphorfrachten

Im Maßnahmenprogramm (MP) zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) in Hessen im zweiten Bewirtschaftungszeitraum bündelt das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) alle auf den in der Richtlinie 2000/60/EG genannten Zielen basierenden Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität bis 2021 (HMUKLV, 2015b). Das Land Hessen hat Anteile an den Flussgebietseinheiten Rhein und Weser, weshalb sich das Maßnahmenprogramm auf die entsprechenden Einzugsgebiete von Rhein, Weser und ihrer im Gebiet Hessen liegender Nebenflüsse, bezieht. Die geplanten Maßnahmen in Bezug auf die Reduzierung des Phosphoreintrags in die Gewässer sind in den folgenden Unterkapiteln kurz dargestellt.

2.5.1 Maßnahmen und Ziele der Wasserrahmenrichtlinie

Nach Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) verpflichten sich die EU Mitgliedsstaaten dazu, für jede Flussgebietseinheit oder für den in sein Hoheitsgebiet fallenden Teil einer internationalen Flussgebietseinheit ein Maßnahmenprogramm festzulegen. Als Umweltziele werden in der Wasserrahmenrichtlinie die Vermeidung der Verschlechterung des Zustandes von Oberflächengewässern und Grundwasserkörpern genannt. Die Mindestanforderung an genannte Wasserkörper ist es (nach WRRL Anhang V), einen „guten“ Zustand zu erreichen.

Als „Grundlegende Maßnahmen“ werden die Maßnahmen zur Erfüllung der Mindestanforderungen an den Gewässerschutz genannt, wie sie sich z. B. aus der Umsetzung bestehender gemeinschaftlicher Wasservorschriften zum kommunalen Abwasser, zur Phosphatbelastung der Gewässer oder dem Trinkwasserschutz ergeben. Die „grundlegenden Maßnahmen“ beinhalten somit im Allgemeinen bereits etablierte Maßnahmen zur Einhaltung und Kontrolle von Grenzwerten diverser bereits verbindlicher europäischer Richtlinien und Verordnungen und werden daher in den folgenden Unterkapiteln nicht näher geschildert.

„Ergänzende Maßnahmen“ sind weiterhin zu planen und zu ergreifen, um die in der Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG), Artikel 4 und Anhang V, festgelegten Ziele zu erreichen. Die Gestaltung der Maßnahmen ist den EU-Mitgliedsstaaten überlassen.

Zusätzlich wird die Wirksamkeit der Maßnahmen durch das begleitende Überwachungsprogramm überprüft, sodass die Maßnahmen an die jeweils neuen Erkenntnisse angepasst werden können.

Sogenannte „Zusätzliche Maßnahmen“ sind erst zu ergreifen, wenn aus der Überwachung oder anderen Daten klar erkennbar ist, dass die gesteckten Ziele nicht mit den zuvor genannten Maßnahmen erreicht werden.

2.5.2 Hessisches Maßnahmenprogramm zur Reduzierung der Phosphorkonzentration in Gewässern

Laut Maßnahmenprogramm hat „das Land Hessen [...] das Ziel alle Wasserkörper in einen „guten“ Zustand zu bringen bzw. das „gute“ ökologische Potenzial bei den künstlichen und erheblich veränderten Wasserkörpern zu erreichen und diesen guten Zustand/ gutes Potenzial zu erhalten.“ (HMUKLV, 2015b)

Um einen „guten“ ökologischen Zustand in Gewässern zu erreichen, ist für die Phosphor-Elimination vorgesehen, die Konzentration an Gesamtposphor und Orthophosphat in diesen Wasserkörpern deutlich zu reduzieren. Dazu werden folgende Maßnahmen genannt:

- Umsetzung von notwendigen und sicher wirksamen Maßnahmen zur weiteren Verbesserung der Elimination von Phosphor in Kläranlagen sowie Maßnahmen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen,
- Minderung der durch Erosion bedingten Bodeneinträge und damit auch der diffusen Phosphoreinträge durch landwirtschaftliche Beratung zum Erosionsschutz und finanzieller Förderung erosionsmindernder Bewirtschaftungsverfahren.

2.5.2.1 Punktquellen

Die im Rahmen der „erweiterten Maßnahmen“ im Maßnahmenprogramm festgelegten Phosphor-Grenzwerte beziehen sich ausschließlich auf Abwasserströme aus Kläranlagen, da diese den Hauptteil der in den entsprechenden Einzugsgebieten vorhandenen Belastung aus Punktquellen ausmachen. Die diesbezüglich gesetzten Anforderungen an kommunale Kläranlagen werden nach den Größenklassen der Kläranlagen unterschieden und können in Tabelle 2.1 eingesehen werden. Kläranlagen werden nicht berücksichtigt, wenn sie eine Ausbaugröße < 1.000 EW haben oder direkt in den Rhein oder in das Wisper-Einzugsgebiet einleiten.

Nach dem Maßnahmenprogramm Hessen obliegt es grundsätzlich den Betreibern der Kläranlagen, die Technik zu wählen, um die o. g. Werte einhalten zu können. Bei Einhaltung der in Tabelle 2.1 genannten Grenzwerte ist nach Untersuchungen des HMUKLV ein Rückgang von 47% der in Hessen durch die Kläranlagen emittierten Phosphatfracht im Vergleich zum Bezugsjahr 2012 zu erwarten.

Tabelle 2.1: Anforderungen an kommunale Kläranlagen in betroffenen Einzugsgebieten (HMUKLV, 2015b)

Nr.	GK *)	Detaillierte Spezifikation	Anzahl betroffener Anlagen	Anzahl Anlagen, die die notwendigen Anforderungen derzeit wahrscheinlich nicht einhalten (Stand 2014)	Anforderung
1	5	-	8	8	P_{ges} (2h-Probe), Überwachungswert: 0,4 mg/l Arithm. Monatsmittelwert P_{ges} (24h-Probe), der Eigenkontrolle: 0,2 mg/l
2	4	In Einzugsgebieten von Schwarzbach (Ried), Rodau und Urselbach wegen Umweltqualitätsnorm-Überschreitung bei Zn, Cu und hoher Phosphorbelastung. Bei einzelnen Talsperren wegen hoher Empfindlichkeit und nicht gutem Zustand (Eder-, Diemel- und Kinzig-Talsperre).	16	15	P_{ges} (2h-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} (2h-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} (2h-Probe; qualifizierte Stichprobe), Überwachungswert: 2,0 mg/l Ziel P_{ges} : Jahresmittelwert von 1,0 mg/l der Eigenkontrolle

*) GK = Größenklasse der Kläranlage

Die Kläranlagen, die von den jeweiligen Maßnahmen betroffen sind, sind in Anhang 6 des Maßnahmenprogrammes aufgelistet. Aufgrund z. T. starker Verschärfungen der Überwachungswerte, liegen diese unterhalb der aktuellen Ablaufwerten der Kläranlagen. Die bei Einhaltung der neuen Überwachungswerte zusätzlich zu eliminierende P-Fracht wird über den

Klärschlamm aus der Kläranlage ausgetragen. Eine theoretische Ermittlung der zu erwartenden P-Frachten im Klärschlamm nach Umsetzung der Maßnahmen ist somit sinnvoll.

2.5.2.2 Diffuse Quellen

Als bedeutendste Ursache für Phosphor-Einträge in den Einzugsgebieten aus diffusen Quellen sind im Maßnahmenprogramm Hessen die Erosion und Abschwemmung von (landwirtschaftlich genutzten) Böden genannt. Andere Pfade diffuser Belastungen, wie z.B. Einträge über Drainagen seien quantitativ von untergeordneter Bedeutung. Als mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der diffusen Einträge werden vornehmlich Maßnahmen zur Erosions- und Abschwemmungsminderung genannt. An dieser Stelle sei für weitere Informationen auf das Maßnahmenprogramm verwiesen.

3 Identifikation der relevanten Kläranlagen nach Novelle der AbfKlärV

3.1 Darstellung des Betrachtungsrahmens

Aus den Vorgaben der AbfKlärV ergibt sich ein Handlungsbedarf für Kläranlagen der GK 4 und 5 ab einem P-Gehalt im Klärschlamm von mindestens 20 g P/kg TM. Innerhalb dieses Gutachtens wird der Betrachtungsrahmen auf Kläranlagen der GK 3 erweitert um der in Hessen verfolgten Ressourcenschutzstrategie Rechnung zu tragen. Außerdem erfolgt eine gesonderte Betrachtung von Kläranlagen, deren P-Gehalte nahe 20 g P/kg TM liegen, um möglichst große Rückgewinnungspotentiale auszuschöpfen. Weiterhin könnte es bei diesen Kläranlagen bei einer Verschärfung der Anforderungen an die Einleitung in Vorfluter zu einer Überschreitung dieses Wertes kommen. Die Rückgewinnung aus weiteren phosphorhaltigen Stoffströmen kann zusätzliche Potentiale eröffnen, die anhand von Aschen aus Biomasseverbrennungsanlagen in die Betrachtung mit einbezogen werden.

Im Rahmen dieses Gutachtens wird die Klärschlamm Entsorgung innerhalb des Bundeslandes Hessen betrachtet. Klärschlammströme, die das Bundesland verlassen, soweit sie zu ermitteln waren, werden zusammengefasst dargestellt, ohne den genauen Entsorgungsort zu spezifizieren. Die Einhaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen aus der AbfKlärV, sowie der weiteren gesetzlichen Vorschriften bei der Entsorgung bzw. Verwertung des Klärschlammes in den jeweiligen Empfänger-Bundesländern wird postuliert. Die gegebenen Daten lassen vor allem die Nachverfolgung der außerhalb Hessens landwirtschaftlich genutzten Klärschlammmenge zu. Um das Potential zur P-Rückgewinnung innerhalb Hessens im Rahmen des Gutachtens möglichst vollständig zu erfassen, wird von einer Entsorgung, bzw. Verwertung der zur Verbrennung anfallenden Klärschlämme und der im Rahmen einer Mono- oder Mitverbrennung entstehenden Aschen im Bundesland ausgegangen.

Aufgrund der Unsicherheit des zukünftigen Verbleibs des Klärschlammes bei den Kläranlagen, die zurzeit synthetische Polymere zur Klärschlammwässerung verwenden (siehe Kapitel 2.4), werden diese in diesem Konzept möglichst weitgehend bei der thermischen Klärschlammbehandlung berücksichtigt. Dadurch ergeben sich eventuell auch Rückgewinnungspotentiale – bei erfolgter Klärschlammmonoverbrennung – für Klärschlämme aus Kläranlagen, die nach AbfKlärV als nicht relevant eingestuft werden. Dies dient dem Ressourcenschutz.

3.2 Datengrundlage

Nach § 61 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) in Verbindung mit § 40 des Hessischen Wassergesetzes (HWG) und in Verbindung mit den näheren Regelungen in der hessischen Abwassereigenkontrollverordnung (EKVO) hat der Unternehmer der Abwasseranlage die notwendige regelmäßige betriebliche Überwachung hinsichtlich des ordnungsgemäßen Betriebes und der Einhaltung der Anforderungen eigenverantwortlich sicherzustellen. Die Ergebnisse sind in jährlichen Eigenkontrollberichten zu dokumentieren und den zuständigen Wasserbehörden vorzulegen.

Die Erfassung aller abwasserspezifischen Daten aus diesen Berichten erfolgt über das Fachinformationssystem "Hessische Abwasseranlagen" (FIS HAA), das vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie betrieben wird. Die Daten der Eigenkontrollberichte werden neben anderen Daten aus HAA im Lagebericht – Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen und auch für andere Berichtspflichten zusammengestellt und ausgewertet.

Für das vorliegende Gutachten wurden vom HLNUG folgende Daten zur Verfügung gestellt:

- Adressen der Abwasserverbände in Hessen sowie der dazugehörigen Kläranlagen mit Angaben
 - zum Phosphorgehalt (in mg/l) im Zulauf und Ablauf der Kläranlage (GK 2-5) sowie Jahresfracht (in kg/a) der in den Vorfluter eingeleiteten Phosphorgehalt
 - zur Ausbaugröße (alle GK) und den angeschlossenen Einwohnerwerten (sofern diese angegeben sind)
 - zur Anfallmenge (in m³/a bzw. t/a und Angabe des TS-Gehaltes in %) und Verbleib (Entsorgungsweg(e)) des Klärschlammes
 - der Jahresabwassermenge im Zulauf/Ablauf (in m³/a)
 - der eingesetzten Zusatzstoffe zur Abwasser-/Schlammbehandlung, z.B. auch Polymereinsatz, aber auch Fällungssalze (in t/a)
 - Art der Abwasserreinigung und der für die Phosphorrückgewinnung relevanten technischen Ausstattung (z.B. Faulturm) der einzelnen Kläranlagen (sofern diese Angaben vorhanden sind)

Nach § 7 Abs. 7 der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) haben die Betreiber von Abwasserbehandlungsanlagen ein Register zu führen und diese Angaben bis zum 31. März des Folgejahres für das vorherige Kalenderjahr an die für den Vollzug der Klärschlammverordnung fachlich zuständigen Behörden, hier dem Regierungspräsidium Kassel, Dezernat Landwirtschaft, weiter zu leiten.

Die eingereichten Daten werden gemäß Bundesvorgaben statistisch ausgewertet und an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit zur Meldung an die EU sowie an das Statistische Landesamt weitergereicht.

Aus diesem Register wurden

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

für das Gutachten zur Verfügung gestellt.

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

3.3 Definition von Begriffen und Rechenwerten

Innerhalb der nachfolgenden Kapitel werden Terminologien und Begriffe verwendet, die zur besseren Übersicht hier kurz zusammengefasst erläutert werden sollen.

3.3.1 Indirekt und direkt entsorgende Kläranlagen (Indirekt- und Direktentsorger)

In Hessen herrschen je nach Größenklasse und Lage der Kläranlagen entweder der direkte Anfall von Klärschlamm zur Entsorgung nach der Schlammbehandlung auf der jeweiligen Anlage oder die indirekte Entsorgung über eine in der Nähe befindliche größere Kläranlage vor. Bei letzterer Möglichkeit kann es je nach Herkunft und Stabilisierungs- oder Entwässerungsgrad des Klärschlammes zu einer Mitbenutzung der vorhandenen Infrastruktur der großen Kläranlage kommen. Mit Hilfe der zur Verfügung gestellten Daten wurde der Klärschlamm, der von kleineren Anlagen stammt, direkt in die Bilanz der Großanlagen integriert, so dass keine doppelte Zählung stattfand. Die Anlagen werden im weiteren Verlauf des Gutachtens als **direkt entsorgende Kläranlagen** (Direktentsorger = Kläranlagen bei denen Klärschlamm direkt einem Entsorgungsweg angedient wird) und **indirekt entsorgende Kläranlagen** (Indirektentsorger = Kläranlagen, die ihren Klärschlamm über eine andere Kläranlage entsorgen) bezeichnet.

3.3.2 Relevante Kläranlagen

Unter dem Begriff **relevante Kläranlagen** werden die nach dem Kriterium P-Gehalt größer 20 g P/kg TM der Novelle der AbfKlärV eindeutig für die Phosphorrückgewinnung identifizierten Kläranlagen der Größenklassen 4 bis 5 zusammengefasst (vgl. Kapitel 3.5). Die Kläranlagen der GK 3 werden aus Ressourcenschutzaspekten zusätzlich berücksichtigt.

3.3.3 Bezeichnungen der Phosphorgehalte und P-Massenströme

Innerhalb des Gutachtens wurde aufgrund des Schwellenwertes aus dem Referentenentwurf zur Novelle der AbfKlärV als Bezugsgröße immer der gesamte enthaltene elementare Phosphor (P_{ges}) angegeben. Im Vorfeld fand bei den ausgewerteten Daten eine Umrechnung von Phosphat (P_2O_5) auf P_{ges} statt ($P_2O_5 \cdot 0,4364 = P$).

Die Betrachtungen basieren sowohl auf Mess- als auch auf Rechenwerten. Phosphorkonzentrationen wurden durchgängig als Konzentration je kg Trockenmasse (TM oder TS synonym verwendet) angegeben, mit dem Buchstaben P abgekürzt und mit den jeweiligen Indizes versehen. Unterschieden wird zwischen:

- Den einzelnen Messwerten der P-Konzentrationen,
- den aktuellen mittleren P-Konzentrationen im Klärschlamm (Mittelwerte aus Messwertperioden, siehe Kapitel 3.4.2: $P_{\text{KS},2004-2009}$, $P_{\text{KS},2012-2014}$; $P_{\text{KS},2004-2014}$),
- den prognostizierten mittleren P-Konzentrationen im Klärschlamm ab 2025 (Mittelwerte aus maßgeblicher Messwertperiode + minimal zu erwartender zusätzlicher P-Konzentration bei Umsetzung der Vorgaben aus dem Maßnahmenprogramm WRRL, siehe Kapitel 3.4.2: $P_{\text{KS},\text{Prognose}}$),
- den Zu-/Ablauf-Konzentrationen der Kläranlagen ($P_{\text{KLA},\text{Zulauf}}$, $P_{\text{KLA},\text{Ablauf}}$) und
- den errechneten P-Konzentrationen aus einer Zulauf-/Ablauf-Frachtbetrachtung der P-Massenströme in den Kläranlagen (siehe Kapitel 3.4.2, $P_{\text{KS},\text{Frachtbetrachtung}}$).

Die aus der P-Konzentration und dem Klärschlamm(trocken-)massenstrom (in Mg TS oder Mg TM) gebildeten P-Massenströme werden nachfolgend mit $M_{\text{P},\text{Index}}$ angegeben.

3.3.4 Ausbaugröße und Größenklassen

In Tabelle 3.1 sind die Größenklassen 1 bis 5 nach den jeweils maßgeblichen BSB₅-Zulauffrachten eingeteilt und die sich daraus ergebenden Ausbaugrößen zur Erinnerung zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Definition der Größenklassen von Kläranlagen nach Anhang 1 der Abwasserverordnung (BMJV, 2014)

Größenklasse	BSB-Fracht im Zulauf [kg BSB ₅ /d]	Ausbaugröße/ Einwohnerwert [E]
1	< 60	0 bis 999
2	60 bis 300	1.000 bis 5.000
3	> 300 bis 600	5.001 bis 10.000
4	> 600 bis 6.000	10.001 bis 100.000
5	> 6.000	größer 100.000

Die im Referentenentwurf zur Novelle der AbfKlärV genannten Größenklassen beziehen sich auf die genehmigte Ausbaugröße der Kläranlage. Eine differenzierte Betrachtung der rechnerischen Anschlussgröße der Kläranlagen in Hessen, aufgrund der berichteten BSB₅-Frachtbelastung im Zulauf der Kläranlagen, ist somit nicht erforderlich.

3.4 Übersicht über die Kläranlagen und die Klärschlamm Entsorgung in Hessen in den Jahren 2012 bis 2014

In Hessen wurden im Jahr 2014 insgesamt 712 Kläranlagen betrieben, von denen 24 % den Größenklassen 4 und 5 (+ 10 % GK 3) zuzuordnen sind, auf welche 87,7 % (+ 5,4 % für GK 3) der ausgebauten Behandlungskapazität entfallen (siehe Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Kläranlagen mit Anzahl und Ausbaugröße nach Größenklasse und in Summe

GK	Alle Kläranlagen		Direktentsorger		Indirektentsorger	
	Summe der Ausbaugrößen [E]	Anzahl Anlagen	Summe der Ausbaugrößen [E]	Anzahl Anlagen	Summe der Ausbaugrößen [E]	Anzahl Anlagen
1	127.023	246	59.751	99	67.272	147
2	586.384	222	445.304	159	141.080	63
3	566.540	73	473.990	60	92.550	13
4	5.358.743	161	5.290.743	157	68.000	4
5	3.735.000	10	3.735.000	10	0	0
∑	10.373.690	712	10.004.788	485	368.902	227

Wie Tabelle 3.2 zeigt, sind 227 Kläranlagen indirekt entsorgende Kläranlagen mit einer Gesamtausbaugröße von ca. 370.000 E (vgl. Kapitel 3.3.1). Unter der Annahme, dass hier langfristig gesicherte Entsorgungskonzepte der einzelnen Betreiber vorliegen, reduziert sich die Anzahl der relevanten Anfallstellen für Klärschlamm zur weiteren Betrachtungen auf 485 direkt entsorgende Kläranlagen. Im Einklang mit dem in Kapitel 3.1 genannten Betrachtungsrahmen wurde die Anzahl der in Kapitel 3.5 genauer zu betrachtenden Kläranlagen in einem ersten Schritt auf 10 Kläranlagen der GK 5, 157 der GK 4 und 60 der GK 3 eingeschränkt.

In Bild 3.1 sind sowohl die prozentuale Verteilung der Einwohner-Ausbauwerte je Landkreis als auch die räumliche Verteilung der Kläranlagen nach Größenklasse dargestellt. Innerhalb Hessens kann anhand der Verteilung der Größenklassen der Kläranlagen sehr gut auf die Bevölkerungsverteilung geschlossen werden. So befindet sich der Hauptteil von Bevölkerung und des Gewerbes in den südlichen Kreisen. Im Norden kann der Großraum Kassel als Schwerpunktregion identifiziert werden. In der Mitte Hessens befinden sich einzelne dichter besiedelte Regionen um Marburg, Gießen und Fulda.

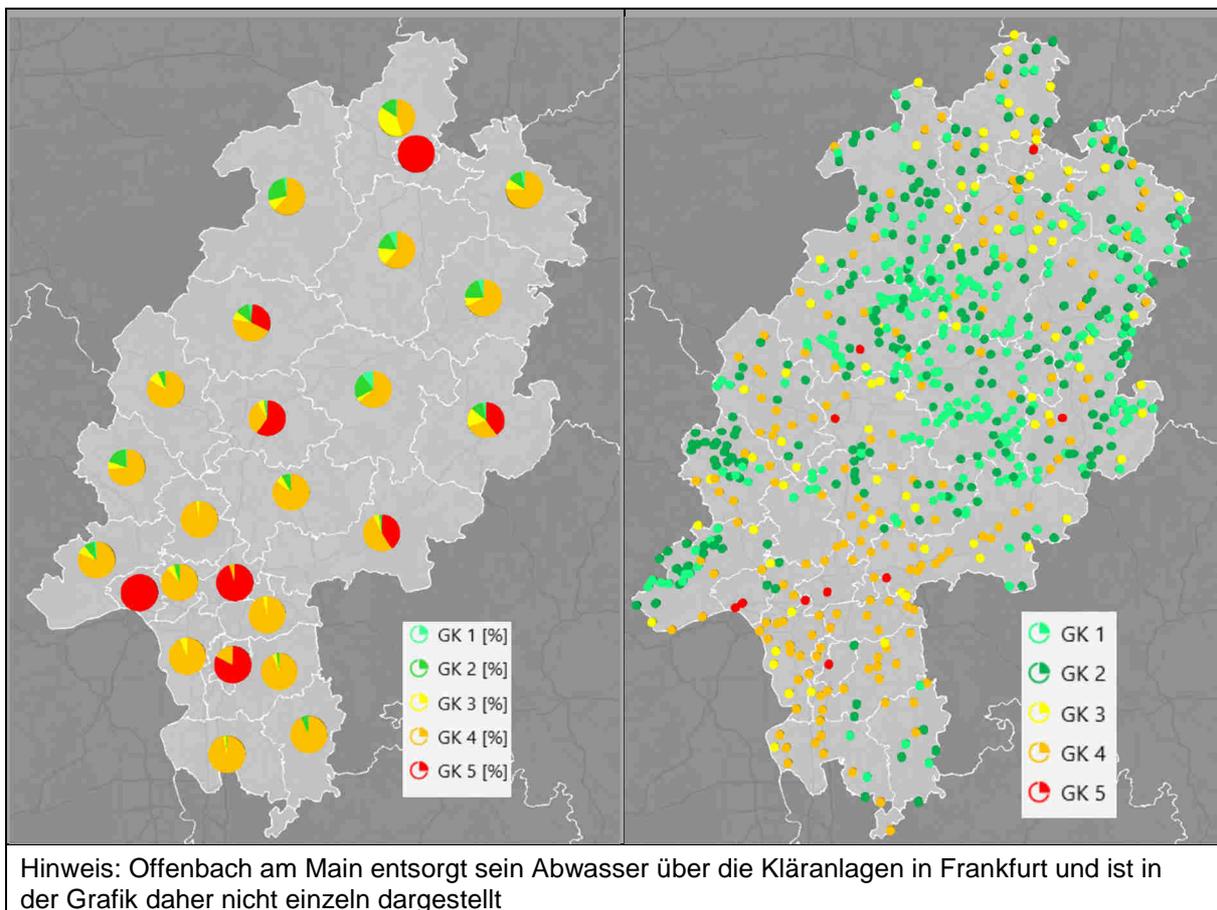


Bild 3.1: Prozentuale Verteilung der Ausbaugrößen in den Landkreisen und kreisfreien Städten und räumliche Anordnung der Kläranlagen in Hessen nach Größenklasse

Aus der Verteilung der Kläranlagen nach Größenklassen können erste Rückschlüsse auf eventuelle Ansatzpunkte für Phosphorrückgewinnungsanlagen gezogen werden, doch müssen die real anfallenden Klärschlammengen zunächst genauer identifiziert und zugeordnet werden (Kapitel 3.4.1). Zudem ist eine Betrachtung der aktuellen Entsorgungswege und der dafür zur Verfügung stehenden Infrastruktur notwendig (Kapitel 3.4.2). Außerdem wurden die maßgeblichen P-Gehalte im Klärschlamm ermittelt (Kapitel 3.4.3) und die Kläranlagentechnologie ausgewertet (Kapitel 3.4.4).

3.4.1 Maßgebliche Klärschlammströme von 2012 bis 2014

Die gegebenen Daten (siehe Kapitel 3.2) der Klärschlammströme in Mg TS/a zur Entsorgung für die einzelnen Kläranlagen wurden in Zeitreihen von 2012 bis 2014

ausgewertet. Die Festlegung eines für weitere Betrachtungen maßgeblichen Klärschlammstromes je Kläranlage erfolgte so, dass möglichst keine Unterschätzung der Mengen stattfand, um Kapazitätsabschätzungen nicht zu gering vorzunehmen. Dabei wurde wie in Tabelle 3.3 aufgeführt vorgegangen.

Tabelle 3.3: Festlegung des maßgeblichen Klärschlamm-trockenmassenstroms je Kläranlage für den Betrachtungszeitraum 2012 bis 2014

Ergebnis aus 2012 bis 2014	Als maßgeblich angenommener Klärschlammfall
<p>Innerhalb der drei Jahre liegt ein klarer Trend zu einem höheren Klärschlammfall auf der jeweiligen Kläranlage vor.</p> <p>Der Klärschlammfall 2014 war außergewöhnlich hoch. Eventuell wurden zusätzliche Abwassermengen mitbehandelt oder zusätzlicher Klärschlamm aus indirekt entsorgenden KLA zur Behandlung angenommen und entsorgt. Die Kläranlage wurde entsprechend für Rückfragen markiert.</p> <p>Sinkende Klärschlamm-mengen wurden festgestellt. Die Kläranlage wurde entsprechend für eine nachträglich anzugehende Detailabklärung bei Umsetzung eines Konzeptes markiert.</p>	Jahr 2014
<p>Es liegt ein gleichmäßiger Klärschlammfall in 2012 bis 2014 vor.</p> <p>Unregelmäßige Klärschlamm-mengen machen eine Identifikation eines klaren Trends nicht möglich. Die Kläranlage wurde für eine nachträglich anzugehende Detailabklärung bei Umsetzung eines Konzeptes entsprechend markiert.</p>	Mittelwert 2012-2014

Aus der Fallbetrachtung wurde für jede direkt entsorgende Kläranlage ein maßgeblicher Klärschlammstrom in Mg TS/a als Ist-Zustand definiert. Für jede Kläranlage wurde eine detaillierte Auswertung zur Erfassung des maßgeblichen Klärschlammfalls vorgenommen. Diese liegt dem Gutachten zugrunde. In Tabelle 3.4 sind die summarischen Ergebnisse je Landkreis und kreisfreier Stadt dargestellt. Es ist erkennbar, dass es in den Jahren 2012 bis 2014 zu Schwankungen der Klärschlamm-trockenmassenströme um bis zu 3 % um den Mittelwert aus diesen Jahren kam. Dies liegt vor allem in einem geringeren Klärschlammfall im Jahr 2013 begründet, welcher eventuell auf längere, mehrjährige Entsorgungsintervalle einzelner Kläranlagen zurückzuführen sein könnte. Die als maßgeblich angenommene Klärschlamm-menge wird für den Fall, dass die Daten aus 2014 den aktuellen Stand abbilden um ca. 1,2 % unterschätzt. Dies liegt im Rahmen der Genauigkeiten bei der Erfassung des Trockenmassesstroms.

Tabelle 3.4: Summe der Klärschlammströme aller direkt entsorgenden Kläranlagen für die Jahre 2012 bis 2014 als Einzelwerte, Mittelwerte und als maßgebliche Werte aufgrund der Jahresreihenauswertung (Kreisebene)

Kreis	Klärschlammanfall [Mg TS/a]				
	2012	2013	2014	Mittelwert 2012 bis 2014	als maßgeblich gewählt
Kreis Bergstraße	5.370	5.231	5.641	5.414	5.379
Stadt Darmstadt	2.971	3.133	2.965	3.023	3.023
Kreis Darmstadt-Dieburg	6.114	6.155	6.186	6.152	6.276
Stadt Frankfurt	39.618	38.486	41.983	40.029	40.029
Kreis Fulda	4.410	4.535	4.551	4.499	4.684
Kreis Gießen	6.375	6.429	6.189	6.282	6.244
Kreis Groß-Gerau	4.347	4.554	4.481	4.460	4.508
Kreis Hersfeld-Rotenburg	2.406	2.265	2.771	2.481	2.511
Kreis Hochtaunus	3.767	3.944	3.926	3.829	3.891
Kreis Kassel	4.306	3.463	3.769	3.865	3.718
Kreis Lahn-Dill	5.392	4.703	4.994	5.029	4.946
Kreis Limburg-Weilburg	4.616	4.843	4.748	4.782	4.864
Kreis Main-Kinzig	8.755	8.545	8.356	8.468	8.385
Kreis Main-Taunus	2.843	2.993	2.565	2.800	2.804
Kreis Marburg-Biedenkopf	6.231	6.053	6.181	6.155	6.128
Kreis Odenwald	1.756	1.700	1.764	1.740	1.738
Kreis Offenbach	4.521	4.757	4.470	4.699	4.556
Kreis Rheingau-Taunus	4.921	4.413	4.173	4.520	4.338
Kreis Schwalm-Eder	3.907	3.473	3.306	3.562	3.542
Stadt Kassel	4.205	4.389	4.581	4.392	4.581
Kreis Vogelsberg	3.339	2.034	2.432	2.601	2.153
Kreis Waldeck-Frankenberg	3.741	2.942	3.405	3.384	3.284
Kreis Werra-Meißner	2.814	2.702	2.942	2.819	2.848
Kreis Wetterau	7.093	7.186	7.310	7.233	7.305
Stadt Wiesbaden	8.986	9.164	9.332	9.160	9.357
SUMME	152.803	148.091	153.020	151.378	151.091

Weitere Effekte können die Klärschlammmenge bis 2025 deutlich reduzieren. Allein die geplante Klärschlammfäulung für den Raum Frankfurt (Kläranlagen Sindlingen und Niederrad/Griesheim) wird laut Aussage des Betreibers ab ca. 2020 den Klärschlamm-trockenmasseanfall um ca. 40 % reduzieren, was eine Reduktion des insgesamt in Hessen anfallenden KS-Trockenmassenstroms um 10,6 % nach sich ziehen würde. Die tabellarischen Daten der Jahresreihen für die 25 Landkreise und kreisfreien Städte sind in Bild 3.2 kartographisch dargestellt.

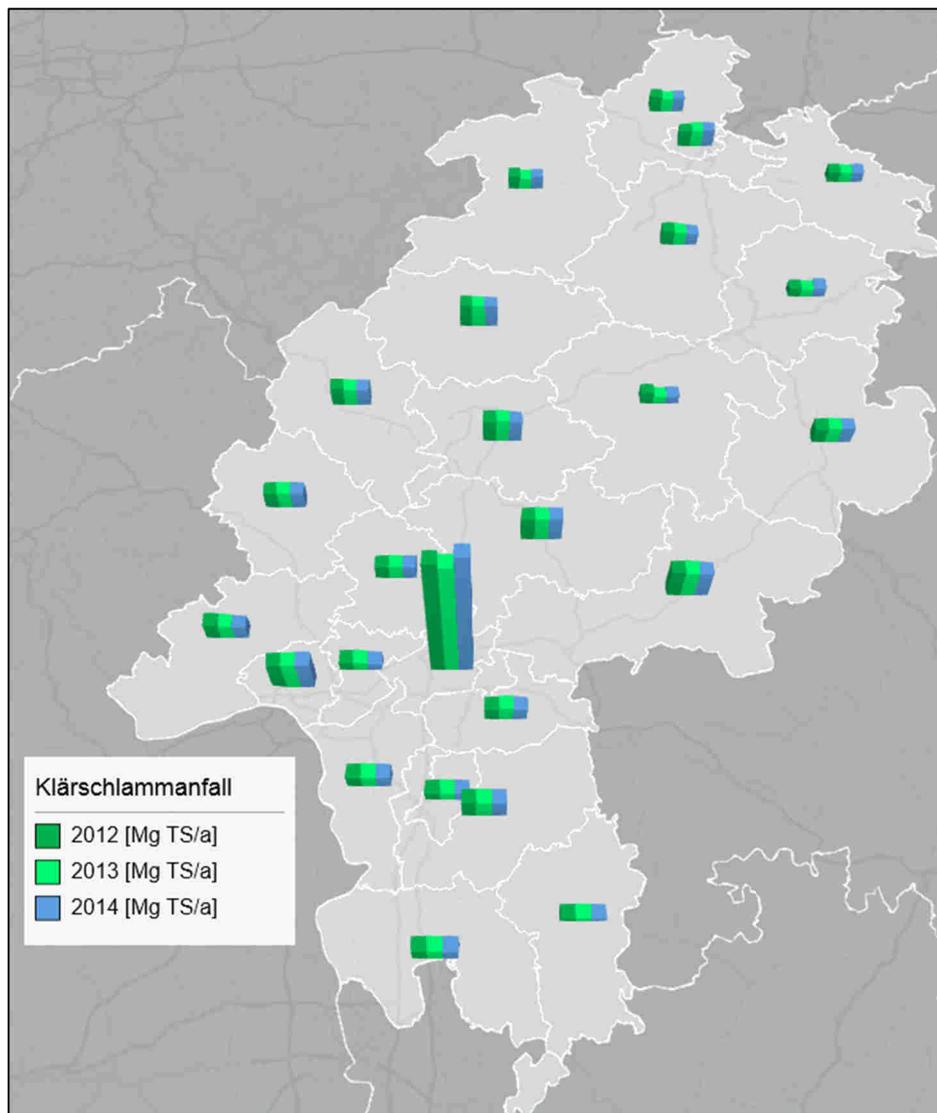


Bild 3.2: Klärschlammmassenströme von 2012 bis 2014 als Jahresreihen auf Kreisebene (Zahlenwerte in Tabelle 3.4)

In Bild 3.2 wird in Kombination mit Tabelle 3.4 deutlich wie ungleich der Klärschlammanfall in Hessen verteilt ist. Die Kläranlagen Frankfurt Sindlingen und Niederrad/Griesheim, sowie die weiteren Kläranlagen im Stadtgebiet Frankfurt am Main machen 26,5 % des insgesamt in Hessen zur Entsorgung anfallenden Klärschlammes aus. Zudem sind gut die Schwankungen im Klärschlammanfall in der Stadt Frankfurt zu erkennen.

Auf Bundeslandebene zusammengefasst ergeben sich für den im Konzept angesetzten maßgeblichen Klärschlammanfall die in Bild 3.3 dargestellten Massenströme je Größenklasse. Ähnlich der Situation in Gesamtdeutschland (STATISTISCHES BUNDESAMT und DWA KEK-1.2, 2014), fällt in Hessen mehr als 90 % des Klärschlammes auf Kläranlagen der GK 4 und 5 an.

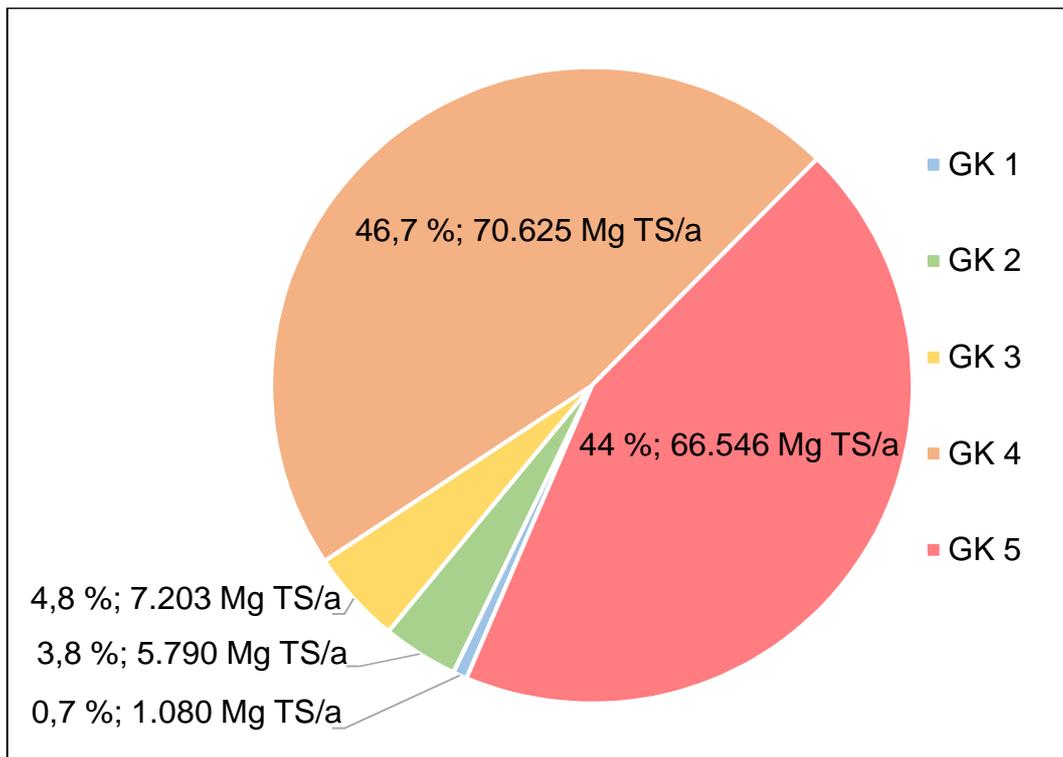


Bild 3.3: Als maßgeblich ermittelter Klärschlammanfall in Mg TS/a für die Jahre 2012 bis 2014 nach Größenklasse in Hessen

3.4.2 Entsorgungswege für Klärschlamm in Hessen

Für die Entsorgungswege Verbrennung, Landwirtschaft, Landbau und Vererdung standen ebenfalls Daten aus 2012 bis 2014 zur Verfügung. Die Entsorgungswege wurden analysiert. Aufgrund der geringen Verschiebungen wurde die Entsorgungssituation des Jahres 2014 als Basis für weitere Betrachtungen festgelegt. Mit Daten des HLNUG aus dem Jahr 2012 (siehe Kapitel 3.2) standen teilweise Angaben des Verbrennungsweges (Mono- oder Mitverbrennung) zur Verfügung. Weiterhin konnte mit Daten des Hessischen Landesamtes für Statistik von 2013 für mehr als 92 % der verbrannten Klärschlammmengen die Art der Verbrennung (Mono- oder Mitverbrennung) ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der Schwankungen im Klärschlammanfall (Darstellung des maßgeblichen Klärschlamm-massenstromes) stellt sich die Entsorgungssituation in Hessen wie in Bild 3.4 dar.

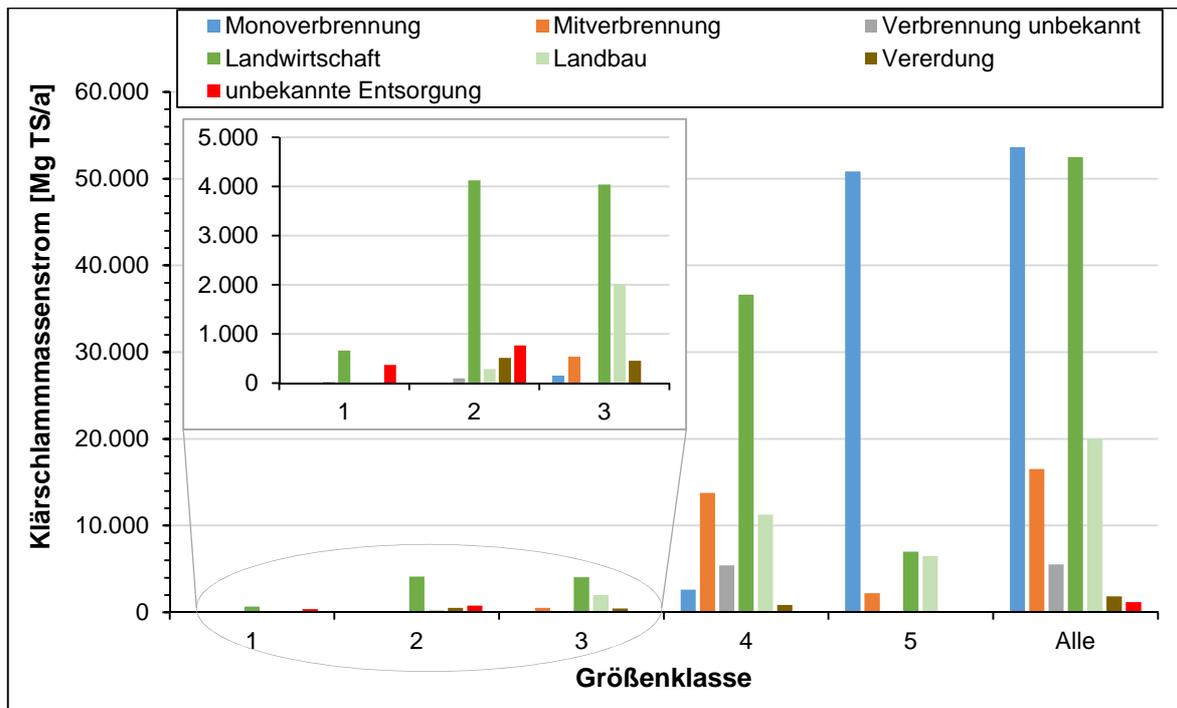


Bild 3.4: Entsorgungswege für Klärschlamm nach Größenklasse (Entsorgungswege von 2014 mit maßgeblichen Klärschlammmassenströmen aus Tabelle 3.4)

Wie aus der Grafik zu erkennen ist, stellt die landwirtschaftliche und landbauliche Verwertung von Klärschlamm aus den Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 4 den dominierenden Entsorgungsweg dar. Lediglich ein Anteil von kleiner 1 % der Klärschlämme aus Kläranlagen der GK 1 bis 3 wird einer Verbrennung zugeführt. Bei den Kläranlagen der GK 4 geht der Großteil von 63,1 % des verbrannten Klärschlammes in Mitverbrennungsanlagen. Anders sieht die Situation bei den zehn Kläranlagen der GK 5 in Hessen aus. Der Klärschlamm wird größtenteils monoverbrannt (Frankfurt, Wiesbaden und z. T. Darmstadt). Nennenswerte Anteile zur Mitverbrennung finden sich in Marburg und Kassel (jeweils ca. 18 % des TS, Rest in Landwirtschaft/Landbau) und Darmstadt (41 % des TS, Rest zur Monoverbrennung). Die weiteren Klärschlammengen zur landwirtschaftlichen und landbaulichen Verwertung kommen aus den Kläranlagen Fulda, Gießen und Hanau. Insgesamt werden 50,04 % der gesamten Klärschlammmenge einer Verbrennung angedient. Ein Anteil von 1,3 % der Klärschlammmenge konnte anhand der vorliegenden Daten keinem Entsorgungsweg zugeordnet werden.

Bild 3.5 zeigt die Trockensubstanzgehalte der zur Entsorgung anfallenden Klärschlämme. Die zur Verfügung gestellten Daten (vgl. Kapitel 3.2) wurden dahingehend ausgewertet, dass zunächst neuere TS-Gehalte aus den Jahren 2011 bis 2014 als Mittelwert für die Kläranlagen bestimmt wurden. Für einige Anlagen, für die keine Daten aus 2011 bis 2014 vorlagen, konnten TS-Gehalte aus 2004 bis 2010 herangezogen werden. Die Gewichtung von neueren zu älteren TS-Gehalten ist anhand der jeweiligen Anzahl der Kläranlagen im Diagramm abzulesen. Wie die Auswertung zeigte, sind die TS-Gehalte der Klärschlämme stark vom Entsorgungsweg

abhängig. So liegt der TS für die Entsorgungswege Verbrennung und Landschaftsbau im Median bei 25 bis 26 %. In der Landwirtschaft hingegen wird im Median der 321 Kläranlagen ein Klärschlamm mit einem TS von 9,3 % auf die Felder ausgebracht.

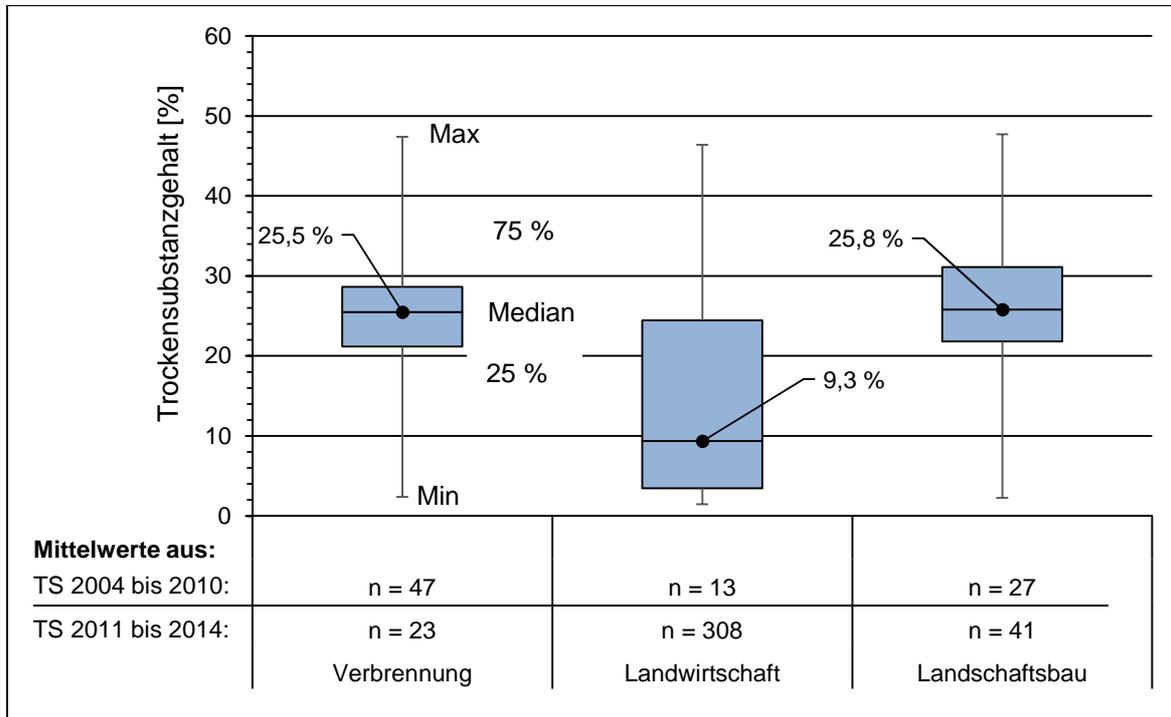


Bild 3.5: Trockensubstanzgehalte der Klärschlämme aus direkt entsorgenden Kläranlagen nach Entsorgungsweg und Anzahl der entsorgenden Kläranlagen (Doppelzählungen bei Teilentsorgung über mehrere Wege)

Die TS-Gehalte sind vor allem im Hinblick auf eine sich später ändernde Entsorgung des Klärschlammes wichtig (vgl. Kapitel 2.4 und 3.1). So ist davon auszugehen, dass die Zahl der Kläranlagen mit nicht oder teilweise entwässertem Klärschlamm bei steigendem Anteil an Klärschlamm zur Verbrennung zurückgeht. Der TS-Gehalt des Klärschlammes der direkt entsorgenden Kläranlagen wird aus Kostengründen bei einer vermehrten Entsorgung in der Verbrennung steigen. Dies wird in der Szenarien-Betrachtung in Kapitel 5 erneut aufgegriffen.

3.4.3 Maßgebliche Phosphor-Gehalte und -Frachten im Klärschlamm

Wie im Referentenentwurf der Novelle zur AbfKlärV zu lesen ist, sind für die Identifikation der relevanten Kläranlagen zur P-Rückgewinnung Messwerte im Klärschlamm bindend. Für die Auswertung im Rahmen des Gutachtens standen Messwerte von 2004 bis 2009 (für viele Kläranlagen) und 2012 bis 2014 (für landwirtschaftlich entsorgten Klärschlamm) zur Verfügung. Für die Identifikation der relevanten Kläranlagen wurden die einzelnen Messwerte verwendet, wobei eine einmalige Überschreitung der 20 g P/kg TM innerhalb dieses Zehnjahreszeitraumes für eine entsprechende Positiv-Berücksichtigung bei den Betrachtungen ausreichend war (vgl. Kapitel 2.1). Somit wurden auch Schlämme aus

Kläranlagen mit P-Gehalten, die im Jahres- oder Mehrjahres-Mittelwert unterhalb der 20 g P/kg TM liegen, als relevant für die P-Rückgewinnung identifiziert.

Die maßgebliche P-Fracht zur Bestimmung des im Klärschlamm enthaltenen Rückgewinnungspotentials wurde anhand der Messwerte zum P-Gehalt im Klärschlamm und des ermittelten maßgeblichen Klärschlammstroms je Kläranlage (vgl. Kapitel 3.4.1) berechnet.

Da in den Jahren 2012 bis 2014 nur die Daten für landwirtschaftlich verwertete Klärschlämme zur Verfügung standen und nicht für alle Kläranlagen Messwerte aus dem Klärschlamm für die Jahre 2004 bis 2009 vorlagen, wurde folgende Hierarchie bei der Bestimmung der maßgeblichen mittleren P-Gehalte der Klärschlämme gewählt:

1. Mittelwert der Messwerte zu P-Gehalten aus den Jahren 2012 bis 2014 ($P_{KS,2012-2014}$)
2. Mittelwert der Messwerte zu P-Gehalten aus den Jahren 2004 bis 2009 ($P_{KS,2004-2009}$)
3. Zulauf-/Ablauf-Frachtbetrachtung der Kläranlage und Bestimmung der sich daraus ergebenden rechnerischen P-Fracht im Klärschlamm für die Jahre 2012 bis 2014, wenn keine Daten vorlagen ($P_{KS,Frachtbetrachtung}$)

Das Ziel war hierbei eine möglichst hohe Aussagekraft aufgrund neuerer Daten zu erreichen. So ist bei den Messwerten aus den Jahren 2012 bis 2014 ein aktuellerer Stand der auf den Kläranlagen vorhandenen Technik widerspiegelt, als bei den Werten aus 2004 bis 2009. Die Frachtbetrachtung wurde zunächst mit dem Ziel der Datenplausibilisierung durchgeführt. Aufgrund äußerer Faktoren, wie Klärschlammannahmen von indirekt entsorgenden Kläranlagen und zudem aufgrund der allgemeinen Unsicherheit von Frachtbilanzierungen, konnten die Daten schlussendlich nur bedingt für diesen Zweck genutzt werden. Dennoch lieferte die Frachtbetrachtung wichtige Anhaltspunkte für weitere Untersuchungen. So konnten z. B. zwei möglicherweise relevante Kläranlagen identifiziert werden, für die keine P-Messwerte aus dem Klärschlamm vorlagen. Außerdem wurden Kläranlagen mit großen Abweichungen in Frachtbetrachtung und realen Messwerten identifiziert, die im Anschluss an dieses Gutachten einer genaueren Prüfung unterzogen werden sollten, um ihre Relevanz für die P-Rückgewinnung festzustellen. Beide Fälle sind in Kapitel 3.5 einzeln hervorgehoben.

3.4.4 Verfahrenstechnik zur Phosphorelimination auf den Kläranlagen

Insgesamt geben 296 der 712 Kläranlagen in Hessen an, eine Phosphorelimination zu betreiben. Wie Bild 3.6 zeigt handelt es sich dabei zumeist um größere Kläranlagen. Dies liegt in den Grenzwerten nach Abwasserverordnung für die GK 4 und 5 begründet. Dennoch haben ca. ein Drittel der Kläranlagen der GK 2 und die Hälfte der Kläranlagen der GK 3

Reinigungsstufen zur P-Elimination, die z. B. auf verschärfte Anforderungen an die Einleitung zurück zu führen sein könnten. Durch die in Kapitel 2.5 beschriebenen geplanten Maßnahmen zur weitreichenden P-Elimination zur Erreichung der Ziele der WRRL werden in den nächsten Jahren weitere Kläranlagen der GK 2 bis 4 mit P-Eliminationsstufen ausgestattet werden, bzw. bestehende Anlagen werden ertüchtigt.

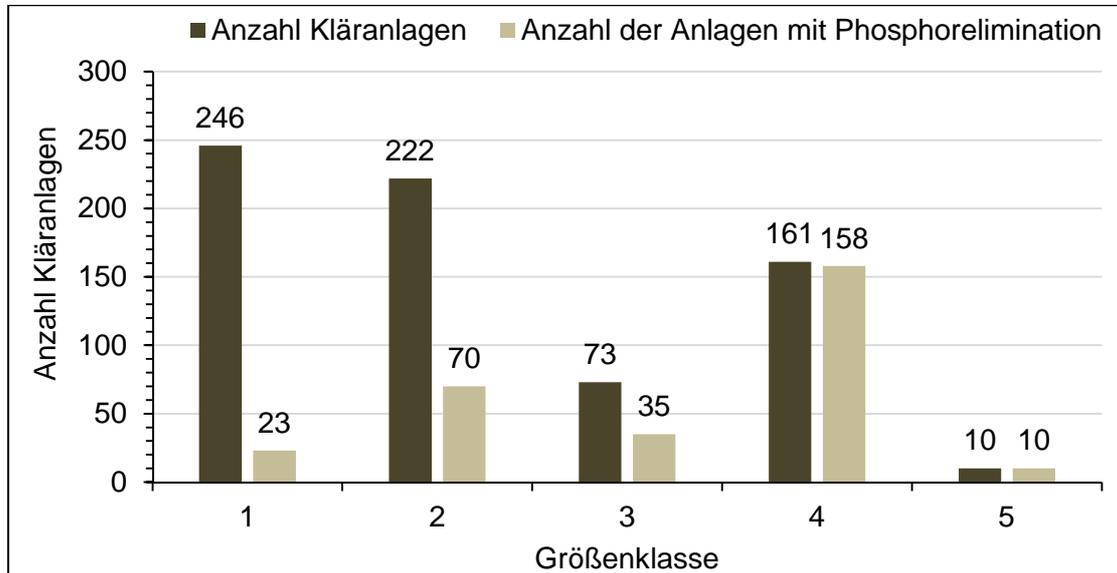


Bild 3.6: Anzahl der Kläranlagen mit Phosphorelimination nach Größenklasse

In Bild 3.7 ist die Ausbaugröße der Kläranlagen mit P-Elimination nach Größenklasse dargestellt. Es zeigt sich, dass insgesamt 91,6 % der ausgebauten Kläranlagenkapazität in Hessen über eine Stufe zur Phosphorelimination verfügt.

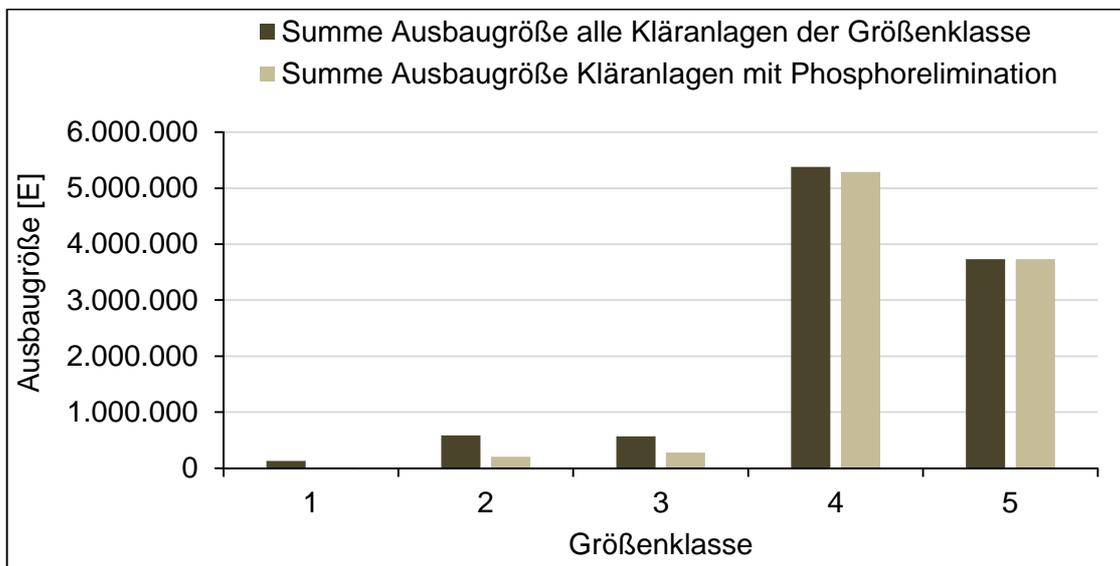


Bild 3.7: Ausbaugröße der Kläranlagen mit Phosphorelimination nach Größenklasse

Neben der Erkenntnis, ob eine P-Eliminationsstufe vorhanden ist und wieviel diese eliminiert (bzw. wieviel P im Klärschlamm enthalten ist, vgl. Kapitel 3.4.3), ist für die Wahl eines geeigneten P-Rückgewinnungsverfahrens auch die Art der P-Elimination, bzw. das

verwendete Fällmittel ausschlaggebend. Welche Faktoren die Wahl des Rückgewinnungsverfahrens beeinflussen können wird in Kapitel 4.4 beschrieben. Hier werden zunächst die vorhandenen Daten dargestellt. Wie Bild 3.8 zeigt, sind die Anteile der Kläranlagen mit rein biologischer P-Elimination nach den auswertbaren Daten sowohl als absolute Anzahl der Kläranlagen, als auch als Summe der vorhandenen Ausbaugröße äußerst gering. Ob Eisen oder Aluminium als Fällmittel verwendet werden, konnte aus den gegebenen Daten häufig nicht zweifelsfrei ermittelt werden. Da viele Kläranlagen beides verwenden (z. B. im Sommer Eisen und im Winter Aluminium zur Bekämpfung von Fadenbildnern), werden bei der Datenerhebung aktuell nur die verwendeten Fällmittelmengen an Eisen und/oder Aluminium ohne die Art des Fällmittels abgefragt. Aus einer Umfrage von (HÖHNE, 2014) konnten die Daten der Kläranlagen teilweise zugeordnet werden.

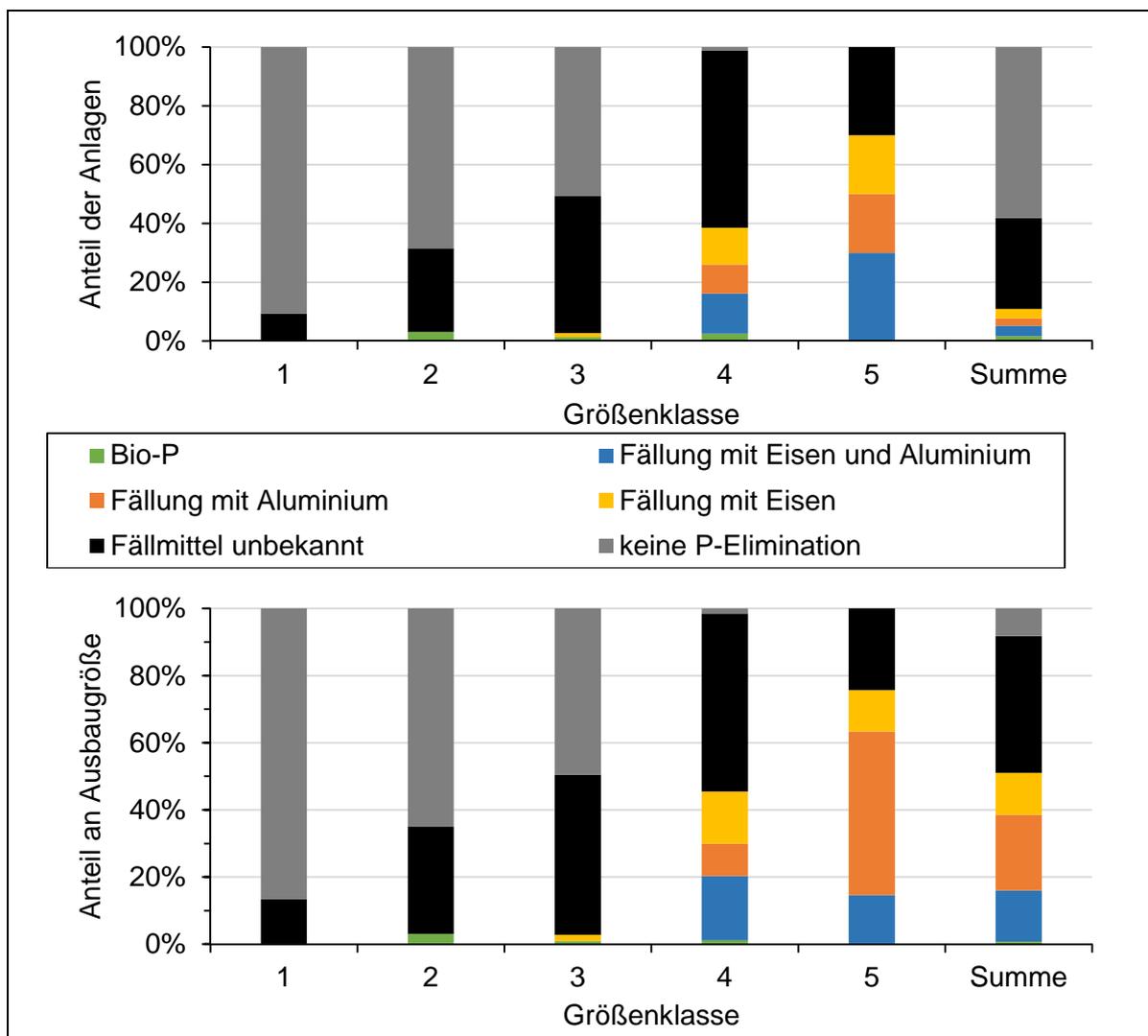


Bild 3.8: P-Elimination nach Anzahl der Kläranlagen (oben) und nach Ausbaugröße (unten) für die GK 1 bis 5

Es bleibt aber dennoch ein großer Anteil an Kläranlagen (30,9 % aller Kläranlagen mit 40,8 % der Ausbaugröße), für den keine Angabe zur Art des Fällmittels vorliegt. Hier könnten zur

genauen Abklärung der technischen Möglichkeiten auf den Kläranlagen Daten erhoben werden. Außerdem könnte eine Informationskampagne die Kläranlagenbetreiber über die technischen Auswirkungen bei der P-Rückgewinnung aufgrund der vorliegenden P-Elimination aufklären.

3.5 Identifikation der für die Phosphorrückgewinnung in Hessen relevanten Kläranlagen

Aus Bild 3.9 können die Standorte der 182 für die P-Rückgewinnung relevanten Kläranlagen, sowie die Anlagen, welche eventuell aufgrund der Frachtbetrachtung relevant sein könnten, entnommen werden.

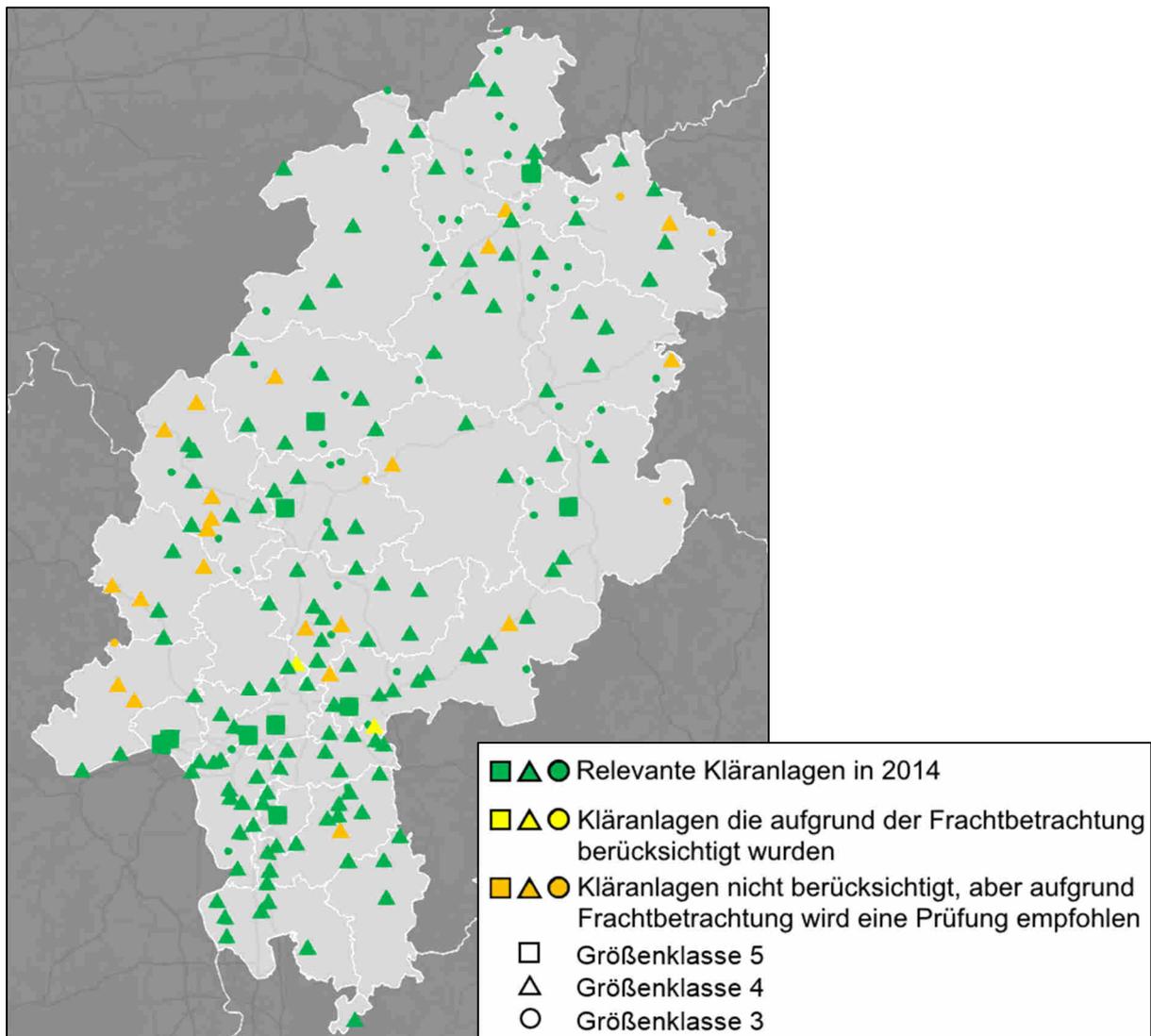


Bild 3.9: Nach Kriterien Novelle AbfKlärV relevante direkt entsorgende Kläranlagen der GK 3 bis 5 (Stand 2014)

Für die zwei gelb dargestellten Kläranlagen lagen keine Messwerte von P-Gehalten im Klärschlamm aus den Jahren 2004 bis 2014 vor. Aufgrund der durch die Zulauf-/Ablauf-Frachtbetrachtung berechneten theoretischen P-Konzentrationen im Klärschlamm, könnten

diese aber oberhalb von 20 g P/kg TM liegen und wurden deshalb in der Konzepterstellung berücksichtigt. Zusammen fallen auf beiden Kläranlagen 810 Mg TS/a an, für die 43 Mg P/a an Phosphor im Klärschlamm prognostiziert wurden. In Tabelle 3.5 und Tabelle 3.6 wurden die beiden Kläranlagen aufgrund der Unsicherheit der Auswahlmethode nicht aufgenommen.

Außerdem wurden 26 Kläranlagen identifiziert, für die Messwerte vorlagen, die unterhalb der 20 g P/kg TM lagen, für die aus der Frachtbetrachtung aber eine höhere Konzentration ermittelt wurde. Die Frachtbetrachtung kann nur als zusätzliches Hilfsmittel zur Voridentifikation von Kläranlagen dienen, eine wirkliche Prüfung mit Messungen im Klärschlamm kann diese aber nicht ersetzen. Somit wurden die 26 Kläranlagen, bei denen Widersprüche auftraten, zur späteren Abklärung des P-Gehaltes hervorgehoben, sie werden aber im Konzept selbst nicht berücksichtigt, um die Phosphor-Rückgewinnungsmenge nicht zu überschätzen.

Die Verteilung der Kläranlagen mit gemessenen P-Gehalten größer 20 g P/kg TM auf die einzelnen Landkreise und kreisfreien Städte ist in Tabelle 3.5 dargestellt. Der Vollständigkeit halber wurden in Tabelle 3.5 auch die Kläranlagen der GK 1 bis 2 mit P-Gehalten größer 20 g P/kg TM aufgeführt. Nachfolgend werden diese aber aufgrund der in Kapitel 3.1 erläuterten Fokussierung auf die GK 3 bis 5 nicht mehr weiter betrachtet. Auf den für die P-Rückgewinnung relevanten Kläranlagen der GK 3 bis 5 fallen insgesamt 81,8 % der Klärschlammmenge in Hessen an. Es ist aus der Tabelle zu entnehmen, dass die 10 Kläranlagen der GK 5 mit 66.546 Mg TS/a 22,7 % mehr Klärschlamm anfallen aufweisen, als die 126 relevanten Kläranlagen der GK 4 (54.226 Mg TS/a). Dies hat beträchtliche Auswirkungen auf eine spätere Konzepterstellung. Bei einer potentiellen P-Rückgewinnung auf den Kläranlagen (vgl. Szenario 1 Kapitel 5.1) könnte allein durch die Einbeziehung der Kläranlagen der GK 5 mehr als 52 % der betroffenen Klärschlämme einer P-Entfrachtung zugeführt werden. Sollten gleichzeitig weitere Klärschlämme anderer Kläranlagen zur Rückgewinnung auf diese 10 Kläranlagen geliefert werden, steigert sich die rückgewinnbare P-Fracht pro Rückgewinnungsanlage dementsprechend.

Tabelle 3.5: Summe der Klärschlammströme der direkt entsorgenden Kläranlagen mit relevanten P-Gehalten im Klärschlamm und deren Anzahl (in Klammern) nach Größenklasse (Kreisebene)

Landkreis/Kreisfreie Stadt	Klärschlammstrom [Mg TS/a] (Anzahl Kläranlagen)				
	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Kreis Bergstraße				3.409 (7)	
Stadt Darmstadt				403 (1)	2.620 (1)
Kreis Darmstadt-Dieburg		119 (2)	118 (1)	5.275 (13)	
Stadt Frankfurt				103 (1)	39.926 (2)
Kreis Fulda		88 (4)	430 (4)	1.173 (3)	2.218 (1)
Kreis Gießen	15 (1)	118 (2)	281 (3)	2.554 (5)	3.174 (1)
Kreis Groß-Gerau			183 (1)	4.325 (8)	
Kreis Hersfeld-Rotenburg	10 (1)	87 (2)	237 (2)	1.676 (4)	
Kreis Hochtaunus				2.613 (4)	
Kreis Kassel		167 (6)	1.381 (12)	950 (4)	
Kreis Lahn-Dill		75 (1)	363 (3)	2.490 (6)	
Kreis Limburg-Weilburg		96 (3)		1.075 (2)	
Kreis Main-Kinzig	26 (2)		255 (2)	3.949 (9)	2.791 (1)
Kreis Main-Taunus		82 (1)	52 (1)	2.671 (4)	
Kreis Marburg-Biedenkopf	48 (4)	459 (9)	530 (4)	2.480 (5)	1.879 (1)
Kreis Odenwald	7 (1)	76 (3)		1.654 (4)	
Kreis Offenbach			333 (2)	4.223 (9)	
Kreis Rheingau-Taunus	6 (1)	36 (2)		2.103 (4)	
Kreis Schwalm-Eder	13 (2)	137 (3)	296 (5)	2.031 (7)	
Stadt Kassel					4.581 (1)
Kreis Vogelsberg	16 (3)	141 (5)		866 (4)	
Kreis Waldeck-Frankenberg	34 (4)	660 (18)	386 (4)	1.961 (7)	
Kreis Werra-Meißner	3 (1)	47 (2)		1.348 (5)	
Kreis Wetterau		236 (4)	195 (2)	4.894 (10)	
Stadt Wiesbaden					9.357 (2)
Summe	178 (20)	2.621 (67)	5.039 (46)	54.226 (126)	66.546 (10)

In Bild 3.10 werden die für eine P-Rückgewinnung relevanten Klärschlammströme mit den insgesamt in Hessen anfallenden Klärschlammströmen (vgl. Bild 3.3) verglichen. Insgesamt müssen 83 % der hessischen Klärschlämme einer P-Rückgewinnung zugeführt werden.

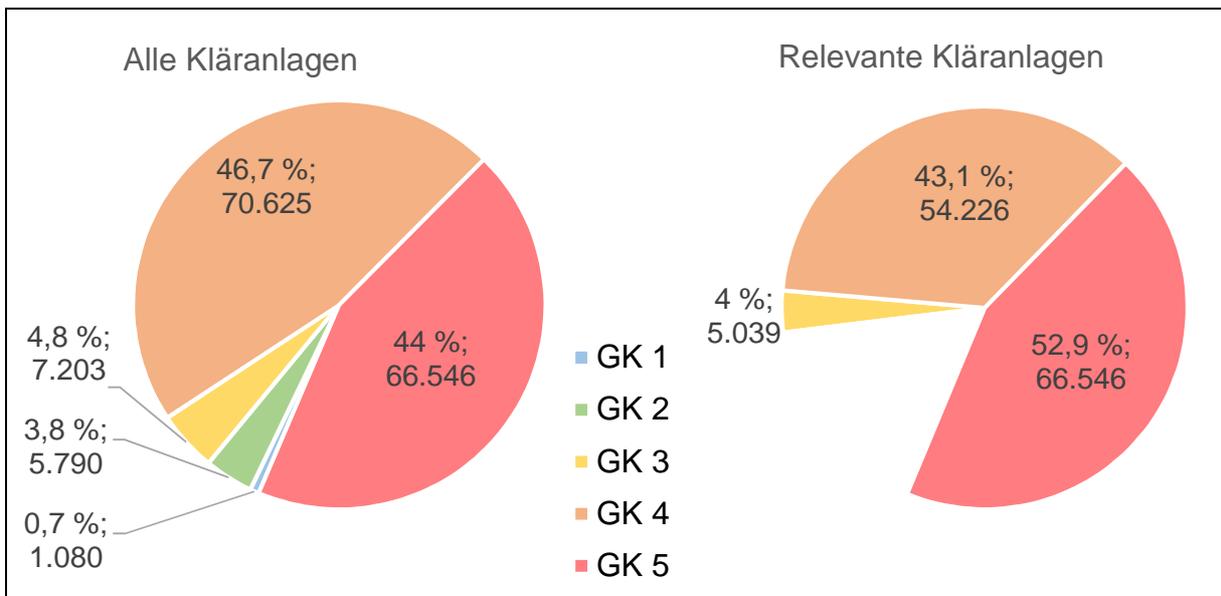


Bild 3.10: Für die Phosphorrückgewinnung relevante Klärschlamm-massenströme [Mg TS/a] im Vergleich zum Klärschlamm-anfall insgesamt nach GK (in Hessen)

Die zehn Kläranlagen der GK 5 fallen alle unter die Vorgabe zur P-Rückgewinnung. In der GK 4 müssten 126 (+2) der 157 Kläranlagen Maßnahmen ergreifen. Für GK 3 sind es 43 von 58 Anlagen.

3.5.1 Phosphor-Massenströme im Klärschlamm der relevanten Kläranlagen

In erster Linie ist der im Klärschlamm enthaltene P-Massenstrom (Tabelle 3.6) für die Konzepterstellung interessant, da davon auszugehen ist, dass durch den Vertrieb des Phosphors ein Anteil der anfallenden Kosten gedeckt werden kann. Grundsätzlich ist die Ermittlung des P-Massenstromes für die Identifikation der Kläranlagen nach dem Referentenentwurf der Novelle zur AbfKlärV aber nicht von Bedeutung, da hier ausschließlich die P-Konzentration im Klärschlamm im Vordergrund steht. Somit können auch Kläranlagen mit hohen P-Frachten im Klärschlamm von der P-Rückgewinnung ausgenommen werden, sollte der Gehalt an Phosphor im Klärschlamm bei diesen Kläranlagen unterhalb von 20 g P/kg TM liegen. Das dennoch hohe Potential zur Wertstoffrückgewinnung aus diesen Kläranlagen wird in Kapitel 3.6 näher beleuchtet.

Wie Tabelle 3.6 zeigt, fallen insgesamt fast 3.363 Mg P/a in den 182 relevanten Kläranlagen an. Die Einzelwerte je Kläranlage können Tabelle D.1 entnommen werden. Fast die Hälfte der fast 3.363 Mg P/a stammt aus Kläranlagen der Größenklasse 5. Hinzu kommen noch die zwei Kläranlagen, die über die Frachtbetrachtung identifiziert wurden, so dass sich insgesamt ein Rückgewinnungspotential von 3.403 Mg P/a bei einer Klärschlamm-menge von 126.619 Mg TS/a ergibt (siehe hierzu auch Tabelle 3.11).

Tabelle 3.6: Phosphor-Massenstrom (und Anzahl) der relevanten Kläranlagen der GK 3 bis 5 für 2012 bis 2014 (Kreisebene)

Landkreis/Kreisfreie Stadt	Phosphormassenstrom [Mg P/a] (Anzahl Kläranlagen)		
	GK 3	GK 4	GK 5
Kreis Bergstraße		102 (7)	
Stadt Darmstadt		15 (1)	92 (1)
Kreis Darmstadt-Dieburg	3 (1)	139 (13)	
Stadt Frankfurt		3 (1)	796 (2)
Kreis Fulda	7 (4)	28 (3)	64 (1)
Kreis Gießen	7 (3)	70 (5)	168 (1)
Kreis Groß-Gerau	4 (1)	137 (8)	
Kreis Hersfeld-Rotenburg	4 (2)	50 (4)	
Kreis Hochtaunus		85 (4)	
Kreis Kassel			165 (1)
Kreis Lahn-Dill	8 (3)	62 (6)	
Kreis Limburg-Weilburg		23 (2)	
Kreis Main-Kinzig	8 (2)	104 (9)	92 (1)
Kreis Main-Taunus	2 (1)	76 (4)	
Kreis Marburg-Biedenkopf	12 (4)	58 (5)	65 (1)
Kreis Odenwald		47 (4)	
Kreis Offenbach	9 (2)	160 (9)	
Kreis Rheingau-Taunus		66 (4)	
Kreis Schwalm-Eder	7 (5)	58 (7)	
Stadt Kassel	38 (12)	28 (4)	
Kreis Vogelsberg		23 (4)	
Kreis Waldeck-Frankenberg	8 (4)	68 (7)	
Kreis Werra-Meißner		35 (5)	
Kreis Wetterau	6 (2)	163 (10)	
Stadt Wiesbaden			198 (2)
Summe	122 (46)	1.602 (126)	1.639 (10)

Weitere Potentiale für die P-Rückgewinnung über die aktuell diskutierten zukünftigen gesetzlichen Vorgaben hinaus werden in Kapitel 3.6 beschrieben.

3.5.2 Entsorgungswege für den Klärschlamm der relevanten Kläranlagen

Die in Bild 3.4 dargestellten Entsorgungswege für Klärschlämme in Hessen beziehen sich auf alle Klärschlämme im Bundesland Hessen. Die Klärschlämme der für die P-Rückgewinnung identifizierten Kläranlagen machen davon einen Anteil von ca. 84 % aus, wie Bild 3.11 zeigt.

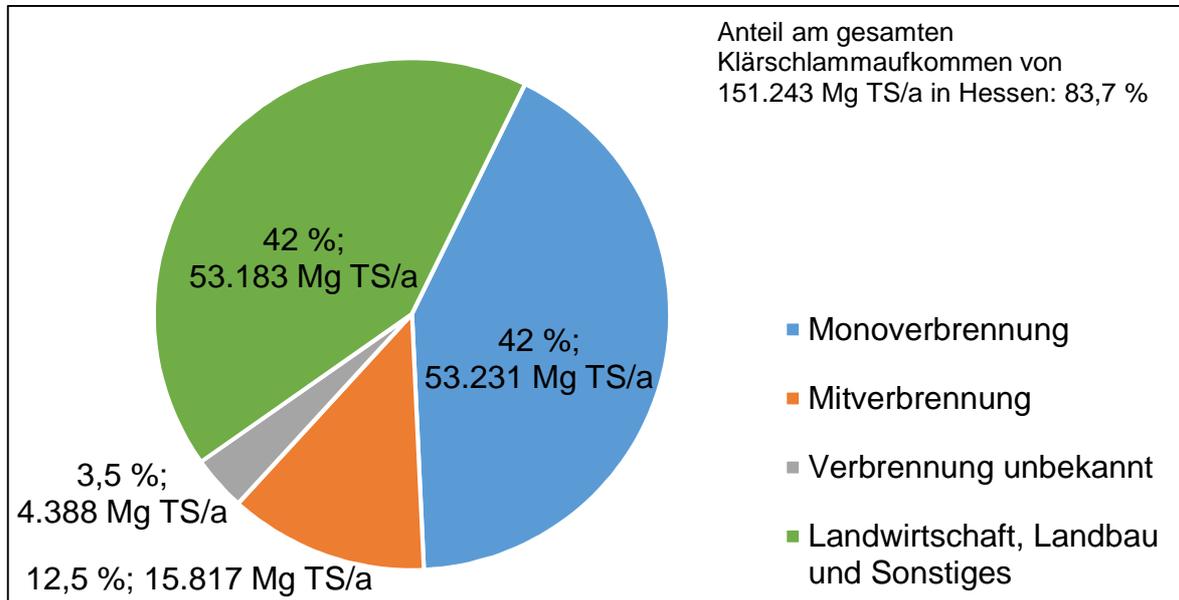


Bild 3.11: Entsorgungswege der für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen in 2014

Von diesen werden 58 % einer Verbrennung zugeführt und mindestens 42 % laut den Erhebungen gesichert monoverbrannt. Der Anteil der Verwertung in Landwirtschaft, Landbau und Sonstigem liegt ebenfalls bei 42 %. Auf die GK 4 und 5 entfallen davon 48.736 Mg TS/a, die gemäß Novelle der AbfKlärV ab 2025 keiner landwirtschaftlichen oder landbaulichen Verwertung mehr zugeführt werden dürfen.

3.6 Sensitivitätsanalyse zur Identifikation weiterer Rückgewinnungspotentiale von Phosphor aus Klärschlamm

Der aktuell vorgesehene Grenzwert von 20 g P/kg TM schließt in Hessen 29 direkt entsorgende Kläranlagen der GK 4 und 17 der GK 3 von der P-Rückgewinnung aus. Möglicherweise sind in diesen Kläranlagen dennoch nennenswerte Potentiale zur P-Rückgewinnung vorhanden. Dies wird nachfolgend anhand zweier Fälle untersucht. Die Kläranlagen wiesen im betrachteten Zeitraum keine Grenzwertüberschreitung des P-Gehaltes im Klärschlamm auf, aber:

- der P-Gehalt liegt bei 80 % des Grenzwertes, also oberhalb von 16 g P/kg TM (**Fall 1**).
- die P-Fracht der Kläranlage liegt aufgrund eines großen Klärschlammstromes trotz niedriger P-Konzentration oberhalb der P-Fracht von positiv nach Novelle der AbfKlärV für die P-Rückgewinnung identifizierten Kläranlagen (**Fall 2**).

Die identifizierten Kläranlagen sind in Bild 3.12 kartographisch dargestellt.

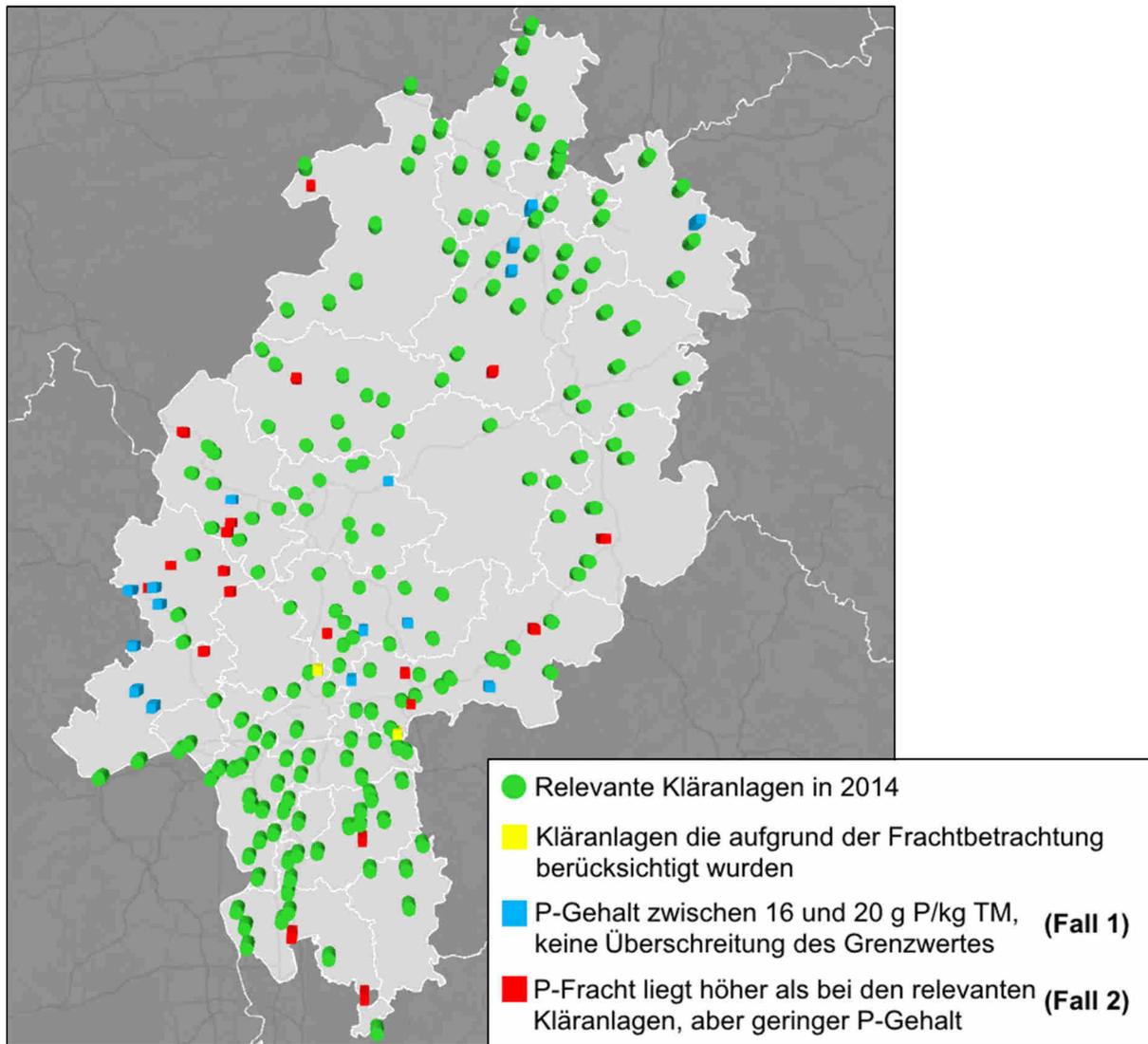


Bild 3.12: Sensitivitätsanalyse der Kläranlagen GK 3 bis 5, die zum jetzigen Zeitpunkt P-Gehalte im Klärschlamm von 16 bis kleiner 20 g P/kg TM aufweisen bzw. relativ hohe P-Frachten im Klärschlamm aufweisen

Insgesamt ist das in Tabelle 3.7 genannte Rückgewinnungspotential gegeben. Die betreffenden Kläranlagen sind in Anhang A aufgelistet.

Tabelle 3.7: Fallbetrachtung zur Sensitivitätsanalyse für die Jahre 2012 bis 2014

Sensitivität	Anzahl Kläranlagen	Summe Ausbaugröße [E]	Mittelwert P-Gehalt 2012-2014 [g P/kg TM]	Summe P-Fracht 2012-2014 [Mg P/a]
Fall 1	15	392.490	17,3	139,8
Fall 2	17	362.400	12,1	94

3.7 Prognose der möglicherweise relevanten Kläranlagen ab dem Jahr 2025

In den Kapiteln 2.4 und 2.5 sind Änderungen und Entwicklungen in der bundesdeutschen und europäischen Gesetzgebung beschrieben, die sich unabhängig von der Novelle der Klärschlammverordnung auf die Entsorgungssituation von Klärschlämmen in der Bundesrepublik und auf die im Klärschlamm enthaltenen Phosphormengen auswirken werden. Diese Auswirkungen können qualitativ benannt werden und lassen sich unter gewissen Einschränkungen auch quantitativ darstellen. Als weiterer Faktor wird die prognostizierte regionale Bevölkerungsentwicklung in den Landkreisen und Städten in Hessen (Kapitel 3.7.3) aufgrund ihrer zu erwartenden Auswirkungen auf die Abwasserwirtschaft in Hessen angesprochen. Diese Kläranlagen werden in den nachfolgenden Kapiteln identifiziert. Aufgrund der Unsicherheiten in den Prognosen und der klaren Ausrichtung der Novelle der AbfKlärV auf gesicherte Messwerte, werden diese aber nicht in die Szenarienbetrachtung in Kapitel 5 integriert.

3.7.1 Auswirkung des Maßnahmenprogramms zur Wasserrahmenrichtlinie

Die in Kapitel 2.5 beschriebenen Maßnahmen im zweiten Bewirtschaftungszyklus zur Umsetzung der WRRL haben direkte Auswirkungen auf die im Klärschlamm enthaltenen Phosphormengen. Hauptsächlich wird die P-Fällung auf den Kläranlagen ausgebaut. Die Klärschlammmenge und die darin enthaltene Phosphormenge steigen somit auf mehr als 300 Kläranlagen. Die zusätzlichen P-Mengen im Klärschlamm wurden ähnlich wie bei der in Kapitel 3.3.3 vorgestellten und in Kapitel 3.4.3 durchgeführten Zulauf-/Ablauf-Frachtbetrachtung ermittelt. Abweichend davon wurde hier lediglich die minimal zu erwartende zusätzliche P-Fracht im Klärschlamm berechnet. Dies erfolgte durch die Differenzbildung der mittleren P-Fracht im Ablauf der jeweiligen Kläranlage von 2012 bis 2014 und des einzuhaltenden Grenzwertes im Ablauf nach Umsetzung der Maßnahmen. Auf die Annahme fiktiver niedrigerer Überwachungswerte wurde verzichtet, um die zu erwartende zusätzliche P-Fracht im Klärschlamm nicht zu überschätzen. Die Erhöhung des Klärschlammmanfalls durch Fällung anderer gelöster Abwasserinhaltsstoffe wurde als marginal im Vergleich zur gesamten Klärschlammmenge eingestuft und nicht berücksichtigt. Die Berechnung der prognostizierten P-Konzentration im Klärschlamm nach Umsetzung der Maßnahme erfolgte gemäß der nachfolgenden Formel.

$$P_{KS, \text{Prognose}} = P_{KS, \text{aktuell}} + \frac{M_{P, \text{zusätzlich}}}{M_{KS, \text{aktuell}} + M_{P, \text{zusätzlich}}/1000} \left[\frac{\text{g P}}{\text{kg TM}} \right]$$

$P_{KS, \text{Prognose}}$	Prognostizierte P-Konzentration im Klärschlamm bei Umsetzung der Maßnahmen aus der WRRL	[g P/kg TM]
$P_{KS, \text{aktuell}}$	Für 2012 bis 2014 ermittelter maßgeblicher P-Gehalt im Klärschlamm (nach Hierarchie Kapitel 3.3.3)	[g P/kg TM]
$M_{P, \text{zusätzlich}}$	Zusätzliche P-Fracht aus der Differenz der mittleren P-Fracht im Ablauf der Kläranlagen von 2012 bis 2014 und des einzuhaltenden Grenzwertes im Ablauf der Kläranlage nach Umsetzung der Maßnahmen	[g P/a]
$M_{KS, \text{aktuell}}$	Aktueller maßgeblicher Klärschlammmassenstrom für 2012 bis 2014 (Ausnahme: Berücksichtigung der geplanten Schlammfäulung in Frankfurt am Main)	[kg TM/a]

Die Phosphorfrachten im Klärschlamm für alle Kläranlagen in Hessen werden sich nach den angestellten Berechnungen bis 2025 voraussichtlich um 213,9 auf 3.970 Mg P/a erhöhen. Dies entspricht einer Steigerung um 5,7 %. Für die relevanten Kläranlagen nach AbfKlärV aus 2014 fällt die Steigerung mit 5,1 % (172,2 Mg P/a) niedriger aus, was auf bereits größtenteils vorhandene Reinigungsstufen zur P-Elimination zurückzuführen ist.

Aufgrund der erwarteten Erhöhung des P-Gehaltes im Klärschlamm konnten vier zusätzliche Kläranlagen positiv für die P-Rückgewinnung identifiziert werden, die in Tabelle 3.8 genannt sind. Diese werden in 2025 voraussichtlich den Wert 20 g P/kg TM überschreiten.

Tabelle 3.8: Aufgrund prognostizierter zusätzlicher P-Fracht im Klärschlamm in 2025 positiv identifizierte Kläranlagen

Anlagenname	GK	P-Gehalt 2014 [g P/kg TM]	prognostizierter P-Gehalt 2025 [g P/kg TM]	prognostizierte P-Fracht 2025 [Mg P/a]
Glauburg / Stockheim	3	19,7	21,5	4,91
Gudensberg / Maden	4	18,3	23,5	9,10
Grünberg / Lumda	3	16,1	22,8	0,99
Eschenburg / Eibelshausen	4	13,6	33,2	1,94

Die identifizierten Kläranlagen sind in Bild 3.13 kartografisch dargestellt.

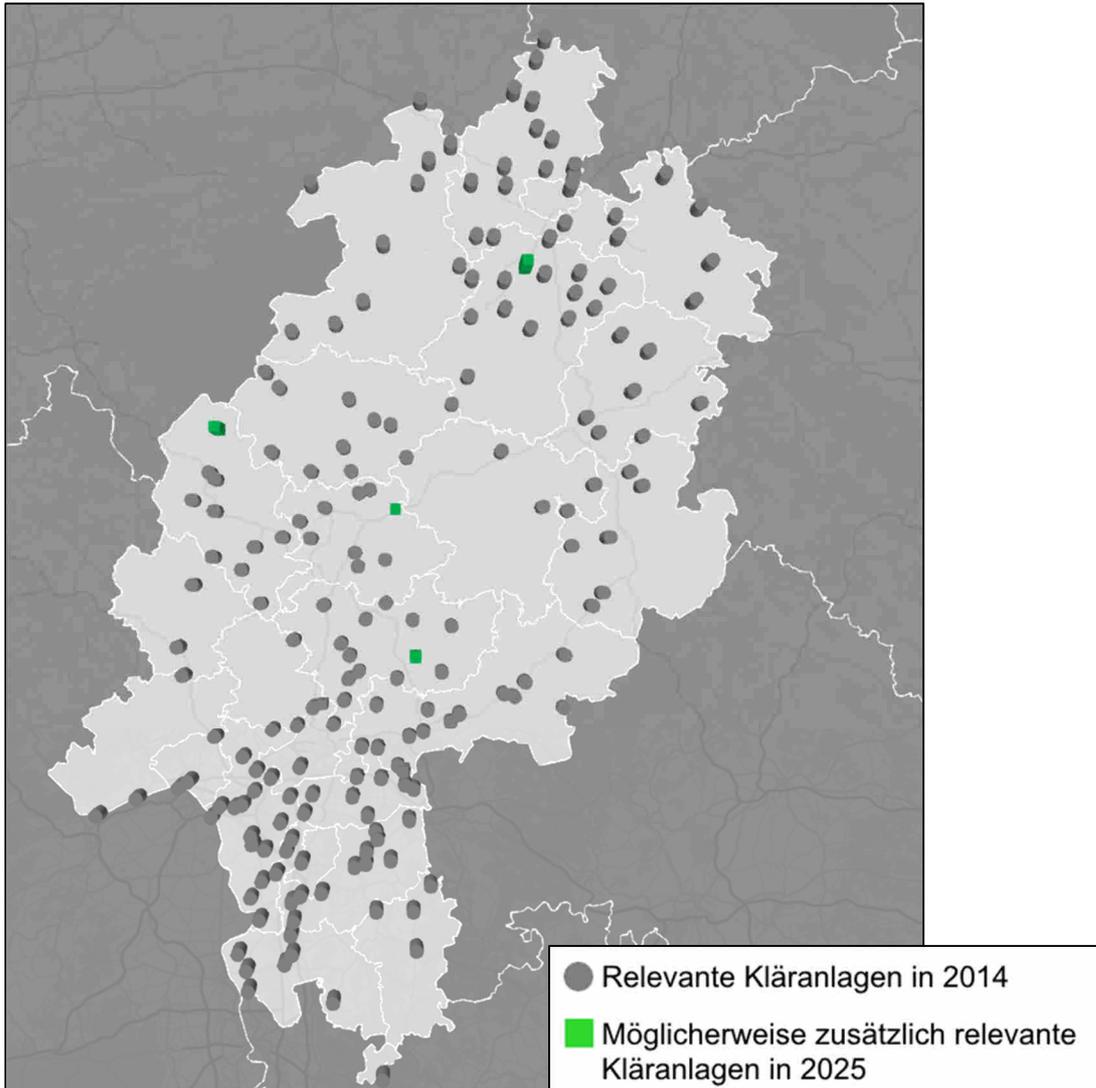


Bild 3.13: Nach AbfKlärV relevante direkt entsorgende Kläranlagen der GK 3 bis 5 bei Berücksichtigung des Maßnahmenprogramms WRRL 2015 bis 2021 (Prognose für das Jahr 2025)

3.7.2 Sensitivitätsanalyse 2025

Analog zu der aktuellen Situation (vgl. Kapitel 3.6) wurde auch für 2025 eine Sensitivitätsanalyse auf Basis der Daten aus Kapitel 3.7.1 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 3.14 dargestellt. Die bereits in 2014 als relevant für die P-Rückgewinnung identifizierten Kläranlagen (vgl. Bild 3.9, Bild 3.12) sind grau dargestellt. Insgesamt wäre zusätzlich das in Tabelle 3.9 genannte theoretische Rückgewinnungspotential gegeben. Die betreffenden Kläranlagen sind in Anhang A aufgelistet.

Tabelle 3.9: Fallbetrachtung zur Sensitivitätsanalyse für das Jahr 2025

Sensitivität	Anzahl Kläranlagen	Summe Ausbaugröße [E]	Mittelwert P-Gehalt 2012-2014 [g P/kg TM]	Summe P-Fracht 2012-2014 [Mg P/a]
Fall 1	15	400.300	17,5	145
Fall 2	15	329.400	13,1	93

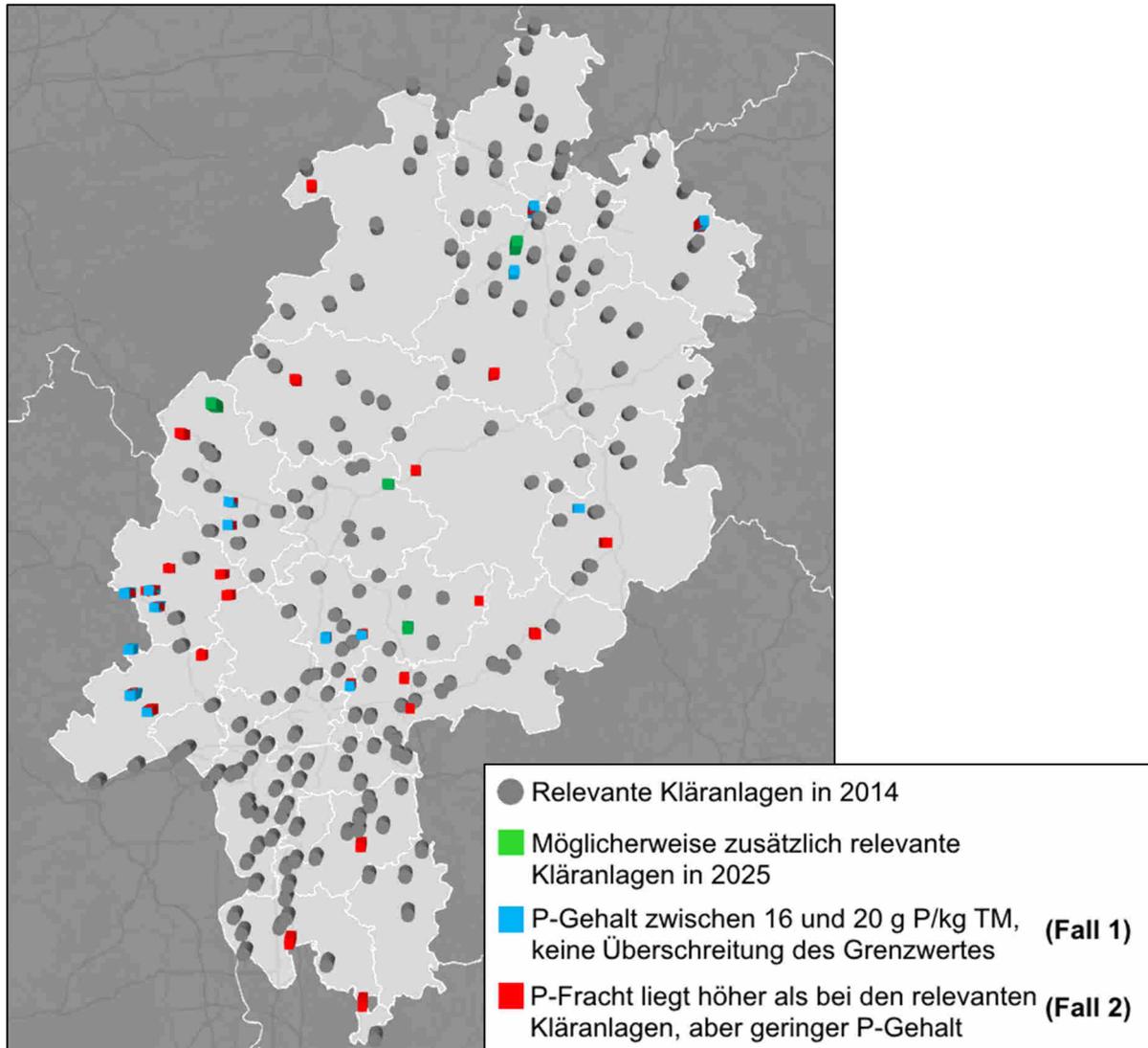


Bild 3.14: Kläranlagen der GK 3 bis 5 die zukünftig (2025) relevant sein könnten, P-Gehalte im Klärschlamm von 16 bis kleiner 20 g P/kg TM aufweisen oder P-Frachten im Klärschlamm vorliegen haben werden, die größer als die der nach AbfKlärV relevanten Kläranlagen sind

3.7.3 Regionale Bevölkerungsentwicklung in Hessen

Auf Basis der aktuellen Bevölkerungsprognosen des Hessischen Statistischen Landesamtes wurde qualitativ untersucht, in welchen hessischen Landkreisen aufgrund sich ändernder Bevölkerungszahlen ab 2030 voraussichtlich weniger oder mehr Klärschlamm anfallen wird. Eine direkte Übertragung der Bevölkerungsprognose auf die voraussichtliche

Klärschlammmenge ist aufgrund des nicht abschätzbaren gewerblichen Anteils am Abwasserstrom und somit am Klärschlammaufkommen zu stark fehlerbehaftet und wird hier nicht untersucht. Es kann aus Bild 3.15 und Bild 3.16 abgelesen werden, dass das bevölkerungsreiche Ballungszentrum im Süden Hessens wachsen wird. Für Frankfurt am Main wird ein Bevölkerungswachstum von 17 % bis 2030 angegeben.

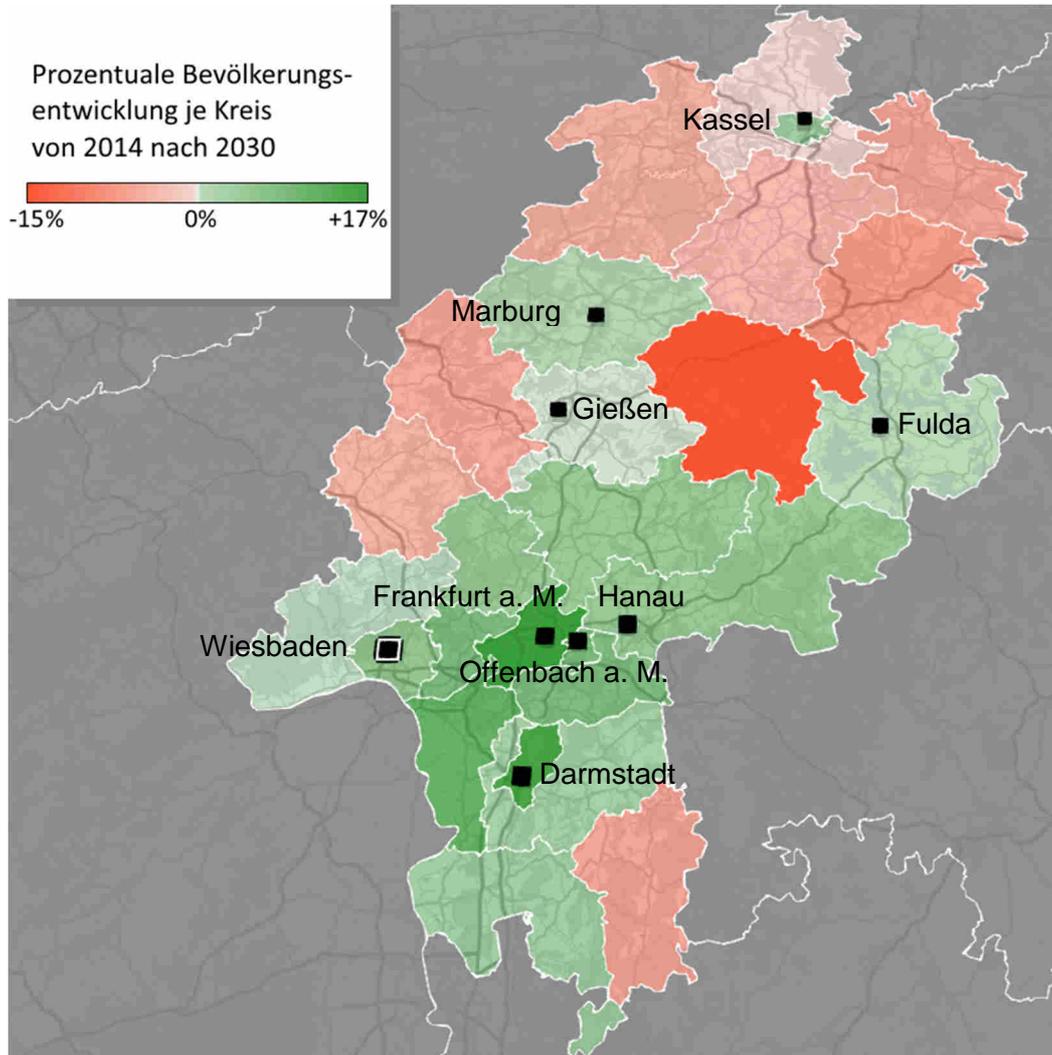


Bild 3.15: Kartografische Darstellung der Bevölkerungsprognose für das Land Hessen bis 2030 (Kreisebene) (HSL, 2016)

Gleichzeitig verlieren die flächenmäßig großen, aber bevölkerungsärmeren Landkreise im Norden und in der Mitte Hessens Einwohner. Innerhalb des Bundeslandes kann somit ein klarer Trend zur Verstädterung abgelesen werden. Der Abwasseranfall wird somit ebenfalls mit der Zeit auf weniger Kläranlagen konzentriert, was die Rückgewinnung aus nassem Klärschlamm aufgrund der höheren Massenströme lukrativer machen könnte. Mögliche zentrale Rückgewinnungsanlagen in heutigen Ballungszentren wie Frankfurt am Main im Süden und Kassel im Norden Hessens werden auch im Jahr 2030 sinnvolle Standorte darstellen.

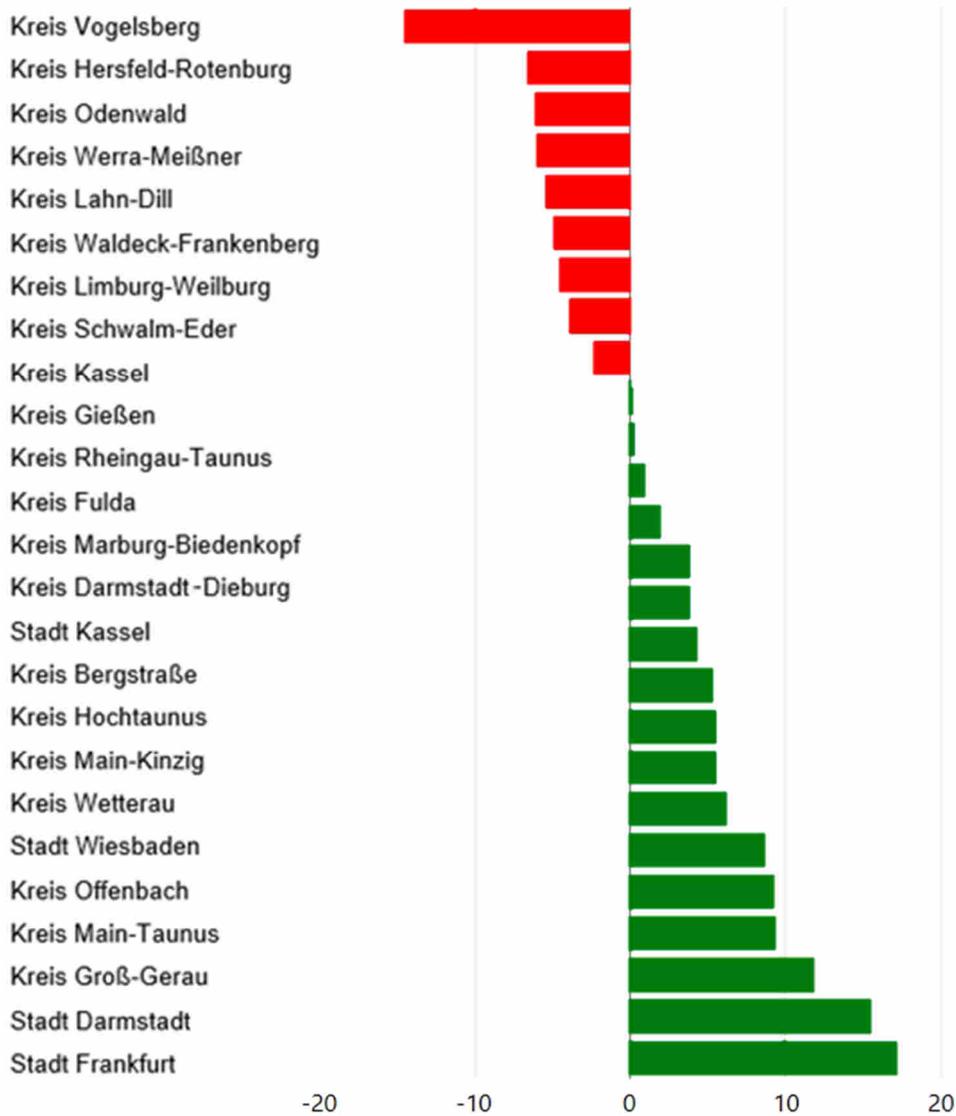


Bild 3.16: Bevölkerungsprognose durch das HSL bis 2030 – Änderung der Bevölkerungszahlen auf Kreisebene in % (HSL, 2016)

3.8 Weitere Stoffströme (Aschen aus Biomasseverbrennung)

In Hessen gibt es 44 Biomasseverbrennungsanlagen mit einem Durchsatz von 890.510 Mg/a. Im Rahmen einer Umfrage haben 20 Betreiber dieser Anlagen mit einem gesamten Brennstoffinput von 634.000 Mg/a Angaben zu der Aufteilung ihrer Inputmassenströme gemacht. Somit wurden 71 % der Gesamtbrennstoffmenge in Bild 3.17 berücksichtigt. Mindestens 80 % des Brennstoffinputs besteht aus Holz. Der Holzanteil bei den Gartenabfällen und dem Grünschnitt kann nicht angegeben werden. (TIEMANN, 2015)

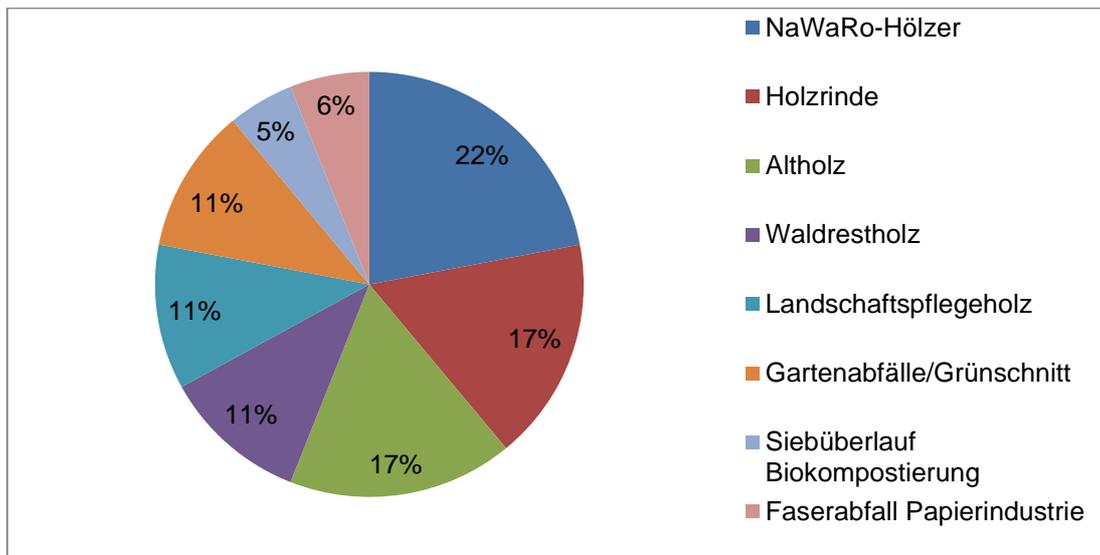


Bild 3.17: Zusammensetzung des Inputs zur Verbrennung der 20 befragten Biomasseheizkraftwerke (TIEMANN, 2015)

Der Aschegehalt für Althölzer beträgt zwischen 6 bis 12 Gew.-% der Brennstoff-Trockensubstanz (OBERNBERGER, 1997) Für naturbelassenes Holz liegt er bei 0,4 bis 0,8 Gew.-% (LFU, 2009). Aus der Befragung ergab sich für die 634.000 Mg/a bekannten Inputs ein Ascheanfall von 43.790 Mg/a Rostasche (0,55 % P) und 10.910 Mg/a Flugasche. Bei der Biomassenfeuerung entstehen neben den Grob- und Rostasche (60-90 Gew-%), zwei verschiedenen Arten von Flugaschen: die Zyklonflugasche (10-35 Gew-% der TS) und die Feinstflugasche (2-10 Gew-% der TS). In Tabelle 3.10 sind die durchschnittlichen P_2O_5 - und P-Gehalte der unterschiedlichen Aschefractionen für Althölzer angegeben. (Oberberger, 2007) Holzrasche enthält je nach Aschefraktion zwischen 1,1 bis 1,2 % P (OBERNBERGER, 1997)

Tabelle 3.10: Phosphorgehalte von Aschen aus der Holzverbrennung (OBERNBERGER, 1997)

Nährstoff	Grobasche [Gew-%]	Zyklonflugasche [Gew-%]	Feinstflugasche [Gew-%]
P_2O_5	0,9	1,4	0,4
P	0,39	0,61	0,17

Der durchschnittliche Phosphorgehalt in den Aschen der befragten Anlagen aus TIEMANN (2015) lag bei 0,55 %. In Klärschlammmonoverbrennungsanlagen mit kommunalem Klärschlamminput beträgt der mittlere Phosphorgehalt circa 9 % (KRÜGER und ADAM, 2013). Aufgrund der geringen P-Gehalte ist die Rückgewinnung mit derzeit verfügbaren Verfahren nicht wirtschaftlich darstellbar, auch bei einer separaten Erfassung der Asche-Fractionen und ausschließlicher Nutzung der Zyklonflugasche.

3.9 Zusammenfassung des Potentials zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm in Hessen

Aus den vorangehenden Kapiteln ergeben sich Phosphorrückgewinnungspotentiale aus dem Klärschlamm, die in Tabelle 3.11 zusammengefasst dargestellt sind. Die Massenströme der durch P-Messungen im Klärschlamm ermittelten 182 relevanten Kläranlagen wurden um die Massenströme der 2 Kläranlagen erweitert für die keine P-Messungen im Klärschlamm vorlagen, die aber aufgrund der Zulauf-/Ablauf-Frachtbetrachtung als möglicherweise relevant eingestuft wurden. Zudem ist der Gesamtmassenstrom an Klärschlamm und Phosphor aller direkt entsorgenden Kläranlagen in Hessen dargestellt. Für beide Gruppen wurde zudem die für 2025 angestellte Prognose aufgeführt.

Tabelle 3.11: Zusammenfassung des Rückgewinnungspotentials

Anteil am Klärschlamm-anfall	Stoffstrom	Ausgangssituation 2012 bis 2014		Prognose KS-Massenströme 2025 mit Faulung FFM	
		Klärschlamm-menge [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg/a]	Klärschlamm-menge [Mg TS/a]	P-Fracht (Prognose inkl. WRRL) [Mg/a]
182 (+2) relevante Kläranlagen aus 2012 bis 2014 aktuell: 83,7 % 2025: 81,8 %	Mono- verbrennung	53.231	1.111	37.260	1.161
	Mitverbrennung	15.817	522	15.817	545
	Verbrennung unbekannt	4.388	130	4.388	139
	Landwirtschaft, Landbau und Sonstiges	53.183	1.640	53.183	1.731
	Summe	126.619	3.403	110.649	3.576
Alle direkt entsorgenden Kläranlagen (100 %)	Mono- verbrennung	53.610	1.114	37.640	1.164
	Mitverbrennung	16.536	534	16.536	557
	Verbrennung unbekannt	5.534	145	5.534	155
	Landwirtschaft, Landbau und Sonstiges	74.364	1.950	74.364	2.077
	unbekannt	1.198	12	1.198	16
	Summe	151.243	3.756	135.272	3.970

Die Klärschlammmenge aus den 184 Kläranlagen, die in den nachfolgenden Kapiteln näher betrachtet werden liegt aktuell bei 83,7 % der gesamten Klärschlammmenge zur Entsorgung in Hessen. Durch die geplante Schlammfäulung in Frankfurt am Main reduziert sich dieser Anteil geringfügig auf 81,8 %. Das Phosphorrückgewinnungspotential liegt laut den aktuellen Zahlen bei 90,6 % der gesamten P-Fracht in Hessen.

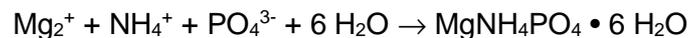
4 Technische Verfahren zur Phosphorrückgewinnung

Aus der Vielzahl an Verfahren, die eine Phosphorrückgewinnung aus der wässrigen Phase, dem Klärschlamm oder der Klärschlammasche ermöglichen wurde hier eine Auswahl an Prozessen getroffen, die zunächst beschrieben und zum Teil einer gesonderten Betrachtung unterzogen wurden. Bei der Auswahl wurde insbesondere berücksichtigt, ob die Verfahren derzeit noch aktiv erforscht oder vertrieben werden, ob sie sich verfahrenstechnisch grundsätzlich für die jeweiligen Zielstoffströme eignen und entsprechend implementieren lassen sowie ob genügend Informationen frei verfügbar sind, die eine technische Beschreibung des Prozesses mit möglichst wenigen Unklarheiten zulassen.

4.1 Verfahrensbeschreibungen

4.1.1 PEARL-Prozess

Zur Fällung bzw. Kristallisation der gelösten Phosphate können hinsichtlich einer späteren Phosphorverwertung bzw. -verwendung besonders vorteilhaft Magnesium-Verbindungen zum Einsatz kommen. Liegt außer Phosphat ebenfalls Ammonium in der flüssigen Phase vor, kann unter bestimmten Randbedingungen die Kristallisation von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP, mineralogisch als „Struvit“ bezeichnet) nachfolgender Reaktionsgleichung erfolgen:



Aus der Reaktionsgleichung ist zu erkennen, dass im MAP-Salz Magnesium (Mg^{2+}), Ammonium (NH_4^+) und Phosphat (PO_4^{3-}) im stöchiometrischen Verhältnis von 1:1:1 enthalten sind. Um dieses molare Gleichgewicht in einem wässrigen Medium zu erhalten, müssen in der Regel Phosphor und vor allem Magnesium zudosiert werden. Wird lediglich die Phosphorrückgewinnung (im Beisein von Ammonium) angestrebt, wird nur Magnesium bis zum Gleichgewicht mit Phosphat oder zur Verbesserung des Kristallisationsgrades leicht überstöchiometrisch zudosiert. Der deutliche Überschuss an Ammonium stellt kein prozesstechnisches Hindernis für die Kristallisation dar, sondern begünstigt diese aufgrund der höheren Übersättigung der Lösung.

Die verfahrenstechnische Ausgestaltung der MAP-Kristallisation, lässt sich u. a. mittels im Aufstrom betriebener Kristallisationsreaktoren durchführen (z.B. DHV-Crytalactor®, OSTARA PEARL™-Prozess). In Bild 4.1 ist das vereinfachte Verfahrensschema des PEARL-Prozesses dargestellt.

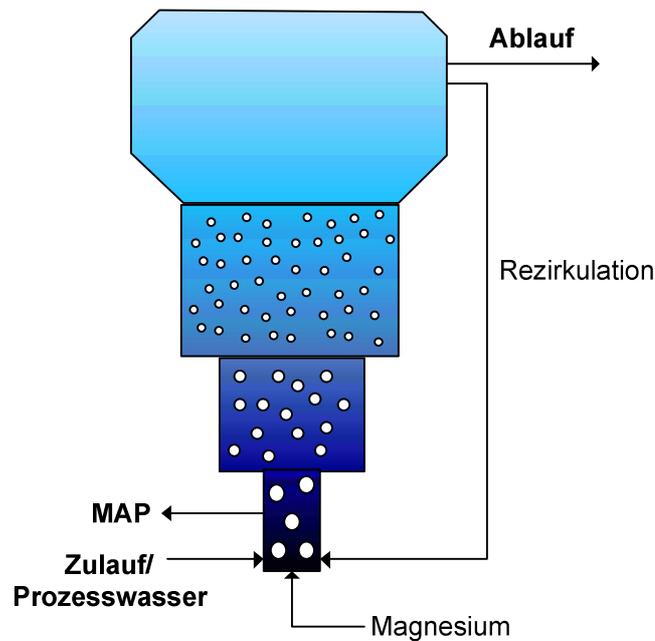


Bild 4.1: Verfahrensschema der PEARL-MAP-Kristallisationsanlage (ESEMAG, 2006)

In dem aufwärts durchströmten Reaktor werden Natronlauge zur pH-Wert-Einstellung und Magnesiumchlorid als Fällmittel zugegeben. Die im oberen Reaktorbereich gebildeten MAP-Kristalle sinken infolge der Querschnittserweiterung des Reaktors bzw. der Strömungsverlangsamung ab und dienen im unteren Reaktorbereich als Pellet-Keime, so dass keine externen Trägermaterialien wie z.B. Sand zugegeben werden müssen. Nach Erkenntnissen der Verfahrensentwickler aus dem Betrieb verschiedener Versuchsanlagen, führt dieses Prinzip sowie ein patentiertes Einmischsystem für Chemikalien und Überstandswasser am Reaktorboden zu MAP-Kristallen mit einer Reinheit von mehr als 97 %, bei einem erwartbaren Wirkungsgrad bezogen auf die Phosphorfracht im Zulauf zum Kristallisationsreaktor von 85 – 90 %. Die am Reaktorboden abgezogenen MAP-Pellets haben einen Durchmesser von bis zu 6 mm. (ESEMAG, 2006; N. N., 2006; BRITTON et al., 2007)

Der Vorteil aller im Aufstrom betriebenen Reaktoren ist in der Produktform zu sehen. Die MAP-Pellets sinken erst ab, wenn sie eine gewisse Größe erreicht haben und können aufgrund ihrer Körnigkeit und hohen Nährstoffkonzentration leichter und kostengünstiger verwertet werden als MAP-Suspensionen bzw. – nach weitgehender Entwässerung und Trocknung – MAP-Pulver aus Sedimentationsprozessen. Ein solcher Schwebebettreaktor zur MAP-Kristallisation wird mit einem Durchsatz von 500 m³/d Überstandswasser als Demonstrationsanlage in Edmonton (Kanada) betrieben. Sieben großtechnische Anwendungen in Nordamerika sind in Betrieb und drei weitere Anlagen befinden sich dort im Bau oder im Planungsstadium. In der Nähe von London ist auf der kommunalen Kläranlage Slough die erste derartige Anlage zur Phosphorrückgewinnung in Europa in Betrieb gegangen. Weitere Anlagen in Europa sind in Amersfoort (NL) sowie Madrid (ESP) in Planung bzw. Bau (OSTARA 2016).

4.1.2 P-RoC-Verfahren

Das P-RoC-Verfahren (Phosphorus Recovery from Wastewater by Crystallisation of Calcium Phosphate Compounds) wurde vom Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (CMM) im Labor- und Halbtechnik-Maßstab bis hin zu einer Pilotanlage im Batchbetrieb entwickelt und erfolgreich erprobt. Grundlage des Verfahrens ist die Rückgewinnung gelösten Phosphats aus der Wasserphase mittels Kristallisation an Calcium-Silicat-Hydrat (CSH). In einem Kristallisationsreaktor, der als Rührreaktor ausgelegt ist, werden die CSH-Impfkristalle dem Abwasser zugegeben. Das mit Phosphor beladene CSH kann nach der Abtrennung (Absetzbecken/Siebung) in der Landwirtschaft als Düngemittel eingesetzt oder zur weiteren Verarbeitung an die Düngemittelindustrie abgegeben werden. In Bild 4.2 ist das Fließbild des Verfahrens dargestellt.

Abhängig von der Qualität des Abwassers verbleiben die CSH-Kristalle 0,5 bis 2 Stunden im Kristallisationsreaktor. Nach Angaben der Entwickler liegt der Wirkungsgrad bezogen auf die Phosphorfracht im Zulauf zum Kristallisationsreaktor bei bis zu 90 %. Dies ist jedoch von den durchgesetzten Bettvolumina abhängig, die zu einem Verbrauch der reaktiven Komponenten des Materials führen. Durch die Betriebsweise des Verfahrens analog eines Festbettadsorbers mit definierter initialer CSH-Zugabe und kontinuierlicher Abwasserdurchströmung ergibt sich eine rechnerische, durchschnittliche P-Rückgewinnung. Diese sinkt mit den durchgesetzten Bettvolumina ausgehend von (nahezu) 100 % sukzessive ab.

Der Gesamtwirkungsgrad bezogen auf den Zulauf der Kläranlage ist abhängig von der Einsatzstelle des P-RoC-Verfahrens in der Kläranlage, möglichen Vorbehandlungsschritten und der hieraus resultierenden gelöst vorliegenden Phosphatfracht. Optimal erscheint für die Behandlung von Prozesswasser einer Bio-P-Kläranlage und geringen durchgesetzten Bettvolumina die Rückgewinnung von bis zu 30 % des Phosphors aus dem Kläranlagenzulauf, sofern gezielte Maßnahmen für eine vorgeschaltete Phosphorrücklösung aus dem Klärschlamm vorgesehen werden. Das bayerische Landesamt für Umwelt nennt in seinem Bericht für die in diesem Projekt durchgesetzten Bettvolumina eine durchschnittliche Rückgewinnung von „60 % des Phosphors aus dem Zentrat“, entsprechend ca. 12 % bezogen auf den Zulauf zur Kläranlage. (LFU, 2015)

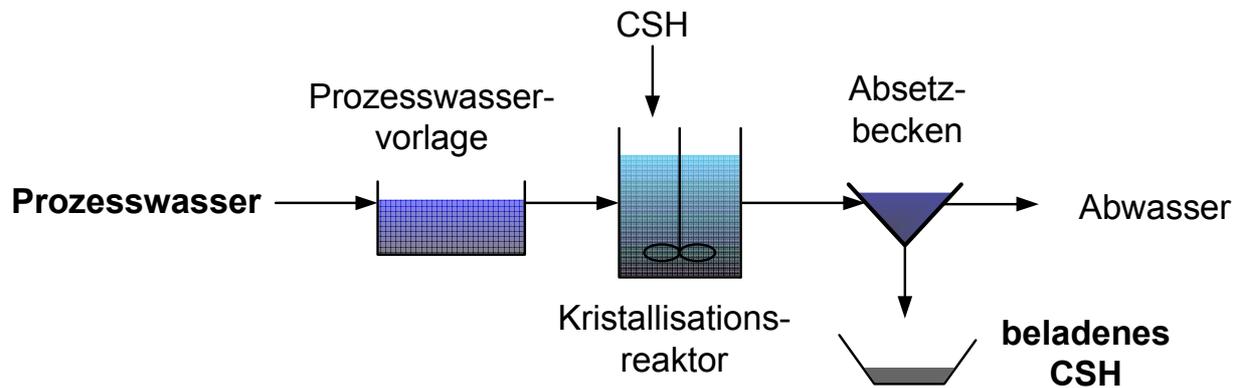


Bild 4.2: Verfahrensschema des P-RoC-Verfahrens (SCHUHMAN, 2010)

Die Kristallisationsprodukte erreichen – in Abhängigkeit von der Abwasserzusammensetzung – P-Gehalte von bis zu 13 Gew.-%. Mineralogische Analysen weisen die Bildung von phosphathaltigen Mineralphasen wie z. B. hydroxylapatitähnliche Ca-P-Phasen, Brushit und Struvit nach. Aufgrund der niedrigen Schwermetallgehalte des Kristallisationsmaterials und dessen geringer Affinität für die Anreicherung von Schwermetallen, wurden in den generierten Produkten Schwermetallgehalte nachgewiesen, die weit unterhalb der relevanten Grenz- und Richtwerte liegen (EHBRECHT, 2013). Als calciumphosphathaltiges Material ist das Rezyklat evtl. zum Einsatz in der Düngemittelindustrie besser geeignet als direkt in der Landwirtschaft. Untersuchungen zu einer großtechnischen Anwendung des Verfahrens liefen auf der Kläranlage der Stadt Neuburg a. d. Donau (Bayern) vielversprechend, so dass dort eine Vollstromumsetzung in Planung ist.

In Hessen (Kläranlage Gießen) wurden im Rahmen einer Förderung durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) Untersuchungen zum Einsatz des klassischen P-RoC-Verfahrens ergänzt durch MAP-Kristallisation im Schlammwasser vorgenommen („Entwicklung eines kombinierten Kristallisationsverfahrens zur Gewinnung von Phosphatdünger aus dem Abwasserreinigungsprozess mit vollständiger Verwertung der Restphasen in der Zementindustrie“). Die Bilanzierung hat ergeben, dass ca. 10 % des Phosphorzulaufs zur Kläranlage Gießen rückgewonnen werden können. Das Verfahren wird nun nicht weiter verfolgt (MICHEL, 2016).

4.1.3 Berliner Verfahren/ AirPrex-Verfahren

Das Berliner Verfahren wurde nach den 1994 erstmalig auftretenden massiven Inkrustationen im Bereich der Zentratwasserbehandlung sukzessive in die Kläranlage Waßmannsdorf der Berliner Wasserbetriebe (BWB) implementiert, verändert und optimiert. Im Abwasserreinigungsprozess der Kläranlage wird eine vermehrte biologische Phosphorelimination angewandt, was hohe Phosphatkonzentrationen im Schlammwasser

begünstigt. Das spontane Ausgasen des Kohlenstoffdioxids aus dem übersättigten Faulschlamm führte zum Anstieg des pH-Wertes und damit zur Veränderung der Löslichkeitsgleichgewichte von MAP und anderen Verbindungen, so dass es zu unkontrollierten Inkrustationen kam. Dieses Problem wurde durch verschiedene Maßnahmen gelöst (Bild 4.3), die als „Berliner Verfahren“ patentiert wurden. Insbesondere wurden folgende verfahrenstechnische Änderungen vorgenommen:

- Intensivierung der Faulschlammumwälzung durch standardmäßige Zufuhr am Behälterkopf und Abzug am Behälterboden (1. Faulstufe).
- Dosierung von Antiinkrustationsmitteln in die Rohrleitungen zwischen zweitem Faulbehälter und Faulschlammvorlage sowie in den Zulauf zur Entwässerungs-Zentrifuge.
- Ausgestaltung der Faulschlammvorlage als Reaktor zur gezielten MAP-Fällung durch CO₂-Ausstrippen mittels Lufteintrag (Anstieg des pH-Wertes auf pH 8) sowie Dosierung von Magnesiumchlorid (MgCl₂) als Fällmittel. (HEINZMANN und LENGEMANN, 2013)

Auf diese Weise konnte das Betriebsproblem der sich rasch entwickelnden ungewollten Inkrustationen sicher behoben werden und damit weitere Vorteile (gesteigerter Mineralisationsgrad des Faulschlammes, verbesserte Entwässerungseigenschaften, Reduzierung des Verbrauchs an Flockungshilfsmitteln, verringerte Phosphat-Rückbelastung) generiert werden, so dass sich der Einsatz des Berliner Verfahrens in jährlichen Betriebskosteneinsparungen niederschlägt (HEINZMANN und LENGEMANN, 2013).

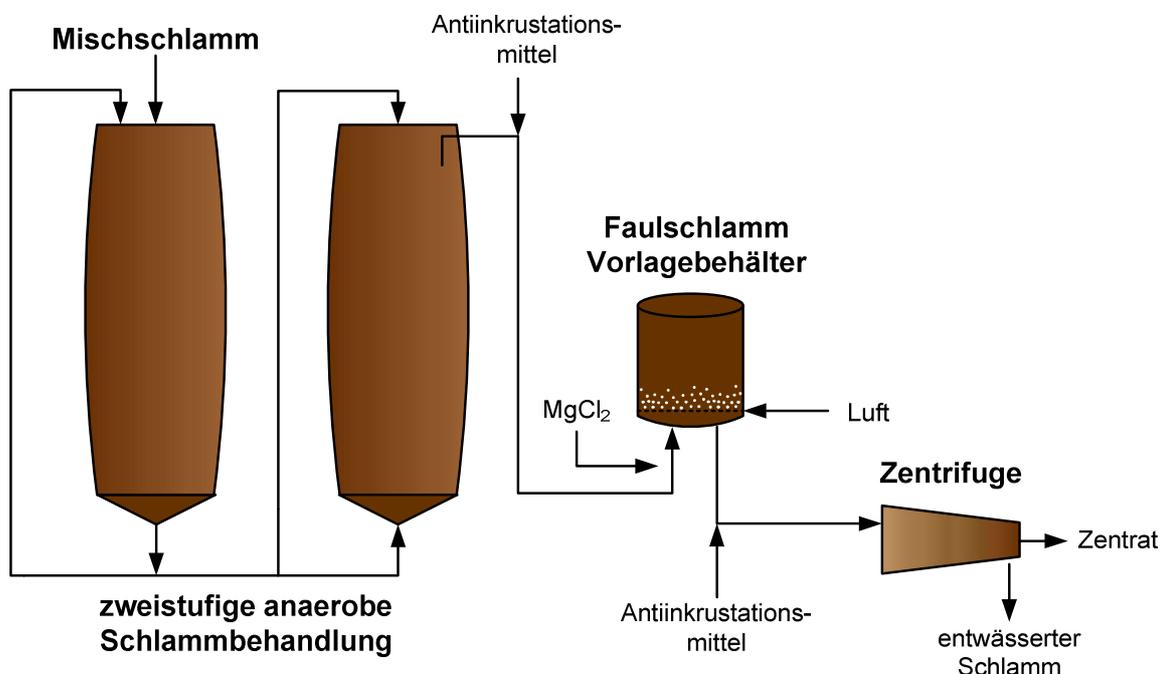


Bild 4.3: Verfahrensschema des Berliner Verfahrens (HEINZMANN und LENGEMANN, 2013)

Durch diese Betriebsweise des Berliner-Verfahrens resultierten Probleme dahingehend, dass quartalsweise ca. 30 Tonnen MAP vom Fuß des Faulschlamm-Vorlagebehälters abgezogen

werden mussten, um den Betrieb der am Boden installierten Flächenbelüftung aufrecht erhalten zu können. Bezogen auf den Anlagenzulauf konnten nur ca. 2 % des Phosphors über diesen Weg separat rückgewonnen werden; der Großteil des Phosphors wurde als MAP weiterhin mit dem Klärschlamm der Entsorgung zugeführt. Als nachteilig erwies sich des Weiteren, dass MAP gemeinsam mit dem Faulschlamm den Zentrifugen zugeführt wurde und sich an dieser Stelle der abrasive Verschleiß durch das MAP deutlich erhöhte. (HEINZMANN und LENGEMANN, 2013)

Eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens zur Vermeidung von Inkrustationen in Kombination mit einer Phosphorrückgewinnung war somit erforderlich. Diese wird inzwischen als AirPrex-Verfahren (Bild 4.4) großtechnisch auf verschiedenen Anlagen in Deutschland (Mönchengladbach-Neuwerk, Braunschweig-Steinhof) und den Niederlanden (Wieden-Echten, Amsterdam) eingesetzt) (EWERT und WAGENBACH, 2013). Ende 2014 befanden sich vier Anlagen im Bau, drei davon in Deutschland (BOGNER, 2014).

Das AirPrex-Verfahren wurde seit 2006 von der P.C.S. GmbH, Hamburg, die die Lizenz für das Patent der BWB übernommen hat, auf dem Markt angeboten. Nunmehr besitzt die CNP-Technology Water and Biosolids GmbH, Hamburg die Rechte am AirPrex Verfahren und vertreibt dieses weltweit (BOGNER, 2014).

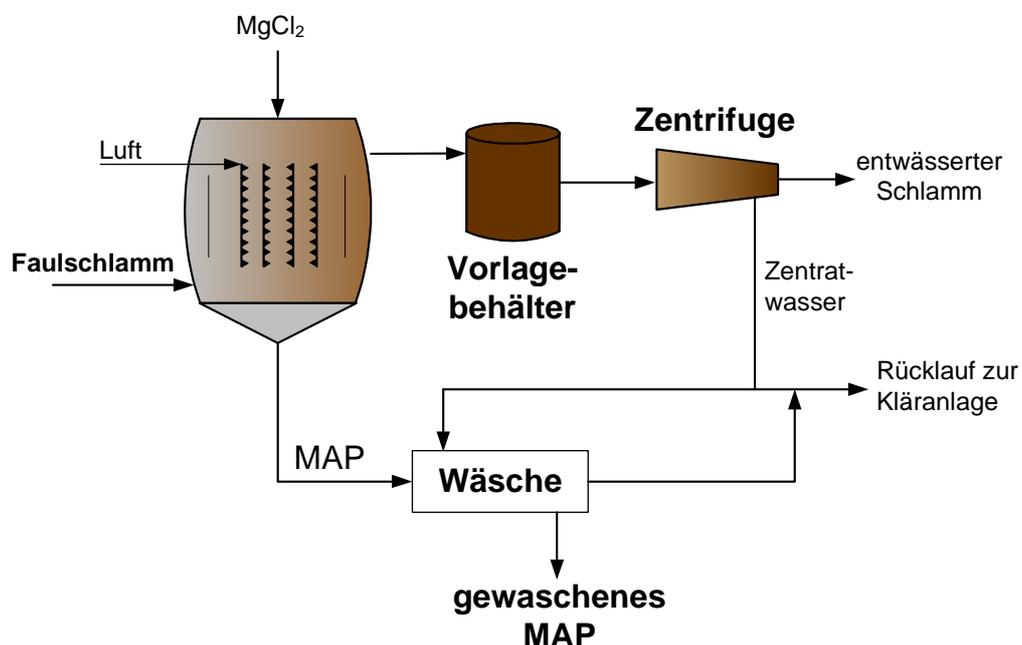


Bild 4.4: Verfahrensschema des AirPrex-Verfahrens in Wieden-Echten, Niederlande (EWERT und WAGENBACH, 2013)

Unmittelbar nach der Faulung wird der Faulschlamm dem MAP-Reaktor zugeführt. Durch die bereits im Berliner Verfahren vorgesehene Luftstripping steigt der pH-Wert auf Zielwerte zwischen pH 7,8 – 8,0 (STOWA, 2012) an und in Folge der Dosierung von Magnesiumchlorid wird MAP ausgefällt. Die hydraulische Aufenthaltszeit im Reaktor sollte acht Stunden

betragen, damit eine Reduzierung der Phosphat-Konzentration im Schlamm von ca. 90 % gelingt (EWERT und WAGENBACH, 2013); am Standort Berlin-Waßmannsdorf wird ausgehend von ca. 350 mg $\text{PO}_4\text{-P/l}$ im Zulauf zum MAP-Reaktor ein Wirkungsgrad von ca. 95 % erreicht (HEINZMANN und LENGEMANN, 2013). Das MAP wird über einen trichterförmigen Boden aus dem Reaktor ausgeschleust und gewaschen. In der Anlage in Waßmannsdorf ($Q = 2.400 \text{ m}^3/\text{d}$, $V = 800 \text{ m}^3$) werden bei einer Belüftung zwischen 2.000 und 3.000 m^3/h (HEINZMANN und LENGEMANN, 2013) bezogen auf die Phosphorzulaufracht zur Kläranlage ca. 11 % (LENGEMANN und EWERT, 2015) rückgewonnen. In Amsterdam werden mit dem Verfahren aktuell Rückgewinnungsgrade von bis zu 22 % erreicht.

4.1.4 Stuttgarter Verfahren

Am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) der Universität Stuttgart wurde in Zusammenarbeit mit der iat – Ingenieurberatung, Stuttgart, das sogenannte „Stuttgarter Verfahren“ zur Phosphorrückgewinnung aus anaerob stabilisierten Klärschlämmen als Magnesium-Ammonium-Phosphat entwickelt. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass kommunaler Klärschlamm von Kläranlagen mit simultaner Phosphat-Elimination zur Rückgewinnung verwendet werden kann und keine Verfahrensumstellungen seitens der Abwasserreinigung erforderlich sind (z. B. Bio-P-Betrieb). Das erzeugte phosphor- und stickstoffhaltige Rezyklat (v. a. MAP) könnte beispielsweise direkt als Mehrnährstoffdünger in der Landwirtschaft verwendet werden. Untersucht wurde die Phosphorrückgewinnung sowohl aus Klärschlämmen mit Eisen- als auch Aluminiumfällung.

Das „Stuttgarter Verfahren“ (Bild 4.5) wurde in den Jahren 2003 und 2004 entwickelt und im Labormaßstab erprobt (WEIDELNER et al., 2005; WEIDELNER et al., 2007). Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde eine halbtechnische Versuchsanlage mit einem Reaktorvolumen von ca. 1 m^3 betrieben. Dabei konnte gezeigt werden, dass das Verfahren auch im halbtechnischen Maßstab stabil zu betreiben ist (WEIDELNER et al., 2008). Daraufhin wurde eine Pilotanlage im großtechnischen Maßstab projektiert und ausgeführt. Diese Pilotanlage wird seit Ende 2011 vom Abwasserzweckverband Raum Offenburg betrieben und seitens des ISWA wissenschaftlich begleitet. Die Pilotanlage wurde so dimensioniert, dass ein in etwa 5.000 EW bis 10.000 EW entsprechender Teilstrom des täglich anfallenden Faulschlammes behandelt werden kann.

Die Pilotanlage besteht im Kern aus zwei Chargenbehältern und einem Absetzbecken (Maximalfüllvolumen für Faulschlamm jeweils ca. 12 m^3), einer Kammerfilterpresse sowie aus Vorratsbehältern und Dosiereinrichtungen für die Betriebsmittel Natronlauge, Zitronensäure,

Schwefelsäure, Magnesiumoxid und Flockungshilfsmittel. Der Betrieb der Anlage erfolgt chargenweise. In Bild 4.5 ist das Verfahrensschema dargestellt.

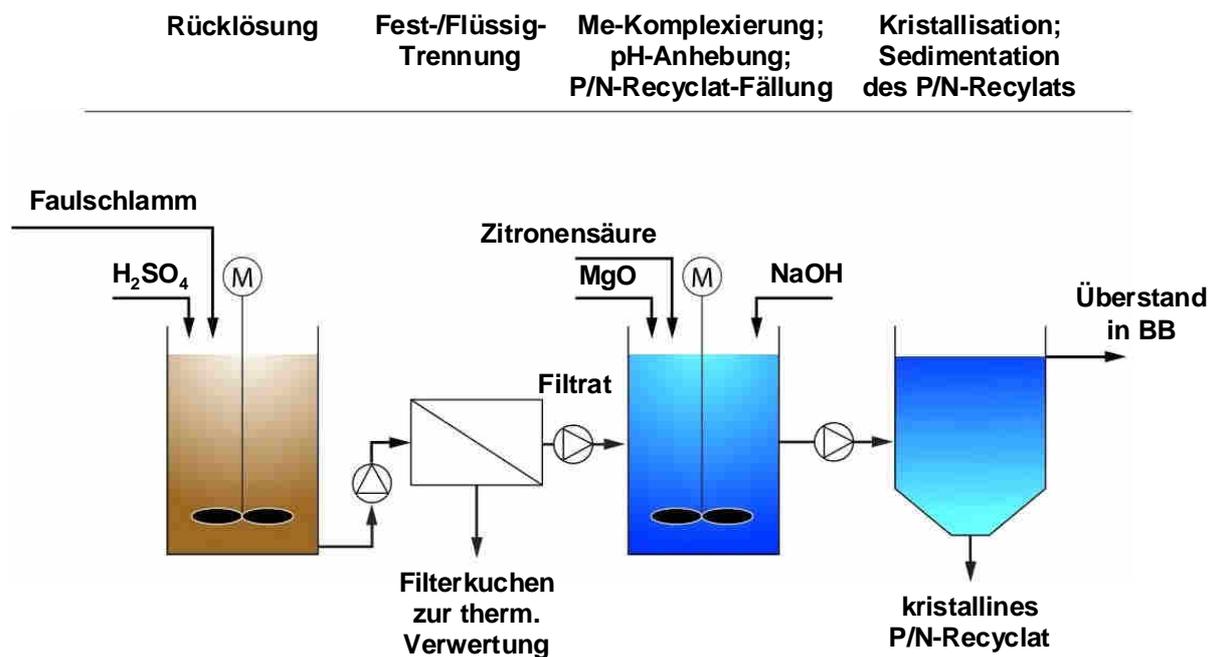


Bild 4.5: Verfahrensschema des Stuttgarter Verfahrens (MEYER, 2013)

In Chargenbehälter 1 wird die Rücklösung von Phosphaten aus dem Faulschlamm zwischen pH 3 und pH 5 durchgeführt. Der Behälter ist so ausgelegt, dass er eine Charge Faulschlamm aufnehmen kann und zusätzlich ein Freibord für eine eventuelle Schaumbildung infolge der Säurezugabe während der Rücklösung vorhanden ist. Die Zugabe von 78 %iger Schwefelsäure erfolgt gleichzeitig mit der Faulschlammbeschickung. Hierdurch kann die Schaumbildung minimiert werden. Nach Abschluss der für die Rücklösung der Phosphate vorgesehenen Zeit erfolgt die Fest-/Flüssig-Trennung mittels einer Kammerfilterpresse, so dass aus einem Kubikmeter Faulschlamm ca. 0,9 m³ Filtrat gewonnen werden (MEYER, 2014) (MEYER, 2015). Zu niedrige pH-Werte < pH 3 führen bei der Entwässerung zu einer unbefriedigenden Ausbildung des Filterkuchens bzw. es resultiert eine arbeitsintensive Reinigung des Aggregates. Aus gesamtbetrieblichen Gründen wird daher auf das Einstellen von pH-Werten < pH 3 verzichtet, mit denen eine höhere Phosphorausbeute möglich wäre. Zur Schlammkonditionierung wird der saure Faulschlamm in der Beschickungsleitung zur Kammerfilterpresse mit einer Stammlösung aus speziellem Polymer und Betriebswasser vermischt. Nach der Separation wird das Filtrat in den Chargenbehälter 2 überführt. Die feste Phase, d. h. der entwässerte und phosphat- bzw. nährstoffabgereicherte Schlamm, wird der thermischen Behandlung zugeführt. (STEINMETZ et al., 2014; MEYER, 2013)

In Chargenbehälter 2 finden im Filtrat die Komplexierung von Metallen und Schwermetallen, die Neutralisation und die MAP-Fällung statt. Zur Komplexierung der im Rücklöseschritt

freigesetzten Metalle wird Zitronensäure in Abhängigkeit der Metallkonzentrationen (hauptsächlich Eisen, Aluminium, Calcium und Magnesium) in das Filtrat dosiert. Nach der Metall-Komplexierung und der Zugabe des Fällmittels Magnesiumoxid (Zugabe noch im sauren Milieu) wird der pH-Wert durch Zugabe von Natronlauge auf den Fällungs-pH-Wert von 8 angehoben. (MEYER, 2014)

Nach Abschluss der MAP-Fällungsreaktion wird das Filtrat mit den Fällprodukten in das Absetzbecken überführt; alternativ kann das Fällprodukt auch ohne vorherige Sedimentation direkt über eine Kammerfilterpresse gewonnen werden; dies stellt die derzeitige Betriebsweise des Verfahrens dar. Der verdrängte Überstand aus dem Absetzbecken bzw. der Filterpresse wird dem Belebungsbecken (BB) der Kläranlage wieder zugeführt. (MEYER, 2013)

Eine alternative Betriebsweise wurde inzwischen untersucht, bei der das Filtrat zunächst dem Absetzbecken für eine weitergehende Feststoffabtrennung („intensive Sedimentation“) zugeführt wird, bevor es in den Behälter zur Komplexbildung und Fällung zurückgeführt wird. Hier erfolgt eine modifizierte Einstellung des pH-Wertes. Durch diese Maßnahmen lässt sich die Rezyklatqualität deutlich verbessern (STEINMETZ et al., 2014).

In einem weiteren Verfahrensschritt werden die Fällprodukte entwässert, getrocknet und ggf. gereinigt. Der mittlere Rückgewinnungsgrad ist abhängig von dem Säureeinsatz und der Schlammbeschaffenheit (Eisen- oder Aluminiumfällung). Auf Basis der aktuellen Versuchsergebnisse auf der Kläranlage Offenburg ist bezogen auf den Phosphorgehalt im Faulschlamm eine Rückgewinnung von im Mittel ca. 50 % möglich, bezogen auf den Kläranlagenzulauf entspricht dies ca. 43 %. Bei pH 3 wird dieser Wert für stark Aluminiumhaltige Schlämme erreicht, für Klärschlämme aus der P-Elimination mittels Eisensalzen können bei pH 3 Rückgewinnungsgrade von > 70 % erwartet werden. Für diese Schlämme erscheint eine 50 %-ige Phosphorrückgewinnung bereits bei pH 4 möglich. Diese Werte sind bislang nur für eine Kläranlage gültig und müssten an anderen Standorten verifiziert werden.

Das Rezyklat wurde auf die Parameter nach Düngemittelverordnung (2012) sowie auf ausgewählte organische Mikroschadstoffe untersucht. Sämtliche Grenzwerte nach Düngemittelverordnung werden unterschritten. Hinsichtlich der untersuchten Mikroschadstoffe (u.a. Benzophenon, Diethyltoluamid, Galaxolid, TCPP) wird durch das Stuttgarter Verfahren eine Abreicherung von 78 bis 99 % gegenüber dem für die thermische Behandlung vorgesehenen Klärschlamm erreicht. (STEINMETZ et al., 2014; MEYER, 2013)

Im Jahr 2015 wurde als weitere Option (Bild 4.6), um mehr Produktreinheit zu generieren, anstelle des Absetzbeckens eine Membrantrennstufe (Ultrafiltration) zwischen der Filterpresse und dem Reaktor zur MAP-Fällung und -Agglomeration in den Verfahrensablauf integriert (MEYER et al., 2015). Die nach Membranfiltration erzeugten Rezyklate weisen geringere Schwermetallgehalte und eine bessere Optik (helleres Pulver) auf.

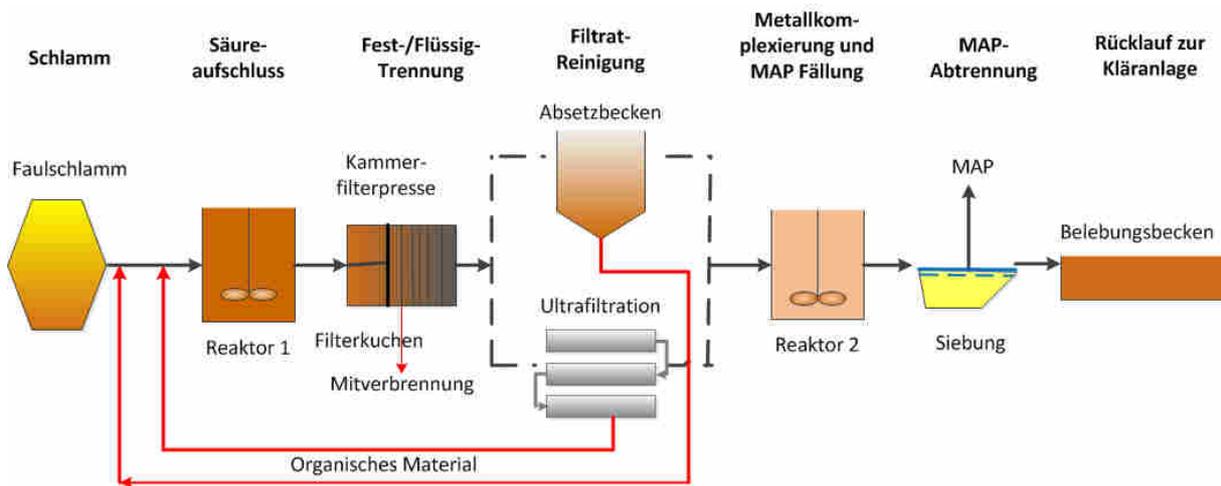


Bild 4.6: Verfahrensschema des modifizierten Stuttgarter Verfahrens; nach (MEYER, 2015)

4.1.5 Budenheimer Kohlensäure-Verfahren

Das Budenheimer Kohlensäure-Verfahren wurde von der Chemischen Fabrik Budenheim KG entwickelt und befindet sich derzeit in der Erprobung und Weiterentwicklung. Ziel ist es, das in Klärschlämmen enthaltene Phosphat zu extrahieren und anschließend gezielt als Calciumphosphat zu fällen. Das Verfahrensschema ist in Bild 4.7 dargestellt (SCHNEE et al., 2013)

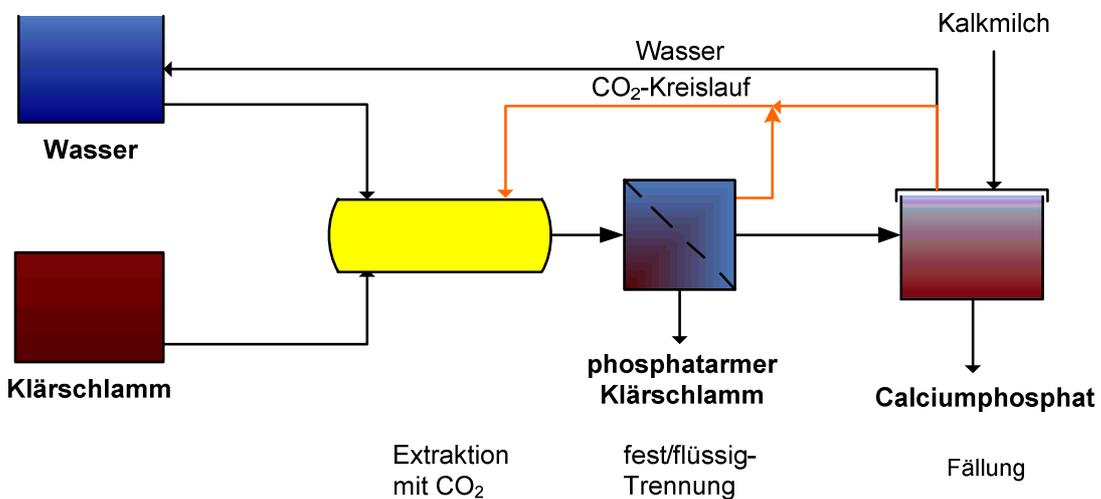


Bild 4.7: Verfahrensschema des Budenheimer Kohlensäure-Verfahrens

Unter Druck gelangt Kohlenstoffdioxid in den mit Wasser und Klärschlamm versetzten Reaktor. Das CO₂ löst sich in der wässrigen Phase, wodurch Kohlensäure entsteht und der pH-Wert sinkt. In diesen Milieubedingungen lösen sich die Phosphate aus dem Klärschlamm. Anschließend wird die Suspension filtriert und der phosphatarme Klärschlamm aus dem Verfahren ausgeschleust. Die Fällung des Phosphates aus dem Filtrat erfolgt durch Austreiben des Kohlenstoffdioxids, wodurch der pH-Wert wieder erhöht wird; ggf. wird die Fällung durch

die Zugabe von Kalkmilch unterstützt. Nach abschließender Trocknung steht der Phosphatdünger für die weitere Verwertung zur Verfügung. Das anfallende Prozesswasser kann nach der Phosphatfällung erneut zum Anmischen von Klärschlamm eingesetzt werden. Auch das CO₂ wird im Kreislauf geführt, indem es beim Entspannen erfasst, verdichtet und wiederum zur Extraktion eingesetzt wird (SCHNEE et al., 2013; STÖSSEL, 2013).

Der abgetrennte Klärschlammrückstand ist phosphatarm und kann dadurch gut in der Baumaterialindustrie genutzt werden; durch den Entzug des Phosphates ist hinsichtlich der entsprechenden Produkthanforderungen ein Einsatz in der Zementindustrie möglich (SCHNEE et al., 2013; STÖSSEL, 2013)

Derzeit können bis zu 50 % der Phosphate aus dem Klärschlamm durch das Verfahren rückgewonnen werden. Der pH-Wert wird hierfür in der Extraktionsstufe auf ca. pH 5 eingestellt (STÖSSEL, 2016). Da der Schlamm ohne vorbereitende Maßnahmen genutzt werden kann, ist eine Anlage direkt am Klärwerk sinnvoll, wodurch Transportwege entfallen. Auch erfordert die Trocknung des mit dem Budenheim Verfahren behandelten Klärschlammes weniger Energie. (SCHNEE et al., 2013; STÖSSEL, 2013)

Bisher wurden hauptsächlich Untersuchungen mit „Fe-Schlämmen“ vorgenommen, intensive Versuche zum Einsatz des Budenheim-Verfahrens mit Bio-P-Schlämmen und „Al-Schlämmen“ stehen noch aus (STÖSSEL, 2016). Ergebnisse zu Pflanzenverfügbarkeitsuntersuchungen wurden noch nicht publiziert. Belastbare Zahlen zu Betriebsmittelverbräuchen und Kosten sind nicht verfügbar.

Anfang 2016 wurde im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes eine Pilotanlage auf der Kläranlage Mainz-Mombach mit einem stündlichen Durchsatz von 1-2 m³ Nassschlamm errichtet, deren Inbetriebnahme für April 2016 vorgesehen war.

4.1.6 Mephrec Verfahren

Das von der ingitec GmbH Leipzig konzipierte Verfahren zum metallurgischen Phosphorrecycling (Mephrec) erlaubt die gleichzeitige stoffliche und energetische Verwertung von phosphathaltigen Abfällen, z.B. von Klärschlamm. Kernstück des Verfahrens ist der mit Koks betriebene Sauerstoff-Schacht-Schmelz-Vergaser (Bild 4.8).

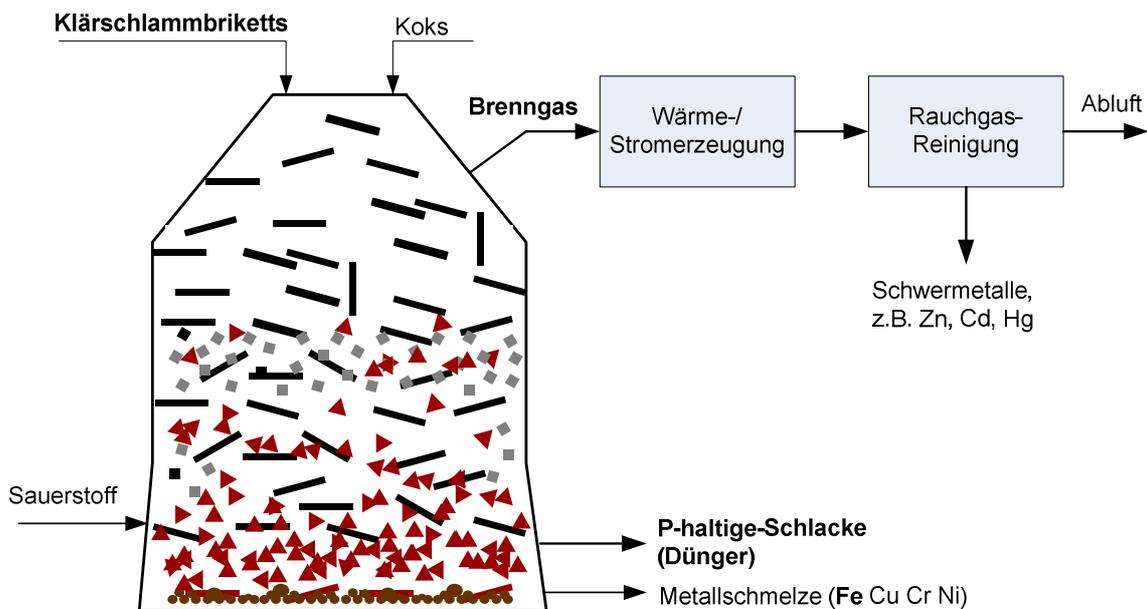


Bild 4.8: Verfahrensschema des Mephrec Verfahrens (SCHEIDIG et al., 2010)

Der Klärschlamm muss vor der Zugabe in den Mephrec-Reaktor brikettiert werden, um die Gasdurchlässigkeit der Schüttsäule bei der Schacht-Schmelzvergasung im Reaktor zu gewährleisten. Außerdem wird im Verfahren metallurgischer Koks (ca. 15 % bezogen auf den mineralischen Anteil der Klärschlamm-Briketts) eingesetzt, der die zum Schmelzen erforderliche Wärmeenergie sowie die reduzierende Atmosphäre im Ofenschacht bereitstellt. Der organische Anteil des Klärschlamms wird unter diesen Bedingungen vergast; das Brenngas kann zur Wärme- oder Stromerzeugung genutzt werden (SCHEIDIG et al., 2010). Im Reaktor werden die mineralischen Bestandteile des Klärschlamms im Gegenstrom mit den aufsteigenden, heißen Reaktionsgasen der Koks-Verbrennung aufgeheizt und schmelzen auf diese Weise zu einer Schlacke (Schmelzzeit ca. 2 bis 3 Stunden). Diese fließt mit einer Temperatur von ca. 1.450°C kontinuierlich aus dem Reaktor ab. (SCHEIDIG et al., 2013)

Im Prozess verdampfen Schwermetalle mit niedrigem Schmelzpunkt (z.B. Zink, Cadmium, Quecksilber) bereits im Schacht des Reaktors und werden in der Gasreinigung abgeschieden. Bei höheren Temperaturen schmelzende Metalle (z.B. Kupfer, Chrom, Nickel) legieren in einer als Schwermetall-Senke wirkenden Metallschmelze, deren Hauptbestandteil Eisen ist. Aufgrund ihrer höheren Dichte sammelt sich diese Schmelze unterhalb der flüssigen phosphathaltigen Schlacke im Herd des Reaktors. (SCHEIDIG et al., 2010)

Die Trennung von Schlacke und Metallschmelze kann über einen Siphon oder durch getrennte Abstiche in unterschiedlicher Höhe aus dem Herd des Reaktors gewährleistet werden. Der Schlacke-Abfluss erfolgt entweder in ein Wasserbad oder in einen Wasserstrahl, so dass es zu einer Granulierung des Materials kommt. Im Prozess entstehen somit „gleichzeitig

- eine phosphathaltige Schlacke,
- eine Metalllegierung (in geringer Menge) und
- ein Brenngas, das sich nach Reinigung auf Synthesegasqualität zur Stromerzeugung eignet.“ (SCHEIDIG et al., 2013)

In dem Prozess werden alle im Klärschlamm enthaltenen organischen Schadstoffe zerstört und der Schwermetallgehalt in der Schlacke durch Verdampfung (und nachfolgender Abscheidung) sowie Aufkonzentrierung in der Metallschmelze reduziert. Die verbleibenden Metall- oder Metalloxidgehalte des Produktes (Schlacke) liegen deutlich unter den Grenzwerten der Düngemittelverordnung und den veröffentlichten Werten der in Novellierung befindlichen Klärschlammverordnung (SCHEIDIG et al., 2013; SCHEIDIG et al., 2010)

Häufig wird der Vergleich zwischen der phosphorhaltigen Mephrec-Schlacke und „Thomasmehl“ gezogen. Die Schlacke weist geringere Anteile an Eisenoxiden (FeO und Fe_2O_3), annähernd gleiche CaO -, MgO - und zitronensäurelösliche P_2O_5 -Gehalte sowie höhere SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalte auf. Die Schlacke zeichnet sich „durch eine hohe Pflanzenverfügbarkeit des im Dünger enthaltenen Phosphors“ (SCHEIDIG et al., 2010) aus. Mit dem Mephrec-Verfahren können ca. 80 % des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors rückgewonnen werden (SCHEIDIG et al., 2010), d.h. bezogen auf den Kläranlagenzulauf ca. 70 % des Phosphors. Der Phosphorverlust in der Metallschmelze muss noch genauer quantifiziert werden, einer detaillierten Bilanzierung des Phosphors kommt bei den weiteren Untersuchungen zu diesem Verfahren große Bedeutung zu.

Das Mephrec-Verfahren wird im großtechnischen Pilotmaßstab zur Klärschlammbehandlung in Nürnberg umgesetzt und an diesem Standort weiter erprobt und optimiert. Die Pilotanlage wird im Jahr 2016 in Betrieb gehen. Im Zuge dieser kontinuierlichen Versuche wird auch der angegebene Wirkungsgrad überprüft werden. Grundsätzlich ist das Verfahren auch mit Klärschlammaschen anwendbar. Hierbei bestehen jedoch nicht mehr die energetischen Vorteile wie bei der Behandlung von brikettiertem Klärschlamm. Allerdings kann das Mephrec-Verfahren in diesem Fall in vorhandene Klärschlamm-Verbrennungsanlagen integriert und somit andere Vorteile generiert werden (z.B. Nutzung der logistischen Infrastruktur, Abgasreinigung).

4.1.7 Phosphorrückgewinnung in Verbindung mit Hydrothormaler Carbonisierung: AVA cleanphos und TerraNova Ultra

Bei der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) wird Biomasse mit hohen Drücken und Temperaturen sowie unter Luftabschluss innerhalb weniger Stunden in sogenannte HTC-Kohle umgewandelt. Ein Forschungs- und Anwendungsgebiet der hydrothermalen Carbonisierung ist seit einigen Jahren die Behandlung von Klärschlamm. Als besondere Vorteile gegenüber konventionellen Klärschlammbehandlungsverfahren werden hierbei die deutlich bessere mechanische Entwässerbarkeit der HTC-Kohle im Vergleich zum Klärschlamm und die dadurch sinkenden Transportmengen und -kosten für die anschließende Entsorgung gesehen (TERRANOVA, 2015b). Weiterhin wird als vorteilhaft eine Verdichtung des Energiegehaltes von Klärschlamm zur HTC-Kohle angeführt (KLÄUSLI, 2015), wodurch die HTC-Kohle bspw. zur Feuerung eingesetzt werden kann. Firmen, die derzeit HTC-Industrieanlagen bzw. Pilotanlagen zur Klärschlammbehandlung errichtet haben sind unter anderem AVA-CO2 Schweiz AG, TerraNova Energy GmbH (TerraNova® Ultra-Verfahren) und CS carbonSolution Deutschland GmbH (CS-HTC90™).

Die Betriebsweisen der entwickelten HTC-Verfahren basieren alle auf dem gleichen Prinzip (vgl. Bild 4.9). Der Klärschlamm wird eventuell mit Prozesswasser angemaischt, mit Katalysatoren versetzt und durch die im Prozess gewonnene Wärme in einem Wärmetauscher vorgewärmt. Anschließend gelangt der Klärschlamm in den Karbonisierungsreaktor, wo innerhalb von wenigen Stunden Klärschlamm in HTC-Kohle umgewandelt wird. Die Kohlesuspension ist gut mechanisch entwässerbar und kann anschließend einer Trocknung und bspw. Pelletierung zugeführt werden. Das Prozesswasser muss in der Regel vor der Einleitung in eine Kläranlage gereinigt werden. (CS, 2015; TERRANOVA, 2015a)

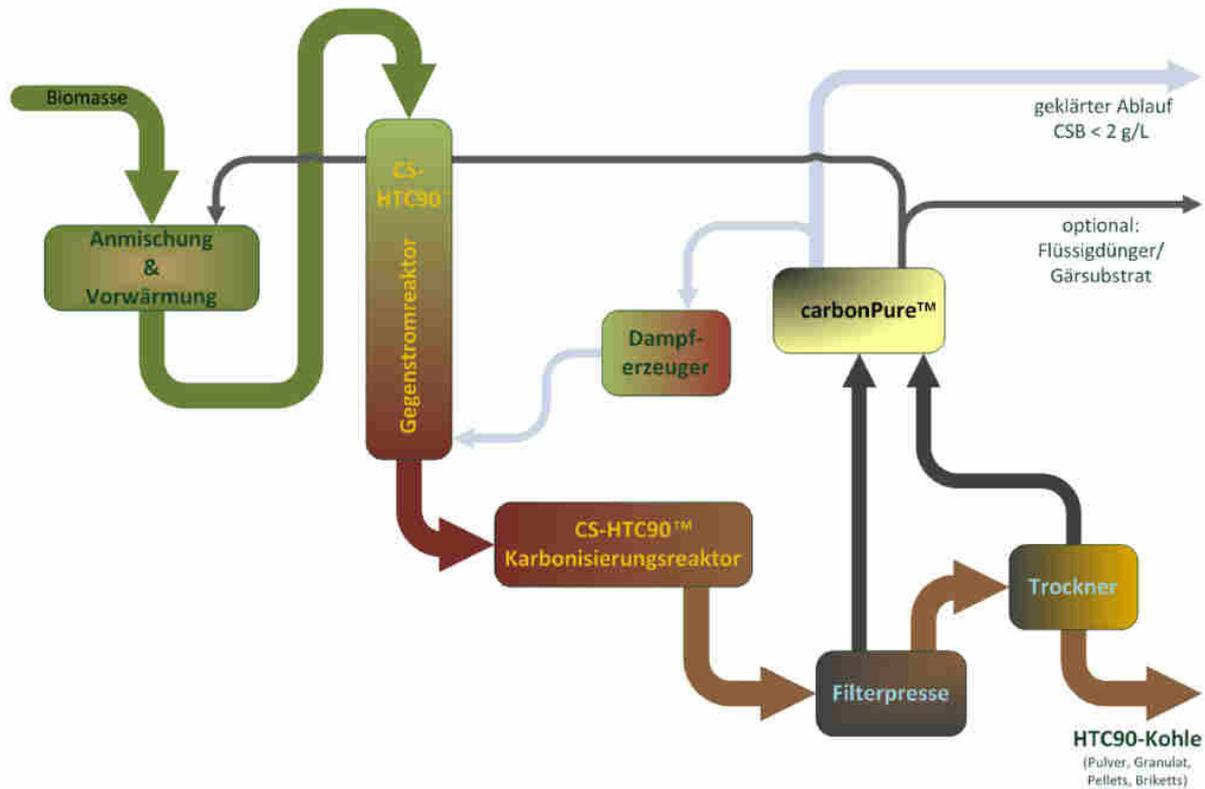


Bild 4.9: Verfahrensschema der Hydrothermalen Carbonisierung am Beispiel der CS-HTC90™-Anlage (CS, 2015)

Auch der Bereich der Phosphorrückgewinnung aus der HTC-Kohle bzw. dem Prozesswasser wird von einigen Firmen erforscht. Die AVA-CO₂ AG hat das AVA cleanphos Verfahren entwickelt, welches im halbtechnischen Maßstab pilotiert werden soll.

Phosphorrückgewinnung nach dem AVA cleanphos Verfahren

Das AVA cleanphos Verfahren (Bild 4.10) basiert auf der Phosphorrückgewinnung aus der HTC-Kohle und erreicht nach Informationen der AVA-CO₂ Schweiz AG Rückgewinnungsraten von 80 % bezogen auf das Ausgangssubstrat Klärschlamm. Der Phosphor liegt, anders als in Klärschlammasche, nicht in einer stabilen Matrix gebunden vor, sondern ist nach dem HTC-Prozess nur leicht an die größeren Kohlepartikel angelagert. Der Phosphor wird zunächst durch einen sauren Aufschluss (Leaching, pH-Wert < 2) aus der entwässerten HTC-Kohle gelöst und in die flüssige Phase überführt. Beim Leaching werden nur geringe Mengen an Schwermetallen aus der HTC-Kohle in die flüssige Phase überführt. Nach einer anschließenden Fest-Flüssig-Trennung ist mehr als 90 % des Orthophosphats in der flüssigen Phase vorhanden. Aus dieser kann entweder durch Zugabe von Calcium ein Calcium-Phosphat ausgefällt oder Phosphorsäure gewonnen werden. Zur Phosphorsäuregewinnung werden in einem weiteren Schritt mittels Membranfiltration die Metall-Sulfate (z.B. Aluminium und Eisen) abgetrennt. Diese sollen nach Informationen der Entwickler wieder in Kläranlagen als Fällmittel eingesetzt werden können. Im letzten Schritt kann die 5 %ige Phosphorsäure auf

20 - 30 % bzw. auch auf 50 - 75 % aufkonzentriert werden. (AVA-CO2 SCHWEIZ AG, 2014; KLÄUSLI, 2015)

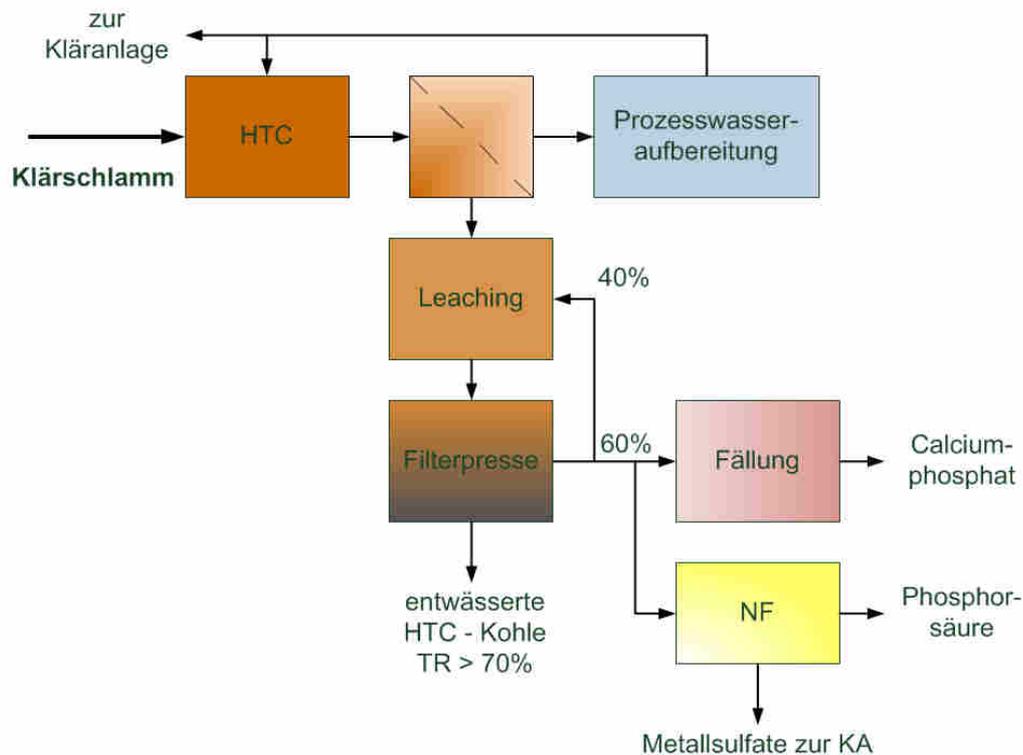


Bild 4.10: Verfahrensschema des AVA cleanphos Verfahrens

Phosphorrückgewinnung nach dem TerraNova® Ultra Verfahren

TerraNova Energy erläutert das Verfahren wie folgt (BUTTMANN, 2015): Im TerraNova® Ultra Verfahren (Bild 3.1) wird entwässertes Klärschlamm mit bis zu 30 % Trockensubstanzgehalt zunächst über einen kontinuierlich betriebenen Wärmetauscher unter Zugabe von Schwefelsäure durch Hydrothermale Carbonisierung zu einer dünnflüssigen Kohleslurry hydrolysiert. Nach einer anschließenden Wärmerückgewinnung wird das Hydrolysat mit Schwefel- und Zitronensäure im pH-Wert zur Rücklösung des Phosphors eingestellt. Die Rücklösequote wird dabei über den pH-Wert festgelegt und liegt beispielsweise bei eisengefällten Klärschlämmen und einem pH-Wert von 2,9 bei über 50 %. In einer Kammerfilterpresse wird die vom Phosphor abgereicherte Klärschlammkohle auf über 65 % Trockensubstanzgehalt ultraentwässert und kann anschließend direkt einer thermischen Verwertung zugeführt werden. Das abgetrennte Filtrat enthält mit etwa 3.500 mg P/l eine hohe Konzentration an gelöstem Phosphat, welches über eine nachfolgende MAP-Kristallisation oder Calciumfällung zu einem verwertbaren Phosphor-Rezyklat rückgewonnen wird. Die Rücklösung des Phosphors erfordert im TerraNova® Ultra Verfahren zur Ultraentwässerung von Klärschlamm außer der Säurezugabe keinen zusätzlichen Verfahrensschritt.

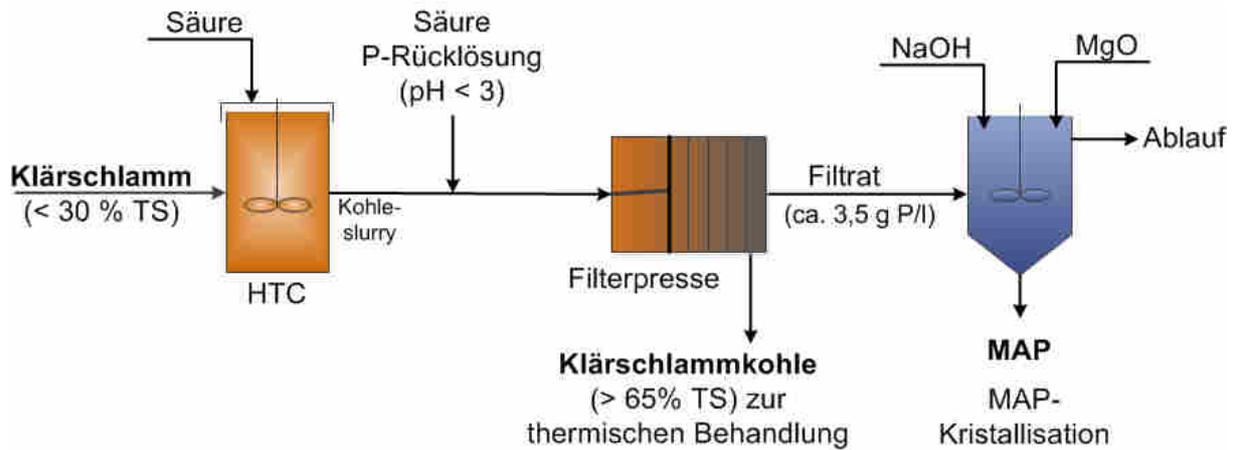


Bild 4.11: Verfahrensschema des TerraNova® Ultra Verfahrens

4.1.8 Pyrolyse bzw. Vergasungsverfahren

Bei der Pyrolyse wird organisches Material in Abwesenheit von Sauerstoff thermisch zersetzt und in Gas und Kohle umgewandelt. Neben Biomasse und Abfall kann auch Klärschlamm einer Pyrolyse zugeführt werden. Pyrolyseanlagen sind laut den Herstellern für eine dezentrale Klärschlammbehandlung geeignet, so dass bspw. Transport- und Energiekosten gegenüber zentralen Verbrennungsanlagen eingespart werden können. Hersteller, die Pyrolyse- bzw. Entgasungsanlagen für die Klärschlammbehandlung entwickeln und bereits auf Kläranlagen realisiert haben, sind u.a. die Eisenmann Anlagenbau GmbH & Co. KG (Pyrobuster®), die PYREG GmbH (PYREG-Verfahren), die THERMO-SYSTEM Industrie- & Trocknungstechnik GmbH (KlärschlammReformer™) sowie die Sülzle Kopf Anlagenbau GmbH (SynGas Klärschlammverfahren).

Bei den Pyrolyse-Verfahren wird der Klärschlamm zunächst auf 70 - 90 % Trockensubstanz entwässert und getrocknet. Hierzu wird i.d.R. die bei der Pyrolyse erzeugte und gewonnene Energie und Wärme genutzt. Der getrocknete Klärschlamm gelangt anschließend in den Pyrolysereaktor.

Beim Pyrobuster® besteht der Reaktor aus einem Zweikammer-Drehrohrföfen. In der ersten Zone, der Pyrolyse, wird der Klärschlamm in Pyrolysekoks und -gas aufgespalten und in der zweiten Zone wird das Pyrolysekoks durch Zugabe von Sekundärluft oxidiert. (EISENMANN, 2015)

Beim PYREG®-Verfahren (vgl. Bild 4.12) wird der getrocknete Schlamm im Reaktor zunächst bei 650°C entgast und anschließend in einer Nachverschmelzung karbonisiert. Die entstehenden Schwelgase werden von Staub befreit und in einer Brennkammer (FLOX-Brenner; FLOX = flammenlose Oxidation) bei 1.250°C verbrannt (PYREG, 2015). Die Wärme kann zur Erhitzung des PYREG®-Reaktors bzw. zur Klärschlamm-trocknung genutzt werden.

Die PYREG GmbH sieht aufgrund des Phosphorgehalts eine Verwertungsoption der entstehenden Rückstände in der Düngemittelproduktion. Durch das Einstellen unterschiedlicher Behandlungsparameter soll der im Klärschlamm enthaltene Phosphor trotz des thermischen Prozesses pflanzenverfügbar bleiben. Die erste großtechnische Umsetzung des PYREG®-Verfahrens erfolgt in der Kläranlage Linz-Unkel (Ausbaugröße 30.000 E). Eine zweite Anlage wird derzeit in Homburg (Saarland) errichtet. Das PYREG®-Verfahren wird von den Verfahrensentwicklern nicht als Pyrolyseverfahren angesehen, so dass es nicht direkt von den Einschränkungen betroffen ist, die in der Begründung zur Klärschlammverordnungsnovelle (N. N., 2015) angeführt sind. Ob die entstehenden Rückstände somit ohne zusätzliche Aufbereitung direkt als Phosphor-Rohstoff für die Düngemittelindustrie vermarktet werden kann, hängt von der Schadstoffbelastung des Produktes und der weiteren rechtlichen Ausgestaltung bzw. Konkretisierung der Nomenklatur ab. Für eine direkte bodenbezogene Verwertung des Reststoffes als Düngemittel sind Anpassungen der Düngemittelverordnung erforderlich, da das anfallende Substrat nicht den dort geregelten Aschen zugeordnet werden kann. Neben den Nachweisen über die stoffliche Unbedenklichkeit sind zudem Nachweise über eine düngende Wirkung zu erbringen.

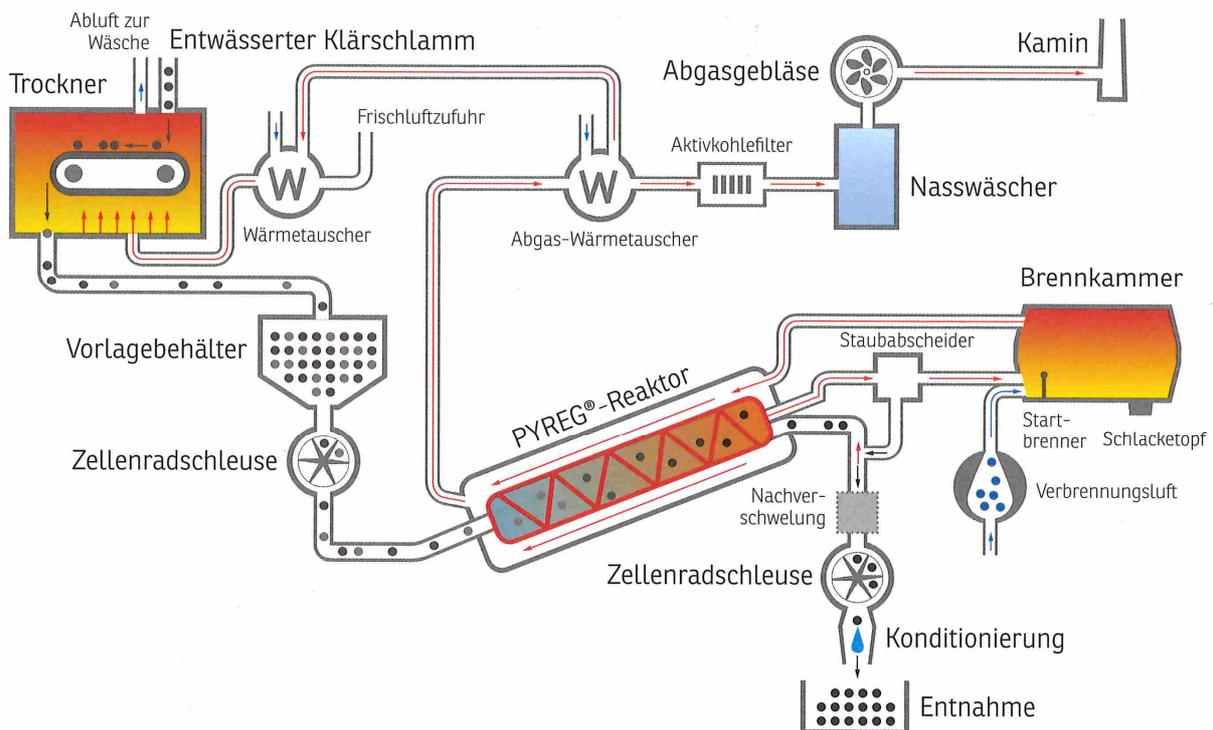


Bild 4.12: Verfahrensschema des PYREG®-Verfahrens (PYREG, 2015)

4.1.9 PASCH Verfahren

Im Rahmen des Verbundvorhabens „PASCH“ wurde ein Verfahren (Bild 4.13) entwickelt und erforscht, das eine Rückgewinnung von Phosphor als pflanzenverfügbares Calciumphosphat (alternativ Magnesiumphosphat) aus Klärschlammverbrennungsaschen ermöglicht. Aus den im Labor und im Technikum durchgeführten Forschungsarbeiten wurde ein Rückgewinnungsprozess entwickelt, der aus den folgenden drei Hauptschritten besteht:

- Chemischer Aufschluss der Aschen (Laugung),
- Reinigung der Aufschlusslösung und
- Produktfällung.

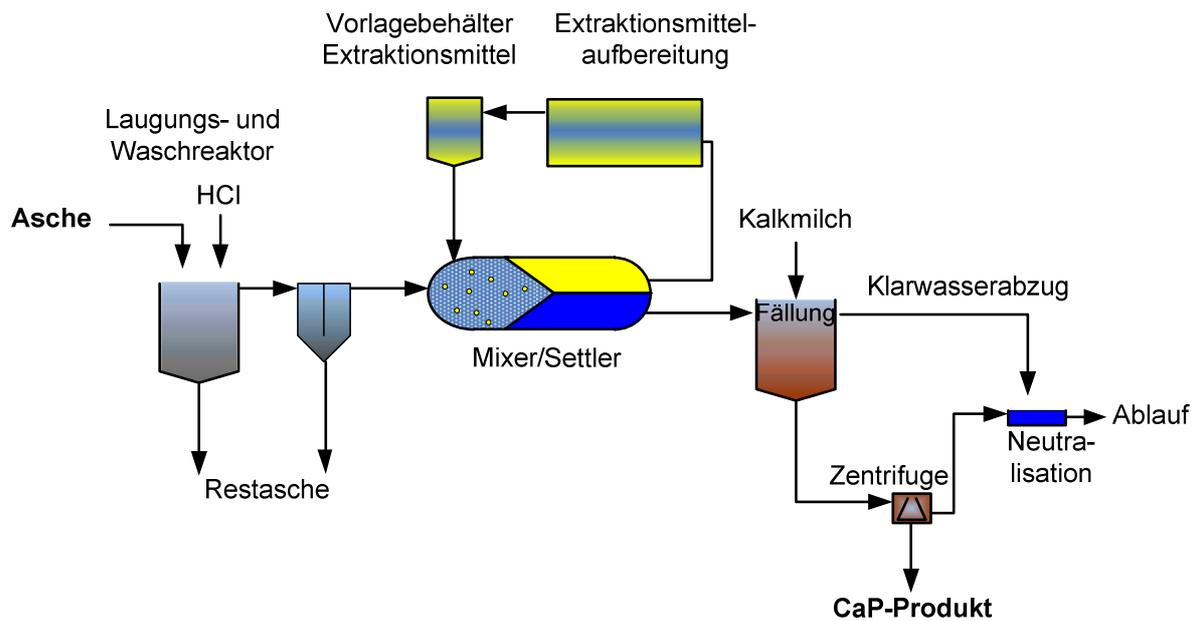


Bild 4.13: Verfahrensschema des PASCH-Verfahrens (PINNEKAMP et al., 2011)

Zur weitgehenden (> 95 %) Freisetzung des Phosphates aus der Klärschlamm- asche wird diese in einem Rührbehälter mit verdünnter Salzsäure bei Umgebungstemperatur vermischt. Anschließend wird die Laugungslösung von dem verbliebenen Rückstand getrennt, der Rückstand gewaschen und weitgehend vom Waschwasser befreit. Die chloridische Laugungslösung wird zur Abtrennung der mit dem Phosphor ebenfalls aus der Asche heraus gelösten Metalle, die als Chlorokomplexe vorliegen, einem mehrstufigen Solventextraktionsprozess unterzogen, für den eine zweistufige Mixer-Settler-Einheit empfohlen wird. Das mit den Metallen beladene Extraktionsmittel wird in einem Nebenschritt gewaschen, reextrahiert und regeneriert, so dass es erneut eingesetzt werden kann. Als letzter Prozessschritt wird die Produktfällung aus der Laugungslösung durchgeführt. Hierbei wurden im Versuchsbetrieb verschiedene Rezyklate generiert. Eine edukt- und produktspezifische Optimierung des großtechnischen Betriebs ist ohne gravierende bau- bzw. maschinentechnische Veränderung möglich, so dass im Betrieb sowohl auf sich ändernde

Aschezusammensetzungen als auch auf veränderte Anforderungen an das Rezyklat reagiert werden kann. Der Gesamtwirkungsgrad bezogen auf den Kläranlagenzulauf beträgt ca. 80 %. (PINNEKAMP et al., 2010)

Das PASCH-Verfahren ermöglicht die Herstellung zweier unterschiedlich zusammengesetzter Calciumphosphate sowie eines Magnesiumphosphates. Das derzeit priorisierte Verfahrenskonzept sieht die Produktion von Calciumphosphat unter Einsatz von Kalkmilch als Fällmittel vor. Hohe Aluminiumgehalte in der Asche erhöhen auch den Aluminiumanteil im Rezyklat, da durch die Solventextraktion keine signifikante Abtrennung des Aluminiums erfolgt. Durch eine Zwischenfällung kann hierauf reagiert werden. Weiterentwicklungen des Verfahrens sehen die Rückgewinnung von Metallen sowie als Alternativoption zum Calciumphosphat-Rezyklat eine Phosphorsäureherstellung vor.

4.1.10 LEACHPHOS Verfahren

Ein weiterer nasschemischer Rückgewinnungsprozess ist das Leachphos-Verfahren, das auf einem Schwefelsäure-Aufschluss basiert. Dieses Verfahren wurde in einem großtechnischen Versuch mit einem stündlichen Durchsatz von 2 Mg Asche in der Schweiz erprobt (SIEGRIST, 2014; P-REX, 2015).

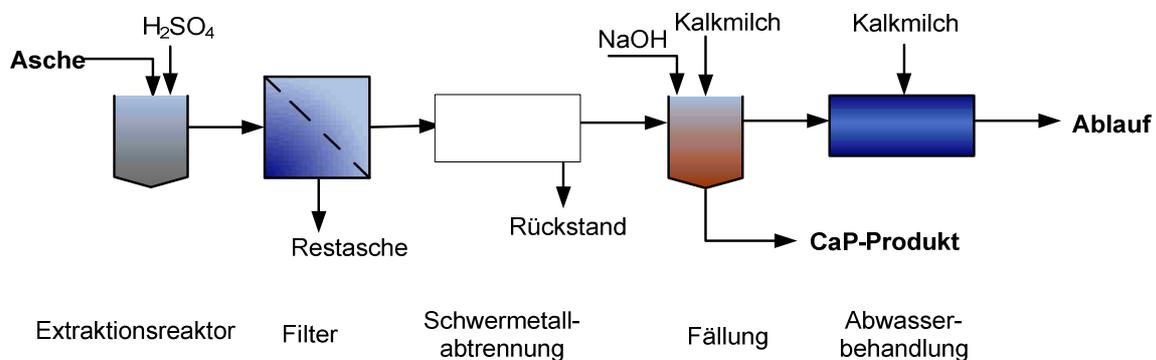


Bild 4.14: Verfahrensschema des LEACHPHOS-Verfahrens

Je nach Aschezusammensetzung und Säureeinsatz gehen 80-95 % des Phosphors aus der Asche in Lösung (P-REX, 2015). Durch Zugabe von Natronlauge oder Kalkmilch wird der pH-Wert erhöht und Phosphor fällt aus. Da die in der Asche enthaltenen Schwermetalle nur teilweise im Extraktionsreaktor gelöst und anschließend mit dem Phosphor gefällt werden, werden deren Konzentrationen im Calciumphosphat-Rezyklat (das auch nennenswerte Anteile Aluminium und Eisen enthält) als akzeptabel beschrieben. Eine gezielte Schwermetallentfernung, wie sie in Bild 4.14 auf Basis von Prozesspräsentationen (MORF, 2013) dargestellt ist, wurde anscheinend letztlich nicht implementiert, so dass wahrscheinlich die Wertstoff-

Schadstoff-Trennung auf einer selektiven Rücklösung bzw. Ausfällung beruht. Hierbei werden die pH-Werte bei der Rücklösung so eingestellt, dass spezifisch mehr Phosphor als (Schwer-)Metalle in Lösung geht. Dies geht jedoch in der Regel mit einem verminderten Rückgewinnungsgrad aufgrund geringerer P-Freisetzung bei weniger niedrigen pH-Werten einher. Die Entfernung der nach der P-Fällung weiterhin in der Lösung vorhandenen Metalle erfolgt in der Prozessstufe der Abwasserbehandlung bei $\text{pH} > 9$.

4.1.11 TETRAPHOS Verfahren

Das TETRAPHOS Verfahren sieht vier Hauptprozessstufen vor (Bild 4.15). Ziel des Prozesses ist die Produktion von Phosphorsäure, von der ein Teil rückgeführt und im ersten Verfahrensschritt, dem Aufschluss, wieder eingesetzt wird. Hierbei werden signifikant weniger Schwermetalle mitgelöst als beim Einsatz von Salz- oder Schwefelsäure, dennoch wird die Rücklösung/der Aufschluss mit ca. 90 % des Phosphorgehaltes der Asche angegeben. Nach einer Entwässerung und Ausschleusung der Feststoffe wird die flüssige Phase zunächst einer Calcium-Fällung zugeführt. Unter Zugabe von Schwefelsäure entsteht Calciumsulfat (Gips); zusätzlich wird mit den H^+ -Ionen der Schwefelsäure durch Protolyse Phosphorsäure gebildet. Anschließend werden die mitgelösten Metalle (Fe, Al, Mg) mittels Ionenaustauschern abgetrennt. Diese werden periodisch mit Salzsäure regeneriert, so dass Metallsalze entstehen, welche in Kläranlagen Wiederverwendung als Fällmittel finden sollen. Abschließend erfolgt die Phosphorsäureerzeugung und -aufkonzentrierung durch eine Nanofiltration und Vakuumverdampfung. Der gesamte Rückgewinnungsgrad des Verfahrens über alle Verfahrensschritte und der prozentuale Phosphorsäureüberschuss gegenüber dem rückgeführten Anteil wurden bislang nicht publiziert. Derzeit wird das Verfahren im Klärwerk Hamburg Köhlbrandhöft im Pilotmaßstab (1 Mg Asche je Tag) erprobt. Die Verfahrensentwickler prognostizieren für eine großtechnische Umsetzung in Hamburg zur Behandlung von 20.000 Mg Asche eine positive Wirtschaftlichkeit bei heutiger Marktsituation. (LEBEK et al., 2015; RAK und SCHURIG, 2015)

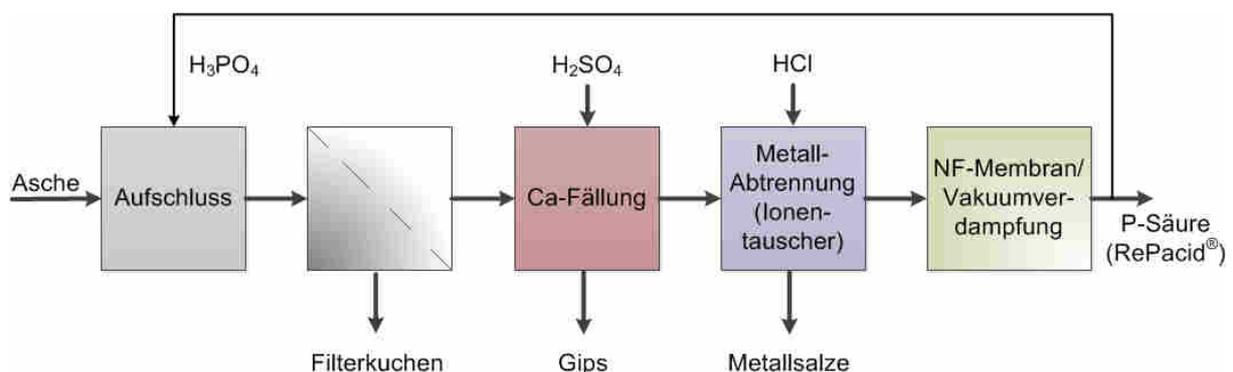


Bild 4.15: Verfahrensschema des TETRAPHOS Verfahrens

4.1.12 ASH DEC/Outotec Verfahren

Ein Verfahren zur thermochemischen Behandlung von Klärschlammaschen zu Phosphordüngern wird seit einigen Jahren stetig weiterentwickelt und firmiert derzeit als Outotec-Verfahren (Synonym zu ASH DEC-, SUSAN-, BAM-Verfahren). Eine Pilotanlage mit einem Durchsatz von 7 Mg/d wurde in Leoben (Österreich) von der inzwischen insolventen Firma ASH DEC betrieben.

Die thermochemische Behandlung von Klärschlammaschen zielt darauf ab, die Schwermetalle durch Verdampfung aus der Asche zu entfernen, da erhöhte Schwermetallgehalte eine direkte Verwendung der Aschen in der Landwirtschaft verhindern. Ein weiteres Ziel ist es, die Phosphate in eine pflanzenverfügbare Form zu überführen. In Bild 4.16 ist das Prinzip des Verfahrens dargestellt. (KLEY et al., 2005)

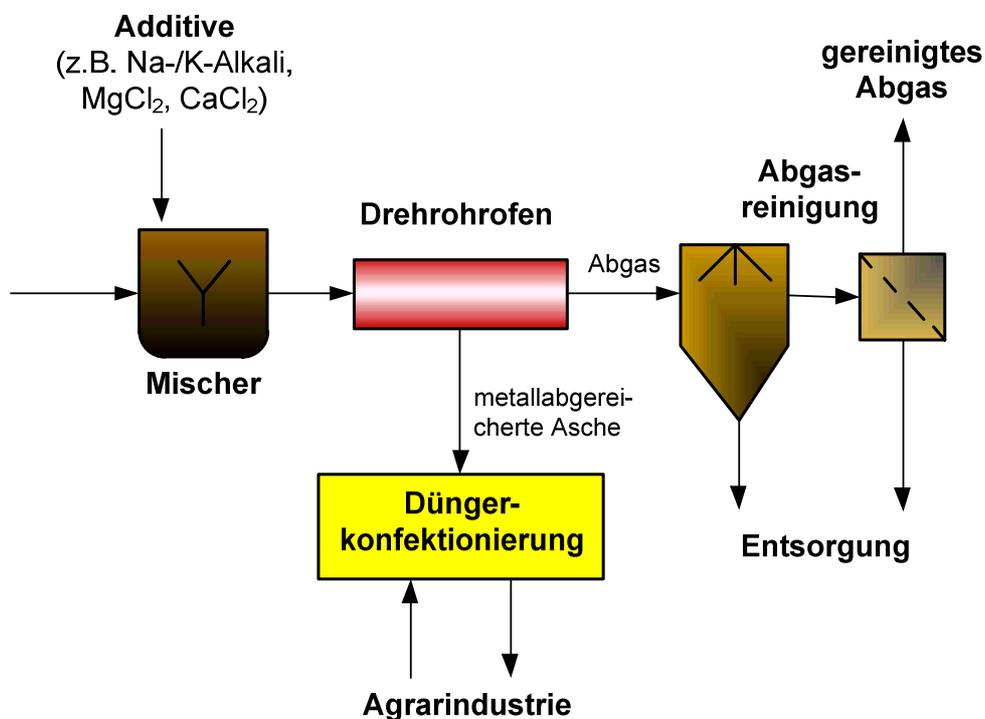


Bild 4.16: Verfahrensschema des ASH DEC Verfahrens

Zunächst wird die phosphathaltige Klärschlammasche mit Calciumchlorid ($CaCl_2$) und/oder Magnesiumchlorid ($MgCl_2$) versetzt; zuletzt wurde Natriumhydrogenkarbonat ($NaHCO_3$) vorgesehen (HERMANN, 2013). Diese Additive werden in destilliertem Wasser gelöst mit der Asche vermischt, so dass im Ausgangsstoff ein Wassergehalt von ca. 30 % eingestellt wird. Das Gemisch wird anschließend der zwanzigminütigen thermischen Behandlung zugeführt. In geschlossenen Systemen wie z. B. Drehrohrofen reagieren die Schwermetalle bei Temperaturen von ca. $1.000^\circ C$ zu den entsprechenden Chloriden und werden verdampft. Das

mit Schwermetallchloriden angereicherte Abgas wird ausgeschleust und die Schadstoffe über einen Nasswäscher abgeschieden und entsorgt (KLEY et al., 2005; ADAM et al., 2007)

Durch das Verfahren ist eine weitgehende Entfrachtung der Asche von den Schwermetallen Pb, Cd, Cu und Zn von > 90 %, von Mo > 80 % und von Sn > 70 % möglich (Kley et al. 2005). Bei der Verfahrensmodifikation unter Zugabe von Karbonaten erfolgt keine Entnahme von Cu und eine geringere Entnahme von Zn und Pb (HERMANN, 2013).

4.2 Pflanzenverfügbarkeit der erzeugten Rezyklate

Grundsätzlich ist die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphaten stark von ihrer Bindungsform abhängig. KRATZ und SCHNUG (2009) haben einen guten Überblick über die einzelnen Verbindungen gegeben, die in Tabelle 4.1 zusammengefasst sind.

Tabelle 4.1: Pflanzenverfügbarkeit unterschiedlicher P-Fractionen aus Düngemitteln (zusammengefasst nach (KRATZ und SCHNUG, 2009))

P-Fractionen	Pflanzenverfügbarkeit	Primärquelle
Monocalciumphosphat (MCP)	unstrittig vollständig und sofort pflanzenverfügbar	FINCK, 1992; SCHILLING, 2000
Dicalciumphosphat (DCP)	gut pflanzenverfügbar; aber langsam wirkend	QUIN, 1982; HIGNETT und BRABSON, 1961; (FINCK, 1992)
Ammoniumphosphat (MAP, DAP)	vollständig und sofort pflanzenverfügbar	SIKORA und MULLINS, 1995; SCHILLING, 2000)
Silikocarnotit / kieselensäurehaltige Phosphate	gut pflanzenverfügbar, dazu zahlreiche Gefäß- und Feldversuche mit Thomasmehl	z.B. MAERCKER, 1895; SCHLEEDE et al., 1939; SCHEFFER, 1956
Fe-/Al-Phosphate	uneinheitlich	z. B. MULLINS et al., 1990; SIKORA et al., 1992; SIKORA und MULLINS, 1995

Rezyklate aus Verfahren, wie z. B. dem PEARL-Prozess oder dem Stuttgarter Verfahren, die auf eine Erzeugung von Magnesiumammoniumphosphat (MAP, anderer Name: Struvit) ausgelegt sind, haben sehr gute Pflanzenverfügbarkeiten.

4.2.1 Bestimmung der Phosphatlöslichkeit

Die Löslichkeit von Phosphaten in unterschiedlichen Lösungsmitteln soll die Pflanzenverfügbarkeit und die daraus resultierende Düngewirkung der untersuchten Düngemittel beschreiben. Um die Löslichkeit der Produkte der einzelnen Verfahren zu bestimmen, werden die standardisierten Prüfverfahren nach VDLUFA (2002) zur Hilfe genommen. Mit dieser einheitlichen Untersuchungsgrundlage lassen sich vergleichbare Ergebnisse erzielen. Der kritische Punkt bei den chemischen Extraktionsverfahren ist, dass es

sich um statistische Methoden handelt, die nur eine momentane Löslichkeit darstellen. Unter realen Feldbedingungen finden kontinuierliche Lösungsprozesse statt, die mit einem Extraktionsverfahren nicht vergleichbar sind. (KRATZ und SCHNUG, 2009)

Es wird kein Extraktionsverfahren universell eingesetzt (Ausnahme: Wasser und Mineralsäureextraktion). Die unterschiedlichen Methoden extrahieren jeweils unterschiedliche P-Fractionen bzw. P-Bildungsformen (KRATZ und SCHNUG, 2009). Die Analysegenauigkeit bei den Löslichkeitsuntersuchungen ist von mehreren Faktoren abhängig. So haben HEINITZ et al. (2013) festgestellt, dass zum Beispiel die Korngrößen der Recyclingprodukte Einfluss auf die Löslichkeitsanalyse haben. Des Weiteren spielt auch das Verhältnis der zu lösenden Stoffe zur Lösungsmittelmenge eine Rolle. Dennoch bieten Löslichkeitsuntersuchungen einen Anhaltspunkt für die Pflanzenverfügbarkeit der erzeugten Rezyklate.

In Bild 4.17 sind Literaturdaten zur Phosphatlöslichkeit der Rezyklate aus unterschiedlichen P-Rückgewinnungsverfahren ausgewertet. Für viele Verfahren finden sich kaum Angaben zur P-Löslichkeit.

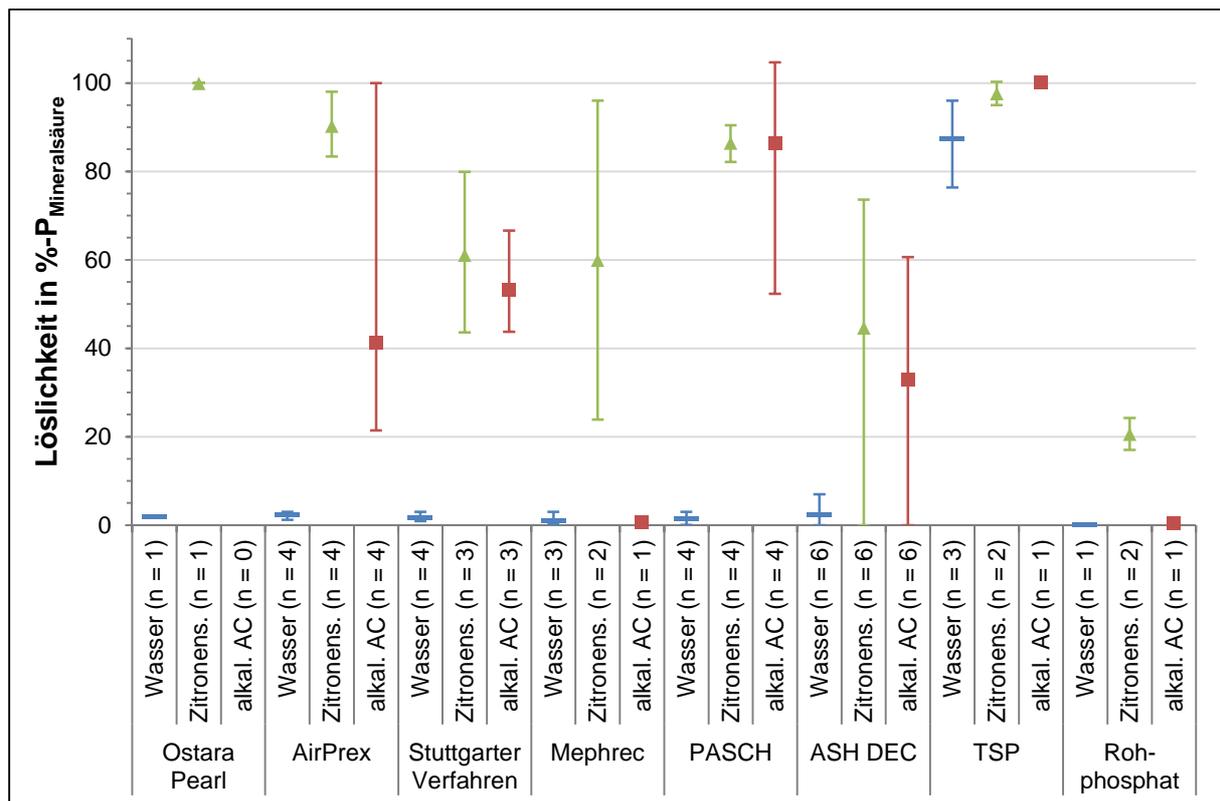


Bild 4.17: Löslichkeit unterschiedlicher P-Recyclingprodukte in Wasser, Zitronensäure und alkalischem Ammonicitrat (alkal. AC) im Vergleich zu Rohphosphat und Triple Superphosphat (TSP)

Es ist zu erkennen, dass für die einzelnen Rezyklate große Schwankungsbreiten der Löslichkeitswerte auftreten. Von den dargestellten Verfahren kann keines ein Rezyklat erzeugen, welches einen nennenswerten wasserlöslichen und damit direkt pflanzenverfügbaren Anteil besitzt. Im Vergleich zum Rohphosphat zeigt sich hingegen eine

verbesserte Löslichkeit in Zitronensäure und alkalischem Ammoncitrat. Zu beachten ist, dass bei allen Verfahren nur wenige veröffentlichte Untersuchungen ausgewertet werden konnten.

4.2.2 Pflanzenversuche

Unter dem Überbegriff Pflanzenversuch wird eine Vielzahl von Untersuchungsmethoden, die im Topf oder auch im Feld durchgeführt werden, zusammengefasst. Da hier zumeist keine einheitliche Vorgehensweise vorliegt, wie es in den Löslichkeitsuntersuchungen der Fall ist, sind unterschiedliche Quellen schwer miteinander zu vergleichen. Aus diesem Grund werden nachfolgend beispielhaft Untersuchungen am Lehrstuhl für Pflanzenernährung an der TU München dargestellt, wo mehrere Verfahren in Gefäßversuchen verglichen wurden.

Für die Versuche wurden Maispflanzen und Rapspflanzen über eine Versuchsdauer von sechs bis neun Wochen eingesetzt. Als Referenzdünger wurde ein voll wasserlöslicher Phosphatdünger in Konzentrationen von 250, 500 und 1000 mg P/Gefäß verwendet. Als Rezyklate kamen MAP-Recyclingdünger aus dem AirPrex, dem Stuttgarter Verfahren und dem P-RoC-Verfahren, sowie Rezyklate aus dem Mephrec und dem ASH DEC-Verfahren in Konzentrationen von je 500 mg P/Gefäß zum Einsatz.

In Bild 4.18 sind beispielhaft die Mittelwerte der Trockenmasseerträge von Mais gegeben. Die Erträge der Gefäße mit Rezyklaten, können dabei direkt mit der Zugabe von 500 mg P/Gefäß an Referenzdünger verglichen werden.

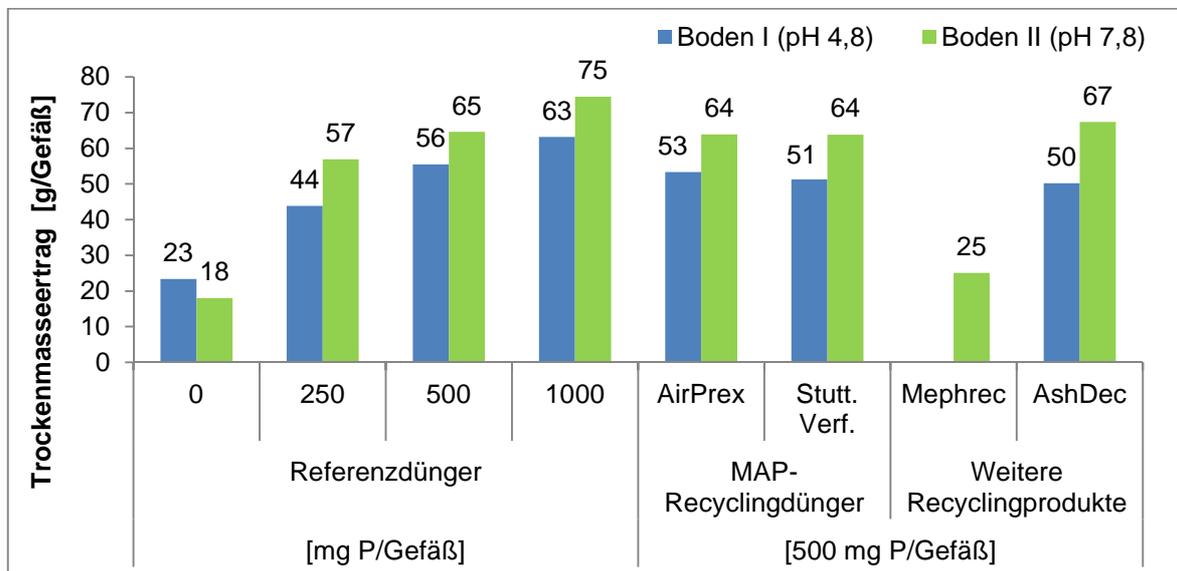


Bild 4.18: Mittelwerte der Trockenmasseerträge der Rezyklate für Mais (LFU, 2015)

Es ist zu erkennen, dass die MAP-Rezyklate und das ASH DEC-Rezyklat ähnliche Erträge beim Mais erreichen wie der Referenzdünger. Das Mephrec-Rezyklat erzielt auf kalkhaltigen Boden nur eine geringe Ertragssteigerung im Vergleich zur ungedüngten Probe. Für dieses wurden aber in anderen Untersuchungen auch weit bessere Pflanzenverfügbarkeiten festgestellt (CABEZA et al., 2011; HEINITZ et al., 2013). Insgesamt fehlen für eine belastbare

Aussage über die Pflanzenverfügbarkeit der einzelnen P-Rückgewinnungsverfahren umfangreiche vergleichende Untersuchungen mit mehrjährigen Topf- und Feldversuchen.

4.2.3 Schlussfolgerungen zur Pflanzenverfügbarkeit

Generell kann aus den veröffentlichten Ergebnissen kein klarer Zusammenhang zwischen Gefäßversuch und Löslichkeitsuntersuchungen abgeleitet werden. Die gute Wasserlöslichkeit scheint selbst bei geringen Vegetationszeiten nicht allein ausschlaggebend für eine schnelle P-Verfügbarkeit. So haben die getesteten MAP-Rezyklate ähnliche Ergebnisse erzielt wie das ASH DEC-Rezyklat, obwohl dieses eine leicht bessere Wasserlöslichkeit aufwies. Fehlende Standardisierungen bei Pflanzenversuchen machen die Ergebnisse verschiedener Studien schwer vergleichbar. Außerdem sind aktuell einige Verfahren bei den veröffentlichten Ergebnissen nicht bzw. unterrepräsentiert. Unter diesen Bedingungen kann kein fundierter Vergleich der Verfahren hinsichtlich der Pflanzenverfügbarkeit der Rezyklate erfolgen.

4.3 Gegenüberstellung der Verfahren

Ein Ziel des Gutachtens ist die Identifikation von Prozessen zur Phosphorrückgewinnung, für die auf Basis des Entwicklungsstandes sowie der Möglichkeiten der Integration in hessische Kläranlagen, ein besonderes Potential für Demonstrationsstandorte in Hessen gesehen wird. Folgende Verfahren wurden an dieser Stelle in Abstimmung mit dem Auftraggeber für einen Auswahlprozess möglicher Pilotierungen in Hessen nicht weiter betrachtet:

Stuttgarter Verfahren: Umfassende Untersuchungen in Offenburg. Diese wurden zuletzt um verschiedene Optionen erweitert, die noch weiter untersucht werden. Ein Projekt in Hessen würde die Koordination der Verfahrensoptimierung ggf. erschweren.

Mephrec: Noch mindestens bis 2017 weitere Untersuchungen in Nürnberg im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes KRN Mephrec.

AVA Cleanphos: Aktuelles DBU Projekt in Karlsruhe. Keine Paralleluntersuchung sinnvoll.

PYREG: Erste Umsetzungen laufen bereits auf der Kläranlage Linz-Unkel bzw. in Homburg.

TETRAPHOS: Untersuchungen in Hamburg haben jüngst begonnen, dies sollte abgewartet werden.

Für die weiteren in Kapitel 4.1 beschriebenen Verfahren erfolgte eine Gegenüberstellung hinsichtlich verschiedener Kriterien, um die Auswahl geeigneter Verfahren für verschiedene Einsatzstellen zu erleichtern.

Entscheidungsmatrix Stoffstrom „Flüssige Phase“/Schlammwasser

Verfahren	PEARL	P-RoC	AirPrex
Technischer (Untersuchungs-)Stand	ca. 10 großtechnische Anlagen weltweit (Kanada, USA; GB, NL)	In ca. 5 Versuchs- und Pilotanlagen erprobt, u.a. KLA Gießen	> 5 großtechnische Anlagen (D, NL)
Mindestanlagengröße	ca. 30.000 - 50.000 E	ca. 25.000 E	ca. 30.000 - 50.000 E
Modularisierbarkeit/ Flexibilität	Drei Standardanlagengrößen verfügbar, sowie mehrere Aggregate parallel möglich	Verschiedene Anlagengrößen sowie mehrere Aggregate parallel möglich, Einstellung der Dosiermenge CSH bzw. Bettvolumina	Verschiedene Anlagengrößen sowie mehrere Aggregate parallel möglich; geringe Anpassungen an bestehender Anlage; sinnvoll nur für gesamten Klärschlammstrom
Phosphorrückgewinnungswirkungsgrad/ Einhaltung AbfklärV	In Verbindung mit Desintegration/ Rücklösung insbes. bei Bio-P-KLA mit P-Gehalten < 27 g P/kg TR möglich (η_{ges} ca. 30 %)	gut kombinierbar mit Rücklöseschritten bei Bio-P-KLA; Wirkungsgrad abhängig von durchgesetzten Bettvolumina, z.B. im Schnitt 60 % (η_{ges} ca. 12 %)	η_{ges} bis ca. 20 %, d.h. für Klärschlämme < 24 g P/kg TR einsetzbar
Rezyklat(qualität): chemisch, P-Verfügbarkeit	MAP „Crystal Green“ aus Schlammwasser: sehr reines Rezyklat, gute Pflanzenverfügbarkeit vielfach nachgewiesen, gewinnbar als Pellets (1-3 mm)	beladenes CSH; evtl. eher für Düngemittelindustrie geeignet	MAP aus Faulschlamm (gewaschen), ggf. dennoch Schlammanhaftungen, Pflanzenverfügbarkeit vielfach nachgewiesen
Betriebsmittel	gering: Magnesium, Natronlauge	gering: CSH	gering: Magnesium
Ökobilanz	Niedriger Chemikalien- und Energieeinsatz in Verbindung mit geringerer Rückbelastung und Gutschrift für MAP führen in Summe zu negativer (guter) Bilanz in allen Kategorien (<i>P-REX</i>).	mittel bis sehr gut in Projekt <i>PhoBe</i>	Aufwendungen an Energie und Chemikalien höher als z.B. bei Pearl, aber als Gesamtverfahren aufgrund besserer Schlammentwässerung dennoch mit negativer (guter) Bilanz bzw. bei Öko- und Humantoxizität fast ausgeglichen (<i>P-REX</i>).

Verfahren	PEARL	P-RoC	AirPrex
Kostenaspekte	ggf. Lizenzgebühren bzw. „Ostara Modell“ bei dem zu bestimmten Konditionen Chemikalien bezogen und erzeugte Rezyklate abgegeben werden; ab 150.000 E wirtschaftlich	600 €/Mg CSH, 40 Mg/50.000 m ³ für im Mittel 60 % Rückgewinnung (LfU Bayern)	Verfahrenskosten werden an den aktuellen Standorten durch Einsparungen gedeckt (keine Inkrustationen, geringere P-Rückbelastung, bessere Entwässerbarkeit bei weniger FHM)
Umsetzbarkeit	Kurzfristig (ca. 2 Jahre) Verfahren ist großtechnisch erprobt; Planung, Genehmigung und Bau bedeuten für diese Technologie keine großen Hürden	Kurzfristig (ca. 2-4 Jahre) Verfahren ist für verschiedene Stoffströme in Pilotanlagen erprobt; Planung, Genehmigung und Bau bedeuten für diese Technologie keine großen Hürden	Kurzfristig (ca. 2 Jahre) Verfahren ist großtechnisch erprobt; Planung, Genehmigung und Bau bedeuten für diese Technologie keine großen Hürden
Abschließende Bewertung für ein zu förderndes Demonstrationsvorhaben in Hessen	Noch keine Umsetzung in Deutschland; für Schlammwasserbereich geeignetes Verfahren zur MAP-Kristallisation; vielfältig kombinierbar; einsetzbar als letzter Verfahrensschritt der P-Rückgewinnung auch für Verfahren zur Rückgewinnung aus Klärschlamm In Hessen auf Bio-P-KLA demonstrierbar	Erprobung erfolgte im Rahmen eines AiF Projektes auf der KLA Gießen, sowie an anderen Standorten in Deutschland mit unterschiedlichen Stoffströmen (Abwasser in Neuburg, Schweinegülle in Boxberg)	Ausgereiftes Verfahren, keine Pilotierung in Hessen erforderlich, da genügend Beispielumsetzungen. Geringe Mengen an P können gewonnen werden, kostendeckender Betrieb für Lösung eines Betriebsproblems

Entscheidungsmatrix Stoffstrom Klärschlamm

Verfahren	Budenheim	TerraNova® Ultra
Technischer (Untersuchungs-)Stand	Laborphase mit Klärschlamm aus KLA mit Fe-Salz-Fällung abgeschlossen; aktuell Technikum KLA Mainz, Nassschlamm-Durchsatz 1-2 m³/h	ca. 5 halbtechnische Umsetzungen des HTC-Prozesses (D, F, ESP, SLO), P-Rückgewinnung noch wenig untersucht
Mindestanlagengröße	ca. 30.000 E	ca. 30.000 E
Modularisierbarkeit/ Flexibilität	Erweiterung aufgrund der benötigten Aggregate möglich: mehrere Extraktionsreaktoren, Filterpresse im Batchbetrieb	Erweiterung aufgrund der benötigten Aggregate möglich: mehrere HTC-Reaktoren, P-Rücklösung in Leitungen, Filterpresse und MAP-Fällung im Batchbetrieb
Phosphorrückgewinnungswirkungsgrad/ Einhaltung AbfKlärV	50 % (pH 5) bezogen auf P im Klärschlamm, d.h. < 38 g P/kg TR möglich, bei höheren P-Gehalten nur über Erreichen des Wirkungsgrades von 50 %	> 50 % (pH 2,9) bei eisengefällten Klärschlämmen, d.h. < 38 g P/kg TR möglich, bei höheren P-Gehalten nur über Erreichen des Wirkungsgrades von 50 %
Rezyklat(qualität): chemisch, P-Verfügbarkeit	Calciumphosphat: keine konkreten Angaben für dieses Verfahren, aber üblicherweise mittlere Pflanzenverfügbarkeit, geeignet für Düngemittelindustrie; Schadstoffgehalte ungeklärt, da keine Schwermetallsenke	MAP: keine konkreten Angaben für dieses Verfahren, aber i.d.R. gute Pflanzenverfügbarkeit, geringe Schadstoffe
Betriebsmittel, Energie	gering: Kreislaufführung von CO ₂ und Wasser, Kalkmilch als Fällmittel	hoch: Schwefel- und Zitronensäure zum Aufschluss, Magnesium und Natronlauge zur MAP-Fällung; Verdichtung des Energiegehaltes von Klärschlamm zur HTC-Kohle; deutlich verbesserte Entwässerung auf 65 % TS erwartet
Ökobilanz	k. A.	k. A.

Verfahren	Budenheim	TerraNova® Ultra
Kostenaspekte	Zuletzt keine Nennung von Kostenangaben.	ca. 45 bis 50 €/Mg Klärschlamm _{entw.} ohne Rückgewinnung
Umsetzbarkeit	Mittelfristig (ca. 4-5 Jahre) Verfahren muss weiter erprobt werden; Planung, Genehmigung und Bau sind aufwendiger als im Schlammwasserbereich	Mittelfristig (ca. 4-5 Jahre) Verfahren muss weiter erprobt werden; Planung, Genehmigung und Bau sind aufwendiger als im Schlammwasserbereich
Abschließende Bewertung für ein zu förderndes Demonstrationsvorhaben in Hessen	Derzeit erfolgt eine Untersuchung im Rahmen einer DBU-Förderung in Mainz. Ein Projekt in Hessen sollte auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen aufbauen.	Möglichkeit für das Land Hessen für eine innovative Umsetzung mit gewissen Risiken (HTC-Reaktionsabwasser, Rezyklat-Qualität, Kosten- und Energiebilanz)

Entscheidungsmatrix Stoffstrom Klärschlammasche

Verfahren	PASCH	LEACHPHOS	ASH DEC
Technischer (Untersuchungs-)Stand	Technikum-Untersuchungen	größtechnischer Versuch 2 Mg Asche/h	große Technikumsanlage, Machbarkeitsstudien/Anlagenplanungen
Mindestanlagengröße	5.000 – 10.000 Mg Asche/a	5.000 Mg – 10.000 Asche/a	20.000 Asche/a
Modularisierbarkeit/ Flexibilität	Sehr gut möglich, da Anlagenkonzept ohnehin Aggregate in Parallelbetrieb (Batch, Redundanzen) vorsieht bzw. diese leicht erweiterbar sind (Solventextraktion)	Sehr gut möglich, da Anlagenkonzept Aggregate in Parallelbetrieb (Batch, Redundanzen) ermöglicht	Zentrale Bausteine (Drehrohrofen und Rauchgasreinigung) haben gewisse Spielräume aber keine Modularisierbarkeit
Phosphorrückgewinnungswirkungsgrad/ Einhaltung AbfKlärV	Bis zu 90 % des Phosphors aus der Asche, d.h. gesetzl. Forderung wird eingehalten	70-80 % des Phosphors aus der Asche, d.h. gesetzl. Forderung wird evtl. eingehalten	>95 %, da keine P-Verluste im Verfahren, d.h. gesetzl. Forderung wird eingehalten
Rezyklat(qualität): chemisch, P-Verfügbarkeit	Calcium- oder Magnesiumphosphat (mit Aluminium), mittlere Pflanzenverfügbarkeit, geeignet für Düngemittelindustrie	Calciumphosphat mit Aluminium, Eisen, ggf. anderen Metallen, da keine Schwermetallseparation im Prozess; mittlere Pflanzenverfügbarkeit, geeignet für Düngemittelindustrie	Rezyklat aus Asche: Ni wird nicht reduziert; bei Verfahrensmodifikation unter Zugabe von Karbonaten/Sulfaten erfolgt keine Entnahme von Ni und Cu und eine geringere Entnahme von Zn und Pb; Pflanzenverfügbarkeit stark von Boden abhängig (sehr unterschiedliche Ergebnisse), bei Einsatz von Karbonaten auf allen Böden gut
Betriebsmittel, Energie	hoch: Salzsäure, Kalkmilch	hoch: Schwefelsäure, Kalkmilch, Natronlauge	mittlerer Chemikalieneinsatz, hoher Energiebedarf für thermische Behandlung im Drehrohrofen
Ökobilanz	Bewertung als „bestes Verfahren“ im Projekt <i>PhoBe</i> , Salzsäureverbrauch (Hg-Emissionen) dominiert Ökobilanz; Gutschriften wegen des hohen Rückgewinnungsgrades; grundsätzlich gilt Ähnliches wie bei LEACHPHOS	In Summe trotz relativ hoher Rückgewinnung aufgrund des hohen Chemikalieneinsatzes und hohen (indirekten) Energiebedarfs, verbunden mit hohen Treibhausgasemissionen diesbezügl. ausgeglichene Bilanz;	In Summe trotz hohen Energieaufwandes und Chemikalieneinsatzes (Na-Zugabe) negative (gute) Energie-Bilanz aufgrund des sehr hohen Rückgewinnungsgrades; hohe

Verfahren	PASCH	LEACHPHOS	ASH DEC
		mittlere Belastungen bei Öko- und Humantoxizität (<i>P-REX</i>)	Belastungen bei Öko- und Humantoxizität (<i>P-REX</i>)
Kostenaspekte	ca. 3 €/kg P (ca. 75 % verbrauchs-mitteldominiert); ca. 200 €/Mg Asche	k. A., aber ähnlich wie PASCH zu erwarten bzw. etwas geringer aufgrund der nicht vorhandenen Metallabtrennung	ca. 2 €/kg P, sehr hohe Investitionen (> 10 Mio. €), geringer Betriebskostenanteil
Umsetzbarkeit	Mittelfristig (ca. 5-7 Jahre) Verfahren muss weiter erprobt bzw. erstmalig großtechnisch pilotiert werden; Planung, Genehmigung und Bau sind relativ aufwendig	Mittelfristig (ca. 4-5 Jahre) Verfahren muss weiter erprobt/ an Aschequalität angepasst werden (s.o.) bzw. erstmalig großtechnisch in einem kontinuierlichen Prozess pilotiert werden; Planung, Genehmigung und Bau sind relativ aufwendig	Kurzfristig (ca. 3 Jahre) Verfahren ist in Pilotanlagen erprobt; eine großtechnische Umsetzung steht noch aus, aber mit Outotec professioneller Anlagenbauer und -betreiber; Planung, Genehmigung und Bau sind relativ aufwendig
Abschließende Bewertung für ein zu förderndes Demonstrationsvorhaben in Hessen	noch keine Pilotierung erfolgt, viele Optionen zur Prozessoptimierung (Selektive Rücklösung und Fällung; Anpassung an andere Stoffe, z.B. Pyrolyse-Aschen; Phosphorsäure-Produktion; Metallrückgewinnung integrierbar) Interessante innovative Option zur Pilotierung in Hessen	Wirkungsgrad etwas zu gering, keine gezielte Schwermetallentfrachtung	Wenn die Aschequalität zu den möglichen Metallreduzierungen des Verfahrens passt, sehr interessante Option. Vertrieb durch die Fa. Outotec, damit in professioneller Hand für thermische Anlagen. Verfahren, das technisch am weitesten fortgeschritten ist, aber bisher ohne Pilotanlage. Interessante Option zur Pilotierung in Hessen direkt <u>im Vollstrom</u> , rel. geringes Verfahrensrisiko, aber hoher Investanteil

4.4 Zuordnung der Rückgewinnungsverfahren zu den Kläranlagen aufgrund technischer Gesichtspunkte

Bei der Zuordnung eines Verfahrens der Phosphorrückgewinnung zu einer Kläranlage bzw. einem Klärschlamm- oder Aschestrom kann bereits im Vorfeld einer konkreten Planung eine gewisse Abschätzung vorgenommen werden, welcher Prozess für den jeweiligen Anwendungsfall geeignet ist. Dabei ist neben der Größe der Anlage bzw. dem letztlich erforderlichen Durchsatz des P-Rückgewinnungsverfahrens insbesondere die Art der Phosphorelimination bei der Abwasserreinigung von Bedeutung.

Verfahren zur Phosphorrückgewinnung im Schlammwasserbereich (z. B. PEARL, P-RoC, AirPrex) sind nur für Bio-P-Kläranlagen sinnvoll einsetzbar, da der Rückgewinnungsgrad bei Kläranlagen mit Metallsalzfällung im Bereich von 5 % des Phosphors bezogen auf den Kläranlagenzulauf liegt.

Auch der Einsatz von Eisen- bzw. Aluminiumsalzen beeinflusst mögliche P-Rückgewinnungsprozesse. So weisen beispielsweise Untersuchungen zum Stuttgarter Verfahren aus, dass in den häufig eingesetzten pH-Wert-Bereichen zur Phosphat-Rücklösung von pH 3 bis 4 die Phosphorfreisetzung bei Klärschlamm aus Kläranlagen, in denen Aluminium als Fällmittel eingesetzt wurde, ca. 30 bzw. 15 % geringer gegenüber Klärschlämmen ausfällt, die aus Kläranlagen mit überwiegendem Einsatz von Eisenfällmitteln stammen (STEINMETZ et al., 2014). Auch wenn diese Werte bislang nur für jeweils einen Klärschlamm ermittelt wurden, sind ähnliche Größenordnungen auch für andere Schlämme zu erwarten bzw. auf anderen Prozesse übertragbar, die einen Aufschluss im sauren pH-Wert-Bereich anstreben (z.B. Budenheim). Nähere Untersuchungen zum genauen Einfluss des Fällmittels auf die Leistungsfähigkeit der Verfahren stehen häufig noch nicht zur Verfügung.

Auch bei den Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Asche ergeben sich verschiedene Einschränkungen bei der Verfahrensauswahl. So hat ein zu hoher Aluminiumanteil in der Asche beim PASCH-Verfahren direkte Auswirkungen auf die Qualität des Rezyklats bzw. dessen Verwertbarkeit, da aus der Aschematrix gelöstes Aluminium in der Solventextraktionsstufe nicht signifikant abgetrennt wird, allerdings bis zu 50 % des Aluminiums aus der Asche in das Rezyklat überführt werden. Verschiedene Schwermetalle in der Asche verdienen eine besondere Betrachtung beim ASH DEC Prozess. Hierbei werden Nickel und Kupfer nicht oder kaum sowie Zink und Blei in nur geringem Maße aus der Asche entfernt, so dass die Verwertbarkeit des Rezyklates als Düngemittel von der Qualität der eingesetzten Asche bestimmt wird.

Neben der Art der Phosphorelimination auf den Kläranlagen ist der P-Gehalt im Klärschlamm ausschlaggebend für die Anwendbarkeit der Verfahren. Dabei ergeben sich die Einschränkungen nicht direkt aus technischen Gesichtspunkten heraus, sondern es findet eine Eingrenzung der Verfahren anhand der Ziele der Novelle der AbfKlärV statt. Die Verfahren können in Abhängigkeit des P-Gehalts im Klärschlamm nur bestimmte Rückgewinnungsziele erreichen. In Bild 4.19 ist aus den sich ergebenden Einschränkungen eine Zuteilung der möglichen zukünftigen Entsorgungs- und Rückgewinnungspfade dargestellt. Szenario 3 der Szenarienbetrachtung (Kapitel 5.3) enthält zusätzliche Hinweise und Überlegungen zur Verfahrensauswahl.

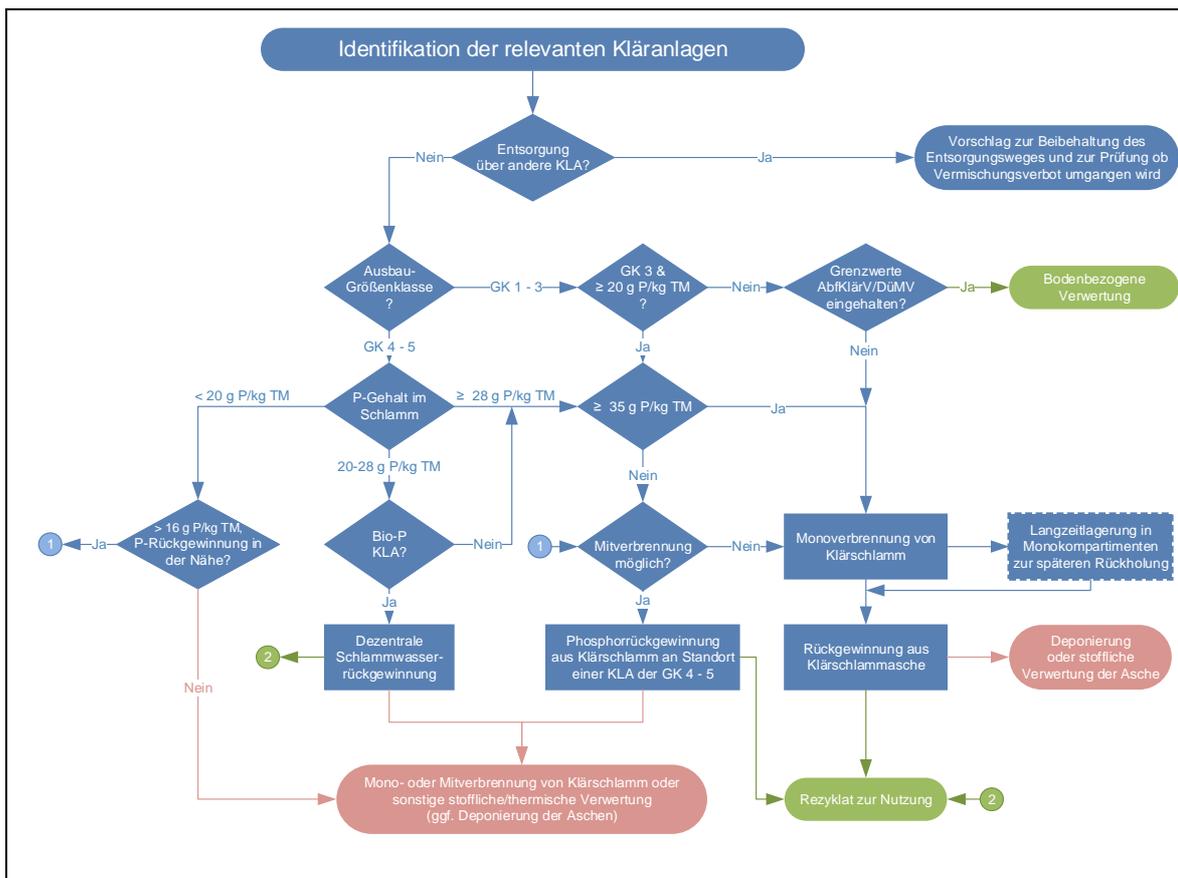


Bild 4.19: Auswahlschema des zur Zielerreichung nach Novelle AbfKlärV bestgeeigneten Rückgewinnungspfadens

Die Art der P-Elimination ist hier im Hinblick auf Kläranlagen mit vermehrter biologischer P-Elimination (Auswahlfeld „Bio-P KLA?“ im Bild) in die Zuordnung der Kläranlagen mit eingegangen, um den Rückgewinnungspfad „Schlammwasser“ zu charakterisieren. Angaben zur vermehrten Bio-P auf den Kläranlagen in Hessen liegen nicht flächendeckend vor (vgl. Kapitel 3.4.4). Es konnte aber anhand der Kläranlagen, die eine P-Eliminationsstufe besitzen, aber keine Fällmitteldosierung angegeben haben, ermittelt werden, welche Kläranlagen eine reine Bio-P fahren. Für diese Kläranlagen wurde in einem weiteren Schritt ermittelt, ob eine anaerobe Schlammstabilisierung zur P-Rücklösung im

Faulbehälter vorliegt. Die Kläranlagen sind in Tabelle 4.2 aufgeführt, wenn der P-Gehalt im Klärschlamm zwischen 20 bis 28 g P/kg TM lag.

Tabelle 4.2: Kläranlagen mit P-Gehalten im Klärschlamm von 20-28 g P/kg TM und vermehrter biologischer P-Elimination ohne Fällmitteldosierung

HAA_ID	Anlagenname	GK	Schlamm- faulung?
300000158	Grossalmerode / Trubenhäusen	3	nein
300000170	Sontra	4	ja
300023013	Burghaun	3	nein
400000026	Fuldabrück / Dennhausen	3	ja
400000054	Fuldataal / Simmershausen	4	nein
400000070	Gudensberg / Maden	4	nein
500000089	Wohratal / Halsdorf	2	ja
700000043	Hofheim Am Taunus / Langenhain	2	ja
800000048	Steinau an der Straße	4	nein

Es zeigt sich, dass zwei der identifizierten Kläranlagen mit Bio-P eine Schlammfaulung besitzen und der GK 3 oder 4 zuzuordnen sind. Das Rückgewinnungspotential aus Schlammwasser in Hessen ist nach den zu Verfügung stehenden Daten also als klein einzuschätzen.

4.5 Synergieeffekte

Für die Ausführung von Maßnahmen auf Kläranlagen zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie gilt es hinsichtlich einer Phosphorrückgewinnung verschiedene Aspekte zu beachten. In Bild 4.20 sind die Kläranlagen dargestellt, die gemäß Kapitel 5 für eine Phosphorrückgewinnung in den verschiedenen Szenarien einbezogen werden und die von Ertüchtigungen zur Einhaltung der Vorgaben der WRRL betroffen sein werden.

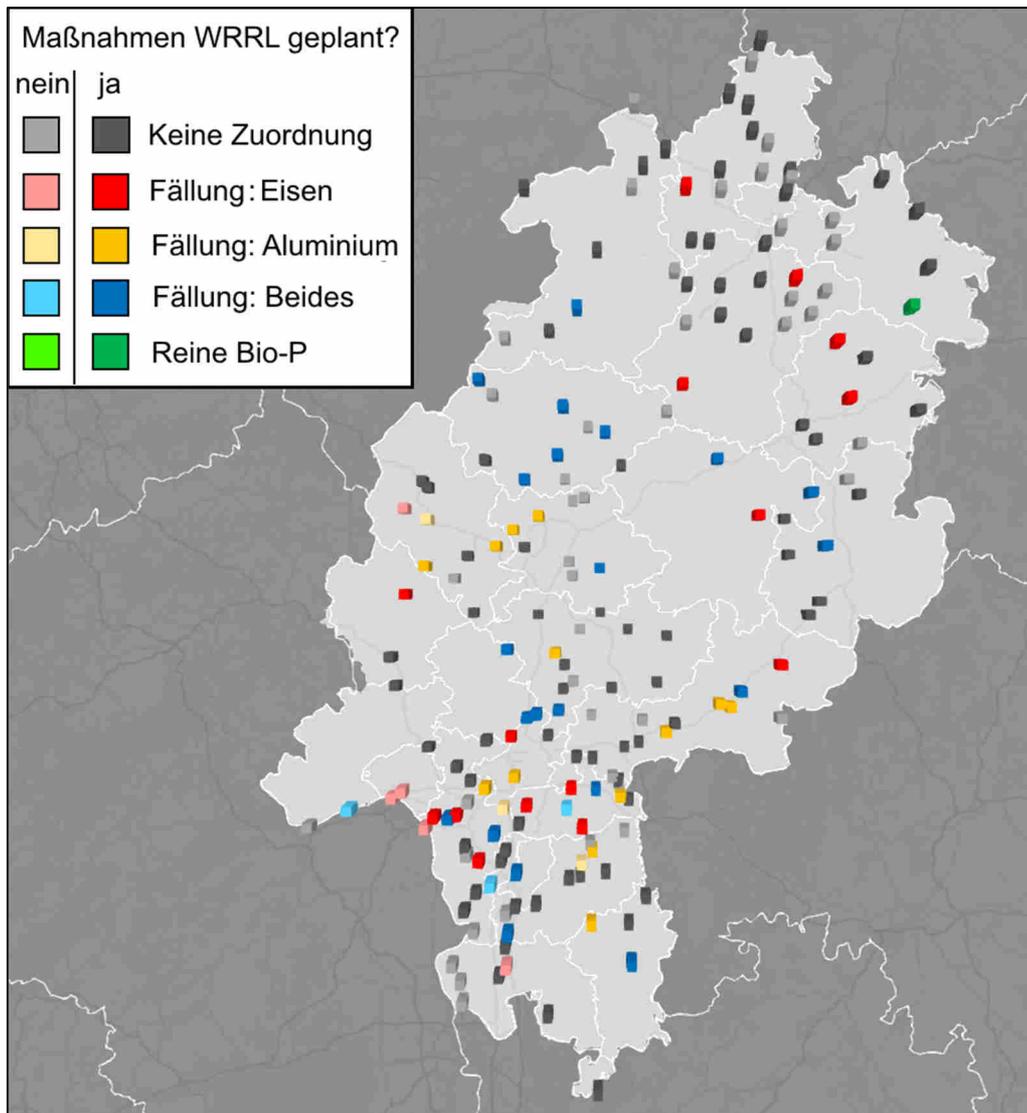


Bild 4.20: Relevante Kläranlagen nach Kapitel 3.9 mit und ohne geplante Maßnahmen zur Umsetzung der WRRL unter Angabe der Art der P-Elimination

Bei Kläranlagen, in denen bislang ausschließlich eine vermehrte biologische Phosphorelimination (sog. Bio-P) vollzogen wird und die sich grundsätzlich für eine Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser eignen (weitere Voraussetzung: Faulung), sollte eine Ausweitung der P-Elimination vorzugsweise über eine Nachfällung ausgeführt werden. Durch das Separathalten des Tertiärschlammes, der ohnehin kaum Klärgaspotenzial birgt, von den übrigen Klärschlammkreisläufen, besteht die Möglichkeit, den Prozess der vermehrten biologischen P-Elimination und die entsprechenden Maßnahmen zur gezielten P-Rücklösung und P-Rückgewinnung aufrecht zu erhalten. Aktuell sei beispielhaft die Kläranlage Sontra erwähnt (grün, vgl. Tabelle 4.2). Weitere Kläranlagen können über eine dem Gutachten nachfolgende Kläranlagenbefragung hinsichtlich der genauen P-Elimination ermittelt werden.

5 Szenarien-Betrachtung zur Eingrenzung des empfohlenen Rückgewinnungskonzeptes

Die ganzheitliche Betrachtung der aktuellen und zukünftig zulässigen Klärschlamm Entsorgungswege des Bundeslandes Hessen ermöglicht mehrere denkbare Phosphorrückgewinnungskonzepte, mit unterschiedlichen Einzellösungen für jede der 184 in Kapitel 3.9 identifizierten Kläranlagen.

Um mögliche Vor- und Nachteile unterschiedlicher Konzepte innerhalb der nachfolgenden Unterkapitel transparent und anschaulich zu erörtern wurden drei Szenarien entwickelt. Diese Szenarien stehen repräsentativ für die jeweils möglichen Unterszenarien mit ähnlicher Ausrichtung.

Szenario 1 und 2 richten sich stark mit Blick auf den möglichen zukünftigen Entsorgungsweg der Klärschlämme aus. Da die thermische Entsorgung nach dem Ausstieg aus der landwirtschaftlichen und landbaulichen Verwertung zunehmen wird, wird diese hier als Hauptentsorgungsweg der Klärschlämme aus den Größenklassen 4 und 5 ausgewiesen. In Hessen müssen spätestens ab 2025 (ggf. früher aufgrund der Verwendung synthetischer Polymere, siehe Kapitel 2.4) zusätzlich mindestens 46.340 Mg TS/a Klärschlamm aus Kläranlagen der Größenklasse 4 und 5 der Verbrennung zugeführt werden. Werden zusätzlich Klärschlämme von Kläranlagen der GK 3 mit Massenströmen größer 100 Mg TS/a einbezogen, so fallen insgesamt 49.400 Mg TS/a zusätzlich zur Verbrennung an. Für die Phosphor-Rückgewinnung nach der Novelle der AbfKlärV sind davon 35.500 Mg TS/a relevant. Die Szenarien 1 und 2 unterscheiden sich im Grundprinzip in der gewählten Verbrennungsart (Mono-/Mitverbrennung) für die zusätzlich thermisch zu entsorgenden Klärschlämme. Beide Szenarien setzen, aufgrund der in den einzelnen Unterkapiteln und im Szenarienvergleich (Kapitel 5.4) besprochenen Gründe, nicht auf eine reine Mono- oder Mitverbrennung des Schlammes.

In Szenario 3 wird die Art der Phosphor-Rückgewinnung hauptsächlich vom jeweiligen P-Gehalt im Klärschlamm und den derzeit publizierten Rückgewinnungsquoten der jeweiligen Technologien, bzw. der Limitierung des jeweiligen Rückgewinnungspfades abhängig gemacht.

Innerhalb der Szenarien-Entwicklung wird unter anderem auf den hessischen Abfallwirtschaftsplan aus dem Jahr 2015 verwiesen (HMUKLV, 2015a). Bild 5.1 stellt die Verteilung von Abfallbehandlungsanlagen und Deponien innerhalb Hessens dar.

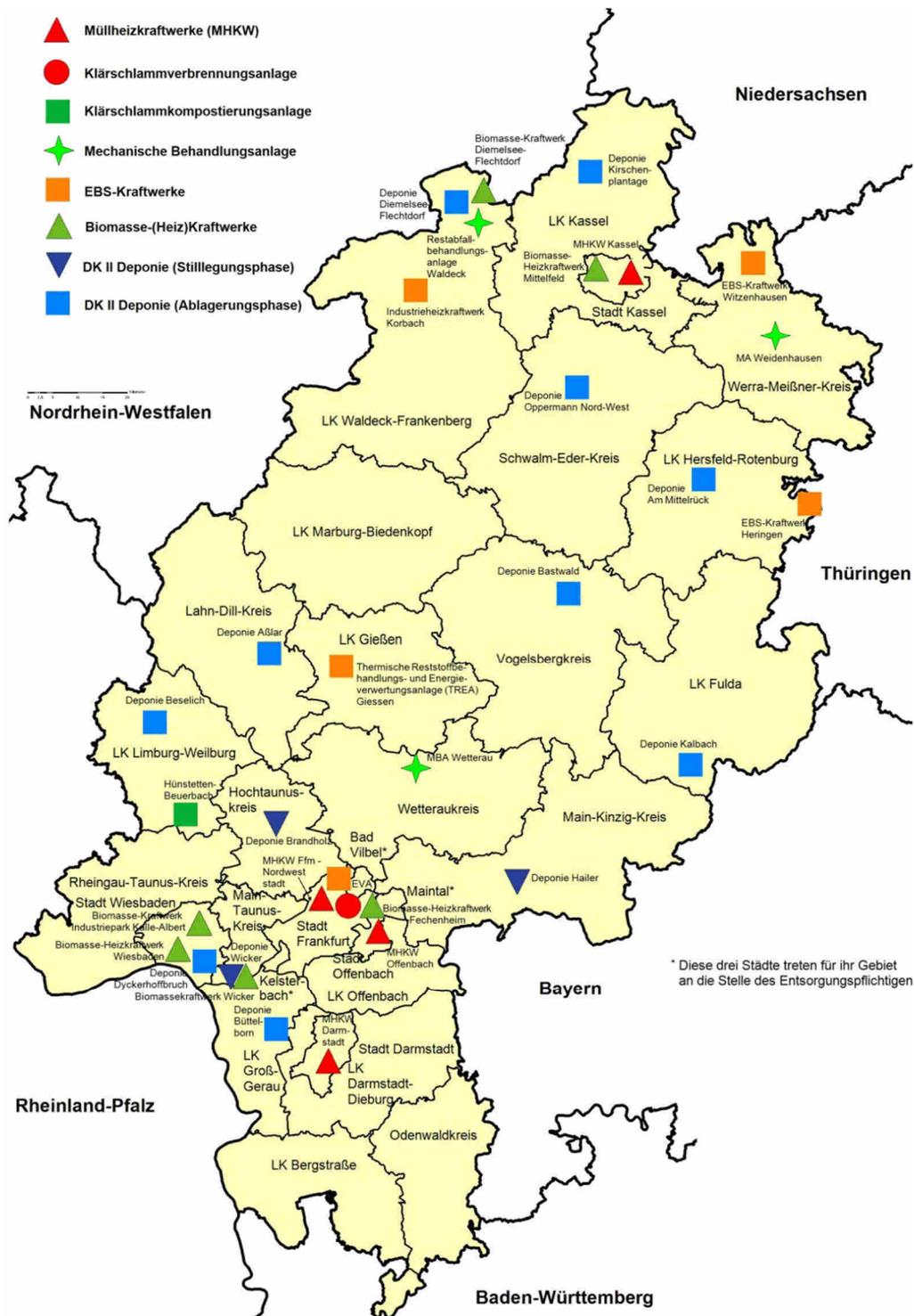


Bild 5.1: Verteilung von Abfallbehandlungsanlagen und Deponien innerhalb Hessens (HMUKLV, 2015a)

Im Bild ist mit der Schlamm-Entwässerungs- und Verbrennungsanlage (SEVA) Sindlingen in Frankfurt am Main eine Klärschlammmonoverbrennungsanlage mit einer Kapazität von 40.000 Mg TS/a in Hessen ausgewiesen (HÖHNE, 2014). Zudem nimmt die Klärschlammverbrennungsanlage der Firma Infraserb Höchst neben industriellen Klärschlämmen auch kommunale Klärschlämme an. Aktuell werden dort zwei Wirbelschichtöfen zur Verbrennung

von je 30.000 Mg TS/a industriellem und kommunalem Klärschlamm betrieben. Drei weitere Wirbelschichtöfen mit circa 50.000 Mg TS/a Kapazität für Klärschlamm werden derzeit überwiegend für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen (EBS) genutzt. Der Betrieb der EBS-Öfen mit Klärschlamm wurde bereits erfolgreich getestet. Nach derzeitigem Kenntnisstand können alle fünf Wirbelschichtöfen ganz oder teilweise als mögliche Reserve für die Klärschlammmonoverbrennung angesehen werden. (APPEL, 2016)

Außerdem stehen vier große Müllheizkraftwerke in Hessen zur Verfügung, von denen sich 3 im Süden befinden (siehe auch Szenario 1). Weitere vorhandene und auch potentielle neue thermische Entsorgungswege für Klärschlamm werden an gegebener Stelle in den einzelnen Szenarien eingeführt.

Nachfolgend werden die drei entwickelten Szenarien zunächst einzeln dargestellt und danach gemeinsam hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit und dem jeweiligen P-Rückgewinnungspotential diskutiert.

5.1 Szenario 1: Weitgehende Rückgewinnung auf Kläranlagenstandorten

Szenario 1 setzt den Fokus auf eine mögliche Aufrechterhaltung der Entsorgung mit aktuell oder eventuell in 2025 verfügbaren Kapazitäten in der Verbrennung möglichst ohne Zubau von Monoverbrennungsanlagen. Die Phosphorrückgewinnung wird mit Blick auf die verfügbare Technik gewählt, die den nachfolgenden Verbrennungsweg (Mono-/Mitverbrennung) möglichst offenhält. Somit wird vermehrt eine P-Rückgewinnung aus dem nassen Schlamm oder – bei entsprechender Eignung – aus dem Schlammwasser direkt auf der Kläranlage für die in Kapitel 3.9 identifizierten Kläranlagen empfohlen. Eine Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm am Standort der Verbrennungsanlage ist aus technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll. Hier wäre zunächst eine Entwässerung des Schlammes auf der Kläranlage zur Verbesserung der Transportfähigkeit durchzuführen, um dann eine Rückverdünnung, P-Rückgewinnung aus dem Nassschlamm und nachfolgende Entwässerung vor der Verbrennung anzuschließen.

Unter Berücksichtigung der voraussichtlich nicht ausreichenden Verbrennungskapazität vorhandener Klärschlammmonoverbrennungsanlagen, werden hier eventuell verfügbare Kapazitäten in der Mitverbrennung aufgeführt. Für die Entsorgung nennenswerter Klärschlamm-Tonnagen bieten sich grundsätzlich folgende Arten von Verbrennungsanlagen an:

- Klärschlammmonoverbrennungsanlagen
- Müllheizkraftwerke (MHKW)
- Kohlekraftwerke
- Zementwerke

Die möglichen Verbrennungswege werden nachfolgend kurz dargestellt und im Hinblick auf ihre Eignung zur Einbindung in das Konzept erläutert. Die Monoverbrennung ist in Hessen neben der zusammengefassten landwirtschaftlichen und landbaulichen Verwertung der Hauptentsorgungsweg für Klärschlamm (vgl. Szenario 2 in Kapitel 5.2). In diesem Szenario wird die Kapazität der vorhandenen Monoverbrennungsanlagen als gleichbleibend angesehen und der Fokus auf alternative Verbrennungsverfahren gelegt. So soll ermittelt werden, ob auf einen Zubau weiterer Verbrennungskapazität weitestgehend verzichtet werden kann.

Drei der vier Müllheizkraftwerke sind in Hessen, wie in Bild 5.1 dargestellt, im Süden des Landes zu finden. Aus der Prognose des Abfallwirtschaftsplans 2015 (HMUKLV, 2015a) ergibt sich für 2025 ein Rückgang des erwarteten Restmüllaufkommens zur Verbrennung von ca. 72.000 Mg/a nassem Restmüll. Hier könnten eventuell nennenswerte Mengen an

Klärschlamm mitverbrannt werden, wenn eine grundsätzliche Eignung der Feuerungsart im jeweiligen MHKW zur Klärschlammmitverbrennung vorliegt. Allerdings sind in die Prognose des AWP noch keine aktuellen Bevölkerungsprognosen (siehe Kapitel 3.7.3) mit eingeflossen. Die effektiv verfügbare Kapazität in den MHKW ist daher niedriger anzunehmen.

Im Jahr 2011 standen bundesweit ca. 716.000 Mg TS/a an genehmigter Kapazität zur Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken zur Verfügung (WIECHMANN et al., 2012). Der mittlere Trockensubstanzgehalt im Klärschlamm liegt hier zwischen 25 bis 35 %. HOLPERT und SCHMIDL (2016) errechneten ein theoretisches Potential der Mitverbrennung in allen deutschen Kohlekraftwerken von 4 Mio. Mg TS/a. Mitverbrennung von Klärschlamm ist für die Betreiber von Kohlekraftwerken unter anderem im Hinblick auf Einsparungen beim Kauf von CO₂-Zertifikaten interessant. Aufgrund einer weniger ausgeprägten Abgasreinigung können Emissionen, die oberhalb der z. B. für MHKW zulässigen Grenzwerte nach 17. BImSchV liegen, nicht ausgeschlossen werden, was in der Vergangenheit zu Bedenken bei der Mitverbrennung von Abfällen wie z. B. Klärschlämmen in Kohlekraftwerken führte (vgl. DEUTSCHER BUNDESTAG, 2011). Zudem wird die Kapazität zur Mitverbrennung in Kohlekraftwerken in den kommenden Jahrzehnten voraussichtlich aufgrund des vermehrten Ausbaus erneuerbarer Energien zurückgehen. So wurde beispielsweise im Kraftwerk Staudinger (Großkrotzenburg) der Bau eines geplanten 6. Blocks vom Betreiber aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen nicht weiterverfolgt (KÖHLER, 2016). Aktuell werden im Kraftwerk Staudinger ca. 18.000 Mg TS/a an Klärschlamm – zu einem nicht bezifferten Anteil auch aus anderen Bundesländern – verbrannt (WIECHMANN et al., 2012). Bezogen auf die Gesamtmenge an hessischem Klärschlamm zur Mitverbrennung in den Jahren 2012 bis 2014 von 16.530 Mg TS/a läge also zum heutigen Zeitpunkt allein im Kohlekraftwerk Staudinger sogar eine Überkapazität vor, wenn auf die Verbrennung von Klärschlämmen aus anderen Bundesländern verzichtet würde.

Für eine thermische Nutzung des Energiegehaltes getrockneten Klärschlammes zur Zementherstellung stehen in Hessen sowohl in Mainz-Amöneburg, als auch in Großenlüder-Müs Zementwerke mit Klinkererzeugung (Voraussetzung) zur Verfügung. HOLPERT und SCHMIDL (2016) geben – mit Bezug auf Zahlen des Vereins Deutscher Zementwerke für die Verwertung von Klärschlamm in der Zementherstellung – in der Bundesrepublik Deutschland ein theoretisches Potential von mehr als 2 Mio. Mg TS/a an. Gleichzeitig werden die aktuell genutzten Kapazitäten mit 120.000 Mg TS/a angegeben. Die tatsächlich verfügbaren Kapazitäten innerhalb und außerhalb von Hessen sind nicht zu beurteilen, so dass dieser Entsorgungsweg hier als mögliche Reserve behandelt werden muss.

Die Aufstellung der möglichen Mitverbrennungswege und der eventuell vorhandenen Kapazitäten zeigt, dass mittelfristig Kapazitäten zur Verfügung stehen könnten, die zur Verbrennung von Klärschlamm genutzt werden können, der ab 2025 nicht mehr in die landwirtschaftliche Verwertung gehen darf. Eine langfristige Entsorgungssicherheit ist aufgrund der zu erwartenden Umstellungen z. B. in der Energieversorgung innerhalb der Bundesrepublik mit diesem Gutachten jedoch nicht zu beurteilen.

Für Szenario 1 wurden ab 2025 folgende Festlegungen und Annahmen getroffen:

1. Es werden Klärschlamm-mengen und P-Gehalte für die in Kapitel 3.9 identifizierten 184 Kläranlagen zu Grunde gelegt (zusätzliche Angabe des Rückgewinnungspotentials und der Menge der weiteren Klärschlämme der GK 4 und 5 aus der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 3.6, ohne Einbindung in das Konzept).
2. Ab 2025 nicht mehr zur landwirtschaftlichen Verwertung zugelassene Klärschlämme aus den nach Kapitel 3.9 relevanten Kläranlagen werden als zur Mitverbrennung anfallende Schlämme klassifiziert und es erfolgt vorab eine P-Rückgewinnung aus dem nassen Klärschlamm oder dem Schlammwasser.
3. Klärschlämme aus Kläranlagen die in 2014 ganz oder teilweise über die Mitverbrennung entsorgt haben oder Klärschlämme bei denen der Verbrennungsweg 2014 unbekannt war, werden ab 2025 vollständig als mitverbrannte Klärschlämme behandelt und es erfolgt vorab eine Rückgewinnung aus dem nassen Klärschlamm oder dem Schlammwasser.
4. Klärschlämme aus Kläranlagen die in 2014 vollständig über die Monoverbrennung entsorgt haben, werden auch in 2025 der Monoverbrennung angedient und es erfolgt eine Rückgewinnung aus der Asche.

Aus den getroffenen Annahmen und der Festlegung des Betrachtungsrahmens ergeben sich die in Bild 5.2 dargestellten Entsorgungswege für die Klärschlämme aus den für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen ab 2025.

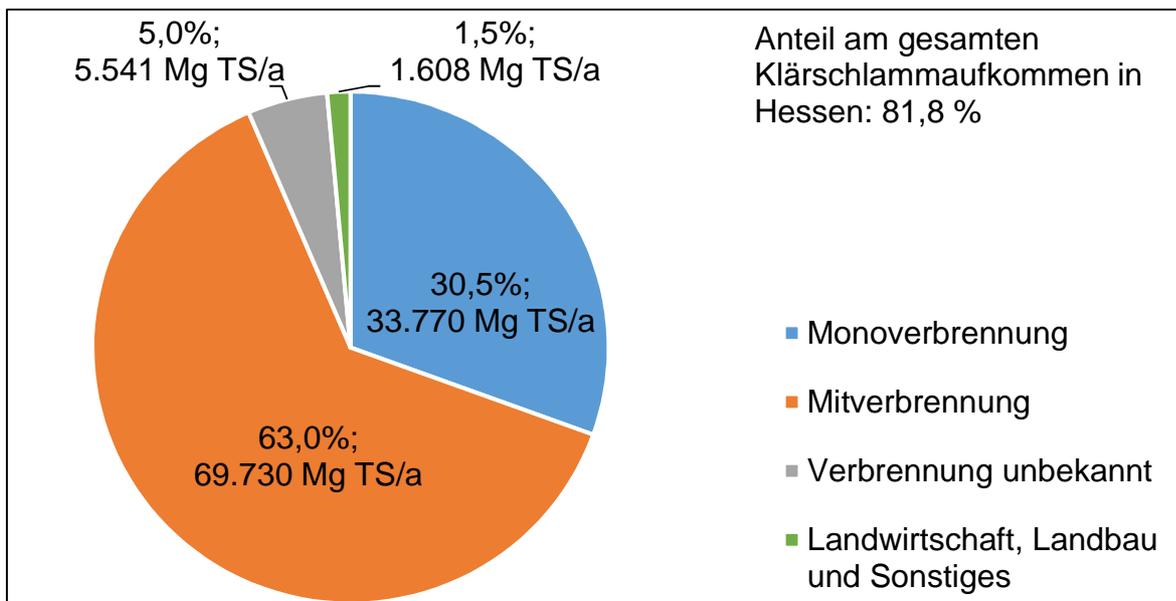


Bild 5.2: Entsorgungswege der für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen in 2025 nach Szenario 1

Der Anteil von 1.608 Mg TS/a zur landwirtschaftlichen, landbaulichen oder sonstigen Verwertung macht 1,5 % der Klärschlammmenge der relevanten Kläranlagen aus. Es handelt sich um die 22 Kläranlagen der GK 3 mit weniger als 100 Mg TS/a Klärschlammfall, die aufgrund der marginalen P-Mengen aus dem Betrachtungsrahmen herausgenommen wurden (vgl. Einführung in Kapitel 5). Hier scheint, sofern die entsprechenden Schadstoffgrenzwerte eingehalten werden, eine landwirtschaftliche Verwertung in Kläranlagennähe angebrachter zu sein, als lange Transportwege zu Verbrennungsanlagen für den Klärschlamm und z. B. hoher Chemikalieneinsatz zur P-Rückgewinnung vor Ort. Bei sich ändernden rechtlichen Rahmenbedingungen, müsste dieser Anteil an Klärschlamm eventuell zu einem späteren Zeitpunkt ebenfalls einer P-Rückgewinnung zugeführt werden. Durch die weitgehende Mitverbrennung der zusätzlich zur Verbrennung anfallenden Klärschlämme, würden 63 % der betrachteten Klärschlämme spätestens ab 2025 über diesen Weg entsorgt. Der Anteil der Monoverbrennung läge bei 30,5 %.

Bild 5.3 zeigt die räumliche Verteilung der Entsorgungswege der relevanten Kläranlagen in 2025 bei Zugrundelegung einer weitgehend erfolgenden Mitverbrennung des Klärschlammes. Die Klärschlämme zur Monoverbrennung fallen in den Kläranlagen der GK 5 in Wiesbaden und Frankfurt am Main, sowie in einer Kläranlage der GK 3 und einer Kläranlage der GK 4 an. Diese wurden bereits im Jahr 2014 vollständig monoverbrannt.

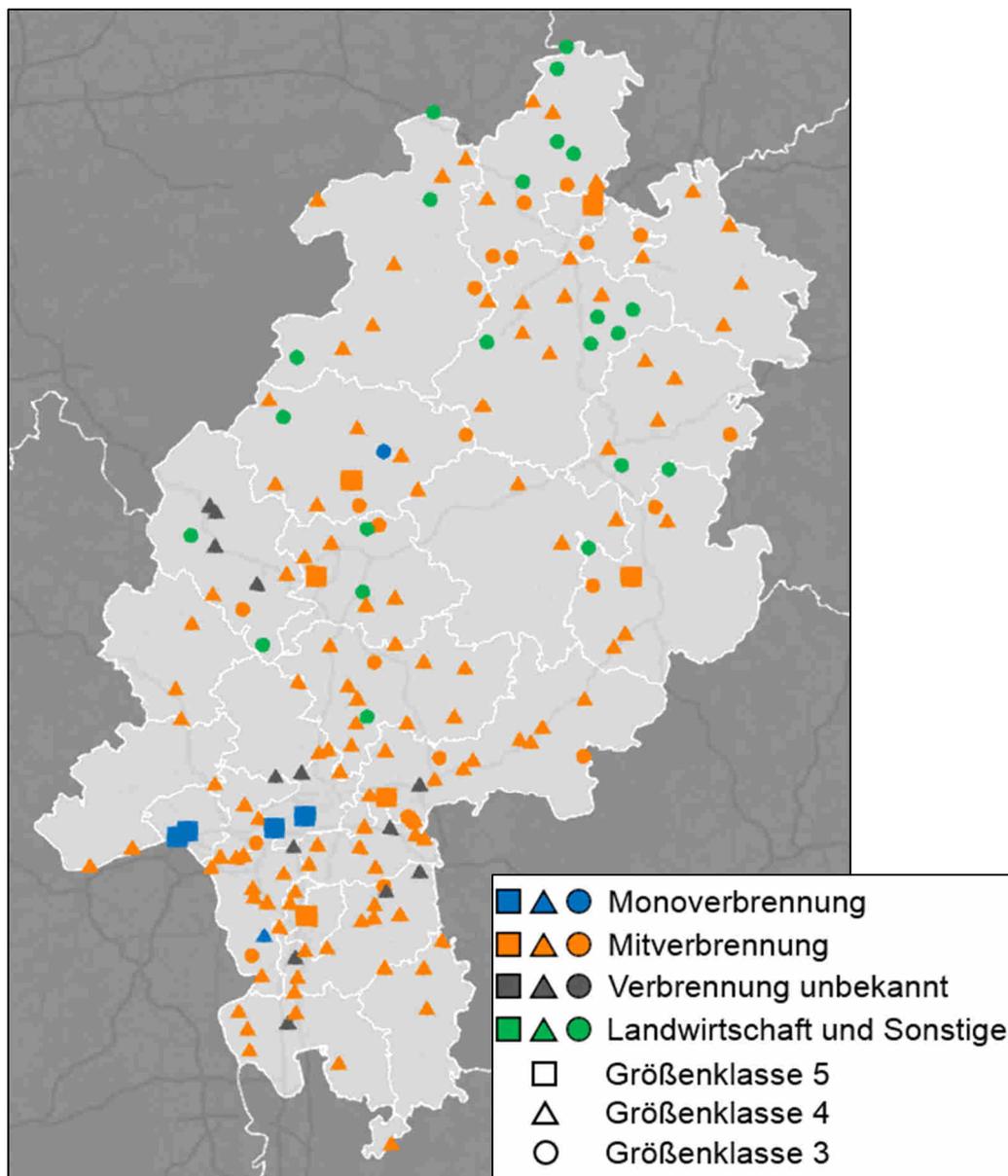


Bild 5.3: Kartographische Darstellung der Entsorgungswege der relevanten Kläranlagen in 2025 bei Anwendung von Szenario 1

Bei Analyse der Karte zeigt sich, dass die hauptsächlichen Kooperationspotentiale bei der Phosphorrückgewinnung bei den sechs Kläranlagen liegen, die im Szenario über die Klärschlammmonoverbrennung entsorgen würden. Bei gemeinsamer Verwendung der, aufgrund der geplanten Schlammfäulung für Kläranlagen Niederrad/Griesheim und Sindlingen, freiwerdenden Monoverbrennungskapazitäten in der SEVA Sindlingen könnte hier eine Rückgewinnungsanlage aus Asche gebaut werden. Eventuell werden weiterhin kommunale Klärschlämme in der Klärschlammverbrennungsanlage der Infraserb Höchst verbrannt. Grundsätzlich wäre die Errichtung einer größeren Anlage zur Verwertung beider Ascheströme unter einer einzigen Betreibergesellschaft denkbar. Es wäre im Falle einer

durch die Betreiber gewünschten getrennten Lösung aber möglicherweise noch eine zweite P-Rückgewinnungsanlage aus Klärschlammasche notwendig.

Die Anzahl der möglicherweise zu planenden P-Rückgewinnungsanlagen aus Klärschlamm direkt am Kläranlagenstandort liegt bei maximal 157, wie Tabelle 5.1 zeigt.

Tabelle 5.1: Anzahl der potentiellen Rückgewinnungsanlagen bei weitgehender Phosphorrückgewinnung am Kläranlagenstandort (Szenario 1) nach GK

Regierungspräsidium	GK	Anzahl Kläranlagen		
		Monoverbrennung	Mitverbrennung	Verbrennung unbekannt
Darmstadt	3	0	8	0
	4	1	66	9
	5	4	2	0
	Σ	5	76	9
Gießen	3	1	4	0
	4	0	18	4
	5	0	2	0
	Σ	1	24	4
Kassel	3	0	11	0
	4	0	30	0
	5	0	2	0
	Σ	0	43	0
Hessen		6	143	13
Anlagen zur P-Rückgewinnung		1 bis 2	max. 143	bis zu 13 (Sicherheit)
Anzahl Kläranlagen-Betreiber		4	139	13

Die Anzahl an z. T. sehr klein zu dimensionierenden Rückgewinnungsanlagen für nassen Klärschlamm sollte aus wirtschaftlichen Gründen durch Zusammenlegungen möglichst verringert werden. Da eine Rückgewinnung aus nassem Klärschlamm mit größer 95 % Wassergehalt den Transport schon über mittlere Strecken unwirtschaftlich werden lässt, wurde vor allem nach Kooperationspotentialen innerhalb eines 10 km Radius um Kläranlagen der GK 5 gesucht (Bild 5.4, Tabelle 5.2, Tabelle 5.3). Zudem sind in Tabelle 5.2 auch die Klärschlammmengen bei Kooperation der Kläranlagen im 20 km Radius um die Kläranlagen der GK 5 angegeben. Die Kläranlagengröße ab 100.000 E wurde dabei bewusst als minimale Kläranlagengröße für den Standort einer gemeinsamen P-Rückgewinnung gewählt. Durch die auf diesen Kläranlagen nach erfolgter

Rückgewinnung notwendige Entwässerung des Klärschlammes, fallen große Mengen an Prozesswasser an, die behandelt werden müssen. Diese können voraussichtlich in kleineren Kläranlagen vor allem im Hinblick auf die zu erwartende Ammoniumfracht nicht ausreichend gereinigt werden. Aus Gründen der Betriebssicherheit sollte sich eine mögliche Kooperation von Kläranlagen mit dem Ziel der P-Rückgewinnung daher auf Standorte der GK 5 konzentrieren. Innerhalb der Grenzen, die für Szenario 1 definiert wurden, kämen insgesamt 6 Kläranlagen der GK 5 mit Entsorgungsweg Mitverbrennung als Agglomerationsort für die P-Rückgewinnung umliegender Kläranlagen in Frage.

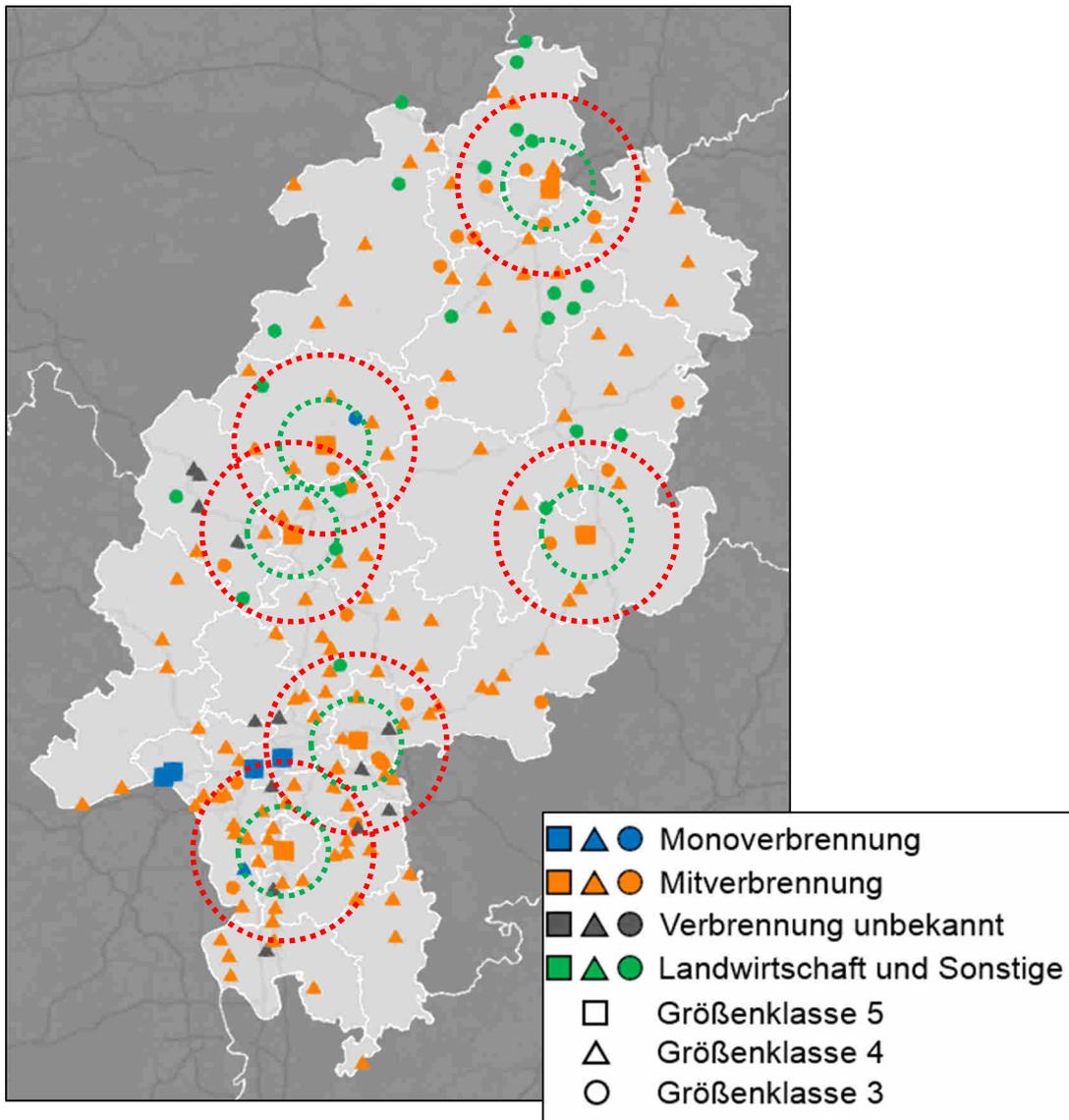


Bild 5.4: Identifikation von Kooperationspotentialen von Kläranlagen in Szenario 1

Wie Bild 5.4 zeigt, liegen vor allem für Darmstadt (8 KLA, 7 Betreiber) und Hanau (9 KLA, 8 Betreiber) viele Kläranlagen im 10 km-Radius. Diese haben zudem einen relativ hohen kumulierten Klärschlammmanfall, wie Tabelle 5.2 zeigt. Die jeweiligen Betreiber, die im Nahbereich mit den Kläranlagen GK 5 kooperieren könnten, sind Tabelle 5.3 aufgelistet.

Tabelle 5.2: Klärschlammmenge bei Kooperation verschiedener Kläranlagen [Mg TS/a] (vgl. Tabelle 5.3)

Radius [km]	Kläranlagen der GK 5 als Standorte für gemeinsame P-Rückgewinnungsanlagen					
	Darmstadt	Fulda / Gläserzell	Kassel / Wolfsanger	Marburg / Cappel	Giessen / Margaretten-hütte	Hanau / Nordwest
KS-Anfall KLA GK 5:	2.620	2.218	4.581	1.879	3.174	2.791
Radius 10 km	126	158	119	273	163	541
	599		336	141	177	240
	332		167		869	643
	776		240			159
	641					174
	403					101
	841					248
						354
Zwischen-summe 10 km	3.717	158	861	414	1.209	2.460
Anzahl KLA	7	1	4	2	3	8
Radius 20 km	183	403	122	258	986	118
	243	108	209	1.067	199	382
	350	177	216	113	497	513
	382	654	117	66	146	785
	195	404	309		439	
	88	115			115	
	454				141	
	275				273	
	118					
	382					
	513					
	785					
	103					
	367					
	791					
	52					
	1.300					
1.495						
Zwischen-summe 10-20 km	8.076	1.861	973	1.504	2.796	1.798
Anzahl KLA	18	6	5	4	8	4
Steigerung der zu behandelnden Klärschlammmenge auf der Kläranlage GK 5 [%]						
10 km Radius	+142	+7	+19	+22	+38	+88
20 km Radius	+450	+91	+40	+102	+126	+153

Tabelle 5.3: Kläranlagen der GK 5 und im 10 km-Radius befindliche Kläranlagen der GK 3 und 4, die dorthin Klärschlamm anliefern könnten

Darmstadt HSE Abwasserreinigung GmbH & Co KG	Fulda / Gläserzell AV Fulda	Kassel / Wolfsanger KASSELWASSER	Marburg / Cappel AV Marburg	Giessen / Margaretenhütte Mittelhessische Wasserbetriebe	Hanau / Nordwest Hanau Infrastruktur Service
Weiterstadt / Gräfenhausen, GK 4, Stadtwerke Weiterstadt	Grossenlüder / Kleinlüder, GK 3, ZV Gruppenklärwerk Hosenfeld-Großenlüder	Fuldatal / Ihringshausen, GK 3, Gemeinde Fuldatal	Lohra / Damm, GK 4, AV Mittlere Salzböde	Lahnau / Dorlar, GK 4, Gemeinde Lahnau	Mühlheim Am Main, GK 4, AV Untere Rodau
Langen, GK 4, AV Langen-Egelsbach		Fuldatal / Simmershausen, GK 4, Gemeinde Fuldatal	Ebsdorfergrund / Hachborn, GK 3, Gemeinde Ebsdorfergrund	Biebertal / Rodheim-Bieber, GK 4, Gemeinde Biebertal	Heusenstamm, GK 4, Stadt Heusenstamm
Büttelborn, GK 4, Gemeinde Büttelborn		Ahnatal / Heckershausen, GK 3, Gemeinde Ahnatal		Lollar, GK 4, ZV Lollar-Staufenberg	Rodgau / Weiskirchen, GK 4, Stadtwerke Rodgau
Griesheim, GK 4, Stadt Griesheim		Fuldabrück / Dennhausen, GK 3, Gemeinde Fuldabrück			Hainburg / Hainstadt, GK 3, Gemeinde Hainburg
Pfungstadt, GK 4, Stadt Pfungstadt					Hainburg / Klein-Krotzenburg, GK 3, Gemeinde Hainburg
Darmstadt / Eberstadt, GK 4, HSE Abwasserreinigung GmbH & Co KG					Großkrotzenburg, GK 4, Gemeinde Großkrotzenburg
Mühlital / Nieder-Ramstadt, GK 4, AV Modau					Erlensee / Rückingen, GK 4, Gemeinde Erlensee
					Nidderau / Windecken, GK 4, Stadtwerke Nidderau

Es ist möglich allein durch das Zusammenlegen von Rückgewinnungsanlagen im Radius von 10 km um Kläranlagen der GK 5, die Anzahl der P-Rückgewinnungsanlagen aus nassem Schlamm von max. 157 auf max. 132 zu reduzieren (vgl. Bild 5.4). Insgesamt könnten so 23,6 % der Klärschlämme aus den relevanten Kläranlagen – also 26.082 Mg TS/a – in 6 Kläranlagen der GK 5 einer P-Entfrachtung zugeführt werden. Bei Erweiterung des Radius auf 20 km könnten sogar 38,9 % der Klärschlämme an diesen 6 Standorten konzentriert werden. Es würden insgesamt 70 P-Rückgewinnungsanlagen eingespart, so dass sich die absolute Zahl von max. 157 auf max. 87 reduzieren ließe. Durch Ausnutzung der Kooperationspotentiale im 10 km-Radius würden dann z. B. in Darmstadt zusätzlich 142 % der Klärschlammmenge bezogen auf den TS-Gehalt zur P-Rückgewinnung anfallen. Die Prozesswassermenge aus der Schlammentwässerung erhöht sich dementsprechend in Abhängigkeit des TS der angelieferten Klärschlämme überschlüssig auf etwa den 2,5-fachen Volumenstrom. Eine eventuelle Überlastung der Kläranlagen durch den zusätzlich anfallenden Prozesswasserstrom wäre jeweils bemessungstechnisch zu überprüfen. Der Rücktransport von Prozesswassermengen auf die Ursprungskläranlagen könnte hier Abhilfe schaffen. Möglich wäre auch die gezielte Prozesswasserbehandlung zur Ammoniumreduzierung mit eventueller Stickstoffrückgewinnung. Eine Wirtschaftlichkeit solcher Maßnahmen bleibt aber im konkreten Fall zu klären. Im Einzelnen kann die Auswirkung der vorgestellten möglichen Kooperationen auf den Kläranlagenbetrieb nur durch eine detaillierte Planung im Anschluss an das Gutachten unter Mitwirkung der Beteiligten abschließend beurteilt werden.

Die für das Szenario 1 getroffenen Annahmen sind stark von der zur Verfügung stehenden Mitverbrennungskapazität abhängig. Sollte eine Analyse der Kapazitätsentwicklung bis 2025 ergeben, dass nicht genügend Verbrennungskapazitäten zur Verfügung stehen, werden vor allem für das nördliche Hessen voraussichtlich zusätzliche Verbrennungsmöglichkeiten geschaffen werden müssen. Für diesen Fall ist davon auszugehen, dass eine Monoverbrennung bevorzugt gebaut wird, da diese hinsichtlich der langfristigen Entsorgungssicherheit, der rückgewinnbaren P-Mengen, der Skalierbarkeit der P-Rückgewinnung und auch hinsichtlich der rechtlichen Rahmenbedingungen Vorteile bietet. Dies würde langfristig eine Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammmasche begünstigen. Weitere Überlegungen hierzu sind in Kapitel 5.2 erläutert.

5.2 Szenario 2: Maximierung der Phosphor-Rückgewinnung

Aus der Gegenüberstellung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren in Kapitel 4 kann abgelesen werden, dass nach derzeitigem Entwicklungsstand der einzelnen Verfahren zur Erhöhung des rezyklierbaren Phosphorstromes eine Rückgewinnung aus der Klärschlammasche angestrebt werden muss. Die Rückgewinnungsquoten bei den untersuchten Verfahren bezogen auf den Phosphormassenstrom im Kläranlagenzulauf liegen hier bei 70 bis größer 90 %. Größtenteils wird die in der Novelle der AbfKlärV geforderte Rückgewinnungsquote von 80 % aus der Klärschlammasche überschritten. Die Rückgewinnung von Phosphor sollte aufgrund technischer Gesichtspunkte bei Aschen aus Klärschlammmonoverbrennungsanlagen erfolgen. Die Vermischung mit Abfall oder anderen Brennstoffen (z. B. Mitverbrennung im Kohlekraftwerk) vor der Verbrennung senkt den prozentualen Anteil des enthaltenen Phosphors und macht die Rückgewinnung aufgrund der erhöhten durchzusetzenden Aschemenge bei gleicher rückgewinnbarer Tonnage an Phosphor zudem deutlich teurer.

Die Skalierungseffekte durch den zentralisierten Anfall von Klärschlammasche zur P-Rückgewinnung ermöglichen den Bau von in der Investition teuren Verfahren, die sich bei geringen Aschedurchsätzen als unwirtschaftlich erweisen könnten. Verfahren wie ASH DEC oder auch das metallurgische Phosphorrecycling (Mephrec) aus Klärschlamm bieten sich eventuell aufgrund niedrigem Betriebsmittelbedarf an. Gleichzeitig kann durch die Konzentrierung der P-Rückgewinnung auf wenige Standorte eine einheitlichere Qualität des Rezyklates hinsichtlich P-Gehalt, P-Verfügbarkeit und Schwermetallgehalt erreicht werden.

Wie in Kapitel 3.4.2 dargestellt, liegt der Anteil der Klärschlämme zur Verbrennung, die in den Jahren 2012 bis 2014 einer Monoverbrennung angedient wurden, bei mindestens 71 % (bei ca. 7 % Klärschlämmen mit unbekanntem Verbrennungsweg). Unter Zugrundelegung der Entsorgungswege aus 2014 liegt der mittlere Klärschlammmanfall zur Monoverbrennung aus den Jahren 2012 bis 2014 bei 53.611 Mg TS/a und somit bei 35 % der Gesamtmasse der entsorgten Klärschlämme. Die Klärschlämme werden dabei nahezu vollständig in der Monoverbrennung in Frankfurt am Main entsorgt. Somit herrscht in Hessen bereits zum jetzigen Zeitpunkt eine starke Zentralisierung der Klärschlamm Entsorgung vor.

Für Szenario 2 wurden ab 2025 folgende Festlegungen und Annahmen getroffen:

- Es werden Klärschlammengen und P-Gehalte für die in Kapitel 3.9 identifizierten 184 Kläranlagen zu Grunde gelegt (zusätzliche Angabe des Rückgewinnungspotentials und der Menge der weiteren Klärschlämme der GK 4 und 5 die in die Monoverbrennung gehen könnten, ohne Einbindung in das Konzept).
- Ab 2025 nicht mehr zur landwirtschaftlichen Verwertung zugelassene Klärschlämme werden der Monoverbrennung angedient und es erfolgt eine Rückgewinnung aus der Asche.
- Klärschlämme, aus Kläranlagen die in 2014 ganz oder teilweise über die Monoverbrennung entsorgt haben, werden auch in 2025 vollständig der Monoverbrennung angedient und es erfolgt eine Rückgewinnung aus der Asche.
- Klärschlämme bei denen der Verbrennungsweg 2014 unbekannt war oder die vollständig mitverbrannt wurden, werden in 2025 vollständig der Mitverbrennung angedient, bzw. eine Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm wird angestrebt und der (rechtlich zulässige) Entsorgungsweg steht danach offen.

Aus den getroffenen Annahmen und der Festlegung des Betrachtungsrahmens ergeben sich die in Bild 5.5 dargestellten Entsorgungswege für die Klärschlämme aus den für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen ab 2025.

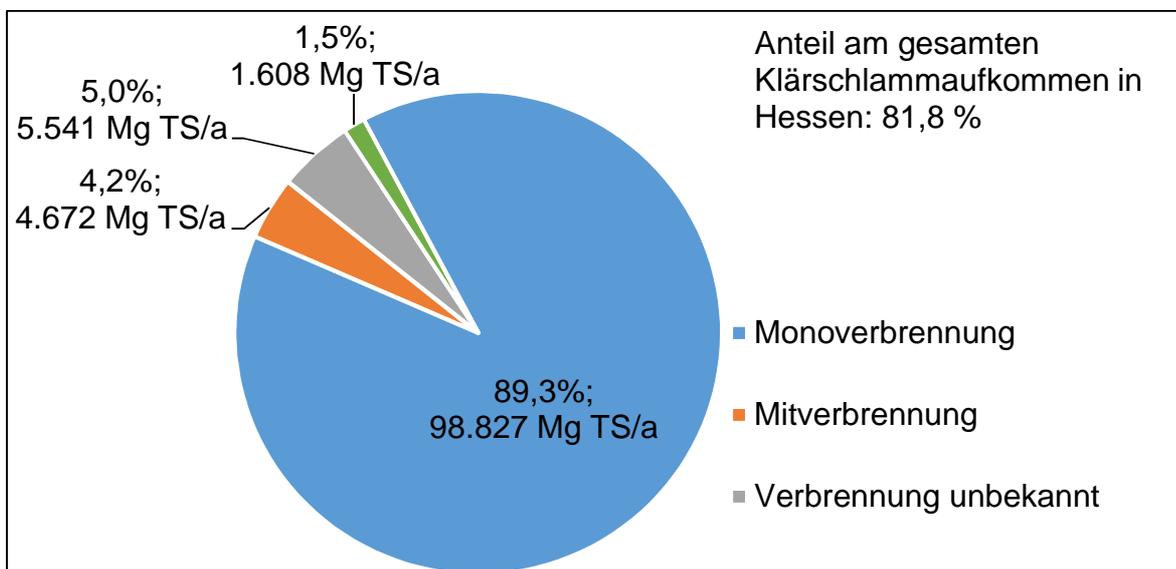


Bild 5.5: Entsorgungswege der für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen in 2025 nach Szenario 2

Der Anteil der Kläranlagen, deren Verbrennungsweg nicht bekannt ist, wurde auch hier analog zu Szenario 1 zur besseren Übersicht einzeln dargestellt. Bei der Betrachtung des Rückgewinnungspfades wurden diese Kläranlagen weiterhin als Anlagen angenommen, auf denen eine P-Rückgewinnung aus dem Klärschlamm installiert würde mit

anschließender Mitverbrennung. Insgesamt werden in diesem Szenario 89,3 % der Klärschlämme aus relevanten Kläranlagen bei der Monoverbrennung berücksichtigt.

Aus der kartographischen Darstellung der Kläranlagenstandorte in Bild 5.6 wird ersichtlich, dass sich die Standorte der Kläranlagen, deren Klärschlämme weiterhin über eine Mitverbrennung entsorgt würden, im Süden Hessens befinden.

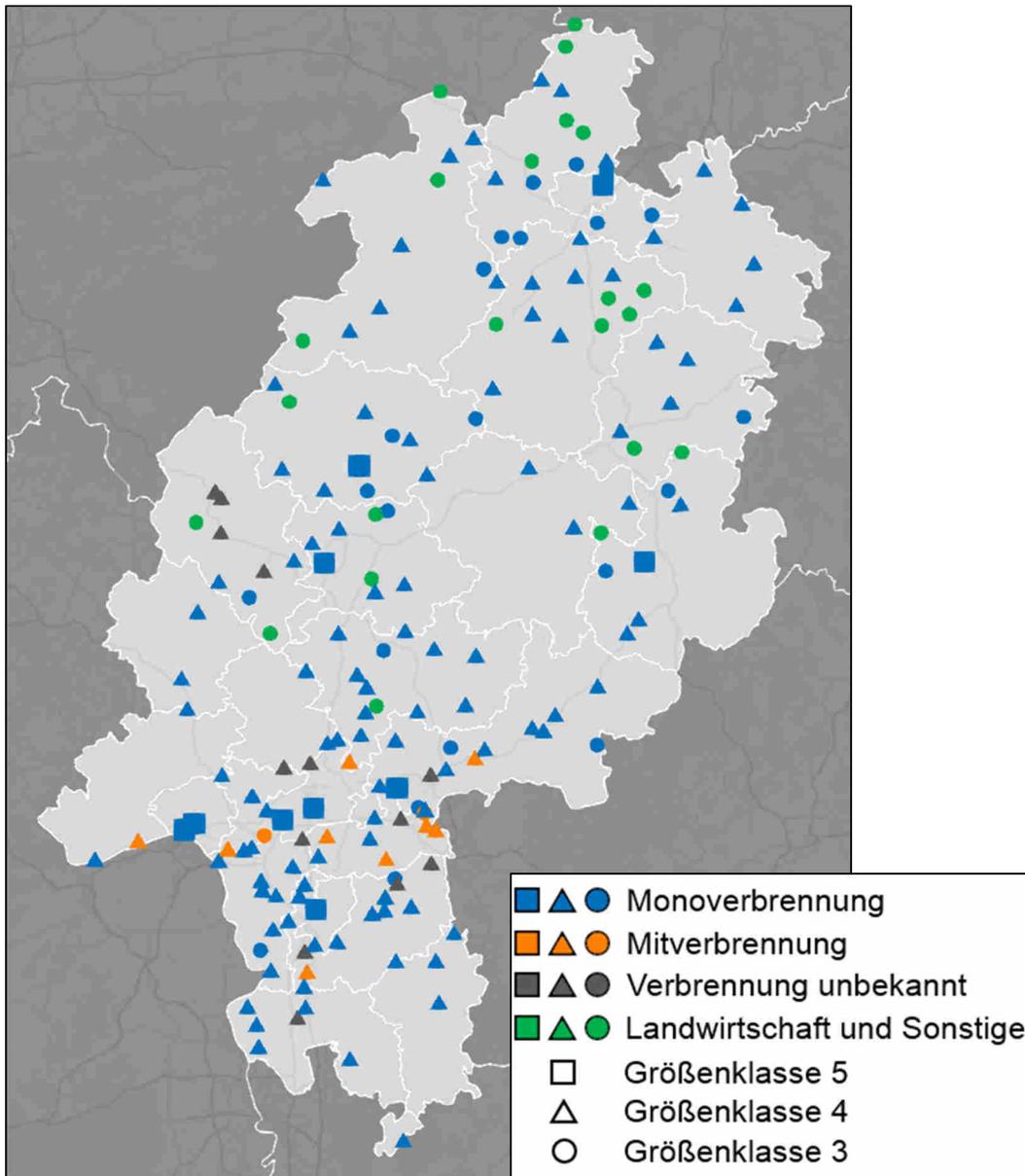


Bild 5.6: Kartographische Darstellung der Entsorgungswege der relevanten Kläranlagen in 2025 bei Anwendung von Szenario 2

Dort ergeben sich, wie auch in Szenario 1 beschrieben, Kooperationspotentiale zwischen kleineren und größeren Kläranlagenstandorten zum Betrieb gemeinsamer Anlagen zur P-Rückgewinnung. In Szenario 2 fehlen Kläranlagen der GK 5 als mögliche Akkumulationsorte für Klärschlamm, da diese vollständig bei der Monoverbrennung und

Rückgewinnung aus Klärschlammasche Berücksichtigung finden. Somit müssten – abweichend zu Szenario 1 – Standorte der GK 4 genutzt werden. Insgesamt stehen 22 Standorte der GK 4 zur Verfügung, deren Klärschlamm nicht gesichert monoverbrennt wird, wie Tabelle 5.4 zeigt.

Tabelle 5.4: Anzahl der potentiellen Rückgewinnungsanlagen bei Maximierung der Phosphorrückgewinnung (Szenario 2) nach Größenklasse

Regierungspräsidium	GK	Anzahl Kläranlagen		
		Monoverbrennung	Mitverbrennung	Verbr. unbekannt
Darmstadt	3	6	2	
	4	58	9	9
	5	6		
	Σ	70	11	9
Gießen	3	5		
	4	18		4
	5	2		
	Σ	25		4
Kassel	3	11		
	4	30		
	5	2		
	Σ	43		
Hessen		138	11	13
Anlagen zur P-Rückgewinnung		2 bis 3	max. 11	bis zu 13 (Sicherheit)
Anzahl Kläranlagen-Betreiber		132	11	13

Eine mögliche Kooperation wäre im Umkreis Seligenstadt denkbar. Dort fallen auf vier Kläranlagen insgesamt 1.077 Mg TS/a an (vgl. Tabelle 5.5). Der Standort der P-Rückgewinnung könnte in Abhängigkeit des Auslastungsgrades der Kläranlagen gewählt werden, um die Rückbelastung aus der Schlammwässerung auf diese Weise zu berücksichtigen.

Tabelle 5.5: Mögliche Kläranlagen-Kooperation zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm in Szenario 2

Anlagenname	GK	KS-Massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
Seligenstadt / Klein-Welzheim	4	278	10,4
Seligenstadt	4	243	8,7
Hainburg / Klein-Krotzenburg	3	174	5,1
Rödermark / Ober-Roden	4	382	13,8
Summe		1.077	38,0

Aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** kann zudem entnommen werden, dass durch den zentralisierten Ansatz der P-Rückgewinnung aus Asche an maximal drei Monoverbrennungsanlagen (SEVA Sindlingen, Infraserb Hoechst und eine weitere Anlage im Norden) die Anzahl der benötigten Anlagen zur weitreichenden P-Rückgewinnung in Hessen auf maximal 27 reduziert werden kann.

Die Auslastung der zwei bis drei Monoverbrennungsanlagen in Hessen würde sich aufgrund der Marktsituation in 2025 einstellen. Es ist unrealistisch, dass die Klärschlämme zur Verbrennung nur aus Hessen kommen. Ebenfalls werden in der Realität Klärschlämme aus Hessen weiterhin außerhalb des Bundeslandes verbrannt werden. Aktuell ist nicht absehbar inwieweit die zusätzlich benötigten Verbrennungskapazitäten innerhalb Deutschlands bis 2025 geschaffen werden können. Die DWA nennt Planungs- und Bauzeiten für Monoverbrennungsanlagen im Bereich von 8 bis 10 Jahren (DWA, 2015). Somit ist mit Engpässen bei der Klärschlamm Entsorgung bis zum Jahr 2025 zu rechnen. Die daraus voraussichtlich resultierenden Preissteigerungen sind nicht abzuschätzen. Die Transportkosten werden neben dem Verbrennungspreis ein weiterer Faktor bei der Auswahl des Entsorgungsortes für den Klärschlamm je Kläranlage sein. Direkt können diese aber nicht beziffert werden, da auch hier eine starke Abhängigkeit vom Markt vorliegt und die Nachfrage voraussichtlich stark steigen wird.

Um dennoch eine Aussage über die mögliche P-Rückgewinnung innerhalb des gewählten Szenarien zu treffen, werden nachfolgend Einschränkungen vorgenommen:

- Wie in Kapitel 3.1 festgelegt und bereits in Szenario 1 dargestellt, wird von einer Entsorgung aller anfallenden Klärschlamm mengen zur Verbrennung innerhalb Hessens ausgegangen.
- Die genauen Verbrennungskosten werden für die Betrachtungen ausgeklammert. Sie können sowohl für die Mono- als auch für die Mitverbrennung von Klärschlamm aus den o. g. Gründen in diesem Rahmen nicht prognostiziert werden. Vereinfacht

wird von einem in etwa gleichen Preis in allen drei Monoverbrennungsanlagen ausgegangen.

- Für den Transport werden keine Kosten betrachtet. Der Klärschlamm müsste in jedem Fall zu einer geeigneten Entsorgungsstelle innerhalb Hessens transportiert werden. Die genauen Kosten sind nicht relevant. Zur besseren Eingrenzung des „wirtschaftlicheren“ Entsorgungsortes wird die Transportstrecke von der Kläranlage zur Monoverbrennungsanlage angesetzt. Der Transport soll dabei immer zum nächsten Verbrennungsstandort erfolgen.

Die Errichtung des zur Minimierung des Transportweges benötigten Verbrennungsstandortes im Norden Hessens kann nach mehreren Gesichtspunkten erfolgen. Dabei spielt neben der Minimierung des Transportweges eventuell auch die Vorhaltung ausreichender Zwischenlagerungskapazitäten (vgl. Kapitel 2.3) in Form von Deponien der Deponieklasse II (DK II) eine Rolle. In Bild 5.7 sind zwei mögliche Standorte miteinander verglichen. Der Standort auf der Kläranlage Kassel/Wolfsanger bietet den Vorteil, dass die Klärschlammmenge aus der einzigen Kläranlage der GK 5 im Norden Hessens direkt vor Ort anfällt (fiktiv gewählter Transportweg von 100 m). Hier werden eventuell Transportkosten eingespart, was im nachfolgenden Vergleich mit dem weiteren Standort genauer untersucht wird.

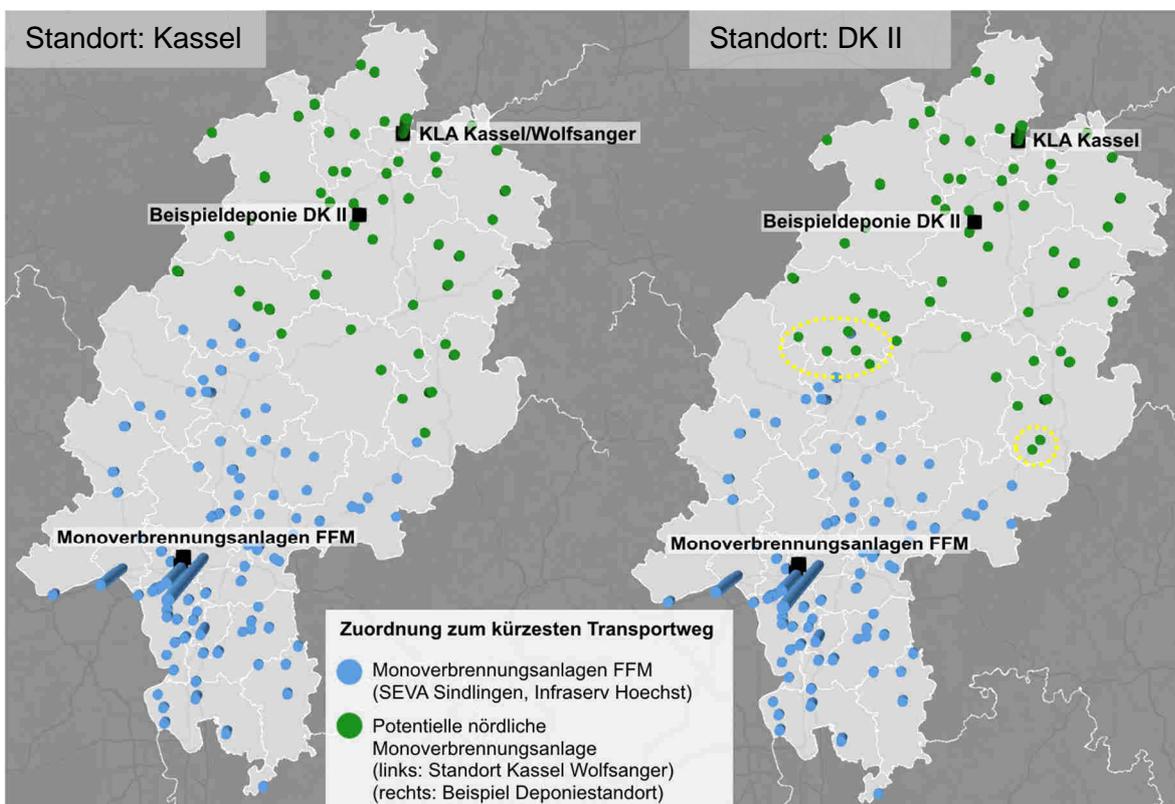


Bild 5.7: Räumliche Aufteilung der Klärschlammengen zur Monoverbrennung auf mögliche Verbrennungsstandorte (Kriterium: kürzester Transportweg)

Die Wahl einer Deponie als Standort für eine Monoverbrennungsanlage bietet hingegen die Möglichkeit zumindest teilweise Aschen günstig (d. h. ohne Transportkosten) zu puffern, um z. B. halb- und großtechnische Untersuchungen abzuwarten, bevor die Wahl auf ein P-Rückgewinnungsverfahren fällt. Die lange Planungs- und Bauzeit von Klärschlammverbrennungsanlagen würde ansonsten eine zeitliche Überschneidung beim Bau der P-Rückgewinnungsanlage notwendig machen, ohne dass das gewählte Verfahren vorab mit der dann anfallenden Asche getestet werden konnte. Dies wäre unter anderem im Hinblick auf die vorher nicht bekannten Schwermetallgehalte in der Asche und die sich daraus ergebenden Einschränkungen bei der Technologieauswahl nicht ratsam. Gleichzeitig bietet die hier gewählte Beispieldeponie den Vorteil, dass sie zentraler in Hessen liegt und so eventuell Transportwege verkürzt werden können. Für die Abschätzung des Transportaufwandes wurde, abweichend von den bisherigen Betrachtungen, der Klärschlammstrom in Mg Originalsubstanz (OS) verwendet, da dies der real zu transportierenden Menge entspricht. Wie in Kapitel 3.4.2 ausgeführt, entsorgen aktuell viele hessische Kläranlagen ihren Klärschlamm in der Landwirtschaft, wo deutlich geringere Trockensubstanzgehalte vorliegen, als dies bei einer Entsorgung mittels Verbrennung der Fall wäre. Bei der Bestimmung eines Verbrennungsortes unter Zuhilfenahme der beiden Parameter Entfernung in Straßenkilometern und zu transportierende Klärschlammmenge in Mg OS/a würden Kläranlagen mit einem TS-Gehalt, der aktuell bei $< 10\%$ liegt, das Ergebnis unnötig verzerren. Zudem ist davon auszugehen, dass der TS-Gehalt zur Anlieferung bei der Monoverbrennungsanlage grundsätzlich höher liegen wird. Nach Auswertung des (WIECHMANN et al., 2012) liegt der minimale TS/TR des Klärschlammes einer der betrachteten 22 Monoklärschlammverbrennungsanlagen bei 20% . Zumeist liegen Werte größer 25% vor. Die nachfolgenden Auswertungen zu möglichen Standorten der Monoverbrennung in Hessen orientieren sich an diesen Werten. Dabei wurde folgendes Vorgehen gewählt:

1. Annahme: Der gewählte Transportweg entspricht dem kürzesten Weg zwischen Kläranlage und Monoverbrennung.
2. Die Kläranlagen werden zunächst anhand der kürzesten Entfernung auf die vier betrachteten Standorte zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm (Kläranlage Kassel, DK II, SEVA Sindlingen, Infraserb Hoechst, vgl. Bild 5.7) aufgeteilt.
3. Je nach kürzester Transportentfernung erfolgt eine Aufteilung in Norden/Süden.
4. Die Standorte in Frankfurt werden aufgrund ihrer räumlichen Nähe zueinander und des voraussichtlichen Bestehenbleibens beider Anlagen zusammengefasst dargestellt, da sie voraussichtlich in einer P-Rückgewinnungsanlage behandelt

würden. Von den Standorten im Norden soll einer ausgewählt werden (Punkte 5. bis 7.).

5. Zur Bestimmung der mittleren TS-Gehalte im Klärschlamm der relevanten Kläranlagen mit potentielltem Entsorgungsweg Monoverbrennung werden zur Verfügung stehende Daten ausgewertet.
6. Bei einem TS-Gehalt im Klärschlamm von kleiner 20 % wird von einer durchzuführenden Entwässerung auf min. 25 % TS ausgegangen (Kläranlagen hervorgehoben).
7. Weitere Annahme: Im Mittel werden 25 Mg OS/LKW transportiert.

Für die Monoverbrennungsanlagen in Frankfurt ist u. a. aufgrund der Klärschlammleitung von der Kläranlage Niederrad/Griesheim zur SEVA Sindlingen keine Betrachtung des Transportweges sinnvoll. Die Auswahl des Standortes im Norden könnte aber z. B. aufgrund des minimalsten Transportaufwandes erfolgen. Aus den o. g. Annahmen ergeben sich für den Standort Kassel/Wolfsanger in Summe 266.670 gefahrenen Kilometer pro Jahr. Der Bau der möglichen Monoverbrennungsanlage auf der DK II würde ca. 15.900 km Transportweg pro Jahr weniger bedeuten (Summe: 250.800 km/a), was einer Einsparung von ca. 6 % an Transportwegen entsprechen würde. Zusätzlich zum Transportweg müssen jedoch andere Faktoren berücksichtigt werden, wie z. B. die notwendige Behandlung der Brüdenwässer aus einer eventuellen Klärschlamm-trocknung oder die Verfügbarkeit geeigneten Personals vor Ort. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird nachfolgend bei der Ermittlung der Klärschlamm-mengen je Verbrennungsanlage von dem Fall ausgegangen, dass die Monoverbrennungsanlage im Norden neben der Deponie DK II gebaut würde. Zudem werden die Standorte Infraserb Höchst und SEVA Sindlingen in Frankfurt zur besseren Übersicht zusammengefasst dargestellt.

Nach der in Bild 5.7 (rechts) vorgenommenen Einteilung der Kläranlagen auf die möglichen Monoverbrennungsstandorte aufgrund des Transportweges, würden die in Tabelle 5.6 dargestellten Klärschlamm-massenströme je Monoverbrennungsstandort anfallen. Daraus wurde analog zu den Untersuchungen von PINNEKAMP et al. (2014) unter der Annahme eines Glührückstandes von 35 % die zu erwartende Aschemenge zur Phosphorrückgewinnung berechnet. Innerhalb der Tabelle wird zwischen allen Klärschlämmen, die nach Szenario 2 monoverbrannt würden und den Klärschlämmen der relevanten Kläranlagen nach der Novelle der AbfKlärV unterschieden. Auf den TS-Gehalt bezogen sind in dem Szenario 90,6 % der 109.120 Mg TS/a monoverbrannten Klärschlämme nach AbfKlärV relevant. Diese enthalten 95,1 % der Gesamtphosphorfracht von 3.203 Mg P/a aller monoverbrannten Schlämme. In der Realität wäre eine

P-Rückgewinnung aus der Asche im Vollstrom ausgelegt, so dass weitere 158 Mg P/a als Rückgewinnungspotential anfallen.

Tabelle 5.6: Klärschlammströme im Input der Monoverbrennungsanlagen, voraussichtlicher Ascheanfall und geschätzter P-Gehalt in der Asche

Standort		Klärschlammström		TR _{Mittel} %	Asche Mg/a	P-Fracht Mg P/a	P-Gehalt %
		Mg OS/a	Mg TS/a				
Alle Klärschlämme zur Monoverbrennung nach Szenario 2							
Nord	DK II	94.862	26.170	27,6	9.159	742	8,1
Süd	Frankfurt	299.171	82.950	27,7	29.033	2.462	8,5
Summe		394.032	109.120		38.192	3.203	
Klärschlämme der relevanten Kläranlagen nach AbklärV							
Nord	DK II	86.929	23.341	26,9	8.169	694	8,5
Süd	Frankfurt	276.697	75.486	27,3	26.420	2.351	8,9
Summe		363.626	98.827		34.590	3.045	
Anteil an allen Klärschlämmen zur Monoverbrennung			90,6 %			95,1 %	

Es zeigt sich, dass durch die zur Minimierung des Transportaufwandes vorgenommene Zuordnung der Kläranlagen auf die Monoverbrennungsstandorte der Verbrennungsstandort im Norden zur Entsorgung der Klärschlämme aus Hessen ohne die Annahme von Klärschlämmen aus umliegenden Bundesländern relativ klein ausfallen könnte. Die Lage der möglichen Verbrennungsanlage in der Mitte von Deutschland, könnte hier aufgrund der gesamtdeutschen Problematik der zu geringen Verbrennungskapazitäten ab 2025 für einen eventuellen Betreiber den Bau einer größeren Anlage interessant machen. Eine Ermittlung der potentiellen Klärschlammströme aus den Nachbarländern ist empfohlen. Dies wird auch nach einer Ermittlung der aktuellen Monoverbrennungsstandorte durch PINNEKAMP et al. (2014) deutlich (Bild 5.8).



Bild 5.8: Standorte von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Deutschland nach PINNEKAMP et al. (2014)

Die ermittelten Aschemengen aus Tabelle 5.6 zeigen, dass sich für den Standort im Norden eventuell eher ein Verfahren mit geringerem Investitions- aber höherem Betriebsmittelaufwand wie PASCH oder LEACHPHOS zur P-Rückgewinnung lohnen würde. Investitionsintensive Verfahren, wie z. B. ASH DEC oder Mephrec würden sich hingegen bei den Anlagen in Frankfurt anbieten, wo sehr große Aschemengen zentriert anfallen können. Für beide Standorte gilt, dass die letztendliche Aschequalität die Wahl eines P-Rückgewinnungsverfahrens stark beeinflusst. Die spezifischen Kosten einer P-Rückgewinnung im Norden mit diesen Verfahren könnte über den Weg der zusätzlichen Annahme von Aschen von außerhalb Hessens reduziert werden. Eine Kostenbetrachtung der P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche wird beispielhaft in Kapitel 6.2 durchgeführt.

5.3 Szenario 3: Rückgewinnung nach Mindestanforderungen der Novelle AbfKlärV

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die P-Rückgewinnung nach den Mindestanforderungen der Novelle der AbfKlärV durchzuführen. Dies wird nachfolgend untersucht. Innerhalb der Novelle der AbfKlärV wird zunächst eine Minimierung des P-Gehaltes im Klärschlamm auf kleiner 20 g P/kg TS gefordert. Sollte dies nicht möglich sein, ist eine mindestens 50 %ige Reduzierung des P-Gehaltes zu erreichen. Die aktuell im Bereich Nassschlamm in der Erprobung befindlichen Verfahren können diese 50 % erreichen, was jedoch häufig mit einem erheblichen Betriebsmittelaufwand verbunden ist. Unter der Annahme, dass 50 % P-Rückgewinnung knapp erreicht werden können, aber keine Möglichkeit gegeben ist mit vertretbarem Kostenaufwand eine ausreichende Sicherheit von z. B. 60 % P-Rückgewinnung zu gewährleisten, ist die maximale P-Konzentration in Klärschlämmen für die Nassschlammrückgewinnung auf Werte unterhalb 40 g P/kg TS begrenzt. Gleichzeitig ist zur Einhaltung einer P-Konzentration im Klärschlamm unterhalb der 20 g P/kg TS ein Sicherheitsfaktor vorzusehen. Soll der P-Gehalt im behandelten Klärschlamm auf im Mittel 16 g P/kg TM (= 80 % von 20 g P/kg TS) minimiert werden, kann unter Berücksichtigung eines möglichst wirtschaftlichen Betriebspunktes der Anlage zur P-Rückgewinnung davon ausgegangen werden, dass Klärschlämme mit maximal 32 g P/kg TS mittels der aktuell erprobten Verfahren sicher abgereichert werden können. Bei vollständiger Umsetzung einer P-Rückgewinnung nach den Mindestvorgaben, ist die tatsächlich vor Ort benötigte Rückgewinnungsquote zur Abreicherung bis 16 g P/kg TS in Abhängigkeit zum P-Gehalt im Klärschlamm fließend (vgl. Bild 5.9). Klärschlämme mit P-Gehalten kleiner 23 kg P/kg TS können bereits bei 30 % P-Rückgewinnung bis unterhalb von 16 g P/kg TS abgereichert werden, so dass in diesen Fällen bei Bio-P-Kläranlagen auch Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Schlammwasser in Frage kommen. Die Klärschlämme mit P-Gehalten größer 35 g P/kg TS werden in Szenario 3 sicherheitshalber als Schlämme zur Monoverbrennung mit Rückgewinnung aus der Asche angenommen, um Betreiberwünsche nach Entsorgungssicherheit abzubilden.

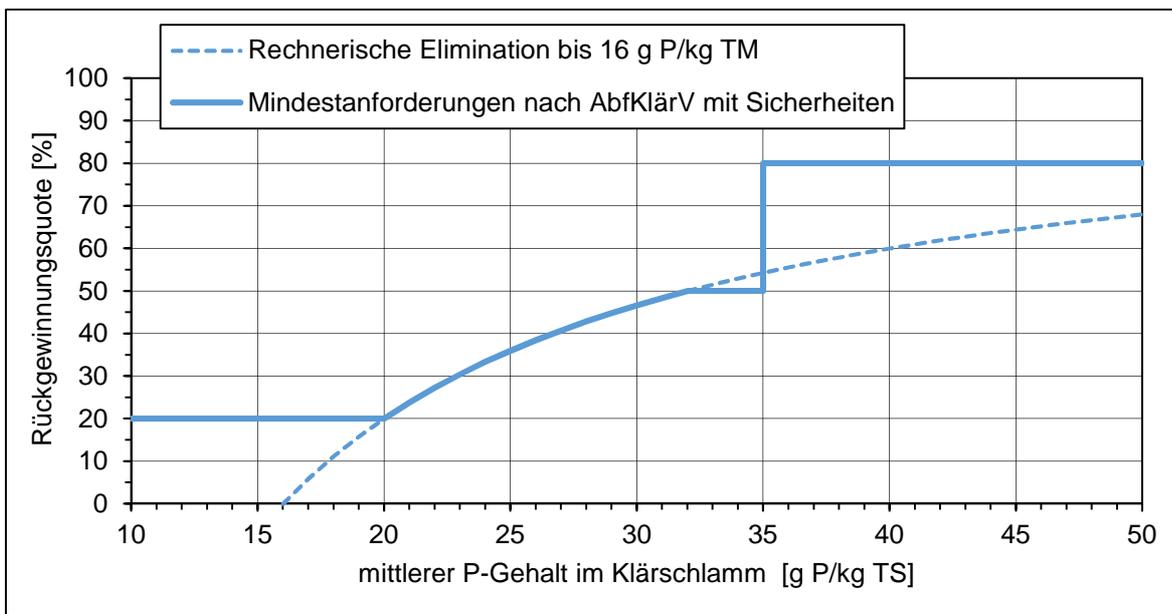


Bild 5.9: Änderung der benötigten Rückgewinnungsquote zur Abreicherung des P-Gehaltes auf 16 g P/kg TM bei steigendem Ausgangsgehalt im Klärschlamm

Die aus Bild 5.9 ableitbaren Klassen zur P-Rückgewinnung sind in Tabelle 5.7 den jeweils zu erreichenden Rückgewinnungsquoten gegenübergestellt.

Tabelle 5.7: Klasseneinteilung der Mindestrückgewinnungsquoten zu Abreicherung der Phosphor-Gehalte im Klärschlamm auf 16 g P/kg TS in Szenario 3

Mittlerer Phosphorgehalt [g P/kg TS]	Rückgewinnungsquote [%]
< 20	20
20 bis 32	20 bis 50
32 bis 35	50
> 35	80

Unter Berücksichtigung der geplanten Schlammfäulung in Frankfurt (vgl. Kapitel 3.4.1) ergibt sich – durch die Verringerung des Klärschlammstroms der Kläranlagen Sindlingen und Niederrad/Griesheim bei gleichbleibender P-Fracht – eine auf 33 g P/kg TS steigende mittlere P-Konzentration im Klärschlamm. Dies wurde bei der Einteilung der Kläranlagen in Bild 5.10 berücksichtigt.

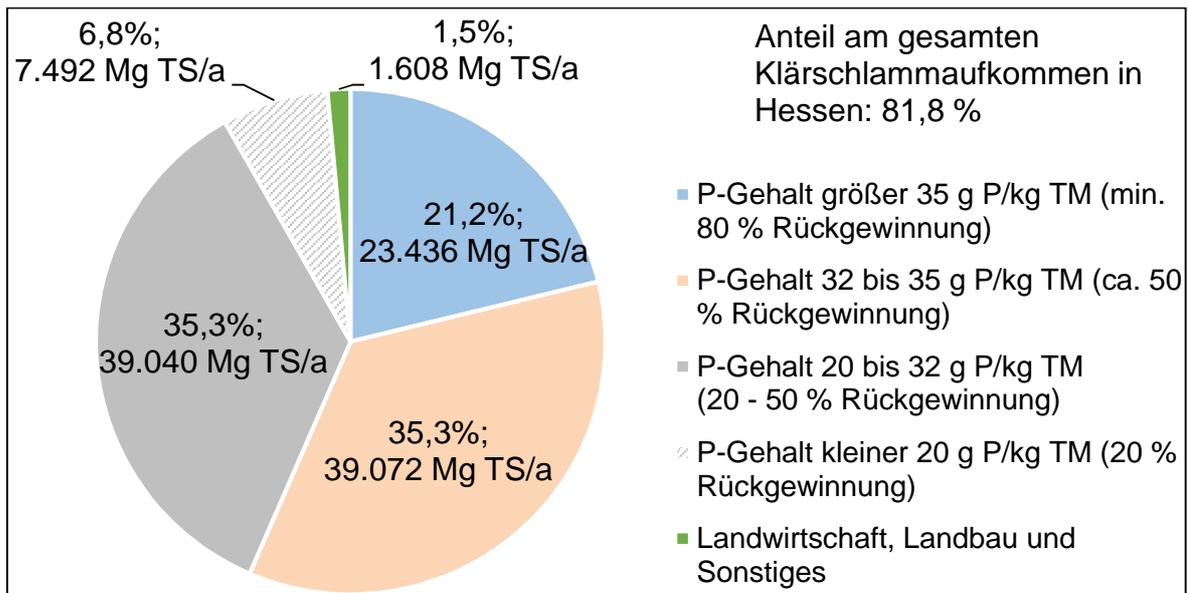


Bild 5.10: Aufteilung der Klärschlammströme zur Rückgewinnung anhand der P-Gehalte in den heute für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen (Szenario 3 - Status quo)

Insgesamt können für 42,1 % der Klärschlämme mit Rückgewinnungsquoten von kleiner 50 % bis 16 g P/kg TS abgereichert werden. Dies entspricht 99 Kläranlagen (vgl. Tabelle 5.8). Zur Monoverbrennung und P-Rückgewinnung mit mindestens 80 % Wirkungsgrad aus Asche fallen in Szenario 3 die Schlämme von 38 Kläranlagen an. Die restlichen 25 Kläranlagen müssten eine 50 %ige Reduzierung erzielen.

Tabelle 5.8: Anzahl der potentiellen Rückgewinnungsanlagen bei Rückgewinnung nach Mindestanforderungen der Novelle AbfKlärV (Szenario 3) nach Größenklasse

Regierungspräsidium	GK	Anzahl Kläranlagen			
		P-Gehalt größer 35 g P/kg TM (min. 80 % Rückgewinnung)	P-Gehalt 32 bis 35 g P/kg TM (ca. 50 % Rückgewinnung)	P-Gehalt 20 bis 32 g P/kg TM (20 - 50 % Rückgewinnung)	P-Gehalt kleiner 20 g P/kg TM (20 % Rückgewinnung)
Darmstadt	3	2	0	5	1
	4	26	15	28	7
	5	0	4	2	0
Gießen	3	0	0	3	2
	4	1	1	18	2
	5	1	1	0	0
Kassel	3	1	0	6	4
	4	6	4	17	3
	5	1	0	1	0
Hessen		38	25	80	19
Anlagen zur P-Rückgewinnung		2 bis 3	max. 25	max. 80	max. 19

Die räumliche Verteilung der Kläranlagen nach Anwendung der Einteilung aus Szenario 3 ist in Bild 5.11 dargestellt. Eine Agglomeration an Kläranlagen der GK 4, mit dem Rückgewinnungspfad Klärschlammmasche befindet sich im Süden Hessens. Zudem müssten die Schlämme der Kläranlagen GK 5 in Gießen und Kassel aufgrund hoher P-Gehalte der Monoverbrennung und P-Rückgewinnung aus Asche zugeführt werden. Eine wirtschaftliche thermische Entsorgung des Klärschlammes aus Kassel ist ohne nahegelegene Monoverbrennung nicht sicher gegeben. Gegebenenfalls könnte die vorhandene Klärschlamm-trocknung (KASSEL WASSER, o. J.) reaktiviert bzw. modernisiert werden. Hier ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Abstimmung mit der konkreten Entsorgungsplanung des Klärschlammes notwendig. Unter Zugrundelegung der Aufteilung der Kläranlagen auf eine nördliche und eine/zwei südliche Monoverbrennungsanlagen anhand der kürzesten Transportstrecke (vgl. Szenario 2) würden in den Kläranlagen im Norden Hessens 6.912 Mg TS/a zur Monoverbrennung anfallen. Davon stammen 4.581 Mg TS/a aus Kassel/Wolfsanger. Im Süden (inkl. Gießen) müssten noch 16.524 Mg TS/a aufgrund der hohen P-Gehalte zur sicheren P-Rückgewinnung monoverbrannt werden.

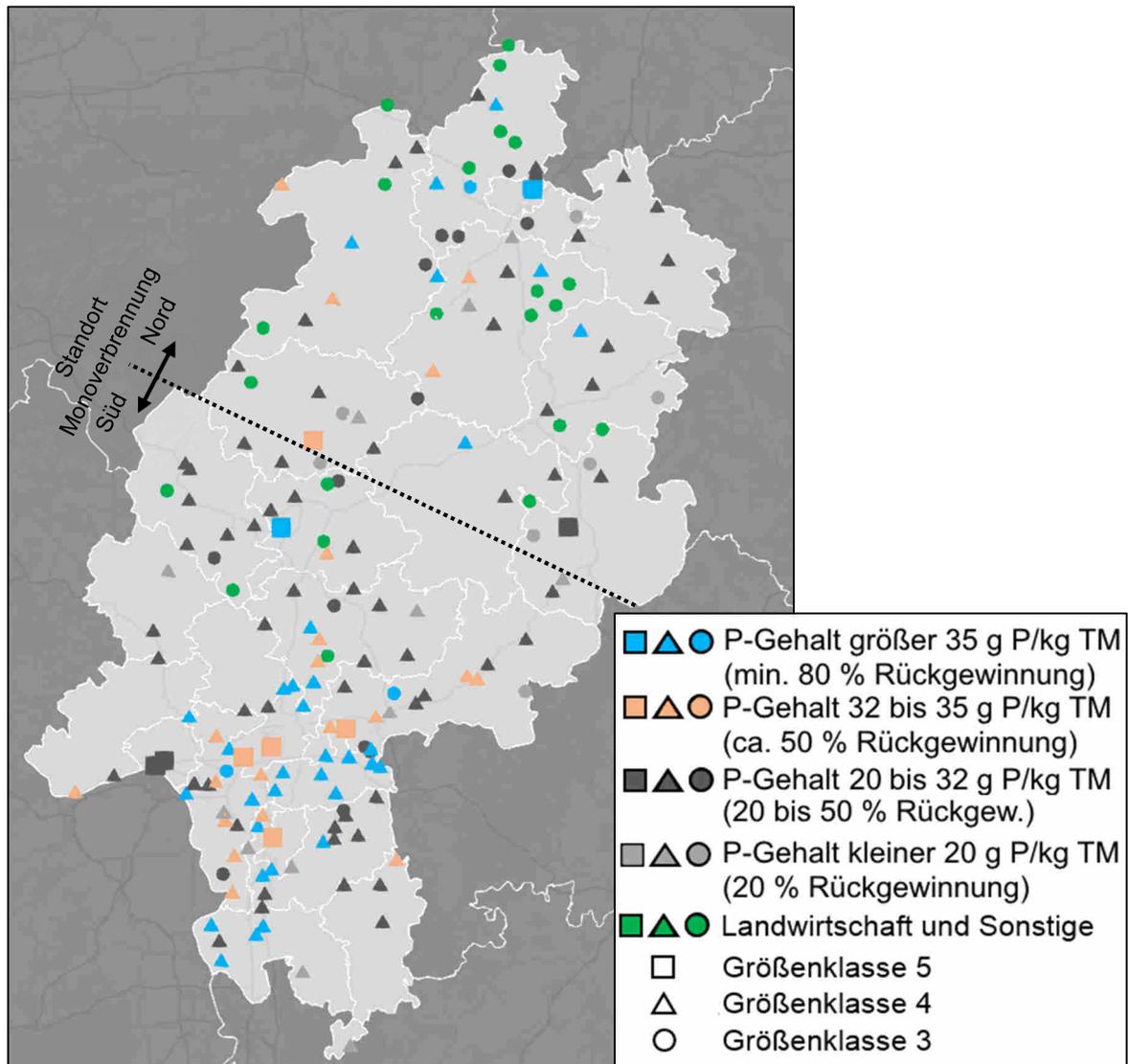


Bild 5.11: Kartographische Darstellung der P-Gehalts-Klassen unter Angabe der benötigten Rückgewinnungsquoten für die relevanten Kläranlagen bei Anwendung von Szenario 3

Das Szenario 3 ist im Vergleich zu den Szenarien 1 und 2 deutlich sensitiver gegenüber den steigenden P-Gehalten nach Umsetzung der Maßnahmen im Maßnahmenprogramm zur WRRL. Insgesamt wird die mittlere P-Fracht im Klärschlamm aller relevanten Kläranlagen um ca. 5,1 % steigen, was in den Szenarien 1 und 2 zu geringen Veränderungen bei der rückgewinnbaren P-Fracht führt. In Szenario 3 ändern sich hingegen die Zuteilungen der Klärschlämme zu den jeweiligen Klassen aufgrund der P-Gehalte deutlich, wie Bild 5.12 im Vergleich zu Bild 5.10 zeigt. Dies ist größtenteils auf die Kläranlagen in Frankfurt zurückzuführen, da diese voraussichtlich einen P-Gehalt im Klärschlamm von mehr als 35 g P/kg TS (aktuell: 20 g P/kgTS; nach Inbetriebnahme der Schlammfäulung: 33,2 g/kg TS; mit Berücksichtigung zusätzlicher P-Elimination aus WRRL Maßnahmen: 35,8 g P/kg TS) erreichen werden.

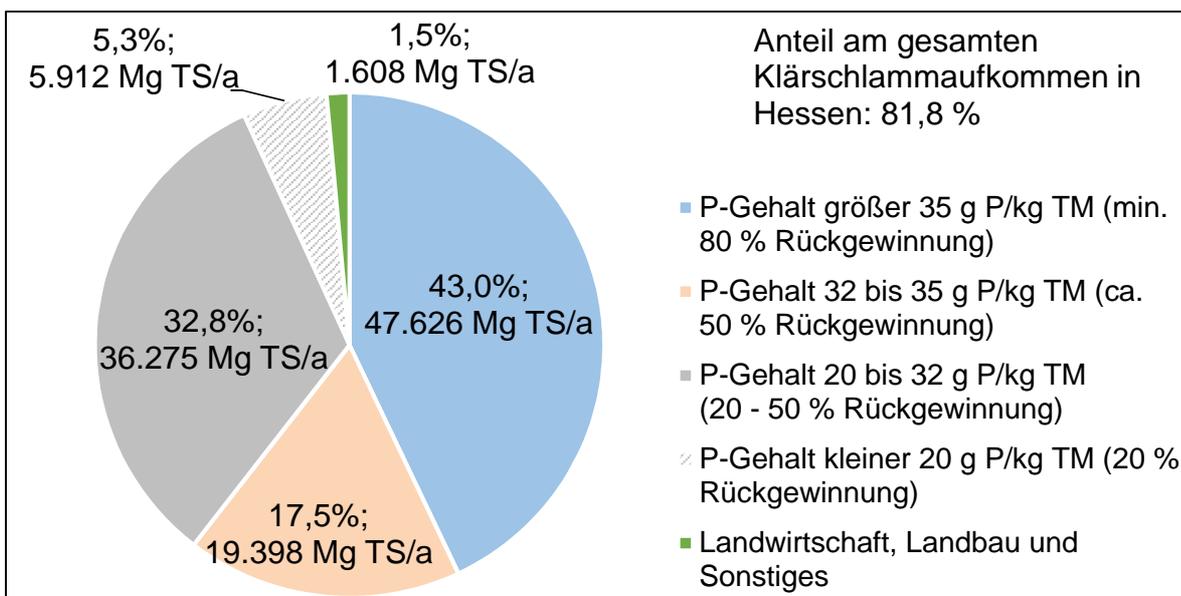


Bild 5.12: Aufteilung der Klärschlammmassenströme zur Rückgewinnung anhand der P-Gehalte in den relevanten Kläranlagen nach Umsetzung der Maßnahmen zur WRRL (Szenario 3 - Prognose)

Aus Szenario 3 ergibt sich ein Bedarf an einer Verdichtung der begleitenden Datenerfassung im Hinblick auf die Umsetzung des Maßnahmenprogrammes WRRL in Hessen. Der Abgleich der P-Gehalte im Schlamm mit der technischen Realisierbarkeit der geforderten P-Rückgewinnungsquoten hat große Auswirkungen auf die schlussendliche Anwendbarkeit der jeweiligen Technologien.

5.4 Vergleich der Szenarien und Bewertung der Umsetzbarkeit

5.4.1 Phosphorrückgewinnungspotential

Die drei Szenarien haben unterschiedliche P-Rückgewinnungspotentiale, die in Tabelle 5.9 zusammenfassend dargestellt sind. Bei den Szenarien 1 und 2 sind diese Potentiale in erster Linie abhängig von der jeweiligen Projektion des geänderten Klärschlamm-entsorgungsweges in die Zukunft. Die Zuteilung der aktuell landwirtschaftlich/landbaulich verwerteten Klärschlämme zu den Verbrennungswegen ab 2025 unterlag Überlegungen zur Verfügbarkeit der jeweiligen Kapazitäten. In Szenario 3 hingegen wurden die Kläranlagen aufgrund der derzeit verfügbaren Technik in Abhängigkeit des P-Gehaltes im Klärschlamm in Kategorien aufgeteilt. Durch die geplanten Maßnahmen zur P-Elimination auf hessischen Kläranlagen wird sich diese Zuteilung in Zukunft ändern. Folglich sind in Szenario 3 für die zu erwartenden Klärschlamm-mengen in 2025 die zwei Fälle „Status quo“ (P-Fracht bleibt zukünftig gleich) und „Prognose“ (P-Fracht erhöht sich durch Maßnahmen zur Umsetzung der WRRL) dargestellt. Die P-Rückgewinnungsquoten sind jeweils unter Ausschluss des Entsorgungsweges „Sonstiges“ (=Landwirtschaft, Landbau und Sonstiges) angegeben.

Tabelle 5.9: Vergleichende Übersicht über die mögliche P-Rückgewinnung aus Klärschlämmen der relevanten Kläranlagen innerhalb der Szenarien

Ausgangssituation 2014 Entsorgungswege und P-Fracht im KS					
Stoffstrom	MonoV	MitV	V. unbek.	Sonstiges	Summen
Klärschlammmenge [Mg TS/a]	53.231	15.817	4.388	53.183	126.619
P-Fracht im KS [Mg P/a]	1.111	522	130	1.640	3.403
Prognose KS-Massenströme durch Schlammfäulung in FFM, sowie Änderungen der P-Fracht im KS durch Umsetzung WRRL Maßnahmen bis 2025					
Stoffstrom	MonoV	MitV	V. unbek.	Sonstiges	Summen
Klärschlammmenge [Mg TS/a]	37.260	15.817	4.388	53.183	110.649
P-Fracht Prognose 2025 bei Umsetzung WRRL [Mg P/a]	1.161	545	139	1.731	3.576
Szenario 1 - "Weitgehende Rückgewinnung auf Kläranlagenstandorten"					
Stoffstrom	MonoV	MitV	V. unbek.	Sonstiges	Summen
Klärschlammmenge [Mg TS/a]	33.770	69.730	5.541	1.608	110.649
P-Fracht im KS [Mg P/a]	1.008	2.195	164	36	3.403
P-Rückgewinnung [Mg P/a]	806	985	71	-	1.837
Rückgewinnungsquote [%]	80,0	44,9	43,4	-	55,3
Szenario 2 - "Maximierung der Phosphor-Rückgewinnung"					
Stoffstrom	MonoV	MitV	V. unbek.	Sonstiges	Summen
Klärschlammmenge [Mg TS/a]	98.827	4.672	5.541	1.608	110.649
P-Fracht im KS [Mg P/a]	3.045	158	164	36	3.403
P-Rückgewinnung [Mg P/a]	2.432	74	71	-	2.578
Rückgewinnungsquote [%]	80	46,9	43,4	-	76,5
Szenario 3 - "Rückgewinnung nach Mindestanforderungen der Novelle AbfKlärV" – Status quo					
Stoffstrom	MonoV	Mitverbrennung			Summen (inkl. Sonstiges)
	> 35 g P/kg TM	32 bis 35 g P/kg TM	20 bis 32 g P/kg TM	< 20 g P/ kg TM	
Klärschlammmenge [Mg TS/a]	23.436	39.072	39.040	7.492	110.649
P-Fracht im KS [Mg P/a]	949	1.305	980	133	3.403
P-Rückgewinnung [Mg P/a]	759	653	356	26,6	1.794
Rückgewinnungsquote [%]	80,0	50,0	36,3	20,0	53,3
Szenario 3 - "Rückgewinnung nach Mindestanforderungen der Novelle AbfKlärV" – Prognose					
Klärschlammmenge [Mg TS/a]	47.626	19.398	36.275	5.912	110.819
P-Fracht [Mg/a]	1.856	655	921	105	3.574
P-Rückgewinnung [Mg/a]	1.485	327	341	21	2.175
Rückgewinnungsquote [%]	80,0	50,0	37,1	20,0	61,5
MonoV: Monoverbrennung; MitV: Mitverbrennung; V. unbek.: Verbrennungsweg unbekannt; Sonstiges: Landwirtschaft, Landbau und Sonstiges; Szenario 3- Rückgewinnungsquoten: Monoverbrennung notwendig bei > 35 g P/kg TM: 80 %; Rückgewinnung auf Kläranlage: 32 bis 35 g P/kg TM: 50 %, 20 bis 32 g P/kg TM: 20 bis 50 %, kleiner 20 g P/kg TM: 20 %					

Die Darstellung von Szenario 1 und 2 unterscheidet sich zu Szenario 3. In den Szenarien 1 und 2 wurde jeweils der Entsorgungsweg zur Zuteilung der Klärschlammengen und P-Frachten verwendet. Bei unbekanntem Verbrennungsweg wurden die Klärschlammengen behandelt, als würde eine Rückgewinnung auf der Kläranlage durchgeführt, was die ähnlichen P-Rückgewinnungsquoten zum Entsorgungsweg Mitverbrennung erklärt. In Szenario 3 wurde die Zuteilung in vier Kategorien von Rückgewinnungsquoten aufgrund der P-Gehalte im Klärschlamm vorgenommen. Eine Einteilung auf Mono- und Mitverbrennung findet aufgrund dieser nachgeschaltet statt.

In Szenario 1 liegt die erreichbare Rückgewinnungsquote, wie aufgrund der vorherrschend betrachteten P-Rückgewinnung aus Klärschlamm am Kläranlagenstandort zu erwarten ist, mit 55,3 % relativ niedrig. Die Klärschlammengen aus Frankfurt und Wiesbaden, die aktuell und nach Szenario 1 auch zukünftig monoverbrannt würden, erhöhen dabei die erreichbare Rückgewinnungsquote. Bei Nichtbetrachten der Klärschlämme zur Monoverbrennung liegt die mittlere Rückgewinnungsquote für die restlichen Kläranlagen bei lediglich bei 44,8 %.

Szenario 2 bietet mit 76,5 % die höchste P-Rückgewinnungsquote der drei Szenarien. Der Anteil von 89,3 % der Klärschlammmenge zur Monoverbrennung wird vollständig mit der minimal zu erreichenden P-Rückgewinnungsquote von 80 % angenommen. Je nach Rückgewinnungsverfahren liegt diese höher. Bei geschätzten 90 % P-Rückgewinnung aus der Asche steigert sich im Szenario 2 der rezirkulierbare P-Massenstrom auf insgesamt 2.886 Mg P/a (85,7 % Rückgewinnungsquote).

Szenario 3 weist auf die P-Fracht nach Status quo bezogen mit 53,3 % eine ähnliche mittlere Rückgewinnungsquote für Phosphor auf wie Szenario 1 (55,3 %). Im Vergleich zu Szenario 1 und 2 wird bei diesem Szenario allerdings deutlich, dass ein Anteil von 42,1 % (39.040 + 7.492 Mg TS/a) der Klärschlämme mit P-Gehalten kleiner 32 g P/kg TM schon mit Rückgewinnungsquoten kleiner 40 % (6,8 % kleiner mit 20 %) die Anforderungen der Novelle der AbfKlärV erfüllen würde. Durch den Anstieg der P-Gehalte bei Umsetzung der Maßnahmen zur WRRL und die damit teilweise Neueinstufung der Klärschlämme der unterschiedlichen Kläranlagen in andere Kategorien (Prognose) steigt der Anteil der Klärschlämme zur Monoverbrennung und Rückgewinnung aus der Asche in Szenario 3. Dadurch bedingt erhöht sich die berechnete Rückgewinnungsquote auf 61,5 %.

Aus den berechneten P-Massenströmen, die je Szenario als Rezyklat anfallen könnten, kann durch Vergleich mit den Marktpreisen für Phosphordünger ein aktueller Marktwert abgeschätzt werden. Da die Qualität der erzeugten Rezyklate aktuell noch Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen ist, ist ihr Marktwert nicht direkt ermittelbar. Als

Anhaltspunkte wurden nachfolgend der Marktpreis von Rohphosphat mit 14 % P in der Trockenmasse und Triple Superphosphat (20 % P im TR) herangezogen. Die Preisspanne, die sich daraus ergibt, ist in Bild 5.13 dargestellt.

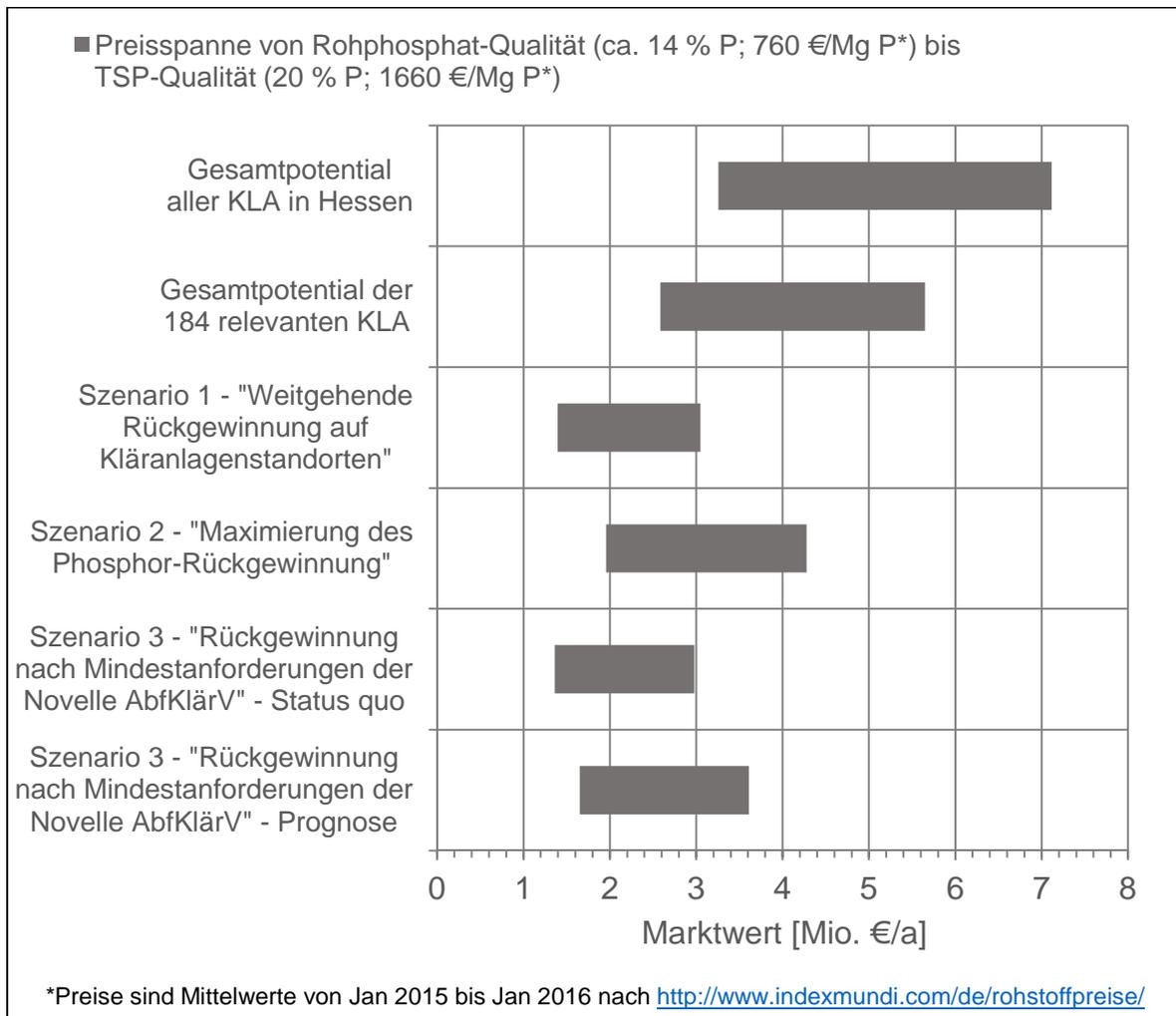


Bild 5.13: Abschätzung des möglichen monetären Erlöses je Szenario bei Verkauf des rückgewonnenen Phosphors

Insgesamt hat der im hessischen Klärschlamm enthaltene Phosphor unter Annahme von Rohphosphat-Qualität einen Marktwert von ca. 3,26 Mio. €/a (TSP-Qualität: 7,12 Mio.€/a). Der in den 184 relevanten Kläranlagen anfallende Phosphor-Massenstrom macht davon 2,59 Mio. €/a aus. Durch eine Umsetzung von Szenario 2 könnten bei erzielbarer Vergütung für Rohphosphat-Qualität mindestens 1,96 Mio. €/a (TSP-Qualität: 4,28 Mio.€/a) an Einnahmen generiert werden, um die P-Rückgewinnung gegenzufinanzieren. Die Szenarien 1 und 3 generieren aufgrund der geringeren Rückgewinnungsquoten dementsprechend niedrigere Erlöse bei Verkauf des Rezyklates.

5.4.2 Aspekte der dezentralen oder zentralen Phosphorrückgewinnung

Die Ansätze der Szenarien 1 und 3 unterscheiden sich von der späteren Ausführung her stark von Szenario 2. Die zentralisierte P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche von monoverbranntem Klärschlamm in Szenario 2 ist mit hohem Transportaufwand und voraussichtlich höheren Verbrennungskosten verbunden. Dennoch bietet sie hinsichtlich der Schaffung langfristiger Entsorgungssicherheit durch die konstante Bereitstellung von Monoverbrennungskapazität Vorteile. Zudem ist der erhöhte Transportaufwand für die Klärschlämme in den Szenarien 1 und 3 mit Entsorgungsweg Mono- oder Mitverbrennung ebenfalls gegeben. Je nach Entsorgungssituation im Bundesland können hier durchaus Transporte über die Landesgrenzen hinaus möglich sein. Zudem bleibt nach der Verbrennung die Entsorgung der Aschen als Kostenfaktor. Dem gegenüber stehen einzelne Verfahren zur P-Rückgewinnung (z. B. ASH DEC oder Mephrec) aus Monoverbrennungsaschen, die eine Metallabreicherung aus der Asche zum Ziel haben, so dass diese im Nachhinein größtenteils als phosphorreiches Produkt/Rezyklat für die Düngemittelproduktion anfällt. Deponiert werden müssten in diesen Fällen nur Reststoffe mit deutlich geringeren Massenströmen.

Die dezentrale Rückgewinnung auf Kläranlagenstandorten könnte mit Blick auf die reine Umsetzung der Mindestanforderungen nach der Novelle der AbfKlärV (Szenario 3) aufgrund der resultierenden niedrigeren Rückgewinnungsquoten an den jeweiligen Standorten hinsichtlich der Einsparung von Betriebsmittelkosten Vorteile bringen. Einer Unterdimensionierung von Anlagen mit Blick auf möglicherweise steigende Anforderungen an die P-Rückgewinnungsquoten in der Zukunft kann durch modulare/erweiterbare Bauweise z. T. vorgebeugt werden. Zudem bleibt ein Hauptkostenpunkt bei der Rückgewinnung aus Klärschlamm die um ein Vielfaches höhere durchzusetzende Tonnage für die Prozesse. Im Vergleich zu 1 Mg OS Nassschlamm verbleiben nach der Monoverbrennung unter Annahme eines TR von 6 % und eines Ascheanteils von 35 % lediglich 21 kg Asche als Input zur P-Rückgewinnung.

Da 89,3 % der Rezyklat-Massenströme in Szenario 2 zentralisiert an maximal drei Orten (Monoverbrennungsstandorte) mit gleichbleibender Qualität anfallen, ist eine Aufbereitung auf TSP-Qualität und damit die Erhöhung der Wertschöpfung aus dem generierten Produkt denkbar. Dies bleibt abhängig vom präferierten Vertriebsweg zu prüfen. Die Verwertung der Rezyklate in der Düngemittelindustrie könnte die vorherige Aufbereitung auf TSP-Qualität aufgrund des dennoch niedriger anzunehmenden Marktpreises unwirtschaftlich werden lassen. Ein Direktvertrieb seitens des Betreibers der P-Rückgewinnungsanlage ist hingegen mit der Schaffung von Vertriebswegen, Verwaltungs- und Marketingkosten verbunden. Die Akzeptanz des Produktes bleibt zudem abzuwarten. Ein ähnliches Modell

der Aufbereitung von Rezyklaten bei der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm in Szenario 1 und 3 erscheint aufgrund der anzunehmenden sehr heterogenen Qualität der Rezyklate der unterschiedlichen Kläranlagen nicht sinnvoll durchführbar.

Die P-Rückgewinnung am eigenen Standort bleibt für die Kläranlagenbetreiber ein deutlich kontrollierbarer Prozess, in den sie je nach Bedarf – unter der Voraussetzung, dass die rechtlichen Vorgaben erfüllt werden – eingreifen können. Der z. T. offene Entsorgungsweg in die Mono- oder Mitverbrennung schafft Wettbewerb, der voraussichtlich weniger Preissteigerungen ab 2025 erwarten lässt. Die theoretisch zur Verfügung stehenden Kapazitäten in der Mitverbrennung werden, wie in Szenario 1 dargestellt, voraussichtlich deutlich höher liegen, als die aktuell benötigten. Durch entsprechenden monetären Anreiz bei steigenden Verbrennungspreisen könnten diese eventuell genutzt werden. Es besteht zudem die Möglichkeit, dass die Transportkosten aufgrund naher Verbrennungsstandorte reduziert werden können. In Abhängigkeit von der späteren Umsetzung der Rechtsvorgaben in die Praxis kommt durch den dezentralen Ansatz dennoch ein höherer Verwaltungs- und Personalaufwand auf die Kläranlagenbetreiber zu. Neben dem Betrieb der Anlagen und der Vermarktung der Produkte liegt dieser auch in der Kontrolle der Umsetzung der Rechtsvorgaben. Dabei sind viele Fragen, wie die Messintervalle zur Kontrolle der Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV, die Sicherstellung, dass das Vermischungsverbot beachtet wird und die jeweiligen Meldewege an die zuständigen Behörden aktuell noch nicht absehbar.

6 Kostenabschätzung der technischen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung

Die voraussichtlichen Kosten der in Kapitel 5 dargestellten Szenarien sind aufgrund von Unwägbarkeiten hinsichtlich vieler Faktoren mit den derzeit vorliegenden Daten und Erkenntnissen zu den einzelnen Prozessen nicht seriös berechenbar.

So ergeben sich aus Szenario 1 und 3 im Vergleich zu Szenario 2 vollständig andere Betrachtungsräume. Im Falle der Steigerung der rückgewinnbaren P-Fracht, wie in Szenario 2 angestrebt, wird der anfallende Klärschlammstrom auf den jeweiligen direkt entsorgenden Kläranlagen entwässert, zu möglichst wenigen Monoverbrennungsanlagen transportiert und nachfolgend eine P-Rückgewinnung aus der Asche beispielsweise an diesen Standorten durchgeführt. Die anfallenden Tonnagen sind dementsprechend groß. Die Betrachtungen aus Szenario 1 und 3 beziehen sich hingegen auf die dezentrale Rückgewinnung aus dem Klärschlamm der Kläranlagen vor Ort. Sollte innerhalb Hessens ab 2025 auf eine weitgehende Rückgewinnung auf Kläranlagenstandorten gesetzt werden, wie in diesen zwei Szenarien beschrieben, so kann eine Entsorgung auch in mehreren Mit- und Monoverbrennungsanlagen erfolgen. Somit würde ein definitiver Bezugsraum wie z. B. das Einzugsgebiet einer Monoverbrennungsanlage als Vergleichsgröße zur Ascherückgewinnung fehlen. Ein künstliches Ansetzen desselben Bezugsraumes aus Szenario 2 würde aber mögliche Kooperationspotentiale außerhalb dieses Einzugsgebietes außen vorlassen. Deshalb werden nachfolgend die möglichen Kosten für die P-Rückgewinnung aus Klärschlamm oder Klärschlammasche unabhängig voneinander dargestellt. Ein direkter Vergleich der Kostenabschätzungen untereinander wird aufgrund der in den Unterkapiteln dargelegten Gründe nicht empfohlen und daher nicht durchgeführt.

6.1 Kosten der Verfahren zur Rückgewinnung aus Klärschlamm

Die DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 „Wertstoffrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm“ gibt die Bandbreite der Kosten von Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Faulschlamm mit 2 bis 25 €/kg P bzw. 0,5 bis 18 €/E*a) an (PINNEKAMP ET AL., 2013). Damit ist die Kostenspanne bei diesem Stoffstrom am höchsten. Seit der Veröffentlichung des Arbeitsberichtes sind weitere Kostenangaben zu anderen Verfahren publiziert worden.

So wurden beispielsweise von STEINMETZ et al. (2014) Kosten zum Stuttgarter Verfahren je nach Säureverbrauch einschließlich Strombedarf mit 8 bis 12 €/kg P angegeben. Kapitaldienst und Personaleinsatz sind hierbei noch nicht berücksichtigt. Allerdings hat sich

das Stuttgarter Verfahren technisch weiterentwickelt (vgl. Kapitel 4.1.4) und die genannten Kosten sind somit überholt.

Von Schnee (BAM und UBA, 2014) wurden auf Basis der damals vorliegenden Erkenntnisse Gesamtbetriebskosten für das Budenheim-Verfahren von 0,6 €/kg P genannt, ohne Anteile auf Kapitalkosten und Betriebskosten zu differenzieren. Dieser für das Verfahren sehr aussichtsreiche Wert wurde auf Anfrage der Autoren zuletzt jedoch nicht mehr bestätigt, so dass aktuelle Verfahrenskosten nicht verfügbar sind (STÖSSEL, 2016). Da die Forschung zu diesem Prozess sich inzwischen – mit dem entsprechenden Erkenntnisgewinn – vom Labor- in den Technikummaßstab weiterentwickelt hat, ist im Zuge der weiteren Forschungsergebnisse des aktuell laufenden DBU Projektes (Kläranlage Mainz-Mombach) auch mit aktuellen und belastbaren Kostenangaben seitens der Fa. Budenheim zu rechnen. Eine Verwendung der vor über zwei Jahren publizierten Kostenangabe ist somit nicht zielführend.

Für das Verfahrensprinzip der hydrothermalen Carbonisierung in Verbindung mit einer Phosphorrückgewinnung aus der Kohleslurry (TerraNova® Ultra Verfahren) werden auf der Webseite der TerraNovaEnergy 49 €/Mg entwässerten Klärschlamm angegeben. (BUTTMANN, 2016) Unter der Annahme, dass dies für Klärschlamm Gültigkeit besitzt, der auf 30 % TR entwässert wurde und dieser ca. 30 g P/kg TR enthält, ergeben sich rund 5,5 €/kg P. Allerdings umfassen diese Kosten nicht nur die Phosphorrückgewinnung, sondern gemäß den Angaben sämtliche Investitionen und Betriebskosten zur Klärschlammbehandlung, die z.B. anstelle einer Faulung errichtet werden würde. Diese Kostenangabe ist daher nicht vergleichbar mit den übrigen o.g. Werten. Der Anteil für die Phosphorrückgewinnung lässt sich allerdings anhand der verfügbaren Daten weder separat errechnen noch ergäbe dies Sinn, da nicht von bestehenden HTC Anlagen ausgegangen werden kann, die lediglich um eine Stufe zur P-Rückgewinnung ertüchtigt werden müssten. Vielmehr müssten im konkreten Anwendungsfall Kosten für den Neubau einer anaeroben Schlammbehandlung oder nennenswerter Ersatzinvestitionen in eine vorhandene Schlammfaulung mit den genannten Kosten für eine HTC einschließlich P-Rückgewinnung einer Vergleichsrechnung unterzogen werden.

6.2 Zentrale Rückgewinnung aus Klärschlammmasche anhand einer Beispielrückgewinnungsanlage mit einer Kapazität von 20.000 Mg Asche/a

In diesem Kapitel wird ein Kostenvergleich der beiden P-Rückgewinnungsverfahren ASH DEC und PASCH anhand einer gewählten Klärschlammmenge von 57.000 Mg TS/a durchgeführt, sodass ein Inputvolumenstrom von 20.000 Mg Asche/a (35 % Ascheanteil) nach der Monoverbrennung gegeben ist. Diese Aschemenge fällt in der nördlichen Region um Kassel allein nicht an, sodass das Beispiel eher auf den stärker besiedelten Süden Hessens anwendbar ist. Im Norden stellt sich die Situation aufgrund der stark unterschiedlichen Kostenstruktur (Anteil der Investitions- bzw. Kapitalkosten an den Gesamtkosten) der Verfahren anders dar. Die nachfolgend berechneten Kosten beziehen sich ausschließlich auf die P-Rückgewinnung und die anschließende Reststoffentsorgung. Eine Kostenbetrachtung des Transports und der vorgeschalteten Monoverbrennung ist zum direkten Vergleich der Verfahren nicht notwendig. Der mögliche Erlös der Verfahren aus dem Verkauf der P-Rezyklate kann aufgrund mangelnder Erfahrung mit den erzielbaren Preisen nur abgeschätzt werden. Die durchgeführten Kostenrechnungen wurden daher zunächst nur für die geschätzten anfallenden Kosten verglichen (vgl. Tabelle 6.3). Eine Betrachtung der möglichen Erlöse wurde – unter Vorbehalt der nicht abschließend ermittelbaren Preise für P-Rezyklate – in Tabelle 6.3 durchgeführt.

6.2.1 Datenbasis

Die Kostenberechnung für das ASH DEC-Verfahren wurden freundlicherweise durch die Fa. Outotec zur Verfügung gestellt. Die Kosten des PASCH-Verfahrens sind auf Basis des vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens „Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm“ (PINNEKAMP ET AL., 2009) ermittelt worden. Sie wurden für den hier betrachteten Fall angepasst. Die Verfahren sind in den Kapiteln 4.1.12 (ASH DEC) und 4.1.9 (PASCH) beschrieben. Für ASH DEC wird hier die kostengünstigere Variante mit Einsatz von Natriumsulfat anstelle von Chloriden untersucht.

6.2.2 Auslegung der Anlagen und Festlegung der Randbedingungen

Für das Beispiel wurde ein Klärschlammstrom von 57.000 Mg TS/a angenommen (vgl. Tabelle 6.1). Dies entspricht bei einem angesetzten mittleren spezifischen Klärschlammfall je Einwohner von 50 g/(E·d) ca. 3,1 Mio. Einwohnerwerten. Der P-Gehalt in der Asche wurde in Anlehnung an die Ergebnisse von KRÜGER und ADAM (2013) zu 9 Gew-% angenommen. Die angegebenen Massenströme je Stunde ergeben sich aus der geschätzten Betriebszeit von 8.000 h/a.

Tabelle 6.1: Auslegungsparameter für die P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche (Basis: 20.000 Mg Asche/a)

Parameter	Wert	Einheit
Klärschlammstrom	57.000	Mg TS/a
spezifischer Klärschlammanfall*	50	g/(E·d)
rechnerischer Einwohnerwert	3.123.288	E
Asche-Massenstrom	20.000	Mg Asche/a
	2.500	kg/h
P-Gehalt	90	g P/kg Asche
P-Fracht	225	kg/h
P ₂ O ₅ -Fracht	515,6	kg/h
Betriebszeit	8.000	h/a
*Annahme: Mittelwert Schlammanfall zwischen Faulschlamm (40 g/(E·d)) und stabilisiertem Schlamm (60 g/(E·d)) nach DWA M 368 (DWA-M 368, 2014)		

Aus den festgelegten Randbedingungen ergibt sich der in Tabelle 6.2 dargestellte Betriebsmittelbedarf der Verfahren. Genauere Angaben zum Betriebsmittelbedarf für PASCH können Tabelle C.1 entnommen werden.

Tabelle 6.2: Betriebsmittelbedarf, Produkt- und Abfallmassenstrom der Verfahren PASCH und ASH DEC im Vergleich (Basis: 20.000 Mg Asche/a)

Betriebsmittel/Parameter	Kosten Betriebsmittel	PASCH	ASH DEC
Salzsäure (33 Gew.-%)	70 €/Mg	2.646 kg/h	-
Lösungsmittlersatz	2.000 €/Mg	4,6 kg/h	-
Calciumoxid	95 €/Mg	634 kg/h	-
Ammoniumlösung (25%)	135 €/Mg	25 kg/h	-
Ammoniumhydrogencarbonat (25%)	150 €/Mg	9,4 kg/h	-
Eisen(III)chloridlösung (30%)	150 €/Mg	150 kg/h	-
Trockenschlamm als Reduktionsmittel	n. a.	-	200 kg/h
Natriumsulfat	n. a.	-	1.130 kg/h
Produktmassenstrom		1.125 kg/h	3.207 kg/h
P-Gehalt in Produkt		18 %	7,0 %
Rückgewinnungsquote		90 %	100 %
P-Fracht rückgewonnen		203 kg P/h	225 kg P/h
Abfallmassenstrom (fest)		1.500 kg/h	100 kg/h

Ein großer Unterschied in den Stoffstrombilanzen von PASCH und ASH DEC liegt in dem stark unterschiedlichen Produkt/Rezyklat-Verhältnis. Bei ASH DEC wird durch Metallabreicherung ein weitgehend schwermetallarmes Rezyklat geschaffen, welches durch die

Zugabe von 45,2 % (1.130 kg/h) Natriumsulfat und 8 % Trockenschlamm (200 kg/h) bezogen auf die Aschemenge im Input (2.500 kg/h) deutlich im Massenstrom erhöht wird (3.207 kg/h Produkt, 100 kg/h Abfall, 523 kg/h Verluste durch Rauchgas). Das Rezyklat hat deshalb eine niedrigere P-Konzentration (7 % P in 3.207 kg/h) als die Asche (9 % P in 2.500 kg/h). Die P-Rückgewinnungsquote bezogen auf die Asche liegt bei 100 %. Im PASCH Verfahren wird hingegen ein phosphorreicher Massenstrom aus der Asche gelöst und mittels Kalkfällung rückgewonnen (18 % P-Gehalt im Rezyklat). Dabei liegt der Anteil der rückgewonnenen P-Fracht bei ca. 90 % und der Rezyklat-Massenstrom macht 45 % des Asche-Massenstroms aus. Die Metallabreicherung schafft sehr niedrige Schwermetallgehalte im Rezyklat. Im Ergebnis werden in beiden Verfahren hohe Rückgewinnungsquoten erreicht. Im PASCH Verfahren fällt neben dem festen Abfallstrom zusätzlich Abwasser zur Reinigung an. Der Abfallstrom liegt bei ca. 60 % des Inputs. Der Abfallstrom im ASH DEC-Verfahren liegt lediglich bei 4 % des Inputs an Asche, was hohe Kosteneinsparungen bei der Entsorgung generieren könnte.

6.2.3 Kostenvergleich und mögliche Erlöse

Der Kostenvergleich wurde in Investitionen, Betriebskosten und Entsorgungskosten aufgeschlüsselt in Tabelle 6.3 dargestellt. Für die Investitionen wurde ein Eigenkapitalanteil von 30 % (5 % Eigenkapitalrendite) und Zinsen von 1 % auf das Fremdkapital angesetzt. Dies entsprach der Kostenrechnung durch Outotec und wurde für das PASCH-Verfahren so übernommen. Die Laufzeit beider Kostenrechnungen wurde auf 20 Jahre festgelegt.

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Investitionen (inkl. Zinsen) im PASCH-Verfahren ca. 72 % niedriger liegen als im ASH DEC-Verfahren. Der hohe Betriebsmittelaufwand für PASCH bewirkt, dass PASCH insgesamt teurer zu betreiben ist. Die Betriebskosten für ASH DEC wurden als Gesamtkosten vom Hersteller genannt. Darin sind u. a. die Betriebsmittel, Personal, Wartung, Handling und Versicherung. Für ASH DEC wurde der Personalaufwand mit sechs zusätzlichen Mitarbeitern angegeben, wenn der Betrieb der Anlage an eine Monoverbrennungsanlage angegliedert wurde. Der Personalaufwand für PASCH wurde analog zu sechs Personen angesetzt

Tabelle 6.3: Kostenabschätzung für die Verfahren PASCH und ASH DEC auf Basis einer P-Rückgewinnung aus 20.000 Mg Asche/a für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren

			PASCH	ASH DEC
Gesamt	Investitionen	Investitionskosten als Capital expenditure (CAPEX)	3.389.100 €	15.000.000 €
		(inkl. Zinsen)	4.981.254 € ¹	17.537.000 €
	Laufende Kosten	Betrieb	59.052.331 €	44.544.800 €
		Entsorgung	21.278.020 €	1.280.000 €
Jahreskosten (Laufzeit: 20 Jahre)	Investitionen		249.063 €/a	878.523 €/a
	Betriebskosten	Wartung	89.974 €/a	2.227.241 €
		Personal	330.000 €/a	
		Betriebsmittel	2.532.643 €/a	
	Entsorgungskosten		1.063.901 €/a	40.000 €/a
	Gesamt		4.265.580 €/a	3.145.764 €/a
Spezifische Kosten	Kosten in €/kg P ₂ O ₅ rückgewonnen	Investitionen	0,07	0,54 €
		Betrieb	0,80	0,21 €
		Entsorgung	0,29	0,08 €
		Gesamt	1,15	0,83 €
	Kosten in €/kg P rückgewonnen	Investitionen	0,15	1,24 €
		Betrieb	1,82	0,49 €
		Entsorgung	0,66	0,18 €
		Gesamt	2,63	1,90 €
	Kosten je Einwohnerwert in €/(Ea)		1,37	1,01

Als weitere Kostenart sind die Entsorgungskosten zu nennen. Die Kosten der Deponierung von Monoverbrennungsaschen wurden anhand der von PINNEKAMP et al. (2014) erhobenen Daten zu im Mittel 50 €/Mg angesetzt. Für die jeweiligen Hauptabfallströme aus den Verfahren wurde der gleiche Wert angesetzt. Eventuell liegt der tatsächliche Entsorgungspreis je Mg Abfall aufgrund der gestiegenen Schwermetallgehalte bei ASH DEC höher als für Monoverbrennungsasche. Der stark schwermetallhaltige Fällschlamm aus dem PASCH-Verfahren wurde separat zur Restasche mit einem

¹ Angesetzte Nutzungsdauern/Abschreibungszeiträume PASCH: Bautechnik: 30 Jahre; Maschinentechnik 15 Jahre, EMSR: 10 Jahre

Entsorgungspreis von 600 €/Mg abgeschätzt. Die Kosten der Abwasserreinigung wurden zudem zu 2 €/m³ angenommen. Für PASCH liegen die Entsorgungskosten nach den angesetzten Gebühren ca. 25-fach höher als für ASH DEC.

Insgesamt ist anhand dieses Kostenvergleichs – ohne Einbezug eventueller Erlöse – von einer Steigerung der Abwassergebühren im Einzugsbereich der Monoverbrennungsanlage von 1,37 €/(E-a) für PASCH und 1,01 €/(E-a) für ASH DEC auszugehen.

Bei den potentiellen Erlösen und Kosteneinsparungen in Tabelle 6.4 wurden Einsparungen aus der nicht zur Entsorgung anfallenden Monoverbrennungsasche und mögliche Erlöse durch die Rezyklate betrachtet.

Tabelle 6.4: Potentielle Erlöse durch den Verkauf von Rezyklat und die Reduktion des Ascheanfalls zur Entsorgung

				PASCH	ASH DEC
Erlös aus Rezyklatverkauf	TSP-Qualität	Erlös je kg P rückgewonnen	€/kg P	1,66 €	
		Erlös pro Jahr	€/a	2.689.200 €	2.988.000 €
		Erlös je Einwohner	€/E-a	0,86 €	0,96 €
	Rohphosphat-Qualität	Erlös je kg P rückgewonnen	€/kg P	0,76 €	
		Erlös pro Jahr	€/a	1.231.200 €	1.368.000 €
		Erlös je Einwohner	€/E-a	0,39 €	0,44 €
Kostenreduktion durch verminderten Ascheanfall zur Entsorgung	Reduktion Ascheanfall		Mg/a	8.000 Mg/a	19.200 Mg/a
	Reduktion Jahreskosten		€/a	400.000 €	960.000 €
	Reduktion je kg P rückgewonnen		€/kg P	0,25 €	0,53 €
	Reduktion je Einwohner		€/E-a	0,13 €	0,31 €

Die Kostenreduktion bei der Deponierung der Monoverbrennungsaschen aufgrund des geringeren Massenstroms zur Entsorgung nach der P-Rückgewinnung wurde – analog zu den Entsorgungskosten der Abfälle aus den Rückgewinnungsanlagen – mit einem Entsorgungspreis von 50 €/Mg Asche ermittelt. Für ASH DEC würden die Deponierungskosten um 0,31 €/(E-a) und somit erwartungsgemäß deutlicher reduziert als bei PASCH. Die Erlöse je rückgewonnenem Kilogramm Phosphor sind abhängig vom erzielbaren Marktpreis (vgl. Kapitel 5.4.1). Die Erlöse werden dabei voraussichtlich näher an den erzielbaren Preisen für Rohphosphat liegen. Aufgrund der signifikant besseren Schwermetallabtrennung und dem höheren P-Gehalt könnte das PASCH-Rezyklat leicht bessere Preise erzielen. Allerdings fällt hier prozessbedingt etwa 10 % weniger Phosphor im Rezyklat an, als beim ASH DEC-Verfahren.

7 Maßnahmen zur Umsetzung der Phosphorrückgewinnung in Hessen

7.1 Kurzfristige organisatorische und vorbereitende Maßnahmen

Im Vorfeld der Umsetzung einer Gesamtstrategie auf Basis der hier dargestellten Ergebnisse und begleitend in den ersten Monaten können bereits einzelne Maßnahmen zur Vorbereitung getroffen werden.

7.1.1 Datenerfassung und Bereitstellung

Die Datenlage innerhalb Hessens hinsichtlich der Phosphorgehalte im Klärschlamm, der anfallenden Klärschlammengen und der Verfahrenstechnik auf der Kläranlage ist insgesamt gut. Die Daten wurden bislang vor allem im Hinblick auf die derzeit vorherrschende Entsorgungssituation und die bestehenden rechtlichen Rahmenbedingungen erhoben. Aktuelle Daten zu den P-Gehalten und Schwermetallen im Klärschlamm sind daher flächendeckend lediglich für die Schlämme vorhanden, deren Verwertungsweg aktuell in der Landwirtschaft oder im Landbau liegt. Mit Umsetzung der Novelle der AbfKlärV in ihrer jetzigen Form, wird eine starke Konzentration der Klärschlamm Entsorgung in der Mono- oder Mitverbrennung stattfinden.

Zur Kontrolle der Reinigungsleistung der Kläranlagen ist die genaue Art der P-Elimination nicht im Detail von Belang. Im Hinblick auf die P-Rückgewinnung sind z. B. die Erfassung der verwendeten Fällmittelart (Fe/Al-Basis) oder aller Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung und einer funktionierenden rein biologischen P-Elimination sinnvoll. Weiterhin wäre hinsichtlich des zu wählenden P-Rückgewinnungsverfahrens relevant, ob jahreszeitlich bedingt sowohl mit Aluminium als auch mit Eisen gefällt wird. Hinweise zu den Einflussfaktoren der P-Elimination auf die Wahl der Rückgewinnungstechnologie sind in Kapitel 4.4 zusammengefasst.

Für die Umsetzung der P-Rückgewinnung in Hessen sollten zeitnah vorbereitend die vorhandenen Berichtswege genutzt werden, um die benötigten Daten der direkt entsorgenden Kläranlagen möglichst vollständig zu erfassen. So kann auch frühzeitig ein Dialog mit den Betreibern der Kläranlagen über Optionen hinsichtlich der P-Rückgewinnung geführt werden. Auch eine, mit den Kläranlagenbetreibern abgestimmte, Bereitstellung von Daten zur Einordnung der Anlagen anhand der Möglichkeiten zur P-Rückgewinnung ist denkbar. Vorteilhaft wäre diese z. B. bei der Ermittlung von Kooperationspotentialen. Die eventuell vorhandenen Kooperationen und guten Beziehungen einzelner Betreiber zueinander sind naturgemäß in einem solchen Gutachten schwer darstellbar. Doch konnten

auch hier einzelne Potentiale für Kooperationen ermittelt und Hinweise zu deren Umsetzung gegeben werden.

7.1.2 Information und Dialog mit den Kläranlagenbetreibern

Die erfolgte Datenerfassung und Auswertung in diesem Bericht kann in einem nachfolgenden Schritt genutzt werden, um Informationsmaterialien für Kläranlagenbetreiber bereit zu stellen. Dabei sind neben den technischen Möglichkeiten und Einschränkungen der P-Rückgewinnung aufgrund von Metallgehalten im Klärschlamm oder der Art der P-Elimination auf den Kläranlagen auch organisatorische Hinweise zur geplanten Umsetzung der Novelle der AbfKlärV innerhalb des Bundeslandes sinnvoll.

Neben der Information der Akteure innerhalb Hessens kann die Bereitstellung einer Diskussionsplattform angestrebt werden. Hier können Betreiber sich gezielt über mögliche Probleme aber auch Erfahrungen mit Rückgewinnungstechnologien und -konzepten austauschen. Beispielhaft wäre die Einrichtung von Runden Tischen, die jährliche Fortführung der im Anschluss des Gutachtens geplanten Informationsveranstaltung als Diskussionsplattform oder ggf. auch die Bereitstellung eines Online-Forums denkbar. Grundsätzlich ist die Wichtigkeit des Informationsaustausches hoch einzuschätzen. Innerhalb des Gutachtens wurden einzelne Kläranlagen kontaktiert und es stellte sich dabei heraus, dass diese vereinzelt bereits Erfahrungen mit P-Rückgewinnungsverfahren im kleintechnischen Maßstab gesammelt hatten oder aktuell Überlegungen zur P-Rückgewinnung anstellten. Im Hinblick auf ein ganzheitliches Rückgewinnungskonzept sollte versucht werden, aus diesen Erfahrungen zu lernen und innerhalb Hessens ganzheitlich davon zu profitieren.

7.2 Mittelfristige Maßnahmen

Als mittelfristige Maßnahmen werden hier die realistisch bis 2020 umsetzbaren Maßnahmen definiert. Innerhalb der nächsten vier Jahre können viele Maßnahmen angestoßen, bzw. die Umsetzung von Rechtsvorgaben begleitet werden, um eine ganzheitliche Integration der P-Rückgewinnung in die Abwasserentsorgung Hessens zu gewährleisten. Aufgrund des knappen Zeitplans bis zur Umsetzung der Vorgaben, wie dieser aktuell aus der Novelle der AbfKlärV zu entnehmen ist, müssen viele Dinge bereits kurzfristig verfolgt werden.

7.2.1 Demonstrationsvorhaben vielversprechender Verfahren innerhalb Hessens

Die in diesem Konzept für eventuelle Demonstrationsvorhaben vorgeschlagenen Rückgewinnungsverfahren bieten im Zusammenhang mit den Szenarien den Ausgangspunkt für weitere Planungen. Zur Auswahl stehen grundsätzlich Verfahren aus nassem Klärschlamm und Asche. Beide Wege sollten weiterverfolgt werden, um die flächendeckende Phosphorrückgewinnung ab 2025 sicherstellen zu können. Im Hinblick auf den großen erzielbaren Effekt bei der Rückgewinnung aus Klärschlammasche im Stadtgebiet Frankfurt am Main, haben die hier anwendbaren Verfahren im Falle der Festlegung auf einen Demonstrationsreaktor Vorrang. Allein die Klärschlämme der Stadt Frankfurt machen derzeit 26,5 % aller Klärschlämme in Hessen aus.

Die Ausschreibung und der Bau einer Demonstrationsanlage sollte möglichst in den nächsten zwei Jahren erfolgt sein, um viele Forschungsergebnisse in die Planung einer Großanlage einfließen zu lassen. Grundsätzlich sollte die Pilotierung in einem Maßstab erfolgen, der einen kontinuierlichen Betrieb ermöglicht. Für die Umsetzung der Phosphorrückgewinnung fehlen aktuell vor allem großtechnische Erfahrungen, was bei der Auslegung der Demonstrationsanlage berücksichtigt werden sollte. Der Forschungsbetrieb könnte je nach gewähltem Verfahren neben der Umsetzung der Großtechnik fortgeführt werden, um Verfahrensoptimierungen im Kleinmaßstab zu testen und Erfahrungen für die zweite Generation der großtechnischen P-Rückgewinnungsanlagen zu sammeln.

7.2.2 Begleitung der Kläranlagen bei der Umsetzung der Maßnahmen nach WRRL auch hinsichtlich der P-Rückgewinnung

In Kapitel 4.5 wurden die potentiellen Synergien bei der Umsetzung der WRRL hinsichtlich Maßnahmen zur P-Elimination auf Kläranlagen beschrieben. Hier können – aufbauend auf der vertiefenden Datenerfassung und der Etablierung von Kommunikationsplattformen – durch das Land Hilfestellungen in Vorbereitung auf die Phosphorrückgewinnung geliefert werden.

7.2.3 Prüfung der Notwendigkeit zur Einrichtung von Monokompartimenten auf Deponien der Klasse II

Die Notwendigkeit zur Schaffung von Zwischenlagerungskapazitäten für Monoverbrennungaschen von 2025 bis 2035 ist nach derzeitigem Sachstand gegeben. Es ist nicht realistisch darstellbar, dass sowohl die Umstellung der Klärschlamm Entsorgung, als auch die Phosphorrückgewinnung in Deutschland flächendeckend ab 2025 sichergestellt ist. Somit kann, auch im Hinblick auf den Abfallwirtschaftsplan in Hessen, mittelfristig bereits eine Reservierung von Monokompartimenten auf Deponien überlegt

werden. Damit wird auch sichergestellt, dass die Klärschlammaschen möglichst an wenigen Orten innerhalb Hessens abgelagert werden, um die Kosten für die Rückholung der Aschen mit dem Ziel der Phosphorrückgewinnung nicht weiter zu erhöhen.

7.3 Langfristige Maßnahmen

Langfristig ist neben der Sicherstellung der Entsorgungssicherheit auch die Kontrolle der durchgeführten Maßnahmen und die Einordnung dieser in die Gesamtstrategie in Hessen zu leisten. Aktuell ist aufgrund der geringen Anzahl an großtechnischen Rückgewinnungsanlagen noch kein Stand der Technik definierbar. Im Zeitraum der Umsetzung der Maßnahmen ist zu prüfen, inwieweit die Einzellösungen auf Kläranlagen und an Verbrennungsstandorten die Anforderungen an die P-Rückgewinnung erfüllen. Unabhängig davon wird empfohlen, dass das Land Hessen die Rückgewinnung von Phosphor aus Kläranlagen aus Gründen des Umweltschutzes und des Ressourcenschutzes verfolgt.

Der Vertrieb von P-Rezyklaten soll möglichst koordiniert und konzentriert erfolgen um den Gesamtaufwand im Hinblick auf den erzielbaren Nutzen angemessen zu halten. Bei dem in den Szenarien 1 und 3 ausgewiesenen Kooperationspotential der Betreiber wurde auf technischer Ebene argumentiert. Grundsätzlich sind gemeinsame Vertriebsmodelle allein aufgrund der Erhöhung der Margen zur Attraktivitätssteigerung des angebotenen Produkts sinnvoll. Dabei ist der Zusammenschluss von Kläranlagen mit vergleichbarer P-Rückgewinnungstechnologie aufgrund der zu erwartenden ähnlichen Produktqualität zu fördern. Die hessische Landesregierung kann hier durch Vermittlung unter den Betreibern und Bereitstellung von Kommunikationsinstrumenten auch über die Anfangsphase hinaus unterstützen.

Die Begleitung bei der Umsetzung der Maßnahmen ist essentiell für die Sicherstellung einer flächendeckenden Lösung zur P-Rückgewinnung innerhalb des Bundeslandes. Aufgrund der gleichzeitigen Umstrukturierung der Klärschlammentsorgung in Deutschland und der Vorgabe zur Phosphorrückgewinnung müssen viele Prozesse parallel ablaufen. Eine grundsätzliche Richtungsentscheidung zur zukünftigen Entsorgung von Klärschlamm innerhalb eines Bundeslandes bietet Planungssicherheit bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung. Dafür wird im ersten Schritt die zeitnahe Verabschiedung einer bindenden Novelle der AbfKlärV benötigt.

8 Zusammenfassung

Der Referentenentwurf zur Novelle der Klärschlammverordnung enthält konkrete Zielsetzungen zum Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung und Einstieg in die flächendeckende Phosphorrückgewinnung in der Bundesrepublik Deutschland. Genauer dürfen nach derzeitigem Stand ab 2025 keine Klärschlämme von Kläranlagen der GK 4 und 5 landwirtschaftlich oder landbaulich verwertet werden. Ab einem Wert von 20 g P/kg TM im Klärschlamm sind diese Schlämme zudem einer Phosphorrückgewinnung zuzuführen. Innerhalb dieses Gutachtens wurde aufgrund der in Hessen verfolgten Ressourcenschutzstrategie zudem die Klärschlämme von Kläranlagen kleiner GK 4 betrachtet, um eventuelle Potentiale aufzudecken.

Auf Basis von Daten zu den in Hessen befindlichen 712 Kläranlagen der GK 1 bis 5 aus den Jahren 2004 bis 2014 wurden zunächst die nach Novelle der AbfKlärV für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen identifiziert. Zusätzlich wurde das Potential der Kläranlagen der GK 3 mit einbezogen. Insgesamt wurden 81,8 % der Klärschlämme in Hessen mit einer Phosphorfracht von 3.403 Mg P/a in die nachfolgende Szenarienbetrachtung zur Konzepterstellung mit einbezogen. Zudem wurden Aspekte wie die prognostizierte Bevölkerungsentwicklung, Maßnahmen zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie und Potentiale aus Kläranlagen mit geringeren P-Gehalten innerhalb einer Sensitivitätsanalyse betrachtet.

Durch umfangreiche Literaturlauswertungen und Anfragen an Verfahrenshersteller konnte der aktuelle Stand der Forschung dargelegt werden. Dabei wurden die Verfahren den jeweiligen P-Rückgewinnungspfaden aus Schlammwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche zugeordnet und hinsichtlich verschiedener Aspekte beschrieben. Nach der Darstellung der Verfahren wurden in Absprache mit dem HLNUG und dem HMUKLV ein Rückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser, zwei Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm und zwei Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche ausgewählt und vertiefend verglichen. Dabei wurden folgende Aspekte berücksichtigt: Technischer Untersuchungsstand, Mindestanlagengröße, Rezyklat-Qualität (Pflanzenverfügbarkeit), Phosphorrückgewinnungspotential, Modularisierbarkeit, Kosten u. a. m.

Innerhalb einer Szenarienbetrachtung wurden ein Szenario mit weitgehender Rückgewinnung auf Kläranlagenstandorten, ein Szenario mit weitgehender Rückgewinnung aus Klärschlammmonoverbrennungssasche und ein Szenario zur Erfüllung der Mindestvorgaben der Novelle der AbfKlärV entwickelt und miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass aufgrund der geforderten hohen Rückgewinnungsquoten aus Klärschlammasche in diesem

Szenario das höchste P-Rückgewinnungspotential vorlag. Zudem kann die bei Konzentration auf wenige Monoverbrennungsanlagen immanente Zentralisierung der P-Rückgewinnung hinsichtlich der Rezyklatqualität und der zu erwartenden Skalierungseffekte bei den Rückgewinnungskosten Vorteile bieten. Gleichzeitig sind aktuell nicht genügend Kapazitäten zur Monoverbrennung des zusätzlich zur Verbrennung anfallenden Klärschlammes vorhanden, während in der Mitverbrennung mögliche Reserven aufgezeigt werden konnten.

Nach der Szenarienbetrachtung konnten Maßnahmen zur Umsetzung der Phosphorrückgewinnung identifiziert und beschrieben werden, die in unterschiedliche Zeithorizonte eingeteilt wurden.

Literaturverzeichnis

2000/60/EG (Hrsg.) (2000): Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften.

ADAM, C., KLEY, G., SIMON, F.-G., LEHMANN, A. (2007): Recovery of nutrients from sewage sludge – Results of the European research-project SUSAN.

APPEL, T. (2016): Persönliche Mitteilung von Thorsten Appel, Leiter Entsorgungsmanagement der Infraseriv GmbH & Co. Höchst KG am 11.03.2016.

AVA-CO2 SCHWEIZ AG (Hrsg.) (2014): AVA-CO2 schafft Durchbruch bei der Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm und stellt das Verfahren „AVA cleanphos“ vor Mitteilung an Kunden und Partner.

BAM (Hrsg.), UBA (Hrsg.) (2014): Workshop Abwasser - Phosphor - Dünger 28./29.01.2014.

BMJV, (2014): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) Anhang 1 Häusliches und kommunales Abwasser AbwV. Fundstelle: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/abwv/anhang_1.html, Zugriff am: 21.04.2016.

BMUB (Hrsg.) (2015): Begründung zum Referentenentwurf der Novelle der AbfKlärV.

BOGNER, R. (2014): Persönliche Mitteilung von Rudolf Bogner, Geschäftsführer CNP-Technology Water and Biosolids GmbH, Hamburg, 2014.

BRITTON, A. T., SACLUTI, F., OLDHAM, W. K., MOHAMMED, A., MAVINIC, D. S., KOCH, F. A. (2007): Value from Waste – Struvite Recovery at the city of Edmonton's Gold Bar WWTP. Unter Mitarbeit von R. J. LeBlanc, P. J. Laughton und R. Tyagi, Moncton, New Brunswick, Kanada, S. 535–542.

BUNDESREGIERUNG (Hrsg.) (2013): Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, 18. Legislaturperiode, 2013. Online verfügbar unter http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2013/2013-12-17-koalitionsvertrag.pdf?__blob=publicationFile.

BUTTMANN, M. (2015): Persönliche Mitteilung von Dipl.-Ing. Marc Buttmann, Geschäftsführer der TerraNova Energy.

BUTTMANN, M. (2016): TerraNova® Ultra- eine Investition, die sich lohnt. Online verfügbar unter <http://terranova-energy.com/wirtschaftlichkeit/>, Zugriff am: 04.05.2016.

CABEZA, R., STEINGROBE, B., RÖMER, W., CLAASSEN, N. (2011): Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. *Nutr Cycl Agroecosyst* (91), S. 173–184.

CS (2015): Funktionsprinzip der CS-HTC90TM-Anlage. Online verfügbar unter <http://www.cs-carbonsolutions.de/CS-Technologie/HTC-Prozess.html>.

DEUTSCHER BUNDESTAG (Hrsg.) (2011): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Krischer, Dorothea Steiner, Bärbel Höhn, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN. Mitverbrennung von Abfällen in Kohlekraftwerken.

DüMV (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) DüMV, vom 2012.

DWA (Hrsg.) (2015): DWA-Positionen zur Klärschlamm Entsorgung. Online verfügbar unter https://de.dwa.de/tl_files/_media/content/PDFs/Abteilung_WAW/Hoe/Positionspapiere/20150324DWAPositionKlaerschlammentsorgung2015final.pdf, Zugriff am: 30.03.2016.

DWA-M 368 (Hrsg.) (2014): Merkblatt DWA-M 368 Biologische Stabilisierung von Klärschlamm.

EHBRECHT, A. (2013): Persönliche Mitteilung von Dipl.-Geoökol. Anke Ehbrecht, Kompetenzzentrum für Materialfeuchte.

EISENMANN (2015): Eisenmann Pyrobustor® Zweikammer-Drehrohrofen. Online verfügbar unter <http://www.eisenmann.com/de/produkte-und-services/environmental-technology/reststoffentsorgung/pyrobustor.html>.

ESEMAG (2006): Sewage-to-fertilizer solution to be launched in Edmonton. *Environmental Science & Engineering Magazine* (Vol. 19, Nr.2), S. 40–42.

EUWID (Hrsg.) (2014): Düngemittelverordnung: BDE sieht Probleme bei synthetischen Polymeren. Online verfügbar unter <http://www.euwid-wasser.de/news/politik/einzelansicht/Artikel/duengemittelverordnung-bde-sieht-probleme-bei-synthetischen-polymeren.html>, Zugriff am: 21.04.2016.

EWERT, W., WAGENBACH, A. (2013): Praktische Umsetzung der MAP-Rückgewinnung aus der Flüssigphase. Unter Mitarbeit von DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Fulda (8. DWA Klärschlammtag).

HEINITZ, F., FARACK, K., ALBERT, E. (2013): Verbesserung der P-Effizienz im Pflanzenbau. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Freistaat Sachsen). LfULG-Schriftenreihe (9/2013).

HEINZMANN, B., LENGEMANN, A. (2013): Vom Betriebsproblem zum Berliner Verfahren - Phosphorrückgewinnung als Magnesiumammoniumphosphat in der Kläranlage Waßmannsdorf.

HERMANN, L. (2013): Thermochemischer Aufschluss von Klärschlammaschen – Das Outotec Verfahren. Vortrag auf dem Symposium „Phosphorrückgewinnung – Aktueller Stand von Technologien, Einsatzmöglichkeiten und Kosten“, Bonn (BMU).

HMUKLV (Hrsg.) (2015a): Abfallwirtschaftsplan Hessen Siedlungsabfälle und Industrielle Abfälle. Stand: 24.04.2015. Aufl. Hg. v. HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMASCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ. Wiesbaden.

HMUKLV (Hrsg.) (2015b): Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Hessen Maßnahmenprogramm 2015-2021. Hg. v. HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMASCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ.

HÖHNE, A. (2014): Ressourcenschutz in der hessischen Abfallwirtschaft - Am Beispiel von Phosphor. Masterarbeit, Hochschule RheinMain Wiesbaden Rüsselsheim.

HOLPERT, M., SCHMIDL, E. (2016): Zukunft der Mitverbrennung von Klärschlamm. In: Pinnekamp, J. (Hrsg.): 49. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft "Wasserwirtschaft 4.0". 2. bis 4. März 2016 in der Messe Essen Ost, Bd. 239. Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V, Aachen (Gewässerschutz, Wasser, Abwasser, 239), S. 64/1.

HSL (2016): Regionale Bevölkerungsvorausberechnung 2014 – 2030. Hg. v. HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT. Online verfügbar unter <http://www.statistik-hessen.de/themenauswahl/bevoelkerung-gebiet/landesdaten/ergebnisse-der-aktuellsten-vorausberechnung-der-bevoelkerung/regionale-bevoelkerungsvorausberechnung-2014-2030/index.html>, Zugriff am: 21.04.2016.

KASSEL WASSER (Hrsg.) (o. J.): Geschichte Klärwerk. Online verfügbar unter http://www.kasselwasser.de/inhalt/geschichte_klaerwerk.html, Zugriff am: 04.05.2016.

KLÄUSLI, T. M. (2015): Entwicklungen bei der Phosphor-Rückgewinnung. UmweltMagazin, S. 27–28.

KLEY, G., ADAM, C., BRENNEIS, R., SIMON, F.-G. (2005): Thermochemische Aufbereitung von Klärschlammaschen zu Phosphordüngern – das EU-Projekt SUSAN Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm, Konzepte, Verfahren, Entwicklungen (167).

KOALITIONSVERTRAG HESSEN (Hrsg.) (2014 - 2019): Verlässlich gestalten - Perspektiven eröffnen Koalitionsvertrag zwischen der CDU Hessen und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN Hessen für die 19. Wahlperiode des hessischen Landtags. Hg. v. CDU HESSEN und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN HESSEN.

KÖHLER, M. (2016): Kohlekraftwerk Eon baut Staudinger nicht aus. Online verfügbar unter <http://www.faz.net/aktuell/rhein-main/kohlekraftwerk-eon-baut-staudinger-nicht-aus-11959310.html>.

KOPP, J. (2015): Die Vorgaben der Düngemittelverordnung zu synthetischen Polymeren – der schnelle Aufstieg aus der Klärschlammverwertung?, 2015.

KRATZ, S., SCHNUG, E. (2009): Zur Frage der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor in Düngemitteln. JOURNAL FÜR KULTURPFLANZEN (61 (1)), S. 2–8.

KRÜGER, O., ADAM, C. (2013): Monitoring von Klärschlammaschen. Tagung: Phosphorrückgewinnung – Aktueller Stand und Technologien – Einsatzmöglichkeiten und Kosten.

LEBEK, M., J. LEHMKUHL, A. RAK, S. LOHMAR (2015): Herstellung von Phosphorsäure aus Klärschlammasche. UmweltMagazin, S. 40–42.

LENGEMANN, A., EWERT, W. (2015): Persönliche Mitteilung „Phosphor Tagesbilanz Klärwerk Waßmannsdorf“.

LFU (Hrsg.) (2009): Verwertung und Beseitigung von Holzaschen. Merkblatt. Unter Mitarbeit von LfL und LWF.

LFU (Hrsg.) (2015): Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen Abschlussbericht. Hg. v. BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT.

MEYER, C. (2013): Persönliche Mitteilung von Regierungsbaumeister Dipl.-Ing. Carsten Meyer.

MEYER, C. (2014): Persönliche Mitteilung von Regierungsbaumeister Dipl.-Ing. Carsten Meyer.

- MEYER, C. (2015): Persönliche Mitteilung von Regierungsbaumeister Dipl.-Ing. Carsten Meyer.
- MEYER, C., PREYL, H., STEINMETZ, H. (2015): Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm mit dem Stuttgarter Verfahren, Köln (16. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium).
- MICHEL (Hrsg.) (2016): Persönliche Auskunft des Betriebsleiters der Kläranlage Gießen.
- MORF, L. (2013): Phosphor Mining Technische Machbarkeit gesichert. Optimierung gestartet.
- N. N. (Hrsg.) (2006): Full-scale struvite recovery Scope Newsletter No. 65.
- N. N. (Hrsg.) (2015): Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit „Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung“, 2015. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/abfklaerv_begrueendung_2015_bf.pdf.
- NOVELLE ABFKLÄRV (Hrsg.) (2015): Novelle AbfKlärV Referentenentwurf.
- OBERNBERGER, I. (1997): Aschen aus Biomassefeuerungen - Zusammensetzung und Verwertung. Thermische Biomassenutzung - Technik und Realisierung. VDI Bericht. 1997 (1319), S. 199–222.
- PINNEKAMP, J., EVERDING, W., GETHKE, K., MONTAG, D., WEINFURTNER, K., SARTORIUS, C., HORN, J. v., TETTENBORN, F., GÄTH, S., WAIDA, C., FEHRENBACH, H., REINHARDT, J. (2011): Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland. Abschlussbericht an das BMBF, Förderkennzeichen: 02WA0805, 02WA0806, 02WA0807, 02WA0808, RWTH Aachen Aachen. Institut für Siedlungswasserwirtschaft.
- PINNEKAMP, J., MALMS, S., MONTAG, D., SCHMELZ, K.-G., VAN DER MEER, M., LEHRMANN, F., BLÖTHE, U., EITNER, R., KLETT, W., SCHWETZEL, W. (2014): ZWIPHOS - Entwicklung eines Zwischenlagerungskonzepts für Klärschlammmonoverbrennungsaschen für Deutschland mit dem Ziel einer späteren Phosphorrückgewinnung Schlussbericht.
- PINNEKAMP, P., DOETSCH, P., RATH, W., GRÖMPING, M. (2010): Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm. Abschlussbericht, RWTH Aachen Aachen. Institut für Siedlungswasserwirtschaft.
- PINNEKAMP ET AL. (Hrsg.) (2009): Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm.

PINNEKAMP ET AL. (Hrsg.) (2013): Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm.

P-REX (Hrsg.) (2015): Leachphos® Ash leaching. Technical Factsheet, 2015. Online verfügbar unter http://p-rex.eu/uploads/media/PREX_Factsheet_LEACHPHOS.pdf, Zugriff am: 28.09.2015.

PYREG (Hrsg.) (2015): Innovative Klärschlammverwertung: Phosphordünger. Online verfügbar unter <http://www.pyreg.de/technologie/kl.html>.

RAK, A., SCHURIG, H. (2015): Phosphorsäure aus Klärschlammaschen nach dem REMONDIS TETRAPHOS®-Verfahren – Erste Ergebnisse aus der Pilotanlage bei Hamburg Wasser, Hamburg (27. Hamburger Kolloquium zur Abwasserwirtschaft).

SCHEIDIG, K., LEHRMANN, F., MALLON, J., SCHAAF, M. (2013): Klärschlamm-Monoverbrennung mit integriertem Phosphor-Recycling, VDI-Klärschlammbehandlung.

SCHEIDIG, K., MALLON, J., SCHAAF, M. (2010): Zukunftsfähige Klärschlammbehandlung. Korrespondenz Abwasser, Abfall. 2010 (57) (19), S. 902–915.

SCHNEE, R., WISSEMBORSKI, R., STÖSSEL, E. (2013): The Budenheim Carbonic Acid Process – An environment friendly process for recovering phosphates from sewage sludge. Gesellschaft zur Förderung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft an der Technischen Universität Braunschweig e. V. Unter Mitarbeit von R. Schnee, R. Wissemborski und E. Stössel, 2013 (84), S. 77–85.

SCHUHMAN, R. (2010): Phosphor-Rückgewinnung aus Ab- und Prozesswässern Informationsblatt.

SIEGRIST, A. (2014): Leachphos eine Lösung die funktioniert. Nasschemisches Verfahren zur Behandlung von Klärschlammaschen, Luzern (VSA/SVUT-Fachtagung).

STATISTISCHES BUNDESAMT, DWA KEK-1.2 (2014): Abwasser und Klärschlamm in Deutschland – statistische Betrachtungen Teil 1: Abwasserbehandlung. Korrespondenz Abwasser, Abfall. 61 (12), S. 1106–1112. DOI: 10.3242/kae2014.12.003.

STEINMETZ, H., PREYL, V., MEYER, C. (2014): Saures Leaching aus Klärschlamm – Stuttgarter Verfahren zur Phosphorrückgewinnung, Berlin (UBA/BAM-Workshop „Abwasser – Phosphor – Dünger“).

STÖSSEL, E. (2013): Budenheim Carbonic Acid Process – An environment friendly process for recovering phosphates from sewage sludge, Braunschweig (4th International Symposium „Re-Water Braunschweig“).

STÖSSEL, E. (2016): Persönliche Mitteilungen von Eva Stössel M.Sc., 2016.

STOWA (Hrsg.) (2012): Struviet productie door middle van het AIRPREX process – Pilotonderzoek op de rioolwaterzuivering Am-sterdam West. 2012/27. Aufl. Unter Mitarbeit von Henry van Veldhuizen, Hans Mollen, Marc Augustijn, Otto Kluiving, Victor Claessen, Geert Notenboom et al.

TERRANOVA (Hrsg.) (2015a): Das Funktionsprinzip des TerraNova® Ultra Verfahrens. Online verfügbar unter <http://terranova-energy.com/blog/project/verfahren/>.

TERRANOVA (Hrsg.) (2015b): TerraNova Energy Broschüre. TerraNova® Ultra, Der neue Weg zur Klärschlammverwertung – kostengünstig und zukunftsweisend. Online verfügbar unter <http://terranova-energy.com/>.

TIEMANN, C. (2015): Rückgewinnung Phosphor Asche von Biomasseverbrennungsanlagen Hessen. Bachelorarbeit, Hochschule RheinMain Wiesbaden Rüsselsheim.

UNGEHEUER, P. (2016): Bekanntmachung zu Forschungsergebnissen einer im Auftrag der Polyelectrolyte Producer Group durchgeführten Studie. Hg. v. POLYELECTROLYTE PRODUCER GROUP, Rundschreiben.

VDLUFA (Hrsg.) (2002): Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat-Lactat-Auszug. VDLUFA-Verlag.

WEIDELENER, A., BRECHTEL, K., MAIER, W., KRAMPE, J., ROTT, U. (2005): Phosphor-Rückgewinnung als MAP mittels saurer Rücklösung aus Faulschlämmen (Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft) (184), S. 59–71.

WEIDELENER, A., MAIER, W., KRAMPE, J. (2007): Phosphorrückgewinnung als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) mittels saurer Rücklösung aus Faulschlämmen. GWF Wasser/Abwasser 148 (4), S. 269–275.

WEIDELENER, A., STEINMETZ, H., MAIER, W., KRAMPE, J. (2008): Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP). Wasser und Abfall.

WIECHMANN, B., DIENEMANN, C., KABBE, C., BRANDT, S., VOGEL, I., ROSKOSCH, A. (2012): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Hg. v. UMWELTBUNDESAMT.

Anhang A Zusammenstellung der Kläranlagen aus Sensitivitätsanalyse Kapitel 3.6 und 3.7.2

Tabelle A.1: Sensitivität 2014 Fall 1: Kläranlagen mit P-Gehalten größer 80 % des Grenzwertes

Anlagenname	GK	Ausbaugröße [E]	P-Gehalt 2012-2014 [g P/kg TM]	P-Fracht 2012-2014 [Mg P/a]
Glauburg / Stockheim	3	10.000	19,7	4,5
Florstadt / Nieder-Florstadt	4	30.000	16,5	11,2
Eschwege / Niederhone	4	60.000	17,4	20,7
Gudensberg / Maden	4	19.950	18,3	7,1
Wabern	3	8.800	16,8	0,0
Baunatal / Kirchbauna	4	40.000	17,2	16,3
Grünberg / Lumda	3	5.240	16,1	0,7
Ehringshausen	4	11.000	16,4	3,8
Limburg A. D. Lahn / Staffel	4	60.000	16,0	20,4
Brechen / Niederbrechen	4	27.000	17,3	10,1
Runkel / Steeden	4	10.500	17,8	9,1
Taunusstein / Bleidenstadt	4	49.900	17,5	11,9
Aarbergen / Rückershausen	3	9.900	17,9	2,6
Bad Schwalbach / Lindschied	4	30.200	16,1	9,9
Niederdorfelden	4	20.000	18,6	11,4
Summe		392.490		140

Tabelle A.2: Sensitivität 2014 Fall 2: Kläranlagen mit geringen P-Gehalten aber höheren Frachten

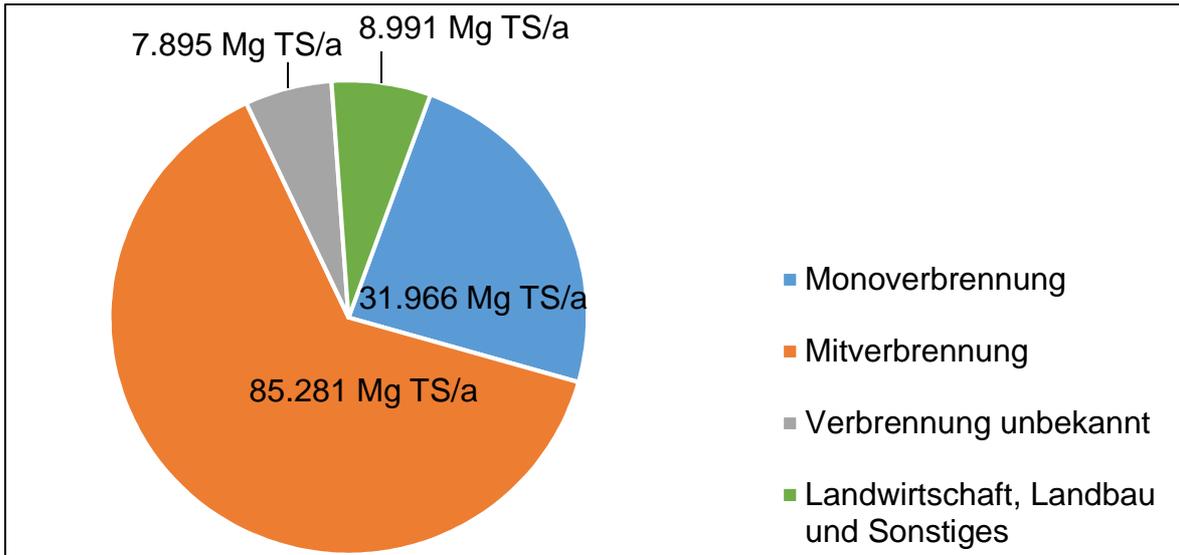
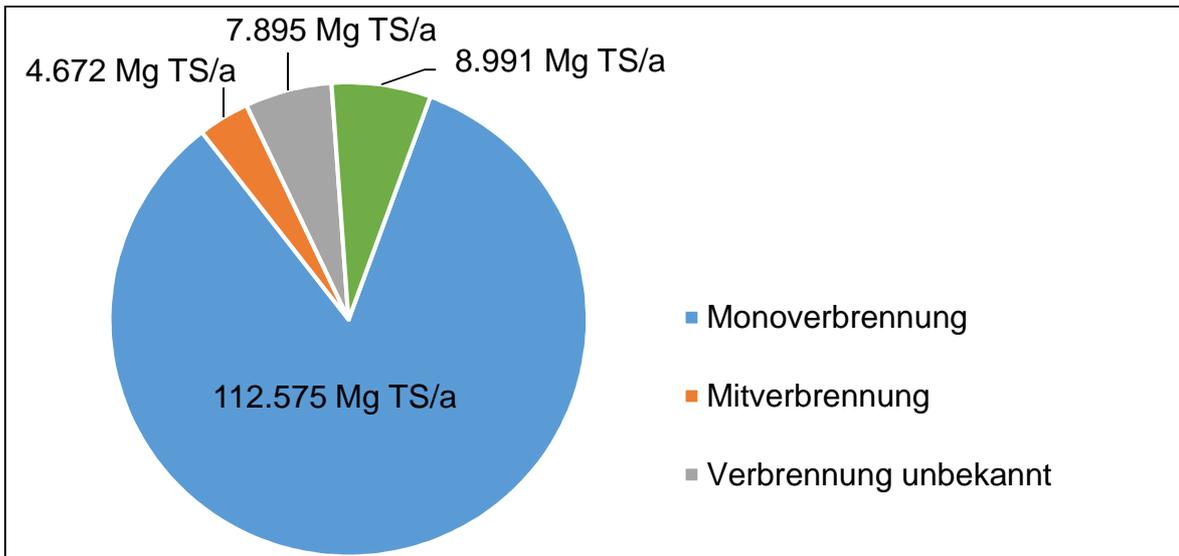
Anlagenname	GK	Ausbaugröße [E]	P-Gehalt 2012-2014 [g P/kg TM]	P-Fracht 2012-2014 [Mg P/a]
Reinheim / Spachbrücken	4	40.000	14,1	10,8
Wald-Michelbach / Unter-Schönmattenweg	4	22.000	11,1	5,7
Heppenheim (Bergstraße)	4	80.000	9,9	13,5
Rosbach v. d. Höhe / Nieder-Rosbach	4	16.500	15,9	4,4
Eichenzell / Löschenrod	4	12.000	7,1	2,9
Neukirchen / Riebelsdorf	4	13.500	13,8	4,2
Dautphetal / Elmshausen	4	15.000	13,0	6,4
Limburg A. D. Lahn / Eschhofen	3	10.000	12,2	4,5
Solms / Burgsolms	4	20.000	15,1	4,9
Weilmünster	4	11.500	12,3	4,1
Haiger	4	34.000	10,5	6,4
Braunfels	4	11.500	7,2	2,8
Idstein / Walsdorf	3	9.900	14,6	4,4
Grävenwiesbach / Heinzenberg	4	25.000	7,6	4,3
Rodenbach / Niederrodenbach	4	16.000	13,9	5,7
Hammersbach / Marköbel	4	12.000	11,5	3,2
Steinau an der Straße	4	13.500	15,1	6,3
Summe		362.400		94

Tabelle A.3: Sensitivität 2025 Fall 1: Kläranlagen mit P-Gehalten größer 80 % des Grenzwertes

Anlagenname	GK	Ausbaugröße [E]	P-Gehalt 2025 [g P/kg TM]	P-Fracht 2025 [Mg P/a]
Rosbach v. d. Höhe / Nieder-Rosbach	4	16.500	16,2	4,5
Florstadt / Nieder-Florstadt	4	30.000	17,1	11,5
Grossenlüder / Unterbimbach	3	6.500	16,4	2,5
Eschwege / Niederhone	4	60.000	17,6	20,9
Wabern	3	8.800	16,8	0,0
Baunatal / Kirchbauna	4	40.000	18,0	17,1
Ehringshausen	4	11.000	18,2	4,2
Solms / Burgsolms	4	20.000	16,0	5,2
Limburg A. D. Lahn / Staffel	4	60.000	17,1	21,8
Brechen / Niederbrechen	4	27.000	19,4	11,4
Runkel / Steeden	4	10.500	18,8	9,5
Taunusstein / Bleidenstadt	4	49.900	17,5	11,9
Aarbergen / Rückershausen	3	9.900	17,9	2,6
Bad Schwalbach / Lindschied	4	30.200	17,1	10,6
Niederdorfelden	4	20.000	19,0	11,7
Summe		400.300		145

Tabelle A.4: Sensitivität 2025 Fall 2: Kläranlagen mit geringen P-Gehalten aber höheren Frachten

Anlagenname	GK	Ausbaugröße [E]	P-Gehalt 2025 [g P/kg TM]	P-Fracht 2025 [Mg P/a]
Reinheim / Spachbrücken	4	40.000	15,9	12,1
Wald-Michelbach / Unter-Schönmattenweg	4	22.000	12,1	6,1
Heppenheim (Bergstraße)	4	80.000	10,0	13,6
Eichenzell / Löschenrod	4	12.000	9,5	3,9
Neukirchen / Riebelsdorf	4	13.500	14,8	4,5
Mücke / Nieder-Ohmen	4	15.000	15,4	3,9
Dautphetal / Elmshausen	4	15.000	13,8	6,7
Limburg A. D. Lahn / Eschhofen	3	10.000	12,2	4,5
Weilmünster	4	11.500	15,0	5,1
Haiger	4	34.000	10,5	6,4
Idstein / Walsdorf	3	9.900	14,6	4,4
Grävenwiesbach / Heinzenberg	4	25.000	9,7	5,5
Rodenbach / Niederrodenbach	4	16.000	14,6	6,0
Hammersbach / Marköbel	4	12.000	13,7	3,8
Steinau an der Straße	4	13.500	15,1	6,3
Summe		329.400		93

Anhang B Weiterführende Grafiken zur Szenarientwicklung**Bild B.1: Entsorgungswege aller hessischen Kläranlagen in 2025 nach Szenario 1****Bild B.2: Entsorgungswege aller hessischen Kläranlagen in 2025 nach Szenario 2**

Anhang C Kostenermittlung für PASCH

Tabelle C.1: Kopie der Tabelle 8.1 aus dem Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben PASCH mit Angaben zu den benötigten Betriebsmitteln (PINNEKAMP et al., 2010)

Stoff bzw. Kostenposition	Erläuterungen
Salzsäure 33 Gew.%	Aus den Angaben zu den Laugungsversuchen in PASCH (<i>Versuchsdurchführung</i>) wurde ein Bedarf von 1,176 m ³ /Mg Asche errechnet.
Elektrische Energie für Rührwerke	Es wurde ein spezifischer Energieeinsatz von 0,2 kW/m ³ Reaktorvolumen angesetzt.
Elektrische Energie für Pumpen	Es wurde eine mittlere Gesamtförderhöhe (geo. Höhe + Verlusthöhe) von 6 m angesetzt.
Lösungsmittlersatz	Die Mixer/Settler-Einheiten haben bei einem Gesamtvolumen von 108 m ³ und einem Anteil der organischen Phase o/w = 2:1 eine Startfüllung von 72 m ³ Extraktionsmittel. Es wird angenommen, dass diese Menge einmal jährlich ersetzt werden muss.
Calciumoxid zur Fällung	Der Bedarf an Calciumoxid wurde stöchiometrisch aus dem Verhältnis Ca:P = 1,5:1,0 ermittelt, um in jedem Fall ausreichend CaO als Fällmittel kalkuliert zu haben. Weiterhin ist in die Berechnung der Phosphorgehalt von 6,1% P je Mg Asche sowie ein Wirkungsgrad von 90% eingegangen.
Calciumoxid zur Neutralisation	Der Bedarf an zusätzlichem CaO für eine weitgehende Neutralisation der Abwässer hängt von dem stoffspezifischen Neutralisationsverhalten ab. Für die Berechnungen wurde angenommen, dass 40% der eingesetzten Salzsäure bei den Laugungs- und Fällreaktionen gebunden wird, so dass noch 60% durch zusätzliches CaO neutralisiert werden müssen.
Ammoniumlösung und Ammoniumhydrogencarbonat-Lösung zur Extraktionsmittelaufbereitung	Aus den Angaben in PASCH (<i>Versuchsdurchführung Extraktion</i>) wurde ein Aufbereitungsmittelbedarf von 0,25 m ³ /Mg Asche errechnet. Es wird zudem auf Basis von Erfahrungswerten angesetzt, dass sich 80% der Chemikalien zur Extraktionsmittelaufbereitung rückgewinnen lassen.
Eisen(III)chloridlösung (30%)	Nach Kapitel 7.1.3 (PASCH) (<i>Feste und flüssige Verfahrensrückstände</i>) ist mit einem Schlammanfall im Abwasser von 20 kg/Mg Asche zu rechnen. Unter Annahme eines Verhältnisses von Schlamm:Eisendosierung von 2,5:1,0 kann man so einen Fällmittelbedarf von 240 kg Fe/a abschätzen.

Anhang D Darstellung der Kläranlagen, nach der Einteilung in Kapitel 3.5.1**Tabelle D.1: Relevante Kläranlagen (Messwerte > 20 g P/kg TM)**

Betreiber	Kläranlagenname	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
ABeG Abwasserbetriebs- gesellschaft mbH				
	Dietzenbach	4	512,7	19,3
Abwasser - und Servicebetrieb Main Spitze			417,5	15,2
	Ginsheim-Gustavsburg	4	417,5	15,2
Abwasserbetrieb Bad Hersfeld			704,3	22,1
	Bad Hersfeld	4	704,3	22,1
Abwasserbetrieb Stadt Bebra			582,5	15,3
	Bebra	4	582,5	15,3
Abwasserwerk Frankenberg			272,1	9,5
	Frankenberg (Eder)	4	272,1	9,5
AV Alsbach-Hähnlein- Zwingenberg			349,9	10,7
	Alsbach-Hähnlein / Alsbach	4	349,9	10,7
AV Altenstadt			400,0	8,8
	Altenstadt	4	400,0	8,8
AV Assenheim- Bruchenbrücken			82,9	2,6
	Niddatal / Assenheim	3	82,9	2,6
AV Aubach			107,0	3,6
	Wöllstadt / Nieder-Wöllstadt	4	107,0	3,6
AV Bad König			265,0	6,9
	Höchst I. Odw. / Mümling- Grumbach	4	265,0	6,9
AV Bickenbach, Seeheim- Jugenheim			381,6	7,7
	Bickenbach	4	381,6	7,7
AV Bonbaden			199,3	4,8
	Braunfels / Bonbaden	3	199,3	4,8
AV Bracht			524,4	17,8
	Wächtersbach	4	524,4	17,8
AV Ederbergland			76,7	1,2
	Hatzfeld (Eder) / Reddighausen-Dodenau	3	76,7	1,2
AV Edermünde			208,7	3,6
	Edermünde / Grifte	4	208,7	3,6
AV Emsbachtal			540,1	13,0
	Selters (Taunus) / Niederselters	4	540,1	13,0
AV Flörsheim			1.495,5	34,8
	Flörsheim am Main / Flörsheim	4	1495,5	34,8
AV Freigericht			464,7	11,1

Betreiber	Kläranlagenname	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
	Hasselroth / Niedermittlau	4	464,7	11,1
AV Fulda			2.218,0	63,5
	Fulda / Gläserzell	5	2218,0	63,5
AV Gelnhausen			748,0	17,6
	Gründau / Lieblos	4	748,0	17,6
AV Herbornseelbach			204,7	4,7
	Herborn / Seelbach	4	204,7	4,7
AV Hessisch Lichtenau			215,5	6,1
	Hessisch Lichtenau / Fürstehagen	4	215,5	6,1
AV Hungen			923,0	27,5
	Hungen / Utphe	4	923,0	27,5
AV Idstein			356,5	8,5
	Hünstetten / Beuerbach	4	356,5	8,5
AV Ittertall			436,3	16,0
	Vöhl / Thalitter	4	436,3	16,0
AV Kronberg			347,0	8,1
	Kronberg Im Taunus	4	347,0	8,1
AV Langen-Egelsbach			598,5	23,0
	Langen	4	598,5	23,0
AV Lauter-Wetter			439,2	12,0
	Lich / Ober-Bessingen	4	439,2	12,0
AV Main-Taunus			1.210,4	45,0
	Hofheim Am Taunus / Lorsbach	4	378,5	13,2
	Hattersheim / Eddersheim	3	51,5	1,9
	Kriftel / Kriftel	4	545,1	20,7
	Niedernhausen	4	235,3	9,3
AV Marburg			1.878,5	64,8
	Marburg / Cappel	5	1878,5	64,8
AV Mittlere Dill			528,0	14,7
	Sinn / Edingen	4	528,0	14,7
AV Mittlere Mümling			580,7	17,1
	Michelstadt / Steinbach	4	580,7	17,1
AV Mittlere Salzböde			273,0	8,1
	Lohra / Damm	4	273,0	8,1
AV Mittlerer Rheingau			629,0	20,3
	Geisenheim	4	629,0	20,3
AV Modau			840,7	15,5
	Mühltal / Nieder-Ramstadt	4	840,7	15,5
AV Obere Gersprenz			362,0	8,3
	Brensbach	4	362,0	8,3
AV Oberer Fallbach			134,0	5,3
	Ronneburg / Hüttengesäß	3	134,0	5,3

Betreiber	Kläranlagenname	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
AV Oberer Rheingau			882,4	28,0
	Eltville Am Rhein / Erbach (Rheingau)	4	882,4	28,0
AV Oberes Beisetal			62,6	1,8
	Knüllwald / Niederbeisheim	3	62,6	1,8
AV Oberes Edertal			139,8	4,2
	Allendorf (Eder) / Haine	4	139,8	4,2
AV Oberes Niddertal			204,3	3,7
	Hirzenhain	4	204,3	3,7
AV Oberes Usatal			487,6	15,6
	Usingen / Kransberg	4	487,6	15,6
AV Oberes Weschnitztal			949,4	15,6
	Mörlenbach	4	949,4	15,6
AV Oberhessen			499,8	13,7
	Nidda	4	499,8	13,7
AV Perfgebiet-Bad Laasphe			899,0	23,2
	Biedenkopf / Wallau	4	816,2	20,9
	Biedenkopf	3	82,7	2,3
AV Rehbachtal			68,2	1,2
	Herborn / Guntersdorf	3	68,2	1,2
AV Rüsselsheim-Raunheim			1.299,9	43,8
	Raunheim	4	1299,9	43,8
AV Schleifbach			278,0	10,4
	Seligenstadt / Klein- Welzheim	4	278,0	10,4
AV Stadtallendorf-Kirchhain			1.168,6	21,1
	Kirchhain	4	1067,0	19,3
	Kirchhain / Großseelheim	3	101,6	1,9
AV Twistetal			96,0	1,8
	Twistetal / Twiste	3	96,0	1,8
AV Ulmtal-Lahn			225,6	5,5
	Braunfels / Tiefenbach	4	225,6	5,5
AV Untere Rodau			540,7	17,3
	Mühlheim Am Main	4	540,7	17,3
AV Unterzent-Untere Mümling			446,6	15,0
	Breuberg / Hainstadt	4	446,6	15,0
AV Warme-Diemeltal			120,0	3,2
	Liebenau / Lamerden	4	120,0	3,2
AV Wehretal-Sontratal			362,4	9,3
	Wehretal / Reichensachsen	4	362,4	9,3
AV Weilburg			534,4	10,3
	Weilburg	4	534,4	10,3
AV Wetzlar			985,9	23,4
	Wetzlar / Steindorf	4	985,9	23,4

Betreiber	Kläranlagenname	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
AWS GmbH			59,4	1,4
	Bad Karlshafen	3	59,4	1,4
Bad Arolser Kommunalbetriebe GmbH			528,0	13,9
	Volkmarsen	4	294,0	7,6
	Arolsen	4	234,0	6,3
EAB Dieburg			454,0	9,5
	Dieburg	4	454,0	9,5
Eigenbetrieb Abwasseranlagen St. Hünfeld			654,0	19,4
	Hünfeld	4	654,0	19,4
Eigenbetrieb Abwasserbeseitigung Bad Orb			314,9	10,3
	Bad Orb	4	314,9	10,3
Eigenbetrieb Babenhausen			280,0	7,2
	Babenhausen	4	280,0	7,2
Eigenbetrieb Bau und Service Oberursel			714,3	22,6
	Oberursel / Weißkirchen	4	714,3	22,6
Eigenbetrieb Stadt Langenselbold			525,0	9,5
	Langenselbold	4	525,0	9,5
EnergieNetz Mitte GmbH			165,6	2,6
	Philippsthal (Werra) / Heimboldshausen	3	165,6	2,6
Entsorgungsbetriebe der Stadt Friedberg			428,2	14,4
	Friedberg (Hessen)	4	428,2	14,4
Fraport AG			103,0	3,4
	Frankfurt Am Main / Flughafen	4	103,0	3,4
Gemeinde Ahnatal			167,0	4,5
	Ahnatal / Heckershausen	3	167,0	4,5
Gemeinde Bad Emstal			114,2	3,4
	Bad Emstal / Merxhausen	3	114,2	3,4
Gemeinde Bad Endbach			66,0	1,9
	Bad Endbach / Wommelshausen	4	66,0	1,9
Gemeinde Bad Zwesten			85,6	2,4
	Bad Zwesten / Zwesten	3	85,6	2,4
Gemeinde Biblis			158,4	7,2
	Biblis	4	158,4	7,2
Gemeinde Biebertal			177,2	3,8
	Biebertal / Rodheim-Bieber	4	177,2	3,8
Gemeinde Büttelborn			332,0	7,2
	Büttelborn	4	332,0	7,2

Betreiber	Kläranlagenname	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
Gemeinde Ebsdorfergrund			141,2	2,8
	Ebsdorfergrund / Hachborn	3	141,2	2,8
Gemeinde Edertal			121,8	3,0
	Edertal / Bergheim	3	121,8	3,0
Gemeinde Eppertshausen			118,1	2,7
	Eppertshausen	3	118,1	2,7
Gemeinde Erlensee			247,6	7,9
	Erlensee / Rückingen	4	247,6	7,9
Gemeinde Fernwald			76,0	1,9
	Fernwald / Steinbach	3	76,0	1,9
Gemeinde Flieden			115,3	2,9
	Flieden	4	115,3	2,9
Gemeinde Fuldaabrück			239,6	6,6
	Fuldaabrück / Dennhausen	3	239,6	6,6
Gemeinde Fuldata			454,6	10,2
	Fuldata / Ihringshausen	3	118,8	3,2
	Fuldata / Simmershausen	4	335,8	7,0
Gemeinde Groß-Zimmern			88,4	2,5
	Gross-Zimmern	4	88,4	2,5
Gemeinde Habichtswald			122,0	6,8
	Habichtswald / Ehlen	3	122,0	6,8
Gemeinde Hainburg			333,0	9,5
	Hainburg / Klein-Krotzenburg	3	174,0	5,1
	Hainburg / Hainstadt	3	159,0	4,4
Gemeinde Helsa			116,5	2,2
	Helsa	3	116,5	2,2
Gemeinde Jossgrund			120,9	2,2
	Jossgrund / Burgjoß	3	120,9	2,2
Gemeinde Kirchheim			85,6	2,0
	Kirchheim	4	85,6	2,0
Gemeinde Lahnau			163,2	4,1
	Lahnau / Dorlar	4	163,2	4,1
Gemeinde Malsfeld			90,9	1,5
	Malsfeld	3	90,9	1,5
Gemeinde Morschen			34,8	0,8
	Morschen / Neumorschen	3	34,8	0,8
Gemeinde Münster			275,0	7,5
	Münster	4	275,0	7,5
Gemeinde Nauheim			366,8	6,1
	Nauheim	4	366,8	6,1
Gemeinde Neuhof			404,1	6,1
	Neuhof	4	404,1	6,1
Gemeinde Niederaula			71,4	1,1
	Niederaula	3	71,4	1,1

Betreiber	Kläranlagenname	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
Gemeinde Rabenau			115,0	2,5
	Rabenau / Londorf	3	115,0	2,5
Gemeinde Stockstadt			182,7	4,1
	Stockstadt	3	182,7	4,1
Gemeinde Waldsolms			95,4	2,3
	Waldsolms / Brandoberndorf	3	95,4	2,3
Gemeinde Willingen (Upland)			160,1	5,5
	Willingen / Schwalefeld	4	160,1	5,5
Gemeinde Wölfersheim			112,3	3,4
	Wölfersheim	3	112,3	3,4
Gemeindewerke Roßdorf			195,2	7,9
	Rossdorf / Gundernhausen	4	195,2	7,9
Hanau Infrastruktur Service			2.791,0	92,1
	Hanau / Nordwest	5	2791,0	92,1
HSE Abwasserreinigung GmbH & Co KG			3.023,0	107,0
	Darmstadt	5	2620,3	91,6
	Darmstadt / Eberstadt	4	402,7	15,4
KASSELWASSER			4580,8	165,1
	Kassel / Wolfsanger	5	4.580,8	165,1
KMB-Kommunalw. Mittlere Bergstraße			1038,9	38,4
	Bensheim	4	1038,9	38,4
Marktgemeinde Burghaun			176,6	2,2
	Burghaun	3	176,6	2,2
Marktgemeinde Eiterfeld			87,3	1,6
	Eiterfeld / Buchenau	3	87,3	1,6
Mittelhessische Wasserbetriebe (MWB)			3.174,1	167,7
	Giessen / Margaretenhütte/Südliche Lahnstrasse	5	3174,1	167,7
Stadt Allendorf/Lumda			90,3	2,1
	Allendorf (Lumda)	3	90,3	2,1
Stadt Alsfeld			241,1	8,9
	Alsfeld	4	241,1	8,9
Stadt Bad Homburg v. d. Höhe			1.063,8	38,4
	Bad Homburg / Ober Eschbach	4	1063,8	38,4
Stadt Bad Nauheim			1.113,1	45,8
	Bad Nauheim	4	1113,1	45,8
Stadt Bad Sooden-Allendorf			229,5	5,2
	Bad Sooden-Allendorf	4	229,5	5,2
Stadt Bad Vilbel			778,7	30,6

Betreiber	Kläranlagenname	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
	Bad Vilbel	4	778,7	30,6
Stadt Bad Wildungen			424,4	19,2
	Bad Wildungen / Wega	4	424,4	19,2
Stadt Borken			451,5	9,0
	Borken (Hessen) / Gombeth	4	451,5	9,0
Stadt Büdingen			334,1	7,8
	Büdingen	4	334,1	7,8
Stadt Bürstadt			391,3	10,0
	Bürstadt	4	391,3	10,0
Stadt Butzbach			497,0	15,0
	Butzbach	4	497,0	15,0
Stadt Diemelstadt			91,0	1,6
	Diemelstadt / Wrexen	3	91,0	1,6
Stadt Dillenburg			382,3	9,1
	Dillenburg / Niederscheld	4	382,3	9,1
Stadt Dreieich			784,6	33,5
	Dreieich / Buchschlag	4	784,6	33,5
Stadt Felsberg			155,0	3,4
	Felsberg	4	155,0	3,4
Stadt Fritzlar			229,0	7,5
	Fritzlar	4	229,0	7,5
Stadt Gernsheim			242,8	7,9
	Gernsheim	4	242,8	7,9
Stadt Grebenstein			96,8	1,6
	Grebenstein	3	96,8	1,6
Stadt Griesheim			776,3	14,6
	Griesheim	4	776,3	14,6
Stadt Heusenstamm			240,3	9,2
	Heusenstamm	4	240,3	9,2
Stadt Hofgeismar			245,5	8,9
	Hofgeismar	4	245,5	8,9
Stadt Homberg (Efze)			193,8	5,1
	Homberg (Efze)	4	193,8	5,1
Stadt Homberg (Ohm)			113,2	2,8
	Homberg (Ohm) / Nieder- Ofleiden	4	113,2	2,8
Stadt Immenhausen			98,0	2,4
	Immenhausen	3	98,0	2,4
Stadt Lampertheim			498,2	20,1
	Lampertheim	4	498,2	20,1
Stadt Lauterbach			403,4	8,8
	Lauterbach (Hessen)	4	403,4	8,8
Stadt Lorsch			189,5	8,2
	Lorsch	4	189,5	8,2

Betreiber	Kläranlagenname	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
Stadt Neckarsteinach			183,7	2,7
	Neckarsteinach / Neckarhausen	4	183,7	2,7
Stadt Pfungstadt			640,8	22,5
	Pfungstadt	4	640,8	22,5
Stadt Riedstadt			356,0	11,9
	Riedstadt / Wolfskehlen	4	356,0	11,9
Stadt Rödermark			382,2	13,8
	Rödermark / Ober-Roden	4	382,2	13,8
Stadt Sontra			125,6	3,0
	Sontra	4	125,6	3,0
Stadt Spangenberg			22,1	0,4
	Spangenberg	3	22,1	0,4
Stadt Trendelburg			77,8	2,3
	Trendelburg / Deisel	3	77,8	2,3
Stadt Wiesbaden -ELW-			9.357,1	198,4
	Wiesbaden / Biebrich	5	2183,5	45,4
	Wiesbaden / Mitte	5	7.173,6	153,0
Stadt Wolfhagen			249,0	9,2
	Wolfhagen	4	249,0	9,2
Stadt Zierenberg			53,7	1,5
	Zierenberg	3	53,7	1,5
Stadtentwässerung Frankfurt am Main			39.925,8	795,7
	Frankfurt am Main / Niederrad/Griesheim	5	27541,9	548,9
	Frankfurt am Main / Sindlingen	5	12.383,9	246,8
Stadtwerke Bad Soden- Salmünster			302,7	6,3
	Bad Soden-Salmünster / Salmünster	4	302,7	6,3
Stadtwerke Groß-Gerau			791,4	26,6
	Gross-Gerau	4	791,4	26,6
Stadtwerke Groß-Umstadt			521,4	14,7
	Groß-Umstadt / Richen	4	521,4	14,7
Stadtwerke Hochheim- Eigenbetrieb			251,6	7,2
	Hochheim Am Main / Hochheim	4	251,6	7,2
Stadtwerke Karben			532,0	19,2
	Karben / Gross-Karben	4	532,0	19,2
Stadtwerke Lich			146,0	5,0
	Lich	4	146,0	5,0
Stadtwerke Melsungen			309,5	13,6
	Melsungen	4	309,5	13,6

Betreiber	Kläranlagenname	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
Stadtwerke Mörfelden- Walldorf			518,4	18,8
	Mörfelden-Walldorf / Mörfelden	4	518,4	18,8
Stadtwerke Naumburg			117,0	2,4
	Naumburg / Elbenberg	3	117,0	2,4
Stadtwerke Nidderau			354,5	10,9
	Nidderau / Windecken	4	354,5	10,9
Stadtwerke Rodgau			643,0	24,6
	Rodgau / Weiskirchen	4	643,0	24,6
Stadtwerke Rotenburg a. d. Fulda			303,1	11,1
	Rotenburg a. d. Fulda / Braach	4	303,1	11,1
Stadtwerke Schlitz			108,4	2,4
	Schlitz / Hutzdorf	4	108,4	2,4
Stadtwerke Schlüchtern			467,6	13,0
	Schlüchtern / Niederzell	4	467,6	13,0
Stadtwerke Schwalmstadt			483,6	16,3
	Schwalmstadt / Treysa	4	483,6	16,3
Stadtwerke Seligenstadt			243,0	8,7
	Seligenstadt	4	243,0	8,7
Stadtwerke Weiterstadt			471,5	18,1
	Weiterstadt / Gräfenhausen	4	126,3	4,1
	Weiterstadt	4	345,2	14,0
Witzenhäuser Wasser Ver- und Entsorgung			415,0	11,0
	Witzenhausen	4	415,0	11,0
ZV Gruppenklärwerk Bad Salzschlirf-Wartb			8,6	0,2
	Bad Salzschlirf	3	8,6	0,2
ZV Gruppenklärwerk Hosenfeld-Großenlüder			158,0	2,8
	Grossenlüder / Kleinlüder	3	158,0	2,8
ZV Lollar-Staufenberg			869,0	21,9
	Lollar	4	869,0	21,9
ZV Mittelhess. Abwasserwerke (ZMA)			462,0	12,3
	Lahntal / Göttingen	4	258,0	7,7
	Neustadt (Hessen)	3	204,0	4,6
Gesamtergebnis			125809,7	3362,4

Tabelle D.2: Möglicherweise relevante Kläranlagen (Keine Messwerte; Frachtbetrachtung liefert Wert > 20 g P/kg TM)

Betreiber	Kläranlage	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
AV Oberes Erlenbachtal			708,2	36,3
	Bad Homburg / Ober Erlenbach	4	708,2	36,3
Gemeinde Großkrotzenburg			101,3	4,7
	Großkrotzenburg	4	101,3	4,7
Gesamtergebnis			809,5	41,0

Tabelle D.3: Relevanz der Kläranlagen sollte geprüft werden (Messwerte nicht überschritten; Frachtbetrachtung liefert Wert > 20 g P/kg TM)

Betreiber	Kläranlage	GK	Klärschlamm- massenstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
AV Baunatal			951,5	16,3
	Baunatal / Kirchbauna	4	951,5	16,3
AV Dautphetal			490,5	6,4
	Dautphetal / Elmshausen	4	490,5	6,4
AV Goldener Grund			585,6	10,1
	Brechen / Niederbrechen	4	585,6	10,1
AV Horlofftal			676,2	11,2
	Florstadt / Nieder- Florstadt	4	676,2	11,2
AV Limburg			1.274,9	20,4
	Limburg A. D. Lahn / Staffel	4	1274,9	20,4
AV Mittleres-Emstal			387,6	7,1
	Gudensberg / Maden	4	387,6	7,1
AV Obere Aar			681,0	11,9
	Taunusstein / Bleidenstadt	4	681,0	11,9
AV Obere Dietzhölze			58,3	0,8
	Eschenburg / Eibelshausen	4	58,3	0,8
AV Ohm-Seenbach			297,9	3,3
	Mücke / Nieder- Ohmen	4	254,4	2,6
	Grünberg / Lumda	3	43,5	0,7

Betreiber	Kläranlage	GK	Klärschlammstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
AV Vorderer Odenwald			765,0	10,8
	Reinheim / Spachbrücken	4	765,0	10,8
Gemeinde Aarbergen			146,1	2,6
	Aarbergen / Rückershausen	3	146,1	2,6
Gemeinde Ehringshausen			230,5	3,8
	Ehringshausen	4	230,5	3,8
Gemeinde Schöneck			614,1	11,4
	Niederdorfelden	4	614,1	11,4
Marktflecken Weilmünster			337,0	4,1
	Weilmünster	4	337,0	4,1
Marktgemeinde Hilders			26,9	0,3
	Hilders	3	26,9	0,3
Stadt Braunfels			379,8	2,8
	Braunfels	4	379,8	2,8
Stadt Eschwege			1191,4	20,7
	Eschwege / Niederhone	4	1.191,4	20,7
Stadt Großalmerode			179,6	2,4
	Grossalmerode / Trubenhausen	3	179,6	2,4
Stadt Haiger			612,3	6,4
	Haiger	4	612,3	6,4
Stadt Heringen			118,0	1,1
	Heringen (Werra)	4	118,0	1,1
Stadt Rosbach v. d. H.			276,4	4,4
	Rosbach v. d. Höhe / Nieder-Rosbach	4	276,4	4,4
Stadt Steinau an der Straße			415,1	6,3
	Steinau an der Straße	4	415,1	6,3
Stadt Wanfried			21,3	0,2
	Wanfried	3	21,3	0,2

Betreiber	Kläranlage	GK	Klärschlammstrom [Mg TS/a]	P-Fracht [Mg P/a]
Stadtwerke Bad Schwalbach			618,0	9,9
	Bad Schwalbach / Lindschied	4	618,0	9,9
Stadtwerke Solms			324,0	4,9
	Solms / Burgsolms	4	324,0	4,9
Gesamtergebnis			11658,7	179,6