



Regionale Machbarkeitsstudie des Landkreises Fulda zur Klärschlammverwertung Abschlussbericht

Verfasser:
Anne Mahret, M.Eng.
Dipl.-Ing. Roland Hilfenhaus, M.Eng.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	1
0. Zusammenfassung.....	2
1. Veranlassung und Ziele.....	3
1.1 Anlass.....	3
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	3
2. Rechtliche Grundlagen.....	4
2.1 EU-Klärschlammrichtlinie.....	4
2.2 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG).....	4
2.3 Klärschlammverordnung (AbfKlärV).....	5
2.4 Düngerecht.....	7
2.5 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (17. BImSchV).....	8
2.6 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft).....	8
2.7 Deponieverordnung (DepV).....	9
3. Grundlagen der Klärschlammentsorgung.....	10
3.1 Methoden zur Schlammreduzierung.....	10
3.1.1 Reduzierung des Schlammanfalls durch Umstellung auf Schlammfäulung.....	11
3.1.2 Reduzierung des Schlammanfalls durch aerobe Schlammalterregelung.....	11
3.1.3 Reduzierung des Tertiärschlammanfalls.....	13
3.2 Verfahren der Eindickung.....	15
3.2.1 Statische Eindickung.....	15
3.2.2 Maschinelle Eindickung.....	16
3.2.2.1 Scheibeneindicker.....	16
3.2.2.2 Bandeindicker.....	17
3.2.2.3 Zentrifuge.....	18
3.3 Verfahren der Entwässerung.....	18
3.4 Verfahren der Trocknung.....	20
3.4.1 Verfahren der Klärschlamm-trocknung.....	21
3.4.1.1 Konvektionstrocknung.....	23
3.4.1.2 Kontakt-trocknung.....	24
3.4.1.3 Strahlungstrocknung.....	24
3.5 Verwertungswege.....	26
3.5.1 Thermische Verwertung.....	26
3.5.1.1 Monoverbrennung.....	26
3.5.1.2 Mitverbrennung.....	28
3.5.1.3 Alternative Behandlungsmethoden.....	32
3.5.2 Landwirtschaft.....	33
4. Kooperationsmöglichkeiten.....	35
4.1 Formen der kommunalen Zusammenarbeit.....	35

4.2	Rechtliche Prüfung.....	35
4.2.1	Allgemeines / insbesondere: zu beachtende Grundsätze des Vergaberechts.....	35
4.2.2	Beurteilung der einzelnen Phasen der Klärschlammverwertung und Klärschlammverarbeitung.....	35
4.2.2.1	Dezentrale / zentrale Konzepte.....	35
4.2.2.2	Klärschlammanfall und Klärschlammaufbereitung	36
4.2.2.3	Klärschlammtransport.....	36
4.2.2.4	Klärschlammbehandlung in „Schwerpunktkläranlage mit Faulturm“	36
4.2.2.5	Verbrennungsanlage	37
4.2.3	Ergebnis.....	38
5.	Phosphor-Recyclingverfahren	39
6.	Datenzusammenstellung.....	41
6.1	Kläranlagen im Landkreis Fulda und der Gemeinde Haunetal.....	41
6.2	Datenerhebung	47
6.2.1	Bestehende Kooperationen	47
6.2.2	Aktuelle Klärschlammentsorgung	48
6.2.3	Klärschlammmengen nach Größenklassen.....	50
6.2.4	Klärschlammmengen nach Reinigungsverfahren	50
6.2.5	Klärschlammanalysen	50
6.2.6	Phosphor-Potential.....	53
6.2.7	Kapazitäten	54
6.2.7.1	Lagerkapazitäten	54
6.2.7.2	Faulungskapazitäten.....	55
6.2.7.3	Entwässerungskapazitäten.....	55
6.2.7.4	Trocknungskapazitäten.....	55
7.	Regionenkonzepte	56
7.1	Region Nord.....	60
7.1.1	Klärschlammanfall	62
7.1.2	Klärschlammaufbereitung auf 5 % TS	63
7.1.3	Transport.....	63
7.1.4	Energetische Nutzung	64
7.1.5	Entwässerung	65
7.1.6	Trocknung.....	66
7.1.7	Verbrennung	67
7.1.8	Wirtschaftlichkeit	68
7.1.8.1	Bestandskosten	68
7.1.8.2	Worst Case.....	68
7.1.8.3	Kooperation	69
7.1.9	Landwirtschaftliche Verwertung.....	73
7.1.10	Kooperationsmöglichkeit	73

7.1.11	Handlungsempfehlung	73
7.2	Region Ost	74
7.2.1	Klärschlammanfall	75
7.2.2	Klärschlammaufbereitung auf 5 % TS	77
7.2.3	Transport.....	77
7.2.4	Energetische Nutzung	78
7.2.5	Entwässerung	79
7.2.6	Trocknung	79
7.2.7	Verbrennung	81
7.2.8	Wirtschaftlichkeit	81
7.2.8.1	Bestandskosten	81
7.2.8.2	Worst Case.....	81
7.2.8.3	Kooperation	82
7.2.9	Landwirtschaftliche Verwertung.....	87
7.2.10	Kooperationsmöglichkeit	87
7.2.11	Handlungsempfehlung	87
7.3	Region Süd	88
7.3.1	Klärschlammanfall	89
7.3.2	Klärschlammaufbereitung auf 5 % TS	90
7.3.4	Transport.....	91
7.3.5	Landwirtschaftliche Verwertung.....	91
7.3.6	Kooperationsmöglichkeit	91
7.3.7	Handlungsempfehlung	91
7.4	Region Südwest.....	92
7.4.1	Klärschlammanfall	93
7.4.2	Klärschlammaufbereitung auf 5 % TS	94
7.4.3	Transport.....	95
7.4.4	Energetische Nutzung	95
7.4.5	Entwässerung	95
7.4.6	Trocknung	96
7.4.7	Wirtschaftlichkeit	97
7.4.7.1	Bestandskosten	97
7.4.7.2	Worst Case.....	97
7.4.7.3	Kooperation	98
7.4.8	Landwirtschaftliche Verwertung.....	100
7.4.9	Kooperationsmöglichkeit	101
7.4.10	Handlungsempfehlung	101
7.5	Region West	102
7.5.1	Klärschlammanfall	103
7.5.2	Klärschlammaufbereitung auf 5 % TS	103

7.5.3	Transport.....	104
7.5.4	Energetische Nutzung.....	105
7.5.5	Wirtschaftlichkeit.....	105
7.5.5.1	Bestandskosten.....	105
7.5.5.2	Worst Case.....	105
7.5.5.3	Kooperation.....	105
7.5.6	Landwirtschaftliche Verwertung.....	107
7.5.7	Kooperationsmöglichkeit.....	107
7.5.8	Handlungsempfehlung.....	107
7.6	Region Mitte.....	108
7.6.1	Klärschlammanfall.....	108
7.6.2	Wirtschaftlichkeit.....	108
7.6.2.1	Bestandskosten.....	108
7.6.2.2	Worst Case.....	109
7.6.2.3	Kooperationen.....	109
7.6.3	Landwirtschaftliche Verwertung.....	110
7.6.4	Kooperationsmöglichkeit.....	110
7.6.5	Handlungsempfehlung.....	111
7.7	Zentrales Konzept.....	112
7.7.1	Trocknung.....	112
7.7.2	Verbrennung.....	112
7.7.3	Wirtschaftlichkeit.....	113
7.7.4	Kooperationsmöglichkeit.....	113
7.7.5	Handlungsempfehlung.....	113
8	Abbildungsverzeichnis.....	114
9	Tabellenverzeichnis.....	116
10	Formelverzeichnis.....	118
11	Quellennachweis.....	118

Abkürzungsverzeichnis

AbfKlärV	Abfallklärschlammverordnung
AOX	Adsorbierbare Organisch gebundene Halogene
BHKW	Blockheizkraftwert
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BIOCOS®	Biological Combined System
Bio-P	Biologische Phosphorelimination
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CST	Centi Stokes
ct	Cent
DepV	Verordnung über Deponien und Langzeitlager
DüMV	Düngemittelverordnung
DüngG	Düngemittelgesetz
DüV	Düngeverordnung
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
EG-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
EU	Europäische Union
EUGH	Europäischer Gerichtshof
EuPhoRe®	Europäisches Phosphat Recycling
EuZW	Europäische Zeitschrift für Wirtschaftsrecht
EW	Einwohnerwert
EWG	Einwohnergleichwert
g	Gramm
GE	Geruchsstoffkonzentration
GK	Größenklasse
GWB	Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen
HT	Hochtemperaturtrocknung
KA	Kläranlage
kg	Kilogramm
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kwh	Kilowattstunde
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat
mg	Milligramm
mT	Metertonne
MT	Mitteltemperaturtrocknung
NT	Niedertemperaturtrocknung
P	Phosphor
pFM	Polymeres Flockungsmittel
PS	Primärschlamm
SBR	Sequentielle Biologische Reinigung
t	Tonne
TA	Technische Anleitung
TBT	Tributylzinn
TM	Trockenmasse
TOC	Total Organic Carbon
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz
ÜSS	Überschussschlamm

0. Zusammenfassung

Die Klärschlamm Entsorgung in Deutschland hat sich in den letzten Jahren mit Verschärfung der Klärschlammverordnung und Düngemittelverordnung zunehmend erschwert. Zu nennen ist speziell der Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung bis 2029/2032 in Abhängigkeit von der Anlagengröße der jeweiligen Kläranlage. Zudem haben bis Ende des Jahres 2023 die Kläranlagenbetreiber der einen Bericht über geplante P-Recyclingmaßnahmen für jede Kläranlage, unabhängig von der Ausbaugröße, zu erstellen und bei der zuständigen Behörde einzureichen. Ziel der Studie ist die Konkretisierung der bereits durchgeführten Studien und Erhebungen sowie die Erarbeitung von konkreten Konzepten und Handlungsempfehlungen für den Landkreis Fulda in Ergänzung der Gemeinde Haunetal, die aufgrund der regionalen Angrenzungen eingebunden wurde. Die Studie ist in drei Phasen gegliedert. Die Phase eins stellt die Datenerhebung dar, in welcher ebenfalls Besichtigungen der Anlagen und die Auswertung der Daten erfolgten. In der Phase zwei wurden verschiedene Konzepte erstellt, welche in der dritten Phase auf Umsetzbarkeit überprüft wurden. Bei der Überprüfung fanden neben der Wirtschaftlichkeit auch die Entsorgungssicherheit und CO₂-Einsparungen Berücksichtigung. Im Landkreis Fulda und der Gemeinde Haunetal fallen rund 5.400 t TS/a an. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurde der Landkreis in sechs Regionen eingeteilt. So lassen sich Konzepte regional angehen und lange Transportwege werden möglichst vermieden. Innerhalb dieser Regionen wurden Möglichkeiten der Klärschlammreduzierung, Aufkonzentrierung, energetischen Nutzung und Verwertung überprüft. Ein Fokus lag dabei auf der Nutzung der vorhandenen Maschinen und Anlagenteile und zwar vor dem Bau neuer. Es haben sich im Zuge der Studie einige Kooperationsmöglichkeiten herausgestellt. Diese Kooperationen beginnen meistens bei der Umstellung auf anaerobe Schlammstabilisierung und einer Eindickung auf den jeweiligen Kläranlagen. Diese liefern ihren eingedickten Schlamm an die nächstgrößere Kläranlage mit Faulturn, in welchem der Schlamm stabilisiert wird und aus dem Faulgas mittels BHKW Strom und Wärme erzeugt wird. In den meisten Regionen sind bestehende Faultürme mit Kapazitätsreserven vorhanden. Eine Ausnahme hierbei bildet die Region Ost und Süd. Für die Region Ost wurde der Bau einer Faulung überprüft. In der Region Süd hat sich eine Kooperation mit anderen Regionen als sinnvoll herausgestellt. Nach der Faulung steht die Mengenreduzierung der Schlammbehandlung im Vordergrund. In diesem Schritt bietet es sich ebenfalls an die vorhandenen Kapazitäten zu nutzen. Für einige Regionen wurde zusätzlich eine solare Trocknung überprüft. Die Trocknungen sind für eine anschließende Verbrennung von Nutzen, so kann mit einem getrockneten Schlamm ein ähnlicher Brennwert wie der von Braunkohle erreicht werden, was eine selbstgängige Verbrennung unterstützt und dadurch Kosten senkt. Für eine eigene Verbrennung mittels Drehrohrofens ist eine vorherige Trocknung des Schlammes notwendig. Die Kläranlagen der Größenklassen 1 und 2 können - mit Ausnahme der Kläranlage „Rasdorf“ - weiter in die Landwirtschaft entsorgen. Um die Zusammenarbeit der einzelnen Kläranlagen zu koordinieren wurden ebenso verschiedene Kooperationsformen überprüft.

1. Veranlassung und Ziele

1.1 Anlass

Die Reinigung von Abwasser ist aus dem heutigen Deutschland nicht mehr wegzudenken. Bei der Reinigung fallen erneut Abfälle, wie Rechen- und Sandfanggut und auch Klärschlamm, an. Für die Entsorgung dieser Reststoffe kommen verschiedene Möglichkeiten der Verwertung und Entsorgung in Frage. Der Klärschlamm wurde viele Jahre landwirtschaftlich verwertet, da er erhebliche Mengen an Phosphor enthält. Phosphor ist eine wichtige Grundlage für das gesamte Leben auf der Erde, sowohl der Mensch als auch jede Pflanze, Tier und Zelle benötigen diesen für ihr Wachstum. Phosphor kann nicht substituiert werden und seine natürlichen Vorkommen befinden sich weitgehend in politisch instabilen Ländern. Um die endliche Ressource zu schonen und nicht auf Importe angewiesen zu sein, soll Klärschlamm stärker als Wertstoffquelle genutzt werden. Eine Verwertungsmöglichkeit des Klärschlammes kann eine bodenbezogene, landwirtschaftliche Verwertung darstellen. Hierbei wird der Phosphor den Pflanzen zur Verfügung gestellt. Da neben den Pflanzennährstoffen Phosphor und Stickstoff, aber auch Schadstoffe im Klärschlamm enthalten sind, wurde im Koalitionsvertrag zur 18. Legislaturperiode ein Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung beschlossen. Durch die Novellierung der Klärschlammverordnung im September 2017 hat sich die Entsorgung des Klärschlammes zunehmend erschwert und zu stark steigenden Kosten geführt. Ab dem Jahr 2029 bzw. 2032 ist eine landwirtschaftliche Verwertung für Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 100.000 EW bzw. 50.000 EW nicht mehr möglich, sodass für diese Kläranlagen Lösungen zu finden sind. Außerdem hat jeder Kläranlagenbetreiber bis Ende 2023 einen Bericht über die geplanten Maßnahmen zum P-Recycling der zuständigen Behörde vorzulegen. In dieser Studie sollen verschiedene Möglichkeiten der Verwertung von Klärschlamm für den Landkreis Fulda und die Gemeinde Haunetal dargestellt werden. Hierbei wird die Betrachtung des Klärschlammes schon bei dessen Entstehung analysiert. Die Studie wird vom Landkreis Fulda finanziert und vom Land Hessen gefördert.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Entsorgung von Klärschlamm muss auch bei sich ändernden Rahmenbedingungen in Zukunft sichergestellt sein. Hierfür ist es notwendig eine ausführliche Datenerhebung durchzuführen, um auf Änderungen reagieren zu können. Diese Daten sind auf unterschiedliche Gesichtspunkte zu analysieren, wie Prozessoptimierungen, passende Entwässerungs- und Trocknungstechniken sowie mögliche Verwertungsmöglichkeiten. Ziel der Studie ist die Konkretisierung der bereits von anderen Institutionen durchgeführten Studien und die Darlegung transparenter Konzepte und Handlungsempfehlungen für die Region Fulda. Die Studie ist in drei Phasen gegliedert. Die erste Phase befasst sich mit der Datenerhebung, die zweite Phase mit der Aufstellung von Konzeptionen und Handlungsempfehlungen und anschließend die dritte Projektphase mit der Prüfung und Bewertung der Umsetzung. In der ersten Phase wurden zu Beginn alle relevanten Daten zusammengetragen und ein Erhebungsbogen für eine einheitliche Abfrage bei den Kläranlagenbetreibern erstellt. Diese Bögen wurden vom Auftraggeber zunächst an die Betreiber von größeren Kläranlagen - über 5.000 EW - und im Anschluss an die Betreiber kleinerer Anlagen versendet. Diese Daten wurden zusammengetragen und ausgewertet. Das Ergebnis findet sich in Kapitel 4. Für die Erstellung von Konzepten wird der Landkreis in sechs Regionen unterteilt. Die Schlammbehandlung soll in den Regionen stattfinden, um möglichst kurze Transportwege zwischen den Anlagen und einer Weiterverarbeitung zu generieren. Ein komplettes Vermeiden von Transporten zwischen den Kläranlagen ist hierbei nicht möglich. Bei den Arten der Schlammbehandlung wird hierbei ein Fokus auf Schlammstabilisierung, Eindickung, Entwässerung und Trocknung gelegt. Bei der Erstellung der (Vorschlags-)Konzepte wird unterschieden in zentral und dezentrale Schlammverwertung. In der dritten Phase wird hierbei auf die Umsetzbarkeit und Bewertung der einzelnen Konzepte geachtet. Neben einer technischen Überprüfung werden auch die Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz berücksichtigt.

2. Rechtliche Grundlagen

In Tabelle 1 sind die relevanten Rechtsgrundlagen aufgezählt, welche für die verschiedenen Möglichkeiten der Entsorgung in Frage kommen. Auf die in der Tabelle blau markierten Rechtsgrundlagen wird anschließend näher eingegangen.

Tabelle 1: Rechtsgrundlagen der Klärschlamm Entsorgung in Deutschland nach (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, 2019)

Regelungsumfang	Rechtsgrundlage	Rechtsgeber
Entsorgung allgemein	Kreislaufwirtschaftsgesetz	Bund
Verwertung in der Landwirtschaft	EU-Klärschlammrichtlinie	Europäische Union
	Klärschlammverordnung	Bund
	Abfallwirtschaftsplan	Hessen
	Düngegesetz	Bund
	Düngeverordnung	Bund
	Düngemittelverordnung	Bund
Thermische Behandlung / Verwertung	Bundes-Immissionsschutzgesetz	Bund
	Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17.BImSchV	Bund
Deponierung	Kreislaufwirtschaftsgesetz	Bund
	Deponieverordnung	Bund
Haftung	Klärschlamm-Entschädigungsfondverordnung	Bund
Export	EG-Abfallverbringungsverordnung	Europäische Union

2.1 EU-Klärschlammrichtlinie

Die EU-Klärschlammrichtlinie vom 12. Juni 1986 soll die Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft regeln. Es sollen dadurch schädliche Auswirkungen auf Böden, Vegetation, Tiere und Menschen verhindert und zugleich eine ordnungsgemäße Verwendung von Klärschlamm gefördert werden (EU-Klärschlammrichtlinie). In der Richtlinie sind Grenzwerte für im Klärschlamm enthaltene Schwermetalle festgelegt (Anhang 1 C, Richtlinie 86/278/EWG), welche in einem Jahr pro ha maximal auszubringen sind. Überschreitungen der Grenzwerte für Cadmium, Kupfer, Nickel, Blei, Zink, Quecksilber und Chrom dürfen von den Mitgliedsstaaten gestattet werden, wenn auf den Flächen ausschließlich Futtermittel angebaut wird und sich daraus keine Gefährdung für Mensch und Umwelt ergibt. Außerdem wurden die zu analysierenden Parameter und Intervalle festgelegt, in denen diese mindestens zu untersuchen sind. Zu den Parametern zählen Trockensubstanz, organische Substanz, pH-Wert, Stickstoff und Phosphor sowie die beschriebenen Schwermetalle. Für die Verwendung von Klärschlamm ist dieser vor der Aufbringung auf den Feldern vorzubehandeln, außer die Mitgliedsstaaten erlauben auch eine Aufbringung unbehandelter Schlämme, wenn diese in den Boden eingespült oder eingegraben werden (Roskosch & Heidecke, 2018). Ebenfalls sind einige Ausbringungsbeschränkungen in der Richtlinie enthalten. Es darf auf Obst- und Gemüsekulturen während der Vegetationsperiode und auf Weiden oder Futteranbauflächen vor Ablauf einer Frist, keine Ausbringung von Klärschlamm erfolgen.

2.2 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012, zuletzt geändert am 20. Juli 2017, soll die Schonung der natürlichen Ressourcen gefördert und der Schutz von Menschen und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sichergestellt werden (§ 1 KrWG).

Es ist die rechtliche Grundlage für die Entsorgung von Abfällen und somit auch für die Entsorgung von Klärschlamm in Deutschland. Eine Stärkung der Abfallvermeidung und des Recyclings von Abfällen soll eine nachhaltige Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes erzielen. Hierfür wurde eine fünfstufige Hierarchie, nach Abbildung 1, aufgestellt. Das vorrangige Ziel sollte die Abfallvermeidung sein. Abfälle aus der kommunalen Abwasserreinigung sind nicht vermeidbar, daher ist die Verwertung des Klärschlammes von größerer Bedeutung. Hier gilt es den Schlamm ordnungsgemäß und schadlos zu verwerten.

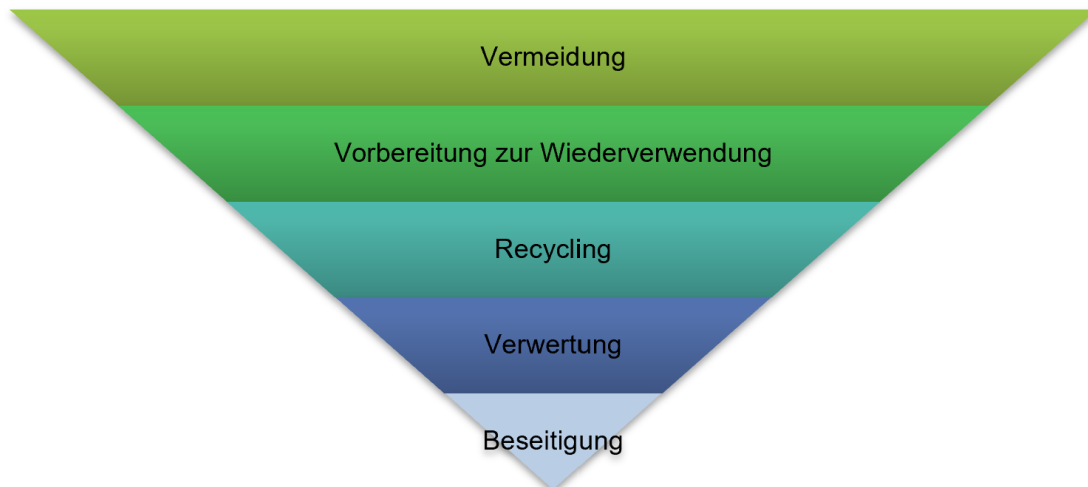


Abbildung 1: Abfallhierarchie nach (wohnindamit.de, 2016)

Auf § 11 KrWG basiert die Klärschlammverordnung. Dieser Paragraph sieht eine separate Rechtsverordnung vor, welche eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von Klärschlamm sicherstellen soll. In § 12 (1) KrWG ist zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherstellung des Schutzes von Menschen und Umwelt, bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Bioabfällen und Klärschlämmen, die Qualitätssicherung geregelt. Die Verwendung qualitätsgesicherter Klärschlämme soll eine verantwortungsbewusste landwirtschaftliche Nutzung von Klärschlämmen ermöglichen. Zu der Verwertung von Klärschlamm zählt auch die thermische Verwertung. Bei einer thermischen Verwertung des Klärschlammes ist das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) einzuhalten.

2.3 Klärschlammverordnung (AbfKlärV)

Durch die Klärschlammverordnung wird die Bewirtschaftung von Klärschlämmen geregelt. Die Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27. September 2017 trat am 3. Oktober 2017 in Kraft. Die Novelle soll eine langfristige Versorgungssicherheit mit Phosphor gewährleisten (Ewens, 2018). Durch die Verordnung wird nach § 1 AbfKlärV das Auf- oder Einbringen von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost auf landwirtschaftlich, landbaulich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Böden geregelt. Der Klärschlamm ist hierbei möglichst hochwertig zu verwerten, soweit technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar (§ 3 AbfKlärV). Eine Rückgewinnung und Rückführung des Phosphors in den Wirtschaftskreislauf sind anzustreben. Mit der Novelle sind im Wesentlichen folgende Ziele verbunden:

- Beendigung der Klärschlammausbringung zu Düngezwecken
- Verringerung des Schadstoffgehalts im Boden
- Rückgewinnung von Phosphor und anderer Nährstoffe (Ressourcenschutz)
- langfristige Versorgungssicherheit aus der Kreislaufwirtschaft sowie keine Abhängigkeit von Importen (Versteyl, 2018)

Eine bodenbezogene Klärschlammverwertung ist durch mehrere Paragraphen eingeschränkt. Es darf kein Klärschlamm auf- und eingebracht werden,

- welcher ein Klärschlammgemisch aus Kläranlagen über 1.000 EW ist, die nicht von demselben Klärschlammherzeuger kommt,
- welcher von Kläranlagen über 100.000 EW (ab 1. Januar 2029), bzw. 50.000 EW (ab 1. Januar 2032) kommt,
- in Wasserschutzgebieten der Schutzzone I, II und III,
- in Naturschutzgebieten, Nationalparks, nationalen Naturmonumenten, Naturdenkmälern, geschützten Landschaftsbestandteilen und gesetzlichen Biotopen.

Einige dieser Einschränkungen wie den Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung für Kläranlagen ab 50.000 EW (bzw. 100.000 EW) und das Verbot der Ausbringung auf Flächen der Wasserschutzzone III, wurden in der novellierten Klärschlammverordnung hinzugefügt. Weitere Änderungen sind ein erweiterter Untersuchungsumfang (bei der Untersuchungshäufigkeit und zu untersuchenden Stoffen) beim Klärschlamm, erweiterte Bodenuntersuchungen und Anforderungen an die freiwillige Qualitätssicherung. Neben der landwirtschaftlichen Verwertung ist auch die Mitverbrennung in Kraftwerken nicht mehr bei allen Kläranlagen zulässig. Bei Phosphorgehalten über 20 g P/kg TM darf der Klärschlamm nicht mitverbrannt werden. Grund hierfür ist die geplante Versorgungssicherheit mit Phosphor und der „verlorene“ Phosphor in der Asche bei der Mitverbrennung. Mit nachstehender Abbildung 2 kann geprüft werden, welche Verwertungswege ab dem 01. Januar 2029 unter Berücksichtigung der AbfKlärV und DüMV möglich sind.

Übersicht Entsorgungsmöglichkeiten ab 1. Januar 2029 ⁷⁾	Kläranlagen ≤ 100 000 EW (ab 1. Januar 2029) bzw. KA ≤ 50 000 EW (ab 1. Januar 2032)			Kläranlage > 100 000 EW (ab 1. Januar 2029) bzw. Kläranlagen > 50 000 EW (ab 1. Januar 2032)		
	< 20 g P/kg TM bzw. < 4,6 % P ₂ O ₅	≥ 20 g P/kg TM bzw. ≥ 4,6 % P ₂ O ₅	Nach P-Abreicherung des Klärschlammes	< 20 g P/kg TM bzw. < 4,6 % P ₂ O ₅	≥ 20 g P/kg TM bzw. ≥ 4,6 % P ₂ O ₅	nach P-Abreicherung des Klärschlammes
Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemischen und -komposten auf und in Böden gemäß den gesetzlichen Vorgaben	✓	✓	X ⁴⁾	X	X	X
Thermische Vorbehandlung in: Klärschlamm-(Mono-)Verbrennung „Klärschlammverbrennungsanlage“ bzw. anderweitige thermische Verfahren bzw. Klärschlamm-Mitverbrennung „Klärschlammmitverbrennungsanlage“ ausschließlich mit ● Kohlefeuerung bzw. ● Gasfeuerung	✓ keine P-Rückgewinnung erforderlich ¹⁾ , Deponierung zulässig	✓ ²⁾ entweder ≥ 80 % P-Rückgewinnung oder Langzeitlagerung oder stoffliche Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehalts	✓ keine P-Rückgewinnung erforderlich ³⁾ , Deponierung zulässig	✓ keine P-Rückgewinnung erforderlich ¹⁾ , Deponierung zulässig	✓ ³⁾ entweder ≥ 80 % P-Rückgewinnung oder Langzeitlagerung oder stoffliche Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehalts	✓ keine P-Rückgewinnung erforderlich ³⁾ , Deponierung zulässig
Mitverbrennungsanlage ohne Beschränkung der Brennstoffe (zum Beispiel Altholz- und Ersatzbrennstoffe)	✓	X	✓	✓	X	✓
Anderweitige Abfallentsorgung (mit Zustimmung der Behörde), zum Beispiel: ● Zementwerke ● Müllkraftwerke	✓ ²⁾	✓ ²⁾	✓ ²⁾	✓ ⁶⁾	X	✓ ⁶⁾

Abbildung 2: Übersicht über die Entsorgungsmöglichkeiten (Otte-Witte, et al., 2018)

Für die Umsetzung der Ziele der Klärschlammverordnung sind besonders zwei Elemente von Bedeutung, diese sind zum einen eine bundeseinheitliche Umsetzung und Auslegung der Anforderungen und zum anderen eine schnelle Weiterentwicklung und Umsetzung der Phosphorrückgewinnungsverfahren (Ewens, 2018). Bis Ende 2023 sind die

Klärschlammherzeuger verpflichtet einen Bericht über die geplanten und eingeleiteten Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung der Behörde vorzulegen. Dies bezieht sich auf Maßnahmen, die ab dem 1. Januar 2023 durchzuführen sind. Hierzu zählt die Auf- oder Einbringung von Klärschlammen auf oder in Böden oder Maßnahmen zur sonstigen Klärschlamm Entsorgung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (Artikel 4 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung).

2.4 Düngerecht

EU Düngerecht

In der „VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt“, vom 8. Mai 2019, werden unter anderem Grenzwerte für Krankheitserreger und verschiedene Schwermetalle festgelegt. Sie ist in nationales Recht umzusetzen.

Düngegesetz (DüngG)

Durch das Düngegesetz wird vor allem die Anforderungen an das Inverkehrbringen und die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Pflanzenschutzmitteln und Kultursubstraten geregelt. Der Zweck des Gesetzes (§ 1 DüngG) ist es die

1. Ernährung der Pflanzen sicherzustellen,
2. Fruchtbarkeit des Bodens, insbesondere den standort- und nutzungstypischen Humusgehalt, zu erhalten oder nachteilig zu verbessern,
3. Gefahren für die Gesundheit von Menschen und Tieren sowie für den Naturhaushalt vorzubeugen oder abzuwenden, die durch das Herstellen, Inverkehrbringen oder die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Pflanzenschutzmitteln sowie Kultursubstraten oder durch andere Maßnahmen des Düngens entstehen können,
4. einen nachhaltigen und ressourceneffizienten Umgang mit Nährstoffen bei der landwirtschaftlichen Erzeugung sicherzustellen, insbesondere Nährstoffverluste in die Umwelt so weit wie möglich zu vermeiden,
5. Rechtsakte der Europäischen Gemeinschaft oder der Europäischen Union, die Sachbereiche dieses Gesetzes, insbesondere über den Verkehr mit oder die Anwendung von Düngemitteln betreffen, umzusetzen oder durchzuführen.

Durch das Gesetz wurde auch der Klärschlamm-Entschädigungsfonds (separate Verordnung über den Klärschlamm Entschädigungsfonds) eingerichtet. Dieser soll Schäden an Menschen und Sachgütern ersetzen, die sich aufgrund einer landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung ergeben. Aktuell sind die Beitragszahlungen ausgesetzt, da die finanzielle Ausstattung den festgelegten Höchstbetrag erreicht hat. Vorher hatten alle Hersteller von Klärschlamm, die ihren Schlamm zur landwirtschaftlichen Verwertung geben, einen Beitrag von 10,23 € pro Tonne Klärschlamm zu leisten. Auch wenn die Zahlungen aktuell ausgesetzt sind, müssen Klärschlammherzeuger die Mengen weiterhin melden und Rückstellungen für die Beiträge tätigen. Die Düngung darf nur nach guter fachlicher Praxis erfolgen, die bezüglich Art, Menge und Zeitpunkt der Anwendung am Bedarf der Pflanzen und am Nährstoffgehalt des Bodens ausgerichtet sein muss (§ 3 Absatz 2 DüngG).

Düngeverordnung (DüV)

Am 02. Juni 2017 trat die neue Düngeverordnung in Kraft. Diese Verordnung regelt die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln auf landwirtschaftlich genutzten Flächen (§ 1 DüV). Hierfür sind Aufbringungsbeschränkungen abhängig von Standort und Bodenzustand, Sperrfristen für die Aufbringung von Düngemitteln und Vorgaben zur Lagerung organischer Düngemittel, geregelt. Vor dem Ausbringen von wesentlichen Nährstoffmengen an Stickstoff oder Phosphat ist der Düngebedarf nach §§ 3 und 4 DüV zu ermitteln. Dies soll eine Überdüngung des Bodens und auch einer Ausspülung der Nährstoffe in das Grundwasser vermeiden. Die Ermittlung des Düngebedarfs hat nach § 4 DüV

zu erfolgen. Hierbei sind der Nährstoffbedarf der Pflanze sowie unter anderem auch der im Boden verfügbare Pflanzennährstoff zu berücksichtigen. Um den vorhandenen Nährstoff im Boden zu bestimmen hat eine Beprobung des Bodens mindestens alle sechs Jahre zu erfolgen. Eine Aufbringung ist nach § 5 DüV dann verboten, wenn der Boden überschwemmt, wassergesättigt, gefroren oder schneebedeckt ist. Außerdem sind Mindestabstände zu Gewässern einzuhalten. In § 6 (8) DüV werden die Sperrfristen für das Düngen mit Düngemittel mit wesentlichem Gehalt an Stickstoff festgelegt. So darf auf Ackerland ab dem Zeitpunkt, ab dem die Ernte der letzten Hauptfrucht abgeschlossen ist, bis zum 31. Januar, nichts aufgebracht werden. In der Zeit vom 1. November bis 31. Januar darf auf Grünland, Dauergrünland und Ackerland mit mehrjährigem Feldfutterbau (bei einer Aussaat bis zum 15. Mai), keine Düngung erfolgen. Eine Ausnahme bildet die Düngung von Zwischenfrüchten, Winterraps und Feldfutter bei einer Aussaat bis zum 15. September, mit einer Frist bis zum 1. Oktober. Dann ist jedoch insgesamt eine Aufbringung von Dünger mit nicht mehr als 30 kg/ha Ammoniumstickstoff oder 60 kg/ha Gesamtstickstoff zulässig. Ebenso ist das aufgebrachte Düngemittel spätestens vier Stunden nach Aufbringung in den Boden einzuarbeiten. Die Düngeverordnung ist erneut zu überarbeiten, da die Europäische Union eine Verschärfung der Regelungen der DüV fordert. Entsprechende Änderungsvorschläge wurden durch die Bundesregierung bei der EU eingereicht (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2019).

Düngemittelverordnung (DüMV)

Die Düngemittelverordnung vom 9. Januar 2009, zuletzt am 26. Mai 2017 geändert, regelt das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenschutzmitteln. Klärschlamm zählt nach der DüMV zu den organischen oder organisch-mineralischen Düngemitteln und ist als Hauptbestandteil von Düngemitteln zugelassen. Auch die Asche aus der Verbrennung sowie verschiedene Rezyklate aus der Phosphorrückgewinnung, sind als Phosphatdünger definiert. Für die landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes sind in der Düngemittelverordnung (Anhang 2, Tabelle 1.4 DüMV) Grenzwerte festgelegt. Neben Grenzwerten für Schwermetalle, sind auch Grenzwerte für Salmonellen zur Vorbeugung von Seuchen und Krankheiten, festgelegt.

2.5 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (17. BImSchV)

Die 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung gilt für die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb von Abfallverbrennungs- und Abfallmitverbrennungsanlagen (§ 1 der 17. BImSchV). Somit gilt die Verordnung auch für Klärschlamm(mit)verbrennungsanlagen. Es sind Grenzwerte für Gesamtstaub, Schwefeloxide, Halogene, Stickstoffoxide, Quecksilber, Kohlenmonoxid, organische Verbindungen und Schwermetalle festgelegt (Roskosch & Heidecke, 2018). Ebenso sind in § 6 die Verbrennungsbedingungen für Abfallverbrennungsanlagen vorgeschrieben. Beispielsweise ist hier die Nachverbrennungstemperatur (> 850 Grad Celsius für zwei Sekunden) oder der maximale Glühverlust der Verbrennungasche (< 5 %) geregelt.

2.6 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)

Die aktuelle TA Luft aus dem Jahr 2002 ist das zentrale Regelwerk für genehmigungsbedürftige Anlagen zur Verringerung von Emissionen und Immissionen von Luftschadstoffen. Sie ist die erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). In dem Regelwerk sind Immissions- und Emissionsanforderungen für Luftschadstoffe von gewerblichen und industriellen Anlagen, die nach 4. BImSchV genehmigungsbedürftig sind, enthalten. Für die Klärschlammverwertung ist im Besonderen der Abschnitt 5.4.8.10.2 „Anlagen zum Trocknen von Klärschlamm“ von Bedeutung. Diese Anlagen sind so zu betreiben, dass Abgase an ihrer Entstehungsstelle, z. B. direkt am Trockner, zu erfassen und einer Abgasreinigung zuzuführen sind. In der TA Luft sind Emissionswerte für Gesamtstaub, Ammoniak, gasförmige anorganische Chlorverbindungen, organische Stoffe und geruchsintensive Stoffe vorgegeben (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Emissionswerte für Anlagen zum Trocknen von Klärschlamm nach der TA Luft

Emissionswerte für Anlagen zum Trocknen von Klärschlamm	
Gesamtstaub	Massenkonzentration: 10 mg/m ³
Ammoniak	Massenstrom: 0,1 kg/h Massenkonzentration: 20 mg/m ³
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen	Massenstrom: 0,1 kg/h Massenkonzentration: 20 mg/m ³
Organische Stoffe	Massenkonzentration: 20 mg/m ³
Geruchsintensive Stoffe	Geruchsstoffkonzentration: 500 GE/m ³

2.7 Deponieverordnung (DepV)

Die Deponieverordnung vom 27. April 2009 regelt die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Nach der Deponieverordnung werden die Abfälle je nach Gefährlichkeit unterschieden und in fünf Deponieklassen eingeteilt. Welcher Abfall in welche Klasse gehört, wird über eine Deklarationsanalyse ermittelt. Seit 2005 ist die Ablagerung von Abfällen mit einem organischen Kohlenstoffanteil (TOC) nach Tabelle 3 grundsätzlich unzulässig. Klärschlamm und auch Hausmüll sind seitdem mechanisch-biologisch oder thermisch vorzubehandeln. Eine Deponierung der Aschen aus der Klärschlammverbrennung ist nach § 23 DepV möglich. Diese Möglichkeit wurde für eine spätere Phosphorrückgewinnung aus der Asche geschaffen. Sie ist auf fünf Jahre befristet und kann unter bestimmten Voraussetzungen verlängert werden.

Tabelle 3: Grenzwerte TOC für die Deponierung nach (Roskosch & Heidecke, 2018)

Deponieklasse	Grenzwert TOC
0	1 Masse-%
I	1 Masse-%
II	3 Masse-%
III	6 Masse-%

3. Grundlagen der Klärschlamm Entsorgung

Die Klärschlamm Entsorgung richtet sich in vielen Bereichen nach dem Wassergehalt des Klärschlammes. Um den Wasseranteil des Schlammes zu reduzieren sind verschiedene Möglichkeiten der Schlammwasserabtrennung möglich. Diese sind in diesem Kapitel dargestellt, ebenso wie einige Verwertungsmöglichkeiten. Aus Abbildung 3 sind die verschiedenen Wassergehalte und Volumenminderung ersichtlich.

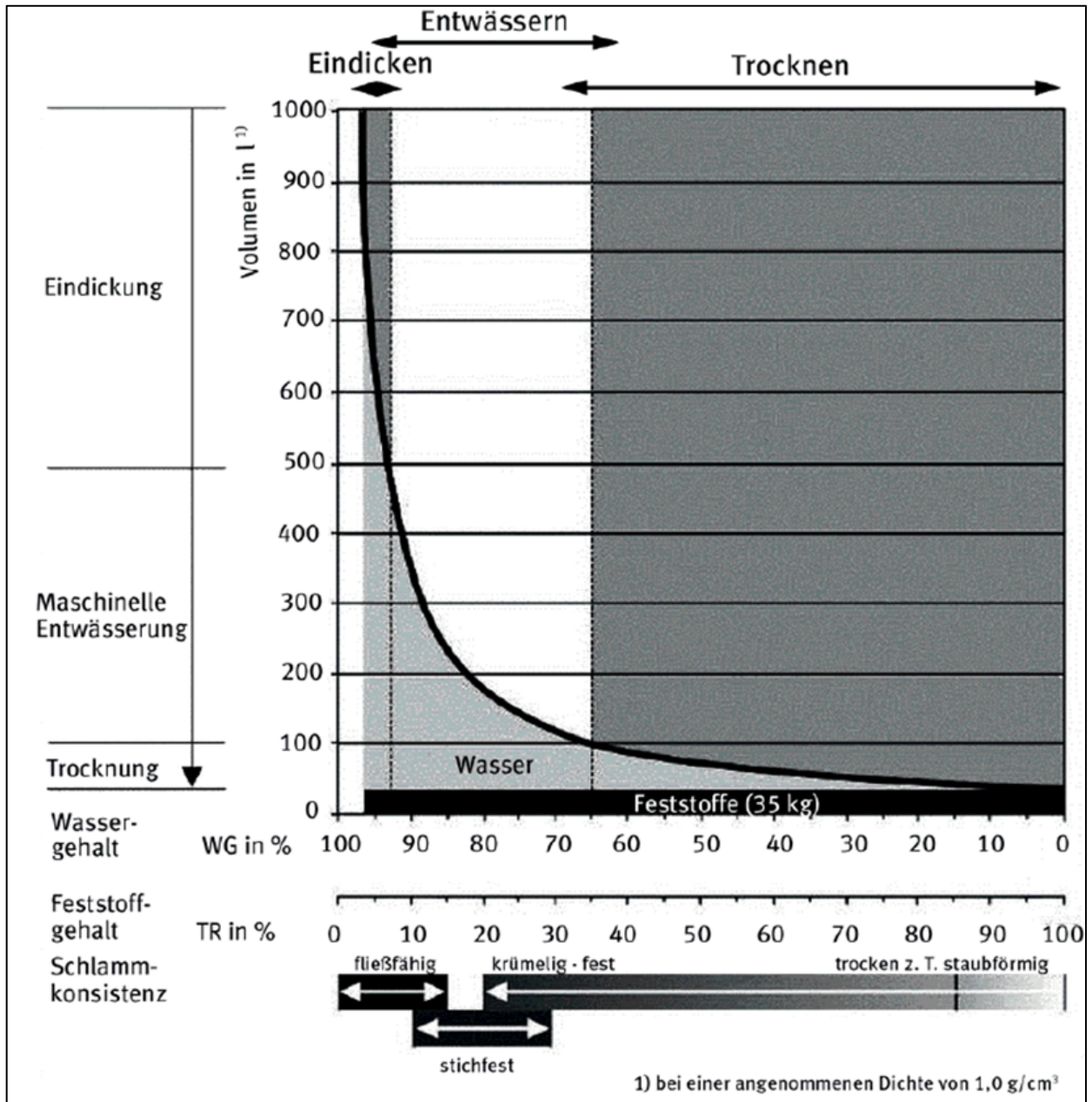


Abbildung 3: Volumenverminderung durch Abtrennen von Schlammwasser (aus DWA-M 366)

3.1 Methoden zur Schlammreduzierung

Die Reduzierung von Abfall ist die erste Hierarchie der Abfallpyramide nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz, wie in Kapitel 2.2 dargestellt. Klärschlamm ist nicht komplett zu vermeiden, aber eine Verminderung bzw. Aufkonzentration ist mit einigen Maßnahmen möglich. Eine Umstellung von aerober auf anaerobe Schlammstabilisierung kann zu einer Reduzierung des Klärschlamm anfalls führen.

3.1.1 Reduzierung des Schlammanfalls durch Umstellung auf Schlammfäulung

Die Errichtung einer Vorklärung ermöglicht die Entnahme von Primärschlamm, welcher im Faulturm einen höheren Gasertrag als Überschussschlamm liefert (Bendt, Tschech, Neitzel, & Schmelz, 2007). Durch die Entnahme wird auch die biologische Stufe der Kläranlage entlastet und es fällt weniger Überschussschlamm an. Die geringere Belastung der Biologie kann außerdem zu Energieeinsparungen bei der Belüftung führen. Eine anaerobe Schlammstabilisierung ermöglicht es im Faulturm Klärgas zu produzieren, welches in Strom und Wärme durch z. B. ein Blockheizkraftwerk (BHKW) umgewandelt werden kann. Der biologische Abbau im Faulturm reduziert die Schlammmenge weiter und der Schlamm lässt sich durch den geringeren organischen Anteil besser entwässern.

3.1.2 Reduzierung des Schlammanfalls durch aerobe Schlammalterregelung

Eine weitere Möglichkeit der Schlammreduzierung ist eine aerobe Schlammalterregelung. Das Schlammalter gibt an, wie lange ein Schlamm im System der Anlage verweilt, bevor er als Überschussschlamm aus dem System ausgeschleust wird. Das Schlammalter lässt sich nach der Formel 1 berechnen.

Formel 1: Berechnung (aerobe) Bemessungsschlammalter für Anlagen mit Nitrifikation (DWA, 2016)

$t_{TS,aerob,Bem} = PF \cdot 3,4 \cdot 1,103^{(15-T)}$	
$t_{TS,aerob,Bem}$	aerobes Schlammalter, das der Bemessung für Nitrifikation zugrunde gelegt wird
PF	Prozessfaktor für Nitrifikation
T	Temperatur im Belebungsbecken

Auf den meisten Kläranlagen werden der TS-Gehalt oder das Schlammalter über Soll-Werte geregelt und über das gesamte Jahr konstant gehalten. So kann es vorkommen, dass sich über das Jahr ein zu hohes Schlammalter einstellt (im Sommer) und dies einen zu hohen Sauerstoffbedarf bzw. bei anaerober Schlammstabilisierung eine Reduzierung der Faulgasproduktion, zur Folge hat. Eine zu starke Reduzierung des TS-Gehalts und somit gleichzeitig eine Erhöhung der Schlammbelastung, führt zu einer schlechteren Reinigungsleistung und einer erhöhten Überschussschlammproduktion. Eine Anpassung des TS-Gehalts an Temperatur und Belastung ist somit für einen effizienten Betrieb einer Kläranlage sinnvoll. In Abbildung 4 ist das erforderliche Schlammalter in Tagen in Abhängigkeit von der Temperatur in der Belebung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Temperatur ein niedrigeres Schlammalter erforderlich ist. Dies lässt sich durch eine höhere Aktivität der Bakterien des Belebtschlammes erklären.

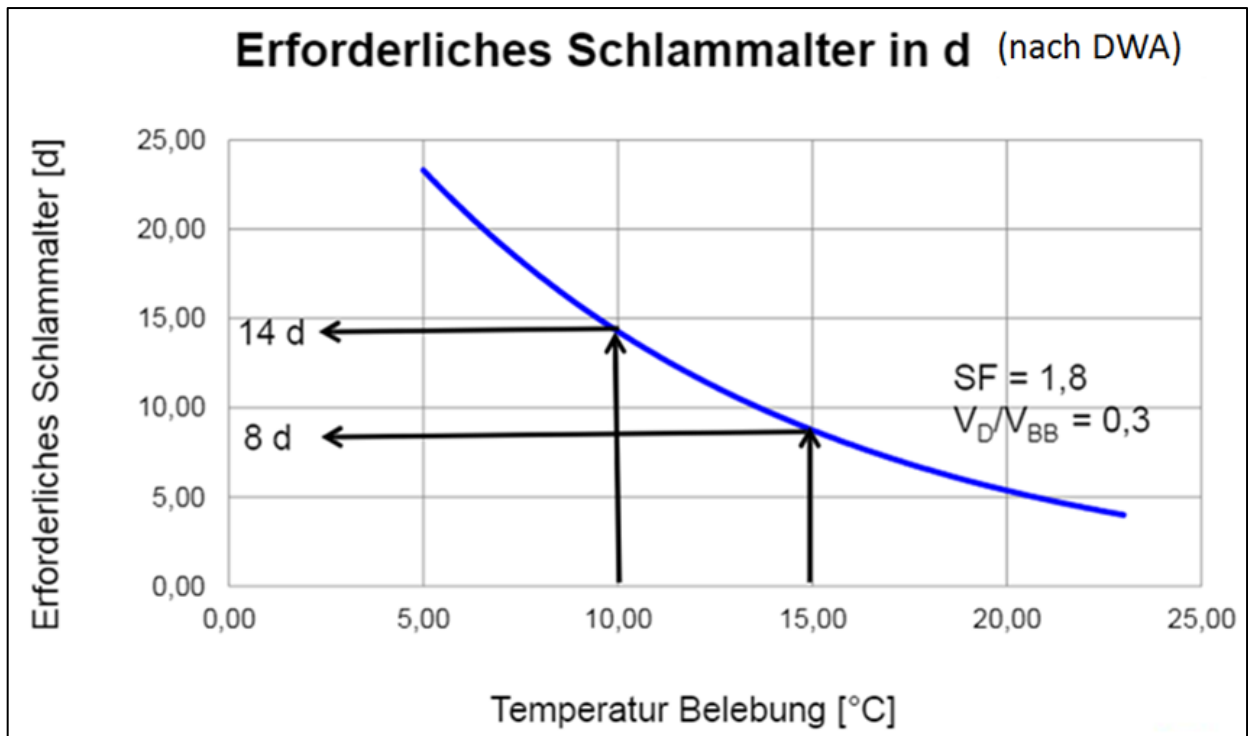


Abbildung 4: Erforderliches Schlammalter in Tagen in Abhängigkeit von der Temperatur nach (Michel, 2011)

Für eine dynamische Schlammalterregelung sind Messungen des TS-Gehaltes in der Belebung und im Rücklaufschlamm, eine Temperaturmessung und eine Ammonium-Nitrat-Messung in der Belebung notwendig. Ebenso ist eine Zulaufmengenmessung bzw. Ablaufmengen- und Überschussschlamm (ÜSS)-Mengenmessung bzw. Ist-Signal-Messung der ÜSS-Pumpen nötig. Die Berechnung des Schlammalters erfolgt jeden Tag und wird über die Temperatur sowie dem Verhältnis von unbelüftetem Volumen zu gesamtem Volumen der Belebung ausgerechnet. Daraus wird die abzuziehende Überschussschlammmenge ermittelt und aus dem System entnommen. Eine Anpassung der Anlage an Temperatur und Belastung des Abwassers kann zu Einsparungen bei der Belüftungsenergie und auch beim Schlammfall führen. Es ist außerdem die Löslichkeit des Sauerstoffes im Wasser zu beachten. Diese sinkt mit steigender Temperatur. Im Sommer muss somit für die gleiche Sauerstoffmenge eine intensivere Belüftung erfolgen. Die benötigte Sauerstoffmenge hängt auch von der Art der Stabilisierung des Klärschlammes ab. Durch eine Anpassung des Schlammalters kann sich bei anaerober Schlammstabilisierung der Gasertrag im Faulraum erhöhen. Die Verweildauer des Schlammes in der Belebung lässt Rückschlüsse auf den möglichen Stabilisierungsgrad des Schlammes zu. So wird bei einem Schlammalter von 25 Tagen von einem stabilisierten Schlamm ausgegangen, welcher keine biologische Aktivität hat. Eine Stabilisierung des teilstabilen Schlammes kann außerhalb des Belebungsbeckens in einem Faulraum stattfinden.

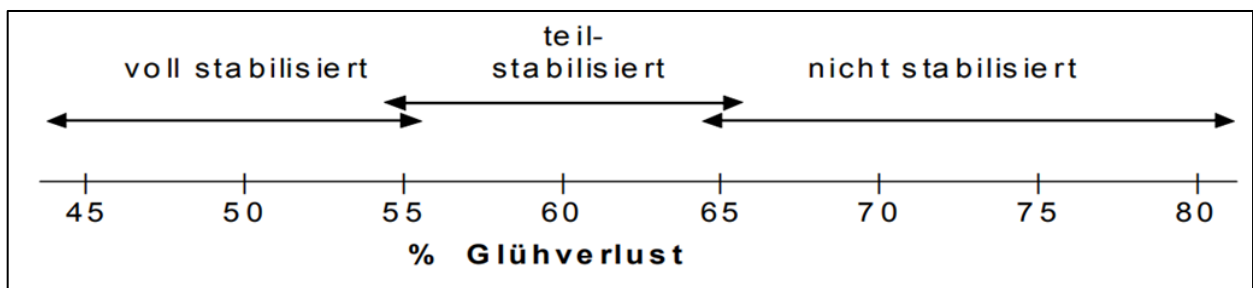


Abbildung 5: Stabilisierungsgrad des Klärschlammes im Hinblick auf den Glühverlust (Bayern, 2011)

3.1.3 Reduzierung des Tertiärschlammanfalls

Eine Möglichkeit der Klärschlammreduzierung ist die Reduzierung des Tertiärschlamms. Durch eine Verschärfung der Grenzwerte für Phosphor in den letzten Jahren ist die Phosphorelimination (P-Elimination) immer wichtiger geworden. Grundsätzlich besteht das Ziel der P-Elimination darin den gelösten Phosphor in eine ungelöste Form zu bringen. Eine Abscheidung erfolgt mit dem Klärschlamm. Bei einer chemischen P-Elimination erfolgt dies durch die Zugabe eines Fällmittels und die dadurch verbundene Bildung von anorganischem Fällschlamm. Die sich weiter verschärfenden Grenzwerte von Phosphor im Kläranlagenablauf, führen zu einem Anstieg des Tertiärschlamms. Die folgenden Maßnahmen dienen einem Entgegenwirken dieses Anstieges. Bei der biologischen P-Elimination wird der Phosphor durch Mikroorganismen aufgenommen und mit dem Überschussschlamm aus dem System genommen. Diese Art der P Elimination wird auch als Bio-P-Verfahren bezeichnet und ist durch eine gezielte Betriebsführung der Kläranlage möglich. Eine Kombination beider Eliminationsarten auf einer Kläranlage ist grundsätzlich denkbar. Ohne gezielte Maßnahmen können etwa 40-55 % des Phosphors im belebten Schlamm eingelagert und aus dem Abwasser entfernt werden (Beier, Schneider, & Lorek, 2016). Eine Reduzierung des Phosphors wird über eine Einbindung beim Zellaufbau erreicht. Hierfür sind abwechselnd aerobe und anaerobe Bedingungen im Becken zu schaffen. In der aeroben Phase wird Phosphat von speziellen Mikroorganismen in der Belebungsstufe aufgenommen. In der anaeroben Phase löst sich ein Teil des aufgenommenen Phosphats zurück, diese Phase ist für den Abbau leicht abbaubaren Substrats notwendig. Die biologische Phosphorentfernung funktioniert bei einem niedrigeren Schlammalter gut, da bei einem niedrigen Schlammalter mehr Überschussschlamm entsteht, welcher Phosphor speichern kann (DWA, 2016). Durch Bio-P kann es zur Bildung unkontrollierter Magnesiumammoniumphosphat (MAP)-Kristallisationen und Ablagerungen kommen. Dies hat den Hintergrund, da es insbesondere bei der biologischen Phosphorelimination zu einer erhöhten Phosphatkonzentration im MAP-Bereich kommt. So löst sich das aufgenommene Phosphat bei langer Aufenthaltszeit zurück und bildet Ablagerungen wie z. B. in Abbildung 6 dargestellt. Neben der Phosphatkonzentration und der Aufenthaltszeit sind auch der pH-Wert, die Magnesium- und Ammonium-Stickstoffkonzentration maßgeblich für die Bildung von MAP (Pfitzner, 2008). In Tabelle 4 sind die Vor- und Nachteile der biologischen Phosphorelimination zusammengefasst.



Abbildung 6: MAP-Ablagerungen in einem Rohr (AR, 2020)

Tabelle 4: Vor- und Nachteile von der biologischen Phosphorelimination (kurz: Bio-P)

Vorteile	Nachteile
kein Fällmittelbedarf	biologischer Prozess, welcher nicht direkt regelbar ist
weniger Klärschlamm zur Entsorgung	schlechtere Entwässerbarkeit des Schlammes möglich
umweltfreundliche Variante der Phosphorelimination, da keine Fällmittelzugabe erfolgt	chemische Phosphorelimination ist weniger von äußeren Einflüssen abhängig und kann stabiler betrieben werden
	zusätzliches Beckenvolumen wird benötigt
	hohe Phosphat-Rückbelastung durch Schlammwasser
	Magnesiumammoniumphosphat (MAP)-Bildung wird begünstigt

Eine weitere Möglichkeit Tertiärschlamm zu reduzieren ist die Optimierung der Fällmitteldosierung durch den Einbau eines Phosphor-Prozessanalytoren und einer gezielten Dosierung von Fällmittel. Die Fällmittelzugabe wird in Vor-, Simultan-, Nach- und Mehrpunkt-fällung unterschieden. Bei der Vorfällung wird das Fällmittel im Zulauf zum Sandfang oder Vorklärbecken hinzugegeben (vgl. Abbildung 7).

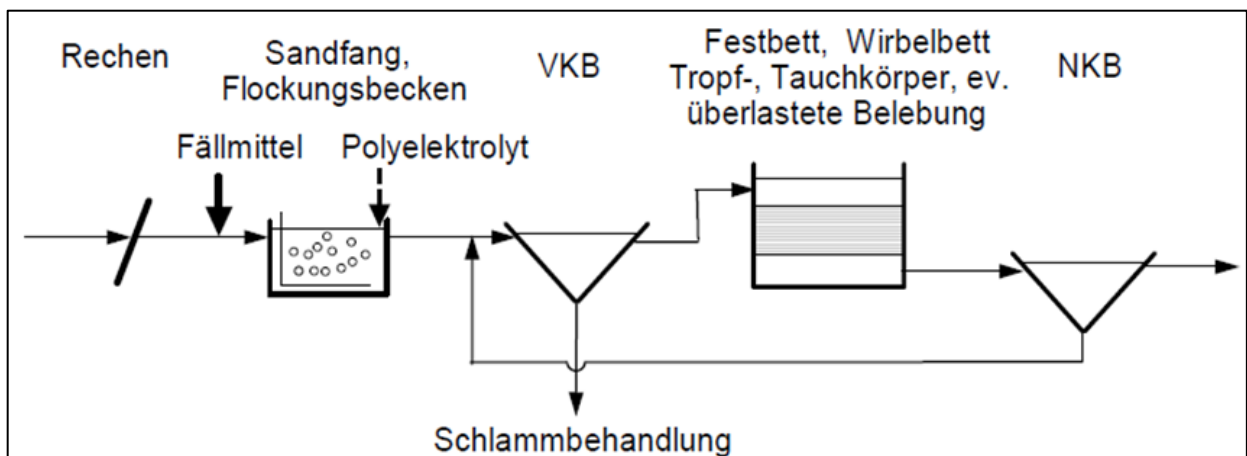


Abbildung 7: Schema der Vorfällung (Böhler & Siegrist, 2008)

Bei der Simultanfällung erfolgt die Zugabe des Fällmittels im Zulauf zur Biologie oder zum Rücklaufschlamm. Die Nachfällung ist der mechanisch-biologischen Reinigung nachgeschaltet (vgl. Abbildung 8) und erfolgt in einer zusätzlichen Reaktoreinheit wie Flockungs- und Sedimentationsbecken. Der Fällmittelbedarf ist nach (Böhler & Siegrist, 2008) für eine ausreichende Flockung höher als bei einer Simultanfällung.

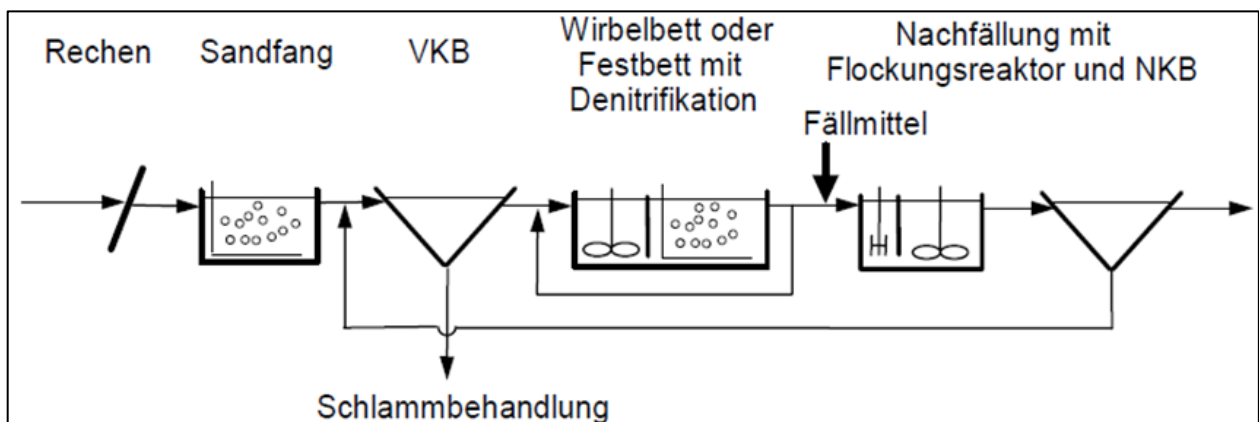


Abbildung 8: Schema der Nachfällung (Böhler & Siegrist, 2008)

Eine Kombination der verschiedenen Verfahren der Einpunktfällung ermöglicht es die Vorteile der jeweiligen Verfahren besser nutzen zu können. So kann beispielsweise an mehreren Punkten in der Kläranlage die Zugabe von Fällmittel erfolgen. Dadurch wird ein sicheres Einhalten der Grenzwerte gewährleistet und auch einer Überdosierung wird entgegengewirkt. Der Anfall von Tertiärschlamm wird minimiert und Fällmittel eingespart.

3.2 Verfahren der Eindickung

Eine Eindickung des Klärschlammes ist für ein wirtschaftliches Betreiben der Anlage vorteilhaft. Durch die Aufkonzentrierung des Schlammes wird das gesamte Volumen deutlich reduziert und die nachfolgenden Verfahrensschritte oder auch der Transport zur weiteren Klärschlammverwertung kann geringer dimensioniert werden. Die Klärschlämme lassen sich von Kläranlage zu Kläranlage unterschiedlich gut eindicken, ebenso ist auch der Ort der Entstehung für ein unterschiedliches Eindickverhalten maßgeblich. In Tabelle 5 sind die verschiedenen Austrags-Feststoffgehalte der unterschiedlichen Eindickverfahren dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass sich der Überschussschlamm am Schlechtesten in einem Standeindicker eindicken lässt, jedoch sind hier der Energieverbrauch und der Flockungsmittelverbrauch geringer. Der erreichte TR-Gehalt ist stark von dem Schlamm abhängig, weshalb keine genauen Angaben für die einzelnen Kläranlagen gemacht werden können.

Tabelle 5: Austrags-Feststoffgehalt (% TR), spezifischer Flockungshilfsmittelverbrauch und spezifischer Energieverbrauch von verschiedenen Eindicksystemen (DWA, 2007)

		Statische Eindickung			Flotation	Maschinelle Eindickung		
		Durchlauf-eindicker		Stand-eindicker	Druckent-spannungs-Flotation	Bandeindicker/ Trommeleindicker/ Schneckeneindicker/ Scheibeneindicker/ Eindickungs-Pumpe	Zentrifuge	
		ohne FHM	mit FHM-				ohne FHM	mit FHM-
Primärschlamm	[% TR]	5 – 10	-	5 – 10	-	-	-	-
Mischschlamm	[% TR]	4 – 6	5 – 8	4 – 8	-	-	-	-
ÜS-Schlamm	[% TR]	2 – 3	3 – 4	2 – 3	3 – 5	5 – 7	5 – 7	6 – 8
Spez. Flockungs-hilfsmittelverbrauch	[kg WS/MgTS]	0	0,5 – 3	0	0	3 – 7	0	1-1,5
Spez. Energie-verbrauch	[kWh/m ³]	< 0,1	< 0,1	-	0,6 – 1,2	< 0,2	1 – 1,4	0,6 – 1
Spez. Energie-verbrauch	[kWh/MgTS]	< 20	< 20	-	100 – 140	< 30	180 – 220	100 – 140

3.2.1 Statische Eindickung

Die statische Eindickung beruht auf der Absetzung des Klärschlammes durch die Schwerkraft. Der Klärschlamm wird in einen statischen Eindicker zwischengespeichert. Dieser ist mit einer höhenverstellbaren Pumpe ausgestattet, um das sich bildende Trübwasser abziehen zu können. Durch ein regelmäßiges Abziehen des Trübwassers können TS-Gehalte von 2-3 % erreicht werden, in Abhängigkeit des Schlammes. Das Absetzverhalten ist hierbei maßgeblich für ein gutes Eindickergebnis. Der statische Eindicker kann auch als Vorlage für weitere Schlammbehandlungen dienen oder als Speicher für eine Nassschlammabgabe. In Abbildung 9 ist die Innenseite eines statischen Eindickers im Betrieb zu sehen.



Abbildung 9: Blick in einen statischen Eindicker im Betrieb

3.2.2 Maschinelle Eindickung

Nicht auf jeder Kläranlage lässt sich der Klärschlamm mittels statischer Eindickung ausreichend eindicken. In manchen Fällen ist der Bau einer maschinellen Eindickung wirtschaftlicher darstellbar. Auf größeren Kläranlagen ist eine maschinelle Eindickung vor der Zugabe des Klärschlammes in den Faulturn zu finden. Es gibt verschiedene Verfahren für eine maschinelle Eindickung. Einige dieser Verfahren sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

3.2.2.1 Scheibeneindicker

Der Scheibeneindicker ist ein kontinuierlich arbeitender Eindicker (Abbildung 10). Der einzudickende Schlamm wird gleichmäßig auf die Scheibe verteilt. Diese ist gelocht mit einem Filtergewebe, durch dieses das abgetrennte Schlammwasser durchsickern und sich unterhalb der Filterscheibe ansammeln kann. Durch die Neigung der Scheibe kann ein hocheingedickter Schlamm erhalten werden.

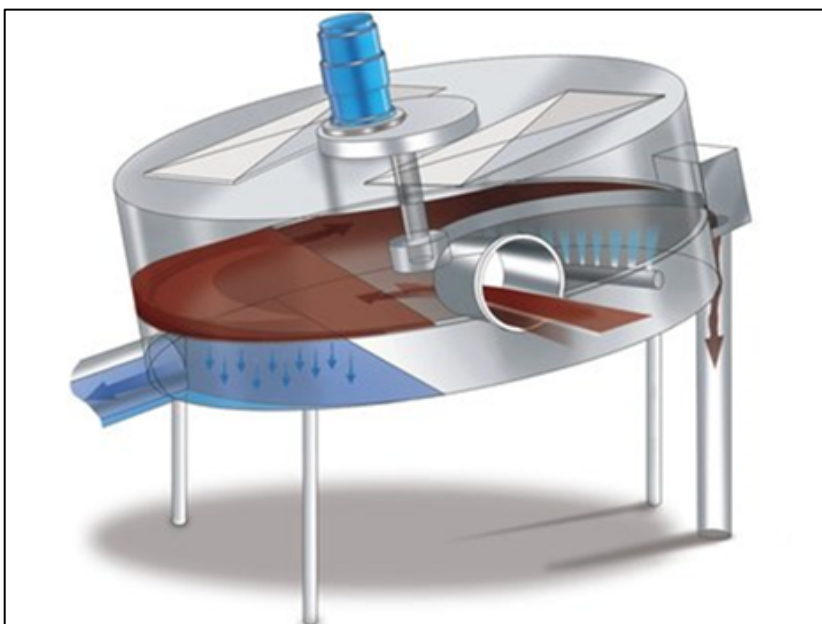


Abbildung 10: Prinzipskizze eines Scheibeneindickers (Huber, 2018)

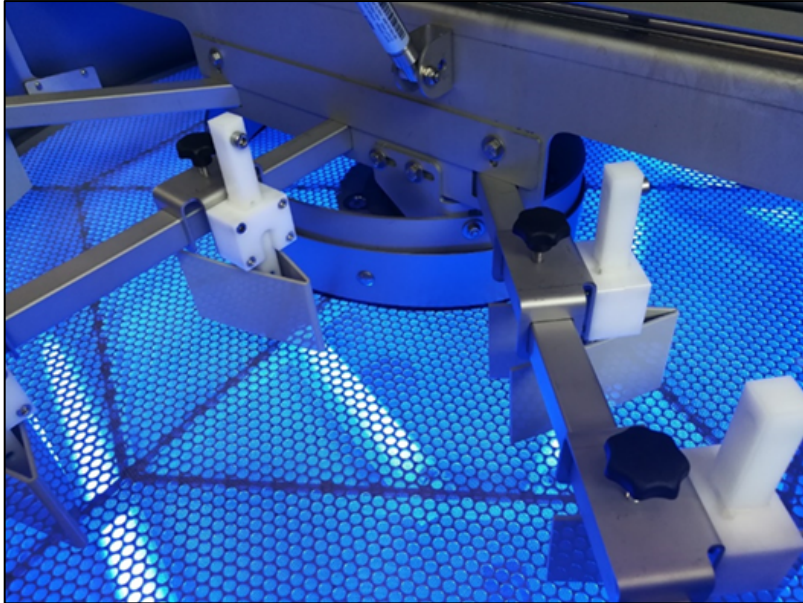


Abbildung 11: Innenansicht eines Scheibeneindickers

Wie aus Tabelle 5 zu entnehmen ist, kann der spezifische Energieverbrauch im Vergleich zu einer Zentrifuge sehr gering sein, dafür ist der spezifische Flockungsmittelverbrauch höher. Die anderen maschinellen Eindicker wie Band-, Trommel-, Schneckeneindicker und Eindickungspumpe sind vergleichbar mit dem Scheibeneindicker.

3.2.2 Bandeindicker

Der Überschussschlamm wird mit einem Flockungsmittel im Flockungsreaktor vermischt und konditioniert. Anschließend wird der Schlamm gleichmäßig auf ein kontinuierlich umlaufendes Siebband (Abbildung 12) verteilt. Durch dieses Sieb kann das Filtratwasser abfließen und in die Filtratwanne geleitet werden. Mittels schwimmender Schikanen wird der Schlamm mehrfach umgeschichtet und die Eindickung somit verbessert. Der Dickschlamm fällt auf der hinteren Umlaufrolle in einen Trichter, von wo er dann zur Lagerung/Abtransport geleitet wird.



Abbildung 12: Bandeindicker (Sülzle Klein)

3.2.2.3 Zentrifuge

In Zentrifugen wird ein künstliches Schwerfeld angelegt. Dadurch kommt es zu einer Trennung der flüssigen und der festen Phase. Durch die Überwindung der Wasserbindungskräfte durch die Fliehkräfte kann auch ohne FHM der gewünschte Eindickegrad erreicht werden. In Abbildung 13 ist das Prinzip einer Zentrifuge dargestellt. Es kann die Eindickung und die Entwässerung auch in derselben Zentrifuge durchgeführt werden, dabei kann jedoch die Eindickung nicht im optimalen Leistungsbereich betrieben werden und es kommt zu betrieblichem Mehraufwand durch zusätzliche Spül- und Einfahrzeiten.

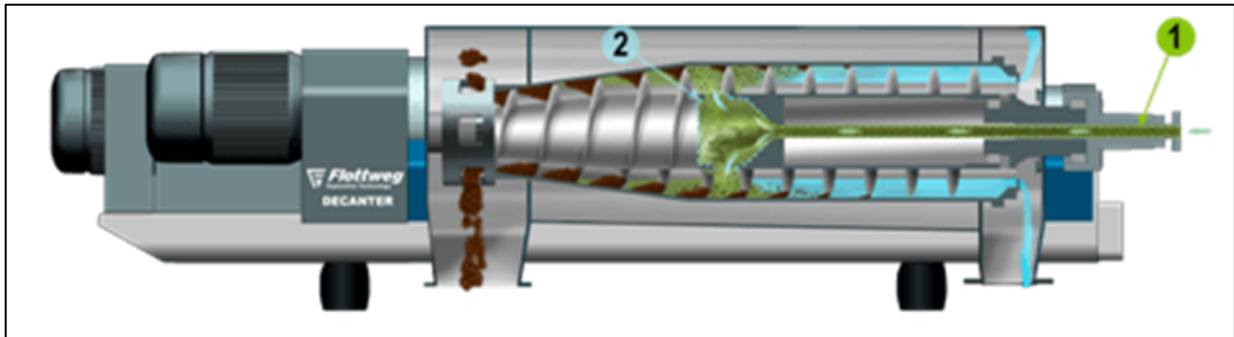


Abbildung 13: Prinzipskizze einer Zentrifuge (Flottweg, 2018)

3.3 Verfahren der Entwässerung

Ähnlich wie bei der Entwässerung gibt es verschiedene Verfahren mit unterschiedlichen Entwässerungsergebnissen auf dem Markt. Das im Klärschlamm enthaltene Wasser kann in freies und gebundenes Wasser eingeteilt werden. Freies Wasser ist nicht durch Schlammpartikel gebunden (DWA, 2013). Gebundenes Wasser wird je nach Art der Bindung weiter unterteilt. So gibt es Zwischenraumwasser, welches durch Kapillarkräfte zwischen den Klärschlammteilchen oder Flocken gebunden ist. Das Oberflächenwasser ist durch Adhäsionskräfte gebunden. Weiter kann Wasser als Hydrogel, in den Zellen als Zellflüssigkeit oder als chemisch gebundenes Wasser im Klärschlamm gebunden (vgl. Abbildung 14) sein. Mengenmäßig überwiegt das freie Wasser (DWA, 2013). Dieses abzutrennen benötigt physikalische Verfahren, wie Eindickung und maschinelle Entwässerung. Für das gebundene Wasser sind thermische Verfahren notwendig. Die Grenzen der einzelnen Verfahren sind in Abbildung 3 dargestellt.

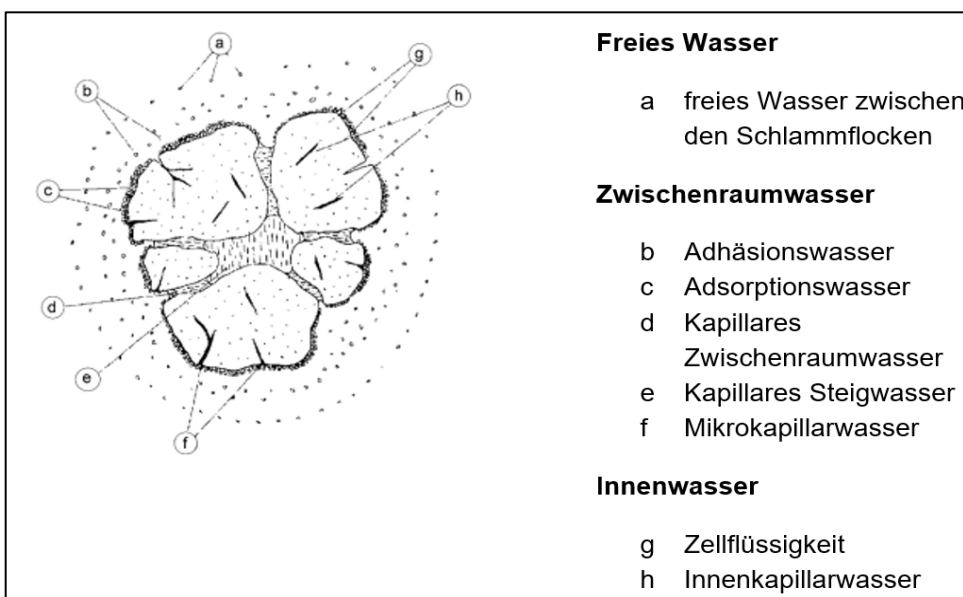


Abbildung 14: Wasseranbindung an eine Schlammflocke (DWA, Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm-trocknung (Entwurf), 2019)

Je nach Entwässerungsmaschine resultieren unterschiedliche Austrags-Feststoffkonzentrationen. Diese sind aber auch von Schlamm zu Schlamm unterschiedlich, da sich jeder Schlamm nach seiner Zusammensetzung anders entwässern lässt. In Tabelle 6 sind die unterschiedlichen TR-Konzentrationen, welche mit verschiedenen Entwässerungsmaschinen und Schlammarten möglich sind, dargestellt. Durch die Zugabe von Konditionierungsmitteln wird die Entwässerung verbessert. Es wird in organische und anorganische Konditionierungsmittel unterschieden. Die anorganischen Flockungsmittel wie z. B. Eisen- und Aluminiumsalze, finden oft bereits bei der Phosphorelimination Anwendung. Kalk als weiteres anorganisches Konditionierungsmittel ermöglicht die Verbesserung der Entwässerungseigenschaften wird aber auch zur temporären Schlammstabilisierung eingesetzt. Wird der Klärschlamm nach der Entwässerung in die Verbrennung gegeben, erhöht sich der nicht verbrennbare Anteil durch die Zugabe von anorganischen Konditionierungsmitteln (Roskosch & Heidecke, 2018). Wird bei der Entwässerung auf organische Polymere zurückgegriffen, fällt bei der Verbrennung ein geringerer Ascheanteil gegenüber der Verwendung anorganischer Konditionierungsmittel an.

Tabelle 6: Erreichbare Austrags-TR Konzentrationen bei unterschiedlichen Entwässerungsmaschinen Auszug aus (DWA, 2013)

Schlammart	Einheit	Zentrifugen	Bandfilter- presse	Filterpressen: Kammer- und Schlauchfilter- pressen		Schnecken- pressen
				pFM	Kalk- /Eisen- Konditionierung	
Austrags-Feststoffkonzentration TR [%]						
Primärschlamm	%	32-40	30-35	32-40	35-45	30-40
Mischschlamm aus PS + ÜSS	%	36-32	24-30	26-32	33-45	24-30
Aerob stabilisierter Überschuss-schlamm	%	18-24	15-22	18-24	28-35	18-24
Faulschlamm	%	22-30	20-28	22-30	30-40	20-28

Eine Möglichkeit zur Schlammreduzierung ist die Umstellung des Konditionierungsmittels. Hier kann von Kalk auf polymeres Flockungsmittel (pFM) gewechselt und eine erhebliche Menge an zu entsorgenden Volumen eingespart werden. Dies hat den Hintergrund, dass viel mehr Kalk für die Entwässerung benötigt wird und dieser sich nicht auflöst oder umwandelt. Der Kalk ist somit gemeinsam mit dem entwässerten Klärschlamm zu entsorgen. Eine Optimierung der Schlammmentwässerung ermöglicht einen höheren Austrags-TS und somit eine geringere Menge an zu entsorgendem Klärschlamm. Eine Verbesserung der Schlammmentwässerung auf den Kläranlagen kann zu einer Reduzierung und Aufkonzentrierung der Klärschlammmenge führen. Für eine bessere Entwässerung kann Flockungsmittel hinzugegeben werden, welches zu Flockenbildung des Schlammes sowie zu einer besseren Abtrennbarkeit des Wassers von den Schlammflocken führt. Da jeder Schlamm verschieden in seiner Zusammensetzung ist, ist auch nicht jedes Flockungsmittel gleich gut. Es empfiehlt sich spezielle Versuche mit verschiedenen Flockungsmitteln durchzuführen, um das passende zu ermitteln. Die Versuche können, je nach Einzugsgebiet der Kläranlage, auch mehrfach im Jahr durchgeführt werden. Dies bietet sich bei saisonalen Gewerken wie z. B. Tourismus mit ausgeprägten Saisons oder Gewerbe mit jahreszeitlich unterschiedlicher Produktion an. Bei den Versuchen mit unterschiedlichen Flockungsmitteln ist der CST-Wert ein erster Anhaltspunkt für eine bessere Entwässerungsleistung, wenn mittels Zentrifuge entwässert wird. Ein geringer Wert ist hierbei besser. Neben der Überprüfung des Flockungsmittels ist das Brauchwasser zum Anmischen von Bedeutung. Wird statt Trinkwasser auf Brauch- oder Nachklärwasser zurückgegriffen, so ist dies auf dessen Zusammensetzung zu überprüfen und mit den Anforderungen für das Flockungsmittel

zu vergleichen. Ebenso ist neben der Zusammensetzung des Wassers auch die Temperatur entscheidend. Ein zu kaltes Ansetzwasser verlängert die Reifezeit und die Schlammflocken können sich nicht so ausbilden wie es für eine bessere Entwässerung nötig wäre. Die Temperatur sollte etwa 15-20 °C betragen, oder die Reifezeit ist zu verlängern um ein stabiles Produkt zu erhalten. Eine weitere Möglichkeit ist eine automatische Dosieranlage, um die Reifezeit zu optimieren. Die Zusammensetzung des Schlammes ist genauso entscheidend für eine gute Entwässerbarkeit wie die biologische Behandlung. Ausgefauter Schlamm lässt sich durch die instabilen Zellwände besser entwässern, da weniger Wasser in den Zellen verbleiben kann.

3.4 Verfahren der Trocknung

Eine Entwässerung des Klärschlammes ist oft nicht ausreichend für eine weitere Verwertung. Aus diesem Grund wird der Klärschlamm in einigen Fällen getrocknet. Weitere Gründe, die für eine Trocknung sprechen sind die:

- verminderte Klärschlammmenge
- bessere Lager- und Transportfähigkeit
- Hemmung mikrobiologischer Prozesse
- hygienische Unbedenklichkeit
- Erhöhung des Heizwertes (Roskosch & Heidecke, 2018).

In Tabelle 7 sind die Vor- und Nachteile einer Klärschlamm-trocknung dargestellt.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Klärschlamm-trocknung

Vorteile	Nachteile
verminderte Klärschlammmenge	zusätzlicher Prozess der Klärschlammbehandlung
bessere Lager- und Transportmöglichkeit	Energie- und/oder zeitaufwändiger Prozess
Hemmung biologischer Prozesse	unterschiedliche Trocknungsgrade bei den verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten sind zu beachten
hygienische Unbedenklichkeit	Selbstentzündung möglich
Erhöhung des Heizwerts	

Bei der Klärschlamm-trocknung wird zwischen Voll- und Teiltrocknung unterschieden. Unter Voll-trocknung ist eine Trocknung ab einem Trockenrückstand von 85 % zu verstehen. Eine Teiltrocknung ist erfolgt bei einem Trockenrückstand von 40-85 %. Ab einem Trockenrückstand von etwa 75 % ist das Endprodukt staub- bis granulaförmig. (DWA, Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm-trocknung (Entwurf), 2019). Aus Abbildung 3 geht hervor, dass jene Feststoffgehalte > 38 % nur durch eine Trocknung umsetzbar sind. Für eine selbstgängige Verbrennung in einer Monoverbrennungsanlage sind Trockenrückstände von 35 % bei unausgefautem Schlamm notwendig. Für Faulschlamm sind auf Grund des geringeren organischen Anteils Trockenrückstände von 45-55 % (vgl. Abbildung 15) mindestens erforderlich (Roskosch & Heidecke, 2018). Es ist vor einer Verbrennung des Klärschlammes also notwendig den Klärschlamm zu trocknen. Weiter ist in der Abbildung 3 zu erkennen, dass bereits eine Reduzierung des Schlammvolumens über 80 % durch eine mechanische Entwässerung möglich ist. Der Klärschlamm ist vor einer Trocknung möglichst weitgehend mechanisch zu entwässern, da eine Trocknung energieintensiver ist (DWA, Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm-trocknung (Entwurf), 2019).

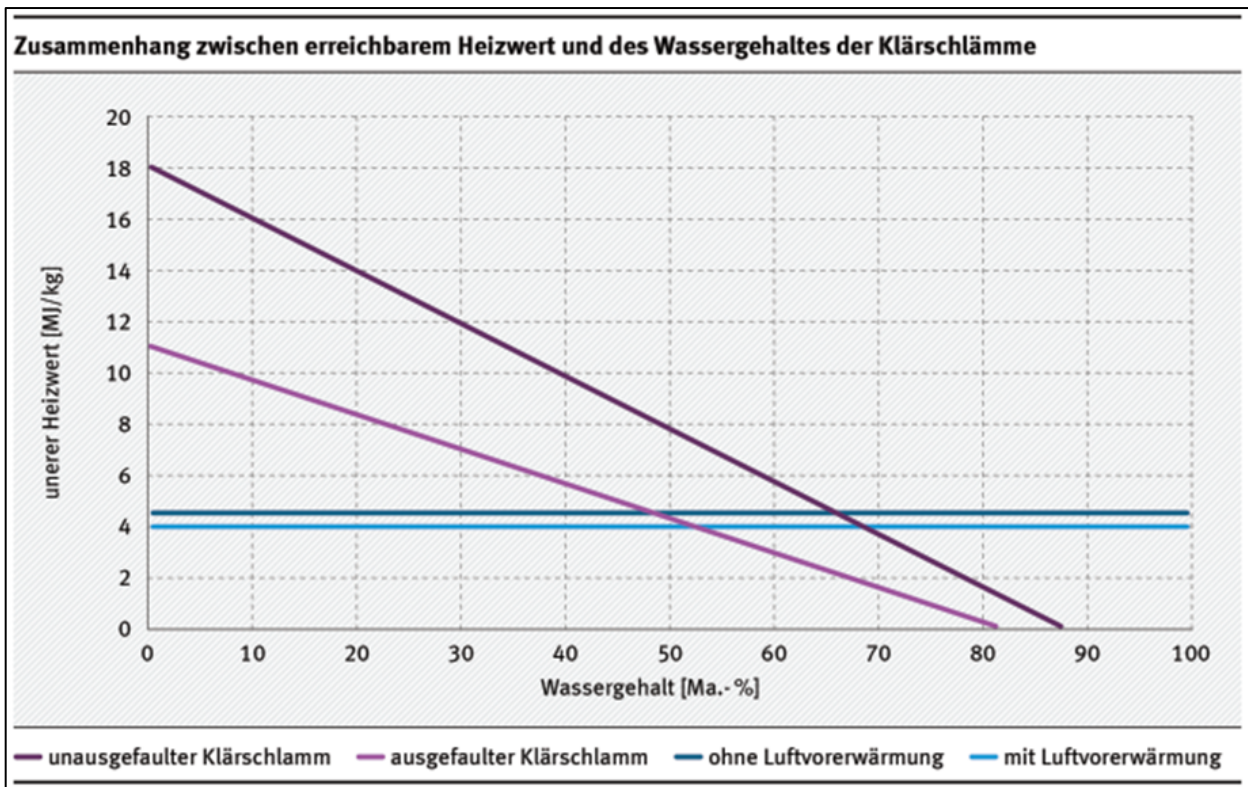


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen erreichbarem Heizwert und Wassergehalt des Klärschlammes (Roskosch & Heidecke, 2018)

Im Bereich von 45 - 65 % TS hat der Klärschlamm äußerst klebrige Eigenschaften (Geyer, 2013), welche zu erheblichen Problemen beim Trocknen in der Maschine und beim Transport führen können. Um diese Phase, die Leimphase, zu umgehen, wird der bereits getrocknete Schlamm mit entwässertem Schlamm gemischt.

3.4.1 Verfahren der Klärschlamm-trocknung

Die Trocknung des Klärschlammes kann mit verschiedenen Verfahren erfolgen. Diese unterscheiden sich in der Art der Wärmeübertragung. Im folgenden Abschnitt werden einige Verfahren näher erläutert. Abbildung 16 zeigt die Anzahl der in Deutschland eingesetzten Trocknungsverfahren. Aktuell sind 203 Trocknungsanlagen an 175 Standorten für kommunale Klärschlämme installiert (Stand 2018) (Roskosch & Heidecke, 2018). Den größten mengenmäßigen Anteil der Trockner machen die Solartrockner aus. Durch einen geringeren Durchsatz als die anderen Trockner kommen sie aber auf etwa 9 % der insgesamt getrockneten Menge.

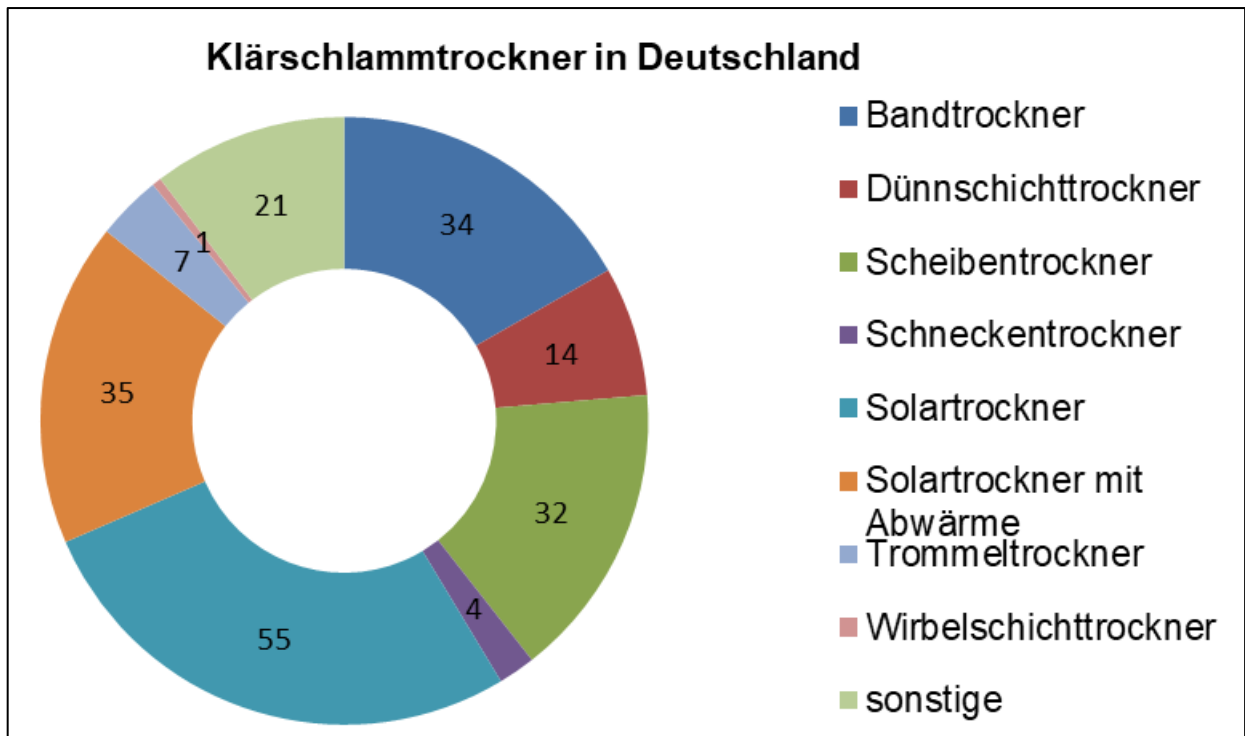


Abbildung 16: Anzahl der Klärschlamm-trockner in Deutschland aufgeteilt nach Trockenarten nach (Roskosch & Heidecke, 2018)

In Abbildung 17 sind verschiedene Trocknungsarten und deren Leistungsbereiche dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei einigen Trocknern eine große Bandbreite gegeben ist, wie z. B. beim Bandrockner. Bei anderen ist nur ein geringer Durchsatz möglich (z. B. Solartrockner). Dies lässt sich auf die unterschiedlichen Verfahren zurückführen. Bei einem Bandrockner ist aufgrund der Maschinenteknik und externen Energiequellen ein höherer Durchsatz möglich als bei einem Verfahren, bei dem mit Hilfe der Sonne auf einer großen Fläche der Klärschlamm getrocknet wird.

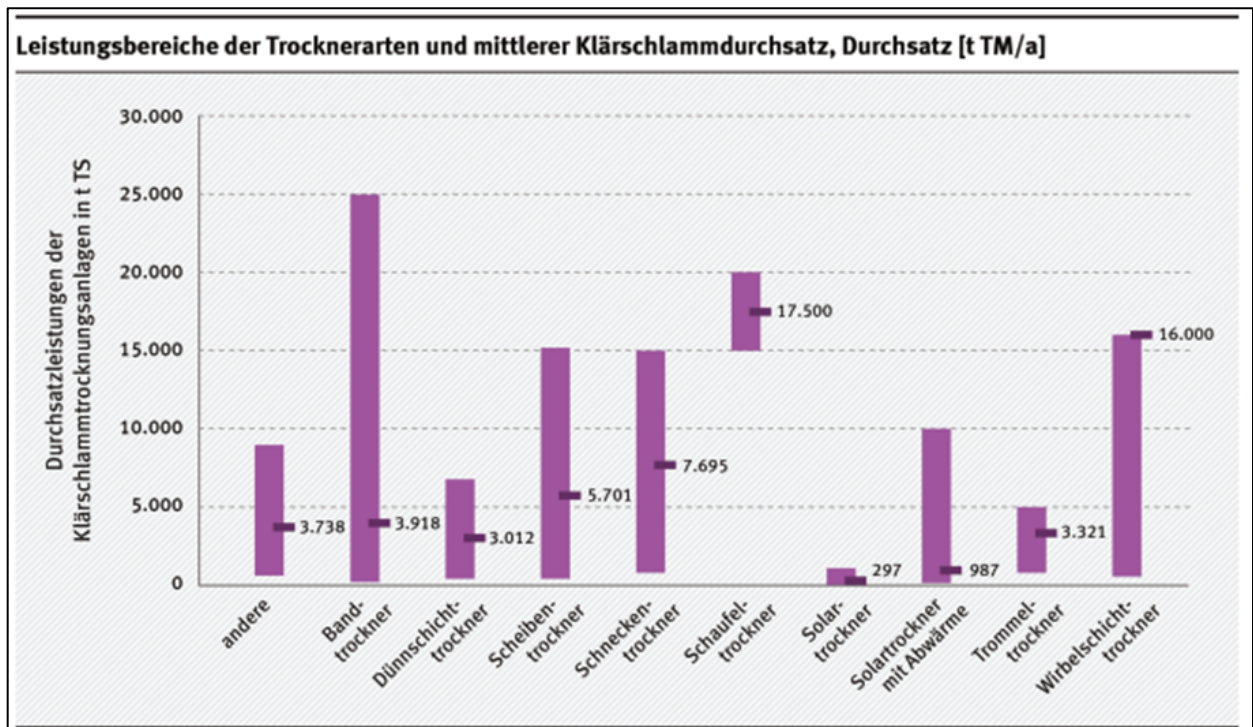


Abbildung 17: Leistungsbereiche der Trocknerarten und mittlerer Klärschlamm-durchsatz (Roskosch & Heidecke, 2018)

Die einzelnen Trocknungsverfahren werden nach der eingesetzten Temperatur und der Art der Wärmeübertragung unterschieden. Dieser technische Zusammenhang wird in nachstehender Tabelle 8 belegt. Bei der Trocknung ist die Möglichkeit der Selbstentzündung des Klärschlammes zu beachten. Ab einem Gehalt von 52-75 % an organischen Verbindungen im Trockenrückstand, ist Klärschlamm ein Brennstoff, der unter gewissen Voraussetzungen zur Selbstentzündung neigt (Heindl & Kurzweil, 2018). Gründe für die Selbstentzündung können mikrobiologische und chemische Reaktionen sein, bei denen Wärme entsteht, welche größer als die abgegebene Wärme des Haufwerks ist. Durch die geringe Restfeuchtigkeit von teil- und vollgetrocknetem Klärschlamm sind die mikrobiologischen Stoffwechsellvorgänge begünstigt, weshalb die Gefahr der Selbstentzündung steigt. Ein wichtiger Punkt der Selbstentzündung entgegen zu wirken ist hierbei die Lagerung des Klärschlammes in Silos unter 100 m³.

Tabelle 8: Temperaturbereich Trocknungsverfahren (DWA, Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm-trocknung (Entwurf), 2019)

Trocknungsart	Temperatur
Hochtemperaturtrocknung (HT-Trocknung)	Guttemperatur > 100 °C Temperatur Wärmeträger > 160 °C
Mitteltemperaturtrocknung (MT-Trocknung)	Guttemperatur 50-100 °C Temperatur Wärmeträger 90-160 °C
Niedertemperaturtrocknung (NT-Trocknung)	Guttemperatur < 50 °C Temperatur Wärmeträger 40-90 °C

3.4.1.1 Konvektionstrocknung

Bei der Konvektionstrocknung um- bzw. überströmt das Trocknungsgas, z. B. Luft oder Rauchgas, den Klärschlamm. Durch die mit der Luft geführten Wärme, verdampft das Wasser im Klärschlamm und wird mit der Luft abtransportiert. Stellvertretend für die Konvektionstrockner wird in diesem Abschnitt der Bandtrockner (vgl. Abbildung 18) vorgestellt. Bandtrockner können als Niedertemperatur- und als Mitteltemperaturtrockner betrieben werden. Bei der Ausführung wird zwischen Ein- und Mehrbandtrockner unterschieden. Vor der Trocknung ist der Klärschlamm zu strukturieren und gleichmäßig auf dem Band zu verteilen. Dies kann eine gute Umströmung mit der Warmluft und somit eine bessere Trocknung sicherstellen. Die Erhitzung der Warmluft kann durch Wärmeträger wie Warmwasser, Heißwasser, Thermoöl, Dampf oder eine Rauchgaszumischung erfolgen. Die für die Trocknung kritische Leimphase führt bei einem Bandtrockner zu keinen Problemen, da der Klärschlamm während der Trocknung in keinem oder geringen Maße bewegt wird. Es ist somit möglich den entwässerten Schlamm direkt auf 90 % TS zu trocknen (DWA, 2019).

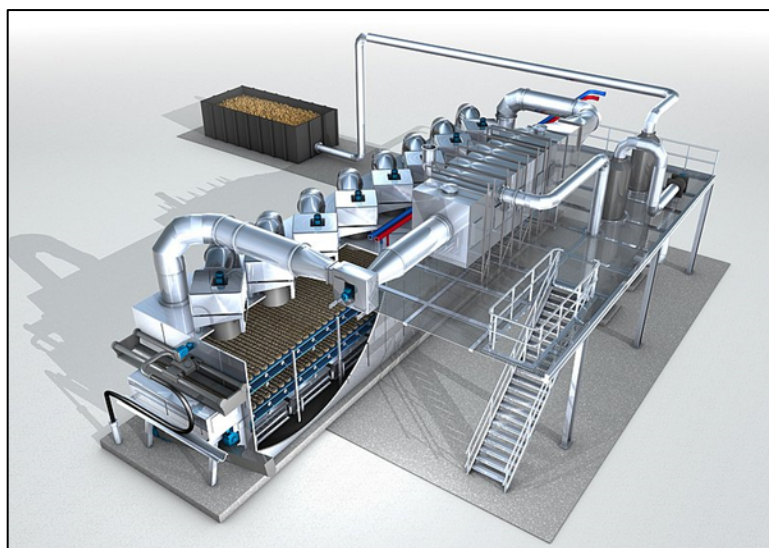


Abbildung 18: Prinzipskizze eines Bandtrockners (HUBER SE, 2016)

Die Feuchtigkeit des Schlammes wird von der Warmluft aufgenommen und abtransportiert. Es kommt somit kaum zu Rückbelastungen durch Brüdenkondensate. Die Abluft ist aber durch einen Luftwäscher oder Biofilter zu reinigen (Resch & Schatz, 2010). Die Verdampfungsleistung eines Bandrockners mit einer Prozesslufttemperatur von 80 °C liegt bei etwa 17 kg H₂O/(m²*h). Nach (Resch & Schatz, 2010) ist ein wirtschaftlicher Betrieb für Kläranlagen ab 20.000-30.000 EW möglich. Die Vor- und Nachteile eines Bandrockners sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Vor- und Nachteile eines Bandrockners

Vorteile	Nachteile
keine Rückmischung nötig, um die Leimphase zu umgehen	nicht für kleinere Anlagen ohne Fremdschlammannahme wirtschaftlich
geringe Rückbelastung mit Brüden	zusätzliche Wärmequelle notwendig

3.4.1.2 Kontakttrocknung

Der zu trocknende Klärschlamm liegt bei der Kontakttrocknung direkt auf der Heizfläche des Systems auf. Es kommt zu keinem direkten Kontakt zwischen dem Heizmedium und dem Klärschlamm. Durch die Erwärmung des Klärschlammes verdunstet das im Klärschlamm gebundene Wasser und wird mit der Leckluft und einer eventuell zusätzlichen Trägerluft abgeführt. Die Behandlung der Brüden muss separat erfolgen. Ein Beispiel für einen Kontakttrockner ist der Scheibentrockner. Hiermit kann Klärschlamm sowohl teil- als auch vollgetrocknet werden. Eine Volltrocknung ist durch eine Rückmischung möglich (DWA, Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm-trocknung (Entwurf), 2019). Durch die kompakte Bauweise braucht der Scheibentrockner nur wenig Platz (Jacobs, 2013). Ein Scheibentrockner ist in kontinuierlicher Betriebsweise zu betreiben, um Betriebsprobleme im Trockner zu vermeiden.

3.4.1.3 Strahlungstrocknung

In den letzten Jahren wurden mehrere solare Klärschlamm-trocknungsanlagen gebaut und in Betrieb genommen (Roskosch & Heidecke, 2018). Bei dem Verfahren wird der Klärschlamm in einem Gewächshaus ähnlichem Gebäude erwärmt und getrocknet. Es haben sich auf dem Markt mehrere Hersteller von Trocknungsanlagen etabliert. In Deutschland sind aktuell 55 Solartrockner mit einem Durchsatz von 16.333 t TS/a und 35 Solartrockner mit Abwärmenutzung mit einem Durchsatz von 34.554 t TS/a installiert (Stand 2018) (Roskosch & Heidecke, 2018). Bei der solaren Trocknung wird zwischen einer rein solaren Trocknung durch Solarstrahlung und fremdwärmeunterstützter Solartrocknung unterschieden. Die Gebäudekonstruktion besteht zumeist aus einer transparenten Eindeckung mit einem aus verzinktem Stahl bestehenden Gerüst auf einer befestigten Bodenplatte. Die Bodenplatte kann aus Beton (Ortbeton oder Fertigbeton), Verbundsteinen oder Asphalt bestehen. Die schlammberührenden Teile sollten aus korrosionsfestem Edelstahl sein (Bux, 2013). Bei der Eindeckung wird nach der Art der Trocknung auf unterschiedliche Eigenschaften Wert gelegt, so ist bei einer rein solaren Trocknung vor allem die Durchlässigkeit für Solarstrahlung wichtig. Bei einer fremdwärmeunterstützten Trocknung ist auch die Wärmedurchlässigkeit der Eindeckung von Bedeutung. Bei der Strahlungstrocknung können sich je nach Verfahren, Standort und Hersteller Schichtdicken von 5-40 cm einstellen (Bux, 2013). Mit einer höheren Schichtdicke steigt auch die Aufenthaltsdauer im Trockner. Für den Vergleich verschiedener Trocknungsanlagen ist die Trocknungsleistung in Tonnen Wasserentzug pro Fläche im Jahr aussagekräftiger als die Verweildauer.

Misch- und Wendetechnik

Damit die Verdunstung des Wassers und die damit verbundene Trocknung des Schlammes optimal ablaufen kann, ist dieser regelmäßig zu wenden und damit auch zu belüften (Roskosch & Heidecke, 2018). Die Häufigkeit des Schlammwendens ist dabei schlammfeuchte- und witterungsabhängig und kann bis zu 20mal täglich sinnvoll sein (Bux, 2013). Zu häufiges Wenden bringt Nachteile, wie einen erhöhten Energieaufwand, Strukturverschlechterung und schlechtere

Trockenleistungen mit sich. Je nach Hersteller der Trocknungsanlage gibt es verschiedene Möglichkeiten der eingesetzten Wendeaggregate. Diese sind Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Übersicht über die bei der solaren Trocknung eingesetzten Wendeinrichtungen (Bux, 2013)

Hersteller/Verfahren	Wendeinrichtung			Betrieb
	Bezeichnung	Bauart	Funktion	
Thermo-System	El. Schwein SchlammManager	Wenderoboter Wendebrücke	w, m, v w, m, v, f	b, sk k
IST	Wendewolf	Schubwender	w, m, f	k
Huber	n. b.	Schaufelwender	w, m, f	k
Roediger Bioenergie	EDZ-Verfahren	Kettengezogene Egge	w, m, f	k

Bemerkungen: w=wenden; m=mischen; v=verteilen; f=fördern und räumen; b=Batch-Betrieb; sk=semi-kontinuierlich; k=kontinuierlich

Je nach gewählten Verfahren wird der Klärschlamm bei der Trocknung kontinuierlich durch den Trockner gefördert oder auf der Stelle gewendet. Eine weit verbreitete Wendeinrichtung ist das elektrische Schwein, wie in Abbildung 19 dargestellt.



Abbildung 19: Elektrisches Schwein

Rein solarer Solartrockner

Eine Form des rein solar betriebenen Solartrockners ist der Speichertrockner. Hierbei wird der Klärschlamm ein- oder zweimal im Jahr aus der Trocknungsanlage entnommen. Den jahreszeitlichen Schwankungen im Austrags TS, welche bei einer rein solaren Trocknung auftreten, kann durch eine Entleerung im Sommer entgegengewirkt werden. Es kann somit eine Entleerung bei einem möglichst hohen Austrags-TS (bis zu 90 %) stattfinden. In den Wintermonaten sind Austrags-TS zwischen 50 und 60 % möglich (Bux, 2013). Es ist hierbei zu beachten, dass der spezifische Energiebedarf für den Wasserentzug und die Trocknungsdauer mit steigendem TR-Gehalt zunimmt. Das anfallende Filtratwasser fällt das gesamte Jahr weitgehend gleichmäßig an. Im Gegensatz zu mobilen Schlammwässerungen bedarf es keiner Zwischenspeicherung. Die Zugabe des Filtratwassers kann kontinuierlich in den Kläranlagenzulauf erfolgen. In die Trocknungsanlage kann der Klärschlamm entwässert, bei kleineren Kläranlagen (bis etwa 15.000 EW), auch ohne eine vorangegangene Entwässerung eingebracht werden (Bux, 2013). Es ist jedoch aufgrund einer größeren Anlagengrundfläche und damit verbundenen höheren Investitionskosten zu überprüfen, in wie weit sich eine vorangehende

Entwässerung wirtschaftlich darstellen lässt. Bei der Auslegung der Anlage gibt es nach oben keine Einschränkungen, wenn ausreichend Fläche vorhanden ist. Eine der größten europäischen solaren Trocknungsanlagen befindet sich derzeit in Palma de Mallorca und trocknet den Schlamm einer 600.000 EW-Anlage (vgl. Abbildung 20). Die Vor- und Nachteile eines Speichertrockners sind in Tabelle 11 zusammengefasst.



Abbildung 20: Solare Klärschlamm-trocknung von Palma de Mallorca (600.000 EW) (ThermoSystem, 2020)

Tabelle 11: Vor- und Nachteile von Speichertrocknern

Vorteile	Nachteile
hohe Trocknungsgrade möglich	großer Flächenbedarf, da lange Speicherzeit
Räumung können besser geplant werden	lange Trocknungszeit
genügend Schlamm für einen großen, entsprechend kostengünstigeren Transport-LKW	Abnehmer der gesamten Klärschlammmenge muss gefunden werden
Arbeitsaufwand relativ gering, da Trocknung voll	
kein Filtratwasserspeicher notwendig	
keine Vorentwässerung notwendig	

Die Schlamm-trocknung kann auch als kontinuierliche Trocknung erfolgen. Hierbei wird der Schlamm laufend eingebracht und entnommen. Es kommt hierbei zu jahreszeitlichen Schwankungen bei dem Austrags-TS und geringere Mengen getrockneter Klärschlamm dessen Entsorgung zu schwankenden Preisen erfolgen muss.

Fremdwärmeunterstützte Solartrockner

Eine Möglichkeit die solare Trocknung effektiver zu gestalten ist die Nutzung von Fremdwärme. Durch Zuführen von Fremdwärme, aus unterschiedlich möglichen Quellen kann sich der Flächenbedarf, wie auch die Witterungsabhängigkeit reduzieren. Als mögliche Fremdwärme für die Trocknung kann z. B. die Abwärme eines Blockheizkraftwerkes dienen.

3.5 Verwertungswege

3.5.1 Thermische Verwertung

3.5.1.1 Monoverbrennung

Bei der Monoverbrennung in Deutschland kommt hauptsächlich das Verfahren einer stationären Wirbelschicht zum Einsatz (Schnell, Horst, & Quicker, 2018). Aktuell gibt es in Deutschland 22 Monoverbrennungsanlagen (Stand 2019) (Heidecke & Roskosch, 2019). Die Standorte sind der Abbildung 21 zu entnehmen.



Abbildung 21: Standorte der Klärschlammverbrennungsanlagen sowie der geplanten Standorte in Deutschland (Lehrmann, Six & Heidecke, Thermische Klärschlammbehandlung - bestehende Kapazitäten, künftiger Bedarf, Entwicklung der Verbrennungskapazitäten-, 2020)

Durch geänderte rechtliche Rahmenbedingungen wird die zu verbrennende Klärschlammmenge in den nächsten Jahren weiter ansteigen. Nach (Ecoprog, 2017) werden die bestehenden Kapazitäten dann nur noch etwa zur Hälfte ausreichen (bei einer Klärschlammmenge von über 1,2 Mio. t/a). Bei der Monoverbrennung ist das DWA Merkblatt DWA-M 386 vom Dezember 2011 zu beachten. Die Monoverbrennung wird zumeist im Temperaturbereich zwischen 850 °C und maximal 950 °C betrieben. Bei einer geringeren Temperatur als 850 °C kann es zu Geruchsemissionen kommen (Roskosch & Heidecke, 2018). Die Einhaltung der Mindesttemperatur kann insbesondere zu Betriebsproblemen, wie Ascheschmelze, hoher Zusatzbrennstoffbedarf und erhöhte Stickoxidemissionen, führen. Die sich einstellende Temperatur ist abhängig vom Energiegehalt und der eingebrachten Klärschlammmenge sowie von der Menge der Verbrennungsluft. Nach 17. BImSchV ist die Temperatur von 850 °C bei einer Verweildauer von zwei Sekunden in der Nachbrennkammer der Abgase einzuhalten, um einen vollständigen Ausbrand der Rauchgase zu erreichen. Mit einer Ausnahmegenehmigung können Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Deutschland auch mit einer niedrigeren Temperatur und/oder kürzeren Verweildauern betrieben werden (Schnell, Horst, & Quicker, 2018).

Feuerungssysteme

Bei der Monoverbrennung kommen unterschiedliche Feuerungssysteme zum Einsatz. Das häufigste System im Einsatz ist der Wirbelschichtofen. Weitere in Deutschland zu findende Feuerungssysteme sind der Etagenofen, der Etagenwirbler und die Rostfeuerung. Hauptbestandteil der Verbrennung ist eine feuerfeste ausgemauerte Brennkammer mit einem Düsenboden im unteren Teil (vgl. Abbildung 22). Auf dem Düsenboden befindet sich eine Sandschicht (Schnell, Horst, & Quicker, 2018). Um eine Versinterung der Asche zu verhindern liegt die obere Temperaturgrenze bei max. 950 °C.

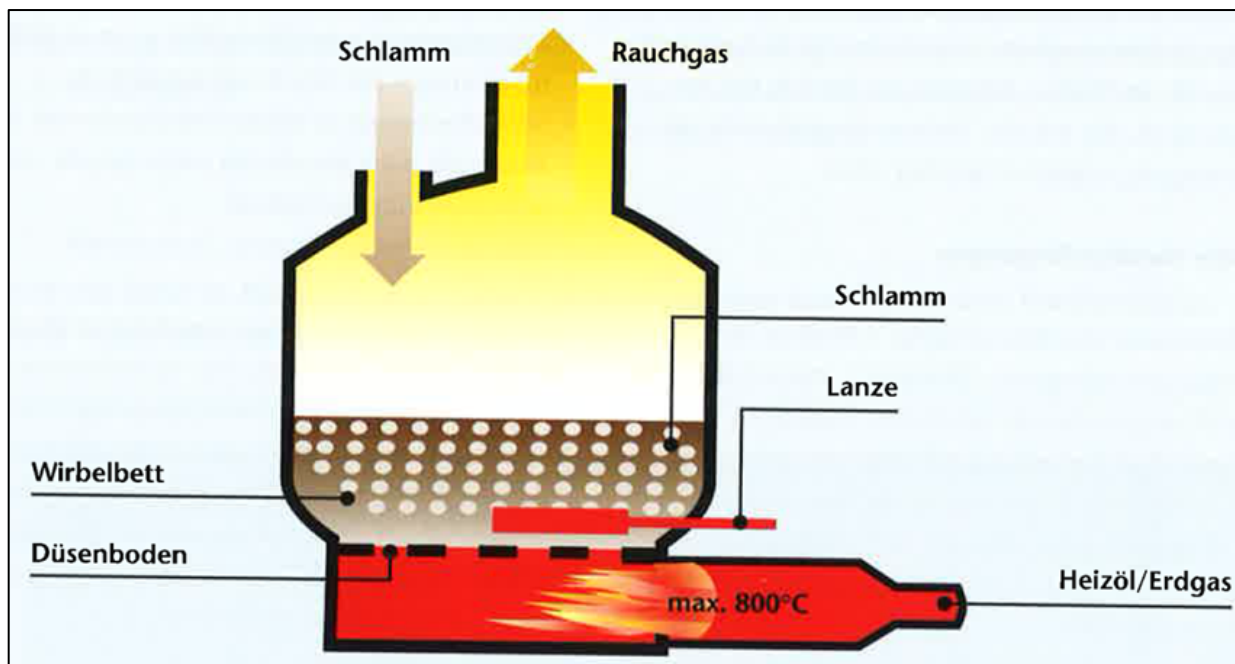


Abbildung 22: Schema einer stationären Wirbelschichtfeuerung (Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen, 2006)

Vorteil einer Wirbelschichtfeuerung ist die gute Verteilung der Verbrennungsluft und des Klärschlamms durch die hohen Turbulenzen der Wirbelschicht (Plank, Wiesgickl, & Roitzsch, 2018). Durch die Verwirbelungen und Reibung wird der Sand des Wirbelbetts zerkleinert und zusammen mit dem Rauchgas ausgetragen. Die Vor- und Nachteile der Klärschlammmonoverbrennung sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Vor- und Nachteile Klärschlammmonoverbrennung

Vorteile	Nachteile
umweltschonende KS-Entsorgung	niedriger Heizwert des Schlammes
Asche als Phosphor-Rohstoff	nur günstig für größere Anlagen oder im Verband mehrerer Kläranlagen
	Nutzung eines möglichen Wärmeüberschusses

3.5.1.2 Mitverbrennung

Eine Alternative zur Klärschlammmonoverbrennung ist die Mitverbrennung in Kraftwerken. Die DWA hat für diese Art der thermischen Behandlung das Merkblatt DWA-M 387 im Mai 2012 veröffentlicht. Hierbei wird vorwiegend auf die Mitverbrennung in Kraftwerken wie Stein- und Braunkohlekraftwerken eingegangen, da der Anteil der industriellen Feuerungsanlagen nur einen geringen Anteil an der gesamten Entsorgungsmenge ausmacht. Nach (Roskosch & Heidecke, 2018) werden 23 % des Gesamtaufkommens in Kohlekraftwerken, 7 % in Zementwerken und etwa 3 % in Abfallverbrennungsanlagen thermisch entsorgt. Ist der Klärschlamm mindestens teilgetrocknet, kann es zu einer Einsparung von fossilen Brennstoffen führen.

Müllverbrennungsanlagen

Bei einer Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllverbrennungsanlagen (Standorte vgl. Abbildung 23), kann max. 10 % der verfügbaren Feuerungsleistung durch Klärschlamm ersetzt werden (Franck & Schröder, 2015). Die jährlich mitverbrannte Klärschlammmenge liegt auf einem gleichbleibenden Niveau in den letzten Jahren bei circa 42.300 t TM/a (Roskosch & Heidecke, 2018).

Hier wird Deutschlands Müll verbrannt

Ingesamt 26,3 Mio. Tonnen in 2018



Abbildung 23: Standorte von Müllverbrennungsanlagen in Deutschland (Schauenberg, 2019)

Zumeist ist in Deutschland bei der Müllverbrennung die Rostfeuerung zu finden, da sie auf die schwankende Zusammensetzung des Abfalls flexibel reagieren kann (Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen, 2006). In Abbildung 24 ist eine Abfallverbrennung schematisch dargestellt.

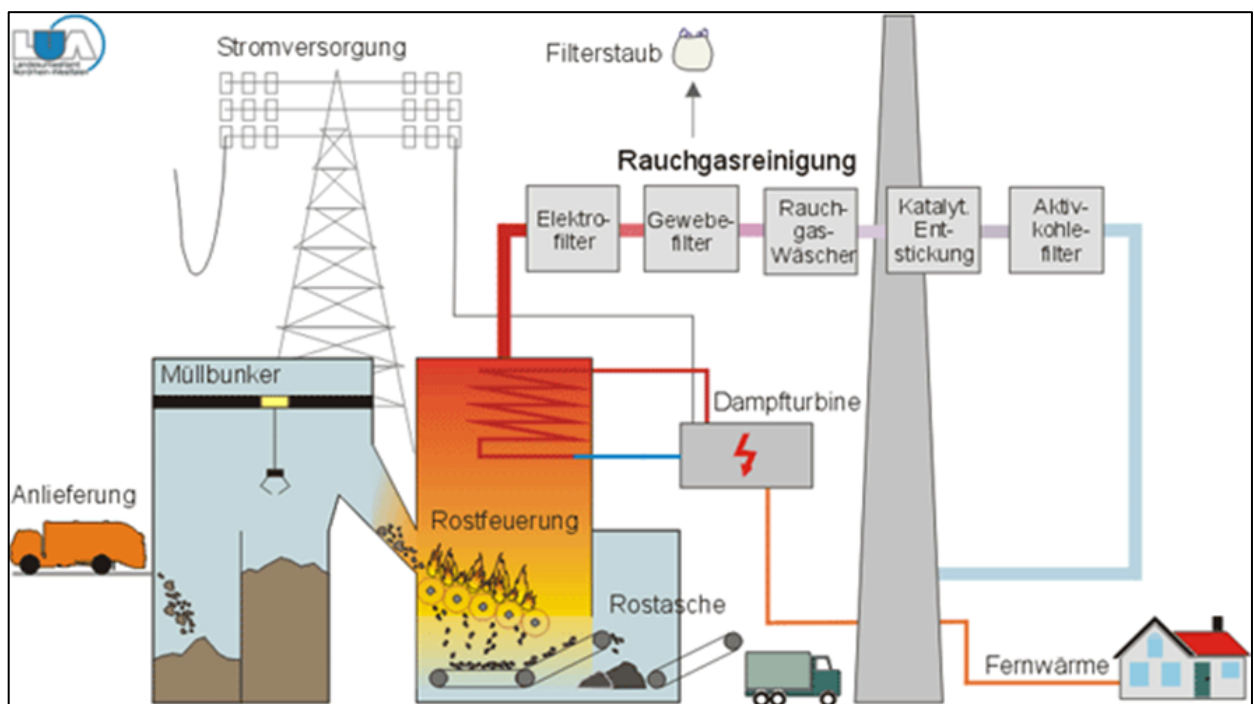


Abbildung 24: Schema einer thermischen Abfallbehandlungsanlage (Landesamt für Natur, Umwelt- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2020)

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Klärschlamm mit dem Abfall zu vermischen. Hierbei ist auf eine gute Durchmischung zu achten, da es sonst zu einer Verklumpung des Materials mit dem feuchten Klärschlamm kommen kann, welches Probleme bei der Verbrennung macht. Eine Möglichkeit der Beimischung ist durch Aufstreumaschinen im Müllbunker oder in der Schleudereinrichtung zur Beschickung des Feuerraums möglich. Die Beimischrate sollte 20 % nicht überschreiten (Roskosch & Heidecke, 2018). Der Klärschlamm sollte bei der Rostfeuerung möglichst entwässert vorliegen, da getrockneter Klärschlamm durch den Rost fallen kann und nicht vollständig ausbrennt. Der Restmüll liegt außerdem nicht in einer vollgetrockneten Form vor (circa 37 Masse-% Wassergehalt) (Weigand & Marb, 2006). Die Müllverbrennungen sind somit auf den höheren Wassergehalt ausgelegt. Der Klärschlamm beeinflusst allerdings den Staubgehalt maßgeblich (Roskosch & Heidecke, 2018). Daher gelten für die Müllverbrennungsanlagen, welche Mitverbrennung betreiben, die gleichen abgasseitigen Voraussetzungen wie für Monoklärschlammverbrennungen nach der 17. BImSchV. Es sind jedoch zusätzlich eine Koksadsorption von Dioxinen sowie ein Katalysator, aufgrund des NO₂-Grenzwertes, notwendig (Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen, 2006).

Kohlekraftwerk

In DWA-M 387 (DWA, Merkblatt DWA-M 387 Thermische Behandlung von Klärschlämmen - Mitverbrennung in Kraftwerken, 2012) wird die thermische Behandlung von Klärschlämmen als Mitverbrennung in Kraftwerken behandelt. Sie macht den größten Anteil an der Mitverbrennung in den letzten Jahren aus. Derzeit werden etwa 401.000 t TM/a mitverbrannt (Roskosch & Heidecke, 2018). Als Feuerungsarten kommen hauptsächlich Staub- oder zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen zum Einsatz. Nach 17. BImSchV sind bis zu 25 % Feuerungswärmeanteil erlaubt. Diese Grenze wird jedoch, um den Kraftwerksbetrieb und Abgaswerte nicht zu gefährden, weit unterschritten. In der Praxis liegt der Feuerungsanteil bei etwa 4 % in Braunkohle- und 1,5 % in Steinkohlekraftwerken. Insgesamt ergibt sich ein Feuerungswärmeanteil von weit unter 2 % (Lehrmann, Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung -Trocknung, Monoverbrennung und Mitverbrennung, 2013). Nach (Roskosch & Heidecke, 2018) liegt die aktuelle Auslastung der Mitverbrennungskapazitäten bei knapp 50 %. Ein Grund hierfür kann der zunehmende Ausbau der Windenergie und anderer regenerativer Energiequellen sein. Kohlekraftwerke werden zum Lastausgleich genutzt und in Teillast gefahren oder abgeschaltet. Die Möglichkeit Klärschlamm mitzuverbrennen sinkt somit, da im Teillastbetrieb der Klärschlamm nicht so gut vor Ort zu trocknen ist und eine geringere Menge beigemischt werden kann. Zumeist kommt es zu Abschaltung der Steinkohlekraftwerke, da Braunkohlekraftwerke träger und enger im Regelbereich sind (Lehrmann, Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung -Trocknung, Monoverbrennung und Mitverbrennung, 2013). Zur besseren Handhabung kann nur stabilisierter, ausgefauter Schlamm verbrannt werden. Bei Annahme von Rohschlamm würde es auf Grund des hohen Wassergehalts zu Schwierigkeiten in der Handhabung und bei der Lagerung, wie durch Gas- und Geruchsbildung, kommen (Roskosch & Heidecke, 2018). Es ist die Verbrennung von entwässertem, teil- und vollgetrocknetem Klärschlamm möglich. Der Entwässerungsgrad ist hierbei von dem Kraftwerk abhängig. In Steinkohlekraftwerken sollte der Klärschlamm mit mindestens 88 % vollgetrocknet sein, in Braunkohlekraftwerken kann er auch in entwässertem oder teilgetrockneter Form vorliegen (Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen, 2006). Der Heizwert von Klärschlamm im vollgetrockneten Zustand liegt zwischen 9-12 MJ/kg und ist damit etwa mit Braunkohle (bei einem Wassergehalt von 50 %) gleich. Steinkohle hat einen Heizwert von 27 - 30 MJ/kg (bei 7-11 % Wassergehalt). Durch eine Trocknung kann somit ein positiver Heizwert erreicht und fossile Brennstoffe eingespart werden (Roskosch & Heidecke, 2018). Die Beimischung des Klärschlammes wird bei der Staubfeuerung in der Regel in der Kohlemühle durchgeführt. Hierbei wird der Schlamm mit der Kohle zerkleinert und getrocknet. Die Mühlen sind meist der limitierende Faktor bei der Mitverbrennung (Roskosch & Heidecke, 2018). Bei der Mitverbrennung in Kraftwerken ist bei der Abgasreinigung auf die besondere Zusammensetzung des Klärschlammes zu achten. Da Klärschlamm die Senke der Abwasserreinigung ist, kommt es zu einem zusätzlichen Eintrag von Schwermetallen. Die Rauchgasreinigung ist üblicherweise auf den Regelbrennstoff, also Braun- oder Steinkohle, ausgelegt (Siedlungswasser- und

Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen, 2006). Es sind somit bei einer Mitverbrennung zusätzliche Reinigungsstufen zu errichten, oder es wird der Klärschlammeintrag auf einen geringeren Prozentsatz beschränkt (Roskosch & Heidecke, 2018). Neben der Rauchgaszusammensetzung ändert sich auch die Zusammensetzung und die Menge der Asche. Klärschlamm hat einen relativ hohen Anteil mineralischer Bestandteile. Diese verbleiben in der Asche und sind zu entsorgen. In den letzten Jahren sind einige Kohlekraftwerke stillgelegt worden und somit auch Kapazitäten zur Mitverbrennung weggefallen. Einige Kraftwerke wurden in Betrieb genommen. Diese arbeiten bei einem bedeutend höheren Wirkungsgrad (circa 42 %), da die Anlage mit einem höheren Dampfdruck und Dampftemperatur gefahren wird. Es liegen noch keine ausreichenden Betriebserfahrungen vor, inwieweit eine Mitverbrennung von Klärschlamm sich auf die Verfahrensweise und Materialien auswirken. Daher fallen auch hier Kapazitäten weg (Lehrmann, Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung -Trocknung, Monoverbrennung und Mitverbrennung, 2013). Ende Januar 2020 hat die Bundesregierung den Kohleausstieg beschlossen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020). Daher wird in Zukunft der Klärschlamm entsorgungsweg in Kohlekraftwerken wegfallen.

Zementwerk

Eine weitere Möglichkeit der Mitverbrennung stellt die Beimischung von Klärschlamm bei der Zementherstellung dar. Die Zementherstellung ist ein energieintensiver Prozess und die Energiekosten können ja nach Brennstoff bis zu 30 % der Herstellungskosten ausmachen (Schmidl, 2018). Durch den Einsatz von Abfall als Energieträger können primäre Energieträger, wie Kohle, Öl oder Erdgas, eingespart werden. Durch die Einsparung von wertvollen Roh- und Brennstoffen, kommt es auch zu einer CO₂-Reduzierung, da Klärschlamm als klimaneutral angesehen wird. Der mineralische Anteil im Klärschlamm kann bei der Zementherstellung die mineralischen Rohstoffe wie Sand oder Eisenerz ersetzen (Roskosch & Heidecke, 2018). In Abbildung 25 sind die Standorte der Zementwerke in Deutschland dargestellt.



Abbildung 25: Zementwerke in Deutschland (Stand Juni 2017) (VDZ, 2020)

Die Öfen der Zementindustrie eignen sich sowohl für getrockneten wie auch teilgetrockneten Klärschlamm. Es werden beim Hauptbrenner aber vorzugsweise Klärschlämme mit einem Trockensubstanzgehalt größer 80 % verwendet (Kuppe & Geyer). Hintergrund hierfür ist der geringere Heizwert von entwässerten oder teilgetrockneten Klärschlämmen. Die Trocknung findet nach (Kuppe & Geyer) aktuell selten im Zementwerk statt. Sie ist aber durch eine Nutzung von nicht im Prozess nutzbarer Energie vor Ort realisierbar. Zu Problemen können hierbei die bei der Trocknung entstehenden Kondensate und Brüden führen. Diese sind separat zu behandeln und aufzubereiten. An den Zementwerken, die den Klärschlamm vor Ort trocknen, kommen Bandtrockner, Schaufeltrockner und Trommeltrockner zum Einsatz. Bei der Mitverbrennung im Zementwerk fallen keine zu entsorgenden Abfälle aufgrund von Klärschlamm an, da die Asche im Zement bleibt. Es wird somit von einer reststofffreien Verwertung gesprochen. Der im Klärschlamm enthaltene Phosphor würde somit auch im Zement verbleiben und wird dem Stoffkreislauf dadurch entzogen. Nach AbfKlärV ist daher die Mitverbrennung von Klärschlamm nur mit Zustimmung der Behörde für Kläranlagen kleiner 100.000 EW (ab 1. Januar 2029) bzw. kleiner 50.000 EW (ab 1. Januar 2032) erlaubt. Bei den größeren Kläranlagen ist die Mitverbrennung nicht zulässig. Weitere Einschränkungen für die Klärschlammmitverbrennung sind die Inputgrenzen für die im Klärschlamm enthaltenen Schwermetalle nach 17. BImSchV für die Abfallverbrennung (Roskosch & Heidecke, 2018). Eine Mitverbrennung von Klärschlamm kann bei hohen Phosphorgehalten die Qualität des Zementes beeinträchtigen. Außerdem kann ein zu hoher Quecksilbergehalt im Klärschlamm zu einer limitierenden Größe bei der Mitverbrennung hinzukommen, da Zementwerke meistens keine Abscheidetechnik für leicht flüchtige Schwermetalle installiert haben (Lehrmann, Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung -Trocknung, Monoverbrennung und Mitverbrennung, 2013).

3.5.1.3 Alternative Behandlungsmethoden

Da in Deutschland aktuell Kapazitäten, für etwa nur ein Drittel der aufkommenden Klärschlammmenge, in Monoverbrennungsanlagen vorhanden sind (Ritterbusch, 2019), befinden sich auch alternative Behandlungsmethoden für kleinere Durchsätze in der Entwicklung. Außerdem erfolgt die Anlieferung an Monoverbrennungsanlagen zumeist über mehrere hundert Kilometer. Um eine Alternative zur Klärschlammmonoverbrennung im kleineren Maßstab zu ermöglichen, sind einige alternative Behandlungsmethoden auf den Markt gekommen. Dies sind meist chemisch-physikalische Verfahren wie z. B. Nassoxidation und Hydrolyse. Die alternativen Behandlungsmethoden sind größtenteils noch in der Entwicklungsphase oder werden nur in geringer Anzahl betrieben (Roskosch & Heidecke, 2018). In diesem Kapitel sind zwei Verfahren exemplarisch dargestellt. Eins der Verfahren ist das EuPhoRe®-Verfahren. Bei dem Verfahren handelt es sich um ein zweistufiges, thermochemisches Aufschlussverfahren für Klärschlamm. Der Prozess läuft weitgehend in einem Drehrohrreaktor ab. Der erste thermische Behandlungsschritt ist die Erhitzung des Klärschlammes und die Entgasung der flüchtigen Bestandteile bei Temperaturen zwischen 650-750 °C (Klose, 2018). Die Feststoffe haben hierbei eine ausgeprägtere Reaktionsbereitschaft. Die im Klärschlamm enthaltenen Schwermetalle gehen in Gegenwart von Salzen in die Gasphase über. Die Produktqualität wird somit weitgehend beeinflusst. Im Anschluss an diesen Behandlungsschritt, schließt sich die oxidative Nachverbrennung des entstandenen fixen Kohlenstoffs mit einer weiteren Schwermetallreduktion bei Temperaturen zwischen 900 und 1.000 °C an. Durch die Zugabe von Additiven, wie Alkali- und/oder Erdalkalisalzen, kann sich der Schwermetallaustrag und auch die Löslichkeit der Asche in Zitronensäure verbessern. Die Löslichkeit ist besonders bei der Gewinnung des Phosphors aus Asche wichtig. Die Asche beinhaltet nahezu den gesamten Phosphor des in den Reaktor eingetragenen Klärschlammes. Die Asche kann z. B. als Granulat, bereits als Dünger in der Landwirtschaft Verwendung finden. Durch die Zugabe von Zitronensäure wird die Pflanzenverfügbarkeit weiter erhöht (Klose, 2018). Eine weitere alternative Behandlungsmöglichkeit ist der KlärschlammReformer der Firma Thermo-System. Dieser ist laut Hersteller eine dezentrale thermische Verwertungsanlage für mittlere Kläranlagen zwischen 25.000 und 100.000 EW. Durch das Verfahren soll die Klärschlammmenge vor Ort minimiert und somit Straßentransporte vermindert werden. Eine Annahme von Fremdschlämmen, zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit ist möglich. Zusätzlich soll das im Schlamm enthaltene Phosphat

wiedergewonnen und soweit wie erforderlich vor Ort wiederverwertet werden oder einer externen Aufbereitung zukommen. Durch die thermische Behandlung werden die organischen Schadstoffe zerstört und es kommt zu einer Abreicherung der anorganischen Schadstoffe, da diese ausgasen. Die Abgase sind über Filter zu reinigen. Die Anlage ist möglichst so zu betreiben, dass sie thermisch energieautark laufen kann. Hierfür ist der Klärschlamm vorher zu trocknen. Die Trocknung kann durch solare Trocknung oder auch durch z. B. einen Bandtrockner erfolgen. Die solare Trocknung hat hierbei den Vorteil, dass die bei der Verbrennung entstehende Abwärme genutzt werden kann. So lassen sich saisonale Schwankungen ausgleichen und die Trocknerleistung erhöhen. Jedoch muss eine größere Fläche verfügbar sein, als bei einer maschinellen Klärschlamm-trocknung. Der getrocknete Klärschlamm wird nach der Trocknung in den Klärschlamm-Reformer gegeben und in einem mehrstufigen Verbrennungsprozess thermochemisch umgesetzt. Der Reaktor besteht aus einer Pyrolysezone, einer Oxidationszone für den Schlamm sowie einer Gasbrennkammer (etwa 900 °C) zur Verbrennung der entstehenden Pyrolysegase. Der Klärschlamm wird unter kontrollierten Bedingungen vollständig mineralisiert. Durch die vorgeschaltete Trocknung kann der Verbrennungsprozess selbstgänglich ablaufen und es wird lediglich zum Anfahren der Anlage eine Zusatzfeuerung benötigt. Das entstehende Abgas wird in einem Wärmetauscher abgekühlt und anschließend in einer dreistufigen Gasreinigung (Staubfilter, Abgaswäscher und Polzeifilter) gereinigt (Ritterbusch, 2019). Nach Herstellerangaben liegen die Kosten für den Klärschlamm-Reformer bei circa 2-3 Mio. € und der Einsatz ist ab einer Klärschlamm-menge von circa 1.000 t TR möglich. Der Klärschlamm-Reformer wurde auf der Kläranlage „Renningen“ realisiert und seit 2017 betrieben (Klette, 2017). Durch die unterschiedlichen Verfahrensbedingungen der thermischen Behandlung kann nach (Ritterbusch, 2019) eine höhere Phosphat-löslichkeit von 60-80 % erreicht werden. Bei Klärschlamm-Asche aus einer Monoverbrennung kann diese bei etwa 30 % liegen. Die alternativen Behandlungsmethoden von Klärschlamm sind zumeist noch in den Kinderschuhen und zum Teil nicht großtechnisch erprobt.

3.5.2 Landwirtschaft

Die Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft hat eine lange Tradition, da die enthaltenen Nährstoffe, wie Phosphor und Stickstoff, im Kreislauf geführt werden. Außerdem kann Klärschlamm die Humusbilanz verbessern. Neben den Nährstoffen sind aber auch Schadstoffe im Klärschlamm enthalten. Um eine Schadstoffanreicherung in den Böden, Pflanzen, Grund- und Oberflächenwasser entgegenzuwirken, ist die bodenbezogene Klärschlamm-Verwertung schon seit langer Zeit umstritten und wird immer weiter eingeschränkt. Rechtliche Grundlage für die landwirtschaftliche Verwertung ist die Klärschlamm-Verordnung und das Düngerecht (vgl. Kapitel 2). Durch die zusätzlichen Einschränkungen der landwirtschaftlichen Verwertung durch die Novellierung der Klärschlamm-Verordnung und Änderung der Düngemittel-Verordnung sind die Flächen und Zeiträume zur möglichen Auf- oder Einbringung reduziert worden. Keine Aufbringung ist erlaubt auf Flächen:

- zum Anbau von Ackerfutter, Mais, Zuckerrüben, Gemüse, Obst, Hopfen, Feldgemüse
- von Grünland und Dauergrünland
- zu forstwirtschaftlichen Zwecken
- in Wasserschutzgebieten der Schutzzone I, II und III
- in Naturschutzgebieten, Nationalparks, nationalen Naturmonumenten, Naturdenkmälern, geschützten Landschaftsbestandteilen und gesetzlichen Biotopen.

Neben einem Aufbringungsverbot auf bestimmten Flächen, gibt es auch eine mengenmäßige Begrenzung von 5 t Klärschlamm TM / ha in 3 Jahren (vgl. AbfKlärV). Dies entspricht 100 m³ Klärschlamm mit 5 % TM pro ha. Vor der Ausbringung (vgl. Abbildung 26) ist eine Düngebedarfsermittlung nach genau festgelegten Vorgaben zu erstellen. Hierbei sind die zu erwartenden Erträge und Qualitäten, die im Boden verfügbaren Nährstoffmengen, der standortspezifische Pflanzenbestand und die Nährstofflieferung zu berücksichtigen (Roskosch & Heidecke, 2018). Die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie dem pH-Wert, der Pufferwirkung des Bodens sowie dem Gehalt an Eisen und Aluminium und somit auch von der Art der P-Fällung. Stickstoff dagegen ist vollständig

pflanzenverfügbar, jedoch ist bei flüssigem Klärschlamm die hohe Ammoniakemission (> 20 % Verlust des ausgebrachten Stickstoffs) zu beachten. Aus diesem Grund ist der Klärschlamm unverzüglich nach der Ausbringung einzuarbeiten (Roskosch & Heidecke, 2018).



Abbildung 26: Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung (Landkreis Günzburg, 2020)

Aufgrund der einzuhaltenden Grenzwerte nach AbfKlärV und DüMV ist Klärschlamm einer der am häufigsten und regelmäßigsten kontrollierten Sekundärrohstoffdünger (Roskosch & Heidecke, 2018). Es gibt jedoch sehr viele neuartige Stoffe die u.a. über Medikamente und Haushaltsprodukte in den Klärschlamm gelangen. Es ist kaum möglich den Klärschlamm auf alle diese Substanzen zu untersuchen und auf ihre Umweltwirkung zu überprüfen. Aus diesem Grund und den anderen enthaltenen Schadstoffen ist die landwirtschaftliche Verwertung in den nächsten Jahren laut Koalitionsvertrag (18. Legislaturperiode) weitgehend einzustellen. Eine Zusammenstellung der Vor- und Nachteile einer landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung ist in Tabelle 13 abgebildet.

Tabelle 13: Vor- und Nachteile der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung nach (Roskosch & Heidecke, 2018)

Vorteile	Nachteile
Klärschlämme werden gründlich auf Schadstoffe untersucht, um die Grenzwerte nach AbfKlärV und DüMV einzuhalten	Neben den geregelten Stoffen können im Klärschlamm eine Reihe von unbekanntem bzw. nicht geregelten Schadstoffen enthalten sein (z. B. Nanomaterialien, Mikroplastik, Antibiotikarückstände, Tributylzinn (TBT), Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), diverse Krankheitserreger)
hoher Anteil an organischer Substanz (günstig für die Bildung von Humus)	mögliche Gefahr des Eintrags und Anreicherung von Schadstoffen in Böden
Nachlieferung an notwendigen Nährstoffen	Risiko der Überdüngung und Nährstoffauswaschung
günstiger Phosphordünger, keine Importabhängigkeit	die direkte Pflanzenverfügbarkeit des Phosphats hängt wesentlich davon ab, in welcher Form die Ausfällung erfolgte.
Bodenuntersuchung vor Klärschlammausbringung	Wirkung von Klärschlamm auf Boden z. B. über den Eintrag antibiotikaresistenter Mikroorganismen oder nicht geregelter Schadstoffe ist ungeklärt

4. Kooperationsmöglichkeiten

Ziel einer kommunalen Zusammenarbeit ist eine effizientere Leistungserbringung. Durch Größenvorteile kann die Wirtschaftlichkeit gesteigert und die Aufgabenerfüllung gesichert werden. Zusätzlich lässt sich der Service und die Bürgerorientierung verbessern. Beispiele einer kommunalen Zusammenarbeit lassen sich in vielen Bereichen, wie z. B. der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung, der Abfallentsorgung, der Regionalentwicklung und Tourismus und dem Klimaschutz und der Energie finden. Die Zusammenarbeit unterscheidet sich im Wesentlichen nach öffentlich-rechtlichen Modellen oder Rechtsform und privatrechtliche Formen der kommunalen Zusammenarbeit in

- Kommunalen Arbeitsgemeinschaften
- Öffentlich-rechtlichen Vereinbarungen
- Zweckverbänden
- Form des Privatrechts: GmbH

4.1 Formen der kommunalen Zusammenarbeit

Durch kommunale Arbeitsgemeinschaften und Zweckvereinbarungen entstehen keine neuen Rechtspersönlichkeiten. Zweckverbände sind Körperschaften des öffentlichen Rechts. Sie verwalten ihre Angelegenheiten im Rahmen der Gesetze unter eigener Verantwortung. Neben der Zusammenarbeit in Form des öffentlichen Rechts stehen aber auch privat-rechtliche Modelle zur Verfügung, wobei hier insbesondere die GmbH zu nennen wäre. Die Gründung erfolgt durch einen notariell beurkundeten Gesellschaftsvertrag, der gegenüber der Rechtsaufsicht anzeigepflichtig ist. Die GmbH entsteht mit der Eintragung im Handelsregister.

4.2 Rechtliche Prüfung

Die rechtliche Prüfung ist durch den Rechtsanwalt Dr. Christoph Kind aus Fulda vorgenommen worden. Die folgenden Abschnitte wurden von ihm verfasst.

4.2.1 Allgemeines / insbesondere: zu beachtende Grundsätze des Vergaberechts

Sie hatten unter Ziff. 4 des Abschlussberichts auf verschiedene Kooperationsmöglichkeiten hingewiesen, wobei in allen Fällen einer Kooperation unbedingt auf einen Nichtverstoß gegen das Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB) (öffentliche Ausschreibung notwendig oder nicht?) zu achten ist. Grundsätzlich ist im Hinblick auf das Urteil des Europäischen Gerichtshofs vom 04.06.2020 (EuZW 2020, 816) darauf zu achten, dass

- der Abschluss des Kooperationsvertrags zwischen zwei Gemeinden bzw. Landkreisen das Ergebnis einer Initiative der Vertragsparteien zur Zusammenarbeit sein und
- eine gemeinsame Definition von Bedarf und Lösungen sowie eine gemeinsame Strategie der Partner feststellbar sein muss.

4.2.2 Beurteilung der einzelnen Phasen der Klärschlammverwertung und Klärschlammverarbeitung

4.2.2.1 Dezentrale / zentrale Konzepte

Ihre Konzeptvorstellung vom 24.11.2022 befasst sich eingehend im Zusammenhang mit Klärschlammfall- und -aufbereitung mit Formen der kommunalen Zusammenarbeit und der Wahl der möglichen Organisations- und Rechtsformen für im Wesentlichen dezentrale Kooperationen bzw. in Bezug auf die thermische Entsorgung eine zentrale Kooperation. Die u. a. in der „Klärschlammstudie Konzeptvorstellung Bürgermeisterdienstversammlung 09.11.2022 Seite 15 f.“ erläuterten einzelnen Arbeitsschritte sind in Bezug auf die einzelnen

Kooperationsformen und ihre sich anbietende rechtliche Ausgestaltung zu betrachten. Die dezentralen Konzepte (Regionen Nord, Ost, Mitte, West, Südwest und Region Süd) ähneln sich im Prinzip, wobei nachfolgend die u. a. im Abschlussbericht dargestellten einzelnen Arbeitsschritte (Klärschlammanfall, Klärschlammaufbereitung auf 5 %, Transport, energetische Nutzung, Entwässerung, Trocknung und schließlich Verbrennung) im Hinblick auf Zusammenarbeitsformen gesondert beurteilt werden sollen.

4.2.2.2 Klärschlammanfall und Klärschlammaufbereitung

Der Klärschlammanfall erfolgt auf den einzelnen Kläranlagen. Die Handhabung der Klärschlammmenge vor Ort wird von den einzelnen Gemeinden erledigt und dürfte keine Fragen der Zusammenarbeit und damit auch keine vergaberechtlichen Probleme aufwerfen. Insoweit wird davon ausgegangen, dass auch die Klärschlammaufbereitung (und ggfls. mechanische Entwässerung) keine diesbezüglichen Probleme aufwirft und die Kosten für Personal, Wartung und Polymer von der Gemeinde getragen werden.

4.2.2.3 Klärschlammtransport

In den verschiedenen Szenarien wird dargestellt, welche Gemeinden ihren Klärschlamm (voringedickt) auf welche Kläranlagen transportieren. Hier gibt es aus unserer Sicht zwei Szenarien:

- Entweder wird der Klärschlamm - soweit noch zulässig - an regionale Landwirte gegen Zahlung eines Entgelts durch die Gemeinde abgegeben. Die in der Regel Lohnunternehmer (da für Abfalltransport (Klärschlamm ist Abfall) eine Zulassung (Zertifizierung) erforderlich ist) übernehmen dann die Transportfunktion und das Aufbringen des Klärschlammes auf die landwirtschaftlichen Flächen. Der Unterzeichner geht davon aus, dass Klärschlamm hauptsächlich nur in der Landwirtschaft Anwendung findet. Insoweit stellt sich die Frage, inwieweit die einzelne Gemeinde den abnehmenden Landwirt frei bzw. beliebig wählen kann. Es ist davon auszugehen, dass die Schwellenwerte für die Erteilung des Transportauftrags (Zahlung der Gemeinde an den abnehmenden Transportunternehmer und Landwirt für die Entsorgung) in der Praxis nicht erreicht werden. Ansonsten müsste in Bezug auf die Abnehmer ein entsprechendes Vergabeverfahren vorgesehen werden, um in transparenter Weise die Schlammabgabe und den Weitertransport zu regeln.
- Neben dem Transport des Klärschlammes zum Zwecke der Aufbringung auf Felder wird jedoch in der Regel mengenbedingt der überwiegende Teil des Klärschlammes durch zu beauftragende Unternehmen von der jeweiligen gemeindlichen Kläranlage an eine Kläranlage zur weiteren Klärschlammbehandlung transportiert werden (z. B. Region Nord: Klärschlammanlieferung von Buchenau und Burghaun nach Hünfeld oder Konzept-Region Ost: Klärschlammanlieferung der Kläranlagen „Günthers“ (Tann), „Wiesen“ (Hofbieber) und „Gersfeld“ an die Kläranlage „Hilders“).

Die Gemeinden werden sich eines Unternehmens aufgrund eines mit diesem abzuschließenden Entsorgungsvertrag zum Zwecke des Transports des Klärschlammes bedienen. Grundsätzlich handelt es sich um die Einzelentscheidung der Gemeinde und die Anwendung der Vergabebestimmungen hängt davon ab, in welchem Umfang (Schwellenwert?) Klärschlamm zu transportieren sein wird. Bis zu diesem Punkt dürften Kooperationsvereinbarungen zwischen einzelnen Gemeinden noch keine Rolle spielen, allenfalls Austausch von Informationen in Bezug auf Ausschreibungen, Entsorgungsunternehmen und weitere Formalien.

4.2.2.4 Klärschlammbehandlung in „Schwerpunktkläranlage mit Faulturm“

Nimmt man zur weiteren Betrachtung das Beispiel des dezentralen Konzepts „Konzept-Region Nord“, wird der Klärschlamm (gegebenenfalls maschinell vorbehandelt und entwässert) zur Schwerpunktkläranlage „Hünfeld“ geliefert, wo in dem dort vorhandenen Faulturm die weitere energetische Verwertung und damit eine weitere - die Endbehandlung des Klärschlammes

vorbereitende - Bearbeitung des Klärschlammes vorgenommen wird. Hier bedarf es einer Vereinbarung zwischen den Gemeinden der klärschlammliefernden Anlagen und der die Schwerpunktkläranlage betreibenden Gemeinde bzw. Körperschaft, die mindestens folgende Eckpunkte haben muss:

- Zunächst die Berechtigung der jeweiligen Gemeinde mit Kläranlage zur Lieferung einer bestimmten (Maximal-)Menge von Klärschlamm an die Schwerpunktkläranlage bzw. Zielkläranlage.
- Anforderungen an das von den Ausgangskläranlagen zu liefernde Produkt Klärschlamm (z. B. ein bestimmter Entwässerungsgrad).
- Regelungen über die Art der Anlieferung und Ablieferung; z. B. Verpflichtung des Transportunternehmens zur Ablieferung und zum Einpumpen des Klärschlammes in den Faulturm.
- Verpflichtung der Schwerpunktkläranlage zur Bearbeitung des Klärschlammes entsprechend den gesetzlichen Vorgaben und Vorbereitung eines "Endprodukts" in bestimmter Konsistenz
- Verpflichtung der Beteiligten zur Mitwirkung bei der Optimierung der Verfahrensabläufe.
- Kostenerstattung durch die zuliefernden Gemeinden an die Gemeinde der Schwerpunktkläranlage.

Anmerkung: Das Volumen der Anlieferung und die hierdurch entstehenden Kosten werden nach Einschätzung des Unterzeichners den Schwellenwert entsprechend der Vergabeverordnung überschreiten. Es ist aber fraglich, ob es überhaupt einen Markt von Entsorgungsunternehmen mit Kapazitäten eines Faulturms gibt, die die weitere Vorbereitung ("Veredelung") des Klärschlammes betreiben und vornehmen können bzw. wollen. Bei der Ausgestaltung der Zusammenarbeit ist strikt darauf zu achten, dass die beteiligten Gemeinden eine gemeinsame Absprache betreffend die Strategie der Klärschlammveredelung treffen, wobei es in den Beispielen um eine Ausnutzung vorhandener Kapazitäten und damit Ausnutzung von Synergieeffekten geht. Insofern nimmt die Schwerpunktkläranlage einen Teil der sich im öffentlichen Interesse und in Verwirklichung des öffentlichen Auftrags ergebenden Tätigkeit wahr, sodass bei vorhandenen Kapazitäten der Gedanke einer Ausschaltung des Wettbewerbs fern liegen dürfte. Dieselbe Situation (= keine vergaberechtliche Relevanz) dürfte vorliegen, wenn sich verschiedene Gemeinden mit Kläranlagen zusammenschließen, und mit eigenen Mitteln und Ressourcen eine Kläranlage mit Faulturm ausstatten, um dort - wenn auch dezentral - jedoch an einer bestimmten Stelle, den Klärschlamm weiter zu behandeln. Insoweit dürfte ein öffentlich-rechtlicher Vertrag als koordinationsrechtlicher Vertrag in Betracht kommen, weil mehrere Träger öffentlicher Verwaltung Vertragsparteien wären. Der koordinationsrechtliche Vertrag regelt Rechtsbeziehungen zwischen Gemeinden, die untereinander nicht mit Verwaltungsakten agieren können. Die Verwaltungsabläufe erscheinen nicht derartig vielfältig und dynamisch, dass ein Zweckverband mit eigenem Verwaltungsapparat gebildet werden müsste. Es ist aber auch denkbar, dass sich eine Kooperationsform auf einer höheren Ebene mit umfangreicherem Verwaltungsapparat erst im weiteren Verlauf als notwendig herausstellt. Es könnte sich aus Gründen der Rechtssicherheit empfehlen, parallel und vorsorglich die Entsorgungsleistungen, die ansonsten in der Schwerpunktkläranlage zu leisten wären, europaweit auszuschreiben. Der Unterzeichner geht allerdings davon aus, dass es einen solchen Entsorgungsmarkt nicht gibt. Wenn dies so sein sollte, würde eine europaweite Ausschreibung letztlich "nicht schaden" und gleichzeitig wie ausgeführt Rechtssicherheit schaffen. Das müsste aber zweckmäßigerweise in der speziellen Situation noch einmal geprüft werden.

4.2.2.5 Verbrennungsanlage

Die Studie hält es für wirtschaftlich denkbar, im Landkreis Fulda eine thermische Entsorgung (thermische Verwertung mittels Drehrohrofens) darzustellen. Die Leistungen für den Bau der thermischen Verwertungsanlage als solche müssen selbstverständlich ausgeschrieben werden. Denkbar ist, dass die Klärschlammverbrennungsanlage vom Landkreis Fulda betrieben wird. Diese Verbrennungsanlage würde eine (ihr zugewiesene) öffentlich-rechtliche Aufgabe erfüllen und würde zweckmäßigerweise in die rechtliche Form eines Zweckverbandes gekleidet werden (mit Aufgabenzuweisung, Name, Sitz, Angabe der Verbandsmitglieder, Angabe der Organe etc.).

Insoweit wird etwa auch der Abwasserverband Fulda in der Form eines Zweckverbandes nach den Bestimmungen des Gesetzes über die kommunale Gemeinschaftsarbeit zum Zwecke der gemeinsamen Abwasserbeseitigung geführt (vgl. § 1 der Verbandssatzung des Abwasserverbandes Fulda vom 13.10.2015 (13. Änderung)). Selbstverständlich könnte die Erfüllung der öffentlich-rechtlichen Aufgabe der Klärschlammverbrennung auch privatrechtlich organisiert werden. Eine solche Aufgabenerfüllung und Aufgabenübertragung würde aber eine Ausschreibung (vergleichbar einer Vergabe an Abfallentsorgungsunternehmen) voraussetzen. Letztlich dürfte die Entscheidung für oder gegen diesen Weg davon abhängen, ob sich der Landkreis mit einer solchen Klärschlammverbrennungsanlage wirtschaftlich nicht überfordert sieht und davon ausgeht, die Aufgabe effizient selbst ausführen zu können. Andernfalls müsste eben die Aufgabe unter Beibehaltung der Leitungshoheit des Landkreises bzw. der beteiligten Gemeinden von einem privaten Unternehmen erbracht werden. Der "Worst Case" wäre der Fall, dass der in den jeweiligen Faulturmanlagen vorbereitete Klärschlamm zur Verbrennung in eine externe Anlage verbracht werden müsste, was erhebliche Transportfrequenzen und u. U. nur eingeschränkt beeinflussbare Kosten erzeugen könnte.

4.2.3 Ergebnis

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass das Gesetz rechtliche Kooperationsformen in ausreichender Form je nach Ebene der Zusammenarbeit zur Verfügung stellt. Die Wahl der "richtigen Kooperationsform" dürfte nicht das Hauptproblem darstellen. Die Hauptaufgabe dürfte in einer Klärung möglicher Abläufe und einer möglichst effizienten Klärschlammverarbeitung und Klärschlammverbrennung bestehen. Wenn diese Abläufe geklärt sind und die Gemeinden zur Mitarbeit im Rahmen des Gesamtkonstrukts bereit sind, wird sich eine endgültige Empfehlung für den rechtlichen Rahmen ohne weiteres geben lassen.

5. Phosphor-Recyclingverfahren

Phosphor ist ein endlicher nicht substituierbarer Stoff. Die natürlichen Vorkommen beschränken sich weitgehend auf politisch instabile Länder. Der im Klärschlamm gebundene Phosphor lässt sich mit verschiedenen Verfahren recyceln und pflanzenverfügbar aufbereiten. In Abbildung 27 sind die verschiedenen Stufen des Klärprozesses und die Bewertung möglicher Verfahren zum Phosphorrecycling dargestellt.

Stoffstrom (Ausgangsmaterial für P-Recycling)	Leistungsfähigkeit (Phosphor-Rückgewinnung)	Rezyklatqualität		Einsatzfähigkeit, Anwendbarkeit)	Betriebsmittelverbrauch, Energieeffizienz	Reife des Verfahrens	Kosten pro kg Phosphor
		Pflanzenverfügbarkeit	Schadstoffabreicherung ⁷				
Abwasser (Kläranlagenablauf)	+	++	++	+	+	++	o
Prozesswasser (Schlammwasser)	++	++(+)	++(+)	+	+++	+++	ooo
Klärschlamm (nicht entwässert)	++	+++	++	+	+++	+++	oo
Klärschlamm (entwässert)	+++	+++	+++	++	++	+++	oo
Klärschlamm asche (aufbereitet)	+++	++	+++	++	++ ⁸	++	oo

+ = gering o = hoch
 ++ = mittel oo = mittel
 +++ = gut ooo = niedrig

Abbildung 27: Bewertung der Phosphor-Rezyklate aus der Abwasserbehandlung (LAGA, 2015)

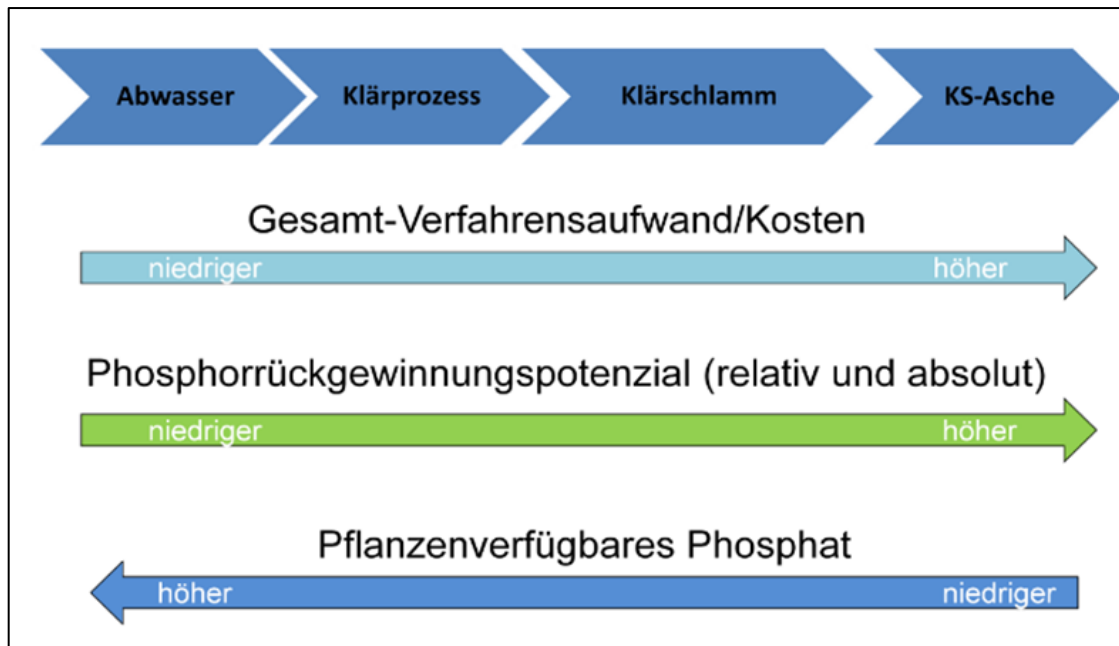


Abbildung 28: Allgemeine Darstellung des Aufwandes, des Potentials und der Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor-Rezyklaten (LAGA, 2015)

Ein mögliches Verfahren ist das EuPhoRe®-Verfahren. Mittels des EuPhoRe®-Verfahren wird entwässert oder getrockneter Klärschlamm thermochemisch behandelt, so dass unmittelbar ein Rohstoff zur Herstellung von P-Düngemitteln gewonnen wird. Wird teilgetrockneter Klärschlamm (> 40 % TR) verwendet, ist das Verfahren energieautark. Der Reaktor ist vorzugsweise als geneigtes Drehrohr ausgebildet. An der erhöhten Seite werden Klärschlamm und Additive (Alkali- und/oder Erdalkalichloride) kontinuierlich zugeführt. Die Drehbewegung des Rohrreaktors befördert den Klärschlamm durch die Behandlungsschritte in Richtung Austrag. In der Gegenrichtung durchströmt heißes Rauchgas den Ofen. Nach der Klärschlamm- und Additivaufgabe wird dieser im ersten Segment des Reaktors von den heißen Gasen endgetrocknet. Der trockene Schlamm wird dann im zweiten Segment bei Temperaturen von circa 700 °C reduktiv behandelt. Dabei verbinden sich die Schwermetalle mit den Chloriden und die leichtflüchtigen verlassen das System mit der Gasphase. Dem letzten Segment werden sauerstoffhaltige, heiße Rauchgase im Gegenstrom zugeführt, wobei eine Verbrennung des Kohlenstoffs bei einer Temperatur bis 1.000 °C erfolgt. Dabei wird der Sauerstoff vollständig verbraucht und schwerer flüchtige Schwermetalle gehen in die Gasphase über. Die verbleibende Asche wird am unteren Ende des Reaktors über eine Kühlschnecke ausgetragen. Die Prozessgase verlassen den Drehrohrofen am oberen Teil des Ofens (Aufgabeseite) und werden einer Verbrennungskammer zugeführt, in der die Gase verbrannt werden. Ein Teil der heißen Verbrennungsgase wird geregelt, mit Luftsauerstoff angereichert und dem Reaktor wieder zugeführt. Der Rest der Verbrennungsgase gelangt zur Rauchgasreinigung, wo Staub und Schwermetalle abgeschieden werden und verlässt die Anlage über den Kamin. Die Asche ist schwermetallarm, frei von organischen Stoffen und kann nach Mahlen und Staubbinding als Phosphor-Dünger oder Ausgangsmaterial zur Düngerherstellung eingesetzt werden.

6. Datenzusammenstellung

6.1 Kläranlagen im Landkreis Fulda und der Gemeinde Haunetal

Für die Studie wurden alle 23 Städte und Gemeinden des Landkreises Fulda sowie die angrenzende Gemeinde Haunetal (Kreis Hersfeld-Rotenburg) berücksichtigt. Das untersuchte Gebiet ist weitgehend ländlich geprägt. Die Stadt Fulda ist mit ihren 70.011 Einwohnern (Stand 2022) die größte Kommune im Landkreis Fulda. Die nächst größeren Kommunen sind Künzell, Hünfeld und Petersberg mit jeweils rund 17.000 Einwohnern. Der Mittelwert für das betrachtete Gebiet liegt bei 9.700 Einwohnern. In der Abbildung 29 werden die Einwohnerzahlen per Stand 2022 gelistet.

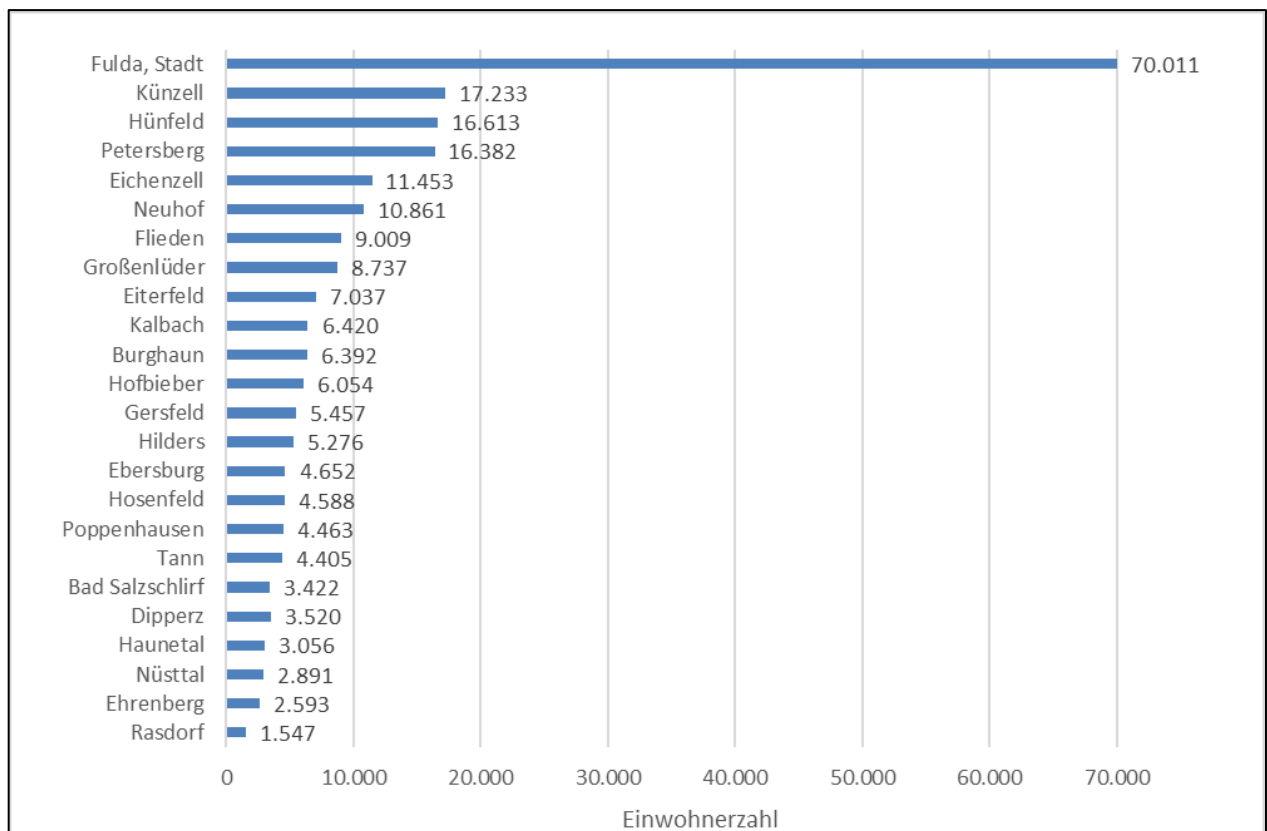


Abbildung 29: Einwohner der Städte und Gemeinden des Landkreises Fulda und Haunetal (2022)

Analog zu den Einwohnerzahlen gestalten sich zahlenmäßig die Ausbaugrößen der Kläranlagen. Die Kläranlage „Gläserzell“ (Fulda) stellt die größte Kläranlage im Landkreis Fulda mit 150.000 Einwohnerwerten (EW) dar. Viele der Kläranlagen haben eine Ausbaugröße unter 3.000 EW. Das 50 % Quantil liegt bei 1.850 EW, 80 % aller Kläranlagen sind kleiner als 7.500 EW. Die jeweiligen Kläranlagen sind in Abbildung 30 dargestellt.

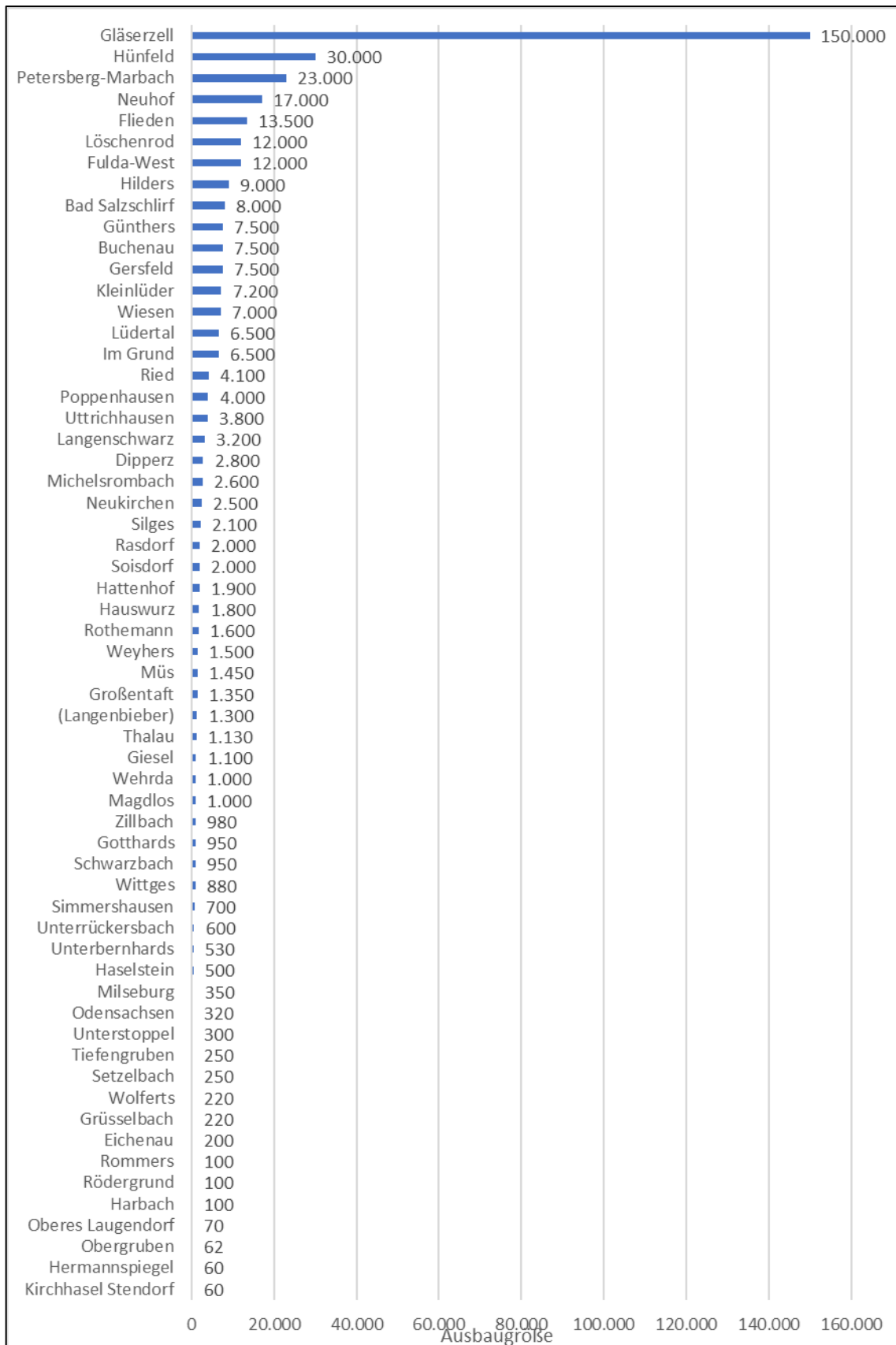


Abbildung 30: Kläranlagen im Landkreis Fulda und in der Gemeinde Haunetal mit den jeweiligen Ausbaugrößen

Kläranlagen werden gemäß der Abwasserverordnung entsprechend ihrer Ausbaugröße in Größenklassen (GK) untergliedert. Die Größenklassen sind nach den Werten in Tabelle 14 gegliedert.

Tabelle 14: Größenklassen mit jeweiliger Ausbaugröße

Größenklasse (GK)	Ausbaugröße (EW)
GK 1	< 1.000 EW
GK 2	1.000 – 5.000 EW
GK 3	5.001 – 10.000 EW
GK 4	10.001 – 100.000 EW
GK 5	> 100.000 EW

Die Kläranlagen des Landkreises Fulda und der Gemeinde Haunetal unterteilen sich auf alle fünf Größenklassen. Die größte Kläranlage „Gläserzell“ ist die einzige Kläranlage der Größenklasse 5. Die meisten untersuchten Kläranlagen sind der Größenklasse 2 zugeordnet, gefolgt von Größenklasse 1. Eine Zuordnung der insgesamt 60 Kläranlagen im Untersuchungsgebiet findet sich in Tabelle 15.

Tabelle 15: Anzahl der Kläranlagen je Größenklasse

Größenklasse (GK)	Anzahl
GK 1	23
GK 2	21
GK 3	9
GK 4	6
GK 5	1

Die Größenklasse mit der größten Anzahl an angeschlossenen Einwohnern bildet die Größenklasse 5 mit 150.000 Einwohnerwerten (EW), gefolgt von der Größenklasse 4 mit einer Anzahl von rund 105.000 Einwohnerwerten (EW). Die kleineren Kläranlagen der Größenklassen 1 und 2 machen prozentual einen Anteil von rund 14 % der gesamten Einwohnerwerte für die Region aus. Abbildung 31 können die Einwohnerwerte je Größenklasse im prozentualen Verhältnis entnommen werden.

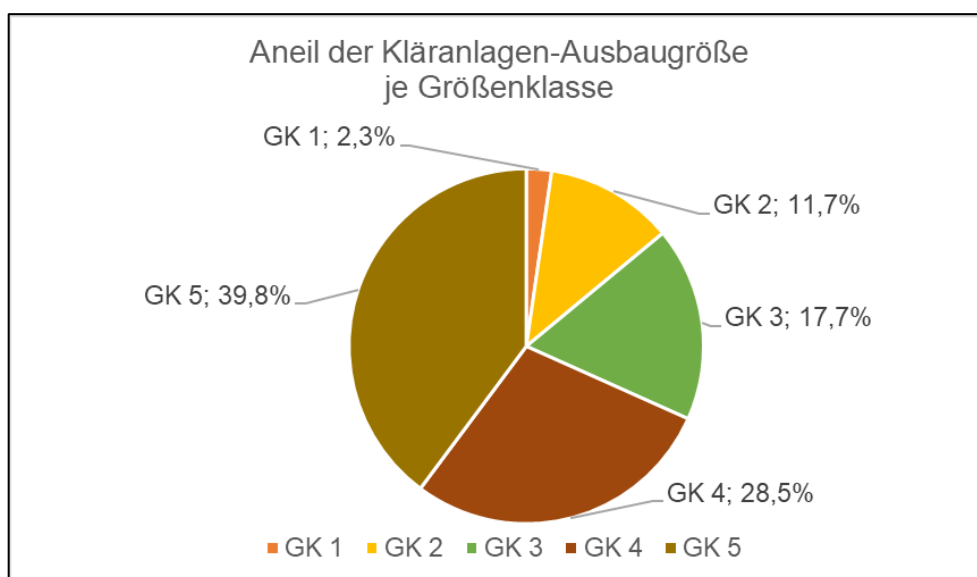


Abbildung 31: Anteil der Kläranlagen-Ausbaugröße je Größenklasse

In den folgenden Diagrammen (Abbildungen 32-35) sind die einzelnen Kläranlagen mit ihrer jeweiligen Ausbaugröße nach Größenklasse im Säulendiagramm dargestellt.

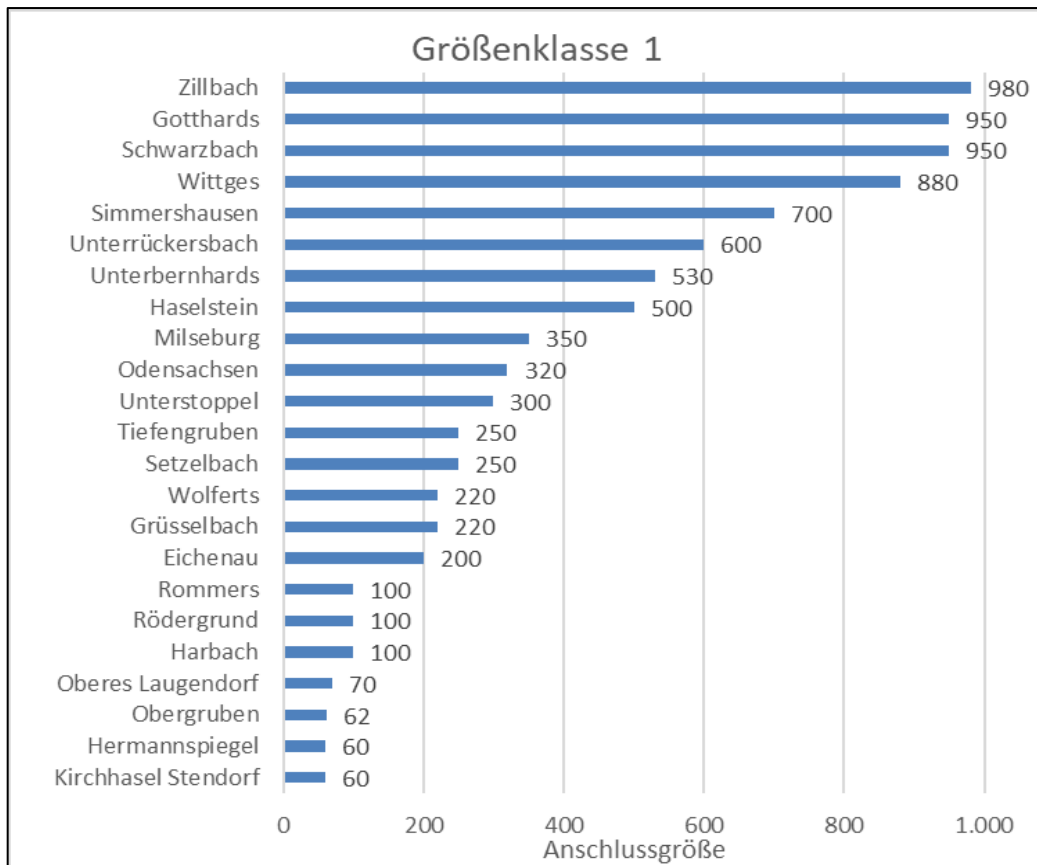


Abbildung 32: Kläranlagen der Größenklasse 1 mit jeweiliger Ausbaugröße

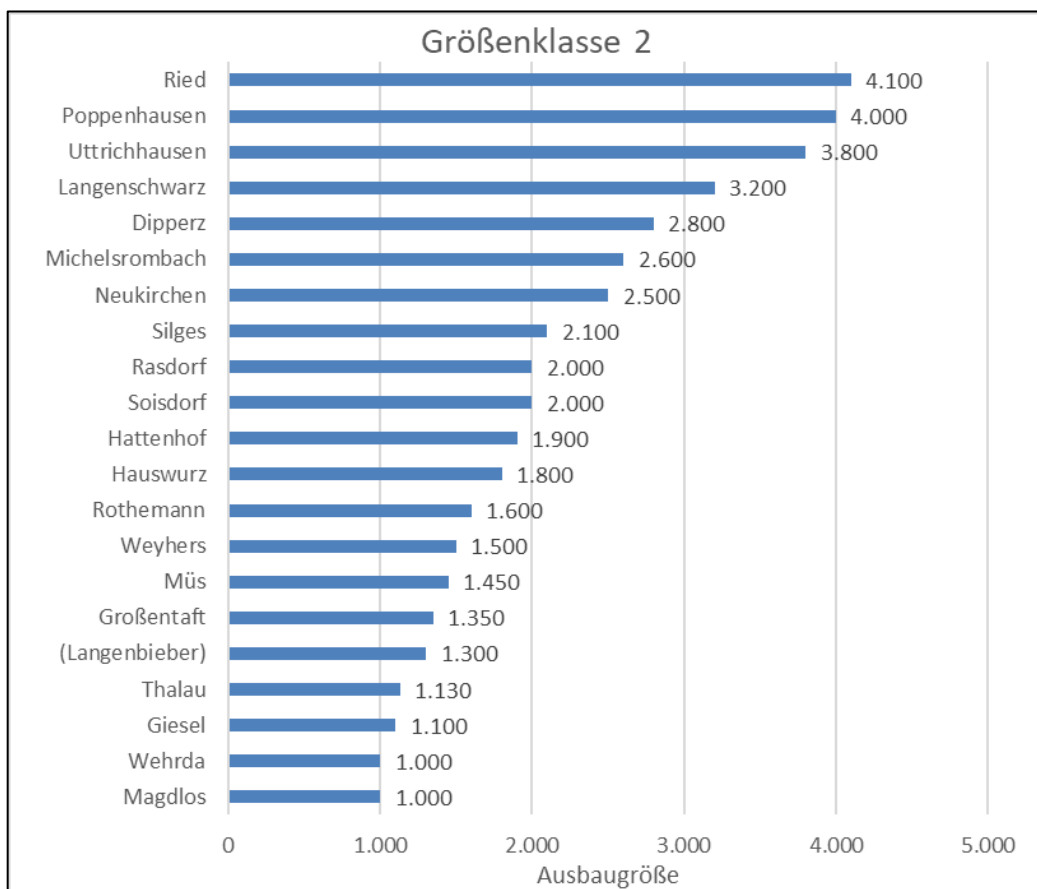


Abbildung 33: Kläranlagen der Größenklasse 2 mit jeweiliger Ausbaugröße

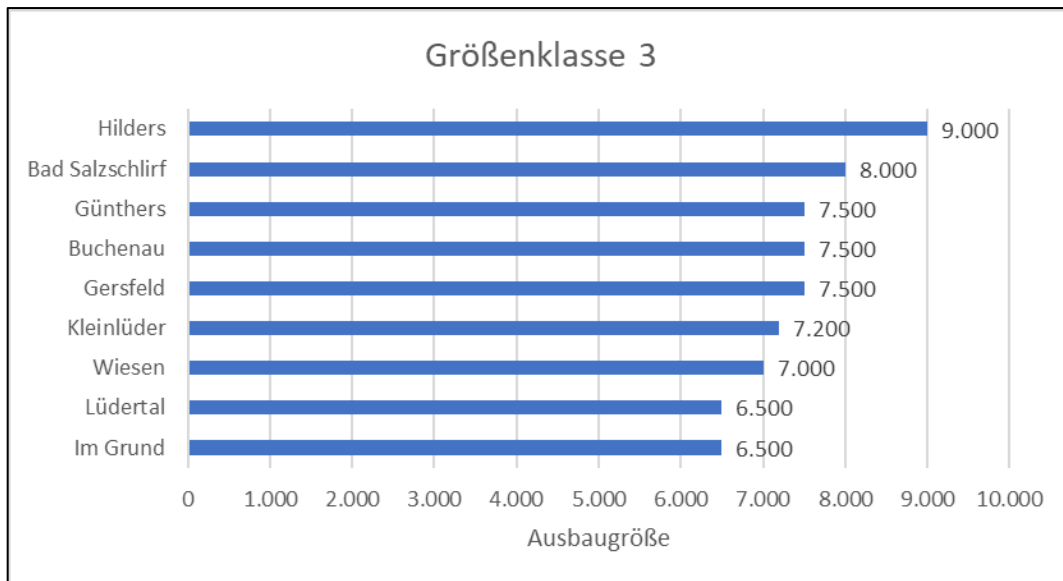


Abbildung 34: Kläranlagen der Größenklasse 3 mit jeweiliger Ausbaugröße

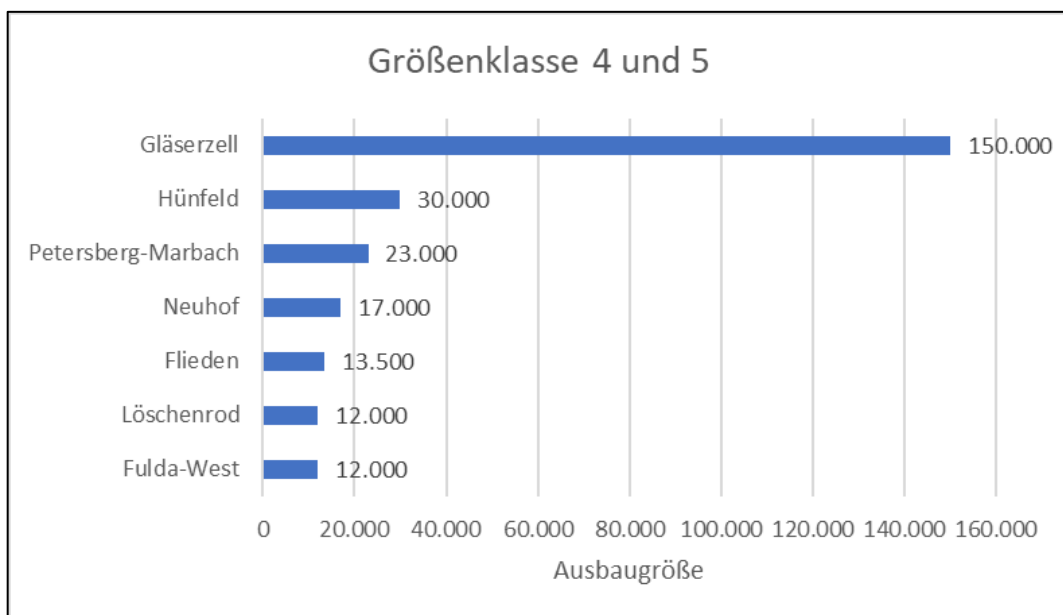


Abbildung 35: Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 mit jeweiliger Ausbaugröße

Die jeweilige Ausbaugröße und Lage der einzelnen Kläranlagen sind in der Karte von Abbildung 36 dargestellt. Die Farben stellen jeweils das Reinigungsverfahren der Kläranlage dar:

- Braun: Belebungsanlagen
- Grün: Teichkläranlagen
- Blau: Anlagen nach dem BIOCOS®-Verfahren
- Magenta: SBR-Anlagen
- Rot: Rotationstauchkörper-, Tropfkörperanlagen

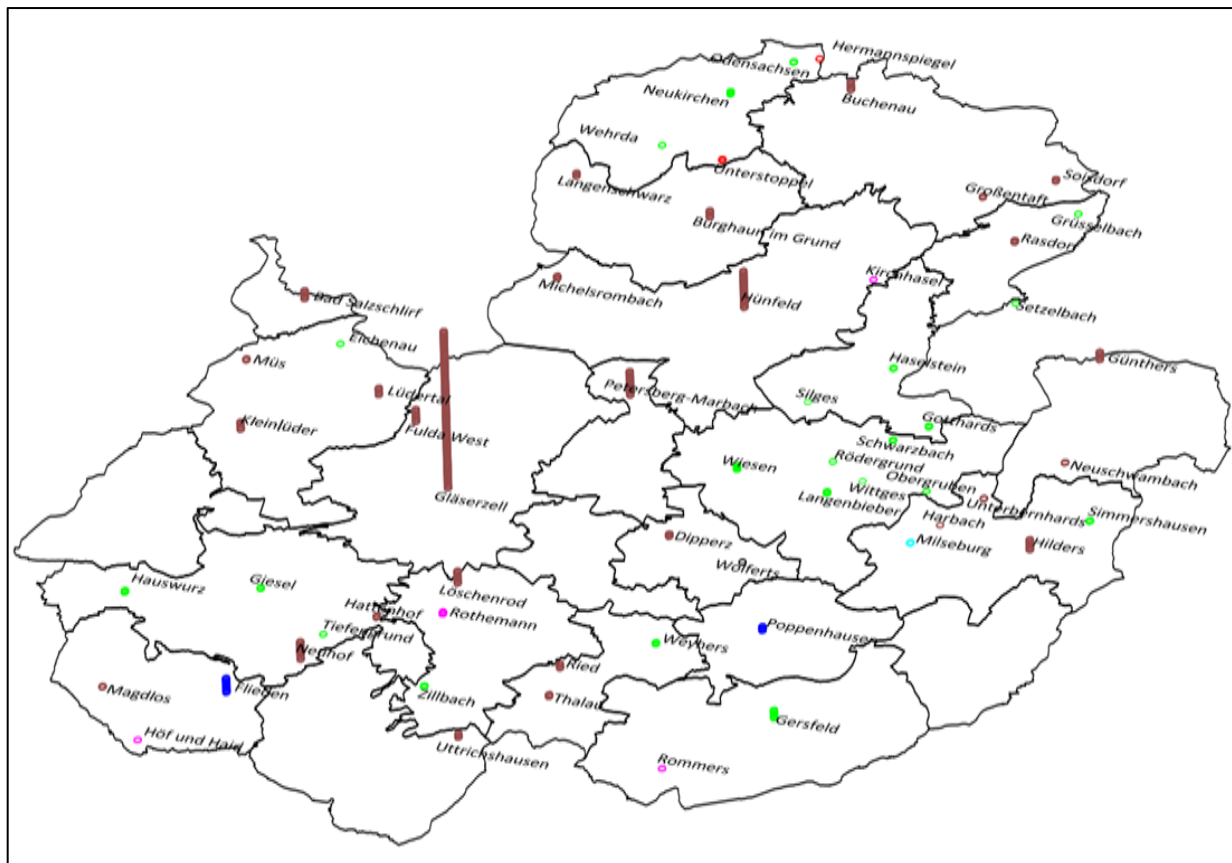


Abbildung 36: Ausbaugröße und Reinigungsverfahren je Kläranlage (braun = Belebungsanlage; grün = Teichkläranlage; blau = BIOCOS®-Verfahren; magenta = SBR-Anlage; rot = Rotationstauchkörper, Tropfkörper)

Tabelle 16: Ausbaugröße und Anzahl der Kläranlagen je Reinigungsverfahren (Stand 2022)

Anlagenart	Einwohnerwerte	Anzahl
Belebungsanlage	322.760	27
SBR-Anlage	1.830	4
Rotationstauchkörper/Tropfkörper	1.030	5
Teichkläranlage	28.562	21
BIOCOS®-Verfahren	17.500	2
Sonstiges (Festbett)	2.000	1

Im Landkreis befindet sich eine Kläranlage aktuell im Umbau (Kläranlage „Wiesen“ in Hofbieber) und bei einer weiteren ist der Umbau in Planung (Kläranlage „Gersfeld“ der Stadt Gersfeld). Hierbei handelt es sich um zwei Teichkläranlagen welche zu BIOCOS®-Anlagen umgebaut werden. Die Kläranlage „Langenbieber“ soll nach Fertigstellung der Kläranlage „Wiesen“ an diese angeschlossen und aufgegeben werden. Die Anlagenänderungen können der Tabelle 17 entnommen werden.

Tabelle 17: Ausbaugröße und Anzahl der Kläranlagen je Reinigungsverfahren nach Umbau

Anlagenart	Einwohnerwerte	Anzahl
Belebungsanlage	322.760	27
SBR-Anlage	1.830	4
Rotationstauchkörper/Tropfkörper	1.030	5
Teichkläranlage	16.262	18
BIOCOS®-Verfahren	30.200	4
Sonstiges (Festbett)	2.000	1

6.2 Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgte mittels Fragebogen. Dieser wurde von der unteren Wasserbehörde zunächst an die Kläranlagen über 5.000 EW versendet und anschließend in einer gekürzten Version an *kleinere* Kläranlagen weitergeleitet. Insgesamt wurden 28 Erhebungsbögen ausgegeben. Es haben sich 80 % aller Kläranlagen über 5.000 Einwohnerwerten beteiligt. Neben Fragebögen wurden Daten auch bei einer Vor-Ort-Besichtigung erhoben. Bei den Besichtigungen wurden mit dem Personal die örtlichen Probleme angesprochen, Optimierungspotential und freie Flächen für Erweiterungen eruiert. Es wurden Kläranlagen jeder Größenklasse besichtigt, Hauptaugenmerk lag jedoch bei den Anlagen über 5.000 Einwohnerwerten und Anlagen, welche neu errichtet wurden. In Abbildung 37 ist zu sehen, dass bei den größeren Anlagen nahezu alle besichtigt wurden. Auf diesen Anlagen fällt der Großteil des Klärschlammes der untersuchten Region an.

Tabelle 18: Besichtigte Kläranlagen nach Größenklasse

Größenklasse	Anzahl	Anzahl besichtigte KA
1	23	3
2	21	4
3	9	7
4	6	4
5	1	1

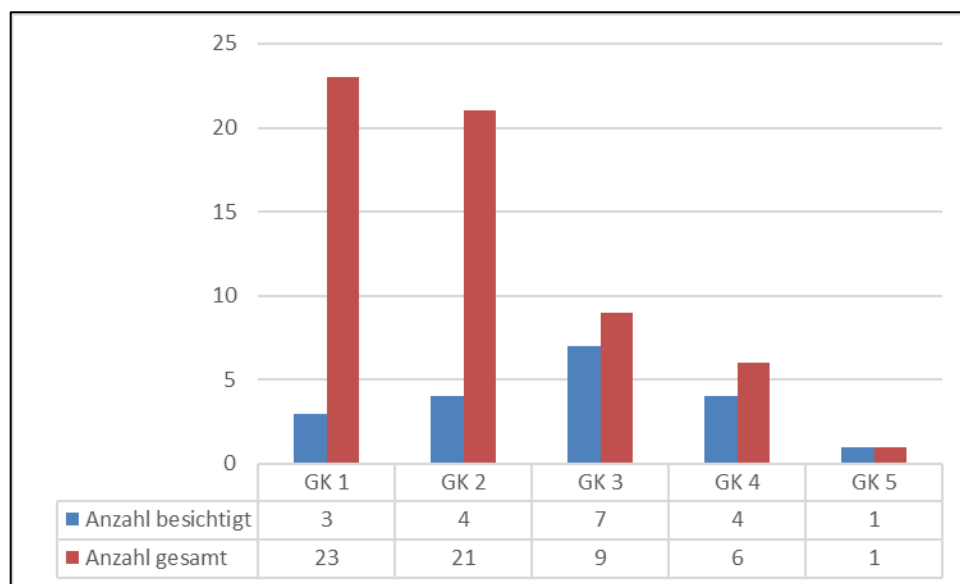


Abbildung 37: Anteil der besichtigten Kläranlagen an der Gesamtanzahl im Landkreis Fulda und Haunetal

In der Größenklasse 4 wurden die Kläranlagen „Peterberg-Marbach“ und „Fulda-West“ nicht besichtigt. Diese Anlagen verfügen über keine eigene Klärschlammbehandlung und der Schlamm wird auf die größte Kläranlage des Abwasserverbandes Fulda nach Gläserzell transportiert.

6.2.1 Bestehende Kooperationen

Im Landkreis Fulda bestehen bereits einige Kooperationen zwischen Kommunen für eine gemeinsame Klärschlamm Entsorgung. So wird der Klärschlamm der Kläranlage „Hilders“ an die Kläranlage „Hünfeld“ geliefert, wo der Schlamm dem Faulturn zuggeführt und anschließend weiterverarbeitet wird. Der Klärschlamm der Kläranlagen „Kleinlöder“, „Bad Salzschlirf“ und „Burghaun“ werden extern auf die Kläranlage in Schlitz im Vogelsbergkreis verbracht. Die Kläranlage im Lüdertal hat eine eigene Vererdungsanlage, die unter anderem den Klärschlamm

der Kläranlage „Müs“ aufnimmt und zwar in den Zeiträumen, in denen das landwirtschaftliche Ausbringverbot greift. Für die nähere Zukunft ist eine Zusammenarbeit des Abwasserverbandes Fulda und des Abwasserverbandes Oberes Fuldataal angedacht.

6.2.2 Aktuelle Klärschlamm Entsorgung

Aktuell wird der Schlamm auf den unterschiedlichsten Wegen entsorgt. In Tabelle 19 sind die jeweiligen Entsorgungsmengen in t TS/a dargestellt. Unter die Rubrik *sonstige Wege* werden Kooperationen mit anderen Kläranlagen und die Vererdung gefasst. Die Klärschlamm mengen sind in der nachfolgenden Karte dargestellt (vgl. Abbildung 38). Die Farben stehen hier für die verschiedenen Entsorgungswege. Grün steht für eine landwirtschaftliche Verwertung, rot für die thermische Entsorgung, magenta für eine externe Verbringung, braun für die Vererdung und schwarz ist ohne Angabe.

Tabelle 19: Verwertungswege mit entsorgter Klärschlammmenge

Verwertungsweg	Klärschlammmenge t TS/a
Landwirtschaft	2.573
Verbrennung	2.131
Mitverbrennung	24
Sonstige Wege	695

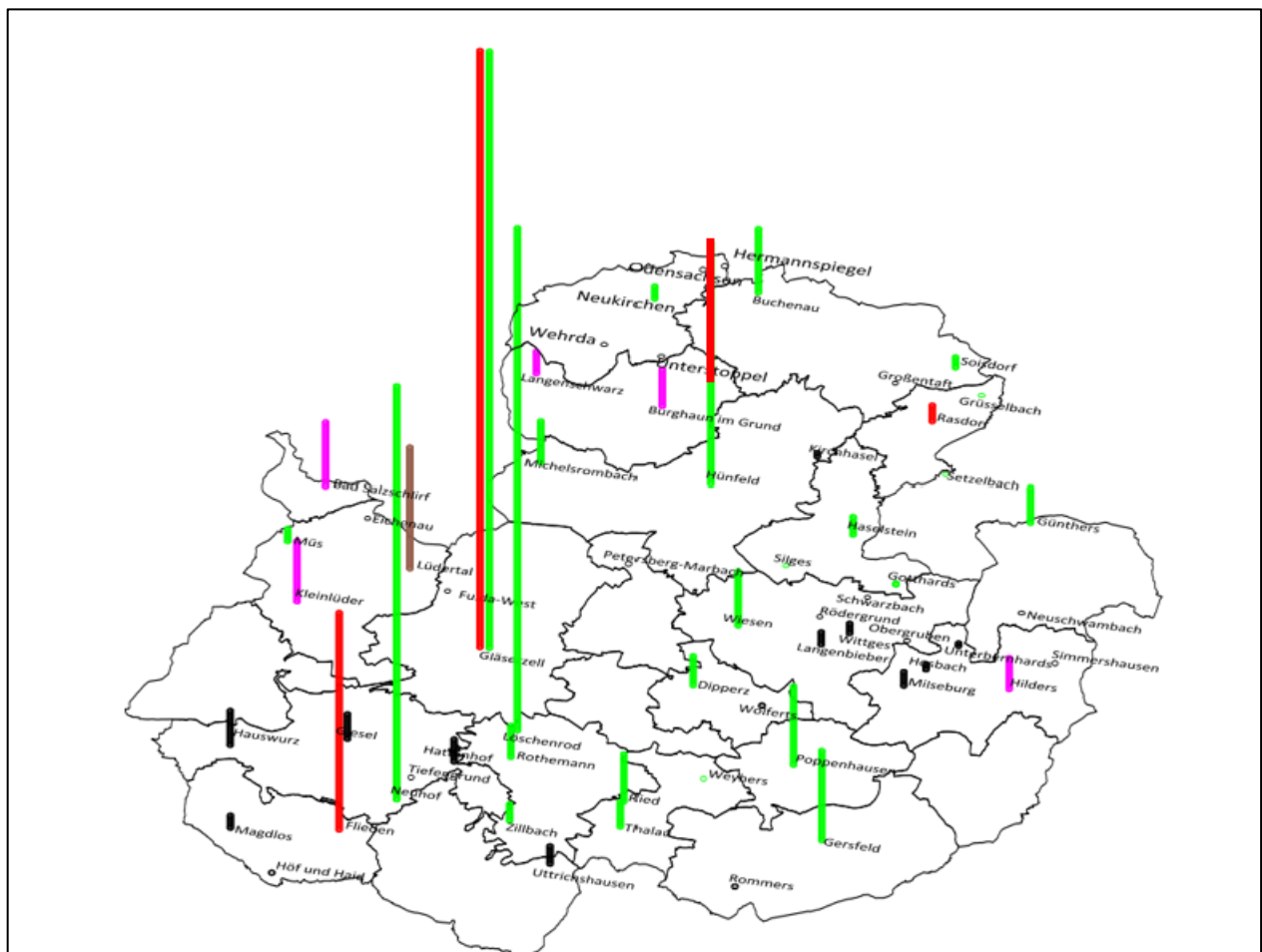


Abbildung 38: Klärschlammmenge der einzelnen Kläranlagen inklusive Verwertungsweegen

Die Abbildung 39 verweist auf die Klärschlamm mngen der einzelnen Kläranlagen in Tonne Trockenmasse pro Jahr.

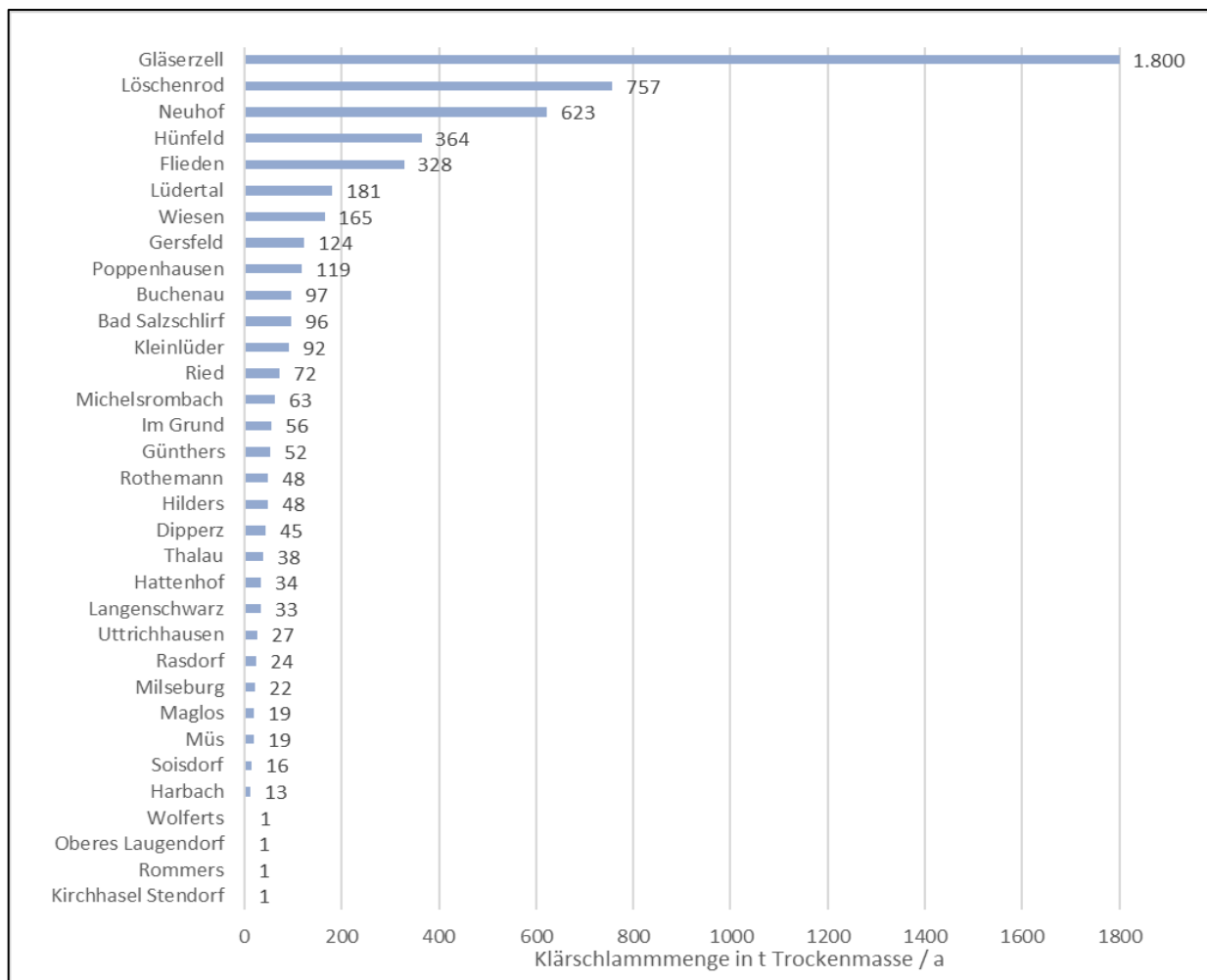


Abbildung 39: Klärslammengen der einzelnen Kläranlagen in Tonne TM pro Jahr

Insgesamt ergibt sich für das untersuchte Gebiet eine Klärslammmenge von 5.378 t TS pro Jahr, welche kontinuierlich anfällt. Auf den Teichkläranlagen fällt der Klärslamm hingegen periodisch an. Es wurde eine Entleerung alle 5 Jahre angenommen. Das Ergebnis des diskontinuierlichen Schlammanfalles kann der Tabelle 20 für insgesamt elf Kläranlagen entnommen werden und umfasst eine Summe von 45,8 t TS pro Jahr. Daraus resultiert eine **Gesamtmenge an Klärslamm von rund 5.400 t TS pro Jahr.**

Tabelle 20: Klärslammmenge in Tonne TM pro Jahr als diskontinuierlicher Schlammanfall

Kläranlage	Kommune / Verband	Tonnen TS/a
Eichenau	Großenlüder (Eigenbetrieb)	0,2
Gotthards	Nüsttal	2,6
Wittges	Hofbieber	3,0
Grüsselbach	Rasdorf	3,0
Setzelbach	Rasdorf	3,0
Weyhers	Ebersburg (AbwV Oberes Fuldata)	3,6
Neukirchen	Hauneck	3,9
Zillbach	Eichenzell (AbwV Oberes Fuldata)	5,1
Haselstein	Nüsttal	5,5
Giesel	Neuhof	7,6
Silges	Nüsttal	8,3

6.2.3 Klärschlammengen nach Größenklassen

Der meiste Klärschlamm in der Region des Landkreises Fulda fällt auf Anlagen der Größenklasse 4 an und macht einen Anteil von rund 38 % aus. Eine Aufstellung der Mengen kann der Tabelle 21 entnommen werden. Es wird darauf hingewiesen, dass in den Schlammengen der Kläranlage „Gläserzell“ (Größenklasse 5) die Schlammengen der Kläranlagen „Fulda-West“ (Größenklasse 4) und „Petersberg-Marbach“ (Größenklasse 4) enthalten sind.

Tabelle 21: Klärschlammfall je Größenklasse

Größenklasse	Klärschlammfall [t TS/a]	Anzahl Kläranlagen
GK 1	79,6 t TS/a	23
GK 2	561,8 t TS/a	21
GK 3	909,2 t TS/a	9
GK 4	2.072,7 t TS/a	6
GK 5	1.800 t TS/a	1

6.2.4 Klärschlammengen nach Reinigungsverfahren

Der Klärschlammfall hängt von der Reinigungsleistung der Kläranlage, der Betriebsweise und auch dem Reinigungsverfahren ab. In der folgenden Tabelle 22 ist der Klärschlammfall auf die einzelnen Reinigungsverfahren aufgeteilt (KS-Menge für alle untersuchten Kläranlagen). Auf den technischen Anlagen fällt pro Einwohner mehr Schlamm als auf den Teichkläranlagen an. Hierbei ist aber die Reinigungsleistung oft nicht mit der von technischen Anlagen zu vergleichen. Ein geringerer Schlammfall sollte nicht auf Kosten der Reinigungsleistung erfolgen. Einige der Teichkläranlagen werden in den nächsten Jahren umgebaut (vgl. Tabellen 16 und 17).

Tabelle 22: Kläranlagen je Reinigungsverfahren (Stand 2022)

Reinigungsverfahren	Tonnen TS pro Jahr	Kilogramm TS/EW pro Jahr	Einwohnerwerte (EW)	Anzahl
Belebung	4.791	14,8	322.760	27
SBR-Anlage	49	27,0	1.830	4
Rotationstauchkörper/Tropfkörper	25	26,5	1.030	5
Teichkläranlage	173	5,9	28.562	21
BIOCOS®-Verfahren	361	22,2	17.500	2
Sonstiges (Festbett)	24	12,2	2.000	1

6.2.5 Klärschlammanalysen

Neben der Klärschlammmenge wurden auch die Klärschlammanalysen der einzelnen Kläranlagen untersucht (Zeitraum 2018-2021). Augenmerk wurde hierbei auf die Grenzwerte in Hinblick auf die Düngemittelverordnung und der Klärschlammverordnung gelegt. Es wurden 25 Kläranlagen und deren Klärschlammanalysen überprüft. Bis auf einige Ausreißer werden die Grenzwerte bei den meisten Kläranlagen eingehalten. In den folgenden Abbildungen sind die einzelnen Parameter grafisch dargestellt, inklusive der Schwankungsbreite und Mittelwert über die gesamten Kläranlagen. In Abbildung 40 sind die Werte aus den verschiedenen Klärschlammanalysen der 25 Kläranlagen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Mittel die Grenzwerte der Klärschlamm- und Düngemittelverordnung nicht überschritten werden. Der Schwankungsbereich zeigt bei Nickel Überschreitungen an (Vgl. Abbildung 40). Diese sind auf

den Kläranlagen „Rasdorf“ und „Bad Salzschlirf“ zu verzeichnen gewesen. Die anderen Grenzwerte werden von allen Kläranlagen eingehalten.

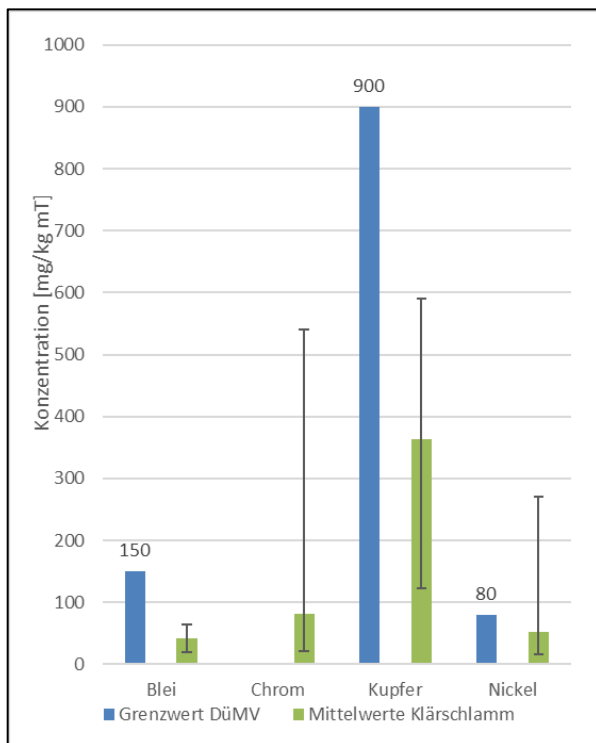


Abbildung 40: Klärschlammanalysen für Blei, Chrom, Kupfer und Nickel

In Abbildung 41 ist der Mittelwert der Kläranlagen für Zink inklusive Schwankungsbreite dargestellt. Für Zink sind in der Klärschlamm- und Düngemittelverordnung keine Grenzwerte festgelegt. Der Mittelwert liegt bei einer Zinkkonzentration bei knapp unter 1.000 mg/kg mT.

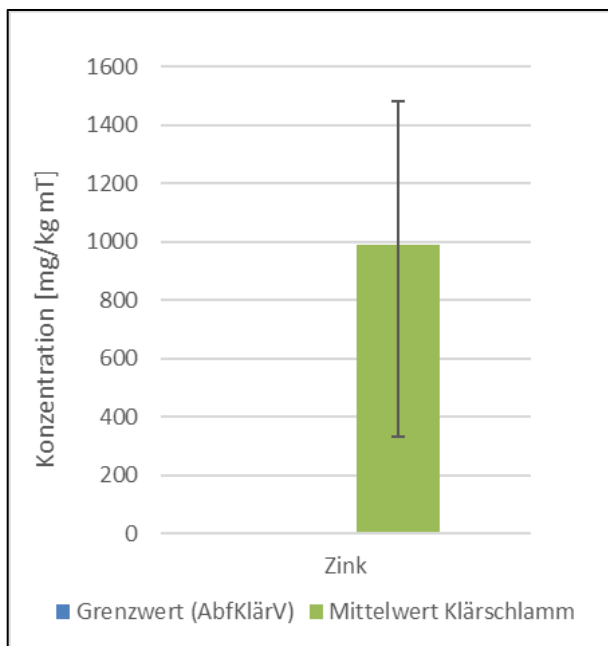


Abbildung 41: Klärschlammanalysen für Zink

Bei Cadmium liegt der Grenzwert nach Klärschlammverordnung bei 1,5 mg/kg mT. Der Grenzwert wird von der Kläranlage „Rasdorf“ überschritten, was auf unterschiedlichste Kleineinleiter im Einzugsgebiet zurückzuführen ist. Alle weiteren untersuchten Kläranlagen halten den Wert ein (vgl. Abbildung 42).

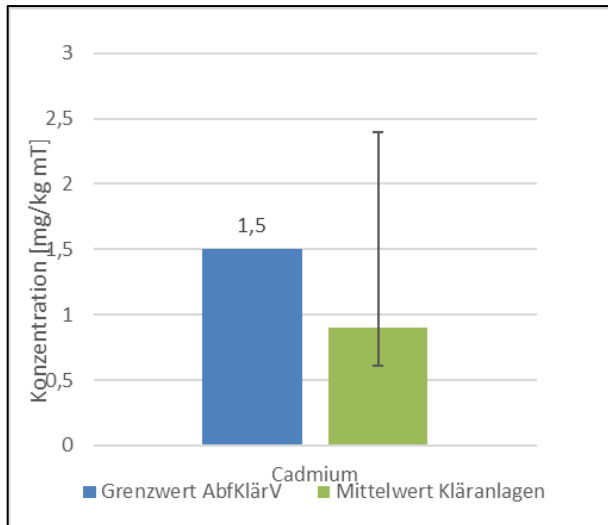


Abbildung 42: Klärschlammanalysen für Cadmium

In Abbildung 43 ist die Auswertung adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX) zu sehen. Am Schwankungsbereich ist zu erkennen, dass es zu einer Überschreitung des Grenzwertes von 400 mg/kg mT kommt. Diese ist auf der Kläranlage „Hilders“ zu finden und ist einmal bei den untersuchten Klärschlammanalysen aufgetreten.

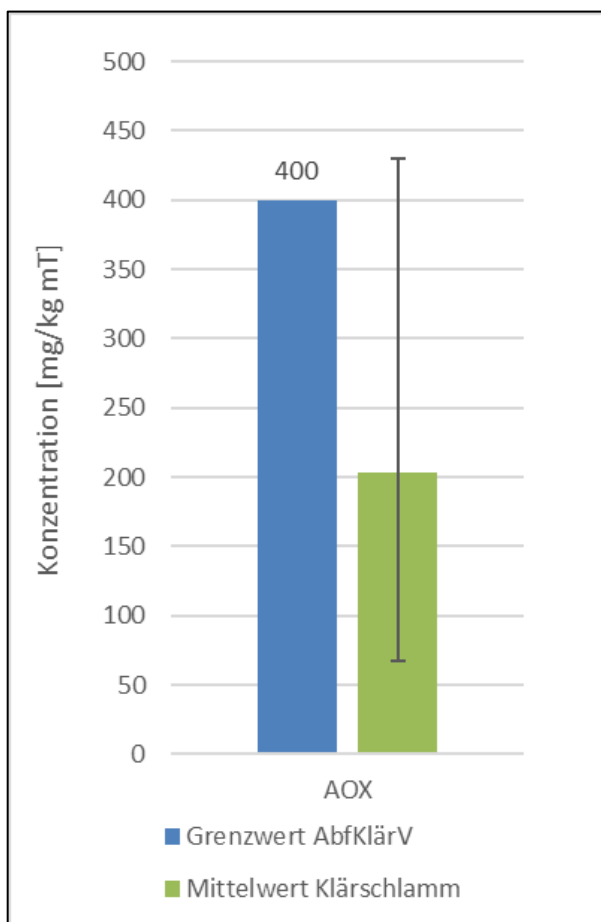


Abbildung 43: Klärschlammanalysen für AOX

Die untersuchten Klärschlammanalysen halten alle den Grenzwert für Quecksilber ein, wie in Abbildung 44 zu sehen ist. Der Mittelwert liegt mit 0,3 mg/kg mT.

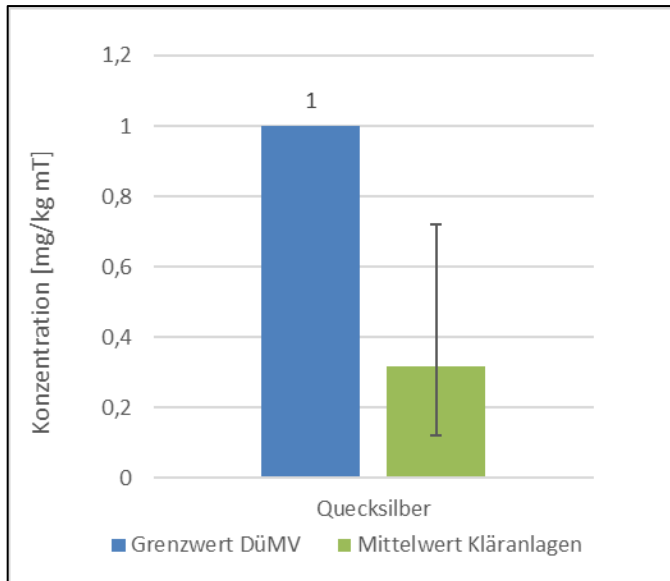


Abbildung 44: Klärschlammanalysen für Quecksilber

6.2.6 Phosphor-Potential

Neben den einzuhaltenden Schwermetallgrenzwerten ist der Phosphorgehalt eines Klärschlammes von Bedeutung. Durch die Klärschlammverordnung soll die Versorgungssicherheit mit Phosphor gesichert werden (Ewens, 2018). In der Klärschlammverordnung ist eine Phosphor-Recycling Pflicht ab 20 g / kg Phosphor TM und Verbot einer Mitverbrennung wie z. B. in einem Zementwerk. Der Phosphor soll so im Kreislauf gehalten werden und nicht im Beton „verloren“ gehen. Abbildung 45 kann die Auswertung des Phosphorgehaltes aus den Klärschlammanalysen entnommen werden.

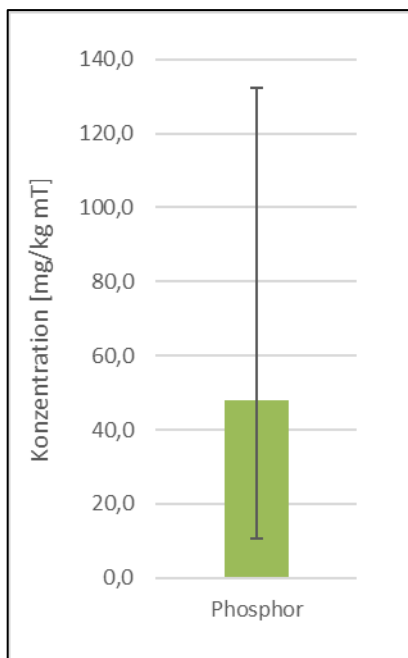


Abbildung 45: Klärschlammanalysen für Phosphor

Im Landkreis fallen etwa **153 t Phosphor pro Jahr** an. Bei Kläranlagen ohne Angabe wurden 2 % Phosphor-Gehalt im Schlamm angenommen. Eine regionale Phosphorrückgewinnung wird im zentralen Konzept (Kapitel 7.7) der Studie näher betrachtet.

6.2.7 Kapazitäten

Im Rahmen der Datenerhebung wurden ebenfalls die Kapazitäten für Lagerung, Entwässerung und Trocknung abgefragt. Die Kapazitäten sind in der folgenden Abbildung 46 dargestellt. Die Differenz zwischen dem roten und grünen Balken stellen die Unter- und Überkapazitäten in der Schlamm Lagerung für ein Jahr dar.

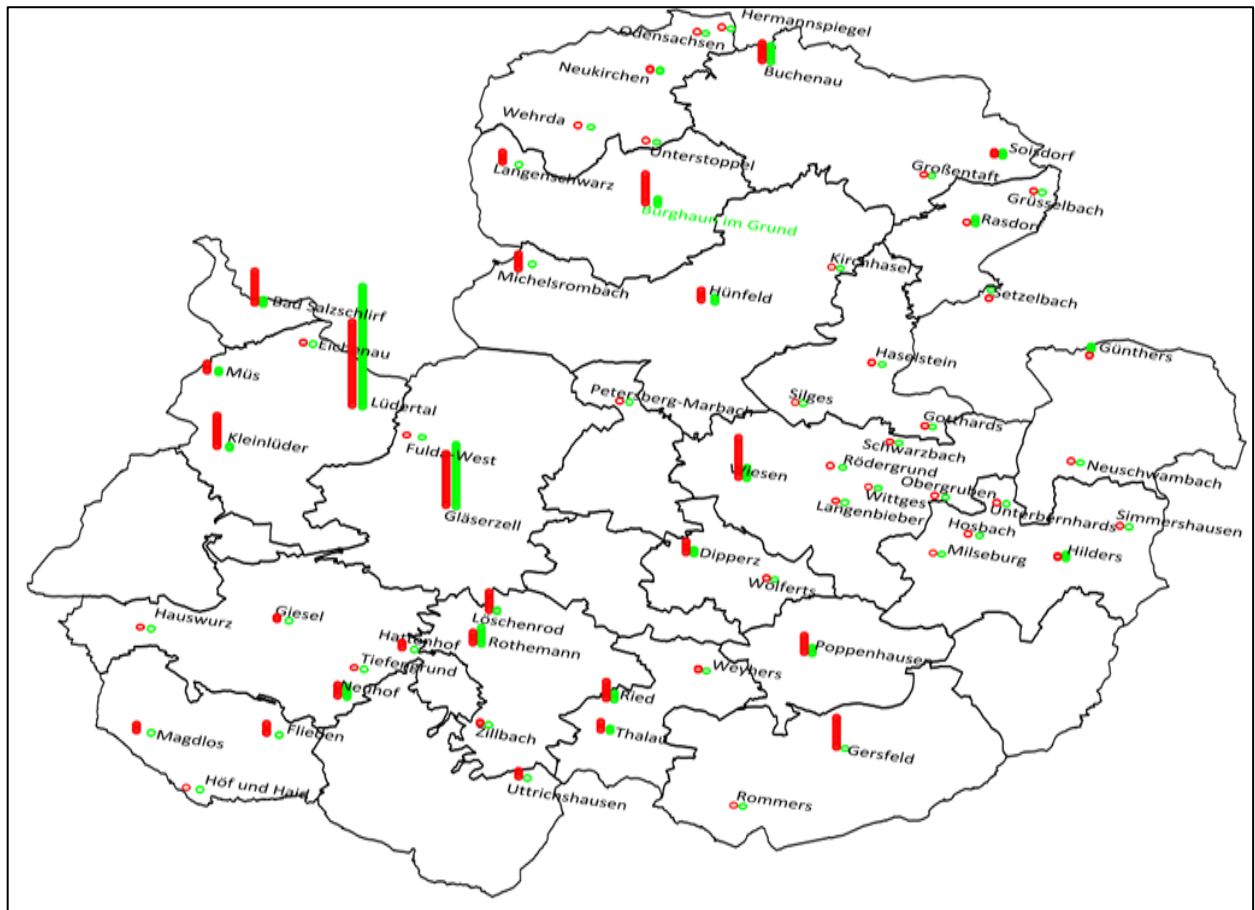


Abbildung 46: Kapazitäten in der Schlamm Lagerung

6.2.7.1 Lagerkapazitäten

Auf jeder Kläranlage sind Lagermöglichkeiten für den Schlamm vorhanden. Diese unterscheiden sich in die Art des zu lagernden Schlamms und des Volumens. Besonderheiten stellen einige Kläranlagen dar. Hierzu zählen unter anderem die Kläranlagen in Gläserzell, Bad Salzschlirf, Flieden, Lüdertal und Rasdorf. Die Kläranlage in Gläserzell verfügt über ein Lager für Klärschlamm in Münsterfeld (Stadt Fulda) mit einem zu lagernden Volumen von 7.500 m³. In Bad Salzschlirf steht die Schlamm Lagerhalle leer, da die Gemeinde Bad Salzschlirf den Schlamm im *nassen* Zustand nach Schlitz fährt. In Flieden stellt sich das Gegenteil dar. Hier sind Stellplätze für zwei Container vorhanden und ein weiterer Stellplatz als Standfläche für zwei Container. Hier müssen eine Entleerung und der Austausch der Container regelmäßig stattfinden. Puffer bieten die beiden Eindicker mit einem Volumen von jeweils 600 m³ (vor der Entwässerung). Im Lüdertal ist eine Klärschlammvererdung vorhanden. Der Schlamm wird auf dem Gelände der Kläranlage voreingedickt und anschließend in die Vererdung gepumpt. Diese besteht aus drei Becken, welche zeitlich unabhängig voneinander geräumt werden können. Die Kläranlage „Rasdorf“ verfügt über sechs Trockenbeete, in welchen bis zu 50 % TS erreicht werden können. Als Zwischenlager für Nassschlamm eignet sich zusätzlich der Schlammspeicher auf der Kläranlage „Rothemann“.

6.2.7.2 Faulungskapazitäten

Im Landkreis Fulda befinden sich drei Faulungsanlagen auf Kläranlagen im Bestand. Diese existieren auf den Kläranlagen in Gläserzell, Hünfeld und in Neuhof. Für die Fuldaer Kläranlage in Gläserzell wie auch für die Kläranlage in Hünfeld gibt es keine Angaben über die Auslastung der Faulung. Es wird aufgrund der Belastungssituation und Ausgliederung der Molkerei und Bau einer eigenen Kläranlage von einem Kapazitätswolumen von 15.000 EW ausgegangen. Dies entspricht etwas weniger als der Hälfte der Kläranlage. Auf der Kläranlage der Gemeinde Neuhof befindet sich ebenfalls ein Faulturm. Dieser ist etwa zur Hälfte ausgelastet und hätte Kapazitäten für 15.000 EW. Diese Kapazität ist im Faulturm vorhanden, jedoch kann die Kläranlage die Rückbelastung nicht verarbeiten, laut Aussage des zuständigen Abwassermeisters.

6.2.7.3 Entwässerungskapazitäten

Auf den Kläranlagen in Hünfeld und in Flieden stehen Entwässerungskapazitäten zur Verfügung. Die Entwässerung in „Hünfeld“ wird an zwei Tagen in der Woche in Betrieb genommen und steht die restliche Woche still. Auf der Kläranlage „Hilders“ ist eine Kammerfilterpresse vorhanden, welche seit ein paar Jahren nicht mehr in Betrieb ist.

6.2.7.4 Trocknungskapazitäten

Im Landkreis Fulda ist eine Trocknungsanlage für Klärschlamm vorhanden. Diese befindet sich in Rasdorf, dargestellt durch Trockenbeete. Diese sollten nur für die eigene Kläranlage genutzt werden. Der Grund hierfür ist - neben dem Lagervolumen - die hohe Schwermetallbelastung des Schlammes der Kläranlage und die dadurch notwendige thermische Verwertung.

7. Regionenkonzepte

Für eine bessere Übersichtlichkeit der einzelnen Kläranlagen wurde das untersuchte Gebiet, bestehend aus dem Landkreis Fulda und der Gemeinde Haunetal, in sechs Regionen unterteilt. Die Einteilung erfolgte unter Berücksichtigung der Lage, der bereits gebildeten Kooperationen und der Klärschlammengen.



Abbildung 47: Einteilung des Landkreises Fulda und der Gemeinde Haunetal in Regionen

Jede Region für sich weist hierbei Besonderheiten auf. Die Region Nord ist überwiegend ländlich geprägt, wobei die Kläranlagen „Hünfeld“ die größte Kläranlage der Region ist. Die Region Ost zeichnet sich durch eine Vielzahl an Kläranlagen der *kleineren* Größenklassen aus. Die größten Kläranlagen stellen „Hilders“ und „Günthers“ dar. Mit den Kläranlagen „Poppenhausen“ und „Wiesen“ sind in der Region zwei neue Kläranlagen nach Umbau zu finden. Die Region Süd ist durch den Abwasserverband Oberes Fuldataal geprägt. Region Südwest gliedert sich in zwei Gemeinden, nämlich Neuhaus und Fliesen. Beide Gemeinden betreiben zwei größere Kläranlagen und weitere kleine Anlagen. In Neuhaus befindet sich auf dem Kläranlagengelände ein Faulturm.

In der Region West ist auf dem Gelände der Kläranlage „Lüdertal“ eine Schlammvererdung zu finden. In diese wird der Klärschlamm von der Kläranlage „Lüdertal“ sowie in den Wintermonaten von der Kläranlage „Müs“ verbracht. Die restlichen Kläranlagen entsorgen ihren Klärschlamm extern auf der Kläranlage „Schlitz“. In der Region Mitte ist die größte Kläranlage „Gläserzell“ des Landkreises Fulda ansässig. Die weiteren Kläranlagen in Marbach und Malkes sind ebenfalls dem Abwasserverband Fulda zugeordnet. In Abbildung 48 ist der allgemeine Ablauf der Konzeptbetrachtung dargestellt. Jeder der genannten Verfahrensschritte wird auf seine Machbarkeit für die einzelnen Regionen geprüft.

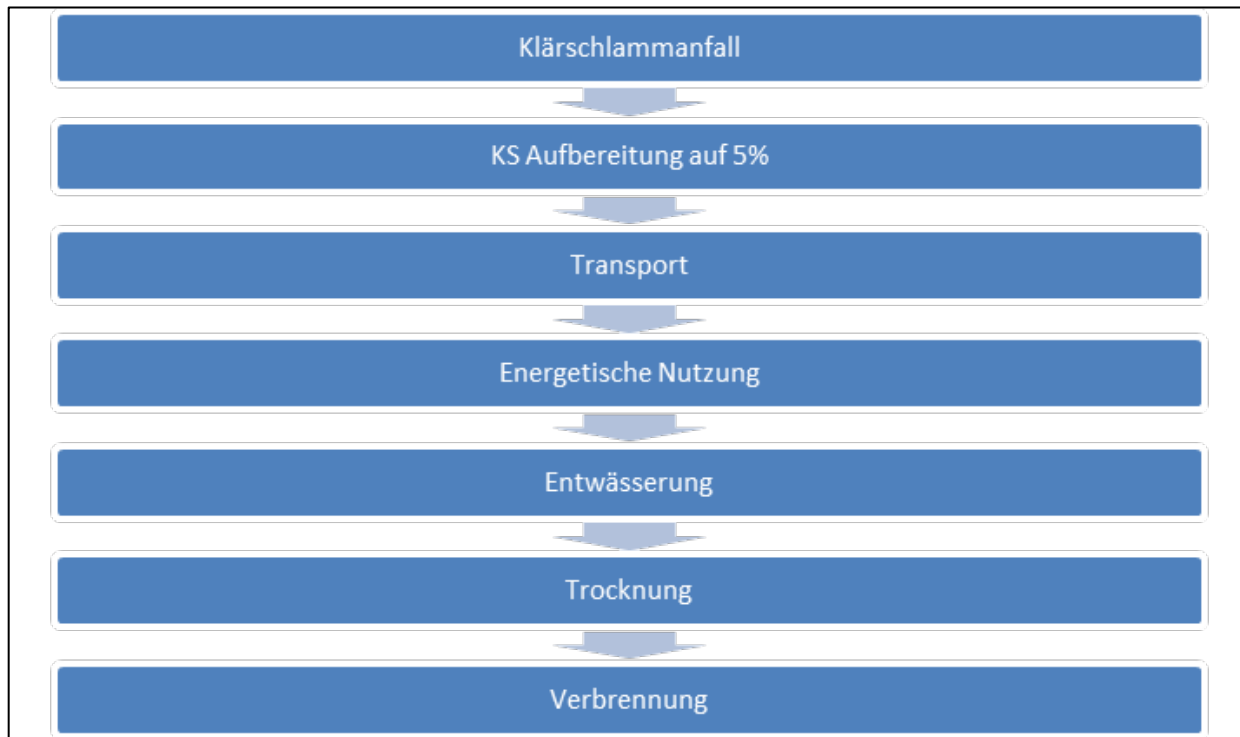


Abbildung 48: Konzeptverlauf für die Betrachtungen der sechs Regionen

Zu Beginn wird der Klärschlammanfall genauer betrachtet, um Möglichkeiten zur Reduzierung des Schlammes zu eruieren, vgl. Kapitel 3.1. Zur Reduzierung des Volumens wird neben der meist bestehenden statischen Eindickung auch die maschinelle Schlammverdickung mittels Bandeindicker überprüft. Andere maschinelle Alternativverfahren wurden nicht näher betrachtet. Grund hierfür sind die geringen Klärschlammmengen pro Kläranlage und die damit einhergehenden geringen Betriebszeiten. Ein Bandeindicker kann mit einem geringeren Durchsatz eindicken und so ein unnötiges An- und Abstellen der Maschine verhindern. Der Transport zu den Kläranlagen mit weitergehender Klärschlammverarbeitung wird mittels LKWs mit einem 28 m³ Silo für den Nassschlamm realisiert. Die darauffolgende Klärschlammverarbeitung sieht unter anderen die energetische Nutzung des unstabilierten Schlammes vor. Mithilfe des Faulturmes wird der Klärschlamm stabilisiert und Faulgas erzeugt. Das Faulgas kann mittels Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden und so einen Beitrag zur CO₂-Reduzierung leisten. Für die Berechnungen ist mit einem CO₂-Einsparpotential von 401 g CO₂/kWh für Strom und 160 g CO₂/kWh für Wärme ausgegangen worden. Die zu erzeugenden Strom- und Wärmemengen sind über die Ausbaugröße ermittelt worden. Für eine Berechnung nach Auslastung waren nicht ausreichend Daten jeder Kläranlage vorhanden. Im Anschluss an die Faulung ist der Klärschlamm zu entwässern. Dies ist in den meisten Regionen über bestehende Maschinen zu realisieren. Falls keine Maschine vorhanden ist, wurde mit einer Errichtung einer Zentrifuge gerechnet. Für die einzelnen Regionen wurde zusätzlich eine solare Trocknung überprüft. Zur Überprüfung einer Verbrennung wurde eine Marktanalyse mit Anfrage an mehrere Firmen gestellt. Hierbei hat sich eine dezentrale Lösung für die einzelnen Regionen als nicht wirtschaftlich dargestellt. Aus diesem Grund wird eine Verbrennung in den einzelnen Regionen nicht weiter betrachtet. Für die

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde neben der Überprüfung der laufenden Kosten auch die Kosten im Vergleich zu den bestehenden Kosten und den im „Worst Case“- Fall anfallenden Kosten verglichen. In Tabelle 23 sind die drei Szenarien beschrieben.

Tabelle 23: Beschreibung der Szenarien für die Betrachtung der sechs Regionen

Szenario	Beschreibung
Bestand	Ermittlung der aktuellen Kosten unter Annahme marktüblicher Preise. Klärschlammengen ohne zusätzliche Behandlung und Mengenreduzierung.
Worst case	Die Kläranlagen ab Größenklasse 3 können nur über die thermische Verwertung entsorgen. Jede Kläranlage regelt die Entsorgung und vorherige Aufbereitung selbstständig, ohne eine Kooperation mit einer anderen Kläranlage einzugehen.
Kooperation	Die Kläranlagen einer Region ab Größenklasse 3 bereiten zusammen ihren Klärschlamm auf und nutzen im Klärschlamm enthaltene Energie für die Klärgaserzeugung.

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wurden folgende Annahmen für die Kläranlagen getroffen. Die Investitionskosten wurden mit Hilfe von Richtpreisangeboten und Erfahrungswerten abgeschätzt. Für die jährlichen Investitionskosten wurde ein Zinssatz von 3 % angenommen und nach LAWA berechnet. Bei einer Umstellung der Kläranlagen auf anaerobe Stabilisierung ab Größenklasse 3 würden die vorhandenen Faulungskapazitäten des Landkreises nicht ausreichen für die anfallende Schlammmenge. Des Weiteren stellt die Region Ost einen „weißen Fleck“ auf der Karte dar und weite Transportwege müssten in Kauf genommen werden. Es wurde im Zuge der Studie eine Errichtung einer Faulungsanlage in der Region Ost überprüft und auf Wirtschaftlichkeit analysiert. Für die Wirtschaftlichkeit wurden Erfahrungswerte für den Bau einer Faulungsanlage in ähnlicher Größe angenommen. Bei den Kosten einer Faulung wurden die folgenden Punkte (Investitionen) berücksichtigt:

- Faulbehälter
- Blockheizkraftwert
- Vorklärung
- Gasaufbereitung
- Heizungsanlage (Wartung und Personal)

Zu dem Nutzen einer Faulung wurden die folgenden vier Punkte berechnet:

- Energetische Nutzung des Schlammes
- Strom- und Wärmeerzeugung
- Reduzierung der Schlammmenge
- Reduzierung der Stromkosten auf allen Anlagen durch Verringerung der Belüftungsenergie

Tabelle 24: Investitionskosten für einzelne Anlagenteile

Anlagenteile	Investitionskosten [brutto]	Dauer Abschreibung [Jahre]	KFAKR [3 %]	jährliche Investitionskosten [brutto]
masch. Eindicker (5.000-15.000 EW)	350.000,00 €	20	0,0672	23.525,50 €
Entwässerung (32.000 EW)	450.000,00 €	20	0,0672	30.247,07 €
Vorklärung (7.000 EW)	500.000,00 €	35	0,04654	23.270,00 €
Faulung (32.000 EW)	2.500.000,00 €	20	0,0672	168.039,27 €

Die laufenden Kosten bei der Trocknung sind in den jeweiligen Regionen hinterlegt und können Tabelle 25 entnommen werden.

Tabelle 25: laufende Kosten der Schlammbehandlung

Kenndaten	Wert	Einheit
Strom	0,25	€/kWh
Eindickung		
Strom	11,4	kWh/EW*a
Polymer	0,4	€/EW*a
Personal	5.000	€/a
Wasser	0,15	€/EW*a
Wartung	1.500	€/a
Entwässerung		
Strom	2,9	ct/EW*a
Polymer	3,3	€/EW*a
Personal	31.200	€/a
Wasser	0,15	€/EW*a
Wartung	4.000	€/a

Die Kosten für die Entsorgung richten sich nach Angaben einiger Kläranlagen. Diese Annahmen wurden für alle Kläranlagen je nach Verwertungsweg angenommen. Die jeweils berechnete Wirtschaftlichkeit bezieht sich auf Kosten Stand Oktober 2022 (vgl. Tabelle 26).

Tabelle 26: Entsorgungskosten der verschiedenen Verwertungswege

Verwertungsweg	Entsorgungskosten [€/m³]
Annahmekosten Klärschlamm für Faulung	30,00 €
Landwirtschaft	25,00 €
Verbrennung	120,00 €

7.1 Region Nord

Die Region Nord unterteilt sich in die Kommunen Hünfeld, Nüsttal, Rasdorf, Eiterfeld und Burghaun des Landkreises Fulda sowie Haunetal im Landkreis Hersfeld-Rotenburg. Insgesamt sind in der Region 19 Kläranlagen mit einer Anschlussgröße von 63.410 Einwohnerwerten (EW). Die größte Kläranlage ist die Kläranlage in Hünfeld mit 30.000 EW.

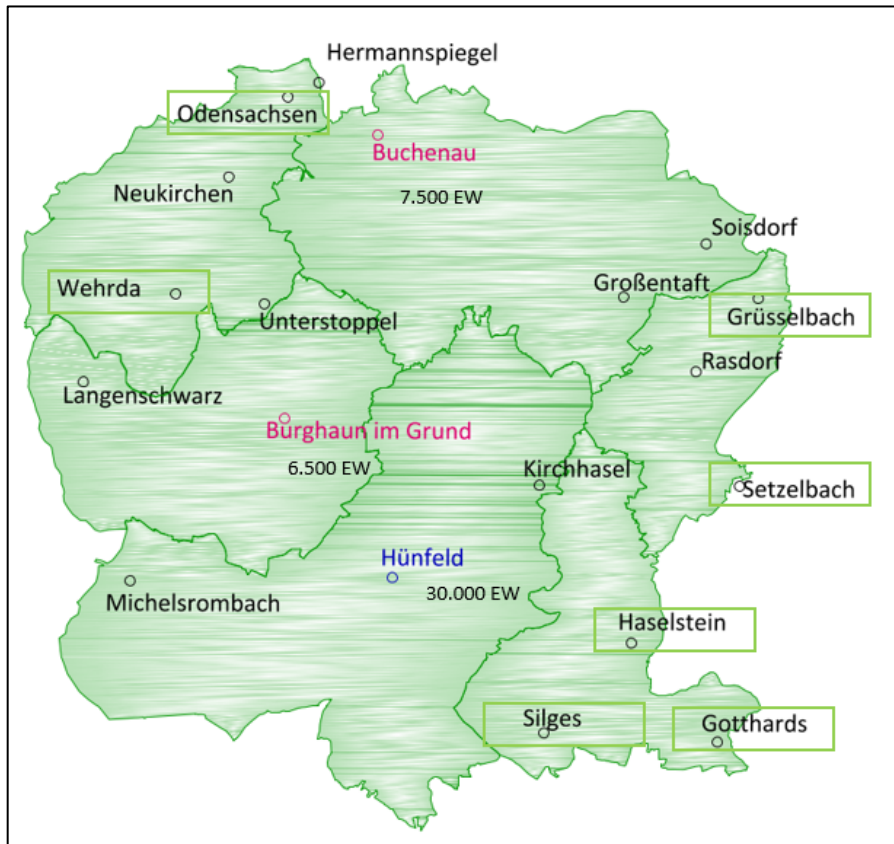


Abbildung 49: Region Nord mit Angabe der Kläranlagen

In der Region sind acht Teichkläranlagen mit einer Anschlussgröße von 7.840 EW zu finden. In Abbildung 50 ist die Anzahl der in der Region vertretenen Kläranlagen nach Größenklasse aufgeteilt.

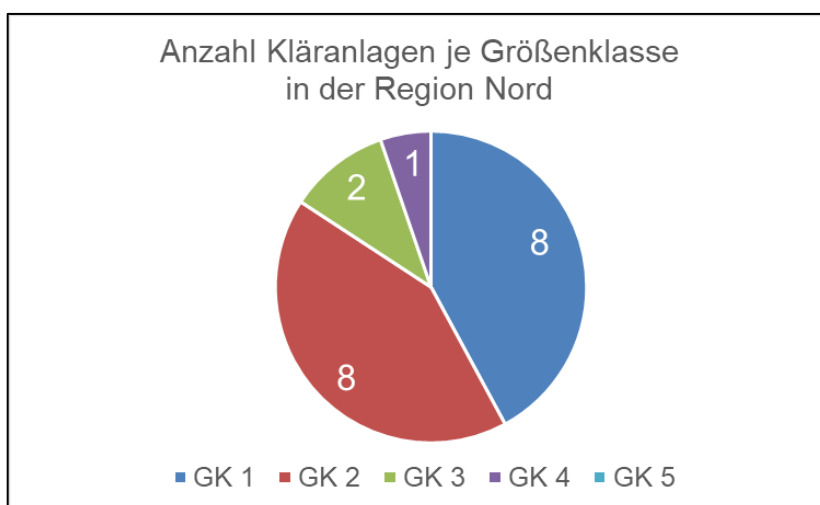


Abbildung 50: Anzahl der Kläranlagen je Größenklasse in der Region Nord

In der Region ist keine Kläranlage der Größenklasse 5 vertreten. Die Mehrheit der Kläranlagen ist den Größenklassen 1 und 2 zugeordnet (Anteil rund 84 %). Für das regionale Konzept wurden die Kläranlagen „Hünfeld“, „Buchenau“ (Eiterfeld) und „Im Grund“ (Burghaun) betrachtet, da diese der Größenklasse 3 und 4 zugeordnet sind und den größten Schlammanteil ausmachen. Für eine Konzipierung der Klärschlammverwertung wurden die Anlagen nach dem Ablaufschema in Abbildung 51 untersucht. Die Farben symbolisieren hierbei die Vorgehensweise bei den einzelnen Verfahrensschritten. Grün steht hierbei für Bestand, blau für eine weitergehende Überprüfung und gelb für eine Nichtbetrachtung, da die Wirtschaftlichkeit nicht gegeben ist.

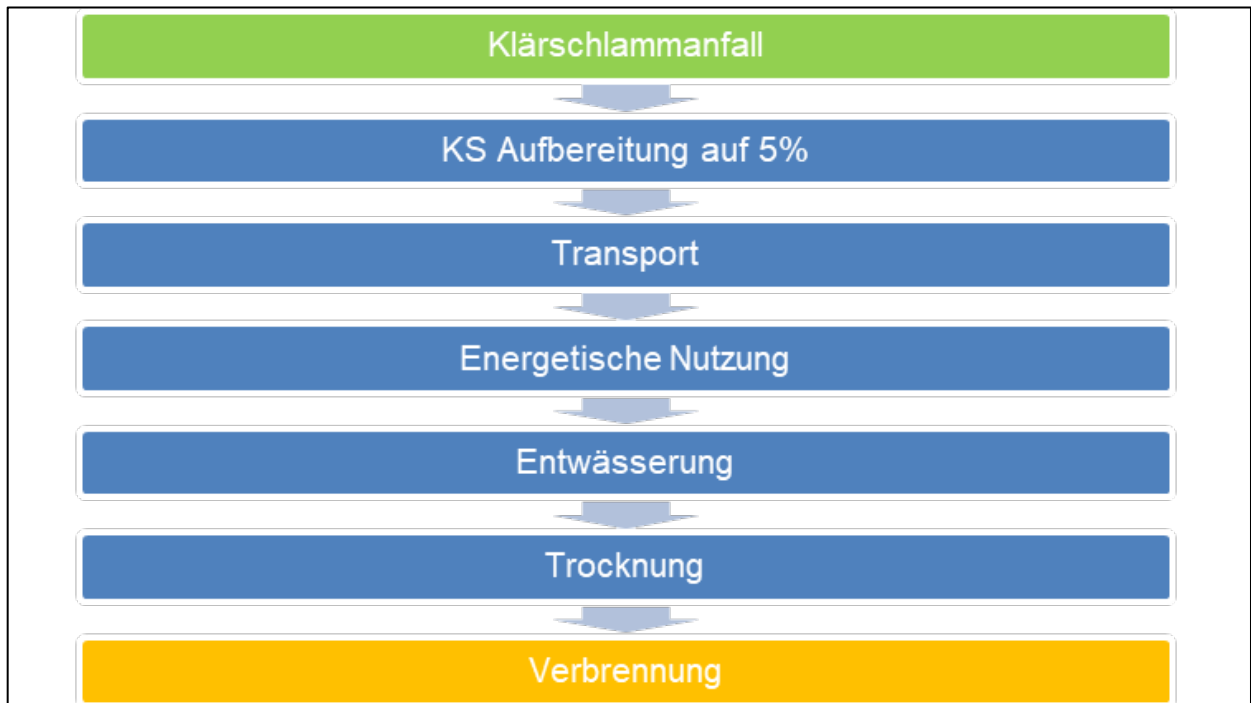


Abbildung 51: Konzeptverlauf der Region Nord

In Abbildung 52 ist das Ablaufschema für die genannten Kläranlagen der Region dargestellt. Hierbei stehen die grünen Kreise für bestehende Verfahrensschritte und die blauen Kreise für Optionen den Klärschlamm weiter zu behandeln. Der rot-grün gestreifte Kreis der Entsorgung steht für die beiden Verwertungswege Landwirtschaft und thermische Verwertung.

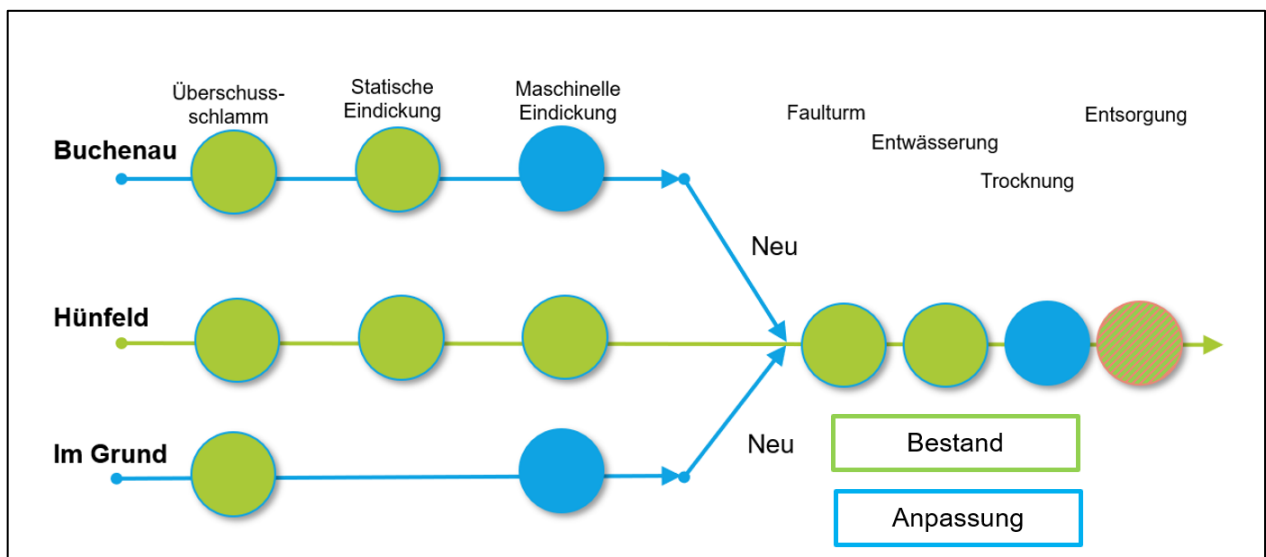


Abbildung 52: Ablaufschema der Region Nord

7.1.1 Klärschlammanfall

In der Region Nord fallen jährlich 679 t TS/a an, davon 652 t TS/a kontinuierlich. In Abbildung 53 ist die Klärschlammmenge je Größenklasse der Region dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass etwas weniger als ein Viertel des Gesamtvolumens auf die 16 Kläranlagen der Größenklasse 1 und 2 fällt.

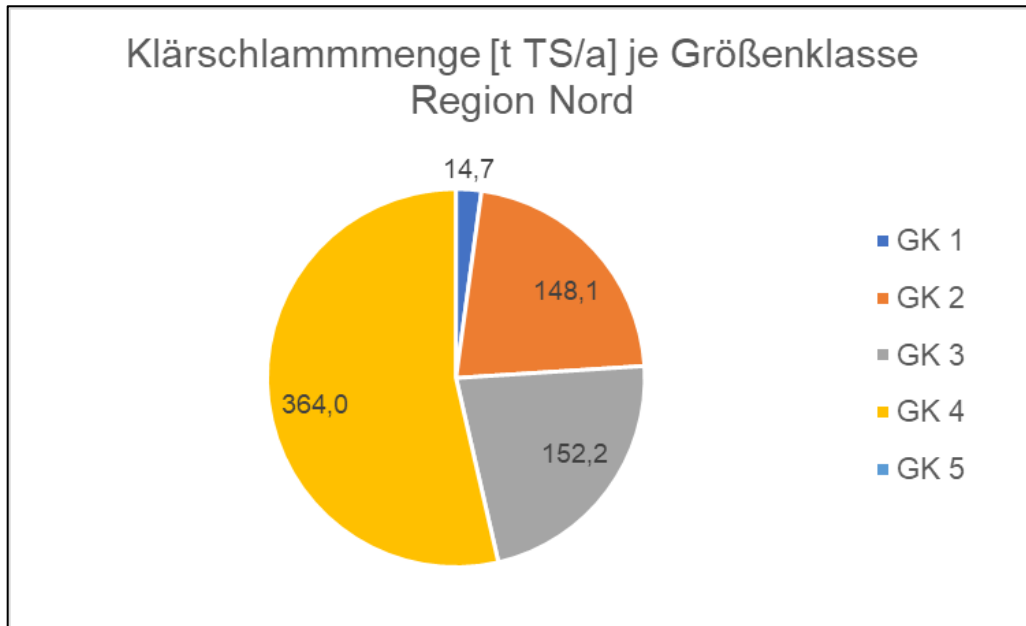


Abbildung 53: Klärschlammengen je Größenklasse in der Region Nord

Die Klärschlammengen der einzelnen Kläranlagen der Region ist in Abbildung 54 dargestellt. Einige Kläranlagen weisen eine Klärschlammmenge von unter einer Tonne TS pro Jahr auf. Bei diesen wird die Schlammbehandlung auf einer anderen Kläranlage vorgenommen, Die jeweilige Menge ist bei jener *externen* Kläranlage dann mitberücksichtigt worden.

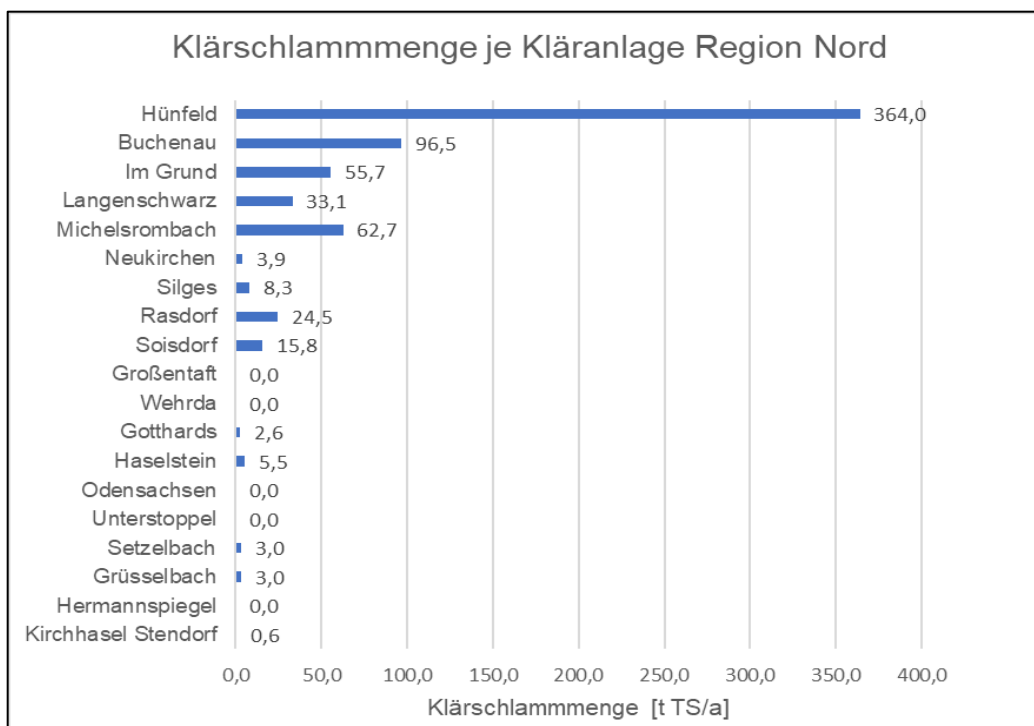


Abbildung 54: Klärschlammmenge je Kläranlage in der Region Nord

Eine Möglichkeit den Klärschlammanfall zu senken, ist die Umstellung auf anaerobe Schlammstabilisierung und Senkung des Schlammalters, näheres hierzu im Kapitel 3.1. Der Klärschlamm der größeren Kläranlagen ist nach Auswertung der Klärschlammanalysen bereits teilstabilisiert. Es sind somit keine größeren Klärschlammeinsparungen im Zuge einer Umstellung auf anaerobe Schlammstabilisierung zu erwarten. Die Kläranlagen der Größenklasse 3 „Im Grund“ (Burghaun) und „Buchenau“ (Eiterfeld) haben einen teilstabilisierten Klärschlamm.

Tabelle 27: Glühverluste einzelner Kläranlagen in der Region Nord

Kläranlage	Glühverlust [%]
Im Grund	62
Buchenau	65

7.1.2 Klärschlammaufbereitung auf 5 % TS

Der Klärschlamm welcher auf den Kläranlagen „Buchenau“ (Eiterfeld) und „Im Grund“ (Burghaun) anfällt besteht weitestgehend aus Wasser. Mittels statischer Eindickung kann der TS-Gehalt auf den Kläranlagen aktuell auf 3,8 % in „Buchenau“ und 1,5 % auf der Kläranlage „Im Grund“ reduziert werden. Um die zu transportierende Klärschlammmenge weiter zu reduzieren und somit CO₂ einzusparen ist eine maschinelle Eindickung notwendig. Für die Schlamm eindickung fallen laufende Kosten an. Hierzu zählen neben Stromkosten auch Kosten für Personal, Wartung und Polymer. Auf die Kosten wird zusätzlich im Kapitel 7.1.8 näher eingegangen

Tabelle 28: Reduzierung Klärschlammengen in der Region Nord durch Eindickung (gerundete Werte)

Kenndaten	Buchenau	Im Grund
Ausbaugröße [EW]	7.500	6.500
Klärschlammmenge aktuell [m ³ /a]	3.820	10.055
TS-Gehalt aktuell [%]	2,0	1,5
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt [m ³ /a]	1.528	3.017
Einsparung m ³ /a durch Umstellung auf anaerobe Schlammstabilisierung [m ³ /a]	2.292 <i>Reduktion um 60 %</i>	7.039 <i>Reduzierung um 70 %</i>
Summe möglicher Einsparungen (bei verschiedenen Ausgangs-TS-Gehalten) [m ³ /a]	9.331	

7.1.3 Transport

Die beiden Kläranlagen „Im Grund“ und „Buchenau“ liefern in diesem Szenario für die Region Nord ihren Klärschlamm auf die Kläranlage „Hünfeld“. Hierfür wird der voreingedickte Klärschlamm mit einem TS-Gehalt von 5 % mittels LKWs (28 m³) transportiert. Bei einer reduzierten Klärschlammmenge von 4.545 m³/a wären dies circa 163 Fahrten im Jahr.

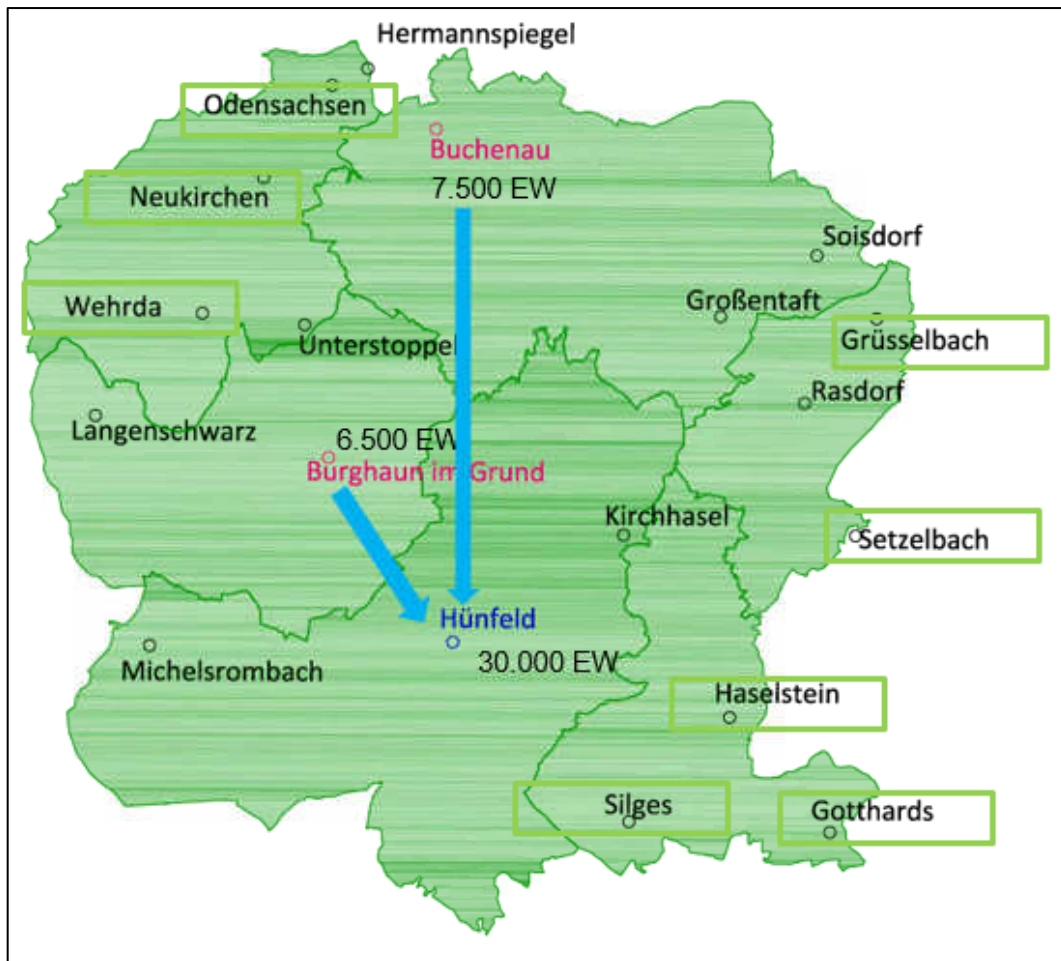


Abbildung 55: Transportstrecken in der Region Nord

Bei der Transportstrecke wurde von der einfachen Entfernung ausgegangen, da nicht im Pendelverkehr die Anlieferung betrieben wird. Die Kläranlagen „Buchenau“ und „Hünfeld“ liegen 15 km entfernt voneinander und von der Kläranlage „Im Grund“ nach Hünfeld sind es 6 km. Durch die Reduzierung der Klärschlammmenge reduzieren sich die Fahrten im Jahr um rund 70 %. Dies führt zu einer Reduzierung des CO₂- Ausstoßes von insgesamt 0,39 t CO₂/a ausmacht.

Tabelle 29: Transportdaten der Region Nord (gerundete Werte)

Kenndaten	Buchenau	Im Grund
Klärschlammmenge [m ³ /a bei 5 % TS]	1.528	3.017
Einfache Entfernung [km]	15	6
Transportfahrten pro Jahr	55	108
CO ₂ -Ausstoß Transport [t CO ₂ /a]	0,66	0,52

7.1.4 Energetische Nutzung

Der auf die Kläranlage „Hünfeld“ gelieferte teilstabilisierte Klärschlamm soll energetisch im Faulturn genutzt werden. Die berechneten Potentiale richten sich nach der Ausbaugröße und nicht nach der Belastung der Kläranlage. Für eine Berechnung über die Belastung waren nicht ausreichend Daten zu Verfügung gestellt worden.

Tabelle 30: CO₂-Einsparpotential für die Region Nord (gerundete Werte)

Kenndaten	Buchenau	Im Grund
Strom- und Wärmeproduktion		
Ausbaugröße [EW]	7.500	6.500
Stromproduktion in [kWh/a]	126.600	109.719
CO₂-Einsparpotential Strom [t CO₂/a]	51	44
Wärmeproduktion in [kWh/a]	159.150	137.933
CO₂-Einsparpotential Wärme [t CO₂/a]	25	22
CO₂-Ausstoß Transport [t CO₂/a]	0,71	0,18
Summe CO₂-Potential inklusive Transport [t CO₂/a]	76	66
Summe CO₂-Potential [t CO₂/a]	141	

Insgesamt sind mit der Faulung der beiden Kläranlagen 141 Tonnen CO₂ im Jahr als Einsparpotential vorhanden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Kläranlage „Im Grund“ bereits jetzt ihren Klärschlamm energetisch im Faulurm der Kläranlage „Schlitz“ verwertet. Die dargestellten Einsparungen sind somit keine neuen Einsparungen. Lediglich bei dem Transport kann CO₂ eingespart werden, da die Kläranlage „Hünfeld“ näher an der Stadt Schlitz liegt.

7.1.5 Entwässerung

Auf der Kläranlage „Hünfeld“ sind aktuell zwei Zentrifugen vorhanden. Diese sind etwa an zwei Tagen in der Woche in Betrieb. Durch die Kapazitätsreserven der Maschine kann der zusätzliche Klärschlamm mit auf der Kläranlage „Hünfeld“ behandelt werden. Die laufenden Kosten für die zusätzlichen Mengen sind in der folgenden Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Reduzierung Klärschlammmenge in der Region Nord durch Entwässerung (gerundete Werte)

Kenndaten	Buchenau	Im Grund
Ausbaugröße [EW]	7.500	6.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	3.820	10.055
TS-Gehalt aktuell [%]	2,0	1,5
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt [m³/a]	1.528	3.017
Klärschlammmenge mit 25 % TS-Gehalt	306	603
Einsparung m³/a durch Entwässerung [m³/a] zu TS-Gehalt aktuell	3.514 <i>Reduzierung um 92 %</i>	9.452 <i>Reduzierung um 94 %</i>
Summe möglicher Einsparungen (bei verschiedenen Ausgangs-TS-Gehalten) [m³/a]	12.966	

7.1.6 Trocknung

In der Region Nord befindet sich eine Trocknung im Bestand. Diese ist auf dem Gelände der Kläranlage „Rasdorf“ zu finden. Der Schlamm wird auf der Anlage in Trockenbeeten getrocknet und so das Volumen reduziert. Die Trockenbeete sind überdacht, um eine Wiedervernässung durch Regen zu vermeiden. So sind bis zu 50 % TS zu erreichen.



Abbildung 56: Trockenbeete mit Überdachung in Rasdorf

Für die Kläranlage „Hünfeld“ wurde eine solare Trocknung überprüft. Hierzu hat die Firma ThermoSystem ein Richtpreisangebot für eine Schlammmenge von 1.800 t/a (bei 25 % TS-Gehalt) abgegeben. Der Austrags-TR Gehalt wird mit 65 % berechnet. Für die Stadt Hünfeld wurde eine solare Trocknung ohne Abwärmenutzung in der Dimension 80 x 18 Meter berechnet (vgl. Abbildung 57). Die Schlammdurchsatzmengen unter den genannten Voraussetzungen kann Abbildung 58 entnommen werden.

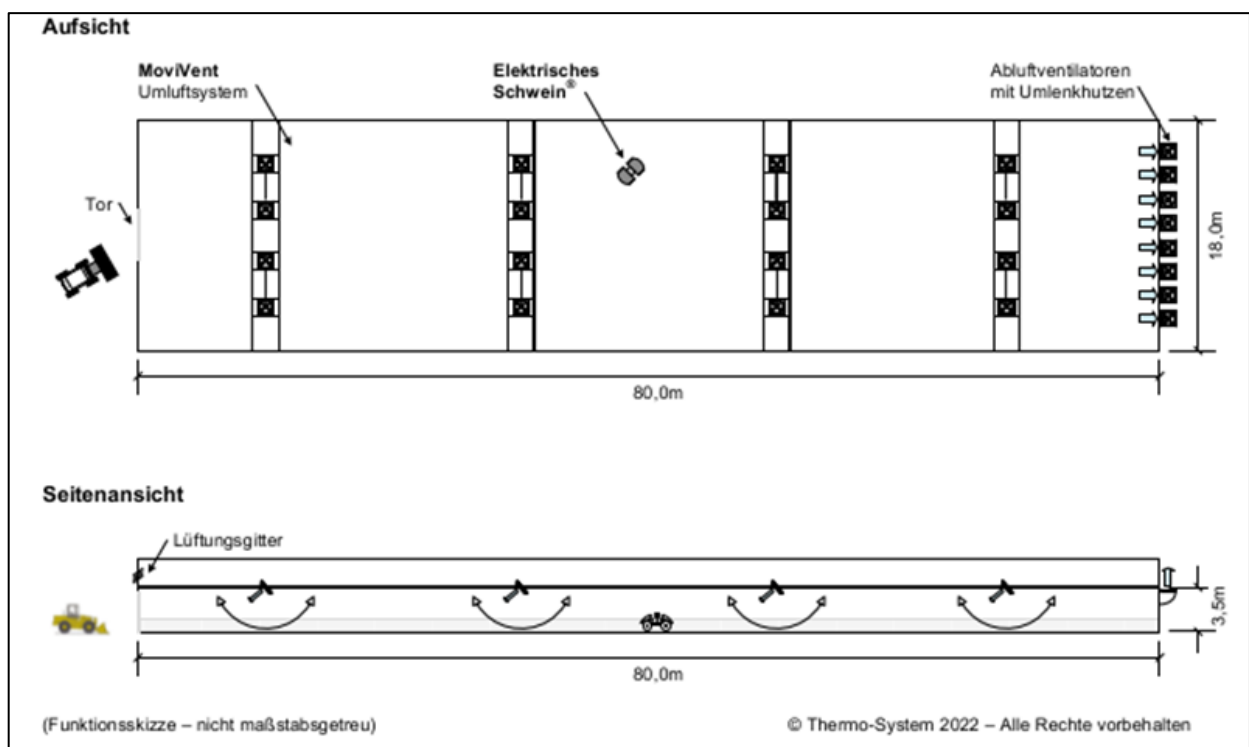


Abbildung 57: Funktionsskizze der solaren Schlamm-trocknung in Hünfeld (ThermoSystem, 2022)

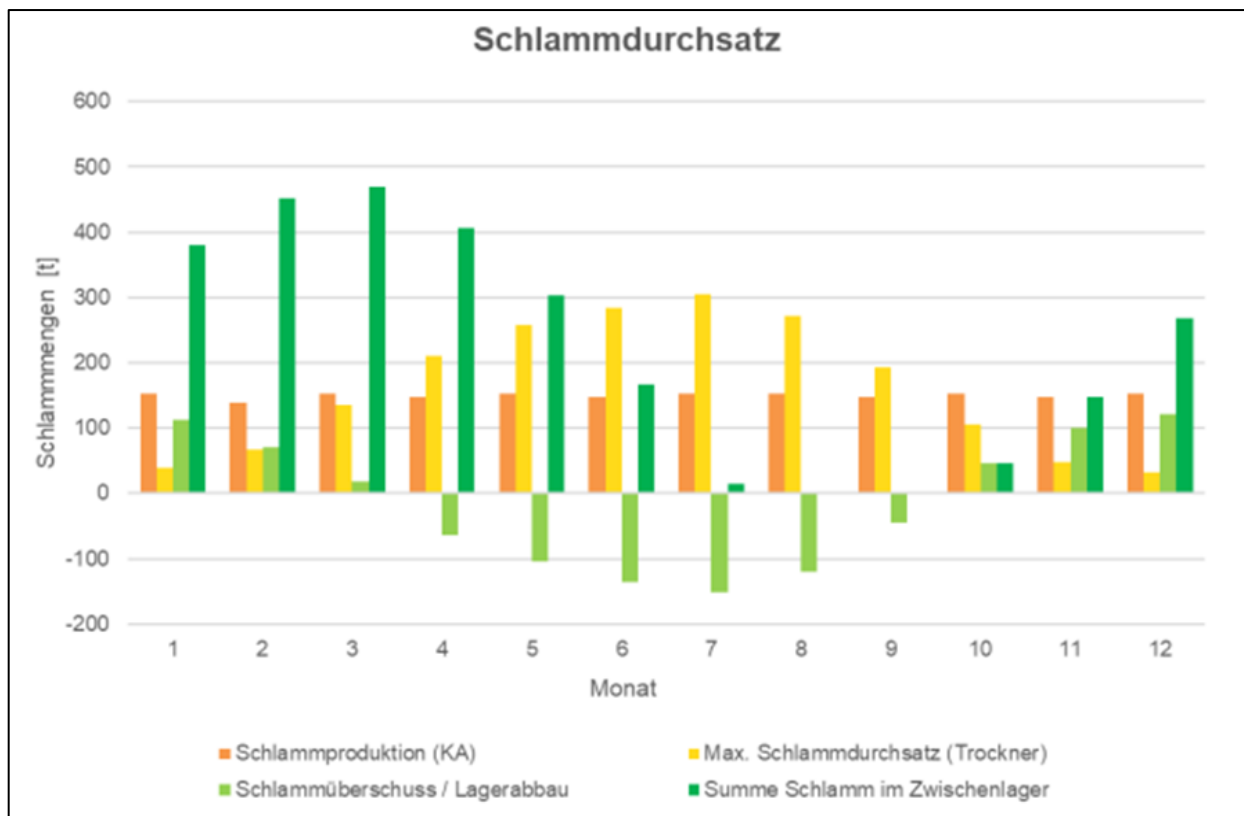


Abbildung 58: Schlammumsatz der Trocknung in Hünfeld nach Bemessung von ThermoSystem

Tabelle 32: Reduzierung der Klärschlammmenge in der Region Nord durch Entwässerung (gerundete Werte)

Kenndaten	Hünfeld	Buchenau	Im Grund
Ausbaugröße [EW]	30.000	7.500	6.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	1.217	3.820	10.055
TS-Gehalt aktuell [%]	26,0	2,0	1,5
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt [m³/a] <small>Vorschlag Schlammeindickung (Kap. 7.1.2)</small>	-	1.528	3.017
Klärschlammmenge mit 25 % TS-Gehalt [m³/a] <small>Mitnutzung Zentrifugen KLA Hünfeld (Kap. 7.1.5)</small>	1.266	306	603
Klärschlammmenge mit 65 % TS-Gehalt [m³/a] <small>Vorschlag solare Trocknung</small>	487	118	232
Einsparung m³/a durch Entwässerung [m³/a] zu TS-Gehalt aktuell	730 <i>Reduzierung um 60 %</i>	3.702 <i>Reduzierung um 96 %</i>	9.823 <i>Reduzierung um 98 %</i>
Summe möglicher Einsparungen (bei verschiedenen Ausgangs-TS-Gehalten) [m³/a]	14.255		

7.1.7 Verbrennung

Im Rahmen der Studie wurde eine Marktabfrage bezüglich einer Verbrennung getätigt. Eine eigene Verbrennung ist ab 10.000 t TS/a wirtschaftlich. Für die Region fällt jedoch nur eine Klärschlammmenge von 652 t TS/a kontinuierlich an. Somit wurde eine thermische dezentrale Verwertung für die Region nicht weiter betrachtet.

7.1.8 Wirtschaftlichkeit

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Wirtschaftlichkeit wurden drei Szenarien untersucht und miteinander verglichen. Die genannten Kosten und Einsparungen dienen der Darstellung einer Tendenz.

7.1.8.1 Bestandskosten

Die drei größten Kläranlagen der Region Nord (vgl. Tabelle 33) verwerten ihren Klärschlamm auf verschiedenen Wegen. Der Klärschlamm der Kläranlage „Hünfeld“ wird in die Landwirtschaft und in die thermische Entsorgung verbracht. Der Klärschlamm der Kläranlage „Buchenau“ wird rein landwirtschaftlich ausgebracht. Die Marktgemeinde Burghaun liefert den Schlamm der Kläranlage „Im Grund“ zur energetischen Nutzung an die Kläranlage in Schlitz. Als Kosten wurden die in Tabelle 24 genannten Annahmen verwendet. Die Entsorgungskosten wurden inklusive der Kosten für die eventuell vorhandene Entwässerung berechnet. In der Tabelle 33 sind die Bestandskosten für die Region Nord und ihre drei größten Kläranlagen ausgewiesen.

Tabelle 33: Bestandskosten der Region Nord ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)

Kenndaten	Hünfeld	Buchenau	Im Grund
Ausbaugröße [EW]	30.000	7.500	6.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	1.217	3.820	10.055
TS-Gehalt aktuell [%]	26,0	2,0	1,5
Aufbereitungskosten aktuell [€/a]	175.306	-	-
Entsorgungskosten [€/a] <small>Unterschiedliche Verwertungswege aktuell</small>	88.261	119.370	301.648
Gesamtkosten [€/a]	263.567	119.370	301.648
Entsorgungskosten der Kläranlagen ab GK 3 Region Nord [€/a]	684.585		

7.1.8.2 Worst Case

Die Kosten des Worst Case Fall berechnen sich nach der Klärschlammmenge und einer Aufbereitung des Schlammes auf 25 % TS-Gehalt. Die Aufbereitung erfolgt auf jeder Kläranlage ab Größenklasse 3 selbstständig. Die Verwertung findet anschließend in einer Verbrennung statt. In Tabelle 34 sind die jeweiligen Kosten dargestellt.

Tabelle 34: Kosten "Worst Case" der Region Nord ab Größenklasse 3 (gerundete Werte)

Kenndaten	Hünfeld	Buchenau	Im Grund
Ausbaugröße [EW]	30.000	7.500	6.500
Klärschlammmenge mit 25 % TS-Gehalt [m³/a]	1.217	306	603
TS-Gehalt aktuell [%]	26,0	25,0	25,0
Aufbereitungskosten [€/a]	175.306	124.049	120.268
Entsorgungskosten [€/a]	146.087	36.671	72.396
Gesamtkosten [€/a]	321.393	160.720	192.664
Entsorgungskosten der Kläranlagen ab GK 3 Region Nord [€/a]	674.777		

7.1.8.3 Kooperation

Eindickung

Für die Kläranlagen „Buchenau“ und „Im Grund“ wurde eine maschinelle Eindickung überprüft, mit einem Zielwert von 5 % TS.

Tabelle 35: laufende Kosten der Eindickung in der Region Nord (gerundete Werte)

Kenndaten	Buchenau	Im Grund
Ausbaugröße [EW]	7.500	6.500
Schlammmenge [m³/a]	3.820	10.055
TS-Gehalt aktuell	2,0	1,5
Abschreibung Maschine [€/a]	23.526	23.526
Flockungsmittel [€/a]	3.000	2.600
Wasser [€/a]	1.125	975
Strom [€/a]	21.375	18.525
Wartung [€/a]	1.500	1.500
Personal [€/a]	5.000	5.000
Summe ohne Abschreibung [€/a]	32.000	28.600
Summe mit Abschreibung [€/a]	55.526	52.126

Transport

Für den Transport wurden 7 €/km angenommen und die einfache Transportstrecke nach Hünfeld festgelegt. Durch die Errichtung einer Schlammeindickung können beide Kläranlagen bei dem Transport Wegstrecken sparen (vgl. Tabellen 36 und 37).

Tabelle 36: Transportkosten in der Region Nord mit Schlammeindickung (gerundete Werte)

Kenndaten	Buchenau	Im Grund
Ausbaugröße [EW]	7.500	6.500
Schlammmenge [m³/a]	1.528	3.017
Transportstrecke	15	6
Transportfahrten pro Jahr	55	108
Kosten [€/a]	5.775	4.536
Summe [€/a]	10.311	

Tabelle 37: Transportkosten in der Region Nord ohne Schlammeindickung (gerundete Werte)

Kenndaten	Buchenau	Im Grund
Ausbaugröße [EW]	7.500	6.500
Schlammmenge [m³/a]	3.820	10.055
Transportstrecke	15	6
Transportfahrten pro Jahr	137	360
Kosten [€/a]	14.385	15.120
Summe [€/a]	29.505	
Einsparungen durch Eindickung [€/a]	8.610	10.584

Annahmekosten

Für die Annahme des Klärschlammes auf der Kläranlage in Hünfeld werden 30 €/m³ angenommen. In Tabelle 38 sind die Annahmekosten in Hünfeld für die beiden zuliefernden Kläranlagen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine vorherige Eindickung des Klärschlammes auf den jeweiligen Anlagen neben Einsparungen des Transportes auch durch die verringerte Menge an Klärschlamm zu einem niedrigeren Kostenblock bei der Annahme führt.

Tabelle 38: Annahmekosten in Hünfeld (gerundete Werte)

Kenndaten	Buchenau	Im Grund
Ausbaugröße [EW]	7.500	6.500
Schlammmenge aktuell [m ³ /a]	3.820	10.055
TS-Gehalt aktuell [%]	2,0	1,5
Annahmekosten TS aktuell [€/a]	114.594	301.647
Schlammmenge [m ³ /a] mit 5 % TS-Gehalt	1.528	3.017
Annahmekosten 5 % TS-Gehalt [€/a]	45.837	90.495
Einsparungen durch Eindickung auf 5 % TS [€/a]	68.757	211.152
Gesamte Einsparung [€/a]	279.909	

Entwässerung

Unter der Prämisse der weiteren Nutzung der Entwässerung auf der Kläranlage „Hünfeld“, werden lediglich für die zusätzlichen Schlammengen die Mehrkosten für Flockungsmittel, Wasser und Strom angesetzt. Wartung und Personal sowie die Abschreibung der Maschine sind in den Gesamtkosten berücksichtigt.

Tabelle 39: laufende Kosten der Entwässerung in der Region Nord (gerundete Werte)

Kenndaten	Hünfeld	Anteil Buchenau	Anteil Im Grund
Ausbaugröße	30.000	7.500	6.500
Klärschlammmenge [m ³ /a]	1.217	1.627	1.047
Abschreibung Maschine [€/a]	60.494	-	-
Flockungsmittel [€/a]	66.000	24.750	21.450
Wasser [€/a]	3.000	1.125	975
Strom [€/a]	57.000	21.375	18.525
Wartung [€/a]	8.000	-	-
Personal [€/a]	31.200	-	-
Summe ohne Abschreibung [€/a]	253.400		
Summe [€/a]	313.894		

Trocknung

Für Hünfeld wurde eine solare Trocknung ohne Abwärmenutzung ausgelegt. Für die Investition wurden 540.000 € angenommen.

Tabelle 40: laufende Kosten der Trocknung in der Region Nord (gerundete Werte)

Kenndaten	Hünfeld
Abschreibung Trocknung [€/a]	25.132
Strom [€/a]	8.250
Wartung [€/a]	1.400
Personal [€/a]	14.500
Summe ohne Abschreibung [€/a]	24.150
Summe mit Abschreibung [€/a]	49.282

Zusammenfassung

Tabelle 41: Zusammenfassung der Region Nord (gerundete Werte)

Kenndaten	Hünfeld	Buchenau	Im Grund
Ausbaugröße	30.000	7.500	6.500
Laufende Kosten Eindickung ohne Abschreibung [€/a]	-	32.000	28.600
Laufende Kosten Eindickung mit Abschreibung [€/a]	-	55.526	52.126
Einsparungen Transport [€/a]	-	8.610	10.584
Einsparungen energetisches Potential [€/a]	-	-	-
Annahmekenkosten Hünfeld	-	45.837	90.495
Laufende Kosten Entwässerung ohne Abschreibung [€/a]	253.400	-	-
Laufende Kosten Entwässerung mit Abschreibung [€/a]	313.898	-	-
Laufende Kosten Trocknung ohne Abschreibung [€/a]	24.150	-	-
Laufende Kosten Trocknung mit Abschreibung [€/a]	49.282	-	-
Amortisation Eindicker je Kläranlage [a]	-	5	8,2
Amortisation Trocknung in Hünfeld [a]	<i>nie</i>	-	-
Mögliche Kosteneinsparungen je Kläranlage [€/a]	Bestand: 83.490 Worst Case: 141.316	Bestand: -57.011 Worst Case: 71.461	Bestand: 19.596 Worst Case: 76.638
Mögliche Kosteneinsparungen gesamt [€/a]	Bestand: 46.075 Worst Case: 289.425		

Sensitivitätsuntersuchung

Mittels Berechnung der laufenden Kosten wurden verschiedene Strompreise angesetzt. In Abbildung 59 sind die möglichen Einsparungen dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass die Kläranlage „Hünfeld“ durch die Annahme von Fremdschlämmen und die Strom- und Wärmeerzeugung den größten Vorteil aus einer Kooperation ziehen kann. Die beiden anderen

Kläranlagen haben bei den verschiedenen Strompreisen Einsparungen oder auch Mehrkosten zum Bestand. Es ist hierbei zu berücksichtigen, dass bis auf die Stromkosten die weiteren laufenden Kosten nicht verändert wurden, ebenso die Investitionskosten und Entsorgungspreise.

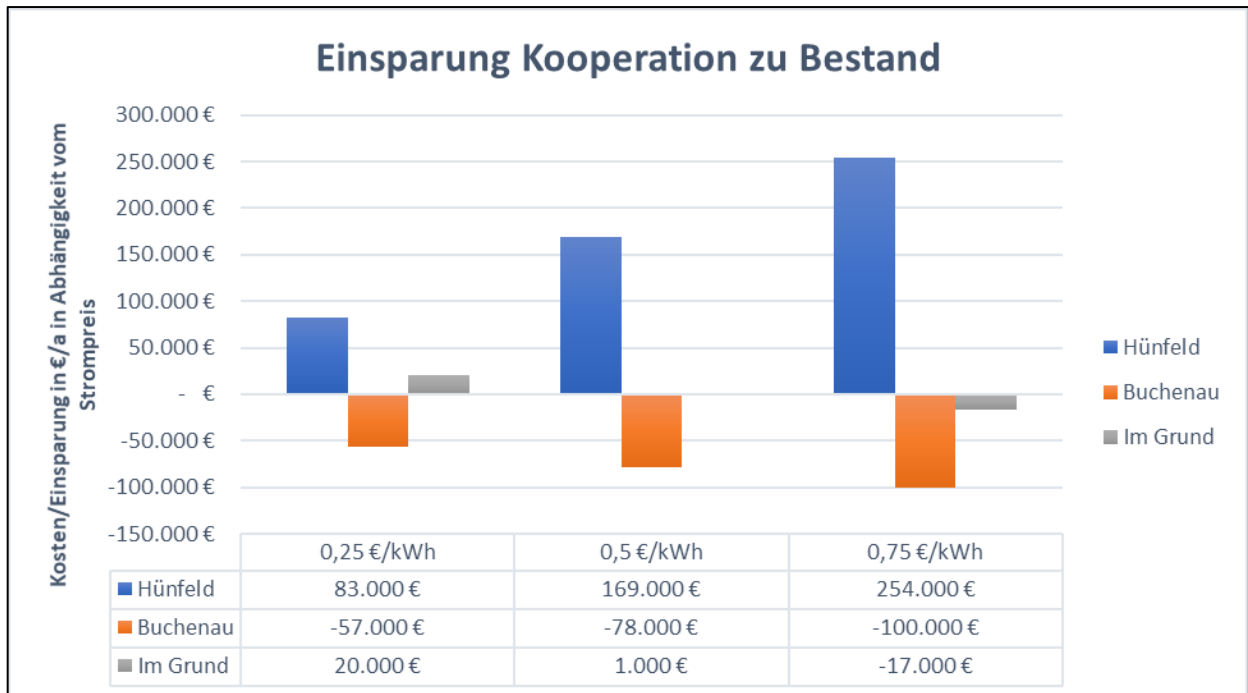


Abbildung 59: Einsparungen der einzelnen Kläranlagen bei verschiedenen Strompreisen

Die Abbildung 60 stellt die möglichen Einsparungen zum Worst Case Szenario dar. Hier ist ebenfalls der Trend erkennbar, dass die Kläranlage „Hünfeld“ mehr von einer Zusammenarbeit profitiert. Die beiden anderen Kläranlagen hingegen haben hingegen höhere laufende Kosten und geringere Einsparungen zu erwarten. Durch die höheren Entsorgungskosten stellt sie eine Kooperation aber deutlichere Kostenvorteile gegenüber einer getrennten Schlammbehandlung dar.

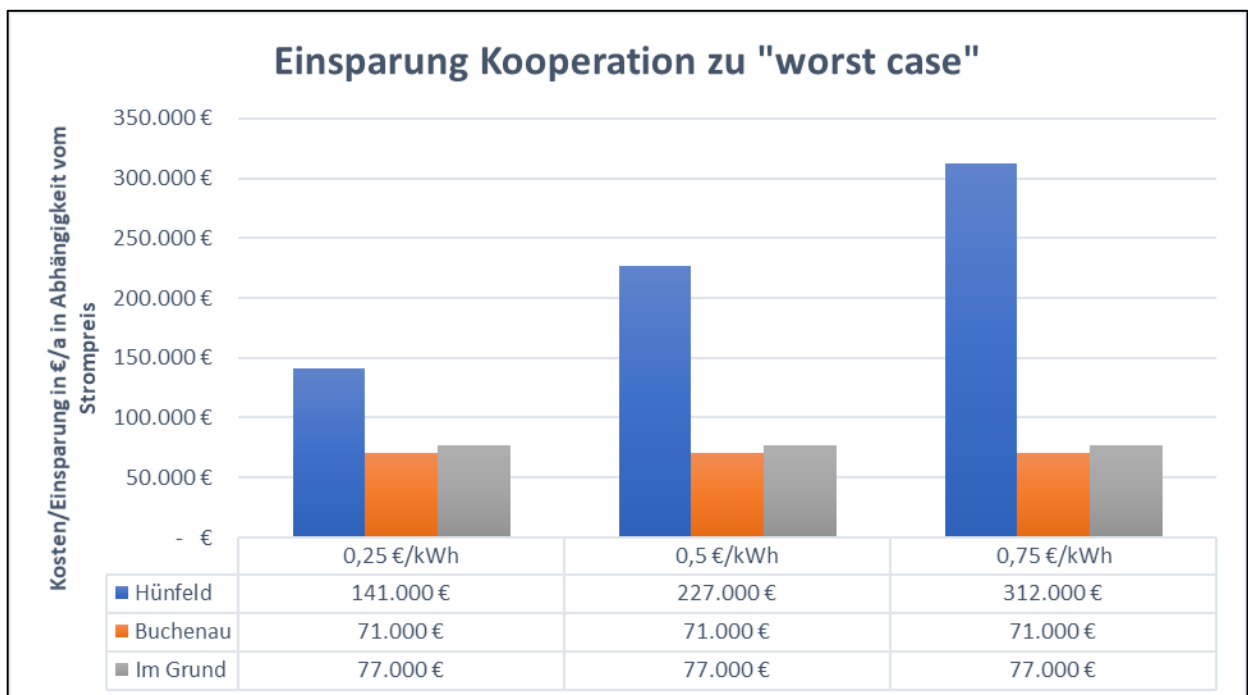


Abbildung 60: Einsparungen der einzelnen Kläranlagen zum Worst Case Szenario mit verschiedenen Strompreisen

Die möglichen Einsparungen in der Region steigen durch den hohen Anteil der Kläranlage „Hünfeld“ an den Gesamteinsparungen mit steigenden Stromkosten.

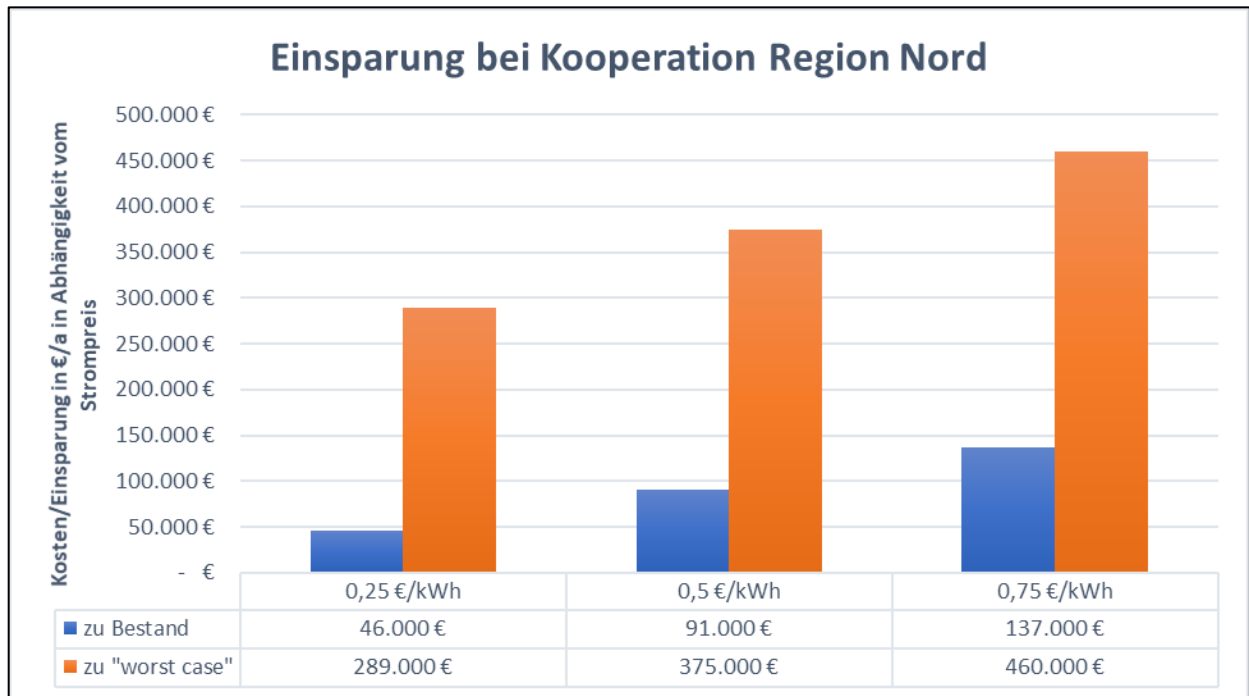


Abbildung 61: Einsparungen bei verschiedenen Strompreisen in der Region Nord

7.1.9 Landwirtschaftliche Verwertung

Die Kläranlagen der Größenklassen 1 und 2 können auch bei Einhaltung der Grenzwerte weiter in die Landwirtschaft entsorgen. Insgesamt sind in der Region etwa 2.441 m³/a landwirtschaftlich bei verschiedenen TS-Gehalten zu entsorgen. In der Region Nord hält die Kläranlage „Rasdorf“ die aktuellen Grenzwerte einer landwirtschaftlichen Verwertung nicht ein. Daher wird der Schlamm der Kläranlage „Rasdorf“ in der Verbrennung entsorgt. Grund hierfür sind die hohen Nickelbelastungen im Klärschlamm.

7.1.10 Kooperationsmöglichkeit

Für eine kommunale Zusammenarbeit der Kommunen sind grundsätzlich alle genannten Kooperationsformen möglich. Zu empfehlen ist hier eine Zusammenarbeit auf Basis einer „Öffentlich-rechtlichen-Vereinbarung“. Die Kriterien nach EuGH Urteil sind dementsprechend zu prüfen.

7.1.11 Handlungsempfehlung

Für die Region Nord wird eine gemeinsame Klärschlammbehandlung der Kläranlagen „Im Grund“ und „Buchenau“ mit der Kläranlage „Hünfeld“ präferiert. In Hünfeld können die freien Kapazitäten im Faulturn und der Entwässerung genutzt und somit Investitionskosten eingespart werden. Die Kläranlagen „Buchenau“ und „Im Grund“ nutzen die im Klärschlamm enthaltene Energie um Faulgas zu erzeugen und so Strom und Wärme für die Kläranlage „Hünfeld“ bereitzustellen. Um das Transportvolumen zu reduzieren bietet sich der Bau einer maschinellen Eindickung auf den zuliefernden Kläranlagen an. Als Option ist eine Solartrocknung zur weiteren Mengenreduzierung zu sehen. Diese ist ohne vorherige Schlammentwässerung nochmals zu überprüfen und zu dimensionieren. Mit einer vorherigen Entwässerung lässt es sich aktuell nicht wirtschaftlich darstellen.

7.2 Region Ost

Die Region Ost wird aus den Kommunen Tann (Rhön), Hilders, Hofbieber, Dipperz, Poppenhausen (Wasserkuppe) und Ehrenberg (Rhön) gebildet. Innerhalb dieser Kommunen sind 15 Kläranlagen mit einer insgesamt Anschlussgröße von 34.792 Einwohnerwerten (EW). Die größten Kläranlagen sind hierbei in Hilders (9.000 EW) und in Günthers (7.500 EW) sowie im Ortsteil Wiesen (7.000 EW). Insgesamt sind fünf Teichkläranlagen in der Region mit einer Ausbaugröße von 3.892 EW (grün umrandet in Abbildung 62).

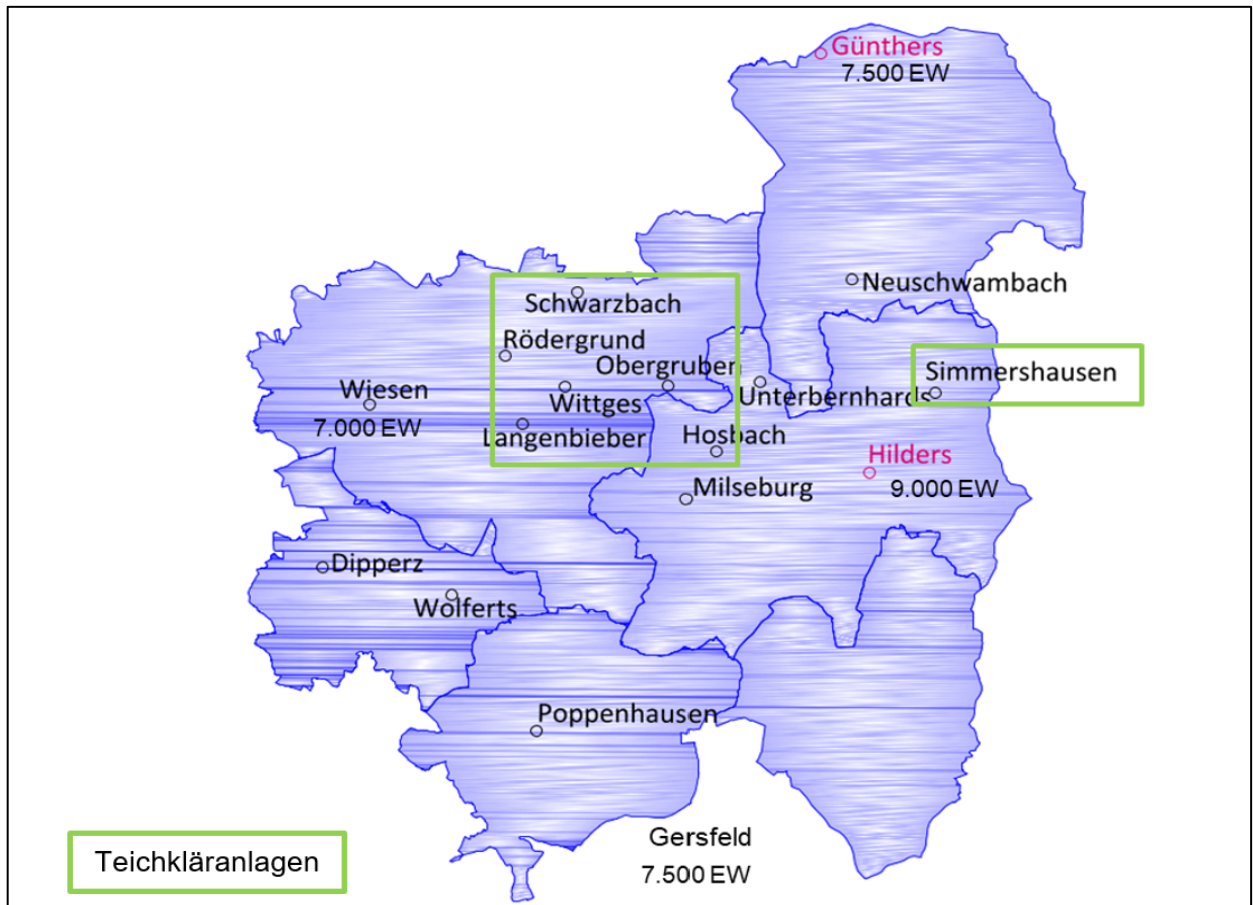


Abbildung 62: Region Ost mit Angabe der Kläranlagen

In der Region Ost sind die ersten drei Größenklassen vertreten. Die Aufteilung ist Abbildung 63 dargestellt. Knapp zwei Drittel aller Anlagen in der Region sind der Größenklasse 1 zugeordnet.

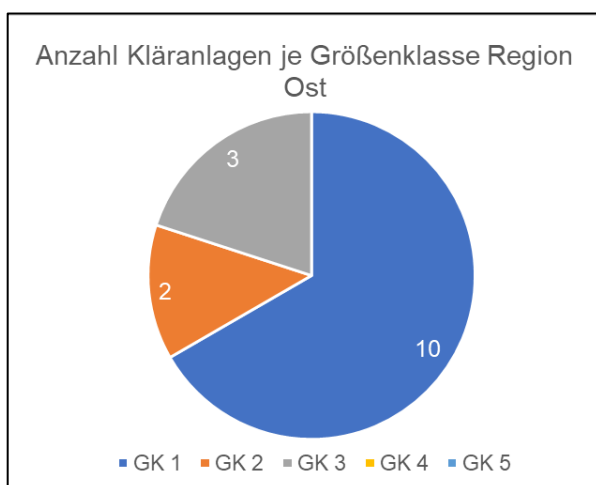


Abbildung 63: Anzahl der Kläranlagen je Größenklasse in der Region Ost

Für die Region Ost wurden alle Punkte des Konzeptablaufes, mit der Ausnahme der Verbrennung, überprüft (vgl. Abbildung 48). Die nachstehende Abbildung 64 stellt das Ablaufschema der drei größten Kläranlagen der Region Ost und der Kläranlage „Gersfeld“ aus der Region Süd dar. Hintergrund der Hinzunahme der Kläranlage „Gersfeld“, ist die sich mengenmäßig anbietende Einbeziehung der Klärschlammmenge für eine rentable Klärschlammbehandlung auf der Kläranlage „Hilders“. Zur Abbildung 64 ist erläuternd zu erwähnen, dass die grünen Punkte den Bestand darstellen, die blauen Punkte die Verfahrensschritte, in die investiert werden sollte und der rot-grün gestreifte Kreis steht für die Entsorgung in die Landwirtschaft und / oder die Verbrennung.

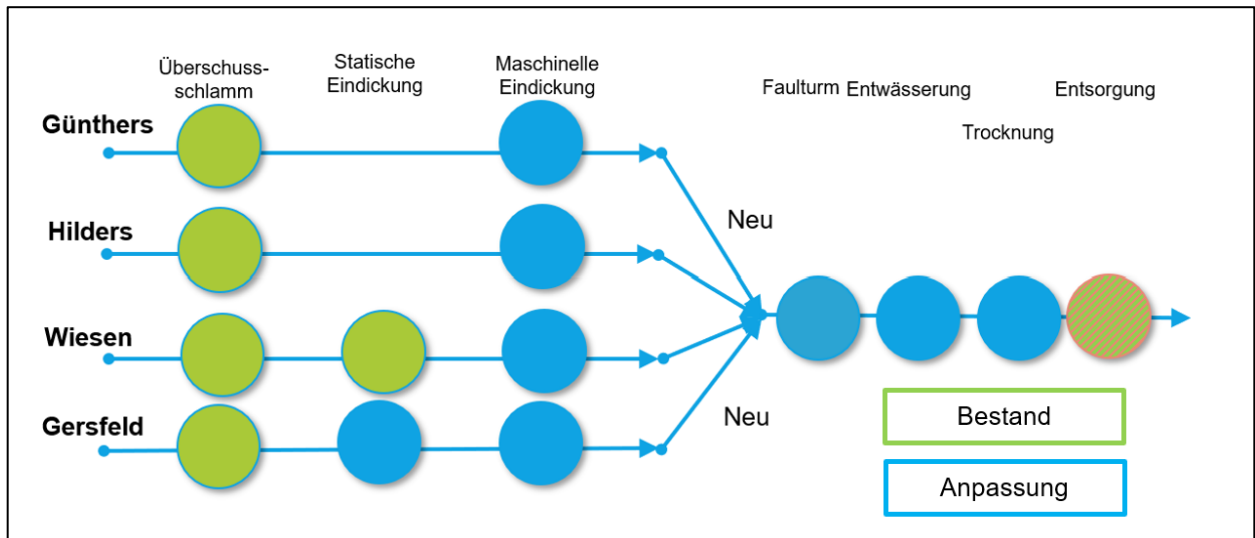


Abbildung 64: Ablaufschema der Region Ost

7.2.1 Klärschlammmanfall

Aktuell fallen in der Region Ost 467,3 t TS/a Klärschlamm an. Mehr als die Hälfte des Schlammes fällt auf den drei Kläranlagen der Größenklasse 3 an (vgl. Abbildung 65). Die Klärschlamm-mengen - ausgewiesen für die jeweiligen Kläranlagen - können der Abbildung 66 entnommen werden. Aufgrund des geplanten Anschlusses von der Kläranlage „Langenbieber“ an die Kläranlage „Wiesen“, wurde Ersterer in der Auflistung in Abbildung 66 nicht mehr aufgeführt.

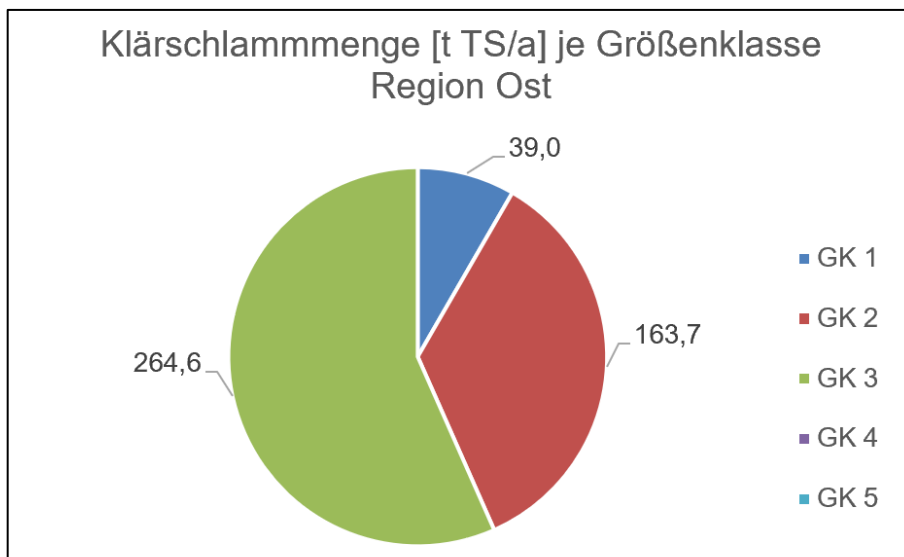


Abbildung 65: Klärschlamm-mengen je Größenklassen in der Region Ost

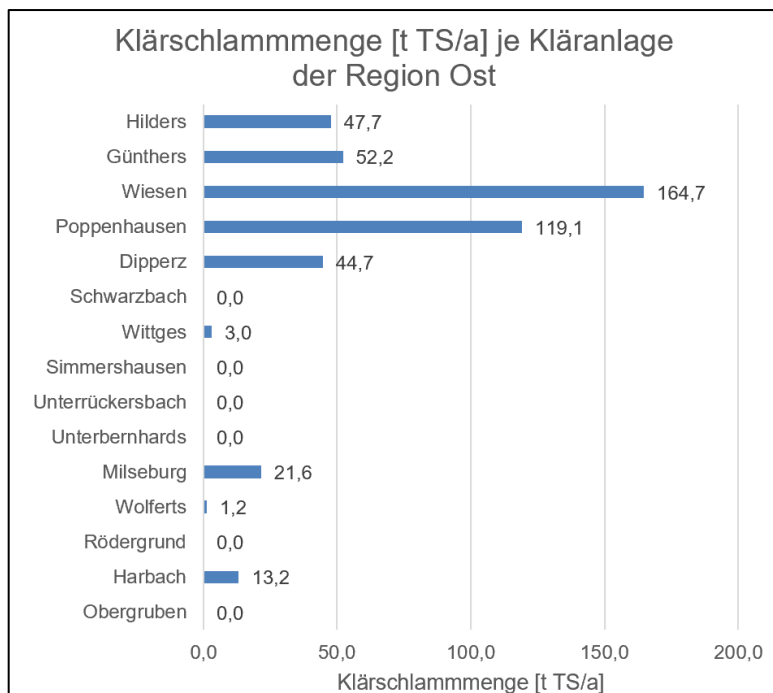


Abbildung 66: Klärschlammengen je Kläranlage in der Region Ost

Der Klärschlammfall in der Region lässt sich durch eine Umstellung auf anaerobe Schlammstabilisierung um etwa 7 % reduzieren.

Tabelle 42: Glühverluste einzelner Kläranlagen in der Region Ost

Kläranlage	Glühverlust [%]
Hilders	64
Günthers	20,5

Hierbei wurde von einer Mengenreduzierung von 20 % für die Kläranlagen „Wiesen“ und „Gersfeld“ ausgegangen. In der Tabelle 43 sind die jeweiligen Mengen dargestellt. Es ist hierbei zu beachten, dass die Kläranlage „Hilders“ bereits anaerob stabilisiert und somit keine Mengenreduzierung zu erwarten ist. Der Klärschlamm auf der Kläranlage „Günthers“ (Tann (Rhön)) wird aktuell mit einer Kammerfilterpresse entwässert und mit Kalk zugesetzt, was einen niedrigen Glühverlust begünstigt. Neben einer besseren Entwässerbarkeit wird der Klärschlamm durch den Kalk stabilisiert. Daher wird von keiner möglichen Einsparung durch Schlammalter-Reduzierung ausgegangen.

Tabelle 43: Reduzierung der Klärschlammengen in der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
Klärschlammmenge aktuell [m ³ /a]	1.980	132	4.475	3.588
TS-Gehalt aktuell	2,0	34,3	3,0	3,0
Klärschlammmenge nach Reduzierung um 20 %	1.980	132	3.820	2.871
Einsparung m ³ /a durch Umstellung auf anaerobe Schlammstabilisierung	-	-	655	718

Neben einer Einsparung im Volumen des Klärschlammes, kommt es auch zu Einsparung bei der Belüftungsenergie. Diese lässt sich auf die geringere Belastung der Belebungsstufe durch die

Errichtung einer Vorklärung erklären. Durch die Reduzierung des Schlammalters lassen sich in der Region Ost etwa 38 t CO₂/a einsparen.

Tabelle 44: Einsparungen Belüftungsenergie Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
BSB5-Fracht [kg/d] bei 60 g/EW*d spez. BSB-Fracht	540	450	420	450
Eliminierung in der Vorklärung [kg/d] 25 %	135	113	-	113
O₂ Einsparungen [kg/d]	135	113	-	113
Energieeinsparungen [kWh/a]	34.493	28.744	-	28.744
CO₂-Einsparpotential Belüftung [t CO₂/a]	14	12	-	12
Summe [t CO₂/a]	38			

7.2.2 Klärschlammaufbereitung auf 5 % TS

Für ein möglichst geringes Transportvolumen des Klärschlammes ist dieser auf den einzelnen Kläranlagen einzudicken. Die Kläranlagen haben bisher keine maschinelle Eindickung verfügbar. Statische Eindicker sind auf dem Gelände der Kläranlagen „Wiesen“, „Günthers“, sowie „Hilders“ vorhanden. In der Tabelle 45 sind für die jeweiligen Kläranlagen die möglichen Einsparungen in der Klärschlammmenge durch eine Schlammeindickung dargestellt. Bei den Einsparungen von rund 5.750 m³/a ist zu beachten, dass diese auf unterschiedliche TS-Gehalte in den Ausgangswerten zurück zu führen sind. Die Mengenerhöhung auf der Kläranlage „Günthers“ der Stadt Tann (Rhön) lässt sich durch den aktuell höheren TS-Gehalt erklären.

Tabelle 45: Mengenreduzierung durch Schlammeindickung (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	1.980	132	4.475	3.588
TS-Gehalt aktuell	2,0	34,3	3,0	3,0
Klärschlammmenge nach Reduzierung um 20 %	1.980	132	3.820	2.871
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt	792	1.493	994	1.148
Einsparung m³/a anaerobe Schlammstabilisierung / Eindickung auf 5 %	1.188 <i>Reduktion</i> <i>um 60 %</i>	-1.361 <i>Erhöhung wg.</i> <i>bestehendem</i> <i>TS-Gehalt</i>	3.481 <i>Reduktion</i> <i>um 78 %</i>	2.440 <i>Reduktion</i> <i>um 68 %</i>
Summe möglicher Einsparungen m³/a (bei verschiedenen TS-Gehalten)	5.748			

7.2.3 Transport

Bei dem Transport des eingedickten Schlammes zur Kläranlage in Hilders wird von einem Silo-LKW mit 28 m³ ausgegangen. Insgesamt wird durch den Transport innerhalb der Region 1,9 t CO₂/a ausgestoßen.

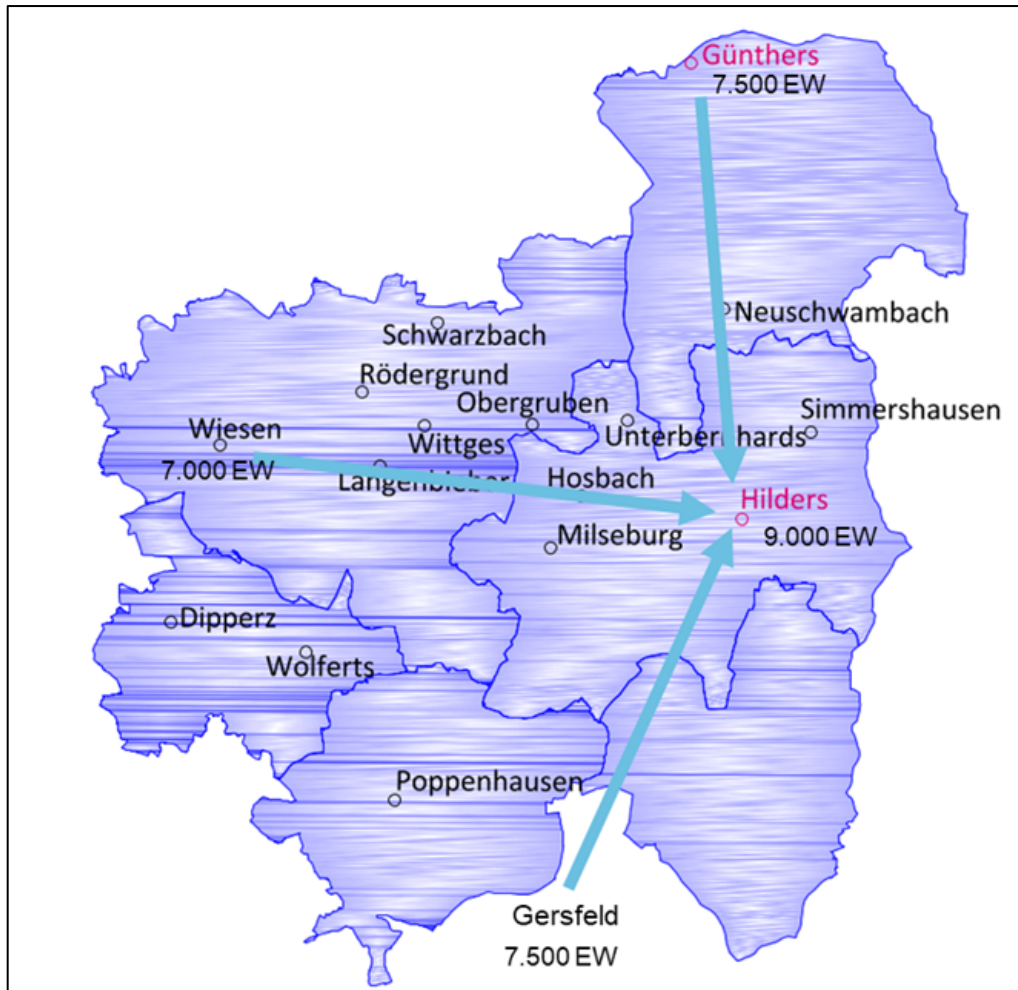


Abbildung 67: Transportstrecken innerhalb der Region Ost

Tabelle 46: Transportmengen innerhalb der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	7.500	7.000	7.500
Klärschlammmenge [m³/a bei 5 % TS]	1.493	994	1.148
Einfache Entfernung [km]	12,6	20,4	22,6
Transportfahrten pro Jahr	54	36	42
CO₂-Ausstoß Transport [t CO₂/a]	0,5	0,6	0,8
Summe [t CO₂/a]	1,9		

7.2.4 Energetische Nutzung

In der Region Ost ist derzeit keine Faulungsanlage vorhanden. Daher wurde ein Neubau einer Anlage auf der größten Kläranlage der Region (Kläranlage „Hilders“) überprüft. Es wurde für eine Kostenreduzierung von einer Faulung nach landwirtschaftlichem Vorbild ausgegangen. Bei der Betrachtung des Strom- und Wärmeverbrauchs wird von einer 100 % Nutzung ausgegangen. In wieweit dies auf der Kläranlage „Hilders“ genutzt werden kann, ist in einer gesonderten Planung zu ermitteln. Die Faulung in Hilders wurde für 32.000 EW ausgelegt. Neben dem Faulturm sind in den geschätzten Kosten auch eine Gasreinigung und ein Blockheizkraftwerk enthalten. Durch die Kooperation können jährlich zusätzlich bis zu 315 t CO₂/a eingespart werden.

Tabelle 47: CO₂-Einsparpotentiale in der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Strom- und Wärmeproduktion				
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
Stromproduktion in [kWh/a]	151.920	126.600	118.160	126.600
CO₂-Einsparpotential Strom [t CO₂/a]	61	51	47	51
Wärmeproduktion in [kWh/a]	190.984	159.153	148.543	159.153
CO₂-Einsparpotential Wärme [t CO₂/a]	31	25	24	25
CO₂-Ausstoß Transport [t CO₂/a]	0	0,5	0,6	0,8
Summe CO₂-Potential je Anteil Kläranlage [t CO₂/a]	92	76	71	76
Summe [t CO₂/a]	315			

7.2.5 Entwässerung

In der Region sind aktuell zwei Entwässerungen vorhanden (Kläranlage „Günthers“ und „Hilders“). Bei den beiden Maschinen handelt es sich um Kammerfilterpressen älteren Bestandes. Die Entwässerung auf der Kläranlage „Hilders“ ist außer Betrieb. Für eine zukünftige Entwässerung nach regionalem Konzept wird mit der Investition in eine neue Zentrifuge für die Behandlung des Schlammes aus der Faulung ausgegangen. Angaben zu Kosten und Wirtschaftlichkeit sind im Kapitel 7.2.8 dargestellt.

Tabelle 48: Mengenreduzierung durch eine Entwässerung in der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	1.980	132	4.475	3.588
TS-Gehalt aktuell [%]	2,0	34,3	3,0	3,0
Klärschlammmenge nach Reduzierung um 20 % [m³/a] <small>Vorschlag anaerobe Schlammstabilisierung, Kap. 7.2.1</small>	1.980	132	3.820	2.871
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt [m³/a] <small>Vorschlag Schlammeindickung, Kap. 7.2.2</small>	792	1.493	994	1.148
Klärschlammmenge mit 25 % TS-Gehalt [m³/a]	396	299	133	230
Einsparung durch Entwässerung [m³/a] zu TS-Gehalt aktuell	1.584 Reduktion um 80 %	-167	4.342 Reduktion um 97 %	3.358 Reduktion um 94 %
Summe möglicher Einsparungen m³/a <small>(bei verschiedenen TS-Gehalten)</small>	9.117			

7.2.6 Trocknung

Um eine weitere Mengenreduzierung des Klärschlammes zu erreichen wurde eine Trocknung für den Klärschlamm der Region Ost überprüft. Hierfür wurde ein Richtpreisangebot von der Firma ThermoSystem angefordert. Die Trocknung wurde auf 1.120 t/a bei 25 % Eingangs-TR und ein

Ausgangs-TR von 65 % ausgelegt. Hierfür ergibt sich eine 56 x 16 m Trocknungshalle. Der Schlammumsatz für die Schlammmenge kann der Abbildung 68 entnommen werden.

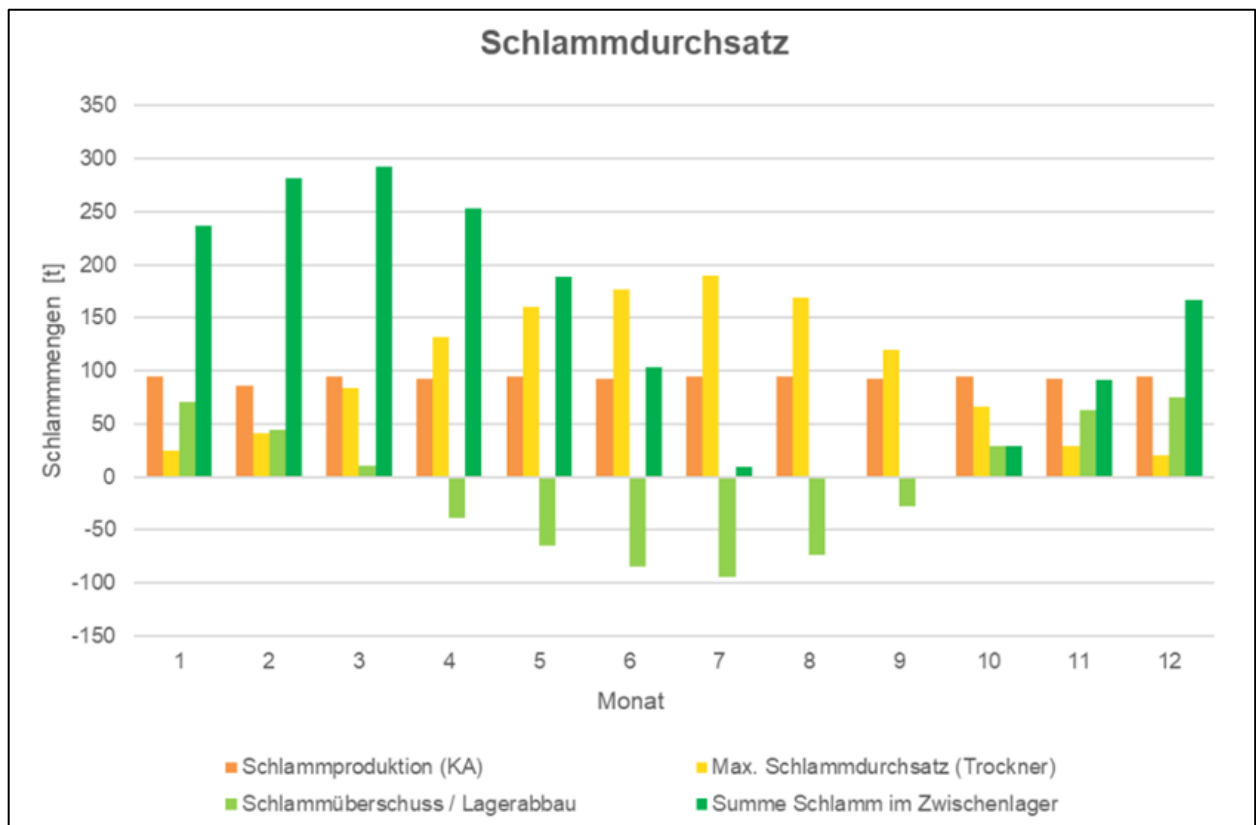


Abbildung 68: Schlammumsatz der Trocknung in Hilders nach Bemessung von ThermoSystem

Tabelle 49: Mengenreduzierung durch eine Trocknung in der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	1.980	132	4.475	3.588
TS-Gehalt aktuell [%]	2,0	34,3	3,0	3,0
Klärschlammmenge nach Reduzierung um 20 % [m³/a] Vorschlag anaerobe Schlammstabilisierung, Kap. 7.2.1	1.980	132	3.820	2.871
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt [m³/a] Vorschlag Schlammeindickung, Kap. 7.2.2	792	1.493	994	1.148
Klärschlammmenge mit 25 % TS-Gehalt [m³/a] Vorschlag Entwässerung, Kap. 7.2.5	396	299	133	230
Klärschlammmenge mit 65 % TS-Gehalt [m³/a]	152	115	51	88
Einsparungen [m³/a] zu TS-Gehalt aktuell	1.828 Reduktion um 92 %	17 Reduktion um 12 %	4.424 Reduktion um 99 %	3.500 Reduktion um 98 %
Summe möglicher Einsparungen m³/a (bei verschiedenen TS-Gehalten)	9.769			

Nach der Trocknung überbleibt eine Menge von 406 m³/a (bei 65 % TR) für die Entsorgung.

7.2.7 Verbrennung

Eine eigene Verbrennung für die Region ist unwirtschaftlich und wurde somit nicht genauer betrachtet.

7.2.8 Wirtschaftlichkeit

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Wirtschaftlichkeit wurden die drei Szenarien aus Tabelle 23 untersucht und miteinander verglichen. Die genannten Kosten und Einsparungen dienen der Darstellung einer Tendenz.

7.2.8.1 Bestandskosten

Der Klärschlamm der Kläranlagen „Hilders“, „Günthers“ und „Wiesen“ in der Region Ost sowie der Schlamm der ergänzend aufgeführten Kläranlage „Gersfeld“ wird in die Landwirtschaft ausgebracht. Die Flächenakquise wird eigenständig bzw. fremd vergeben. Dementsprechend wurden die Bestandskosten in Anlehnung an die Tabelle 26 ermittelt (vgl. Tabelle 50).

Tabelle 50: Bestandskosten in der Region Ost ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	1.980	132	4.475	3.588
TS-Gehalt aktuell [%]	2,0	34,3	3,0	3,0
Aufbereitungskosten aktuell [€/a]	-	28.425	-	-
Entsorgungskosten [€/a]	59.400	119.370	251.374	119.370
Gesamtkosten [€/a]	59.400	147.795	251.374	119.370
Entsorgungskosten der Kläranlagen Region Ost und der Kläranlage „Gersfeld“ [€/a]	577.940			

7.2.8.2 Worst Case

Gemäß der Grundkonstellation für das Worst Case Szenario, wird auf jeder der Kläranlagen ab der Größenklasse 3 inklusive der Kläranlage „Gersfeld“ eine dezentrale Entwässerung vorgenommen und anschließend der Klärschlamm in die Verbrennung übergeben. Die dafür entstehenden Kosten sind der Tabelle 51 zu entnehmen.

Tabelle 51: Kosten "Worst Case" der Region Ost ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
Klärschlammmenge [m³/a]	396	299	133	230
TS-Gehalt [%] nach einer dezentralen Entwässerung	25,0	25,0	25,0	25,0
Aufbereitungskosten [€/a]	122.147	112.697	109.547	112.697
Entsorgungskosten [€/a]	47.520	35.843	23.854	27.559
Gesamtkosten [€/a]	169.667	148.540	133.401	140.256
Entsorgungskosten der Kläranlagen Region Ost und der Kläranlage „Gersfeld“ [€/a]	591.865			

7.2.8.3 Kooperation

Einsparungen Belüftung

Tabelle 52: Einsparung Belüftungsenergie in der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
BSB₅-Fracht [kg/d] bei 60 g/EW*d spez. BSB-Fracht	540	450	420	450
Eliminierung in der Vorklärung [kg/d] 25 %	135	113	-	113
O₂ Einsparungen [kg/d]	135	113	-	113
Energieeinsparungen [kWh/a]	34.493	28.744	-	28.744
Summe Einsparungen [€/a]	8.623	7.186	-	7.186
Summe [€/a]	22.995			

Eindickung

Für die Kläranlagen „Hilders“, „Günthers“, „Wiesen“ und „Gersfeld“ wurde eine maschinelle Eindickung überprüft. Eine statische Eindickung ist auf den drei Kläranlagen der Region Ost (ohne „Gersfeld“) vorhanden.

Tabelle 53: laufende Kosten für die Eindickung in der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
Schlammmenge [m³/a]	792	1.493	994	1.148
Abschreibung Maschine [€/a]	23.526	23.526	23.526	23.526
Flockungsmittel [€/a]	3.600	3.000	2.800	3.000
Wasser [€/a]	1.350	1.125	1.050	1.125
Strom[€/a]	2.257	4.256	2.833	3.273
Wartung [€/a]	1.500	1.500	1.500	1.500
Personal [€/a]	5.000	5.000	5.000	5.000
Summe ohne Abschreibung [€/a]	13.707	14.881	13.183	13.898
Summe mit Abschreibung [€/a]	37.232	38.407	36.708	37.432
Gesamtsumme [€/a]	149.779			

Transport

Für den Transport des Klärschlammes wurden 7 €/km und die einfache Entfernung nach Hilders angenommen. Die Transportwege sind in Abbildung 67 dargestellt und die Berechnungen zu den Transportfahrten sind in nachstehender Tabelle 54 einsehbar.

Tabelle 54: Transportkosten innerhalb der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
Schlammmenge [m³/a]	792	1.493	994	1.148
Transportstrecke	-	12,6	20,4	22,6
Transportfahrten pro Jahr	-	54	36	42
Kosten [€/a]	-	4.763	5.141	6.644
Summe [€/a]	16.548			

Annahmekosten

Für die Verarbeitung des Klärschlammes in Hilders wird mit Annahmekosten von 30 €/m³ ausgegangen.

Tabelle 55: Annahmekosten Hilders mit und ohne vorherige Eindickung

Kenndaten	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	7.500	7.000	7.500
Schlammmenge [m ³ /a] aktuell	1.980	4.475	3.588
TS-Gehalt aktuell [%]	2,0	3,0	3,0
Annahmekosten [€/a]	112.011	49.696	107.652
Schlammmenge [m ³ /a] mit 5 % TS-Gehalt	1.493	994	1.148
Annahmekosten [€/a]	44.804	29.818	34.449
Einsparungen durch Eindickung [€/a]	67.207	19.878	73.203
Summe [€/a]	160.288		

Nutzung energetisches Potential

Tabelle 56: CO₂-Einsparpotentiale in der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Strom- und Wärmeproduktion				
Ausbaugröße [EW]	9.000	7.500	7.000	7.500
Stromproduktion in [kWh/a]	151.920	126.600	118.160	126.600
Wärmeproduktion in [kWh/a]	190.984	159.153	148.543	159.153
Summe Einsparungen je Anteil Kläranlage Strom [€/a]	37.980	31.650	29.540	31.650
Summe Einsparungen je Anteil Kläranlage Wärme [€/a]	47.746	39.788	37.136	39.788
Summe Einsparungen gesamt [€/a]	85.726	71.438	66.676	71.438
Summe [€/a]	295.278			

Entwässerung

Die Entwässerung auf der Kläranlage „Hilders“ ist momentan außer Betrieb. Es wurde mit der Investition in eine Zentrifuge gerechnet.

Tabelle 57: laufende Kosten der Entwässerung in der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Anteil Günthers	Anteil Wiesen	Anteil Gersfeld
Abschreibung Maschine [€/a]	30.247	-	-	-
Flockungsmittel [€/a]	29.700	24.750	23.100	24.750
Wasser [€/a]	1.350	1.125	1.050	1.125
Strom[€/a]	11.696	9.747	9.097	9.747
Wartung [€/a]	4.000	-	-	-
Personal [€/a]	31.200	-	-	-
Summe ohne Abschreibung je Kläranlage [€/a]	77.946	35.622	33.247	27.073
Summe ohne Abschreibung [€/a]	230.500			
Summe mit Abschreibung [€/a]	260.747			

Trocknung

Für Hilders wurde eine solare Trocknung ohne Abwärmenutzung ausgelegt. Für die Investition wurden 500.000 € angenommen.

Tabelle 58: laufende Kosten der Trocknung in der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders
Abschreibung Trocknung [€/a]	23.270
Strom [€/a]	5.250
Wartung [€/a]	1.400
Personal [€/a]	14.500
Summe mit Abschreibung [€/a]	44.420

Schlamm Entsorgung und Vergleich der Szenarien

Tabelle 59: mögliche Einsparungen in der Trocknung gegenüber der Entwässerung

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Klärschlammmenge bei 25 % TS-Gehalt [m³/a]	396	299	133	230
Aufbereitungskosten [€/a] ohne Abschreibung	173.888	-	-	-
Entsorgungskosten [€/a]	103.929	-	-	-
Gesamtentsorgungskosten [€/a]	277.817	-	-	-
Klärschlammmenge bei 65 % TS-Gehalt [m³/a]	152	115	51	88
Aufbereitungskosten [€/a] ohne Abschreibung	21.150	-	-	-
Entsorgungskosten [€/a]	40.871	-	-	-
Gesamtentsorgungskosten [€/a]	62.021	-	-	-
Einsparungen Trocknung zur Entwässerung [€/a] = Gesamteinsparung	185.498	-	-	-

Zusammenfassung

Tabelle 60: Zusammenfassung der Region Ost (gerundete Werte)

Kenndaten	Hilders	Günthers	Wiesen	Gersfeld
Ausbaugröße	9.000	7.500	7.000	7.500
Klärschlammmenge [m³/a] bei 5 % TS Vorschlag Schlammeindickung, Kap. 7.2.2	792	1.493	994	1.148
Laufende Kosten Eindickung mit Abschreibung [€/a]	37.232	38.407	36.708	37.432
Einsparungen Transport [€/a]	-	67.207	19.878	73.203
Einsparungen energetisches Potential [€/a]	8.623	7.186	-	7.186
Annahmekenkosten Hilders	+ 109.071	- 44.804	- 29.818	- 34.449
Laufende Kosten Entwässerung ohne Abschreibung [€/a]	230.500	-	-	-
Laufende Kosten Entwässerung mit Abschreibung [€/a]	260.747	-	-	-
Laufende Kosten Trocknung ohne Abschreibung [€/a]	21.150	-	-	-
Laufende Kosten Trocknung mit Abschreibung [€/a]	44.420	-	-	-
Amortisation Eindicker je Kläranlage [a]	nicht	10,3 (Worst Case)	17,2 (Worst Case)	12,3 (Worst Case)
Amortisation Trocknung in Hilders [a]	nicht	-	-	-
Mögliche Kosteneinsparungen je Kläranlage [€/a]	Bestand: -102.207 Worst Case: 8.059	Bestand: 43.737 Worst Case: 44.482	Bestand: 194.720 Worst Case: 76.747	Bestand: 39.782 Worst Case: 60.668
Mögliche Kosteneinsparungen [€/a]	Bestand: 176.032 Worst Case: 189.958			

Sensitivität

Auch für die Region Ost wurde eine Sensitivitätsuntersuchung bei verschiedenen Strompreisen durchgeführt. Hierbei ist zu erkennen, dass bei steigenden Strompreisen sich eine Kooperation der Kommunen wirtschaftlich darstellen lässt. Die aktuellen niedrigen Verwertungskosten der Landwirtschaft und die hohen Investitionskosten lassen jedoch bei Strompreisen größer 0,5 Cent pro kWh einen geringeren Effekt bei der Kläranlage „Hilders“ erkennen (vgl. Abbildung 69).

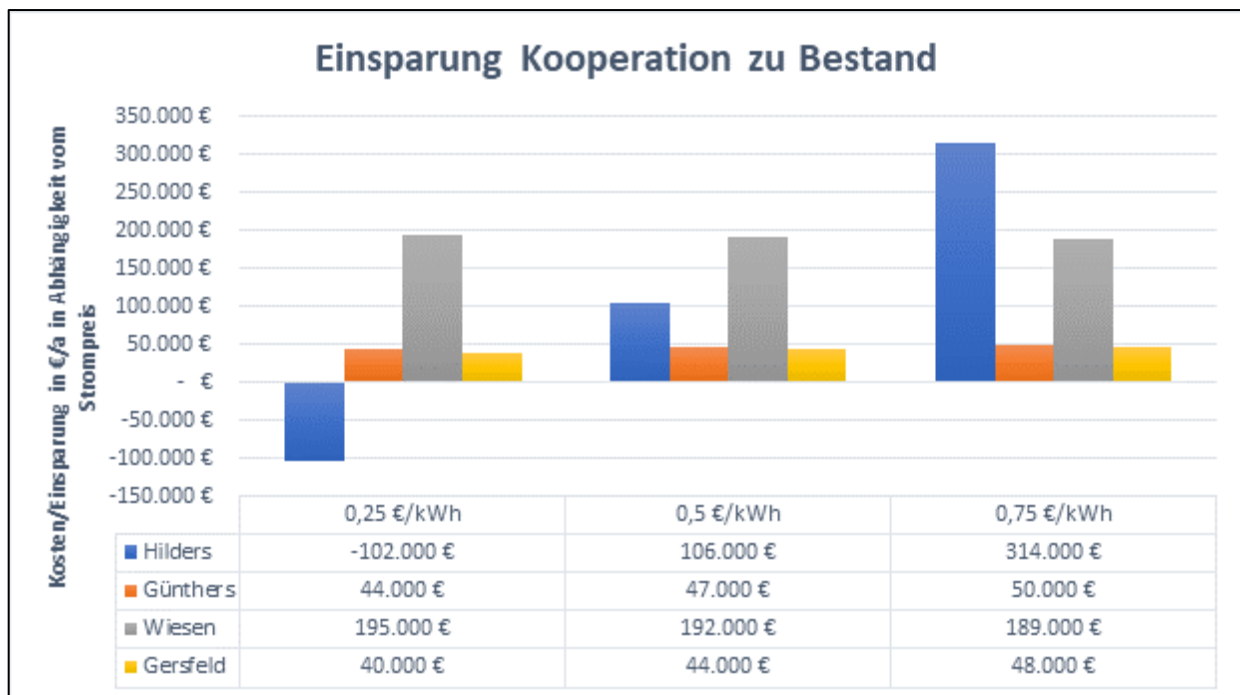


Abbildung 69: mögliche Einsparungen der Kooperation zum Bestand

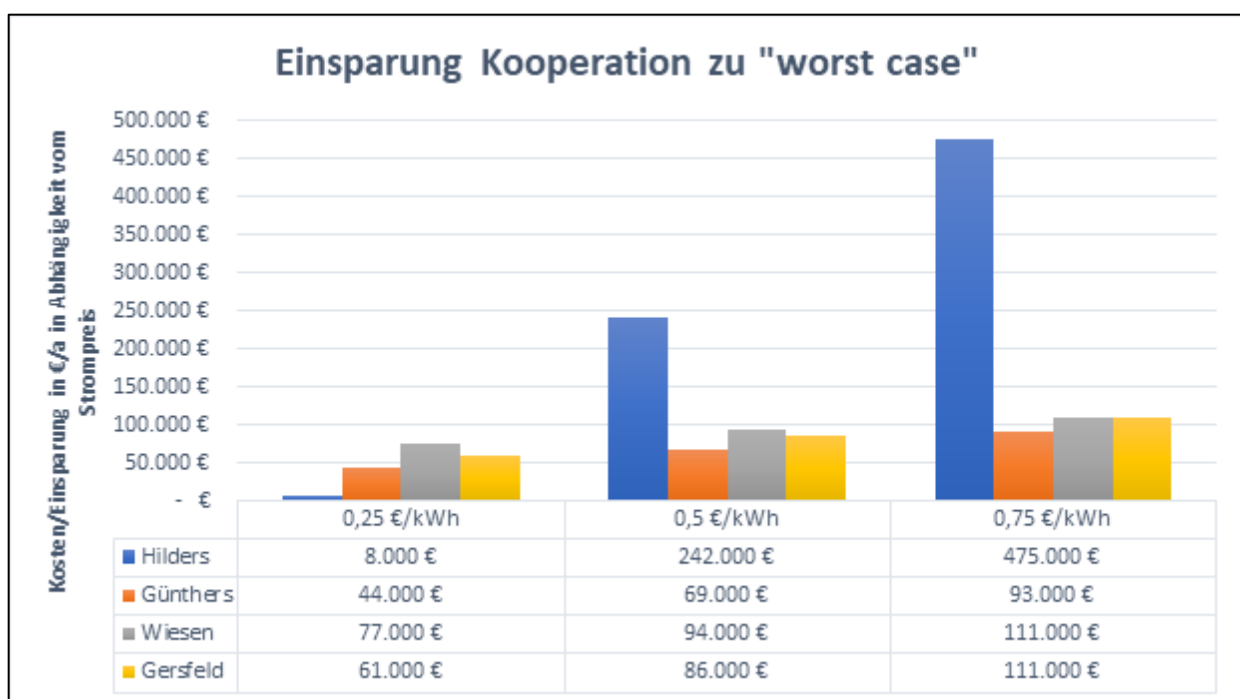


Abbildung 70: mögliche Einsparungen der Kooperation zum Worst Case Szenario

Die Einsparungen innerhalb der Region steigen mit steigenden Strompreisen. Durch die hohen Investitionskosten ist bei einem Strompreis von 25 ct/kWh die Kooperation mit Errichtung einer Faulung nicht wirtschaftlich.

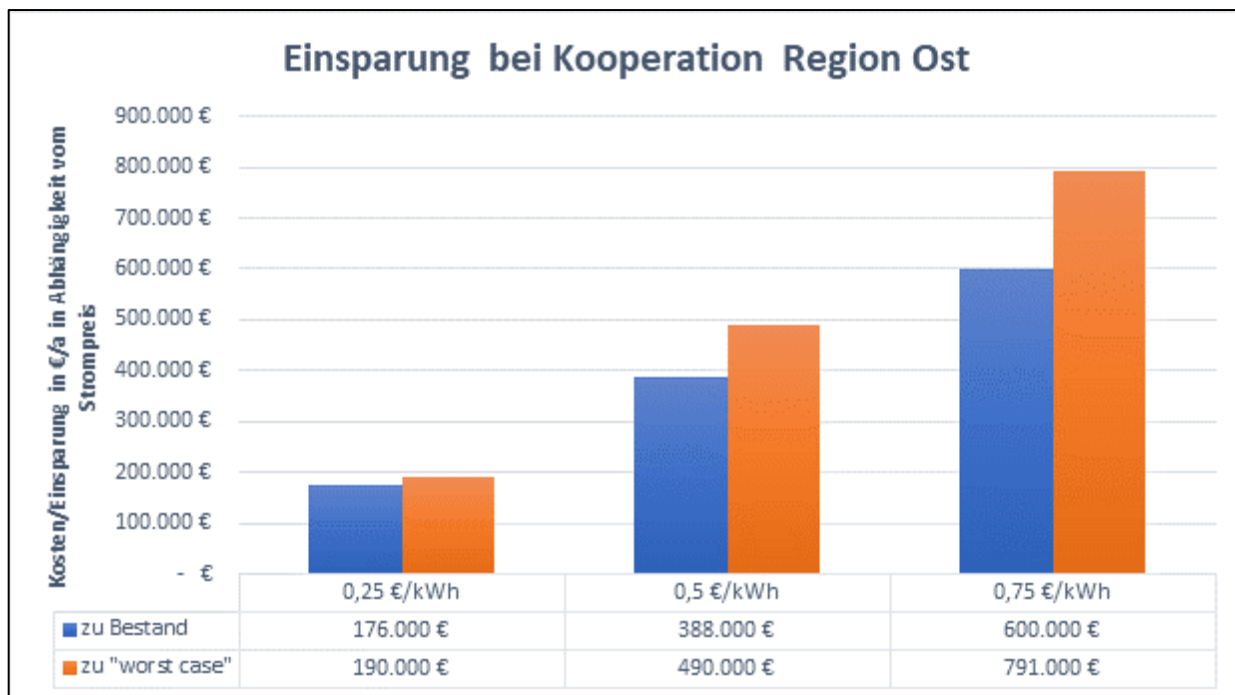


Abbildung 71: mögliche Einsparungen der Kooperation innerhalb der Region Ost

7.2.9 Landwirtschaftliche Verwertung

Die Kläranlagen der Größenklasse 1 und 2 können auch weiterhin ihren Klärschlamm in die landwirtschaftliche Verwertung überführen. In der Region Ost fallen für diese Anlagen 1.859 m³/a Klärschlamm für eine landwirtschaftliche Verwertung an. Die jeweiligen Grenzwerte der überprüften Kläranlagen werden eingehalten.

7.2.10 Kooperationsmöglichkeit

Für eine kommunale Zusammenarbeit der Kommunen sind grundsätzlich alle genannten Kooperationsformen möglich. Zu empfehlen ist hier eine Zusammenarbeit auf Basis einer „Öffentlich-rechtlichen-Vereinbarung“. Die Kriterien nach dem EuGH Urteil sind entsprechend zu prüfen.

7.2.11 Handlungsempfehlung

Für die Region Ost wird die Errichtung einer zentralen Klärschlammbehandlung auf dem Gelände der Kläranlage „Hilders“, inklusive Faulturn, Entwässerung und Blockheizkraftwerk im Rahmen der Konzipierung vorgeschlagen. Die Kläranlagen der Kommunen Günthers (Tann), Wiesen (Hofbieber) und Gersfeld (Rhön) liefern den teilstabilisierten Schlamm an die Faulung der Kläranlage „Hilders“. Der erzeugte Strom und die Abwärme kann in Hilders auf der Kläranlage sowie anderen kommunalen Bereichen wie Schwimmbad und Schule verbraucht werden. Zur Reduzierung der Transportmenge empfiehlt es sich für die zuliefernden Kläranlagen eine maschinelle Eindickung zu installieren. Für eine weitere Mengenreduzierung kann der Bau einer Solartrocknung überprüft werden. Eine Trocknung mit vorheriger Entwässerung lässt sich nicht wirtschaftlich darstellen.

7.3 Region Süd

In der Region Süd sind neun Kläranlagen mit einer insgesamt Anschlussgröße von 32.710 Einwohnerwerten (EW). Die größten Kläranlagen sind hierbei „Löschenrod“ mit 12.000 EW, gefolgt von „Gersfeld“ (7.500 EW) und „Uttrichshausen“ (3.800 EW). Insgesamt sind drei der neun Kläranlagen Teichkläranlagen mit einer Anschlussgröße von 9.980 EW. Die Region besteht aus den Kommunen Eichenzell, Ebersburg, Kalbach und Gersfeld (Rhön). Der Großteil der Region stellt hierbei ebenfalls das Verbandsgebiet des Abwasserverbandes „Oberes Fuldataal“ dar. Aus der Abbildung 72 kann die Region Süd, dargestellt mit den jeweiligen Kläranlagen, entnommen werden. Grün umrandet sind dabei die jeweiligen Teichkläranlagen.

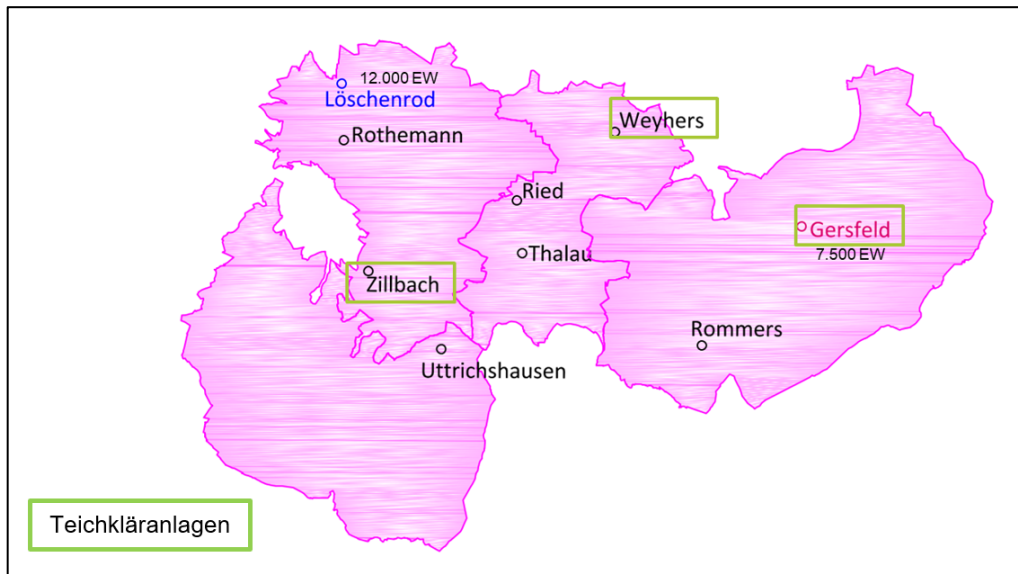


Abbildung 72: Region Süd mit Angabe der Kläranlagen

Die neun Kläranlagen sind den vier Größenklassen 1-4 zugeordnet. Den größten Anteil macht die Größenklasse 2 mit insgesamt fünf Anlagen aus.

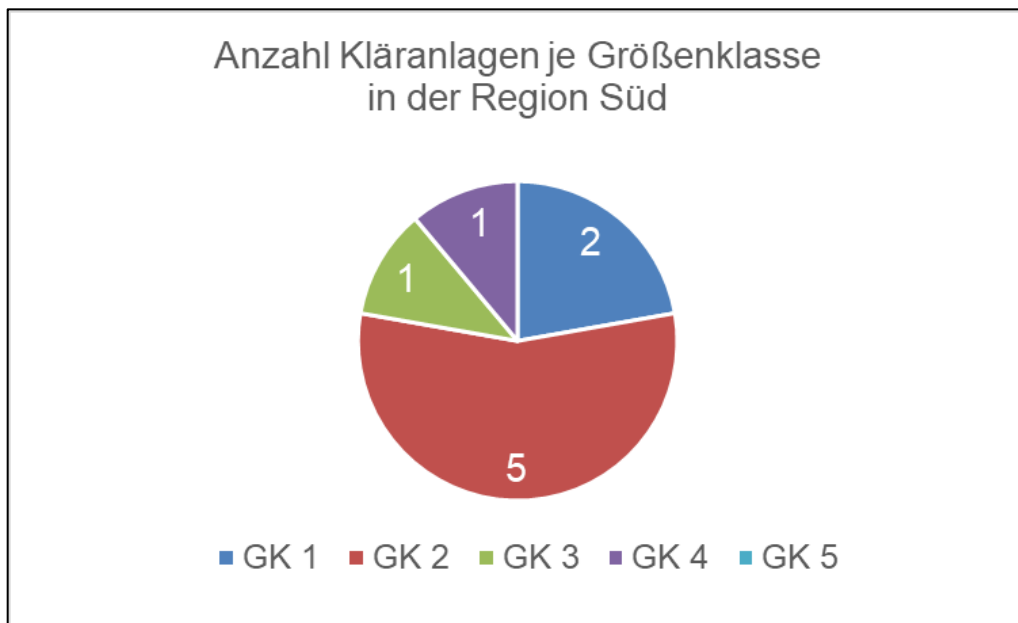


Abbildung 73: Anzahl der Kläranlagen je Größenklasse in der Region Süd

Wie für die anderen Regionen wurde das Konzept nach dem in Abbildung 74 gezeigten Konzeptablauf überprüft. In blau sind die Unterpunkte gekennzeichnet, welche in der Region

berechnet wurden. Gelb sind die Verfahrensschritte, welche außerhalb der Region Süd und zwar in den Regionen Mitte (siehe Kapitel 7.6) und Ost (siehe Kapitel 7.2) ablaufen.

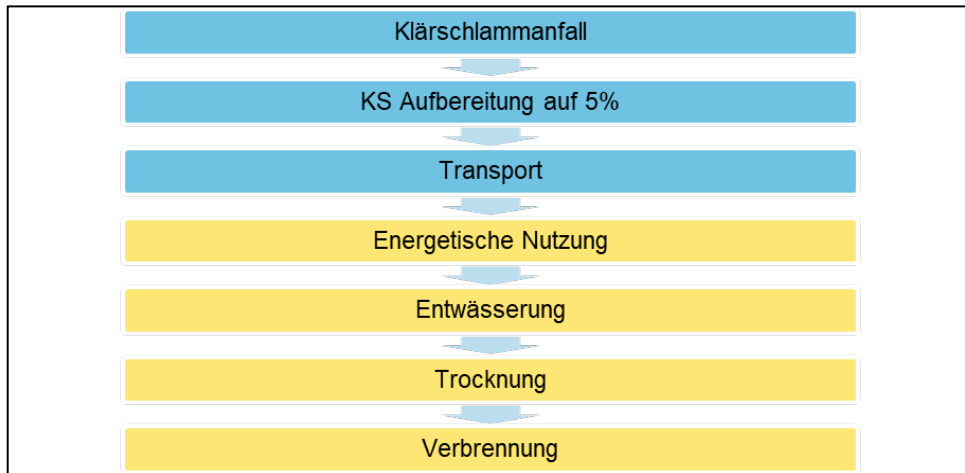


Abbildung 74: Konzeptverlauf der Region Süd

Im Ablaufschema (vgl. Abbildung 75) sind die Klärschlammwege der beiden größten Kläranlagen (Kläranlage „Gersfeld“ und Kläranlage „Löschenrod“) dargestellt. Die grünen Punkte stehen für bereits vorhandene Behandlungsstufen, wohingegen die blauen Felder für neue Verfahrensschritte stehen.

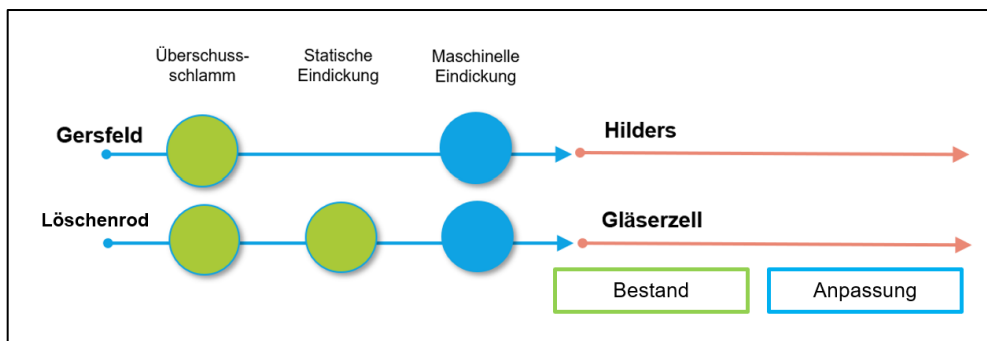


Abbildung 75: Ablaufschema der Region Süd

7.3.1 Klärschlammanfall

In der Region Süd fallen jährlich 1.076,1 t TS Klärschlamm an. In Abbildung 76 ist die Verteilung auf die jeweiligen Größenklassen dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass die Kläranlage „Löschenrod“, als einzige in der Größenklasse 4 angesiedelt, rund 70 % des gesamten Klärschlammes der Region ausmacht.

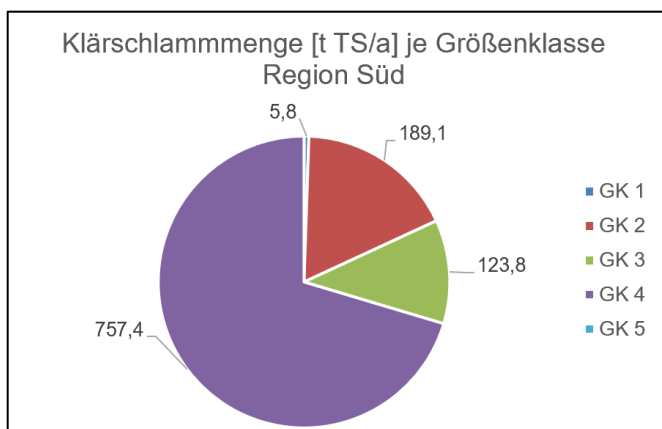


Abbildung 76: Klärschlammmenge je Größenklasse in der Region Süd

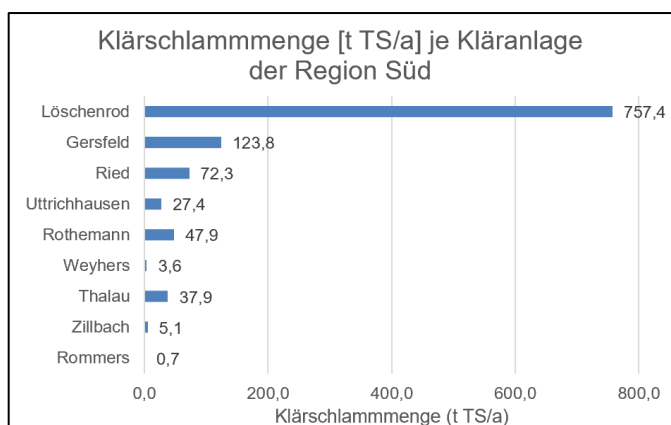


Abbildung 77: Klärschlammengen je Kläranlage in der Region Süd

In der Kläranlage „Löschenrod“ liegt der Glühverlust bei 24 %, was sich auf die Verwendung von Kalk bei der Entwässerung in der Kammerfilterpresse zurückführen lässt. Der Glühverlust ist ein Indiz für den Stabilisierungsgrad des Klärschlammes. Für eine energetische Nutzung des Klärschlammes sollte das Schlammalter reduziert und der Primärschlamm mittels Vorklärung entnommen werden. Durch die Entlastung der Belebung lässt sich Belüftungsenergie einsparen. In Tabelle 61 sind die möglichen Einsparungen in der Region Süd dargestellt.

Tabelle 61: Einsparungen Belüftung Region Süd (gerundete Werte)

Kenndaten	Löschenrod	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	12.000	7.500
BSB₅-Fracht [kg/d] bei 60 g/EW*d spez. BSB-Fracht	720	342
Eliminierung in der Vorklärung [kg/d] 25 %	180	86
O₂ Einsparungen [kg/d]	180	86
Energieeinsparungen [kWh/a]	45.990	21.845
CO₂-Einsparpotential Belüftung [t CO₂/a]	18	9
Summe [t CO₂/a]	27	

7.3.2 Klärschlammaufbereitung auf 5 % TS

Eine Mengenreduzierung des Klärschlammes durch Eindickung auf 5 % ist im folgenden Abschnitt überprüft worden. Durch eine Eindickung lässt sich die Menge an Schlamm deutlich reduzieren, was sich auch auf die Transportfahrten positiv auswirkt.

Tabelle 62: Mengenreduzierung durch Eindickung in der Region Süd (gerundete Werte)

Kenndaten	Löschenrod	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	12.000	7.500
Klärschlammmenge aktuell	2.220	3.588
TS-Gehalt aktuell	35,0	3,0
Klärschlammmenge nach Reduzierung um 20 %	1.776	2.871
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt	12.432	1.148
Einsparung m³/a durch Umstellung auf anaerobe Schlammstabilisierung	-10.656	2.440 Reduktion um 68 %
Summe möglicher Einsparungen m³/a (bei verschiedenen TS-Gehalten)	-8.216	

7.3.4 Transport

Der Transport des Klärschlammes erfolgt aus der Region in andere Regionen. Der Schlamm von der Kläranlage „Löschenrod“ wird zur Kläranlage „Gläserzell“ transportiert und der Schlamm der Anlage in Gersfeld nach Hilders. Die Wege sind in Abbildung 78 dargestellt.

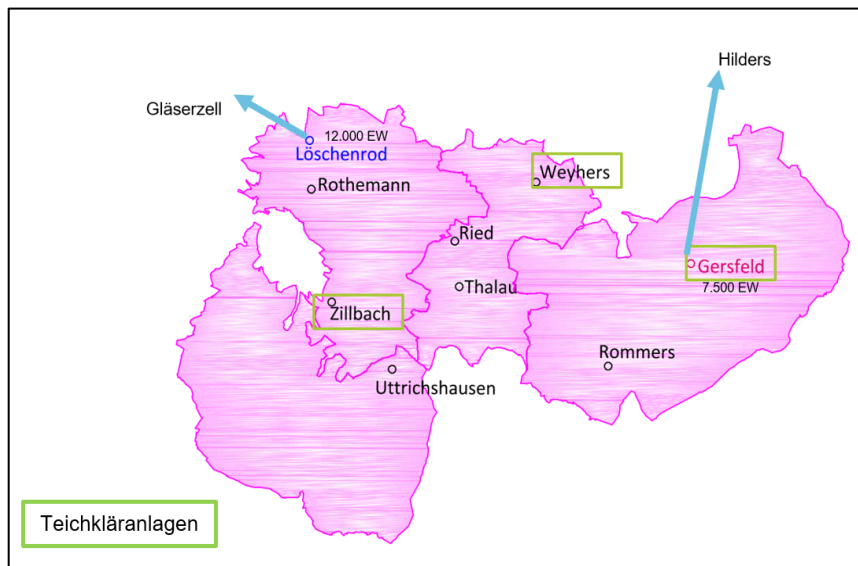


Abbildung 78: Transportwege der Region Süd

Tabelle 63: Transportmengen in der Region Süd (gerundete Werte)

Kenndaten	Löschenrod	Gersfeld
Ausbaugröße [EW]	12.000	7.500
Klärschlammmenge [m³/a bei 5 % TS]	12.432	1.148
Einfache Entfernung [km]	15	23
Transportfahrten pro Jahr	445	42
CO₂-Ausstoß Transport [t CO₂/a]	5,3	0,8
Summe [t CO₂/a]	6,1	

Insgesamt wird durch den Transport des reduzierten Klärschlammes auf 5 % TS aus der Region rund 6 Tonnen CO₂ pro Jahr ausgestoßen. Die weiteren Klärschlammbehandlungsschritte finden in anderen Regionen statt und sind in den dortigen Berechnungen berücksichtigt.

7.3.5 Landwirtschaftliche Verwertung

Die Kläranlagen Größenklasse 1 und 2 entsorgen weiterhin in die Landwirtschaft. Die entsprechenden Grenzwerte der einzelnen Verordnungen werden eingehalten. In der Region fallen 3.642,5 m³/a Klärschlamm für die landwirtschaftliche Verwertung an.

7.3.6 Kooperationsmöglichkeit

Es ergibt sich keine kommunale Zusammenarbeit der Kommunen in der Region Süd.

7.3.7 Handlungsempfehlung

Für die Region Süd wird eine externe Klärschlammverwertung der größeren Kläranlagen in anderen untersuchten Regionen empfohlen.

7.4 Region Südwest

Die Region Südwest umfasst die zwei Kommunen Neuhof und Flieden. Insgesamt haben beide Kommunen acht Kläranlagen mit einer Anschlussgröße von 36.620 EW. Die beiden größten Anlagen der Größenklasse 4 befinden sich in den Ortsteilen Neuhof (17.000 EW) und Flieden (13.500 EW). Insgesamt gibt es drei Teichkläranlagen in der Region mit einer Ausbaugröße von 3.150 EW. Diese sind in Abbildung 79 mit grünem Rand dargestellt.

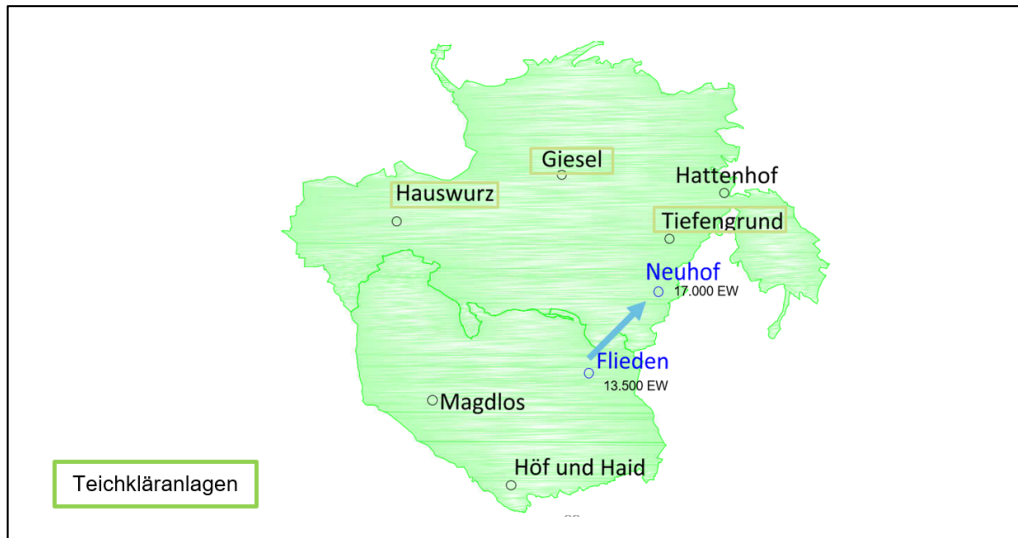


Abbildung 79: Region Südwest mit Angabe der Kläranlagen

Es sind insgesamt drei von fünf Größenklassen in der Region vertreten. Die Größenklasse 2 stellt mit vier Anlagen die meisten Kläranlagen einer Größenklasse (vgl. Abbildung 80).

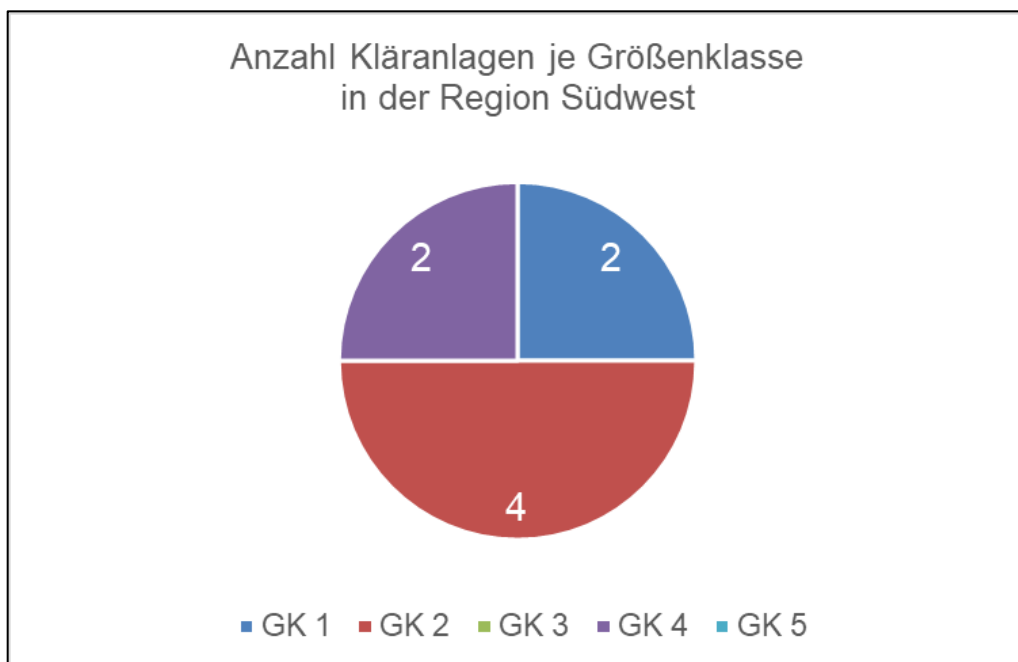


Abbildung 80: Anzahl Kläranlagen je Größenklasse der Region Südwest

Für die Region wurden alle Punkte des Konzeptablaufes der Abbildung 48 überprüft bis auf die Verbrennung. Die beiden größten Kläranlagen der Region (Kläranlage „Flieden“ und „Neuhof“) sind in ihrem Ablauf in der folgenden Abbildung 81 dargestellt. Hierbei stehen die Punkte für einzelne Verfahrensschritte der Schlammaufbereitung und -verwertung. Die grünen Kreise kennzeichnen die vorhandenen Schlammbehandlungen und die blauen Kreise die im Rahmen der Studie vorgeschlagenen Verfahrensschritte. Die rot-grün gestreiften Kreis stellen die

Verwertungspfade „Verbrennung“ und „landwirtschaftliche Ausbringung“ dar. Die gestrichelten Linien stehen für optionale Klärschlammreduzierungsmaßnahmen.

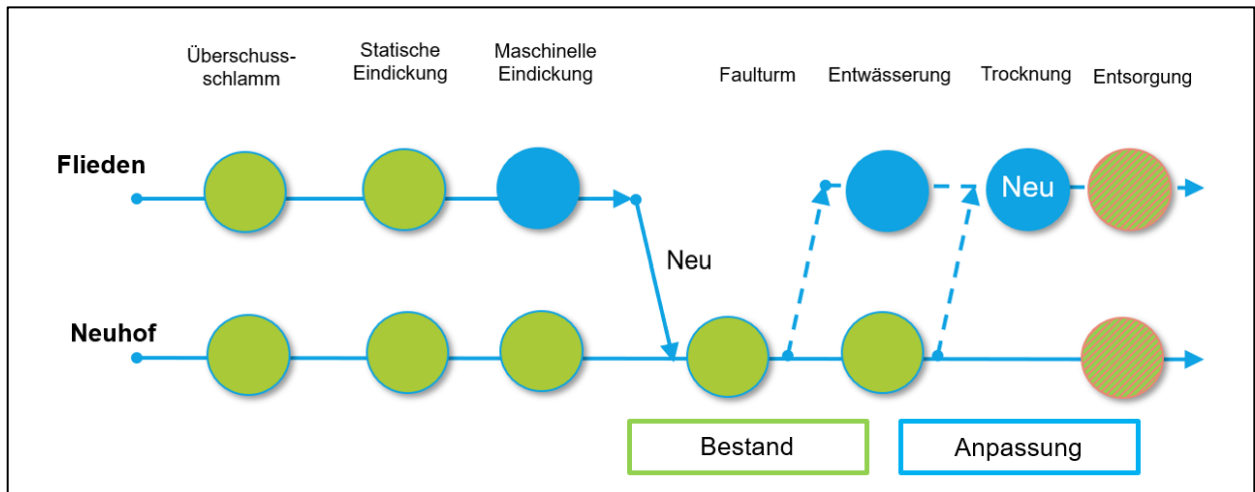


Abbildung 81: Ablaufschema der Region Südwest

7.4.1 Klärschlammmanfall

In der Region Südwest fallen jährlich 1.013,1 t TS Klärschlamm an. Über 90 % des gesamten Schlammes in der Region Südwest ist den zwei Kläranlagen „Neuhof“ und „Flieden“ der Größenklasse 4 zuzuordnen. Aus Abbildung 83 können die einzelnen Klärschlammengen je Kläranlage entnommen werden.

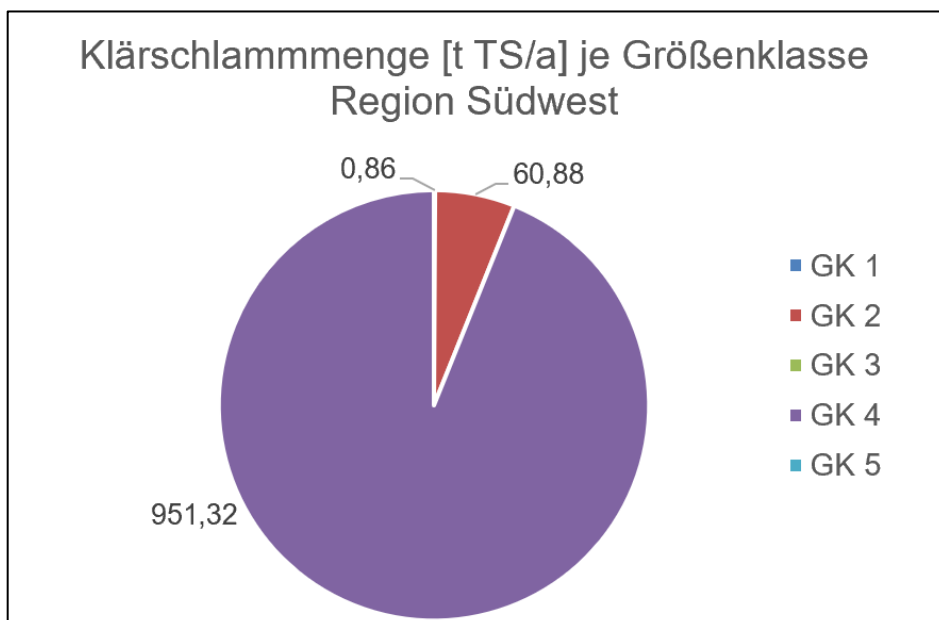


Abbildung 82: Klärschlammengen je Größenklasse in der Region Südwest

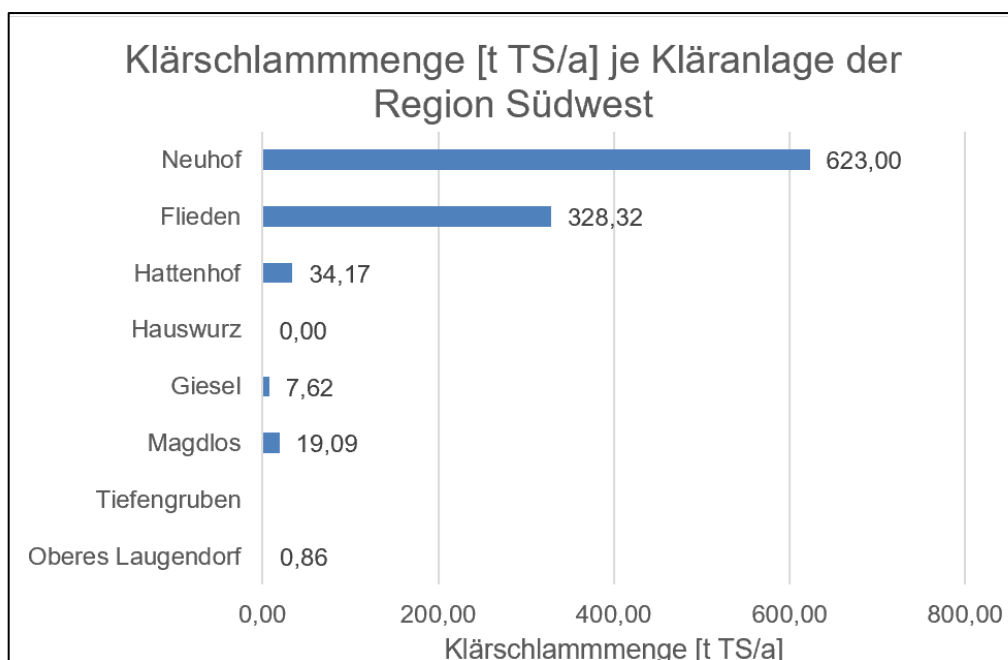


Abbildung 83: Klärschlammengen je Kläranlage in der Region Südwest

Für die Region Südwest wird als Szenario vorgegeben, dass der Klärschlamm auf der Kläranlage „Flieden“ für eine weitere Schlammbehandlung auf die Kläranlage „Neuhof“ transportiert wird. Auf dem Gelände der Kläranlage „Neuhof“ befindet sich eine Kammerfilterpresse. Um in dieser Konstellation Transportwege einzusparen, wird im Rahmen des Ablaufschemas aus Abbildung 48 die Umstellung der Kläranlage Flieden auf eine anaerobe Schlammstabilisierung durchkalkuliert. Wie der Tabelle 64 zu entnehmen ist, geht diese Einsparung im Volumen mit einer Reduzierung der Belüftungsenergie einher. Hintergrund ist die Verringerung des Schlammalters, welche zu einem CO₂-Einsparpotential von 11,5 t CO₂/a führt (vgl. Tabelle 64).

Tabelle 64: Einsparungen Belüftungsenergie Region Südwest (gerundete Werte)

Kenndaten	Flieden
Ausbaugröße [EW]	7.500
Klärschlammmenge aktuell [m ³ /a]	1.190
Klärschlammmenge nach Reduzierung um 20 % [m ³ /a]	952
BSB ₅ -Fracht [kg/d] bei 60 g/EW*d spez. BSB-Fracht	450
Eliminierung in der Vorklärung [kg/d] 25 %	113
O ₂ Einsparungen [kg/d]	113
Energieeinsparungen [kWh/a]	28.744
CO ₂ -Einsparpotential Belüftung [t CO ₂ /a]	11,5

7.4.2 Klärschlammaufbereitung auf 5 % TS

Gemäß dem Ablaufschema aus Abbildung 48 wurde für die Kläranlage „Flieden“ eine Schlammeindickung mit dem Zielwert von 5 % TS-Gehalt überprüft. Die Mengenerhöhung wird auf den hohen TS-Gehalt von 24 % zurückgeführt.

Tabelle 65: Mengenänderung durch Schlammeindickung (gerundete Werte)

Kenndaten	Neuhof	Flieden
Ausbaugröße [EW]	17.000	13.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	1.354	1.190
TS-Gehalt aktuell [%]	40,0	24,0
Klärschlammmenge nach Reduzierung um 20 % [m³/a]	-	952
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt [m³/a]	-	4.565
Klärschlammmenge nach Umstellung auf anaerobe Schlammbehandlung und Schlammeindickung [m³/a]	-	-3.616

7.4.3 Transport

Für eine energetische Nutzung des Klärschlammes in Neuhof ist im Rahmen dieser Konzeptionierung angedacht, den Schlamm der Kläranlage „Flieden“ nach Neuhof zu transportieren. Für die Transportfahrten wurde mit einem Silo-LKW mit 28 m³ Volumen gerechnet. Für den Transport von 4.565 m³ pro Jahr werden 0,8 t CO₂/a ausgestoßen (vgl. Tabelle 66).

Tabelle 66: Transportmengen innerhalb der Region Südwest (gerundete Werte)

Kenndaten	Flieden
Klärschlammmenge [m³/a bei 5 % TS]	4.565
Einfache Entfernung [km]	6,2
Transportfahrten pro Jahr	164
Summe CO ₂ -Ausstoß Transport [t CO ₂ /a]	0,8

7.4.4 Energetische Nutzung

Der bestehende Faulurm der Kläranlage „Neuhof“ hat Kapazitäten um den Schlamm der Kläranlage „Flieden“ mitzubehandeln. Hierfür wird die Aufenthaltszeit reduziert. Die möglichen zusätzlichen Einsparungen sind in der folgenden Tabelle 67 dargestellt.

Tabelle 67: CO₂-Einsparpotentiale der Region Südwest (gerundete Werte)

Kenndaten	Flieden
Strom- und Wärmeproduktion	
Ausbaugröße [EW]	13.500
Stromproduktion in [kWh/a]	227.877
CO ₂ -Einsparpotential Strom [t CO ₂ /a]	91
Wärmeproduktion in [kWh/a]	286.474
CO ₂ -Einsparpotential Wärme [t CO ₂ /a]	115
CO ₂ -Ausstoß Transport [t CO ₂ /a]	0,81
Summe CO ₂ -Potential Kläranlage [t CO ₂ /a]	206

7.4.5 Entwässerung

Für eine weitere Mengenreduzierung nach der Schlammfäulung dient eine Entwässerung. Sowohl auf der Kläranlage „Neuhof“, wie auch auf der Kläranlage in „Flieden“ gibt es bestehende

Schlammwässerungen. Die Entwässerung auf der Anlage in Neuhoﬀ erfolgt über eine Kammerfilterpresse bis auf 40 % TS unter Zugabe von Kalk. In Flieden wird die Entwässerung aktuell über eine Zentrifuge realisiert und zwar auf einen TS-Gehalt von 24 %. Es wird in nachstehender Tabelle dargelegt, wie sich eine Reduzierung des Schlammes auf einen TS-Gehalt von 40 % unter zur Hilfenahme der Entwässerung in Neuhoﬀ auswirkt.

Tabelle 68: Mengenreduzierung durch eine Entwässerung in der Region Südwest (gerundete Werte)

Kenndaten	Neuhoﬀ	Flieden
Ausbaugröße [EW]	17.000	13.500
Klärschlammmenge aktuell [m ³ /a]	1.354	1.190
TS-Gehalt aktuell [%]	40,0	24,0
Klärschlammmenge nach Reduzierung um 20 % [m ³ /a]	-	952
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt [m ³ /a]	-	4.565
Klärschlammmenge mit 40 % TS-Gehalt [m ³ /a]	-	571
Einsparung durch Entwässerung zu TS-Gehalt aktuell [m ³ /a]	-	619 Reduzierung um 52 %
Summe möglicher Einsparungen m ³ /a (bei verschiedenen TS-Gehalten)	619	

7.4.6 Trocknung

Nach einer Entwässerung auf der Kläranlage „Neuhoﬀ“, kann der Klärschlamm für eine Trocknung nach Flieden transportiert werden. Die Trocknung kann mittels solarer Trocknung in einer Art Gewächshaus erfolgen. Hierzu wurde von der Firma ThermoSystem eine Dimensionierung mit 1.930 t/a bei 40 % TS-Gehalt Eingangsmasse und 1.188 t/a bei 65 % TS-Gehalt im Austrag ausgegangen. Für diesen Fall würde sich eine Abmessung von 60 x 18 m ergeben. In der Abbildung 84 ist der Schlammumsatz unter diesen Bedingungen dargestellt.

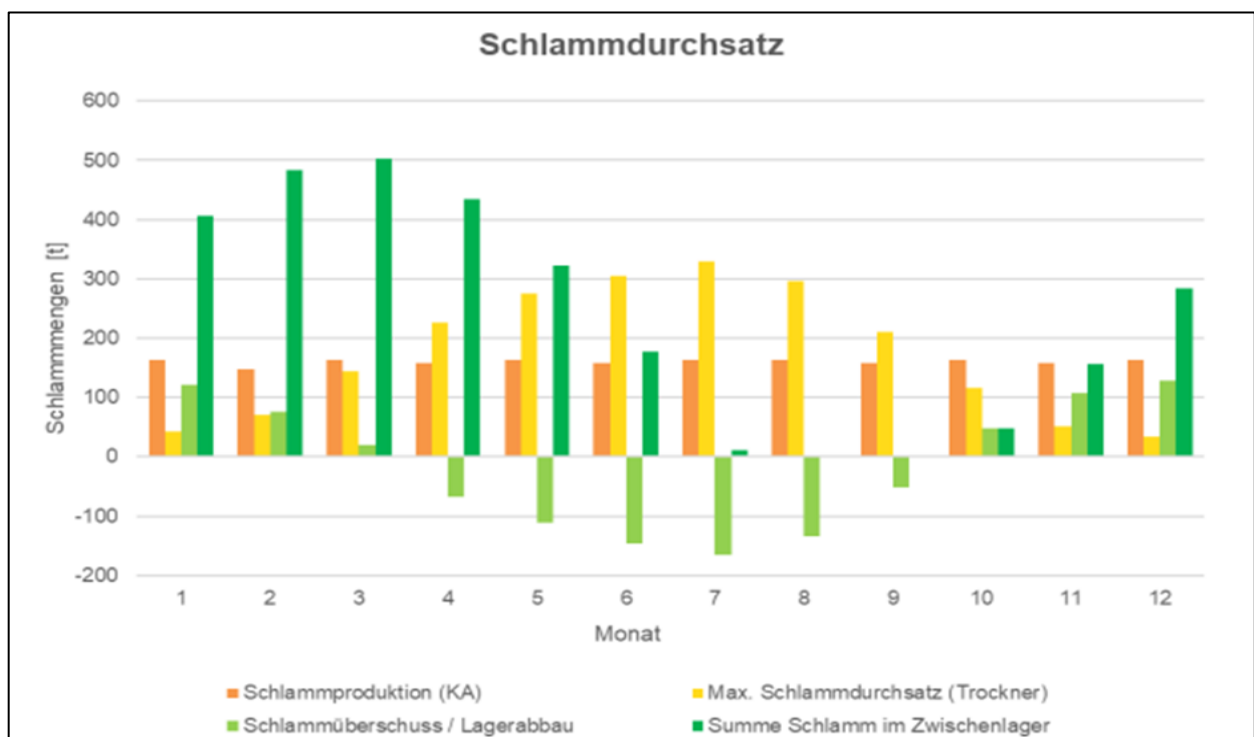


Abbildung 84: Schlammumsatz der Trocknung in Flieden nach der Bemessung von ThermoSystem

Tabelle 69: Mengenreduzierung durch eine Trocknung in der Region Südwest (gerundete Werte)

Kenndaten	Neuhof	Flieden
Ausbaugröße [EW]	17.000	13.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	1.354	1.190
TS-Gehalt aktuell [%]	40,0	24,0
Klärschlammmenge nach Reduzierung um 20 % [m³/a] <small>Vorschlag Schlammstabilisierung, Kap. 7.4.1</small>	-	952
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt [m³/a] <small>Vorschlag Schlammeindickung, Kapitel 7.4.2</small>	-	4.565
Klärschlammmenge mit 40 % TS-Gehalt [m³/a] <small>Vorschlag Mitnutzung Entwässerung in Neuhof, Kap. 7.4.5</small>	-	571
Klärschlammmenge mit 65 % TS-Gehalt [m³/a] über solare Trocknung	833	351
Einsparung durch Trocknung zu TS-Gehalt aktuell [m³/a]	521 Reduktion um 38 %	838 Reduktion um 70 %
Summe möglicher Einsparungen [m³/a] <small>(bei verschiedenen TS-Gehalten)</small>	1.359	

7.4.7 Wirtschaftlichkeit

7.4.7.1 Bestandskosten

Bei der Ermittlung der Bestandskosten ist berücksichtigt, dass die Kläranlagen der Gemeinde Neuhof und Flieden – mit Ausnahme der Kläranlage „Flieden“ – ihre Klärschlammengen derzeit in die Landwirtschaft überführen. Die Kostenbezifferung basiert auf den Daten aus Tabelle 26.

Tabelle 70: Bestandskosten in der Region Südwest ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)

Kenndaten	Neuhof	Flieden
Ausbaugröße [EW]	17.000	13.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	1.354	1.190
TS-Gehalt aktuell [%]	40,0	24,0
Aufbereitungskosten aktuell [€/a]	89.180	112.022
Entsorgungskosten [€/a]	98.190	142.748
Gesamtkosten [€/a]	187.370	254.770
Entsorgungskosten der Kläranlagen ab GK 3 Region Südwest	442.140	

7.4.7.2 Worst Case

Für die Betrachtung des Worst Case Falles wurde gemäß den Vorgaben aus Tabelle 23 von einer eigenständigen Schlammbehandlung dezentral auf den beiden Kläranlagen „Neuhof“ und „Flieden“ ausgegangen, mit anschließender Verwertung in einer Verbrennung.

Tabelle 71: Kosten "Worst Case" der Region Südwest ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)

Kenndaten	Neuhof	Flieden
Ausbaugröße [EW]	17.000	13.500
Klärschlammmenge [m³/a]	1.354	1.190
TS-Gehalt aktuell [%]	40	24
Aufbereitungskosten [€/a]	89.180	112.022
Entsorgungskosten [€/a]	162.522	142.748
Gesamtkosten [€/a]	251.702	254.770
Entsorgungskosten der Kläranlagen ab GK 3 Region Südwest	506.472	

7.4.7.3 Kooperation

Eindickung

Für die Kläranlage „Flieden“ wurde eine maschinelle Eindickung überprüft. Die Eindickung auf der Kläranlage in Neuhof befindet sich im Bestand.

Tabelle 72: laufende Kosten der Eindickung in der Region Südwest (gerundete Werte)

Kenndaten	Neuhof	Flieden
Ausbaugröße [EW]	17.000	13.500
Schlammmenge aktuell [m³/a]	1.354	1.190
TS-Gehalt aktuell [%]	40,0	24,0
Abschreibung Maschine [€/a]	-	23.526
Flockungsmittel [€/a]	-	5.400
Wasser [€/a]	-	2.025
Strom[€/a]	-	38.475
Wartung [€/a]	-	1.500
Personal [€/a]	-	5.000
Summe ohne Abschreibung [€/a]	-	52.400
Summe mit Abschreibung [€/a]	-	75.926

Transport

Für den Transport wurden 7 €/km angenommen und die einfache Transportstrecke nach Neuhof. Die folgenden Tabelle 73 und 74 zeigen den Unterscheid des Transportaufwandes mit und ohne Schlammeindickung auf der Kläranlage „Flieden“.

Tabelle 73: Transportkosten in der Region Südwest mit Schlammeindickung (gerundete Werte)

Kenndaten	Flieden
Ausbaugröße [EW]	13.500
Schlammmenge mit 5 % TS-Gehalt [m³/a]	4.565
Transportstrecke	6,2
Transportfahrten pro Jahr	164
Summe Kosten [€/a]	7.118

Tabelle 74: Transportkosten in der Region Südwest ohne Schlammeindickung (gerundete Werte)

Kenndaten	Flieden
Ausbaugröße [EW]	13.500
Klärschlammmenge (ohne Eindickung) bei 2 % [m³/a]	11.420
Transportstrecke	6,2
Transportfahrten pro Jahr	408
Summe Kosten [€/a]	17.707

Annahmekosten

Für die Annahme des Klärschlamms in NeuhoF werden 30 €/m³ angenommen. In Tabelle 75 sind die Annahmekosten in NeuhoF für die Kläranlage „Flieden“ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine vorherige Eindickung des Klärschlamms auf den jeweiligen Anlagen, neben Einsparungen des Transportes, auch zu deutlich niedrigeren Annahmekosten führt.

Tabelle 75: Annahmekosten in NeuhoF

Kenndaten	Flieden
Ausbaugröße [EW]	13.500
Klärschlammmenge (ohne Eindickung) bei 2 % [m³/a]	11.420
Annahmekosten [€/a]	342.600
Schlammmenge [m³/a] mit 5 % TS-Gehalt <small>Vorschlag Schlammeindickung, Kapitel 7.4.2</small>	4.565
Annahmekosten [€/a]	136.950
Summe Einsparungen durch Eindickung [€/a]	205.650

Entwässerung

Die Entwässerung der Kläranlage „NeuhoF“ kann weiter genutzt (hier: Kammerfilterpresse). Es werden lediglich für die zusätzlichen Schlammengen die Mehrkosten für Flockungsmittel, Wasser und Strom angesetzt. Wartung und Personal sowie die Abschreibung der Maschine sind in den Gesamtkosten berücksichtigt. Im Vergleich zu einer Zentrifuge hat eine Kammerfilterpresse andere laufende Kosten. Diese sind wie in der folgenden Tabelle 76 angenommen. Die Kostenanteile für Flieden und die Kosten für die Gemeinde NeuhoF können der Tabelle 77 entnommen werden.

Tabelle 76: laufende Kosten für eine Kammerfilterpresse

Kenndaten	Spez. Kosten einer Kammerfilterpresse
Flockungsmittel [€/(EW*a)]	2,5
Wasser [€/(EW*a)]	0,15
Strom [kWh/(EW*a)]	10
Wartung [€/a]	8.000
Personal [€/a]	31.200

Tabelle 77: laufende Kosten der Entwässerung in der Region Südwest (gerundete Werte)

Kenndaten	Neuhof	Anteil Flieden
Ausbaugröße	17.000	13.500
Abschreibung Maschine [€/a]	-	-
Flockungsmittel [€/a]	42.500	33.750
Wasser [€/a]	2.550	2.025
Strom [€/a]	4.930	3.915
Wartung [€/a]	8.000	
Personal [€/a]	31.200	
Summe je Kläranlage [€/a]	89.180	39.690
Gesamtsumme [€/a]	128.870	

Trocknung

Für die Kläranlage „Flieden“ wurde eine solare Trocknung ohne Abwärmenutzung ausgelegt. Für die Investition wurden 550.000 € angenommen. Die dafür anfallenden laufenden Kosten sind in der Tabelle 78 dargelegt.

Tabelle 78: laufende Kosten der Trocknung in der Region Südwest (gerundete Werte)

Kenndaten	Flieden
Abschreibung Trocknung [€/a]	25.597
Strom [€/a]	5.500
Wartung [€/a]	1.400
Personal [€/a]	14.500
Summe ohne Abschreibung [€/a]	21.400
Summe mit Abschreibung [€/a]	46.997

Zusammenfassung

Tabelle 79: Zusammenfassung der Region Südwest (gerundete Werte)

Kenndaten	Neuhof	Flieden
Ausbaugröße	17.000	13.500
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	1.354	1.190
Laufende Kosten Eindickung [€/a]	87.826 Bestand	75.926 Neubeschaffung mit Abschreibung
Einsparungen energetisches Potential [€/a]	-	128.588
Annahmekosten für Flieden in Neuhof [€/a]	-	136.950
Anteilige laufende Kosten Entwässerung [€/a]	89.180	39.690
Amortisation Eindicker je Kläranlage [a]	-	2 maschineller Eindicker
Laufende Kosten Trocknung [€/a]	-	49.997 mit Abschreibung
Mögliche Kosteneinsparungen [€/a]	Bestand: 70.606 Worst Case: 134.938	Bestand: 169.491 Worst Case: 169.491

7.4.8 Landwirtschaftliche Verwertung

In der Region Südwest können 901 m³/a landwirtschaftlich verwertet werden. Grundsätzlich ist die Überführung des Schlammes aus den Kläranlagen der Größenklasse 1 und 2 in die Landwirtschaft möglich (27,2 t TS pro Jahr).

7.4.9 Kooperationsmöglichkeit

Für eine kommunale Zusammenarbeit der Kommunen sind grundsätzlich alle genannten Kooperationsformen möglich. Zu empfehlen ist hier eine Zusammenarbeit auf Basis einer „Öffentlich-rechtlichen-Vereinbarung“. Die Kriterien sind nach dem EuGH Urteil zu prüfen.

7.4.10 Handlungsempfehlung

Der Vorschlag für die Region Südwest ist eine Kooperation der Kläranlage „Flieden“ und „Neuhof“. Für die Kläranlage „Flieden“ wird die Errichtung einer maschinellen Voreindickung empfohlen, um die Transportmenge nach Neuhof zu reduzieren. Die aktuell vorhandene Schlammwässerung in Flieden könnte dann außer Betrieb genommen werden. Der nicht stabilisierte Überschussschlamm mit 5 % TS-Gehalt sollte zur Kläranlage „Neuhof“ transportiert werden. Eine Trocknung auf dem Gelände der Kläranlage „Flieden“ mit vorheriger Schlammwässerung hat sich im Rahmen des kalkulierten Szenarios für die Region Südwest als nicht wirtschaftlich herausgestellt.

7.5 Region West

Die Region West besteht aus den Kommunen Bad Salzschlirf, Großenlüder und Hosenfeld. Die größten Kläranlagen sind „Kleinlüder“ (7.200 EW), „Lüdertal“ (6.500 EW) und „Bad Salzschlirf“ (8.000 EW). Insgesamt sind in der Region fünf Kläranlagen mit einer Anschlussgröße von 23.350 EW zu finden. Die Kläranlage „Eichenau“ ist dabei die einzige Teichkläranlage in der Region West mit einer Ausbaugröße von 200 Einwohnerwerten (EW).

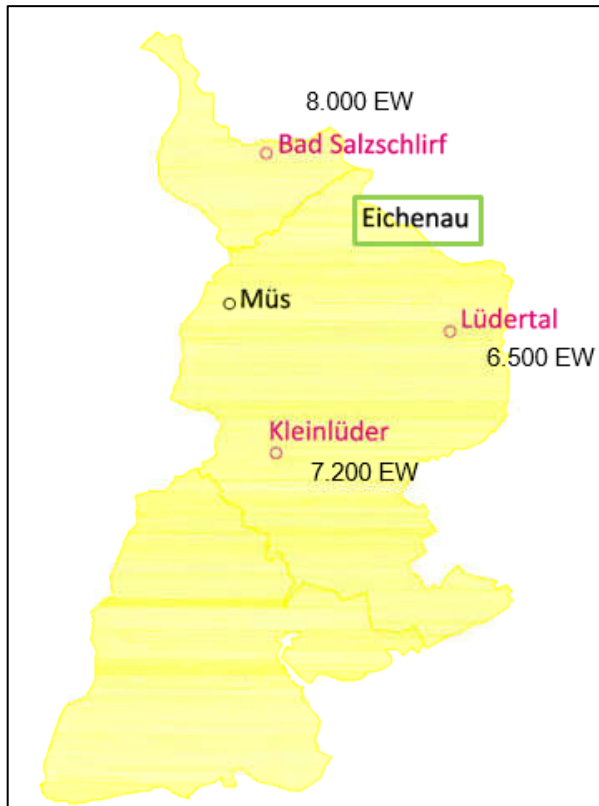


Abbildung 85: Region West mit Angabe der Kläranlagen

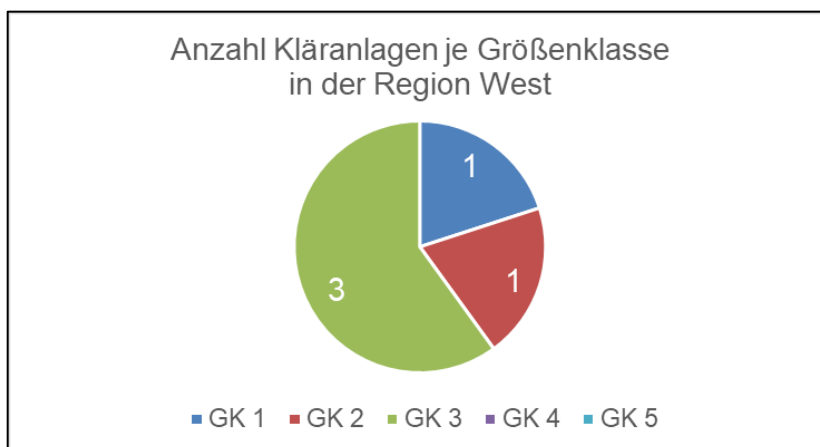


Abbildung 86: Anzahl Kläranlagen je Größenklassen der Region West

Für die Region West (speziell die Kläranlagen „Kleinlüder“ und „Bad Salzschlirf“) wird gemäß des Konzeptablaufes aus der Abbildung 48 lediglich der Verfahrensschritt „KS-Aufbereitung auf 5 %“ geprüft. Hintergrund ist, dass die Kläranlagen „Kleinlüder“ und „Bad Salzschlirf“ einen Glühverlust von rund 64 % aufweisen, was auf einen teilstabilisierten Schlamm hindeutet. Daher wird mit keiner möglichen Einsparung in der Klärschlammmenge ausgegangen, wie dies in den vorangegangenen Regionen der Fall war. Der Klärschlamm der Kläranlage „Kleinlüder“ und der Anlage der Gemeinde Bad Salzschlirf wird in die Faulung der Kläranlage Schlitz gegeben. Zudem

wird der Klärschlamm der Kläranlage „Lüdertal“ in der bestehenden Klärschlammvererdung eingesetzt. Auch der Klärschlamm der Kläranlage „Müs“ (GK 2) wird in Zeiten des landwirtschaftlichen Ausbringungsverbot zur Vererdung auf die Kläranlage „Lüdertal“ gebracht.

7.5.1 Klärschlammanfall

In der Region West fallen jährlich etwa 387,9 t TS an. Eine Aufteilung auf die jeweiligen Größenklassen ist in Abbildung 87 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass etwa 95 % des gesamten Klärschlammes in den eingangs benannten drei *größten* Kläranlagen anfällt.

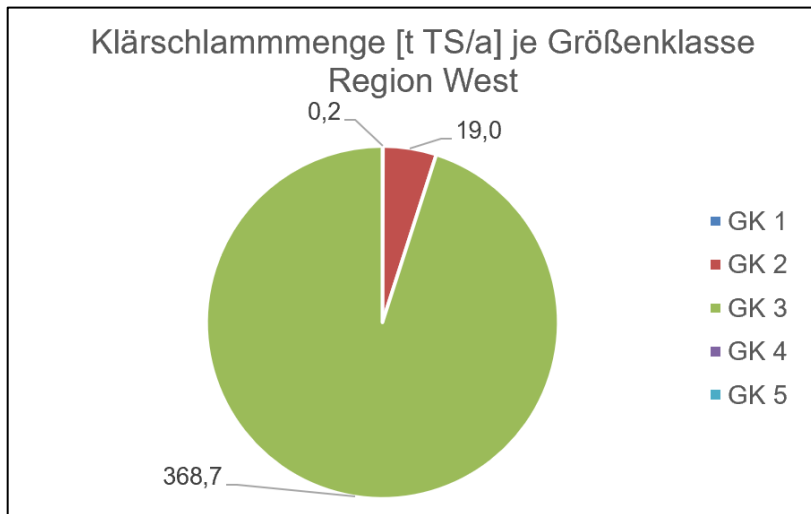


Abbildung 87: Klärschlammengen je Größenklasse in der Region West

In Abbildung 88 sind die Klärschlammengen der einzelnen Kläranlagen der Region West dargestellt.

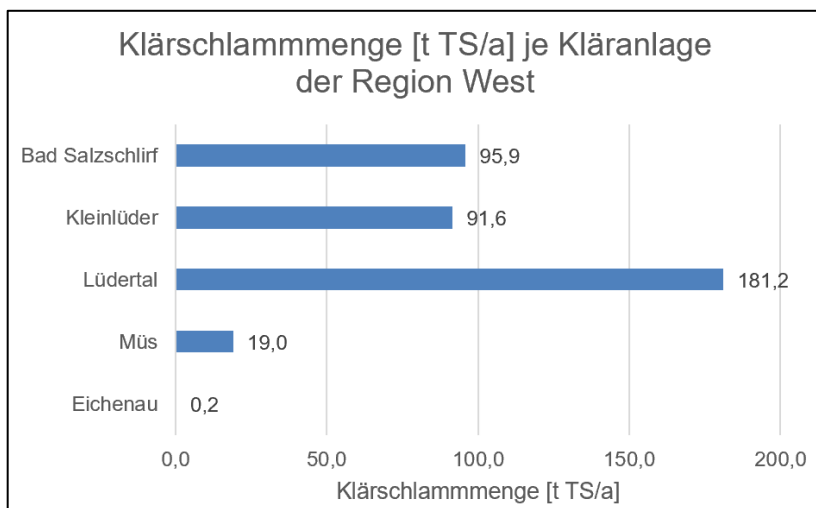


Abbildung 88: Klärschlammengen je Kläranlage der Region West

7.5.2 Klärschlammaufbereitung auf 5 % TS

Um das Transportvolumen nach Schlitz zu reduzieren, wurde für die Kläranlagen „Kleinlüder“ und „Bad Salzschildf“ eine maschinelle Schlammeindickung (Zielwert 5 % TS) überprüft. Die Mengenreduzierung ist in Tabelle 80 dargestellt. Durch die Errichtung einer maschinellen Schlammeindickung, kann die Menge in der Region um circa 2.800 m³/a reduziert werden.

Tabelle 80: Mengenreduzierung durch Schlammeindickung in der Region West (gerundete Werte)

Kenndaten	Bad Salzschlirf	Kleinlöder
Ausbaugröße [EW]	8.000	7.200
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	2.141	3.849
TS-Gehalt aktuell	3,8	2,0
Klärschlammmenge nach Reduzierung um 20 %	-	-
Klärschlammmenge mit 5 % TS-Gehalt	1.627	1.540
Einsparung m³/a durch Umstellung maschinelle Eindickung	514 Reduktion um 76 %	2.309 Reduktion um 60 %
Summe möglicher Einsparungen m³/a (bei verschiedenen TS-Gehalten)	2.823	

7.5.3 Transport

Der Transport des Klärschlamms erfolgt aus der Region West nach Schlitz (Status Quo). Für den Transport werden 1,6 t CO₂/a ausgestoßen (vgl. Tabelle 81). Für die Transportfahrten wurde mit einem Silo-LKW mit 28 m³ Volumen gerechnet.

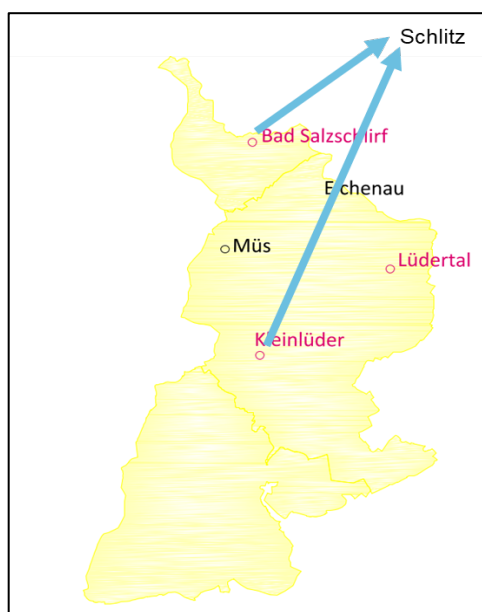


Abbildung 89: Transportwege aus der Region West

Tabelle 81: Transportmengen aus der Region West (gerundete Werte)

Kenndaten	Bad Salzschlirf	Kleinlöder
Ausbaugröße [EW]	8.000	7.200
Klärschlammmenge bei 5 % TS [m³/a]	1.627	1.540
Einfache Entfernung [km]	11,3	23,3
Transportfahrten pro Jahr	59	55
CO ₂ -Ausstoß Transport [t CO ₂ /a]	0,5	1,0
Summe [t CO ₂ /a]	1,6	

7.5.4 Energetische Nutzung

Auf der Kläranlage „Schlitz“ wird der Klärschlamm dem Faultrum zugeführt und dort energetisch genutzt. Durch den bereits unstabilierten Schlamm kommt es zu keinen zusätzlichen Gaserträgen auf der Kläranlage „Schlitz“.

7.5.5 Wirtschaftlichkeit

7.5.5.1 Bestandskosten

Tabelle 82: Bestandskosten der Region West ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)

Kenndaten	Bad Salzschlirf	Kleinlüder
Ausbaugröße [EW]	8.000	7.200
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	2.141	3.849
TS-Gehalt aktuell [%]	3,8	2,0
Aufbereitungskosten aktuell [€/a]	-	-
Entsorgungskosten [€/a]	64.225	115.465
Summe der Entsorgungskosten der Kläranlagen ab GK 3 Region West [€/a]	179.690	

7.5.5.2 Worst Case

Tabelle 83: Kosten "Worst Case" der Region West ab Größenklasse 3 (gerundete Werte)

Kenndaten	Bad Salzschlirf	Kleinlüder
Ausbaugröße [EW]	8.000	7.200
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	2.141	3.849
TS-Gehalt aktuell [%]	3,8	2,0
Aufbereitungskosten für eine dezentrale Behandlung [€/a]	95.692	92.667
Entsorgungskosten den Pfad der Verbrennung [€/a]	39.049	36.949
Gesamtkosten [€/a]	134.741	129.616
Summe der Entsorgungskosten der Kläranlagen ab GK 3 Region West [€/a]	264.357	

7.5.5.3 Kooperation

Eindickung

Für die Kläranlagen „Bad Salzschlirf“ und „Kleinlüder“ wurden die laufenden Kosten für eine maschinelle Eindickung an den jeweiligen Standorten überprüft.

Tabelle 84: laufende Kosten der Eindickung in der Region West (gerundete Werte)

Kenndaten	Bad Salzschlirf	Kleinlüder
Abschreibung Maschine [€/a]	23.526	23.526
Flockungsmittel [€/a]	3.200	2.880
Wasser [€/a]	1.200	1.080
Strom [€/a]	22.800	20.520
Wartung [€/a]	1.500	1.500
Personal [€/a]	5.000	5.000
Summe ohne Abschreibung [€/a]	33.700	30.980
Summe mit Abschreibung [€/a]	57.226	54.506

Transport

Für den Transport wurden 7 €/km angenommen und die einfache Transportstrecke nach Schlitz angesetzt. Die folgenden Tabellen 85 und 86 zeigen den Vergleich der Transportkosten mit und ohne vorherige Schlammverdickung auf einen TS-Gehalt von 5 %. Durch die Errichtung einer Schlammverdickung eröffnet sich für beide Kläranlagen ein finanzielles Einsparpotential von Delta 14.960 Euro pro Jahr.

Tabelle 85: Transportkosten in der Region West mit Schlammverdickung (gerundete Werte)

Kenndaten	Bad Salzschlirf	Kleinlüder
Ausbaugröße [EW]	8.000	7.200
Klärschlammmenge bei 5 % TS [m³/a]	1.627	1.540
Transportstrecke	11,3	23,3
Transportfahrten pro Jahr	59	55
Kosten [€/a]	4.667	8.971
Summe [€/a]	13.638	

Tabelle 86: Transportkosten in der Region West ohne Schlammverdickung (gerundete Werte)

Kenndaten	Bad Salzschlirf	Kleinlüder
Ausbaugröße [EW]	8.000	7.200
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	2.141	3.849
Transportstrecke	11,3	23,3
Transportfahrten pro Jahr	77	138
Kosten [€/a]	6.091	22.508
Summe [€/a]	28.599	

Annahmekosten

Für die Annahme des Klärschlammes auf der Kläranlage in Schlitz werden 30 €/m³ angenommen. In Tabelle 87 sind die Annahmekosten in Schlitz für die beiden zuliefernden Kläranlagen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine vorherige Verdickung des Klärschlammes auf den jeweiligen Anlagen neben Einsparungen des Transportes, auch zu deutlich niedrigeren Annahmekosten führt.

Tabelle 87: Annahmekosten in Schlitz (gerundete Werte)

Kenndaten	Bad Salzschlirf	Kleinlüder
Ausbaugröße [EW]	8.000	7.200
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	2.141	3.849
TS-Gehalt aktuell [%]	3,8	2,0
Annahmekosten [€/a]	64.230	115.470
Klärschlammmenge bei 5 % TS [m³/a]	1.627	1.540
Annahmekosten [€/a]	48.810	46.200
Einsparungen durch Schlammverdickung [€/a]	15.420	69.270
Summe der Einsparungen [€/a]	84.690	

Zusammenfassung

Tabelle 88: Zusammenfassung in der Region West

Kenndaten	Bad Salzschlirf	Kleinlüder
Ausbaugröße	8.000	7.200
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	2.141	3.849
Laufende Kosten Eindickung ohne Abschreibung [€/a]	33.700	30.980
Laufende Kosten Eindickung mit Abschreibung [€/a]	57.226	54.506
Einsparungen Transport [€/a]	1.424	13.537
Einsparungen Schlammmentsorgung [€/a]	15.420	69.270
Einsparungen energetisches Potential [€/a]	-	-
Amortisation Eindicker je Kläranlage [a]	Nicht bei der aktuellen Bestandssituation darstellbar	6
Mögliche Kosteneinsparungen je Kläranlage [€/a]	-	5.803
Mögliche Kosteneinsparungen gesamt [€/a]	5.803	

7.5.6 Landwirtschaftliche Verwertung

Der landwirtschaftliche Verwertungspfad bleibt den Kläranlagen der Region West auch weiterhin offen. Dabei geht es um rund 950 m³ /a. Auch die Ausweichoption in Zeiten des landwirtschaftlichen Ausbringungsverbot zur Verbringung in die Vererdung auf der Kläranlage „Lüdertal“ sollte weiter beibehalten werden.

7.5.7 Kooperationsmöglichkeit

Für eine kommunale Zusammenarbeit sollten bestehende Kooperationsformen (öffentlich-rechtliche-Vereinbarungen) weiter genutzt werden. Im Fall der Kläranlagen „Kleinlüder“ und „Bad Salzschlirf“ wären in einem weiteren Schritt die Kriterien nach dem EuGH Urteil zu prüfen.

7.5.8 Handlungsempfehlung

Die bestehenden Kooperationen der einzelnen Kläranlagen können weitergeführt werden. Für die Kläranlage „Kleinlüder“ empfiehlt sich der Bau einer maschinellen Eindickung, welche sich bereits in der Umsetzung befindet. Eine maschinelle Eindickung für die Kläranlage „Bad Salzschlirf“ ist bei den angenommenen Kosten nicht wirtschaftlich, würde sich aber bei steigenden Transport- und Annahmekosten als wirtschaftlich darstellen.

7.6 Region Mitte

Die Region Mitte stellt das Verbandsgebiet des Abwasserverbandes Fulda dar. Die drei Kläranlagen des Verbandes haben eine Anschlussgröße von insgesamt 185.000 Einwohnerwerten (EW). Die Kläranlage „Gläserzell“ ist mit 150.000 EW die größte Kläranlage des Landkreises und die einzige, welche der Größenklasse 5 zugeordnet wird. Die Kläranlagen „Petersberg-Marbach“ und „Fulda-West“ gehören mit jeweils 23.000 EW und 12.000 EW der Größenklasse 4 an.

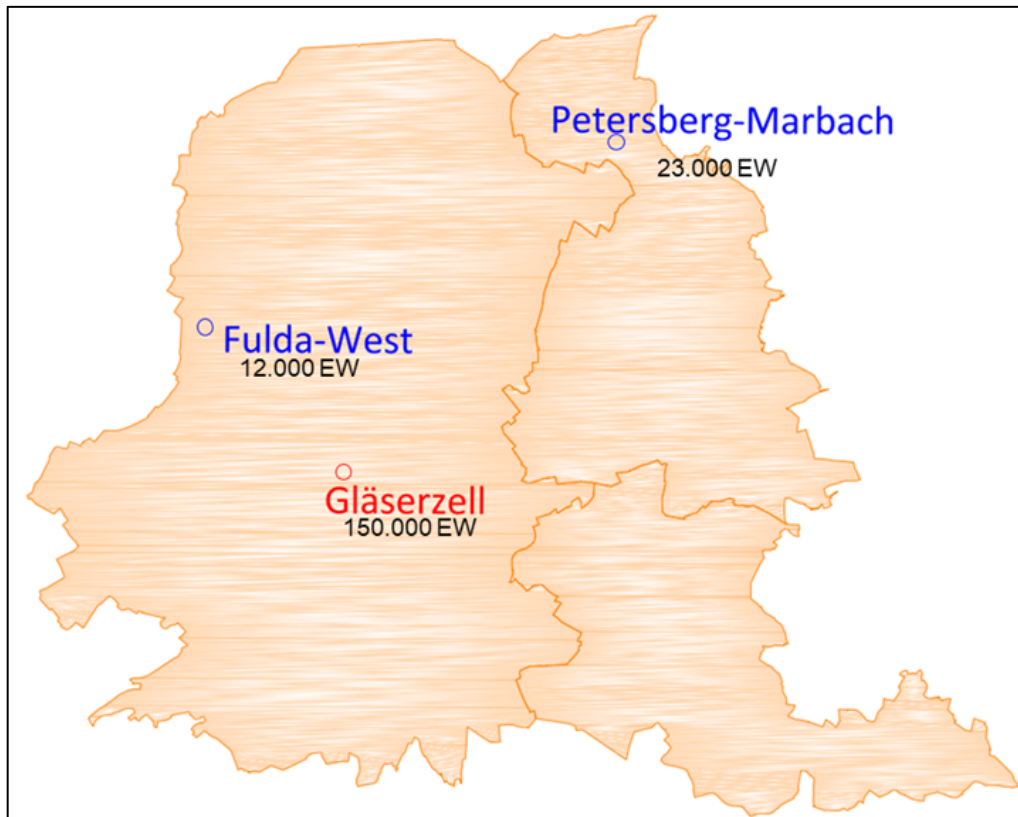


Abbildung 90: Region Mitte mit Angabe der Kläranlagen

Gemäß des Konzeptablaufes aus Abbildung 48, wurden für die Region Mitte die Verfahrensschritte „Trocknung“ und „Verbrennung“ geprüft. Eine Verbrennung hat sich mittels Marktrecherche für die Klärschlammmenge der Region nicht wirtschaftlich darstellen lassen, daher wurde die Betrachtung im zentralen Konzept aufgenommen. Eine Trocknung ist hierbei für das Verfahren eines Drehrohrofens notwendig.

7.6.1 Klärschlammfall

In der Region Mitte fallen jährlich etwa 1.800 Tonnen TS Klärschlamm an. Diese werden der Kläranlage „Gläserzell“ zugeschrieben, enthalten aber zusätzlich die Klärschlamm-mengen von den Kläranlagen „Fulda-West“ und „Petersberg-Marbach“. Der Klärschlamm wird derzeit schon anaerob stabilisiert und somit sind keine Einsparungen der Klärschlamm-mengen zu erwarten.

7.6.2 Wirtschaftlichkeit

7.6.2.1 Bestandskosten

Bei den Bestandskosten ist zu beachten, dass ab dem Jahr 2029 keine landwirtschaftliche Verwertung mehr möglich ist und die Kläranlage „Gläserzell“ in Gänze den thermischen Verwertungsweg einschlagen muss. Bei der Betrachtung des Bestandes wurde die Kläranlage

„Löschenrod“ der Region Süd (Kapitel 7.3) mit aufgenommen, denn für die Region Mitte ist die Anlieferung des unstabilierten Schlammes der Kläranlage „Löschenrod“ in Planung.

Tabelle 89: Bestandskosten der Region Mitte ab Größenklasse 3 (gerundete Werte)

Kenndaten	Gläserzell	Löschenrod
Ausbaugröße [EW]	150.000	12.000
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	6.261	1.776
TS-Gehalt aktuell [%]	25,0	35,0
Aufbereitungskosten aktuell [€/a]	813.334	103.630
Entsorgungskosten [€/a] Landwirtschaft und Verbrennung	453.913	62.161
Gesamtkosten [€/a]	1.267.247	165.791
Entsorgungskosten der Kläranlagen ab GK 3 Region Mitte	1.433.038	

7.6.2.2 Worst Case

Tabelle 90: Kosten "Worst Case" der Region Mitte ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)

Kenndaten	Gläserzell	Löschenrod
Ausbaugröße [EW]	150.000	12.000
Klärschlammmenge aktuell [m³/a]	6.261	1.776
TS-Gehalt aktuell [%]	25,0	35,0
Aufbereitungskosten [€/a]	813.334	103.630
Entsorgungskosten [€/a] Verbrennung	751.304	298.371
Gesamtkosten [€/a]	1.564.638	402.001
Entsorgungskosten der Kläranlagen ab GK 3 Region Mitte [€/a]	1.966.639	

7.6.2.3 Kooperationen

Annahmekosten

Für die Annahme des Klärschlammes in Gläserzell werden 30 €/m³ angenommen. Tabelle 91 weist die kalkulierten Annahmekosten aus, welche für die Kläranlage „Löschenrod“ anfallen.

Tabelle 91: Annahmekosten in Gläserzell (gerundete Werte)

Kenndaten	Löschenrod
Ausbaugröße [EW]	12.000
Klärschlammmenge bei einem TS- Gehalt von 5 % [m³/a]	12.432
Summe der Annahmekosten [€/a]	372.960

Entwässerung

Die Entwässerung der Kläranlage „Gläserzell“ wird weiter genutzt. Es werden lediglich für die zusätzlichen Schlammengen die Mehrkosten für Flockungsmittel, Wasser und Strom angesetzt. Wartung und Personal sowie die Abschreibung der Maschine sind in den Gesamtkosten berücksichtigt.

Tabelle 92: laufende Kosten der Entwässerung in der Region Mitte (gerundete Werte)

Kenndaten	Gläserzell	Anteil Löschenrod
Ausbaugröße	150.000	12.000
Klärschlammmenge [m³/a]	6.261 bei 25 % TS-Gehalt	12.432 bei 5 % TS-Gehalt
Abschreibung Maschine [€/a]	60.494	-
Flockungsmittel [€/a]	495.000	39.600
Wasser [€/a]	22.500	1.800
Strom [€/a]	49.590	3.967
Wartung [€/a]	8.000	-
Personal [€/a]	32.400	-
Summe ohne Abschreibung [€/a]	607.490	45.367
Summe mit Abschreibung [€/a]	713.351	

Zusammenfassung

Tabelle 93: Zusammenfassung der Region Mitte (gerundete Werte)

Kenndaten	Gläserzell	Löschenrod
Ausbaugröße	150.000	12.000
Klärschlammmenge bei 5 % TS [m³/a]		12.432
Laufende Kosten Eindickung ohne Abschreibung [€/a]	-	47.300
Laufende Kosten Eindickung mit Abschreibung [€/a]	-	70.826
Einsparungen Transport [€/a]	-	
Einsparungen energetisches Potential [€/a]		11.498
Annahmekosten Gläserzell		372.960
Laufende Kosten Entwässerung ohne Abschreibung [€/a]	809.835	-
Laufende Kosten Entwässerung mit Abschreibung [€/a]	870.329	-
Mögliche Kosteneinsparungen je Kläranlage [€/a]	335.709	-222.455
Mögliche Kosteneinsparungen gesamt [€/a]	113.254	

7.6.3 Landwirtschaftliche Verwertung

Aktuell verwertet die Kläranlage „Gläserzell“ ihren Klärschlamm etwa zur Hälfte landwirtschaftlich. Dies wird ab 2029 nicht mehr möglich sein (vgl. Abbildung 2).

7.6.4 Kooperationsmöglichkeit

Für eine kommunale Zusammenarbeit der beiden Abwasserverbände, wurde im Rahmen einer schon erfolgten rechtlichen Prüfung, empfohlen eine europaweite Ausschreibung durchzuführen. Für die Organisation der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung sind grundsätzlich alle genannten Kooperationsformen möglich. Zu empfehlen ist hier die Zusammenarbeit auf der Basis eines Zweckverbandes.

7.6.5 Handlungsempfehlung

Für die Region Mitte wird mit einer Anlieferung unstabilierten Schlamm der Kläranlage „Löschenrod“ nach Gläserzell geplant. Hierbei empfiehlt sich eine maschinelle Schlammeindickung, um Kosten für den Transport und bei der Schlammannahme zu sparen. In welchem Maße die bestehende Logistik der landwirtschaftlichen Verwertung des Abwasserverbandes Fulda ab 2029 zu nutzen ist, gilt es weiter zu prüfen.

7.7 Zentrales Konzept

Das zentrale Konzept knüpft an die dezentralen Konzepte ab dem Verfahrensschritt „Verbrennung“ an (vgl. Abbildung 48). Die Aufbereitung der einzelnen Klärschlämme inklusive deren Reduzierung, erfolgt nach den im dezentralen Konzept beschriebenen Maßnahmen.

7.7.1 Trocknung

Die Kläranlagen „Flieden“, „Hünfeld“ und „Hilders“ können auf den eigenen Geländen der Anlagen den Klärschlamm trocknen. Die Abwärme der Verbrennung kann für die Trocknung des restlichen Klärschlammes genutzt werden. Eine genaue Auslegung einer Trocknung kann erst, unter Angabe eines genauen Standortes, aufgrund der verfügbare Energiequellen vor Ort, benannt werden.

7.7.2 Verbrennung

Eine Verbrennung mittels Wirbelschichtverbrennung (vgl. Kapitel 3.5.1.1) hat sich - nach Aussage verschiedener Anlagenbauer - für die Klärschlammmenge des Landkreises als nicht wirtschaftlich dargestellt. Ab einer Klärschlammmenge von etwa 50.000 t/a entwässerter Schlamm, wäre eine eigene Verbrennung mit vorgeschalteter Trocknung bei den aktuellen Investitions- und Energiekosten wirtschaftlich. Die kontinuierlich anfallende Klärschlammmenge im Landkreis Fulda liegt bei 5.378 t TS pro Jahr (s. Kap. 6.2.2).

Der Drehrohrofen stellt eine alternative thermische Behandlungsmethode dar (vgl. Kapitel 3.5.1.3) und ist auch für geringere Durchsätze möglich. Die wesentlichen Prozessschritte des Verfahrens sind in Abbildung 91 dargestellt.

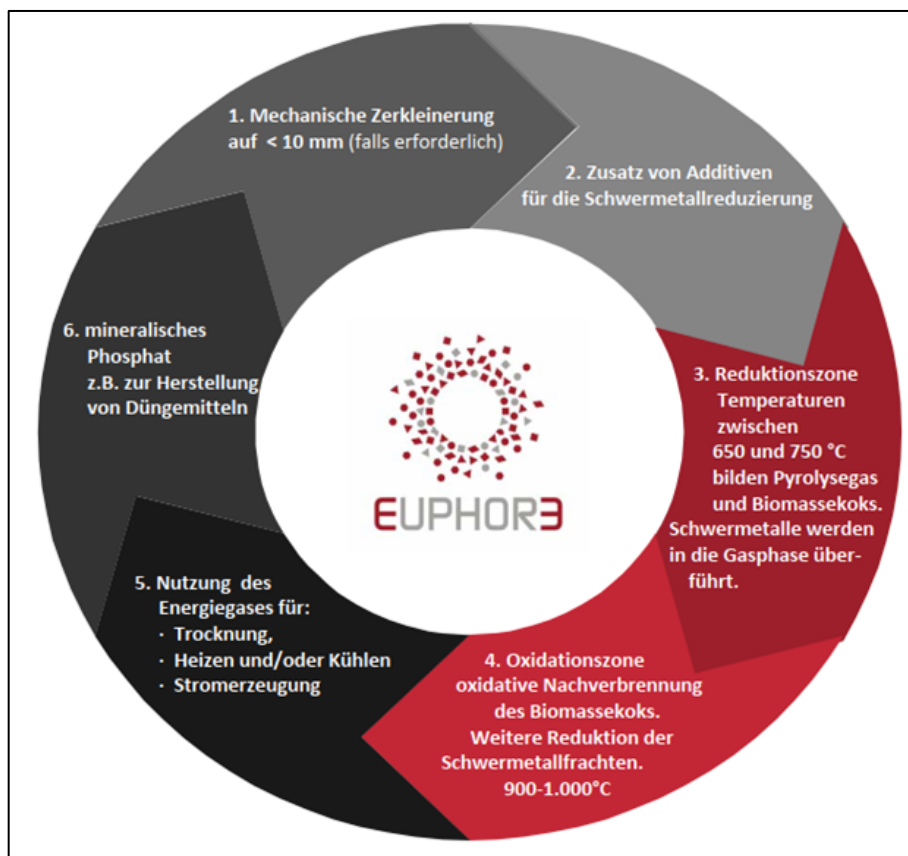


Abbildung 91: EuPhoRe®-Verfahren - die wesentlichen sechs Prozessschritte (EuPhoRe®)

Es ist zu erkennen, dass in Phase drei und vier die Schwermetalle in die Gasphase übergehen und so bei der Abgasreinigung anfallen. Die Schwermetalle sind somit nicht in der Asche, wodurch diese sich für die Herstellung von Düngemitteln ohne viel Aufwand eignet. Zusätzlich ist

der Phosphor in der Asche pflanzenverfügbar und könnte direkt auf die Felder ausgebracht werden. Grund für die Schwermetallabscheidung sind verschiedene Additive und Adsorbens. In Abbildung 92 ist eine solche Anlage dargestellt.

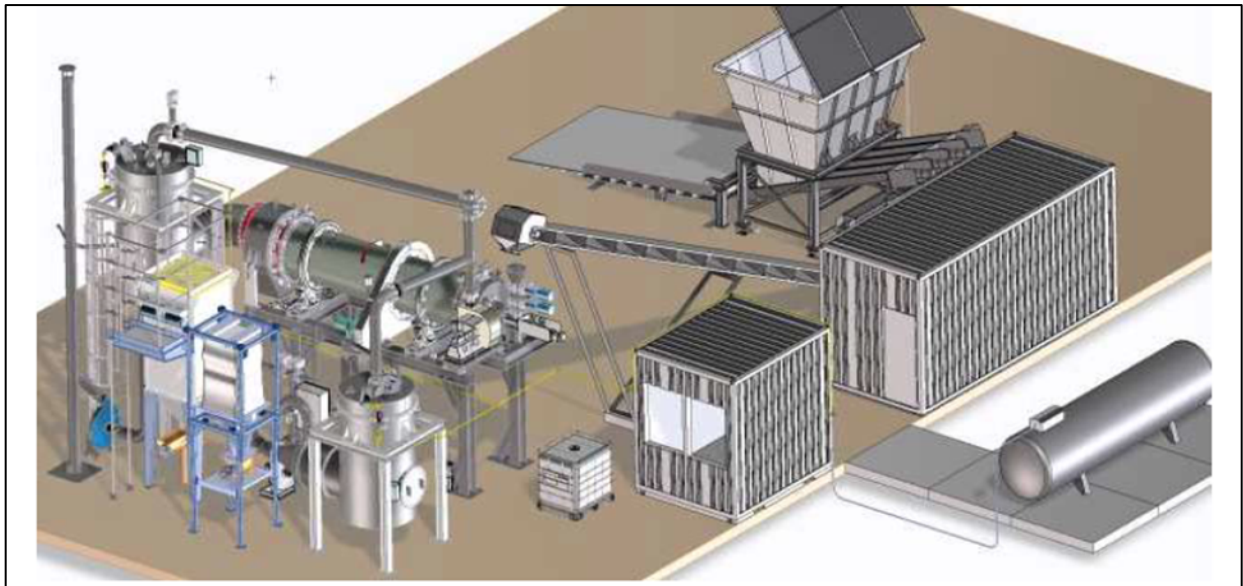


Abbildung 92: Beispiel einer autarken thermo-chemischen Klärschlammbehandlung (EuPhoRe®)

7.7.3 Wirtschaftlichkeit

Eine dezentrale thermische Verwertung ist für den Landkreis Fulda mit mehreren Standorten nicht wirtschaftlich. Für den Landkreis würde sich eine zentrale Anlage unter gewissen Maßstäben finanziell darstellen lassen. Nach Angebot eines Anlagenbauers würde eine solche zentrale Verbrennung mittels Drehrohrfurnas 10 Mio. € Investitionskosten verursachen. Die laufenden Kosten eines Drehrohrfurnas belaufen sich nach Schätzungen des Anlagenbauers auf etwa 800.000 €/a. Diese beinhalten die Additive, Adsorbens, Entsorgung der Rauchgasreinigungsrückstände, Wartungskosten (2 % der Investitionssumme), Stromkosten, Personal, Versicherungen und Lizenzgebühr.

7.7.4 Kooperationsmöglichkeit

Für eine kommunale Zusammenarbeit im Rahmen der Planung und Errichtung einer Thermischen Entsorgung im Landkreis Fulda ist die Gründung eines Zweckverbandes zu empfehlen.

7.7.5 Handlungsempfehlung

Der Bau einer zentralen Verbrennung im Landkreis ist eine politische Entscheidung. Für eine Entsorgungssicherheit im eigenen Landkreis ist eine eigene Verbrennung in den Überlegungen nicht auszuschließen. Auch der Wegfall weiterer Transportwege zu einer externen Verbrennung und die damit verbundenen CO₂-Einsparungen sprechen dafür. Dies jedoch unter der Prämisse, dass in den einzelnen Regionen Klärschlammreduzierungen vor Übergabe in eine Verbrennung vorgenommen werden. Eine genaue Anlagendimensionierung kann erst nach Festlegung eines Standortes erfolgen.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abfallhierarchie nach (wohnindamit.de, 2016)	5
Abbildung 2: Übersicht über die Entsorgungsmöglichkeiten (Otte-Witte, et al., 2018).....	6
Abbildung 3: Volumenverminderung durch Abtrennen von Schlammwasser (aus DWA-M 366)10	
Abbildung 4: Erforderliches Schlammalter in Tagen in Abhängigkeit von der Temperatur nach (Michel, 2011)	12
Abbildung 5: Stabilisierungsgrad des Klärschlamms im Hinblick auf den Glühverlust (Bayern, 2011).....	12
Abbildung 6: MAP-Ablagerungen in einem Rohr (AR, 2020)	13
Abbildung 7: Schema der Vorfällung (Böhler & Siegrist, 2008).....	14
Abbildung 8: Schema der Nachfällung (Böhler & Siegrist, 2008)	14
Abbildung 9: Blick in einen statischen Eindicker im Betrieb	16
Abbildung 10: Prinzipskizze eines Scheibeneindickers (Huber, 2018).....	16
Abbildung 11: Innenansicht eines Scheibeneindickers	17
Abbildung 12: Bandeindicker (Sülzle Klein)	17
Abbildung 13: Prinzipskizze einer Zentrifuge (Flottweg, 2018).....	18
Abbildung 14: Wasseranbindung an eine Schlammflocke (DWA, Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm-trocknung (Entwurf),2019).....	18
Abbildung 15: Zusammenhang zwischen erreichbarem Heizwert und Wassergehalt des Klärschlamms (Roskosch & Heidecke, 2018).....	21
Abbildung 16: Anzahl der Klärschlamm-trockner in Deutschland aufgeteilt nach Trockenarten nach (Roskosch & Heidecke, 2018)	22
Abbildung 17: Leistungsbereiche der Trocknerarten und mittlerer Klärschlamm-durchsatz (Roskosch & Heidecke, 2018).....	22
Abbildung 18: Prinzipskizze eines Band-trockners (HUBER SE, 2016)	23
Abbildung 19: Elektrisches Schwein.....	25
Abbildung 20: Solare Klärschlamm-trocknung von Palma de Mallorca (600.000 EW) (ThermoSystem, 2020).....	26
Abbildung 21: Standorte der Klärschlamm-verbrennungsanlagen sowie der geplanten Standorte in Deutschland (Lehrmann, Six & Heidecke, Thermische Klärschlamm-behandlung - bestehende Kapazitäten, künftiger Bedarf, Entwicklung der Verbrennungskapazitäten-, 2020)	27
Abbildung 22: Schema einer stationären Wirbelschicht-feuerung (Siedlungswasser- und Siedlungsabfall-wirtschaft Nordrhein-Westfalen, 2006).....	28
Abbildung 23: Standorte von Müll-verbrennungsanlagen in Deutschland (Schauenberg, 2019) 29	
Abbildung 24: Schema einer thermischen Abfall-behandlungsanlage (Landesamt für Natur, Umwelt- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2020)	29
Abbildung 25: Zementwerke in Deutschland (Stand Juni 2017) (VDZ, 2020).....	31
Abbildung 26: Landwirtschaftliche Klärschlamm-verwertung (Landkreis Günzburg, 2020).....	34
Abbildung 27: Bewertung der Phosphor-Rezyklate aus der Abwasser-behandlung (LAGA, 2015)	39
Abbildung 28: Allgemeine Darstellung des Aufwandes, des Potentials und der Pflanzen-verfügbarkeit von Phosphor-Rezyklaten (LAGA, 2015).....	40
Abbildung 29: Einwohner der Städte und Gemeinden des Landkreises Fulda und Haunetal (2022)	41
Abbildung 30: Kläranlagen im Landkreis Fulda und in der Gemeinde Haunetal mit den jeweiligen Ausbaugrößen.....	42
Abbildung 31: Anteil der Kläranlagen-Ausbaugröße je Größenklasse.....	43
Abbildung 32: Kläranlagen der Größenklasse 1 mit jeweiliger Ausbaugröße	44
Abbildung 33: Kläranlagen der Größenklasse 2 mit jeweiliger Ausbaugröße	44
Abbildung 34: Kläranlagen der Größenklasse 3 mit jeweiliger Ausbaugröße	45
Abbildung 35: Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 mit jeweiliger Ausbaugröße	45
Abbildung 36: Ausbaugröße und Reinigungs-verfahren je Kläranlage (braun = Belebungs-anlage; grün = Teichkläranlage; blau = BIOCOS®-Verfahren; magenta = SBR-Anlage; rot = Rotationtauchkörper, Tropfkörper).....	46

Abbildung 37: Anteil der besichtigten Kläranlagen an der Gesamtanzahl im Landkreis Fulda und Haunetal.....	47
Abbildung 38: Klärschlammmenge der einzelnen Kläranlagen inklusive Verwertungswegen ...	48
Abbildung 39: Klärschlamm-mengen der einzelnen Kläranlagen in Tonne TM pro Jahr.....	49
Abbildung 40: Klärschlamm-analysen für Blei, Chrom, Kupfer und Nickel	51
Abbildung 41: Klärschlamm-analysen für Zink	51
Abbildung 42: Klärschlamm-analysen für Cadmium.....	52
Abbildung 43: Klärschlamm-analysen für AOX	52
Abbildung 44: Klärschlamm-analysen für Quecksilber	53
Abbildung 45: Klärschlamm-analysen für Phosphor.....	53
Abbildung 46: Kapazitäten in der Schlamm-lagerung	54
Abbildung 47: Einteilung des Landkreises Fulda und der Gemeinde Haunetal in Regionen	56
Abbildung 48: Konzeptverlauf für die Betrachtungen der sechs Regionen.....	57
Abbildung 49: Region Nord mit Angabe der Kläranlagen.....	60
Abbildung 50: Anzahl der Kläranlagen je Größenklasse in der Region Nord	60
Abbildung 51: Konzeptverlauf der Region Nord	61
Abbildung 52: Ablaufschema der Region Nord	61
Abbildung 53: Klärschlamm-mengen je Größenklasse in der Region Nord.....	62
Abbildung 54: Klärschlamm-menge je Kläranlage in der Region Nord.....	62
Abbildung 55: Transportstrecken in der Region Nord	64
Abbildung 56: Trockenbeete mit Überdachung in Rasdorf.....	66
Abbildung 57: Funktionsskizze der solaren Schlamm-trocknung in Hünfeld (ThermoSystem, 2022)	66
Abbildung 58: Schlamm-durchsatz der Trocknung in Hünfeld nach Bemessung von ThermoSystem.....	67
Abbildung 59: Einsparungen der einzelnen Kläranlagen bei verschiedenen Strompreisen	72
Abbildung 60: Einsparungen der einzelnen Kläranlagen zum Worst Case Szenario mit verschiedenen Strompreisen.....	72
Abbildung 61: Einsparungen bei verschiedenen Strompreisen in der Region Nord	73
Abbildung 62: Region Ost mit Angabe der Kläranlagen	74
Abbildung 63: Anzahl der Kläranlagen je Größenklasse in der Region Ost.....	74
Abbildung 64: Ablaufschema der Region Ost	75
Abbildung 65: Klärschlamm-mengen je Größenklassen in der Region Ost.....	75
Abbildung 66: Klärschlamm-mengen je Kläranlage in der Region Ost.....	76
Abbildung 67: Transportstrecken innerhalb der Region Ost.....	78
Abbildung 68: Schlamm-durchsatz der Trocknung in Hilders nach Bemessung von ThermoSystem	80
Abbildung 69: mögliche Einsparungen der Kooperation zum Bestand.....	86
Abbildung 70: mögliche Einsparungen der Kooperation zum Worst Case Szenario	86
Abbildung 71: mögliche Einsparungen der Kooperation innerhalb der Region Ost.....	87
Abbildung 72: Region Süd mit Angabe der Kläranlagen	88
Abbildung 73: Anzahl der Kläranlagen je Größenklasse in der Region Süd.....	88
Abbildung 74: Konzeptverlauf der Region Süd	89
Abbildung 75: Ablaufschema der Region Süd	89
Abbildung 76: Klärschlamm-mengen je Größenklasse in der Region Süd	89
Abbildung 77: Klärschlamm-mengen je Kläranlage in der Region Süd	90
Abbildung 78: Transportwege der Region Süd	91
Abbildung 79: Region Südwest mit Angabe der Kläranlagen.....	92
Abbildung 80: Anzahl Kläranlagen je Größenklasse der Region Südwest	92
Abbildung 81: Ablaufschema der Region Südwest	93
Abbildung 82: Klärschlamm-mengen je Größenklasse in der Region Südwest.....	93
Abbildung 83: Klärschlamm-mengen je Kläranlage in der Region Südwest.....	94
Abbildung 84: Schlamm-durchsatz der Trocknung in Flieden nach der Bemessung von ThermoSystem.....	96
Abbildung 85: Region West mit Angabe der Kläranlagen	102
Abbildung 86: Anzahl Kläranlagen je Größenklassen der Region West.....	102

Abbildung 87: Klärschlamm-mengen je Größenklasse in der Region West.....	103
Abbildung 88: Klärschlamm-mengen je Kläranlage der Region West	103
Abbildung 89: Transportwege aus der Region West.....	104
Abbildung 90: Region Mitte mit Angabe der Kläranlagen.....	108
Abbildung 91: EuPhoRe®-Verfahren - die wesentlichen sechs Prozessschritte (EuPhoRe®)	112
Abbildung 92: Beispiel einer autarken thermo-chemischen Klärschlammbehandlung (EuPhoRe®)	113
.....	113

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rechtsgrundlagen der Klärschlamm-entsorgung in Deutschland nach (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, 2019)	4
Tabelle 2: Emissionswerte für Anlagen zum Trocknen von Klärschlamm nach der TA Luft	9
Tabelle 3: Grenzwerte TOC für die Deponierung nach (Roskosch & Heidecke, 2018)	9
Tabelle 4: Vor- und Nachteile von der biologischen Phosphorelimination (kurz: Bio-P)	14
Tabelle 5: Austrags-Feststoffgehalt (% TR), spezifischer Flockungshilfsmittelverbrauch und spezifischer Energieverbrauch von verschiedenen Eindicksystemen (DWA, 2007).....	15
Tabelle 6: Erreichbare Austrags-TR Konzentrationen bei unterschiedlichen Entwässerungsmaschinen Auszug aus (DWA, 2013).....	19
Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Klärschlamm-trocknung	20
Tabelle 8: Temperaturbereich Trocknungsverfahren (DWA, Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm-trocknung (Entwurf), 2019).....	23
Tabelle 9: Vor- und Nachteile eines Band-trockners	24
Tabelle 10: Übersicht über die bei der solaren Trocknung eingesetzten Wendeeinrichtungen (Bux, 2013).....	25
Tabelle 11: Vor- und Nachteile von Speichertrocknern	26
Tabelle 12: Vor- und Nachteile Klärschlamm-monoverbrennung	28
Tabelle 13: Vor- und Nachteile der landwirtschaftlichen Klärschlamm-Verwertung nach (Roskosch & Heidecke, 2018).....	34
Tabelle 14: Größenklassen mit jeweiliger Ausbaugröße	43
Tabelle 15: Anzahl der Kläranlagen je Größenklasse	43
Tabelle 16: Ausbaugröße und Anzahl der Kläranlagen je Reinigungsverfahren (Stand 2022) ..	46
Tabelle 17: Ausbaugröße und Anzahl der Kläranlagen je Reinigungsverfahren nach Umbau ..	46
Tabelle 18: Besichtigte Kläranlagen nach Größenklasse.....	47
Tabelle 19: Verwertungswege mit entsorgter Klärschlamm-menge	48
Tabelle 20: Klärschlamm-menge in Tonne TM pro Jahr als diskontinuierlicher Schlammanfall ..	49
Tabelle 21: Klärschlamm-anfall je Größenklasse	50
Tabelle 22: Kläranlagen je Reinigungsverfahren (Stand 2022).....	50
Tabelle 23: Beschreibung der Szenarien für die Betrachtung der sechs Regionen.....	58
Tabelle 24: Investitionskosten für einzelne Anlagenteile.....	58
Tabelle 25: laufende Kosten der Schlammbehandlung.....	59
Tabelle 26: Entsorgungskosten der verschiedenen Verwertungswege	59
Tabelle 27: Glühverluste einzelner Kläranlagen in der Region Nord.....	63
Tabelle 28: Reduzierung Klärschlamm-mengen in der Region Nord durch Eindickung (gerundete Werte)	63
Tabelle 29: Transportdaten der Region Nord (gerundete Werte).....	64
Tabelle 30: CO ₂ -Einsparpotential für die Region Nord (gerundete Werte)	65
Tabelle 31: Reduzierung Klärschlamm-menge in der Region Nord durch Entwässerung (gerundete Werte)	65
Tabelle 32: Reduzierung der Klärschlamm-menge in der Region Nord durch Entwässerung (gerundete Werte)	67
Tabelle 33: Bestandskosten der Region Nord ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)	68
Tabelle 34: Kosten "Worst Case" der Region Nord ab Größenklasse 3 (gerundete Werte)	68
Tabelle 35: laufende Kosten der Eindickung in der Region Nord (gerundete Werte)	69

Tabelle 36: Transportkosten in der Region Nord mit Schlammeindickung (gerundete Werte) ..	69
Tabelle 37: Transportkosten in der Region Nord ohne Schlammeindickung (gerundete Werte)	69
Tabelle 38: Annahmekosten in Hünfeld (gerundete Werte)	70
Tabelle 39: laufende Kosten der Entwässerung in der Region Nord (gerundete Werte)	70
Tabelle 40: laufende Kosten der Trocknung in der Region Nord (gerundete Werte)	71
Tabelle 41: Zusammenfassung der Region Nord (gerundete Werte)	71
Tabelle 42: Glühverluste einzelner Kläranlagen in der Region Ost	76
Tabelle 43: Reduzierung der Klärschlamm-mengen in der Region Ost (gerundete Werte)	76
Tabelle 44: Einsparungen Belüftungsenergie Region Ost (gerundete Werte)	77
Tabelle 45: Mengenreduzierung durch Schlammeindickung (gerundete Werte)	77
Tabelle 46: Transportmengen innerhalb der Region Ost (gerundete Werte)	78
Tabelle 47: CO ₂ -Einsparpotentiale in der Region Ost (gerundete Werte)	79
Tabelle 48: Mengenreduzierung durch eine Entwässerung in der Region Ost (gerundete Werte)	79
.....	79
Tabelle 49: Mengenreduzierung durch eine Trocknung in der Region Ost (gerundete Werte) ..	80
Tabelle 50: Bestandskosten in der Region Ost ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)	81
Tabelle 51: Kosten "Worst Case" der Region Ost ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte) ..	81
Tabelle 52: Einsparung Belüftungsenergie in der Region Ost (gerundete Werte)	82
Tabelle 53: laufende Kosten für die Eindickung in der Region Ost (gerundete Werte)	82
Tabelle 54: Transportkosten innerhalb der Region Ost (gerundete Werte)	82
Tabelle 55: Annahmekosten Hilders mit und ohne vorherige Eindickung	83
Tabelle 56: CO ₂ -Einsparpotentiale in der Region Ost (gerundete Werte)	83
Tabelle 57: laufende Kosten der Entwässerung in der Region Ost (gerundete Werte)	84
Tabelle 58: laufende Kosten der Trocknung in der Region Ost (gerundete Werte)	84
Tabelle 59: mögliche Einsparungen in der Trocknung gegenüber der Entwässerung	84
Tabelle 60: Zusammenfassung der Region Ost (gerundete Werte)	85
Tabelle 61: Einsparungen Belüftung Region Süd (gerundete Werte)	90
Tabelle 62: Mengenreduzierung durch Eindickung in der Region Süd (gerundete Werte)	90
Tabelle 63: Transportmengen in der Region Süd (gerundete Werte)	91
Tabelle 64: Einsparungen Belüftungsenergie Region Südwest (gerundete Werte)	94
Tabelle 65: Mengenänderung durch Schlammeindickung (gerundete Werte)	95
Tabelle 66: Transportmengen innerhalb der Region Südwest (gerundete Werte)	95
Tabelle 67: CO ₂ -Einsparpotentiale der Region Südwest (gerundete Werte)	95
Tabelle 68: Mengenreduzierung durch eine Entwässerung in der Region Südwest (gerundete	96
Werte)	96
Tabelle 69: Mengenreduzierung durch eine Trocknung in der Region Südwest (gerundete Werte)	97
.....	97
Tabelle 70: Bestandskosten in der Region Südwest ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)	97
.....	97
Tabelle 71: Kosten "Worst Case" der Region Südwest ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)	98
.....	98
Tabelle 72: laufende Kosten der Eindickung in der Region Südwest (gerundete Werte)	98
Tabelle 73: Transportkosten in der Region Südwest mit Schlammeindickung (gerundete Werte)	98
.....	98
Tabelle 74: Transportkosten in der Region Südwest ohne Schlammeindickung (gerundete Werte)	99
.....	99
Tabelle 75: Annahmekosten in Neuhof	99
Tabelle 76: laufende Kosten für eine Kammerfilterpresse	99
Tabelle 77: laufende Kosten der Entwässerung in der Region Südwest (gerundete Werte) ...	100
Tabelle 78: laufende Kosten der Trocknung in der Region Südwest (gerundete Werte)	100
Tabelle 79: Zusammenfassung der Region Südwest (gerundete Werte)	100
Tabelle 80: Mengenreduzierung durch Schlammeindickung in der Region West (gerundete	104
Werte)	104
Tabelle 81: Transportmengen aus der Region West (gerundete Werte)	104
Tabelle 82: Bestandskosten der Region West ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)	105
Tabelle 83: Kosten "Worst Case" der Region West ab Größenklasse 3 (gerundete Werte)	105

Tabelle 84: laufende Kosten der Eindickung in der Region West (gerundete Werte)	105
Tabelle 85: Transportkosten in der Region West mit Schlammeindickung (gerundete Werte)	106
Tabelle 86: Transportkosten in der Region West ohne Schlammeindickung (gerundete Werte)	106
Tabelle 87: Annahmekosten in Schlitz (gerundete Werte)	106
Tabelle 88: Zusammenfassung in der Region West	107
Tabelle 89: Bestandskosten der Region Mitte ab Größenklasse 3 (gerundete Werte)	109
Tabelle 90: Kosten "Worst Case" der Region Mitte ab der Größenklasse 3 (gerundete Werte)	109
Tabelle 91: Annahmekosten in Gläserzell (gerundete Werte)	109
Tabelle 92: laufende Kosten der Entwässerung in der Region Mitte (gerundete Werte)	110
Tabelle 93: Zusammenfassung der Region Mitte (gerundete Werte)	110

10 Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung (aerobe) Bemessungsschlammalter für Anlagen mit Nitrifikation (DWA, 2016).....	11
---	----

11 Quellennachweis

AR. (2020). Klärwerk.info. Abgerufen am 7. Februar 2020 von <http://www.klaerwerk.info/Schlammbehandlung/Praktische-Erfahrungen-zur-Vermeidung-von-MAP-Ablagerungen>

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. (2019). Rechtsgrundlagen Klärschlamm Entsorgung. Abgerufen am 21. November 2019 von <https://www.stmuv.bayern.de/themen/abfallwirtschaft/klaerschlamm/recht/index.htm>

Bayern, D. (2011). DWA-Bayern. Von https://www.dwa-bayern.de/de/lv-publikationen.html?file=files/_media/content/PDFs/LV_Bayern/6%20LV-Publikationen/Leitfaden_DWA_Bayern_2-4_Gluehverlust-Ueberschussschlamm.pdf&cid=45345 abgerufen

Beier, M., Schneider, Y., & Lorek, C. (15. Januar 2016). Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. Abgerufen am 8. Januar 2020 von <https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/114107>

Bendt, T., Tschsch, D., Neitzel, D., & Schmelz, D.-I.-G. (2007). Schulungsunterlagen für Abwassermeister/innen 2006. (DWA, Hrsg.) Hennef.

Böhler, M., & Siegrist, H. (18. Juli 2008). Flussgebiete Hessen. Abgerufen am 7. Februar 2020 von http://flussgebiete.hessen.de/fileadmin/dokumente/2_umsetzung/hintergrundinformationen/m_gleichkeiten_zur_optimierung_der_chemischen_phosphorflutung_an_hessischen_kl_ranlagen.pdf

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (26. November 2019). Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Abgerufen am 14. Januar 2020 von https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Ackerbau/_Texte/Duengung.html

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (29. Januar 2020). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Abgerufen am 18. Februar 2020 von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Wirtschaft/kohleausstieg-und-strukturwandel.html>

Bux, M. (28. Januar 2013). Bauarten solarer Klärschlamm-trocknungsanlagen. In K. J. Thomé-Kozmiensky, & M. Beckman (Hrsg.), Energie aus Abfall (Bd. 10). Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. Abgerufen am 6. Januar 2020 von https://www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA10/2013_EaA_949_960_Bux.pdf

DWA. (2012). Merkblatt DWA-M 387 Thermische Behandlung von Klärschlämmen - Mitverbrennung in Kraftwerken. Hennef.

DWA. (2013). DWA-M 366 Maschinelle Schlamm-entwässerung. (A. u. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Hrsg.) Hennef.

DWA. (2016). DWA-A 131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. (A. u. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Hrsg.) Hennef.

DWA. (2019). Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm-trocknung (Entwurf). Hennef.

Ecoprog. (17. Mai 2017). Umwelt Magazin. Abgerufen am 2. Januar 2020 von <https://www.umweltmagazin.de/Branchen-News/ecoprog-Grosser-Bedarf-in-der-Monoverbrennung-von-Klaerschamm>

Ewens, H.-P. (2018). Nach der Verabschiedung der novellierten AbfKlärV: Einblicke in den Erwartungshorizont des BMU - Umsetzung der Vorgaben und Vollzugsfragen. In O. Holm, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, & S. Kopp-Assenmacher, Verwertung von Klärschlamm. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.

Franck, J., & Schröder, L. (2015). Zukunftsfähigkeit kleiner Klärschlamm-verbrennungsanlagen. In Energie aus Abfall (Bd. 12). Neuruppin: TK Verlag Thomé-Kozmiensky.

Geyer, J. (2013). Klärschlamm-trocknung in Deutschland -Stand und Perspektive-. In K. J. Thomé-Kozmiensky, & M. Beckmann (Hrsg.), Energie aus Abfall (Bd. 10). Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.

Heidecke, P., & Roskosch, A. (2019). Klärschlamm-verbrennung in Deutschland - Entwicklung und Tendenzen. (10/2019).

Heindl, A., & Kurzweil, P. (2018). Lagerverhalten von getrocknetem Klärschlamm. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (5).

HUBER SE. (2016). HUBER SE. Abgerufen am 10. Januar 2020 von <https://www.huber.de/de/produkte/schlammbehandlung/schlamm-trocknung/huber-band-trockner-bt.html>

Jacobs, U. (2013). Kosten und Wirtschaftlichkeit der Klärschlamm-trocknung. In M. B. Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), Energie aus Abfall (Bd. 10). Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.

Klette, K. (16. Oktober 2017). Pioniergeist bringt wertvollen Phosphor. Stuttgarter Zeitung. Abgerufen am 10. Februar 2020 von <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.klaeranlagenrenningen-pioniergeist-bringt-wertvollen-phosphor.17e50333-5527-4361-9f8c-1af291661c6f.html>

Klose, S. (2018). Thermo-chemische Klärschlammbehandlung nach dem EuPhoRe-Verfahren. In Verwertung von Klärschlamm. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.

Kuppe, A., & Geyer, J. (kein Datum). Einbindung der Klärschlamm Trocknung in andere Infrastruktur- und Industriekomplexe – Beispiel MVA, Zementherstellung und Fernwärmebereitstellung –. In S. Thiel, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, & A. Gosten (Hrsg.), Energie aus Abfall (Bd. 15). Neuruppin. Abgerufen am 19. Januar 2020 von https://www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA15/2018_EaA_637-648_Kuppe

LAGA. (7 2015). docplayer. Von <https://docplayer.org/53087838-Laga-ad-hoc-ag-ressourcenschonung-durch-phosphor-rueckgewinnung-abschlussbericht.html> abgerufen

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. (2020). lanuv.nrw. Abgerufen am 9. März 2020 von <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/abfall/abfallverwertung-und-beseitigung/muellverbrennung/technik-der-thermischen-behandlung>

Landkreis Günzburg. (2020). Landratsamt Landkreis Günzburg. Abgerufen am 6. Februar 2020 von <https://landratsamt.landkreis-guenzburg.de/buergerservice/natur-und-umwelt/allgemeines-abfallrecht/landwirtsch-klaerschlammverwertung>

Lehrmann, F. (2013). Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung -Trocknung, Monoverbrennung und Mitverbrennung-. Abgerufen am 6. Januar 2020 von Vivis: https://www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA10/2013_EaA_899_926_Lehrmann.pdf

Lehrmann, F., Six, J., & Heidecke, P. (2020). Thermische Klärschlammbehandlung -Bestehende Kapazitäten, künftiger Bedarf, Entwicklung der Verbrennungskapazitäten-. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (1/20).

Michel, M. (2011). Abgerufen am 5. Februar 2020 von <https://docplayer.org/39916795-Dynamische-schlammalterregelung-mit-fuzzy-logic-dwa-vdi-tagung-mess-und-regelungstechnik-in-abwassertechnischen-anlagen-fulda-2011.html>

Otte-Witte, R., Boudewins, T., Brandt, C., Fehr, G., Fink, M., Flohr, J., . . . Siekmann, T. (2018). Auswirkungen der neuen Klärschlammverordnung auf die Klärschlamm Entsorgung. KA Korrespondenz Abwasser (8).

Pfitzner, R. (Juli 2008). KAN. Abgerufen am 7. Februar 2020

Plank, H., Wiesgickl, S., & Roitzsch, T. (2018). Genehmigungsrechtliche Aspekte für die thermische Klärschlammverwertung am Standort Hallo-Lochau. In O. Holm, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, & S. Kopp-Assenmacher (Hrsg.), Verwertung von Klärschlamm. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.

Resch, H., & Schatz, R. (2010). Abwassertechnik verstehen. Oberhaching/München: F. Hirthammer Verlag GmbH.

Ritterbusch, S. (2019). Dezentrale Klärschlammverwertung mit dem KlärschlammReformer. In O. Holm, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, & S. Kopp-Assenmacher (Hrsg.), Verwertung von Klärschlamm 2. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.

Roskosch, A., & Heidecke, P. (2018). Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. (Umweltbundesamt, Hrsg.) Dessau-Roßlau.

Schauenberg, T. (28. Oktober 2019). Deutsche Welle. Abgerufen am 8. Februar 2020 von <https://www.dw.com/de/müllverbrennung-in-deutschland-entsorgung-mit-risiken/a-50759483>

Schmidl, E. (2018). Wie reagieren die Zementwerksbetreiber auf die novellierte Klärschlammverordnung? In S. Thiel, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, & A. Gosten (Hrsg.), Energie aus Abfall (Bd. 15). Neuruppin. Abgerufen am 19. Januar 2020 von https://www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA15/2018_EaA_749-760_Schmidl

Schnell, M., Horst, T., & Quicker, P. (2018). Thermische Verwertung von Klärschlamm - Überblick und Einordnung bestehender Verfahren -. In O. Holm, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, & S. Kopp-Assenmacher, Verwertung von Klärschlamm. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. Von https://www.vivis.de/wp-content/uploads/VvK/2018_VvK_131-164_Quicker abgerufen

Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen. (2006). Klärschlamm entsorgung: Eine Bestandsaufnahme. (J. Pinnekamp, & H. Friedrich, Hrsg.) Aachen / Düsseldorf: FiW Verlag.

VDZ. (2020). VDZ. Abgerufen am 4. Februar 2020 von <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/branchenueberblick/zementwerke-in-deutschland/>

Versteyl, A. (2018). vivis. Abgerufen am 11. Januar 2020 von https://www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA15/2018_EaA_595-610_Versteyl

Weigand, H., & Marb, C. (Mai 2006). Müll und Abfall. Abgerufen am 1. Februar 2020 von <https://www.muellundabfall.de/ce/zusammensetzung-und-schadstoffgehalt-von-restmuell-aus-haushaltungen-teil-iii-physikalisch-chemische-eigenschaften-und-schadstoffgehalte/detail.html>

wohindamit.de. (2016). wohindamit.de. Abgerufen am 20. November 2019 von <https://www.wohindamit.de/die-fuenfstufige-abfallhierarchie-was-ist-das/>