

## Phosphorrückgewinnung in Hessen

Die nachfolgende kompakte Darstellung richtet sich an Entscheidungsträger, die mit der Entsorgung phosphorhaltiger kommunaler Klärschlämme befasst sind und die von den gesetzlichen Neuregelungen in der Klärschlamm Entsorgung betroffen sein können. Es handelt sich hierbei um eine Zusammenfassung des Gutachtens „Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm und der Klärschlammmasche“, welches im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und

### Handlungsnotwendigkeit

Klärschlämme stellen mit relevanten Gehalten an Phosphat eine bedeutende Sekundärquelle zur Ressourcensicherung neben konventionell abgebautem Phosphatgestein dar. Wenn das Klärschlamm-Phosphat aufgrund des Ausstiegs aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung nicht mehr im Kreislauf geführt werden kann, sind Alternativen zur Rohstoffsicherung erforderlich. Der Referentenentwurf der AbfKlärV konkretisiert diesen Ausstieg und enthält verbindliche Regelungen zur Phosphorrückgewinnung, die eine Umstrukturierung der gesamten Klärschlammverwertung in Deutschland erforderlich

### Gesetzliche Regelungen zur Klärschlammverwertung

Die Verschärfungen der gesetzlichen Anforderungen an den Schadstoffgehalt von Düngemitteln durch die Düngemittelverordnung [4] gelten seit Beginn des Jahres 2015, was zum Anstieg der thermisch zu entsorgenden Klärschlamm-mengen geführt hat.

Der Referentenentwurf der AbfKlärV [1] sieht zudem ab dem 1. Januar 2025 den Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung für kommunale Kläranlagen der Ausbaugrößenklassen GK 4 und GK 5 vor (vgl. Tabelle 1).

Geologie von der RWTH Aachen im Juni 2016 fertiggestellt wurde. Dabei werden die wesentlichen Ergebnisse einer Analyse zur Situation in Hessen aufgezeigt sowie eine Bewertung ausgewählter Verfahren zur Phosphorrückgewinnung vorgenommen. Sämtliche Betrachtungen basieren auf dem Referentenentwurf zur Novelle der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vom 18. August 2015 [1]. Etwaige Änderungen, die sich im Verlaufe des weiteren Verordnungsgebungsverfahrens ergeben, wurden nicht berücksichtigt.

machen [1]. Die Umsetzung der Novelle der AbfKlärV ordnet sich innerhalb Hessens in die hier verfolgte Ressourcenschutzstrategie ein. Diese bündelt unter Einbeziehung von Wissenschaft, der Wirtschaft und den Verbänden Aktivitäten zur Ressourcenschonung und zu mehr Ressourceneffizienz [2]. Sich daraus ergebende Maßnahmen, wie die weitreichende Phosphorelimination in Kläranlagen zur Herstellung des guten chemischen und ökologischen Zustandes der Gewässer nach Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) [3], wurden innerhalb dieses Gutachtens berücksichtigt.

Bei diesen Größenklassen fallen laut statistischen Erhebungen etwa 91 % der kommunalen Klärschlämme Deutschlands an [6].

**Tabelle 1:** Ausbaugrößenklassen nach Abwasserverordnung [5]

GK	Ausbaugröße/Einwohnerwert [E]
1	0 bis 999
2	1.000 bis 5.000
3	5.001 bis 10.000
4	10.001 bis 100.000
5	größer 100.000

Laut Artikel 5 § 3a i. V. m. Artikel 8 des Referentenentwurfs hat der Klärschlamm-erzeuger ab 2025 eine Rückgewinnung von Phosphor aus dem in seiner Abwasserbehandlungsanlage anfallenden Klärschlamm durchzuführen, sofern der Klärschlamm einen Phosphorgehalt von 2 % oder mehr in der Trockensubstanz (TS) – d. h. in den Feststoffen – aufweist [1]. Dabei ist nach der Begründung zur Verordnung bereits eine einmalige Überschreitung des genannten Wertes ausreichend.

Konkret müssen bei positiver Identifikation der Kläranlage anhand der Ausbaugröße und der im Klärschlamm enthaltenen Phosphorkonzentration Maßnahmen zur Minimierung dieser Konzentration bis unterhalb von 2 % im Klärschlamm ergriffen werden.

Abweichend kann bei hohen Phosphorgehalten auch eine Reduktion des

Ausgangsgehalts im Klärschlamm um mindestens 50 % vorgenommen werden. Erfolgt keine Phosphorrückgewinnung direkt in der Abwasserreinigungsanlage, ist der Klärschlamm zunächst in speziellen Klärschlammverbrennungsanlagen vorzubehandeln. Hierbei entsteht phosphorhaltige Klärschlammasche. Bei einer Rückgewinnung aus der Asche muss mindestens 80 % des enthaltenen Phosphors zurückgewonnen werden. Der Entwurf der Novelle der AbfKlärV sieht eine bis zum 31. Dezember 2035 begrenzte Ausnahmeregelung vor, nach der die Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung separat zwischengelagert werden können, wenn diese danach zu einer gezielten Phosphorrückgewinnung verwendet werden. [1]

### Identifikation der relevanten Kläranlagen nach Novelle der AbfKlärV

#### Klärschlammengen, Entsorgungswege und Phosphorfrachten

Für das Gutachten wurden umfangreiche Daten zu den Klärschlammengen, Entsorgungswegen und Phosphorgehalten im Klärschlamm, sowie vertiefende Daten zu den Kläranlagen (Größe, Reinigungstechnologie, Zusatzstoffe etc.) durch das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, das Hessische Statistische Landesamt sowie dem Regierungspräsidium Kassel zur Verfügung gestellt.

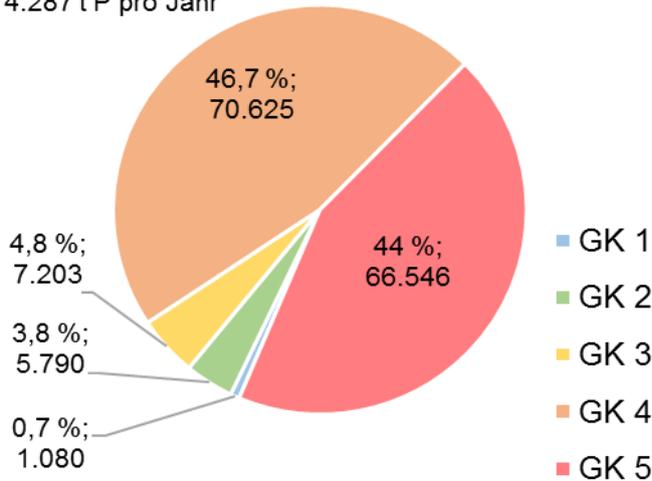
In den Jahren 2012 bis 2014 fielen insgesamt 148.091 bis 153.020 Tonnen Trockensubstanz pro Jahr an Klärschlamm zur Entsorgung an.

Unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung jeder Kläranlage wurde daraus ein maßgeblicher Klärschlamm-anfall für die 712 hessischen Kläranlagen von insgesamt 151.244 t TS pro Jahr mit einer Gesamtfracht an Phosphor von jährlich 4.287 t bestimmt.

In Abbildung 1 sind sowohl die Klärschlammengen aller hessischen Kläranlagen, als auch die Mengen der für die Phosphorrückgewinnung gemäß AbfKlärV-Novelle relevanten Kläranlagen aufgeschlüsselt nach den Größenklassen der Kläranlagen dargestellt.

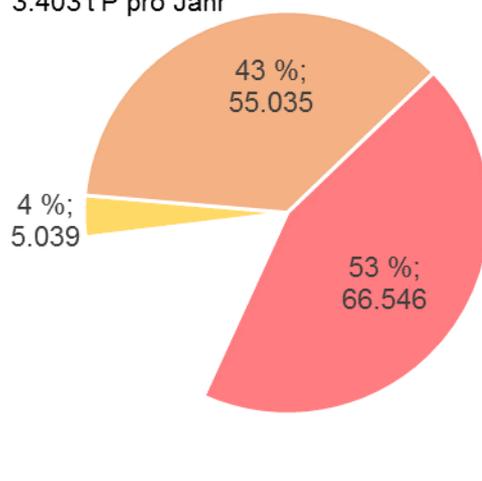
**Alle Kläranlagen**

151.244 t TS pro Jahr  
4.287 t P pro Jahr



**Relevante Kläranlagen**

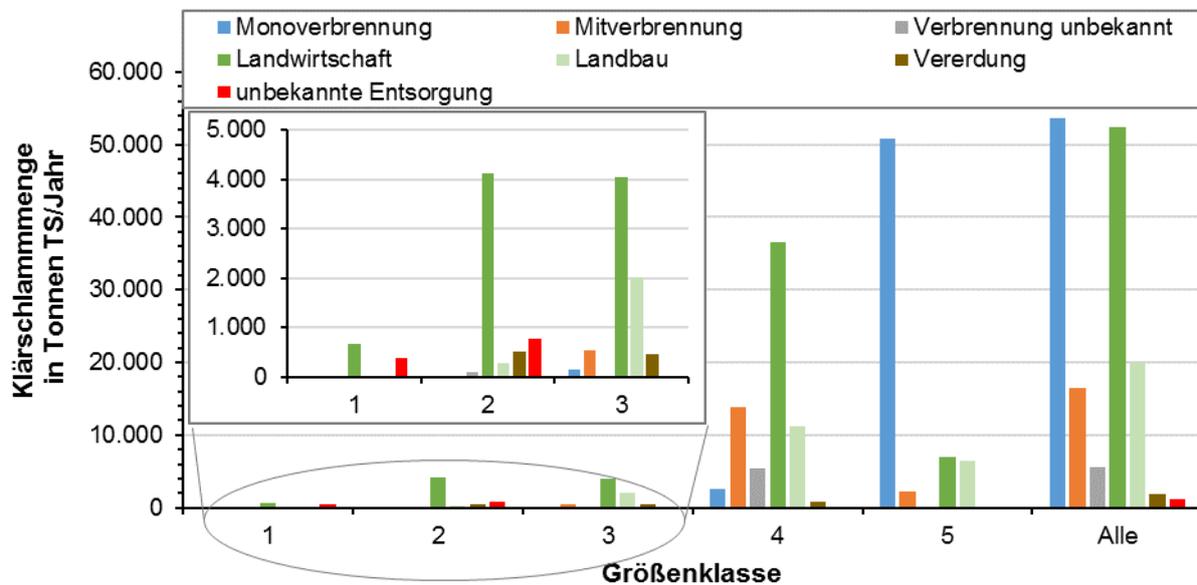
126.620 t TS pro Jahr  
3.403 t P pro Jahr



**Abbildung 1:** Für die Phosphorrückgewinnung relevante Klärschlammengen in Tonnen TS pro Jahr (rechts) im Vergleich zum Klärschlammfall insgesamt nach GK (links)

Die landwirtschaftliche und landbauliche Verwertung von Klärschlamm aus den GK 1 bis 4 stellt für diese kleinen und mittelgroßen Kläranlagen den dominierenden Entsorgungsweg dar (Abbildung 2). 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 gehen 31 % der Klärschlämme in die Verbrennung, mit einem Anteil von 19 % in die Mitverbrennung. Anders sieht die Situation bei den zehn hessischen Kläranlagen der GK 5 aus, deren Klärschlämme größtenteils monoverbrannt werden (76 % Monoverbrennung, 3 % Mitverbrennung).



**Abbildung 2:** Entsorgungswege für Klärschlamm nach Größenklasse 2014

### Für die Phosphorrückgewinnung relevante Kläranlagen nach AbfKlärV – Heute und 2025

Laut Novelle der AbfKlärV sind die Größenklassen 4 und 5 relevant [1]. Um der hessischen Ressourcenschutzstrategie Rechnung zu tragen, wurde zudem die Größenklasse 3 mitbetrachtet. Aus Abbildung 3 können die Standorte der 184 für die Phosphorrückgewinnung relevanten Kläranlagen, sowie die Anlagen, welche eventuell zukünftig relevant sein könnten, entnommen werden.

Auf diesen relevanten Kläranlagen der GK 3 bis 5 fallen insgesamt 83 % der Klärschlammmenge in Hessen an, mit einem jährlichen Phosphorrückgewinnungspotential von 3.403 Tonnen.

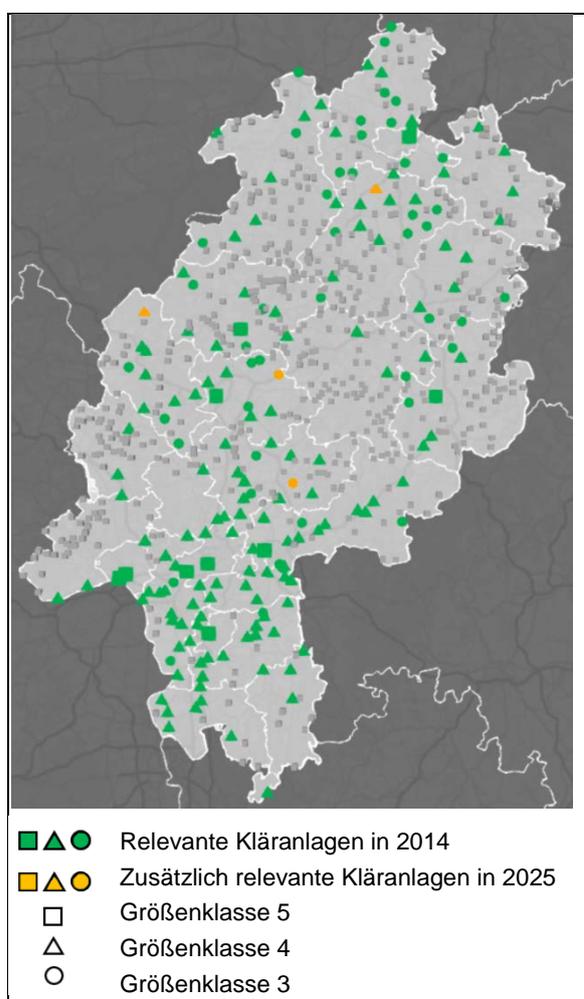
Die zehn Kläranlagen der GK 5 fallen alle unter die Vorgabe zur Phosphorrückgewinnung. In der GK 4 müssten 128 der 157 Kläranlagen Maßnahmen ergreifen, für GK 3 sind es 46 von 58 Anlagen. Die übrigen Anlagen weisen Phosphorgehalte von < 2 % auf, so dass diese von der Phosphorrückgewinnung nicht erfasst werden.

**Tabelle 2:** Phosphormengen der relevanten Kläranlagen nach GK

GK	Phosphormenge [t P/Jahr]	Anzahl Kläranlagen
3	122	46
4	1.642	128
5	1.639	10
alle	3.403	184

Durch die Maßnahmen zur Herstellung des guten Zustandes der Gewässer nach WRRL, könnten bis 2025 ca. 203 t P pro Jahr zusätzlich im Klärschlamm anfallen. Für die relevanten Kläranlagen nach AbfKlärV aus 2014 fielen dabei 172 t P pro Jahr (+ 5,1 %) zusätzlich an.

Aufgrund der prognostizierten Erhöhung des Phosphorgehaltes im Klärschlamm könnten vier zusätzliche Kläranlagen positiv für die Phosphorrückgewinnung identifiziert werden, da sie in 2025 voraussichtlich den Wert von 2 % Phosphor im Klärschlamm überschreiten. Das HSL prognostiziert für 2030, dass das bevölkerungsreiche Ballungszentrum im Süden Hessens wachsen wird. Für Frankfurt am Main wird ein Bevölkerungswachstum von 17 % bis 2030 angegeben. Gleichzeitig verlieren die flächenmäßig großen, aber bevölkerungsärmeren Landkreise im Norden und in der Mitte Hessens Einwohner.



**Abbildung 3:** Nach Kriterium der AbfKlärV-Novelle relevante Kläranlagen der GK 3 bis 5

Innerhalb des Bundeslandes kann ein klarer Trend zur Verstädterung abgelesen werden. Der Abwasseranfall wird somit ebenfalls mit der Zeit auf weniger Kläranlagen konzentriert. Eine direkte Übertragung der Bevölkerungsprognose auf die voraussichtliche Klärschlammmenge ist in diesem Rahmen jedoch nicht möglich.

#### Zuordnung der Rückgewinnungsverfahren aufgrund technischer Gesichtspunkte

Wichtig ist, zwischen Phosphorelimination und Phosphorrückgewinnung zu unterscheiden. Die Elimination von Phosphaten findet seit vielen Jahren obligatorisch in hunderten Kläranlagen statt und dient der Gewässergüte, z. B. der Vermeidung von vermehrtem Algenwachstum im Gewässer. Phosphorrückgewinnung ist die gezielte Überführung von Phosphaten in Verbindungen, die pflanzenverfügbar und schadstoffarm sind, sowie – im Gegensatz zum eliminierten Phosphor – separat vom Klärschlamm als Rezyklat zur Verfügung stehen. Aus der Vielzahl an Verfahren, die eine Phosphorrückgewinnung aus der abgetrennten wässrigen Phase des Klärschlammes (sog. Schlammwasser), dem Klärschlamm selbst oder der Klärschlammmasche ermöglichen wurde hier eine Auswahl 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 und ob sie sich verfahrenstechnisch grundsätzlich für das jeweilige Ziel der Rückgewinnung eignen, sowie ob genügend Informationen frei verfügbar sind, die eine technische Beschreibung des Prozesses mit der geforderten Genauigkeit zulassen. Die

Aufgrund geplanter technischer Maßnahmen zur Klärschlammfäulung auf den beiden großen Kläranlagen in Frankfurt ist von einer Reduktion der gesamt-hessischen Klärschlammmenge in 2025 um ca. 12,5 % auf 110.649 Tonnen TS pro Jahr, bei unveränderter Phosphormenge auszugehen. Dies wurde aufgrund der Tragweite für die Phosphorrückgewinnung nachfolgend berücksichtigt.

Verfahrensbewertung ist im Abschlussbericht zum Gutachten enthalten [7].

Verfahren zur Phosphorrückgewinnung im Schlammwasserbereich sind nur für Kläranlagen mit vermehrter biologischer Phosphorelimination, d. h. ohne Einsatz chemischer Additive zur Phosphorfällung sinnvoll einsetzbar. Der Rückgewinnungsgrad aus Schlammwasser bei Kläranlagen mit Fällmitteleinsatz ist sehr gering und die Anforderungen zur Phosphorrückgewinnung werden deutlich verfehlt. Die Wahl von Eisen- bzw. Aluminiumsalzen (den klassischen Fällmitteln) zur Fällung beeinflusst ebenfalls mögliche Phosphorrückgewinnungsprozesse aus dem Klärschlamm.

Auch bei der Phosphorrückgewinnung aus Asche ergeben sich verschiedene Einschränkungen bei der Verfahrensauswahl. So hat ein zu hoher Aluminiumanteil in der Asche mitunter direkte Auswirkungen auf die Qualität des Rezyklats bzw. dessen Verwertbarkeit.

Schwermetalle in der Asche verdienen eine besondere Betrachtung, da diese nicht in jedem Verfahren im gleichen Maße entfernt werden können. Dies bedeutet, dass die Verwertbarkeit des Rezyklates als Düngemittel von der Qualität der eingesetzten Klärschlamm- asche bestimmt wird.

### Synergieeffekte bei der Umsetzung des Maßnahmenprogramms zur WRRL

Die zukünftig aufgrund des Maßnahmenprogramms WRRL 2015 bis 2021 geforderten Einleitgrenzwerte halten aktuell 346 der 456 Kläranlagen mit höheren Anforderungen an die Phosphorelimination nicht ein [8]. Der notwendige Ausbau dieser Kläranlagen sollte unter Berücksichtigung der ausstehenden Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung erfolgen.

Eignet sich eine Kläranlage grundsätzlich für eine Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser, sollte eine Ausweitung der Phosphorelimination möglichst über

#### Konzeptentwicklung

Auf Basis der ausgewerteten Daten wurden drei Szenarien entwickelt, die die unterschiedlichen Ausrichtungen möglicher Rückgewinnungskonzepte – mit Einzellösungen für jede der 184 relevanten Kläranlagen – darstellen. Die Szenarien 1 und 2 beschäftigen sich dabei vornehmlich mit der Fragestellung „dezentrale oder zentrale Phosphorrückgewinnung“ unter teilweiser Berücksichtigung der derzeitigen Entsorgungsstrukturen, während Szenario 3 auf die Erfüllung der Mindestanforderungen nach AbfKlärV unabhängig vom derzeitigen Entsorgungsweg ausge-

eine nachgeschaltete chemische Ausfällung aus dem biologisch gereinigten Abwasser und die separate Verwertung des phosphatreichen Fällschlammes ausgeführt werden. Somit können weiterhin Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser eingesetzt werden.

Grundsätzlich sollte bei der Auswahl des Fällmittels für Kläranlagen, die bereits chemisch fällen oder eine Fällung nachrüsten müssen, die Entscheidung für das vorgesehene Phosphorrückgewinnungsverfahren mit einbezogen werden.

legt ist. Die Kernergebnisse der Szenarien sind nachfolgend zusammengefasst. In den Szenarien werden jeweils die Rückgewinnungspfade auf den Kläranlagen, bzw. die Entsorgungswege der Klärschlämme kartographisch dargestellt.

Das Ziel der Rückgewinnung aus Klärschlamm war die sichere Unterschreitung des Grenzwertes von 2 % Phosphor, bzw. eine mindestens 50 %ige Rückgewinnungsquote. Der Rückgewinnungspfad Klärschlammmasche wurde durchgängig mit der geforderten Rückgewinnungsquote von mindestens 80 % berücksichtigt.

### 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 und möglichst ohne Zubau von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen. Die Technologie zur Phosphorrückgewinnung soll den Entsorgungsweg offenhalten, also soll möglichst wenig Rückgewinnung aus der Asche erfolgen. Somit wird vermehrt eine Phosphorrückgewinnung aus dem nassen Schlamm oder – bei entsprechender Eignung der Kläranlage – aus dem Schlammwasser direkt auf der Kläranlage empfohlen.

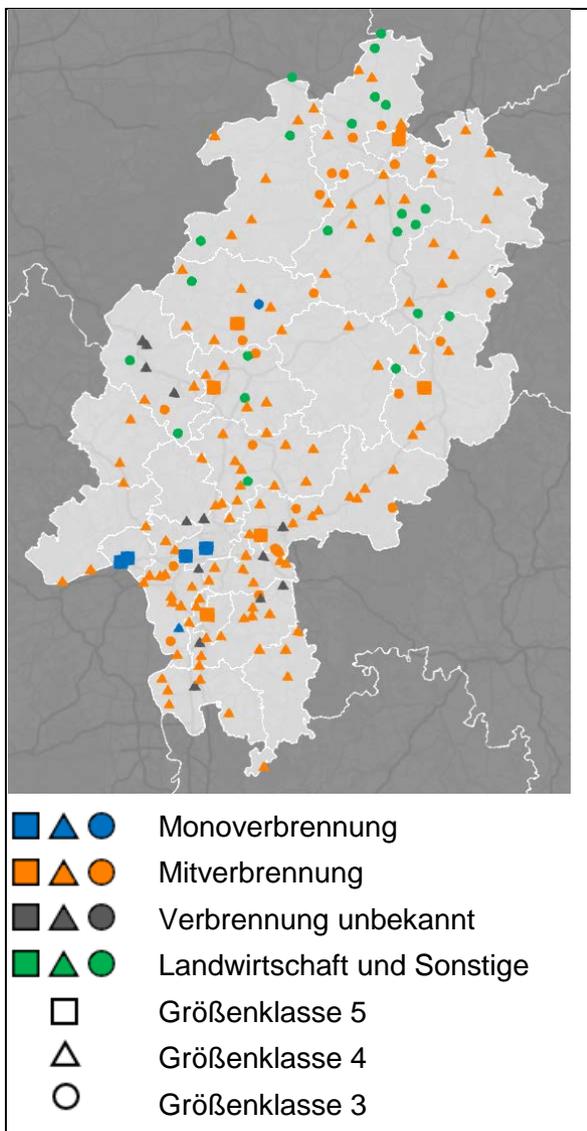


Abbildung 4: Szenario 1 - Darstellung der Entsorgungswege der relevanten Kläranlagen

Der Entsorgungsweg Monoverbrennung wurde für die Klärschlämme, die aktuell auf diesem Weg entsorgt werden im Szenario 1 beibehalten. Hier ist der Bau mindestens einer Rückgewinnungsanlage aus der Asche erforderlich.

Eine Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm am Standort der Verbrennungsanlage ist aus technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll. Es wäre zunächst eine Entwässerung des Schlammes auf der Kläranlage zur Verbesserung der Transportfähigkeit durchzuführen, um dann eine Rückverdünnung, Phosphorrückgewinnung aus dem Nassschlamm und nachfolgende erneute Entwässerung und Trocknung vor der Verbrennung anzuschließen.

Im Szenario 1 konnten voraussichtlich vorhandene Kapazitäten in Mitverbrennungsanlagen aus den nachfolgenden Bereichen identifiziert werden: Müllheizkraftwerke (MHKW), Kohlekraftwerke und Zementwerke. Deren tatsächliche Eignung müsste im Anschluss an das Gutachten genauer untersucht werden.

Kooperationspotentiale zwischen Kläranlagenbetreibern, um die Zahl der benötigten Rückgewinnungsanlagen zu senken, sind im Bericht zum Gutachten enthalten [7].

Table 3: Szenario 1 - Rückgewinnungspfade und Inputmengen

Rückgewinnungspfad	Klärschlamm [t TS/Jahr]	Phosphorfracht [t P/Jahr]	mittlere Rückgewinnungsquote [%]
Asche	33.770	1.008	80
Klärschlamm/ & Schlammwasser	75.271	2.359	45
Landwirtschaft	1.608	36	-
Gesamt	110.649	3.403	55

## Szenario 2: Maximierung der Phosphorrückgewinnung

Ab dem Inkrafttreten der Regelungen der AbfKlärV-Novelle, müssen 36,5 % aller hessischen Klärschlämme, die zur Zeit landwirtschaftlich verwertet werden, verbrannt werden. Szenario 2 fokussiert die Aufrechterhaltung der Entsorgungssicherheit. Es wird dabei davon ausgegangen, dass nicht genügend Kapazität in Anlagen zur Mitverbrennung vorhanden ist. Ein Ausbau von Monoverbrennungskapazitäten wäre die Folge. In Hessen werden zum jetzigen Zeitpunkt bereits 35 % aller Klärschlämme monoverbrannt. Im Zuge des Gutachtens wurden mögliche Kapazitäten in den Verbrennungsanlagen

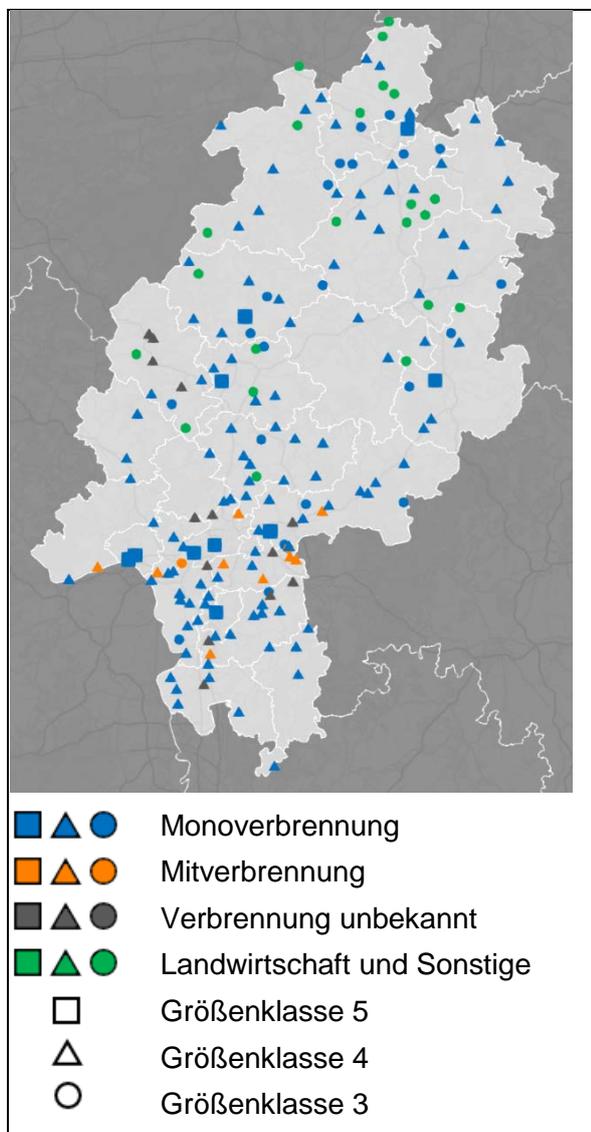


Abbildung 5: Szenario 2 - Darstellung der Entsorgungswege der relevanten Kläranlagen

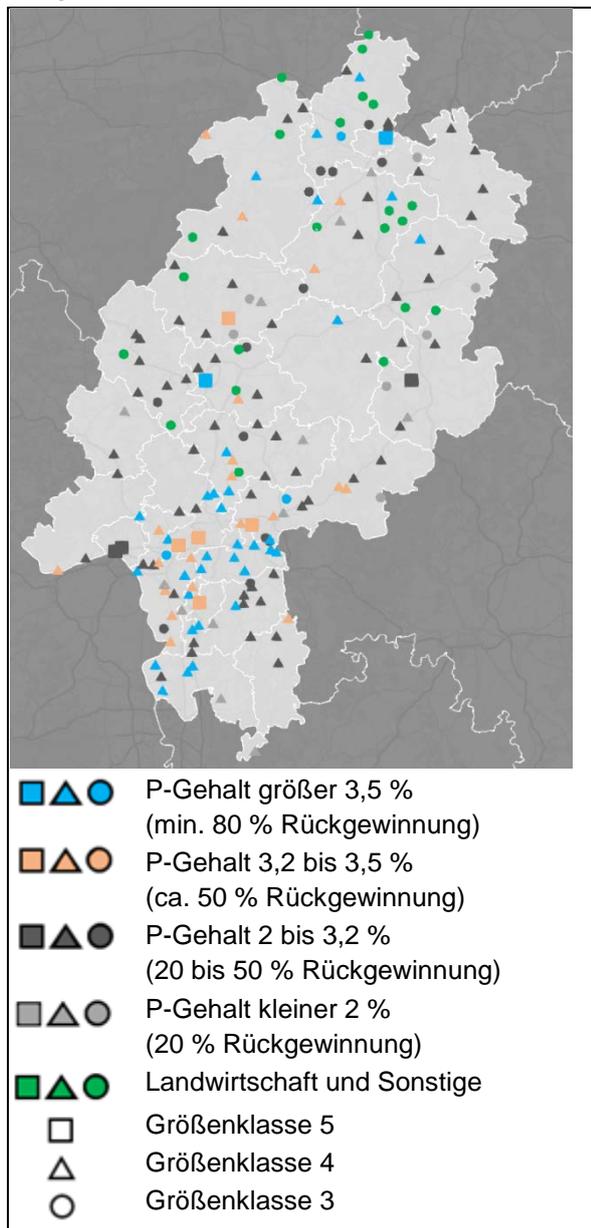
Frankfurt Sindlingen (Reduktion der Schlammmenge durch den Bau einer Schlammfäulung der KA) und Infraserb Höchst zur Monoverbrennung von Klärschlamm berücksichtigt. In Nordhessen fehlen Verbrennungskapazitäten. Diese sind auch nicht grenznah in anderen Bundesländern vorhanden. In Szenario 2 müsste in dieser Region der Bau einer Verbrennungsanlage angestrebt werden. Durch die Zentralisierung der Phosphorrückgewinnung nach Monoverbrennungsanlagen würden fast 90 % der Phosphor-Rezyklate an 2 bis 3 Standorten nach einer Rückgewinnung aus der Klärschlamm-Asche anfallen. Die großen Mengen mit homogener Qualität könnten am Standort der Rückgewinnungsanlage eine Aufbereitung auf Düngemittelqualität und damit die Erhöhung der Wertschöpfung aus dem generierten Produkt ermöglichen. Dies bleibt abhängig vom präferierten Vertriebsweg eingehend zu prüfen. Ein Direktvertrieb seitens der Betreiber der Rückgewinnungsanlage ist hingegen mit hohen Verwaltungskosten verbunden. Die Akzeptanz des Produktes bei einem Vertrieb abseits der etablierten Düngemittelindustrie bleibt zudem abzuwarten.

Tabelle 4: Szenario 2 - Rückgewinnungspfade und Inputmengen

Rückgewinnungspfad	Klärschlamm [t TS/Jahr]	Phosphorfracht [t P/Jahr]	mittlere Rückgewinnungsquote [%]
■ Asche	98.828	3.045	80
■ Klärschlamm/ & Schlamm-wasser	10.213	322	45
■ Landwirtschaft	1.608	36	-
Gesamt	110.649	3.403	77

### Szenario 3: Rückgewinnung nach Mindestanforderungen der Novelle der AbfKlärV

Nach der Novelle zur AbfKlärV wird eine Phosphorrückgewinnung verpflichtend, sollte der P-Gehalt im Klärschlamm bereits einmalig 2 % überschreiten. Dies bedeutet, dass in der Realität auch Klärschlämme mit niedrigeren mittleren P-Gehalten einer Phosphorrückgewinnung zugeführt werden müssen.



**Abbildung 6:** Szenario 3 - Darstellung der Rückgewinnungsquoten abhängig vom P-Gehalt im Schlamm für die relevanten Kläranlagen

Zur sicheren Abreicherung des Phosphors bis unterhalb des Grenzwertes wurde hier ein zu unterschreitender Zielwert von 1,6 % Phosphor in der Trockenmasse

gewählt. Aus Überlegungen zu Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung von Rückgewinnungsanlagen, folgen die in Abbildung 6 dargestellten Rückgewinnungsklassen bei Umsetzung der Mindestanforderungen der AbfKlärV-Novelle.

Auffällig ist, dass die großen Kläranlagen in Frankfurt am Main und Wiesbaden, welche aktuell ihre Schlämme in die Klärschlammmonoverbrennung geben, dies zur Sicherstellung der Phosphorrückgewinnung aufgrund der dort niedrigen Phosphorkonzentrationen im Schlamm nicht zwingend beibehalten müssten. Gießen und Kassel, die aktuell ihre Schlämme nicht in die Monoverbrennung geben, würden dies in Szenario 3 aufgrund hoher Gehalte an Phosphor größer 3,5 % tun müssen. Die strikte Einordnung aufgrund technischer Gesichtspunkte zeigt hier interessante Aspekte hinsichtlich notwendiger Anpassungen in der Entsorgungsstruktur auf. Gleichzeitig ist es unwahrscheinlich, dass bestehende Klärschlämme zur Monoverbrennung insbesondere in der durch die Stadtentwässerung Frankfurt geführten SEVA Sindlingen anderen Verbrennungswegen zugeführt werden.

**Tabelle 5:** Szenario 3 - Rückgewinnungspfade und Inputmengen

Rückgewinnungspfad	Klärschlamm [t TS/Jahr]	Phosphorfracht [t P/Jahr]	mittlere Rückgewinnungsquote [%]
Asche	23.436	949	80
Klärschlamm/ Schlamm- wasser	85.605	2.418	43
Landwirtschaft	1.608	36	-
Gesamt	110.649	3.403	53

## Gegenüberstellung der Szenarien

Die dezentrale Phosphorrückgewinnung an den Kläranlagenstandorten ist der Ausgangspunkt für Szenario 1. In Szenario 3 ergeben sich aufgrund der Prämisse, dass die Mindestanforderungen nach AbKlärV erfüllt werden sollen ebenfalls viele Rückgewinnungsanlagen auf den Kläranlagenstandorten. Vorteilhaft ist bei beiden Szenarien, dass aus heutiger Sicht niedrige Verbrennungskosten in der Mitverbrennung von Klärschlamm in nennenswerter Größe genutzt werden können, da dieser Entsorgungsweg nach der Rückgewinnung aus Schlammwasser und Nassschlamm offensteht. Bei der Phosphorrückgewinnung aus Schlammwasser könnten z. T. sehr hochwertige Rezyklate (z. B. Struvit) erzeugt werden. Nachteilig in den Szenarien 1 und 3 ist jedoch die Vielzahl an Einzellösungen, die hohe Aufwendungen an Personal sowie einen hohen Organisationsaufwand für das Recycling bedingen. Zudem ist kaum Aggregationspotential bei der Phosphorrückgewinnung aus Nassschlamm zu erwarten. Das verfahrensbedingt geringere Rückgewinnungspotential als bei den Ascheverfahren widerspricht außerdem dem Ressourcenschutzaspekt. Die weitgehende Phosphorrückgewinnung aus der Asche von Klärschlammmono-

verbrennungsanlagen wie in Szenario 2 dargestellt ermöglicht eine gleichbleibende Rezyklatqualität aufgrund weniger Rückgewinnungsanlagen und der Homogenisierung der Klärschlämme sowie hohe Rückgewinnungsquoten.

Skalierungseffekte beim Bau großer zentraler Phosphorrückgewinnungsanlagen generieren Kostenersparnisse. Die Schaffung zusätzlicher Verbrennungskapazitäten ist zur Aufrechterhaltung der Entsorgungssicherheit nach dem Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung für alle Szenarien notwendig. Es ist nicht absehbar, ob dies allein durch die Nutzung von Mitverbrennungskapazitäten möglich ist.

Aktuell fehlen Kapazitäten in der Klärschlammverbrennung in Hessen von 49.400 Tonnen TS pro Jahr, von denen 35.500 Tonnen TS pro Jahr aus Kläranlagen stammen, bei denen eine Phosphorrückgewinnung erforderlich wird. Es kann aktuell nicht abgeschätzt werden, ob diese vollständig als Monoverbrennungskapazität zur Verfügung gestellt werden können. Durch die Agglomeration des entwässerten Klärschlammes an wenigen Verbrennungsstandorten ist grundsätzlich mit längeren Transportwegen zu rechnen als derzeit.

**Tabelle 6:** Relation der Anzahl der Kläranlagen zu Rückgewinnungsanlagen innerhalb der Szenarien

Rückgewinnungspfad:	Asche	Klärschlamm/Schlammwasser			Landwirtschaft	Alle
<b>Szenario 1 - "Weitgehende Rückgewinnung auf Kläranlagenstandorten"</b>						
Kläranlagen	6	156			22	184
Phosphorrückgewinnungsanlagen	1 bis 2	≤ 156			-	≤ 158
<b>Szenario 2 - "Maximierung der Phosphorrückgewinnung"</b>						
Kläranlagen	138	24			22	184
Phosphorrückgewinnungsanlagen	2 bis 3	≤ 24			-	≤ 27
<b>Szenario 3 - "Rückgewinnung nach Mindestanforderungen der Novelle AbfKlärV"</b>						
Phosphor im Klärschlamm	> 3,5 %	3,2 - 3,5 %	2 - 3,2 %	< 2 %	-	-
Kläranlagen	38	25	80	19	22	184
Phosphorrückgewinnungsanlagen	2 bis 3	≤ 25	≤ 80	≤ 19	-	≤ 127

## Kostenabschätzung der technischen Verfahren

Die DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 gibt die Bandbreite der Kosten von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm mit 2 bis 25 €/kg P bzw. 0,5 bis 18 € je Einwohner und Jahr an [9]. Damit ist die Kostenspanne bei diesem Stoffstrom am höchsten. Seit der Veröffentlichung des Berichtes sind weitere Kostenangaben zu anderen Verfahren publiziert worden, die in einem ähnlichen Bereich liegen. Hochrechnungen einzelner Verfahren aus dem Labormaßstab mit deutlich geringeren Kostenangaben, wurden zwischenzeitlich nicht mehr bestätigt.

Insgesamt ist bei dezentralem Betrieb von Phosphorrückgewinnungsanlagen auf kleinen oder mittleren Kläranlagen von Kosten im Bereich weniger Euro pro Einwohner und Jahr auszugehen.

Bei der Betrachtung der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche wurden seitens des ISA zwei Verfahren verglichen, wobei das eine

### Ausblick

Im Grundsatz ist eine Richtungsentscheidung im Bereich der Phosphorrückgewinnung auf dem Standort der Kläranlage oder aus Asche immer direkt mit der Wahl des Entsorgungsweges verknüpft. Eine genaue Kapazitätsanalyse von Verbrennungsanlagen und Deponiestandorten in Hessen und den angrenzenden Bundesländern kann dabei unterstützen. Nach Sichtung der vorhandenen Verbrennungskapazitäten sind zur Bereitstellung der Entsorgungssicherheit mit großer Wahrscheinlichkeit zusätzliche Monoverbrennungskapazitäten notwendig. Diese würden eine Rückgewinnung aus Asche begünstigen.

Die Kostenfrage kann aus heutiger Sicht auch aufgrund der bislang wenigen großtechnisch umgesetzten Rückgewinnungsanlagen nur unzureichend geklärt werden. Es ist allerdings von moderaten Kosten-

in der Kostenstruktur stark betriebsmittel-dominiert ist (PASCH), während das andere sehr hohe Investitionen benötigt (ASH DEC). Es zeigte sich, dass bei der gewählten Anlagengröße von 20.000 Jahrestonnen Asche, was etwa dem Klärschlammanfall von 3,1 Mio. Einwohnern entspricht, beide Verfahren sehr kostengünstig ausgelegt werden könnten. Das ASH DEC-Verfahren läge dabei mit 1 € je Einwohner und Jahr kostenmäßig niedriger als das PASCH-Verfahren mit 1,4 € je Einwohner und Jahr. Durch den Verkauf der Rezyklate können in Abhängigkeit von deren Qualität Erlöse erzielt werden, die hier noch nicht eingerechnet wurden. Zudem sind Kosteneinsparungen bei der Deponierung der Klärschlammaschen aufgrund reduzierter Mengen möglich. Die Berechnung basiert auf Zahlen, die die Verfahrensentwickler zur Verfügung gestellt haben und können in der realen Anwendung abweichen.

steigerungen im Bereich weniger Euro pro Einwohner und Jahr auszugehen.

Die bereits weitgehende Zentralisierung der Verbrennung von ca. einem Drittel der Klärschlämme in Südhessen bietet die Möglichkeit, durch Implementierung einer einzelnen Anlage die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche großflächig umzusetzen. Die gemeinsame Erarbeitung von Klärschlammmentsorgungskonzepten durch mehrere Kläranlagenbetreiber kann auf Basis der im Gutachten zusammengefassten Daten erfolgen.

Durch gezielte Erhebung und Bereitstellung von Daten kann das Land Hessen die Kläranlagenbetreiber bei der Entscheidung zur Wahl des geeigneten Phosphorrückgewinnungsverfahrens und der Identifikation geeigneter Kooperationspartner unterstützen. Das hier vorgestellte Gutachten ist dabei der erste Schritt.

## Literatur

1. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015): Referentenentwurf der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (Novelle AbfKlärV)
2. Koalitionsvertrag Hessen (2014): Verlässlich gestalten - Perspektiven eröffnen: Koalitionsvertrag zwischen CDU Hessen und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN Hessen für die 19. Wahlperiode des hessischen Landtags
3. EG (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie - WRRL)
4. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV)
5. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2014): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV). Anhang 1 Häusliches und kommunales Abwasser
6. Statistisches Bundesamt, DWA KEK-1.2 (2014) Abwasser und Klärschlamm in Deutschland – statistische Betrachtungen: Teil 1: Abwasserbehandlung. Korrespondenz Abwasser, Abfall 61(12): 1106–1112. doi: 10.3242/kae2014.12.003
7. Montag D, Bastian D, Pinnekamp J (2016) Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlamm- asche. HAD-Referenz-Nummer: 4824/8.
8. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2016): Maßnahmenprogramm 2015-2021: Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Hessen
9. Pinnekamp J, Baumann P, Cornel P et al. (2013) Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. Arbeitsbericht der DWA Arbeitsgruppe KEK-1.1 „Wertstoffrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm“. Korrespondenz Abwasser, Abfall 60(10/11): 837–844.