

Zukunftsfähige Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern



Impressum

Herausgeber: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz MV
Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus MV

**Mecklenburg
Vorpommern** 

Bearbeitung: Ingenieurbüro Friedrich
Dipl.-Ing. Michael Friedrich
August-Bebel-Str. 14, 19055 Schwerin
www.ibf-thiox.de

INGENIEURBÜRO
FRIEDRICH 

Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft
Dr. Ing. Gerd Kolisch, Dipl.-Ing. Thomas Osthoff
Untere Lichtenplatzer Straße 100, 42289 Wuppertal
www.wiwmbh.de

WiWmbh 

Gestaltung: BILDERmacher Gestaltung, Magnus Bartel
Schliemannstraße 12b, 19055 Schwerin
www.bildermacher.biz

Fotos: Friedrich (1, 2.7, 3, 4.3, 5, 5.3, 5.4, 5.5, 5.8, 6.14)
Gürcke (7)
Kolisch (2, 5.18)
Mediathek des Deutschen Bundestages (4)
Stadt Dargun (5.9)
GKU Altentreptow (5.10)
Thermo-System (5.11)
Kalogeo Anlagenbau GmbH (6)
Dr. Kape (6.3)
foxaon - Fotolia.com (Titel 1)
maxximm - Fotolia (Titel 2)
Kesu - Fotolia.com (Titel 3)

Druck: Landesamt für innere Verwaltung Mecklenburg-Vorpommern
Zentrale Druckerei

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern und des Ministeriums für Wirtschaft, Bau und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern herausgegeben. Sie darf nicht zur Wahlwerbung verwendet werden.

Schwerin, im Dezember 2013

Zukunftsfähige Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	8
2	Grundlagen	10
2.1	Begriffsbestimmung	10
2.2	Entstehung und Zusammensetzung von Klärschlamm	11
2.3	Biologische Abbaubarkeit von Klärschlamm	13
2.4	Stabilisierung von Klärschlamm	14
2.5	Nährstoffgehalt von Klärschlamm	15
2.6	Schadstoffe im Klärschlamm	16
2.6.1	Allgemeines	16
2.6.2	Anorganische Schadstoffe	16
2.6.3	Organische Schadstoffe	17
2.7	Pathogene Keime im Klärschlamm	17
2.8	Energieträger Klärschlamm	18
3	Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern	20
3.1	Mengen und Qualität	20
3.1.1	Klärschlammengen	20
3.1.2	Klärschlammqualität	21
3.1.2.1	Trockensubstanzgehalt	22
3.1.2.2	Schwermetalle	23
3.1.2.3	Organische Schadstoffe	24
3.1.2.4	Seuchenhygienische Aspekte	24
3.1.2.5	Nährstoffe	24
3.1.2.6	Bewertung	25
3.2	Klärschlammbehandlung	26
3.2.1	Abwasserreinigung in Mecklenburg-Vorpommern	26
3.2.2	Stand der Klärschlammstabilisierung	26
3.2.3	Verfahren der Schlammbehandlung nach Kläranlagengröße	27
3.2.3.1	A - Aerobe Stabilisierung	27
3.2.3.2	AN - Anaerobe Stabilisierung	30
3.2.3.3	Bestehende Verbundlösungen für die Klärschlammbehandlung	31
3.2.3.4	Zusammenfassung der gegenwärtigen Situation	31
3.3	Klärschlamm Entsorgung in Mecklenburg-Vorpommern	32
3.3.1	Klärschlammengen und Verwertung	33
3.3.2	Nutzung des Phosphorpotenzials aus Klärschlamm	34

4	Triebkräfte zukünftiger Klärschlammbehandlung und -entsorgung	34
4.1	Rechtlicher Rahmen	34
4.1.1	Kreislaufwirtschaftsgesetz	34
4.1.2	Klärschlammverordnung	36
4.1.3	Bodenschutzrecht	36
4.1.4	Düngerecht	37
4.1.5	Bundes- Immissionsschutzrecht	38
4.1.6	Triebkräfte aufgrund von Gesetzesinitiativen	38
4.2	Klima- und Ressourcenschutz	40
4.3	Entsorgungssicherheit	41
5	Zukünftige Klärschlammbehandlung	42
5.1	Möglichkeiten	42
5.1.1	Integration einer Schlammfäulung	43
5.1.1.1	Verfahrenskonzept	43
5.1.1.2	Errichtung einer Vorklärung	43
5.1.1.3	Vermeidung der simultanen aeroben Stabilisierung	44
5.1.1.4	Errichtung eines Faulbehälters	44
5.1.1.5	Gasverwertung	45
5.1.1.6	Wirtschaftlichkeit der Umrüstung	46
5.1.1.7	Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Co-Fermentation	48
5.1.2	Optimierte Verbundkonzepte	49
5.1.2.1	Verfahrenskonzept	49
5.1.2.2	Errichtung einer Vorklärung auf einer dezentralen Kläranlage	50
5.1.2.3	Separate Behandlung von Prozesswasser	51
5.1.2.4	Planung der optimierten Verbundlösung	52
5.1.3	Optimierung der Schlammbehandlung	52
5.1.3.1	Desintegration von Rohschlamm	52
5.1.3.2	Klärschlammvererdung	53
5.1.3.3	Dezentrale Trocknung von Klärschlamm	55
5.2	Szenarien der zukünftigen Klärschlammbehandlung	57
5.2.1	Szenario 0: IST-Situation	58
5.2.2	Szenario 1: Anaerobe Schlammstabilisierung auf mittelgroßen Anlagen	59
5.2.3	Szenario 2: Klärschlammvererdung auf kleineren Kläranlagen	60
5.2.4	Szenario 3: Dezentrale Trocknung auf mittleren und großen Kläranlagen	61
5.2.5	Resümee	62

6	Zukünftige Klärschlammentsorgung	64
6.1	Einführung	64
6.2	Möglichkeiten	66
6.2.1	Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung	66
6.2.2	Thermische Klärschlammentsorgung	67
6.2.2.1	Monoverbrennung	67
6.2.2.2	Mitverbrennung	70
6.2.3	Kosten	72
6.3	Phosphorrückgewinnungspotenziale	73
6.3.1	Möglichkeiten und Grenzen der Phosphorrückgewinnung	73
6.3.2	Langzeitlagerung von Klärschlammasche	74
6.4	Szenarien der Klärschlammentsorgung in Mecklenburg-Vorpommern	74
6.4.1	Ausgangssituation	74
6.4.2	Szenario – Kurzfristige Klärschlammentsorgung	75
6.4.2.1	Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung	75
6.4.2.2	Thermische Klärschlammentsorgung	75
6.4.3	Szenario – Mittelfristige Klärschlammentsorgung	76
6.4.3.1	Ableitung und Beschreibung des Szenarios	76
6.4.3.2	Herangehensweise	76
6.4.3.3	Dimensionierung	76
6.4.3.4	Technisches Konzept	77
6.4.3.5	Energiebilanz	78
6.4.3.6	Wirtschaftlichkeit	79
6.4.3.7	Auslastungsgrad	80
6.4.3.8	Zentrales versus regionales Anlagenkonzept	80
6.4.3.9	Phosphorrückgewinnung	81
6.4.3.10	Organisation der thermischen Klärschlammverwertung	81
6.4.3.11	Standortbereich der thermischen Entsorgung	81
6.4.4	Szenario – Langfristige Klärschlammentsorgung	82
6.4.4.1	Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung	82
6.4.4.2	Thermische Klärschlammentsorgung	82
6.4.5	Resümee der Szenarienbetrachtungen	83
7	Ausblick	84
8	Abkürzungsverzeichnis	86
9	Literatur	88
Anlage 1	Summenhäufigkeiten der Schadstoffparameter des Klärschlammes in MV	92
Anlage 2	Bilanzierung des Umstiegs von aerober zur anaeroben Schlammstabilisierung	94
Anlage 3	Annahmen und Kostenfunktionen für die Szenarien der zukünftigen Klärschlammbehandlung	106

1 Einführung

Entwässerter Klärschlamm



Von grundsätzlicher Bedeutung ist der Erhalt der Entsorgungssicherheit für die stabilisierten Klärschlämme. Diese gehen in Mecklenburg-Vorpommern derzeit noch überwiegend in den landwirtschaftlichen Verwertungsweg und tragen so direkt zur Nährstoffversorgung der Böden bei. Vor dem Hintergrund der rechtlichen Begrenzungen, die sich aus der gültigen Düngemittelverordnung (DüMV) und der noch ausstehenden Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) ergeben können, wird dieser Verwertungsweg allerdings zunehmend diskutiert. Der notwendige Aufbau eines thermischen Entsorgungsweges innerhalb des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern mit der Schaffung der benötigten Behandlungskapazität ist eine anspruchsvolle und vielschichtige Aufgabe.

Schließlich ist die begrenzte Verfügbarkeit des Pflanzennährstoffs Phosphor zu berücksichtigen. Die zunehmende Ausschöpfung der verfügbaren Ressourcen zeigt sich bereits heute in einer qualitativen Verschlechterung (Cadmium und Uran) der gehandelten Rohphosphate. Diese wird von einer weltweit steigenden Nachfrage aus dem Agrarsektor und einer spekulativen Preistreibung im Handelssektor überlagert. Vor diesem Hintergrund stellen die im Klärschlamm enthaltenen Phosphor-Mengen eine wichtige interne Ressource dar, die wenn möglich, recycelt und weiterhin im Land genutzt werden sollte. Die hierfür bekannten Verfahren befinden sich derzeit noch im Entwicklungszustand, sollten jedoch bei zukünftigen Überlegungen berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Studie werden die verschiedenen Faktoren, die auf den Anfall, die Behandlung und die Verwertung von Klärschlamm einwirken, dargestellt. Dieser Darstellung werden interessante betriebliche oder verfahrenstechnische Ansätze, mit denen sowohl die zu entsorgende Schlammmenge vermindert als auch die produzierte Klärgasmenge optimiert werden kann, gegenübergestellt. Die Strukturen der Abwasser- und Schlammbehandlung sowie die Anfallmengen, die Behandlungs- und die Entsorgungswege für Klärschlamm im Land Mecklenburg-Vorpommern werden zusammenfassend beschrieben. Hierauf aufbauend werden Ansätze für eine zukünftige Klärschlammverwertung über eine Szenarienbetrachtung untersucht. Als Ergebnis dieser Betrachtung werden Hinweise für die weitere Entwicklung eines zukunftsfähigen Klärschlammkonzeptes abgeleitet.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsbestimmung

Die Bezeichnungen für Klärschlamm werden entsprechend des Anfallortes und des Behandlungsstatus differenziert. Die in dieser Studie benutzten Abkürzungen sind in der Abbildung dargestellt.

Die Klärschlammmasse ohne Wasser wird mit der Einheit TS für Trockensubstanz versehen. In anderen Veröffentlichungen steht für TS auch TR (Trockenrückstand) oder TM (Trockenmasse). Für die Klärschlammmasse mit Wasser wird hier als Einheit OS (Originalsubstanz) verwendet. Die Originalsubstanz wird anderweitig auch als FM (Frischmasse) bezeichnet.

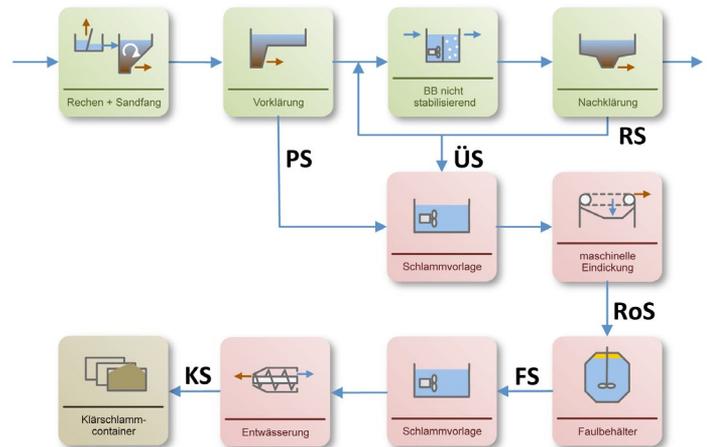
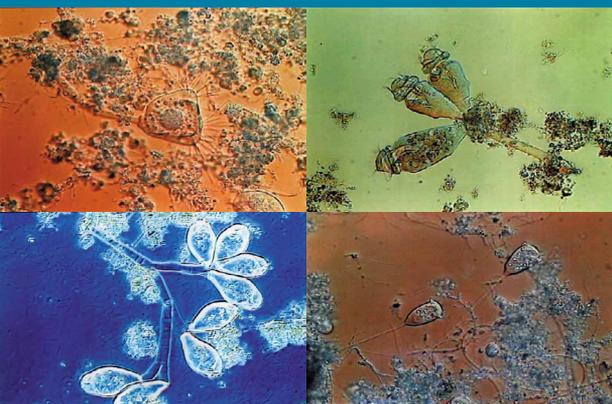


Bild 2.1: Klärschlammbezeichnung mit Zuordnung zum Behandlungsprozess

Belebtschlamm im mikroskopischen Bild



Abk.	Schlammtyp	Charakteristik
PS	Primärschlamm	Fällt in der Vorklärung an
ÜS	Überschussschlamm	Fällt in der biologischen Stufe an
RS	Rücklaufschlamm	Interner Schlammkreislauf der biol. Stufe
RoS	Rohschlamm	Unstabilisierte Mischung aus PS und ÜS
FS	Faulschlamm	Stabilisierte Mischung aus PS und ÜS
KS	Klärschlamm	Fertig behandelter Schlamm

Tabelle 2.1: Begriffserklärung für Klärschlamm

2.2 Entstehung und Zusammensetzung von Klärschlamm

Kommunales Abwasser enthält faserförmige, partikuläre und gelöste Inhaltsstoffe, die in einem zweistufigen Reinigungsprozess aus mechanischer und biologisch-chemischer Abwasserreinigung entfernt werden. In den einzelnen Reinigungsstufen fallen hierbei Reststoffe an, die sich in ihrer Menge und Zusammensetzung sowie in ihrer weiteren Entsorgung bzw. Verwertung erheblich unterscheiden. So werden Rechengut und Kanalsand abgeschieden, gewaschen und direkt entsorgt.

Klärschlamm hingegen, der in einer Vorklärung als **Primärschlamm** und in der biologischen Reinigungsstufe als Sekundärschlamm (**Überschussschlamm**) anfällt, muss vor der Entsorgung aufgrund des hohen Gehalts an organischer Substanz und der damit verbundenen hohen biologischen Aktivität zunächst stabilisiert werden.

Darüber hinaus entsteht bei der Dosierung von Fällmitteln zur chemischen P-Elimination ein weitgehend anorganischer **Fällschlamm**, der zusammen mit dem Überschussschlamm abgezogen wird und der eine hohe Konzentration des wichtigen Pflanzennährstoffs Phosphor aufweist.

Klärschlämme, die aus Kleinkläranlagen stammen, aber auch der Inhalt von Abwassersammelgruben, werden entweder in den Zulauf oder in den Faulbehälter einer öffentlichen Kläranlage eingeleitet. Sie werden dann Bestandteil des Klärschlammes dieser Kläranlage.

Primärschlamm

Partikuläre Bestandteile des Abwassers werden in einer Vorklärung zu 50 bis 60 % abgeschieden und als Primärschlamm bezeichnet. Primärschlamm weist gute statische Eindickeigenschaften auf. Eine Eindickung auf einen Trockensubstanzgehalt von 4 % TS in einem statischen Eindicker ist ein üblicher Wert. Aufgrund des hohen Gehalts an organischer, leicht faulfähiger Substanz gehen jedoch intensive Geruchsemissionen vom Primärschlamm aus, wenn er turbulent bewegt wird.

Primärschlamm zeichnet sich durch einen hohen Anteil an Kohlenhydraten und Fetten und einen geringen Anteil an Proteinen aus (Miron et al., 2000). Im Primärschlamm ist eine im Vergleich zum Überschussschlamm geringe Konzentration an aktiver Biomasse zu finden. Mit Bezug auf diese aktive Biomasse sind biologisch abbaubare Komponenten stets im Überschuss vorhanden.

Parameter	PS	ÜS	ÜS	Einheit
Aerob stabilisiert	nein	nein	ja	
Anfall	25	35	55	g TS/(EW*d)
Trockensubstanzgehalt	30	8	8	g TS/l
Organischer Anteil	70	73	65	%

Tabelle 2.2: Typische Werte für Primär- und Überschussschlamm in Mecklenburg-Vorpommern

Überschussschlamm

Bei dem Abbau gelöster Abwasserinhaltsstoffe durch aktive Biomasse werden die enthaltenen organischen Anteile etwa hälftig veratmet bzw. in neu gebildete Biomasse überführt. Der sogenannte Überschussschlamm enthält neben der reinen Bakterienmasse auch die inerte partikuläre Substanz des Zulaufs, die nicht in der Vorklärung abgeschieden wurde und die in den Schlammflocken adsorbiert ist, sowie inerte Reststoffe aus abgestorbener oder abgebauter Bakterienmasse.

Drei Prozesse bestimmen daher die Produktion von Überschussschlamm:

1. In Abhängigkeit von der Verweilzeit bzw. der Abscheideleistung in der Vorklärung gelangen schwer sedimentierbare partikuläre Stoffe in die biologische Stufe und werden hier teilweise abgebaut bzw. teilweise nur an die Belebtschlammflocken angelagert.
2. Biologisch nutzbares Substrat im Zulauf der biologischen Stufe wird zur Zellteilung genutzt oder als zellinterner Speicherstoff angelegt. Daraus resultiert ein Zuwachs an aktiver Biomasse. Je höher die Schlammbelastung ist, desto höher ist die Wachstumsgeschwindigkeit der aktiven Biomasse.
3. Darüber hinaus steigen mit zunehmendem Schlammalter und der hiermit verbundenen Limitierung des Substratangebotes die Eigenveratmung des Schlammes und damit der Anteil von abgestorbener Biomasse an. Dabei sinkt der organische Anteil des Schlammes. Dieser Prozess wird simultane aerobe Schlammstabilisierung genannt.

Anders als im Primärschlamm herrscht im Belebtschlamm stets ein Mangel an Substrat. Durch diesen Substratmangel wird das Wachstum von Bakterien begrenzt. Die organische Trockensubstanz (oTS) besteht beim Überschussschlamm zu einem sehr großen Anteil

aus lebenden und toten Organismen. Daraus erklären sich der hohe Anteil an Proteinen und die verhältnismäßig geringe Abbaubarkeit des Überschussschlammes in einer Faulung.

Fällschlamm

Zur gezielten Elimination von Phosphor aus dem Abwasser wird auf den meisten Kläranlagen ein Fällmittel eingesetzt, welches unter aeroben Milieubedingungen mit Phosphor eine schwer lösliche Verbindung eingeht. Dieses Fällprodukt, das auch organische Komponenten einschließen kann, erzeugt einen Schlamm, der anteilig im Überschussschlamm enthalten ist. Als Fällmittel wird Eisen vorwiegend in seiner dreiwertigen Form eingesetzt. Auf einigen großen Kläranlagen wird Eisen(II)-sulfat zur Anwendung gebracht. Darüber hinaus ist der Einsatz von Aluminiumsalzen möglich. Nach DWA-A 131 entsteht bei der Fällungsreaktion 2,5 g TS/g Fe. Je nach Phosphorfracht im Zulauf der Kläranlage würde sich damit eine anteilige Schlammproduktion durch Fällschlamm von 6-9 % ergeben. Im Gegensatz zum biologisch fixierten Phosphor ist jedoch der chemisch gebundene Phosphor in seinem anaeroben Rücklösevermögen und in seiner Pflanzenverfügbarkeit deutlich eingeschränkt.

Fäkalschlamm

Fäkalschlamm ist für die Betrachtungen der Verwertungsoptionen im Rahmen dieser Studie nur von nachrangiger Bedeutung, da dieser Schlammtyp nicht direkt entsorgt, sondern als Bestandteil des Klärschlammes einer größeren Kläranlage abgegeben wird.

Fäkalschlamm wird auf unterschiedliche Weise in den Prozessablauf einer Kläranlage eingebracht. In jedem Falle findet nach der Annahme eine Vorreinigung statt. Im Weiteren ist es gängige Praxis, den Fäkalschlamm entweder in den Zulauf der Kläranlage oder in den Faulbehälter einzubringen.

2.3 Biologische Abbaubarkeit von Klärschlamm

Die Mischung aus den vorgenannten Klärschlammarten wird Rohschlamm (RoS) genannt, wobei sich dieser Begriff auf nicht stabilisierten Schlamm bezieht. Rohschlamm besteht bei rein kommunalen Kläranlagen zu ca. 40 % aus Primärschlamm und ca. 60 % aus Überschussschlamm. Beide Klärschlammarten unterscheiden sich jedoch, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, erheblich in ihrer Zusammensetzung und damit in ihrer biologischen Abbaubarkeit.

Primärschlamm besteht zu einem großen Teil aus leicht abbaubaren Kohlenhydraten und Fetten und nur zu einem geringen Teil aus komplexer aufgebauten und daher schwerer abbaubaren Proteinen. Überschussschlamm ist hingegen ein Produkt des mikrobiellen Wachstums. Er besteht vorrangig aus lebenden als auch toten Zellen und damit in hohem Maße aus komplexeren Proteinen (siehe Bild 2.2).

Der CSB-Gehalt (Chemischer Sauerstoffbedarf) von Primär- und Überschussschlamm lässt sich aus den CSB-Gehalten von Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten für beide Schlammarten ableiten. Messungen zeigen jedoch einen großen Schwankungsbereich für Primärschlamm mit Werten von 1,6 bis 2,3 g CSB/g oTS. Der CSB-Gehalt von Überschussschlamm unterliegt hingegen mit Werten von 1,40 bis 1,55 g CSB/g oTS deutlich geringeren Schwankungen und dies fast unabhängig vom Stabilisierungsgrad.

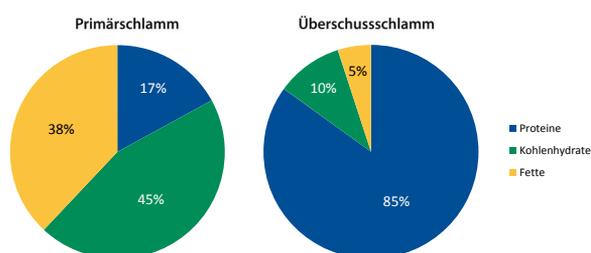


Bild 2.2: Zusammensetzung von Primär- und Überschussschlamm (Miron et al., 2000)

Aus Schlamm- und Energiebilanzen der anaeroben Stabilisierung sowie aus separaten Faulversuchen mit Primär- und unstabilisiertem Überschussschlamm ergeben sich folgende mögliche Abbaugrade in einer mesophilen Schlammfäulung:

	PS	ÜS	RoS
oTS-Abbau	70 %	35 %	50 %
TS-Abbau	50 %	25 %	30 %

Tabelle 2.3: Typischer Abbaugrad bezogen auf TS und oTS bei einer mesophilen Fäulung

Der Abbaugrad des Überschussschlammes in einer Fäulung wird mit steigendem Schlammalter in der biologischen Stufe bzw. mit zunehmender simultaner aerober Stabilisierung immer geringer.

Aufgrund seiner Zusammensetzung aus Primärschlamm und Überschussschlamm kann der biologische Abbaugrad von Rohschlamm erhöht werden, indem entweder:

- das Wachstum von Überschussschlamm durch eine besonders hohe Primärschlammproduktion minimiert wird oder
- die energiereichen Komponenten des Überschussschlammes durch einen chemischen, thermischen oder physikalischen Aufschluss biologisch verfügbar gemacht werden (Desintegration).

2.4 Stabilisierung von Klärschlamm

Unstabilisierter Klärschlamm enthält einen hohen Anteil an biologisch abbaubaren energiereichen Komponenten. Klärschlamm zu stabilisieren bedeutet, diese Komponenten soweit abzubauen, dass nur noch ein inerter organischer Rest im Klärschlamm verbleibt. Grundsätzlich wird zwischen der aeroben und der anaeroben Stabilisierung unterschieden.

Die **aerobe Stabilisierung** erfolgt in der Regel simultan mit der Abwasserreinigung, indem das Belebungsbecken so groß dimensioniert wird, dass neben dem Abbau der Abwasserinhaltsstoffe auch ein Abbau von gut abbaubaren Bestandteilen des Belebtschlammes erfolgen kann. Dabei wird ein Schlammalter von mehr als 25 Tagen angestrebt. Diese Verfahrensweise hat den Vorteil, dass keine separaten Verfahrensstufen für die Stabilisierung benötigt werden. Sie eignet sich damit für kleinere Kläranlagen. Nachteilig bei diesem Prozess ist die negative Energiebilanz, da energiereiche Klärschlammkomponenten unter Sauerstoffzufuhr und damit unter Einsatz von Energie abgebaut werden müssen. Darüber hinaus ist der Stabilisierungsgrad im Winter geringer als im Sommer.

Die **anaerobe Stabilisierung** ist ein separater Prozess, der unter kontrollierten Milieubedingungen in einem Anaerobreaktor (Faulbehälter) bei ca. 37 °C und einer Reaktionszeit von ca. 20 d betrieben wird. Zur erfolgreichen Umsetzung dieses Prozesses ist das Erzeugen von energiereichem Rohschlamm von großer Bedeutung. Da sowohl der Eintrag eines Großteils der absetzbaren Stoffe in die biologische Stufe entfällt, als auch eine lange Schlammaufenthaltszeit in dieser Stufe vermieden wird, kann das Belebungsbecken in seinem Volumen erheblich kleiner dimensioniert werden, als bei der Verfahrensweise der simultanen aeroben Schlammstabilisierung.

Beim anaeroben Abbau von organischen Komponenten entsteht Klärgas, welches zu 60 bis 65 % aus Methan besteht. Durch die Verbrennung und Verstromung von Klärgas in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) kann der Energiegehalt der Abwasserbestandteile zu einem großen Teil nutzbar gemacht werden.

	aerob	anaerob
Prozess	simultan	separat
Vorklärung	nein	ja
Belebungsbecken	sehr groß	klein
Temperatur im Reaktor	8 - 22°C	37°C
Stabilisierungsgrad	im Winter klein	ganzjährig hoch
Energiebilanz	- 5 kWh/(EW*a)	+ 16 kWh/(EW*a)
Wirtschaftlichkeit	< 20.000 EW	> 20.000 EW

Tabelle 2.4: Charakteristische Merkmale der aeroben und anaeroben Schlammstabilisierung

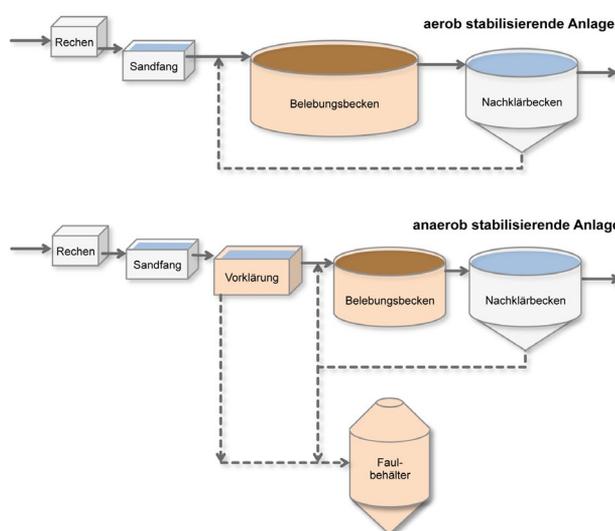


Bild 2.3: Simultane aerobe und anaerobe Schlammstabilisierung

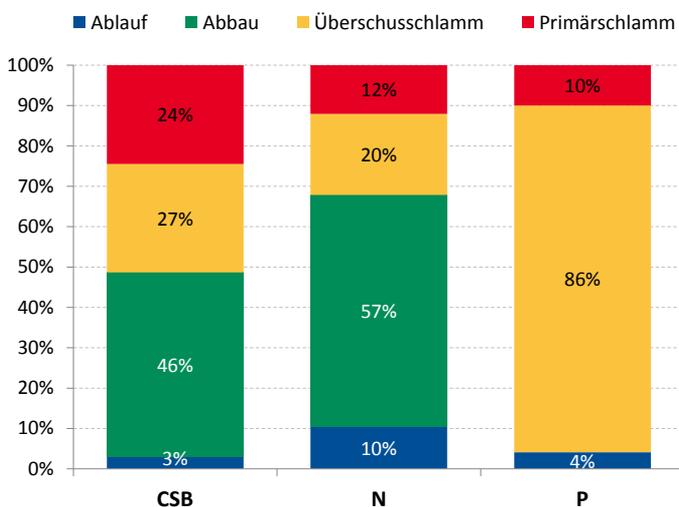
2.5 Nährstoffgehalt von Klärschlamm

Auch der Nährstoffgehalt von Rohschlamm ist auf die Entstehung und die Charakteristik seiner einzelnen Komponenten zurückzuführen.

Beispielhaft ist im Bild 2.4 eine CSB-, N- und P-Bilanz der Abwasserreinigung einer Kläranlage dargestellt. Darin werden die Anteile dieser Nährstoffe auf den Primär- und Überschussschlamm, den Abbau und den Kläranlagenablauf aufgeteilt. Bei der CSB-Bilanz wird der Abbau durch die Oxidation von organischen Komponenten und bei der Stickstoffelimination durch die Denitrifikation realisiert. Phosphor wird zwar ebenfalls gezielt aus dem Abwasser entfernt, in der Regel jedoch in den Überschussschlamm eingebunden und mit diesem abgezogen.

Bei der Reduktion von organischen Bestandteilen des Klärschlammes in einer Faulung wird Stickstoff frei, der bei einer nachfolgenden Schlamm entwässerung über Filtrat, Zentrat oder Trübwasser zurück in die biologische Stufe der Kläranlage gelangt. Phosphor hingegen, wenn er chemisch gefällt wurde, wird nicht in dem Maße mobilisiert wie Stickstoff, da nur der biologisch verfügbare Anteil des Rohschlammes reduziert wird, nicht aber der Fällschlamm.

Es sei darauf hingewiesen, dass bei der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung nicht der P-Gehalt, sondern der Gehalt an P_2O_5 angegeben wird. Der stöchiometrische Faktor für die Umrechnung in P_2O_5 beträgt $2,29 \text{ g } P_2O_5/\text{g P}$.



	Rohschlamm		Faulschlamm	
	N	P	N	P
Primärschlamm	4,0	0,6		
Überschussschlamm	7,0	3,0		
Gesamt	5,7	2,0	5,7	2,8

Tabelle 2.5: N- und P-Gehalt von Klärschlamm bezogen auf % TS

Bild 2.4: Typische Nährstoff-Massenbilanz der Abwasserreinigung

2.6 Schadstoffe im Klärschlamm

2.6.1 Allgemeines

Klärschlamm ist ein Abbauprodukt, das bei der Abwasserreinigung anfällt. Einerseits besteht Klärschlamm aus nicht abbaubaren Abwasserbestandteilen und andererseits aus lebender und toter (inert) Biomasse, welche erst beim Abbau von Abwasserbestandteilen entsteht. Es ist davon auszugehen, dass ein großer Teil von Inhaltsstoffen im Abwasser biologisch abbaubar ist und bei der biologischen Abwasserreinigung oxidativ abgebaut werden kann. Ein anderer Teil hingegen ist persistent und unter den Bedingungen, wie sie in einer Kläranlage herrschen, zumindest biologisch nicht veränderbar. Zudem liegen viele organische Schadstoffe in so geringen Konzentrationen vor, dass eine Spezialisierung von Mikroorganismen zu deren Abbau nicht möglich ist.

2.6.2 Anorganische Schadstoffe

Die neun chemischen Elemente, welche als anorganische Schadstoffe mit der Klärschlamm- und der Düngemittelverordnung reglementiert sind, gehören ausnahmslos den Schwermetallen an. Sie sind einerseits teilweise ein lebensnotwendiges Spurenelement (z.B. Kupfer und Zink), andererseits erwecken sie Besorgnis aufgrund ihrer toxischen Wirkung in dem Belastungspfad Pflanze/Tier/Mensch. Die Toxizität beruht unter anderem auf einer antagonistischen Wirkung mit anderen Metallen. So kann beispielsweise im Hämoglobin das Eisen von Blei oder auf der Darmschleimhaut Kalzium durch Cadmium verdrängt werden.

Die Elemente Arsen, Blei, Chrom, Nickel und Thallium weisen im typischen kommunalen Abwasser in der Regel geringe Konzentrationen auf und haben daher keine besondere Bedeutung als Schadstoff für die

beschriebenen Belastungspfade. Mit Bezug auf den Grenzwert, der nach der Klärschlamm- und der Düngemittelverordnung einzuhalten ist, weisen Klärschlämme jedoch für gewöhnlich höhere Gehalte an Cadmium, Zink, Kupfer und Quecksilber auf, als dies bei den vorgenannten Elementen der Fall ist.

Cadmium wirkt toxisch besonders auf Nieren und die Darmschleimhaut des menschlichen Organismus. Auch wenn die Cadmiumgehalte im Klärschlamm in den letzten 20 Jahren rückläufig sind, wird der gegenwärtige Grenzwert von 10 mg/kg TS in der gültigen AbfklärV wegen der hohen Toxizität von Cadmium in Frage gestellt. Die Düngemittelverordnung sieht nach Ablauf einer Übergangsfrist bis 2015 daher eine Verschärfung des Grenzwertes auf 1,5 mg/kg TS vor.

Zink ist ein essenzielles Spurenelement, das Bestandteil vieler Enzyme ist und eine zentrale Rolle im Stoffwechsel einnimmt. Es ist beteiligt am Aufbau der Erbsubstanz und am Zellwachstum. Der menschliche Organismus hat einen täglichen Bedarf von ca. 10 – 15 mg. Als Schadstoff ist Zink im Klärschlamm eher von untergeordneter Bedeutung.

Quecksilber ist besonders in organisch gebundener Form, aber auch als Dampf aufgenommen, toxisch. Es schädigt Nieren und Leber sowie das Zentralnervensystem. Die Quecksilbergehalte des Klärschlammes sind in den vergangenen 20 Jahren stark zurückgegangen. Der zukünftige Grenzwert der Düngemittelverordnung von nur 1,0 mg/kg TS wird die landwirtschaftliche Verwertung einer signifikanten Klärschlammmenge in Mecklenburg-Vorpommern ab 2015 ausschließen.

Kupfer ist wie Zink ein essenzielles Spurenelement. Der tägliche Bedarf des Menschen liegt bei ungefähr 1,0 - 1,5 mg. Kupfer ist für viele Mikroorganismen allerdings schon bei Konzentrationen toxisch, welche für den Menschen noch unbedenklich sind. Daher rührt seine bakterizide Wirkung. Für den menschlichen Organismus ist die tägliche Aufnahme von 40 mg Kupfer schadlos möglich (Holleman-Wiberg, 2007). Der Kupfergehalt im Klärschlamm ist in manchen Regionen ansteigend, was diesen Parameter mit Bezug auf das Einhalten eines Grenzwertes besonders kritisch macht.

2.6.3 Organische Schadstoffe

Organische Schadstoffe sind erheblich vielfältiger, größtenteils noch geringer konzentriert und schwieriger nachweisbar als die o.g. Schwermetalle. Problematisch für die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm aus Sicht der Daseinsvorsorge ist die Unbestimmtheit, mit der weitere organische Verbindungen und deren Wirkung auf die Umwelt und den menschlichen Organismus erkannt werden. In diesem Zusammenhang spielen gegenwärtig endokrin wirksame Substanzen, sogenannte Mikroschadstoffe, wie z.B. Medikamentenrückstände, Röntgenkontrastmittel, Industriechemikalien und Moschusduftstoffe, eine besondere Rolle. In der aktuellen Diskussion wird bisher allerdings vorrangig auf den Abwasserpfad und den Eintrag dieser Stoffe in die aquatische Umwelt fokussiert.

2.7 Pathogene Keime im Klärschlamm

Pathogene Organismen finden sich sowohl im Abwasser als auch im Klärschlamm. Die WHO unterscheidet 4 Organismengruppen, die im Zusammenhang mit pathogenen Wirkungen des Klärschlammes genannt werden.

Aufgrund der hohen Diversität ist es weder praktikabel noch möglich, Klärschlamm auf ein breites Spektrum an pathogenen Organismen zu untersuchen, so dass ein Indikator- oder Referenzorganismus gefunden werden muss. Als Referenzorganismus dient in Deutschland *Salmonella* spp. .

Gruppe	Beispielorganismen	Erkrankung
Bakterien	E. Coli	Enteritis
	Salmonella spp.	Durchfall
Viren	Hepatitis A virus	Hepatitis A
	Enterovirus	Meningitis
Mehrzeller	Cryptosporidium parvum	Durchfall
	Giardia intestinalis	Durchfall
Würmer (Helminthen)	Ascaris lumbricoides (Spulwurm)	Ascariasis - vielfältige Symptome
	Taenia solium (Schweinebandwurm)	neurobiologische Ausfälle

Tabelle 2.6: Pathogene Organismen im Klärschlamm (WHO, 2006)

2.8 Energieträger Klärschlamm

Der nutzbare Primärenergiegehalt von Klärschlamm leitet sich im Allgemeinen aus den biologisch abbaubaren organischen Bestandteilen und im Besonderen aus dem CSB-Gehalt dieser organischen Bestandteile ab. Er lässt sich relativ einfach über die mögliche Umwandlung von CSB in einer Faulung in Methan ableiten, da der Heizwert von Methan mit $10 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ CH}_4$ gut bekannt ist. Der spezifische Energiegehalt kann aus der Oxidation von Methan mit Sauerstoff abgeleitet werden. Das stöchiometrische Verhältnis von oxidiertem Methan zu dabei verbrauchtem Sauerstoff beträgt $350 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{t O}_2$. Da der CSB ein äquivalentes Maß für den Sauerstoffverbrauch bei der Oxidation von organischen Komponenten ist, kann er mit der Bezugsgröße O_2 ausgetauscht werden. Mit dem o. g. Heizwert von Methan ergibt sich ein Primärenergiegehalt von $3,5 \text{ kWh/kg CSB}$.

Basierend auf der CSB-Bilanz nach Bild 2.4 und einem üblichen CSB-Abbaugrad ist in Tabelle 2.7 der Primärenergiegehalt von Roh-, Primär- und Überschussschlamm zusammengestellt. Die Elektroenergieproduktion durch die Verstromung in einem BHKW wurde hierbei mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 37 % berechnet.

Mit einem Anteil von über 60 % des nutzbaren Energiegehaltes im Rohschlamm kommt dem Primärschlamm demnach eine besondere Bedeutung bei der Erzeugung von Eigenenergie auf kommunalen Kläranlagen zu.

Stabilisierter Klärschlamm ist ein niederkalorischer Brennstoff. Bei einem Trocknungsgrad von 80 % TS ist sein Heizwert zwar vergleichbar mit jenem von Braunkohle, jedoch ist der TS-basierte Heizwert von 11 – 13 MJ/kg TS vergleichsweise niedrig. (Bild 2.5)

	CSB			Energie	
	Fracht g/(EW*d)	Abbau- grad %	Abbau g/(EW*d)	Primär- kWh/ (EW*a)	Elektro- kWh/ (EW*a)
Primärschlamm	25	70	18	22	8
Überschussschlamm	35	35	12	16	6
Rohschlamm	60		30	38	14

Tabelle 2.7: Mittlerer Energiegehalt von Klärschlamm

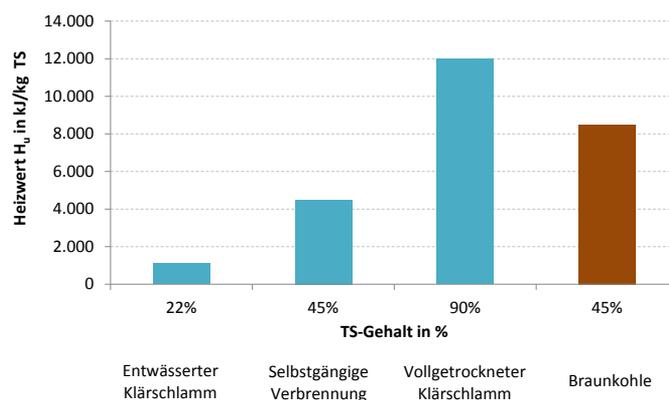


Bild 2.5: Heizwert von entwässertem und getrocknetem Klärschlamm und von Braunkohle

Dabei hängt der Heizwert auch vom Stabilisierungsgrad des Klärschlammes ab, da im Verlauf der Schlammstabilisierung, egal ob aerob oder anaerob, der organische Anteil (Glühverlust) im Klärschlamm reduziert wird. In Bild 2.6 ist der Heizwert von Klärschlamm in Abhängigkeit des TS-Gehaltes und des Stabilisierungsgrades dargestellt.

Für die selbstgängige (autotherme) Verbrennung von Klärschlamm ist ein Heizwert von ca. 4,5 MJ/kg OS notwendig. Dieser Heizwert ist mit herkömmlichen Mitteln zur Klärschlammmentwässerung nicht zu erreichen, so dass eine Klärschlamm-trocknung erforderlich ist.

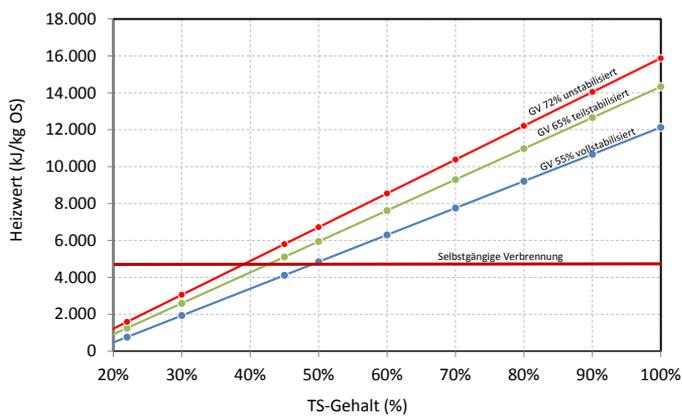


Bild 2.6: Heizwert von Klärschlamm in Abhängigkeit vom TS-Gehalt und vom Stabilisierungsgrad



Bild 2.7: Klärschlammverbrennung

3 Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern

3.1 Mengen und Qualität

3.1.1 Klärschlammengen

Der Klärschlammfall in Mecklenburg-Vorpommern ist seit 2007 relativ stabil und beträgt nach den Klärschlammberichten der Landkreise ca. 41.000 t TS/a. Das entspricht ungefähr 2 % der in Deutschland anfallenden Klärschlammmenge. Diese Klärschlammmenge wird von ca. 200 direktentsorgenden Kläranlagen deklariert. Dabei wurde etwas mehr als die Hälfte der gesamten Klärschlammmenge von nur 12 Kläranlagen abgegeben, die jeweils einen Klärschlammfall von mehr als 1.000 t TS/a haben. 43 städtische Kläranlagen hatten einen Klärschlammfall von 100 bis 1.000 t TS/a und erzeugten einen Anteil von 37 % am Gesamtklärschlammaufkommen. Demgegenüber stehen rund 150 kleinere Kläranlagen des ländlichen Raumes, die immerhin noch 11 % des Klärschlammaufkommens produzierten. Ca. 6 % der in Mecklenburg-Vorpommern deklarierten Klärschlammmenge stammt von reinen Industriekläranlagen. Das Bild 3.2 zeigt die örtliche Verteilung der Klärschlamm-mengen von direkt entsorgenden Kläranlagen. Die Kläranlage Bergen verfügt selbst nicht über eine Faulung. Hier wird der Klärschlamm jedoch in einer benachbarten Biogasanlage anaerob stabilisiert.

Klärschlammzwischenlager

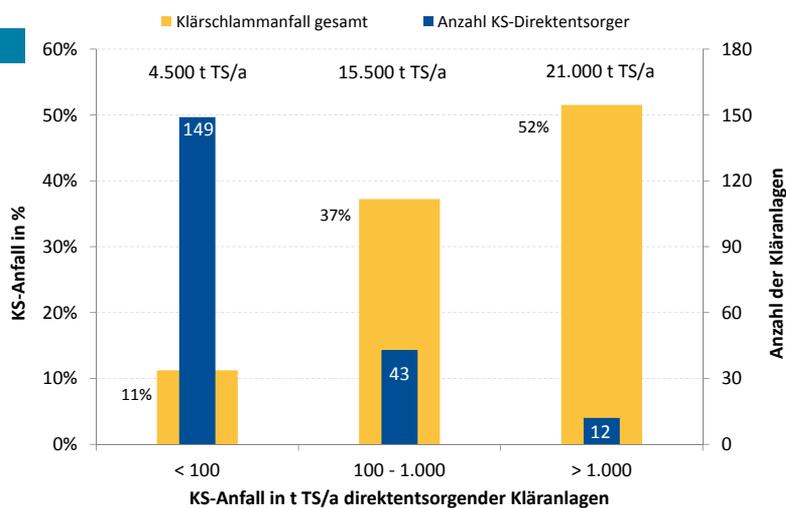


Bild 3.1: Struktur der Klärschlammproduktion in Mecklenburg-Vorpommern

3.1.2 Klärschlammqualität

Die Qualität der in Mecklenburg-Vorpommern produzierten Klärschlämme ist unter den gegenwärtig geltenden gesetzlichen Anforderungen (IST-Szenario) für eine landwirtschaftliche Verwertung gut geeignet. Belastbares Datenmaterial dafür liefert die LMS Agrarberatung GmbH (LMS) als zuständige Stelle zur Qualitätserfassung bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm. Nicht erfasst sind ca. 9.500 t TS/a

entsprechend 23 % der Klärschlämme, welche zwar in Mecklenburg-Vorpommern produziert, aber nicht in Mecklenburg-Vorpommern direkt landwirtschaftlich verwertet werden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass sich die Charakteristik dieser Klärschlämme nicht signifikant von den in Mecklenburg-Vorpommern verwerteten unterscheidet.

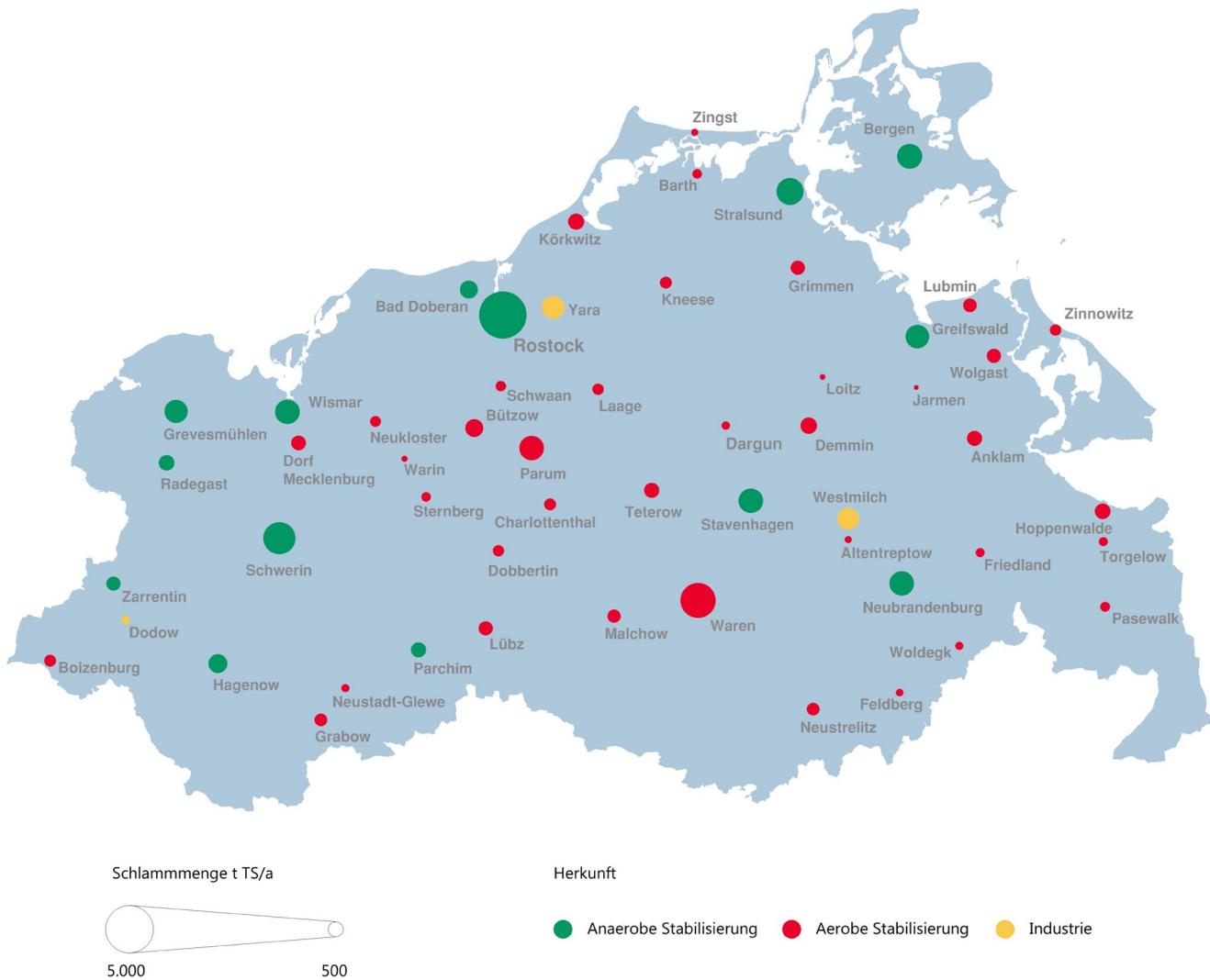


Bild 3.2: Räumliche Zuordnung der Klärschlammproduzenten >50 t TS/a

3.1.2.1 Trockensubstanzgehalt

Der Trockensubstanzgehalt ist einer der wichtigsten Parameter zur Beschreibung der physiologischen Eigenschaften von Klärschlamm. Mit diesem Parameter wird gleichzeitig der Anteil der Feststoffe, wie auch der Wassergehalt angegeben. Im Bild 3.3 sind typische TS-Gehalte für die einzelnen Verfahrensstufen der Schlammbehandlung dargestellt. Danach kommt es im Verlauf der Schlammbehandlung zu einer erheblichen Reduktion der Klärschlammmenge.

Eine hohe Eindickung ist wichtig, um kläranlageninterne Prozesse insbesondere bei der Schlammbehandlung und -entwässerung zu optimieren. Eine effiziente Klärschlamm-entwässerung, die zu einem hohen Feststoffgehalt im Austrag führt, erzeugt eine geringe zu entsorgende Klärschlammmenge und einen hohen Heizwert des Klärschlammes. In jedem Fall werden mit steigendem Eindick- und Entwässerungsgrad die zu transportierenden Klärschlammengen reduziert.

Nach Bild 3.4 wird der Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern zu 94 % entwässert entsorgt, wobei im Mittel ein relativ niedriger Entwässerungsgrad von 22,4 % TS (Median) erreicht wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Werte in dieser Abbildung bereits inklusive einer möglichen Kalkung des Klärschlammes zu verstehen sind. Die restlichen 6 % des Klärschlammes werden „nass“ mit einem TS-Gehalt von kleiner 6 % landwirtschaftlich verwertet. Der „Fehlerbereich“ zwischen 6 und etwa 16 % TS erklärt sich aus dem Wechsel von der reinen Eindickung zur maschinellen Entwässerung. Die Entwässerungsergebnisse für Klärschlämme in Mecklenburg-Vorpommern unterscheiden sich damit signifikant von jenen anderer Bundesländer, aus denen mittlere Werte von 25 % bis über 30 % TS im entwässerten Klärschlamm bekannt sind.

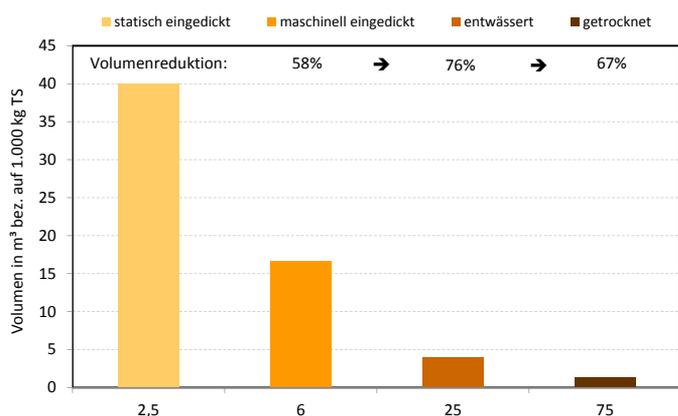


Bild 3.3: Volumenreduktion bei der Schlammbehandlung

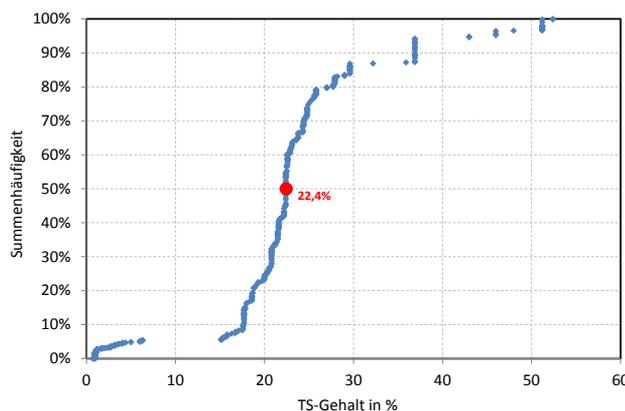


Bild 3.4: TS-Gehalt der landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme (LMS, 2011)

3.1.2.2 Schwermetalle

Innerhalb der Schadstoffgruppe der Schwermetalle gibt es Unterschiede in der Ausschöpfung der geltenden und zukünftigen Grenzwerte der AbklärV und der DüMV.

Das größte Problem stellt gegenwärtig **Kupfer** dar. Hier wird der Grenzwert im Mittel zu 62 % bei einer vergleichsweise geringen Varianz der Werte ausgeschöpft. Schon jetzt werden ca. 2 % der Klärschlämme aus Mecklenburg-Vorpommern thermisch entsorgt, da ihre Kupferkonzentration den Grenzwert überschreitet. Diese Klärschlämme werden jedoch nicht in den Daten der LMS geführt, da sie nicht landwirtschaftlich verwertet werden können.

Bei Inkrafttreten des vorliegenden Entwurfs zur Novellierung der AbklärV und dem Ablaufen der Übergangsfrist für strengere Grenzwerte für Schadstoffe der DüMV sinkt die Grenzwertausschöpfung für **Kupfer** leicht, jedoch räumt sowohl die AbklärV als auch die DüMV den Klärschlammproduzenten Möglichkeiten ein, kupferreiche Klärschlämme auf kupferarmen Böden landwirtschaftlich zu verwerten.

Die Grenzwertausschöpfung steigt besonders stark für **Cadmium** und **Quecksilber** an. Gerade diese beiden Schwermetalle weisen die größten Varianzen der Werte auf. Überträgt man die Konzentrationen von Cadmium und Quecksilber aus der Gegenwart in die Zukunft (2015), so könnten ca. 4 % der Klärschlämme aufgrund zu hoher Cd- und 22 % der Klärschlämme aufgrund zu hoher Hg-Konzentrationen nicht mehr landwirtschaftlich verwertet werden.

Die Konzentrationen von **Blei**, **Chrom**, **Nickel** und **Zink** sind vergleichsweise unauffällig und würden auch in einem Zukunftsszenario nicht zu einem Ausschluss der Klärschlämme aus der landwirtschaftlichen Verwertung führen.

Die Summenhäufigkeiten der Schwermetalle sind im Anhang 1 graphisch dargestellt.

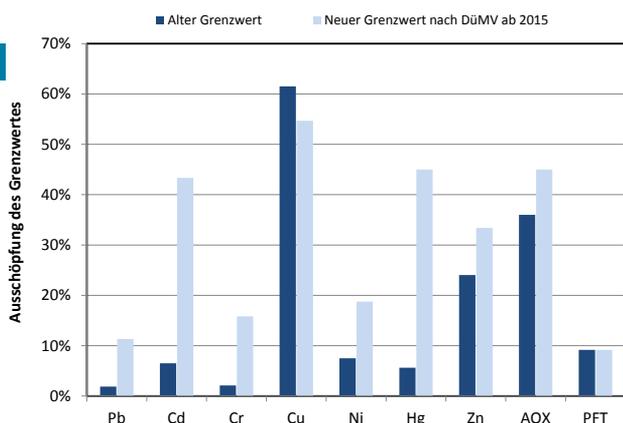


Bild 3.5: Ausschöpfung der alten und neuen Grenzwerte (LMS, 2011)

	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn
Mittelwert 2011	17	0,65	19	492	15	0,45	601
Varianz in %	72	109	60	56	40	96	44
Grenzwert alt	900	10,0	900	800	200	8,0	2.500
Grenzwert neu*	150	1,5	120	900	80	1,0	1.800

* ab 2015

Tabelle 3.1: Mittlere Schwermetallkonzentrationen des Klärschlammes in MV, geltende und zukünftige Grenzwerte in mg/kg TS

3.1.2.3 Organische Schadstoffe

Bei der Gruppe der organischen Schadstoffe weisen die PCB und PCDD/DF verhältnismäßig niedrige Konzentrationen auf. Lediglich der Parameter AOX ist sporadisch auffällig. Trotz einer mittleren Grenzwertausschöpfung von 45 % könnte im Falle des Zukunftsszenarios ca. 1 % des Klärschlammes nicht mehr landwirtschaftlich verwertet werden.

3.1.2.4 Seuchenhygienische Aspekte

Die seuchenhygienische Qualität von Klärschlamm wird in Deutschland über das Vorhandensein von Salmonellen definiert. Dabei dürfen in 50 g Probenmaterial keine Salmonellen gefunden werden.

Grundsätzlich ist Klärschlamm aus Mecklenburg-Vorpommern bei Umsetzung der Anwendungsvorgaben bei der landwirtschaftlichen Verwertung entsprechend § 5 Abs. 3. Nr. 1 a) der DüMV seuchenhygienisch unbedenklich. Entsprechend dieser Anwendungsvorgaben ist die Klärschlammaufbringung nur auf unbestelltem Acker und bei sofortiger Einarbeitung in den Boden zulässig.

3.1.2.5 Nährstoffe

Die Analysen zeigen, dass der organische Anteil im Klärschlamm mit 61 % relativ hoch ist. Ein Viertel der landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme hat einen organischen Anteil von mehr als 70 %. Diese Tatsache legt den Schluss nahe, dass aufgrund des großen Anteils der aerob stabilisierten Klärschlämme besonders im Winter nur eine Teilstabilisierung auf den Kläranlagen möglich ist.

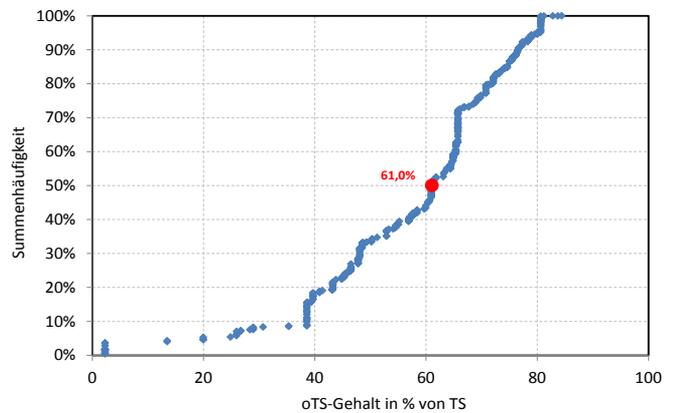


Bild 3.6: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für den Parameter organische Trockensubstanz

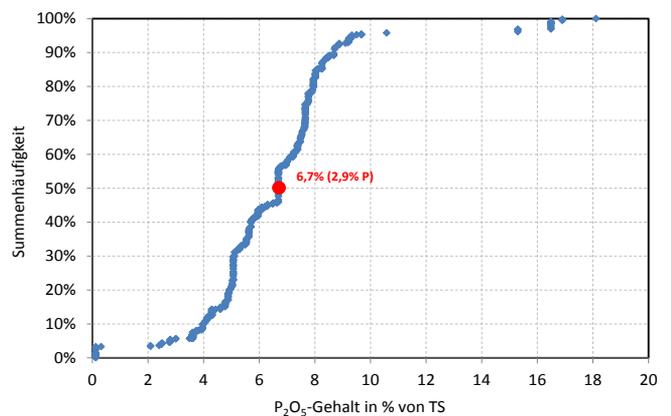


Bild 3.7: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für Phosphor als P₂O₅

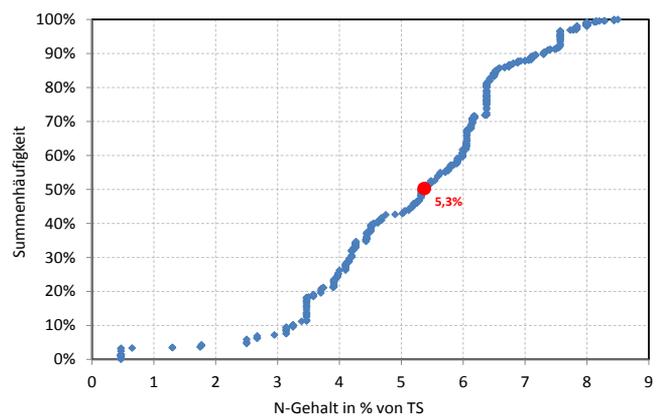


Bild 3.8: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für Stickstoff

Im Mittel weisen die Klärschlämme einen P_2O_5 -Gehalt von 6,7 % und einen N-Gehalt von 5,3 % auf. Kalium als K_2O und Magnesium als MgO haben einen Anteil von jeweils weniger als 1 % und basisch wirksame Substanzen (bwS) von 7 % an der Klärschlamm-trockenmasse. Bei einem Anteil von ca. 35 % der untersuchten Klärschlämme wurden mehr als 10 % bwS nachgewiesen. Höhere Anteile von bwS weisen darauf hin, dass der Klärschlamm mit Kalk versetzt wurde.

3.1.2.6 Bewertung

Resümierend kann festgestellt werden, dass unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Qualität der Klärschlämme, nach Ablauf der Übergangsfrist zur Einhaltung der geregelten Grenzwerte der DüMV für Klärschlämme, ab 2015 ca. 30 % des Klärschlammaufkommens in Mecklenburg-Vorpommern (entsprechend rd. 12.000 t TS/a) nicht mehr landwirtschaftlich verwertet werden kann.

Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass hiervon unabhängig besonders eine Reduktion der Gehalte von Cd, Hg, AOX und PFT im Rahmen der Eintragskontrolle über den Abwasserpfad in dem jeweiligen Einzugsgebiet der Kläranlagen ein Gebot der vorsorglichen Qualitätssicherung der Abwasseraufbereitung und Klärschlammverwertung ist.

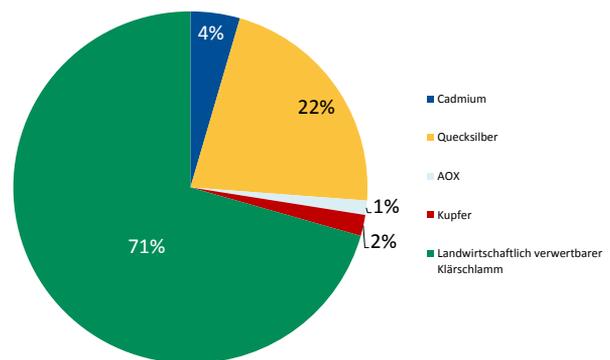


Bild 3.9: Anteile des Klärschlammaufkommens die zukünftig thermisch entsorgt werden müssen

3.2 Klärschlammbehandlung

3.2.1 Abwasserreinigung in Mecklenburg-Vorpommern

In Mecklenburg-Vorpommern werden gegenwärtig 580 Kläranlagen der Größenklassen 1 - 5 betrieben, in denen eine Belastung von 3,42 Mio. Einwohnerwerten behandelt wird. Bei einer Bevölkerungszahl von 1,6 Mio. Einwohnern und einem Anschlussgrad an die öffentlichen Abwasserentsorgungsanlagen von 86 % entsteht eine Struktur der Herkunft des Abwassers entsprechend Bild 3.10.

Von den 580 Kläranlagen sind ca. 200 Kläranlagen Klärschlammproduzenten im Sinne des Abfallrechtes. Sie deklarieren ihren Klärschlammanfall und die Entsorgung gegenüber den Landkreisen. Damit sind entsprechend der Abbildung 3.11 eine große Anzahl von kleineren Kläranlagen direkte Klärschlammproduzenten.

3.2.2 Stand der Klärschlammstabilisierung

Die Klärschlammstabilisierung greift wie kein anderer Prozess in die Verfahrensweise der Abwasserbehandlung und in den Betrieb der gesamten Kläranlage ein. Grundsätzlich ist die anaerobe Stabilisierung die nachhaltigere Lösung, da sie die Trockensubstanz des Klärschlammes ganzjährig betriebsstabil um ca. 30 % reduziert und mit der Nutzung des dabei freiwerdenden Energiepotenzials einen großen Teil des Energiebedarfs der Kläranlage decken kann.

Es ist daher grundsätzlich erstrebenswert, Klärschlamm anaerob zu stabilisieren. Da jedoch auf kleineren Kläranlagen aufgrund der hohen Investitionskosten die anaerobe Stabilisierung nicht wirtschaftlich zu betreiben ist, wird hier der Klärschlamm simultan zur Abwasserreinigung aerob stabilisiert. Nur auf sehr kleinen Kläranlagen existieren Vorklärungen als mechanische Vorreinigung anstatt eines Rechens und Sandfangs. Alle größeren aerob stabilisierenden Kläranlagen verfügen

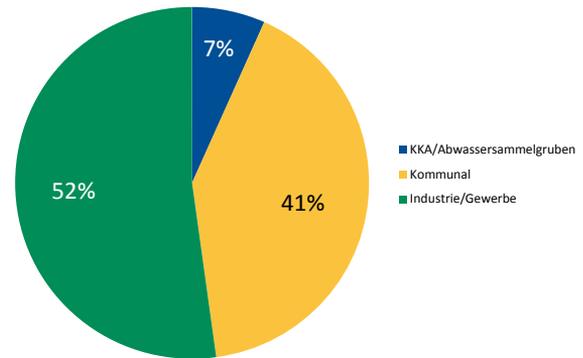


Bild 3.10: Struktur der Abwasserherkunft in Mecklenburg-Vorpommern

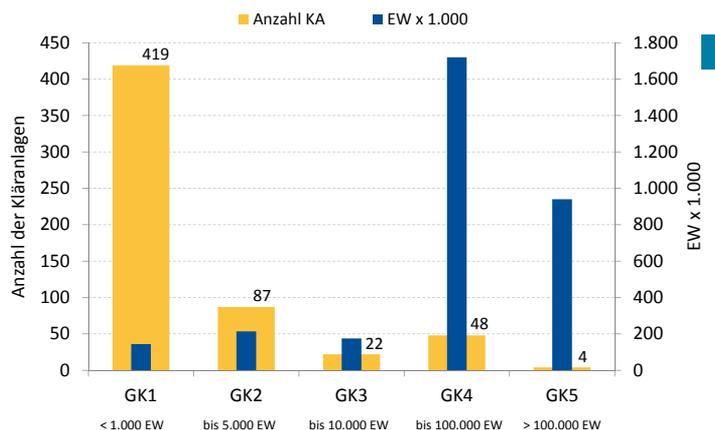


Bild 3.11: Struktur der Kläranlagen (LU 2009)

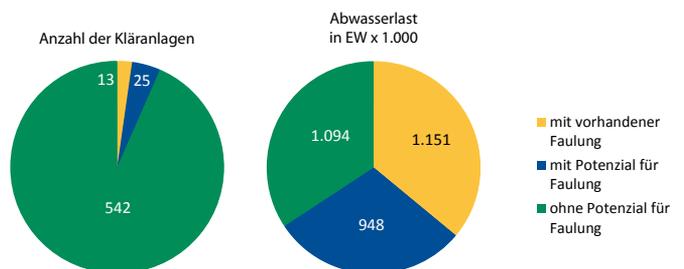


Bild 3.12: Struktur der Klärschlammstabilisierung in Mecklenburg-Vorpommern nach LU 2009

weder über eine Vorklärung noch eine Schlammfäulung. Kennzeichnendes Merkmal aerob stabilisierender Kläranlagen sind große Belebungsbecken und Klärschlämme mit einem Schlammalter von über 25 Tagen.

Insgesamt wird auf ca. 98 % aller Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern der Klärschlamm simultan aerob und lediglich auf den restlichen 2 % (entsprechend 13+1 Kläranlagen) anaerob stabilisiert.

Aus dem Bild 3.12 geht hervor, dass diese 14 Kläranlagen jedoch ca. 1/3 des gesamten Klärschlammaufkommens in Mecklenburg-Vorpommern stellen. Aufgrund der zentralen Stellung von großen Kläranlagen werden Klärschlämme von kleineren Kläranlagen eines Verbandsgebietes zudem vielfach in der zentralen Schlammfäulung mitbehandelt, so dass bereits heute schätzungsweise bis zu 40 % der Klärschlämme in Mecklenburg-Vorpommern anaerob stabilisiert werden. Unter der Annahme einer mittleren TS-Reduktion von 25 % während der aeroben und anaeroben Stabilisierung von Klärschlamm wird schätzungsweise eine Klärschlammmenge von insgesamt 13.000 t TS/a in den Kläranlagen abgebaut und belastet damit nicht mehr den weiteren Entsorgungsweg.

3.2.3 Verfahren der Schlammbehandlung nach Kläranlagengröße

Die Verfahrensweise der Klärschlammbehandlung richtet sich nach der Größe der Kläranlage und nach der Organisationsstruktur des entsorgungspflichtigen Unternehmens. Es wird hier unterschieden zwischen:

- Indirektentsorger, die ihren Klärschlamm nur vorbehandeln und dann über eine größere Kläranlage entsorgen und
- Direktentsorger, die ihren bzw. auch den Klärschlamm kleinerer Kläranlagen so aufbereiten, dass er einem der gesetzlich geregelten Entsorgungswege zugeführt werden kann.

3.2.3.1 A - Aerobe Stabilisierung

Für die überwiegende Anzahl der Kläranlagen, auf denen der Klärschlamm simultan aerob stabilisiert wird, werden im Folgenden 5 typische Varianten der Schlammbehandlung (A1 - A5) unterschieden. Die Einteilung erfolgt hierbei nach der Reinigungskapazität der Kläranlage. Die jeweils eingesetzten Verfahrensschritte geben die auf den Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern anzutreffenden Gegebenheiten wider.

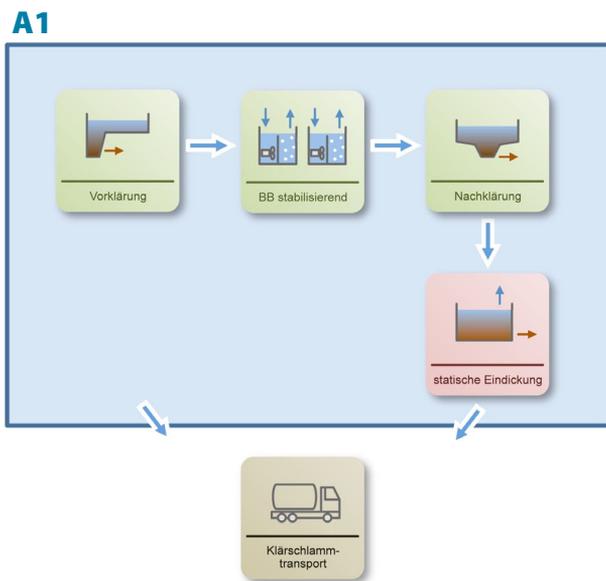


Bild 3.13: Aerob stabilisierende Kläranlage vom Typ A1

A1 - Kläranlagen kleiner 500 EW

Auf kleinen Kläranlagen wird die mechanische Vorreinigung häufig über eine Vorklärung realisiert. Der Primärschlamm wird im Eindicktrichter der Vorklärung gelagert und auf ca. 2,5 % TS eingedickt. Der Überschussschlamm der biologischen Stufe wird in einem statischen Eindicker gelagert und der TS-Gehalt ebenfalls auf ca. 2,5 % angehoben. A1-Kläranlagen sind in der Regel Indirektentsorger. Die weitere Behandlung erfolgt auf einer größeren Kläranlage (GK3 – GK5). Hier wird der Klärschlamm entweder noch anaerob endstabilisiert oder lediglich entwässert.

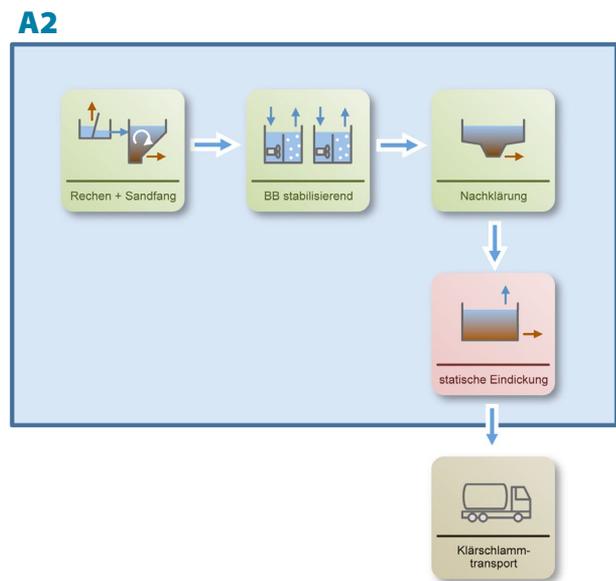


Bild 3.14: Aerob stabilisierende Kläranlage vom Typ A2

A2 – Kläranlagen 500 – 2.000 EW

Auf größeren Kläranlagen der GK1 und den Kläranlagen der GK2 wird bereits ein Rechen und Sandfang anstelle einer Vorklärung eingesetzt. Auch hier findet die weitere Schlammbehandlung analog zu A1 auf einer größeren Kläranlage statt. Allerdings wird der Klärschlamm von einigen gemeindlichen Kläranlagen, die nicht einem Zweckverband angehören, direkt „nass“ auf landwirtschaftlichen Nutzflächen verwertet.

A3

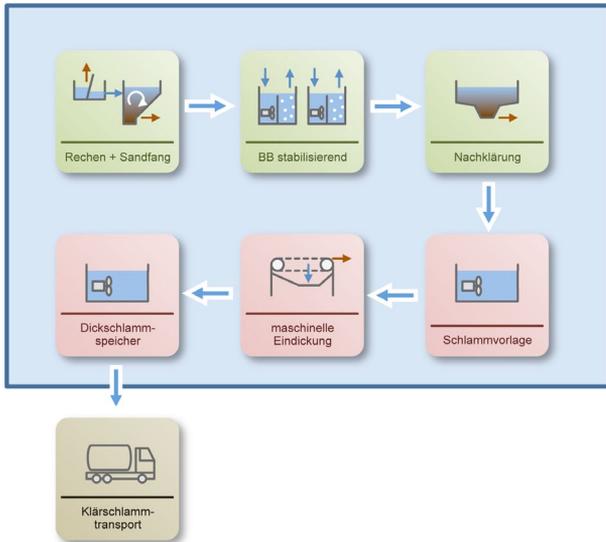


Bild 3.15: Aerob stabilisierende Kläranlage vom Typ A3

A4

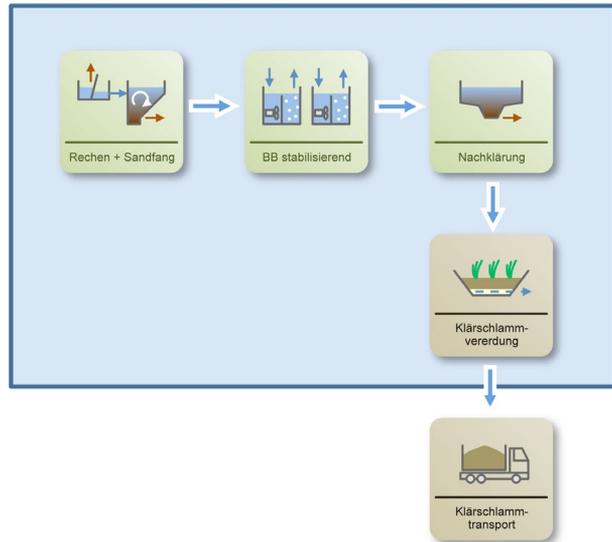


Bild 3.16: Aerob stabilisierende Kläranlage vom Typ A4

A3 – Kläranlagen von 2.000 – 20.000 EW

Kläranlagen mit einer Schlammbehandlung vom Typ A3 decken den gesamten Bereich der städtischen Kläranlagen ab, welche ihren Klärschlamm nicht selbst direkt entsorgen, sondern ihn, wie die vorgenannten Kläranlagen, im Verbund eines Zweckverbandes auf einer größeren Kläranlage entweder einer anaeroben Stabilisierung oder direkt einer Entwässerungsstufe zuführen.

A4 – Kläranlagen von 2.000 – 20.000 EW

A4-Kläranlagen verfügen über eine Klärschlammvererdung als einzige Schlammbehandlungsstufe. Alle anderen Schlammbehandlungsstufen können hier entfallen, da der Klärschlamm sowohl stabilisiert als auch entwässert (vererdet) wird. Diese Kläranlagen sind typische Direktentsorger.

A5

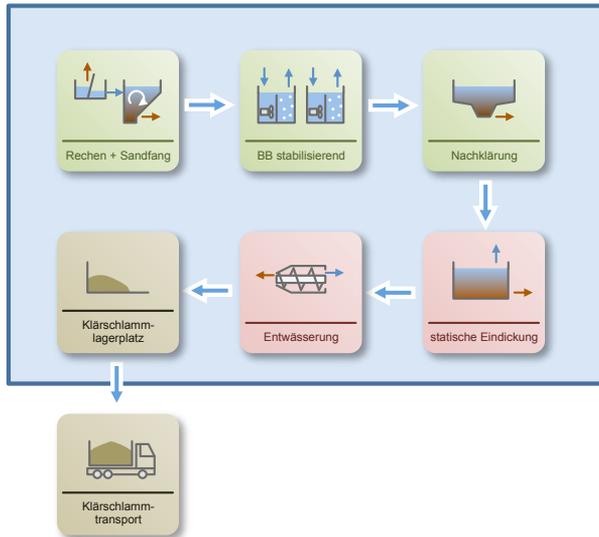


Bild 3.17: Aerob stabilisierende Kläranlage vom Typ A5

A5 – Kläranlagen von 10.000 – 50.000 EW

Kläranlagen der GK 4, die über eine Schlammentwässerung verfügen, werden den A5-Kläranlagen zugeordnet. Auch diese Kläranlagen sind Direktentsorger und führen den Klärschlamm direkt einem Entsorgungspfad zu.

AN

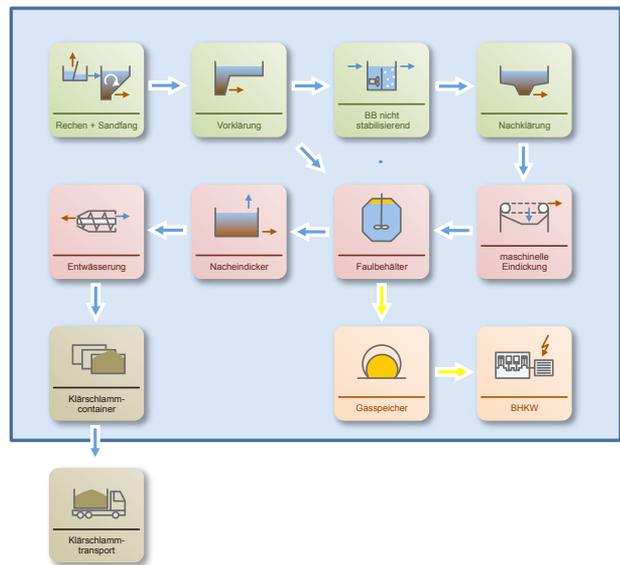


Bild 3.18: Kläranlage mit anaerober Stabilisierung (AN)

3.2.3.2 AN - Anaerobe Stabilisierung

Anaerob stabilisierende Kläranlagen mit einer Faulung sind in Mecklenburg-Vorpommern grundsätzlich Direktentsorger. Sie verfügen über eine Vorklärung und nur über relativ kleine Belebungsbecken. Der Klärschlamm wird maschinell eingedickt und in einem Faulbehälter anaerob stabilisiert. Das dabei anfallende Klärgas wird in einem BHKW in nutzbare elektrische und thermische Energie umgewandelt. Der Klärschlamm wird entwässert und verwertet.

3.2.3.3 Bestehende Verbundlösungen für die Klärschlammbehandlung

Verbund mit A1

Aus Bild 3.13 geht hervor, dass alle Kläranlagen mit einer Schlammbehandlung des Typs A1 ihren Klärschlamm an einen Direktentsorger abgeben. Als Direktentsorger kommen hauptsächlich Kläranlagen vom Typ A4, A5 oder AN in Frage. Der Klärschlamm wird dabei in der Regel als Mischung aus Primär- und Überschussschlamm transportiert und in den meisten Fällen in den Abwasserzulauf des Direktentsorgers gegeben.

Verbund mit A2 und A3

Besonders in den Strukturen eines Zweckverbandes wird Klärschlamm von Kläranlagen des Typs A2 und A3 auf den größeren Kläranlagen endbehandelt, die als Direktentsorger eingerichtet sind. Ein verbandsüberschreitender Verbund ist hier eher selten. Je nach Ausstattung der direktentsorgenden Kläranlage wird der Klärschlamm in diesem Verbund bereits zum größten Teil direkt der Faulung oder der Entwässerung zugeführt.

Verbund über hoheitliche Entsorgungsgrenzen hinaus

In Mecklenburg-Vorpommern existieren nur wenige Verbundlösungen über die Grenzen des Entsorgungsgebietes eines Zweckverbandes hinaus. Eine dieser Lösungen wurde um die zentrale Kläranlage der Stadt Parchim eingerichtet. Hier wird ca. 20 % des Rohschlammes aus den benachbarten Zweckverbänden Parchim – Lübz und Schweriner Umland angeliefert und anaerob stabilisiert.

3.2.3.4 Zusammenfassung der gegenwärtigen Situation

Die Verfahrensweise der Schlammbehandlung auf einer Kläranlage kann direkt aus der Größenklasse der betreffenden Kläranlage abgeleitet werden, wie es auch die o. g. Kategorisierung zeigt. Von der gesamten Klärschlammproduktion in Mecklenburg-Vorpommern werden den Entsorgern ca. 92 % als maschinell entwässerter Schlamm übergeben. Ungefähr 2 % des anfallenden Klärschlammes wird gegenwärtig vererdet und die restlichen 6 % werden „nass“ mit einem TS-Gehalt von 2 – 6 % auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen aufgebracht.

Nach der Tabelle 3.2 werden die Direktentsorger zwar von den Kategorien A4, A5 und AN dominiert, allerdings kommt in Mecklenburg-Vorpommern den Kläranlagen, die ihren Klärschlamm „nass“ entsorgen, eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung zu.

Aufgrund der Vielzahl an Indirektentsorgern, ist der Transport von Nassschlamm aus künftigen Entsorgungskonzepten nur schwer wegzudenken und wird auch weiterhin Bestandteil der Schlamm Entsorgung im ländlichen Bereich sein.

Tabelle 3.2: Struktur der Kläranlagen nach der Verfahrensweise der Schlammbehandlung

	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	AN
Stabilisierung	simultan aerob					anaerob
Merkmal	Vorklärung	Statische Eindickung	Maschinelle Eindickung	Vererdung	Entwässerung	Faulung
KS-Abgabe	Indirekt	Direkt/Indirekt	Indirekt	Direkt	Direkt	Direkt
Größe von		500 EW	2.000 EW	2.000 EW	10.000 EW	> 20.000 EW
Größe bis	< 500 EW	< 2.000 EW	< 20.000 EW	< 20.000 EW	< 50.000 EW	
Anzahl in MV	ca. 400	ca. 100	30	4	33	13+1

3.3 Klärschlamm Entsorgung in Mecklenburg-Vorpommern

3.3.1 Klärschlamm Mengen und Verwertung

In Mecklenburg-Vorpommern wird der anfallende Klärschlamm größtenteils landwirtschaftlich verwertet. Nachweislich betrifft dies 75 % (31.000 t TS/a) aller in Mecklenburg-Vorpommern produzierten Klärschlämme (LMS, 2011). Da ca. 2 % (800 – 1.000 t TS/a) der Klärschlämme thermisch entsorgt werden müssen, verbleiben 23 % (9.500 t TS/a), die entweder einer landbaulichen Nutzung zugeführt, landwirtschaftlich in benachbarten Bundesländern verwertet oder zunächst zwischengelagert werden.

Darüber hinaus wird in Mecklenburg-Vorpommern eine jährliche Klärschlammmenge von ca. 11.000 t TS aus anderen Bundesländern importiert und ausschließlich landwirtschaftlich verwertet. Der größte Teil dieser Klärschlämme kommt aus Schleswig-Holstein (insbesondere Lübeck), Niedersachsen und Brandenburg.

Insgesamt wird damit in Mecklenburg-Vorpommern eine Klärschlammmenge von ca. 42.000 t TS/a auf landwirtschaftliche Nutzflächen aufgebracht. Die Landesfläche von Mecklenburg-Vorpommern beträgt 2,3 Mio. ha.

Für die Aufbringung dieser Klärschlammmenge steht eine landwirtschaftliche Nutzfläche von ca. 800.000 ha zur Verfügung. Tatsächlich genutzt werden davon nur 17.000 ha/a. Mit Klärschlamm gedüngt wurden insgesamt jedoch ca. 40.000 ha in Mecklenburg-Vorpommern, da nicht in jedem Jahr die gleichen Flächen beschlammung werden dürfen (3-jähriger Aufbringungszyklus) und nicht jede Fläche den gleichen Düngbedarf hat.

Mit der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung werden folgende Nährstofffrachten auf die Böden in Mecklenburg-Vorpommern aufgetragen:

• Stickstoff (N):	2.200 t/a
• Phosphor (P ₂ O ₅):	2.800 t/a
• Kalium (K ₂ O):	160 t/a
• Magnesium (MgO):	340 t/a
• Basisch wirksame Substanzen (bwS):	2.900 t/a
• Organische Substanz (OS):	26.000 t/a

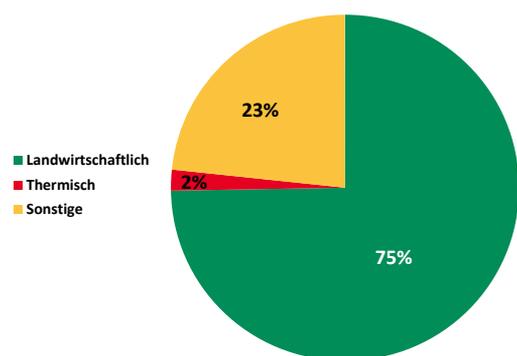


Bild 3.19: Gegenwärtige Klärschlammverwertung in Mecklenburg-Vorpommern



Bild 3.20: Flächennutzung für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung

3.3.2 Nutzung des Phosphorpotenzials aus Klärschlamm

Der Gesamteinsatz an Dünger auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen in Mecklenburg-Vorpommern errechnet sich über die Anbaustruktur und mittlere Düngergaben (LMS, 2009 a/b) zu rund 70.000 t P_2O_5/a , 240.000 t N/a und 150.000 t K_2O/a . Nach Angabe des Statistischen Bundesamtes wurden in Mecklenburg-Vorpommern im Wirtschaftsjahr 2010/2011 rund 34.000 t P_2O_5 , 186.000 t N und 46.000 t K_2O an Mineraldünger eingesetzt. Auf die im selben Zeitraum in der Landwirtschaft ausgebrachte Menge an Klärschlämmen entfielen demgegenüber rund 2.800 t P_2O_5/a , 2.200 t N/a und 160 t K_2O/a (LMS, 2011).

Klärschlamm stellt in der Gesamtbilanz des Landes demnach nur ca. 8 % des Mineraldüngereinsatzes an P_2O_5 sowie 1 % bzw. 0,3 % für die Düngestoffe N und K_2O . Im Vergleich zu dem Phosphorpotenzial aus Klärschlamm anderer Bundesländer mit großen urbanen Strukturen ist dieses für das Flächenland Mecklenburg-Vorpommern insgesamt eher gering. Die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung erfolgt allerdings nur auf rund 17.000 ha/a entsprechend etwa 2,1 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche, so dass ortsbezogen durchaus eine hohe Düngersubstitution gegeben ist. Das Kostenäquivalent des genutzten Klärschlammes mit Bezug auf die Nährstoffe Phosphor, Stickstoff und Kalium errechnet sich auf Basis üblicher Marktpreise (IVA, 2011) zu insgesamt rund 5 Mio. EUR/a bzw. 125 EUR/t TS.

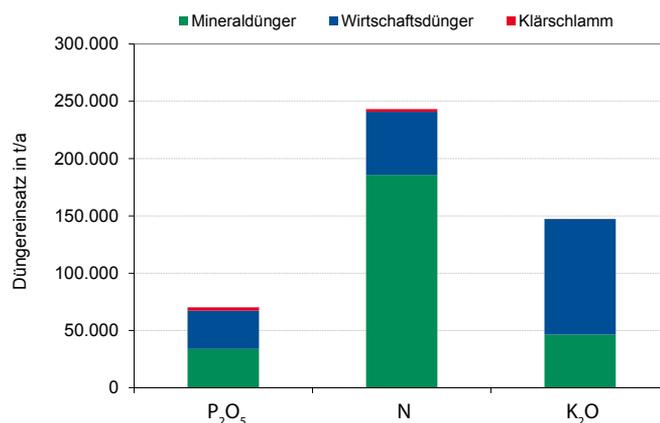


Bild 3.21: Düngemitelesatz in 2010/2011 in Mecklenburg-Vorpommern

4 Triebkräfte zukünftiger Klärschlammbehandlung und -entsorgung

4.1 Rechtlicher Rahmen

Für die landbauliche Verwertung wie auch die thermische Entsorgung kommunaler Klärschlämme besteht ein Rechtsrahmen mit einer Vielzahl von Richtlinien, Gesetzen und Verordnungen sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene. Von besonderer Bedeutung für die landwirtschaftliche Verwertung sind in diesem Zusammenhang das bereits novellierte Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), die ebenfalls novellierte Düngemittelverordnung und die noch zur Novellierung anstehende Klärschlammverordnung.

4.1.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz ist die rechtliche Grundlage für die Entsorgung von Abfällen und wurde jüngst novelliert. Das KrWG datiert vom 24. Februar 2012, ist am 29. Februar 2012 im Bundesgesetzblatt verkündet worden und am 1. Juni 2012 in Kraft getreten. Gemäß der Abfallrahmenrichtlinie der EU wurde eine fünfstufige Abfallhierarchie im Kreislaufwirtschaftsgesetz verankert.

Der Vermeidung von Abfall ist entsprechend dieser Prioritätenfolge der Vorrang vor allen anderen Maßnahmen zu geben, die Beseitigung steht an letzter Stelle, sollte also das letzte Mittel sein.

Es sind jeweils diejenigen Optionen zu fördern, die insgesamt das beste Ergebnis unter dem Aspekt des Umweltschutzes erbringen. Insbesondere bei stärker schadstoffbelasteten Stoffströmen kann demnach eine Abweichung von der Hierarchie erforderlich sein.

Deutscher Bundestag



Wird Klärschlamm bodenbezogen stofflich verwertet, ist gemäß § 11 KrWG die Bundesregierung ermächtigt, zur Sicherung der ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung nähere Bestimmungen zu regeln. Diese näheren Bestimmungen werden in der novellierten Klärschlammverordnung erfolgen.

Für die thermische Entsorgung von Klärschlamm ist die Einhaltung der Regelungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) in § 13 Kreislaufwirtschaftsgesetz vorgegeben.

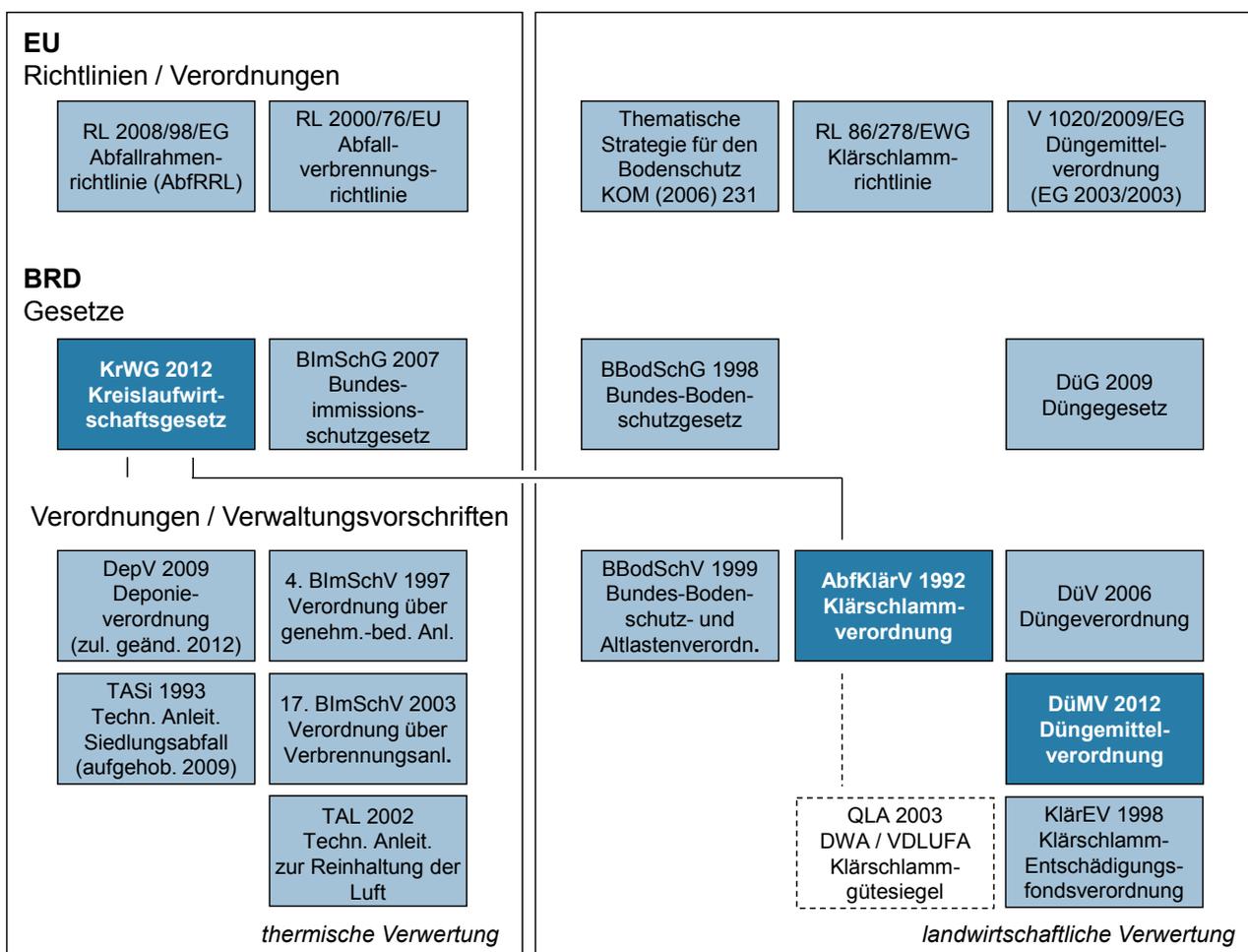


Bild 4.1: Überblick über den Rechtsrahmen zur Klärschlamm Entsorgung

4.1.2 Klärschlammverordnung

Die stoffliche Verwertung der Klärschlämme auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Böden regelt die Klärschlammverordnung. Es ist zu beachten, dass neben dieser abfallrechtlichen Verordnung gleichrangig das Düngerecht einzuhalten ist.

Die AbfKlärV enthält vorrangig die schadstoffbezogenen Vorgaben für die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm, während das Düngerecht die nährstoffbezogenen Aspekte thematisiert. Die derzeit bestehenden Doppelregelungen im Abfall- und Düngerecht für Klärschlamm, der bodenbezogen verwertet werden soll, erschweren die Anwendung der Rechtsvorschriften. Zukünftig ist gemäß § 11 Abs. 2 Satz 3 Kreislaufwirtschaftsgesetz daher eine Doppelregelung nicht mehr zulässig. Im Abfallrecht darf zukünftig hinsichtlich der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlämmen nur noch geregelt werden, was im Düngerecht nicht bereits geregelt ist.

Im Detail enthält die Klärschlammverordnung folgende Regelungen (vgl. Witte et al., 2000a):

- Konzentrationsbegrenzungen von Schwermetallen und anthropogenen organischen Verbindungen
- Festlegung von Schwellenwerten der Bodenbelastung
- Frachtbegrenzung möglicher Schadstoffkomponenten
- Nährstoffbegrenzung
- Begrenzung der Aufbringungsmenge
- Minimierungsgebot für Schadstoffe
- Ausschluss von Flächen mit Gefährdungsrisiko
- Kontrolle und Dokumentation sowie
- Einhaltung der Düngerverordnung

Der Klärschlammverordnung unterliegen einerseits die Betreiber von Abwasserbehandlungsanlagen, die Klärschlamm für die bodenbezogene Verwertung abgeben oder abgeben wollen und andererseits diejenigen, die

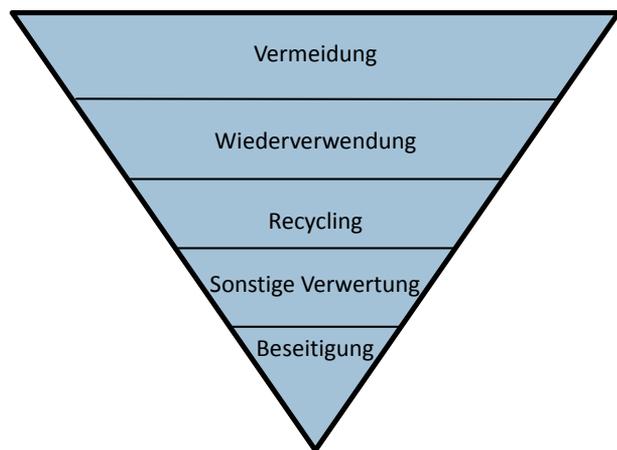


Bild 4.2: Abfallhierarchie nach § 6 KrWG

Klärschlamm auf landwirtschaftlichen oder gärtnerisch genutzten Flächen aufbringen wollen.

Für die geplante Novelle der Klärschlammverordnung ist seit 2010 ein Entwurf des Gesetzgebers in der Diskussion, der neben der Verschärfung der Grenzwerte Regelungen zur Qualitätssicherung und Anforderungen zur seuchenhygienischen Unbedenklichkeit beinhaltet.

4.1.3 Bodenschutzrecht

Wird eine bodenbezogene Verwertung auf Flächen außerhalb des Geltungsbereichs der AbfKlärV angestrebt, werden im Hinblick auf einen vorsorgenden Bodenschutz durch das Bundes-Bodenschutz-Gesetz (BBodSchG) und die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) Anforderungen an Auf- und Einbringung festgelegt.

Für die Verwertung von Klärschlamm auf Flächen außerhalb des Geltungsbereichs der AbfKlärV ist § 12 BBodSchV anzuwenden. Dieser regelt u.a., dass zur Herstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht nur Gemische von

Bodenmaterial und Klärschlämmen verwendet werden dürfen, welche die stofflichen Qualitätsanforderungen der Klärschlammverordnung erfüllen (§ 12 Absatz 1 BBodSchV). Für das Auf- und Einbringen gelten die Vorsorgeanforderungen des § 7 Absatz 2 BBodSchG sowie des § 9 BBodSchV in Verbindung mit § 12 Absatz 2 BBodSchV unmittelbar. Darüber hinaus ist die Nährstoffzufuhr der Folgevegetation anzupassen (§ 12 Absatz 7 BBodSchV).

4.1.4 Düngerecht

Maßgebliche Anforderungen des Düngerechts sind im Düngegesetz (DüG), der Düngeverordnung (DüV) und der Düngemittelverordnung (DüMV) enthalten.

Im *Düngegesetz* schreibt der § 11 speziell für die Verwertung von Klärschlamm vor, dass ein Klärschlamm-Entschädigungsfond einzurichten ist, aus dem die durch landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen entstehenden Personen- und Sachschäden einschließlich ihrer Folgeschäden zu ersetzen sind. Diese Anforderung wurde mit der Klärschlamm-Entschädigungsfonds-Verordnung (KlärEV), die 1999 in Kraft trat, umgesetzt. Die Beiträge dieses Fonds werden durch alle Hersteller von Klärschlamm geleistet, soweit dieser Klärschlamm zur landwirtschaftlichen Verwertung abgegeben wird. Die Beitragshöhe liegt derzeit bei etwas mehr als 10 EUR pro Tonne Trockenmasse. Verwaltet wird der Fonds durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Seit 2007 ist dieser Fonds jedoch gefüllt (73 Mio. EUR), so dass seitdem nur noch eine Meldung der Klärschlamm-mengen, jedoch keine Einzahlung mehr erfolgt.

Die *Düngeverordnung* konkretisiert die Anforderungen an die gute fachliche Praxis bei der Anwendung von Düngemitteln und das Vermindern von stofflichen Risiken durch

deren Anwendung auf landwirtschaftlichen Flächen.

Mit der Düngeverordnung wurde die Nitratrichtlinie der EU in nationales Recht umgesetzt. Dadurch wird die Nährstoffzufuhr insbesondere in Bezug auf Stickstoff und Phosphor begrenzt. Für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung ist die Folge daraus, dass die Sperrfrist (1. November bis 31. Januar) für die Klärschlämme gilt, die einen wesentlichen Gehalt an verfügbarem Stickstoff aufweisen.

Die *Düngemittelverordnung* regelt speziell die Zulassung von Düngemitteln nach dem Düngegesetz. Sie regelt das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Nach der Düngemittelverordnung ist Klärschlamm als organisches oder organisch-mineralisches Düngemittel eingestuft und als NP-Dünger oder NPK-Dünger zugelassen (Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K)).

Klärschlamm darf gemäß Düngemittelverordnung ab 1. Januar 2015 nur noch in Verkehr gebracht werden, wenn die Grenzwerte nach Anlage 2 Tabelle 1.4 der DüMV nicht überschritten werden. Die geltenden Grenzwerte der Klärschlammverordnung für dieselben Schadstoffe sind ab diesem Zeitpunkt nicht mehr maßgebend.

Auch der Einsatz von synthetischen Polymeren ist in der DüMV geregelt. Mit der letzten Novelle der DüMV wurde die Frist für den Einsatz von herkömmlichen Polymeren vom 31.12.2013 nun bis zum 31.12.2016 verlängert. Diese Fristverlängerung dient zur Entwicklung und Umstellung auf alternative Produkte. Ab 2017 dürfen dann nur noch Polymere eingesetzt werden, die eine Mindestabbaurate von 20 % in 2 Jahren einhalten. Die Klärschlammabgabe darf darüber hinaus nur zur direkten Verwertung in unvermischtem Zustand erfolgen.

4.1.5 Bundes-Immissionsschutzrecht

Anlagen, in denen Klärschlamm verbrannt oder mit verbrannt wird, sind gemäß § 4 Bundes-Immissionsschutzgesetz genehmigungsbedürftig. Diese Verbrennungsanlagen unterliegen dem Anwendungsbereich der 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (17. BImSchV), mit der die Errichtung, die Beschaffenheit und der Betrieb von Verbrennungsanlagen geregelt wird, in denen Abfälle eingesetzt werden. Es werden in dieser Verordnung u.a. Grenzwerte für die Emissionen von Gesamtstaub, Schwefeldioxyde, Stickoxide, Quecksilber, Kohlenmonoxid und Schwermetalle festgelegt.

4.1.6 Triebkräfte aufgrund von Gesetzesinitiativen

Verschärfung von Grenzwerten für Schadstoffe

Die Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes mit der weiterhin anstehenden Novellierung der Klärschlammverordnung wird sich wesentlich auf die zukünftige Klärschlammverwertung auswirken. Inwieweit die derzeit diskutierten Grenzwerte in der novellierten AbfKlärV übernommen werden, ist offen. Besondere Anforderungen ergeben sich aus den deutlich reduzierten Grenzwerten für die Schwermetalle Cadmium und Quecksilber. Die strengeren Grenzwerte der DüMV sind nach einer Über-

Element	Symbol	AbfKlärV	AbfKlärV	DüMV	DüMV	Grenzwert
		1992	geplant	2008	2012*	
Arsen	As	-	-	40	40	40
Blei	Pb	900	150	150	150	150
Cadmium	Cd	10,0	3	1,5	1,5	1,5
Chrom	Cr	900	120	-	-	120
Chrom (VI)	Cr(VI)	-	-	2	2	2
Kupfer	Cu	800	850	700	900	800
Nickel	Ni	200	100	80	80	80
Quecksilber	Hg	8	2	1	1	1
Thallium	Tl	-	-	1	1	1
Zink	Zn	2.500	1.800	5.000	5.000	2.500

* Grenzwerte ab 01.01.2015 einzuhalten

Tabelle 4.1: Grenzwerte für anorganische Schadstoffe mg/kg TS

Symbol	Einheit	AbfKlärV	AbfKlärV	DüMV	DüMV	Grenzwert
		1992	geplant	2008	2012	
B(a)P	mg/kg TM	-	1	-	-	1
AOX	mg/kg TM	500	400	-	-	500
PCB	mg/kg TM	0,2	0,1	-	-	0,2
I-TE Dioxine und dl-PCB	ng /kg TM	-	-	-	30	30
PCDD/PCDF	ng TEQ/kg TM	100	30	-	-	100
Synthetische Polymere		-	-	bis 2013	ab 2017	ab 2017
PFT	mg/kg TM	-	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabelle 4.2: Grenzwerte für organische Schadstoffe

gangsfrist ab dem Jahr 2015 auch für Klärschlämme einzuhalten. Klärschlämme, die die Anforderungen nicht erfüllen, sind danach von einer landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung ausgeschlossen.

Seuchenhygienische Regelungen

Neben den Schadstoff-Grenzwerten sind weiterhin auch die seuchenhygienischen Anforderungen an landwirtschaftlich verwertete Klärschlämme nach der geltenden DüMV zu beachten. Auch der Entwurf zur geplanten Novelle der AbfKlärV beinhaltet Vorgaben zur Hygienisierung von Klärschlamm.

Mit letzterer wird im § 5 die grundsätzliche Forderung nach einer hygienisierenden Behandlung bzw. nach einer salmonellenfreien Probe (50 g Nasssubstanz) gestellt. In der Anlage 2 des Entwurfs zur Novelle AbfKlärV sind die als hygienisierende Behandlung geltenden Maßnahmen zusammengestellt:

- Schlammpasteurisierung
- Thermische Konditionierung
- Aerob-thermophile Schlammstabilisierung
- Schlammkompostierung in Mieten
- Kompostierung von Klärschlamm in Reaktoren
- Zugabe von ungelöschtem Branntkalk
- Zugabe von Kalkhydrat im Zuge der Schlammbehandlung
- Klärschlammbehandlung in Pflanzenbeeten
- Hochtemperaturtrocknung

Nach § 6 Absatz 4 können jedoch die zuständigen Behörden das Gebot der Hygienisierung für den Klärschlamm der Kläranlagen der Größenklasse 1 nach einer Erstuntersuchung entfallen lassen.

Phosphorrückgewinnungsgebot

Das Bundesumweltministerium (Bergs, 2012) plant eine neue Verordnung zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammaschen (Phosphatgewinnungsverordnung, AbfPhosV). Sollte es dazu kommen, so müssen Technologien zur Phosphatrückgewinnung zur Verfügung stehen. Sind diese aber noch nicht ausgereift oder wirtschaftlich einsetzbar, käme ausschließlich eine Langzeitlagerung von Klärschlammaschen in Frage. Mit Sicherheit würde diese neue Regelung jedoch die Mitverbrennung von Klärschlamm stark einschränken oder gar unmöglich machen, da eine Vermischung der phosphorreichen Klärschlammaschen mit anderen phosphorarmen Aschen eine Phosphorrückgewinnung weitgehend ausschließt. Ein Verbot der Mitverbrennung bedeutet, dass neue Kapazitäten für die Mono-Klärschlammverbrennung geschaffen werden müssen. Dazu ist mit einer Übergangsfrist von mehr als 10 Jahren zu rechnen.

Qualitätssicherung

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz enthält in § 11 Ermächtigungsgrundlagen zum Erlass von Anforderungen an die Bewirtschaftung von Klärschlämmen sowie in § 12 Vorgaben zur Qualitätssicherung. Die Qualitätssicherung soll die Akzeptanz der Klärschlammverwertung erhöhen. Durch Maßnahmen an allen Prozessschritten der Klärschlammbehandlung und -verwertung soll eine hohe und gleichbleibende Klärschlammqualität sichergestellt werden. In dem System Qualitätssicherung Landbauliche Abfallverwertung (QLA) der VDLUFA / DWA wird der Prozess der Klärschlammverwertung vom Entstehungsort über die Behandlung bis zur Verwertung in den drei Kategorien Ausgangsstoffe, Endprodukte und Anwendungskonzeption überprüft.

Der Abwasserentsorger wird als Qualitätszeichennehmer zertifiziert (Langenohl, 2007; Heck et al., 2012). Beispielfähig sei hier die Schweriner Abwasserentsorgung zu nennen, die den Klärschlamm der Kläranlage Schwerin den Regularien der Qualitätssicherung unterzieht.

4.2 Klima- und Ressourcenschutz

Energieeffizienz

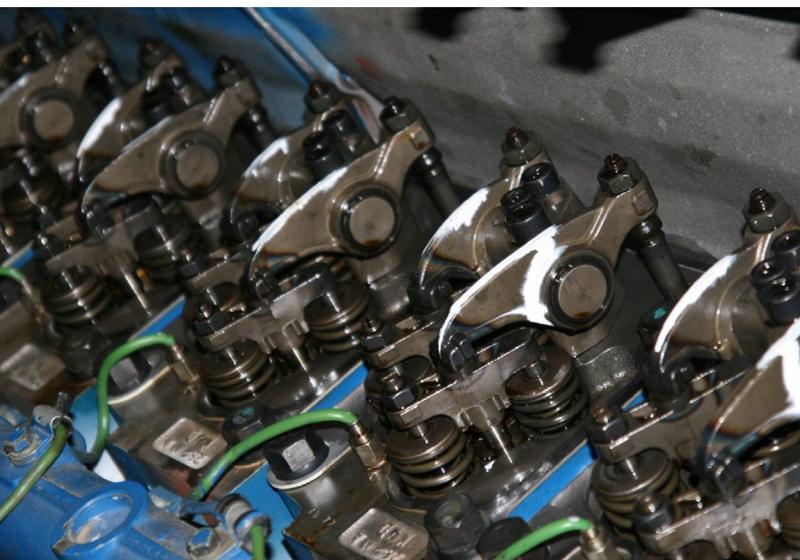
Die biologische Abwasserreinigung erfolgt unter Energiezufuhr über aerobe Prozesse durch eine Oxidation der im Abwasser enthaltenen Kohlenstoff- und Stickstofffrachten. Ein Teil der hierbei eingesetzten Energie wird mit dem gebildeten Überschussschlamm aus dem System Kläranlage entnommen. Zusammen mit dem Primärschlamm der Vorklärung erzeugt die Kläranlage einen natürlichen Energieträger, der vor einer landbaulichen Verwertung stabilisiert, d. h. in seinem

organischen Gehalt reduziert werden muss. Durch die Verlagerung der Stabilisierung in einen separat anaerob betriebenen Faulreaktor kann ein Teil der im Rohschlamm enthaltenen Energie in speicherfähiges und für die Energieerzeugung nutzbares Klärgas überführt werden. Steigende Energiebezugpreise und die Anforderungen des Klimaschutzes geben einer Ausstattung der kommunalen Kläranlage mit einer auf Klärgas basierten Energieeigenerzeugung besonderes Gewicht. Neben einem Aufbau eigener Faulungskapazitäten auf mittelgroßen Kläranlagen bietet sich für kleinere Kläranlagen ein Aufbau von Faulungsanlagen in Verbundlösungen an.

Sekundärrohstoff Phosphor

Von den im Klärschlamm enthaltenen Nährstoffen ist der Phosphor aus betriebswirtschaftlichen Gründen wie auch aus Sicht des Ressourcenschutzes von herausragender Bedeutung. Das Thema der Ressourceneffizienz mit einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs insgesamt und einer nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen wird für Deutschland mit dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) (BMU, 2012) aufgegriffen. Das Programm ProgRess zielt neben einer Weiterentwicklung und großtechnischen Nutzung der verfügbaren Technologien zur Phosphorrückgewinnung auch auf die Nutzung und den weiteren Ausbau einer landbaulichen Verwertung unbedenklicher Klärschlämme (Bergs, 2012). Mögliche rechtliche Forderungen nach einem weitergehenden Phosphorrecycling im Rahmen einer thermischen Klärschlammbehandlung können sich aus der Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ergeben (u.a. Neulen und Christian-Bickelhaupt, 2012).

Bild 4.3: Erzeugung elektrischer Energie mit Gasmotoren



4.3 Entsorgungssicherheit

Anthropogene Spurenstoffe

In den letzten Jahren sind die Auswirkungen anthropogener Spurenstoffe auf die aquatische Umwelt in den Fokus der öffentlichen Diskussion gerückt. Durch die Weiterentwicklung in der Analysetechnik können im Abwasser und auch im Klärschlamm Substanzen in niedrigster Konzentration nachgewiesen werden, deren Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit häufig noch nicht bekannt sind. Neben Industriechemikalien (z. B. Weichmachern, Flammschutzmitteln, Bioziden aus Fassadenanstrichen) zählen dazu insbesondere Medikamentenwirkstoffe (z. B. Diclofenac und Carbamazepin) und hormonell wirksame Substanzen (z. B. 17 α -Ethinylestradiol und Bisphenol-A). Insgesamt wurde ein starker Anstieg im Arzneimittelverbrauch beobachtet und in Verbindung mit dem Anstieg von endokrinen Substanzen im Ablauf von Kläranlagen und im Klärschlamm gebracht.

Bislang konzentriert sich die öffentliche Diskussion vor allem auf den Eintrag der Spurenstoffe über die Kläranlagenabläufe, in geringerem Umfang auch über die Mischwasserentlastung. Für Klärschlamm beschränkt sich die Diskussion derzeit weitgehend auf die bereits in der Klärschlammverordnung geregelten Substanzen (vgl. Tabelle 4.2).

Analog zum Anstieg der Vielfalt von Schadstoffen steigt ebenso das Bedürfnis nach Sicherheit und Schutz vor diesen Schadstoffen. Diese Entwicklung zeichnet langfristig eine abnehmende Akzeptanz der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung vor.

Forderungen der Lebensmittelindustrie

Im Hinblick auf eine Einbindung der vorgenannten Mikroschadstoffe aus der Abwasserphase in den Klärschlamm und deren spätere Freisetzung bei einer landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung besteht

weiterer Forschungsbedarf. Der mögliche Eintrag von organischen Schadstoffen und Mikroschadstoffen in die Nahrungskette wirkt sich jedoch auf die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung aus und könnte diese zukünftig weiter einschränken. Aufgrund der nicht bewertbaren Folgen für die Produktion pflanzlicher wie auch tierischer Nahrungsmittelerzeugnisse sind so bereits heute einzelne Nutzflächen durch Vorgaben der Lebensmittelindustrie von einer Klärschlammausbringung ausgeschlossen.

Verbraucherschutz

Eine große, wenn auch schwer zu bewertende Rolle spielt die öffentliche Meinung mit Bezug auf die Lebensmittelproduktion in Verbindung mit der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung. Die vermeindliche Unwissenheit bezüglich der Inhaltsstoffe im Klärschlamm und in Verbindung damit der Fortschritt in der Analysetechnik führt zu einer Verunsicherung hinsichtlich der Zukunftsfähigkeit der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung.



Bild 4.4: Anstieg des Arzneimittelverbrauchs von 2004 bis 2012 um 45 % nach WidO (2013)

5 Zukünftige Klärschlammbehandlung

5.1 Möglichkeiten

Als zukunftsfähig werden Strategien und Technologien im Bereich der Klärschlammbehandlung bezeichnet, welche die Entsorgungssicherheit erhalten, dem Gebot der Nachhaltigkeit entsprechen und die Wirtschaftlichkeit steigern.

Unter den einzelnen Verfahrensstufen hat dabei die Stabilisierung des Klärschlammes den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und die Nachhaltigkeit der Schlammbehandlung. Die Verfahrensweise und der Wirkungsgrad der Schlammstabilisierung entscheiden im besonderen Maße über die Energieeffizienz und den Klärschlammanteil einer Kläranlage.

Aufgrund der vielen kleinen und wenigen großen Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern besteht eine Vielzahl von möglichen Synergien in der Klärschlammbehandlung über den Einzugsbereich einer Kläranlage und einer Organisationsstruktur hinaus. Das Potenzial dieser Synergien kann durch optimierte Verbundlösungen gesteigert werden, die den o.g. Ansprüchen genügen.

Darüber hinaus stehen Technologien und Verfahrensweisen bereit, die nicht nur die Energieeffizienz des Kläranlagenbetriebes steigern, sondern auch das Aufkommen und den Transport von Klärschlamm minimieren, sowie durch Hygienisierung und Trocknung die Entsorgungssicherheit bei anstehenden Gesetzesänderungen erhalten. Im Folgenden wird auf diese Strategien und Technologien näher eingegangen.

Innenansicht eines Faulbehälters



5.1.1 Integration einer Schlammfäulung

5.1.1.1 Verfahrenskonzept

Die anaerobe Stabilisierung ist, im Gegensatz zur aeroben Stabilisierung, grundsätzlich dazu geeignet, das Energiepotenzial im Abwasser für die Abwasserbehandlung nutzbar zu machen. Gleichzeitig wird der Energieverbrauch und sogar die Schlammproduktion der Kläranlage reduziert. Je nach Größenklasse der Kläranlage bzw. je nach Klärschlammmenge kann so ein wirtschaftlicher Vorteil erzeugt werden. Um tatsächlich einen gesamtwirtschaftlichen Nutzen zu generieren, muss dieser wirtschaftliche Vorteil größer sein als die Kosten, die durch die Umstellung auf die anaerobe Stabilisierung verursacht werden. Vor diesem Hintergrund muss das Konzept, welches einer derartigen Umstellung zugrunde liegt, durch besondere Angemessenheit in den Investitionskosten, aber auch durch ein besonderes Maß an Betriebsstabilität und Leistungsfähigkeit gekennzeichnet sein. Die Struktur und die Größe von Behandlungsstufen unterscheiden sich bei Kläranlagen mit simultaner aerober Schlammstabilisierung (Typ A5) und Kläranlagen mit einer separaten anaeroben Stabilisierung (Typ AN) erheblich. Bei einem Umstieg sind daher umfassende Veränderungen auf der Kläranlage notwendig bzw. empfehlenswert.

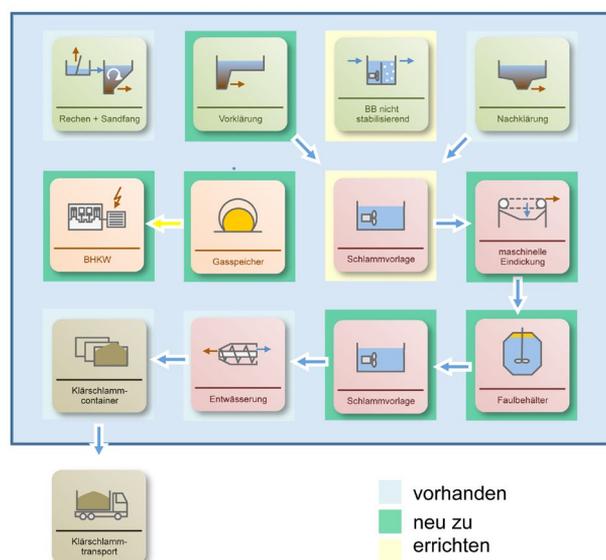
Wesentliche Teilschritte in diesem Zusammenhang sind:

- Errichtung einer Vorklärung
- Vermeidung der simultanen aeroben Schlammstabilisierung
- Errichtung eines Faulbehälters
- Gasverwertung

5.1.1.2 Errichtung einer Vorklärung

Die Errichtung einer Vorklärung ist die wesentliche Voraussetzung zur Verbesserung des Schlammhaushalts und der Energiebilanz der Kläranlage. Es wird ein energiereicher Primärschlamm erzeugt und der Überschussschlammabzug aus der biologischen Stufe entsprechend verringert. Für die Umstellung des Anlagenkonzeptes ist es ausreichend, eine einstraßige Vorklärung (Aufenthaltszeit 1 bis 2 h) mit einem PS-Pumpwerk zu errichten. Als Räumsystem wird ein Bandräumer empfohlen, da dieser kostengünstig ist und das Abdecken der Vorklärung zulässt. Es ist vorteilhaft, den abgezogenen Primär- und Überschussschlamm gemeinsam in einem Vorlagebehälter statisch einzudicken und so den Rohschlammvolumenstrom zu minimieren. Für diese Eindickung ist eine Vorlage in der Größe einer Tagesrohschlammmenge empfehlenswert. Bei größeren Kläranlagen kann der Rohschlamm auch über Band-, Trommel- oder Scheibeneindicker maschinell eingedickt werden. Ein vorgeschalteter Mazerator reduziert Betriebsprobleme durch Verzapfungen.

Bild 5.1: Umstellung von aerober (A5) auf anaerobe Stabilisierung (AN)



5.1.1.3 Vermeidung der simultanen aeroben Stabilisierung

Zur Vermeidung der aeroben Schlammstabilisierung sind das Schlammalter und damit die Gesamtschlammmenge in der biologischen Stufe zu senken. Dies kann durch die Außerbetriebnahme einzelner Belebungsbecken und ein Anpassen des Feststoffgehaltes in der biologischen Stufe erfolgen. Ein ausreichender Feststoffgehalt im Zulauf der Nachklärung von über 2,0 g TS/l sollte eingehalten werden. Die hydraulische Durchgängigkeit der Kläranlage bei Mischwasserbelastung und eine Redundanz bei der Beckenstruktur sind zu berücksichtigen. Der Sauerstoffbedarf in der Belebungsstufe wird um den Anteil der vermiedenen endogenen Atmung verringert. Durch die Hydrolyse von organisch gebundenem Stickstoff in der Faulstufe wird andererseits die zu oxidierende Stickstofffracht erhöht. Die vorhandenen Belüftungseinrichtungen sind daher hinsichtlich der Kapazität und des Regelbereiches zu überprüfen und ggf. anzupassen.

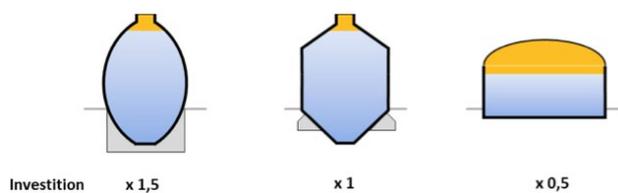


Bild 5.2: Bauformen von Faulbehältern und Investitionskosten

5.1.1.4 Errichtung eines Faulbehälters

Für die Errichtung eines Faulbehälters ist die Angemessenheit der Investition in besonderem Maße zu wahren. Alternativ zu einer herkömmlichen Gestaltung von Faulbehältern (schlank und hoch mit vertikaler Durchmischung) wird empfohlen, eine flache Bauweise in zylindrischer Form mit ebener Sohle und mit einer horizontalen Durchmischung zu prüfen. Diese Alternative würde die Baukosten des Faulbehälters verringern, wenngleich sich auch der Betriebsaufwand bei unzureichender Durchmischung erhöhen kann.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, das Reaktorvolumen so groß zu wählen, dass eine obere Lamelle als Speicher bzw. als Vorlage für die Entwässerungsmaschinen genutzt werden kann. Vorteilhafterweise würde dadurch die mittlere Aufenthaltszeit erhöht und die Errichtung einer separaten Vorlage vermieden werden.

Bild 5.3: Faulbehälter Kläranlage Zarrentin mit 700 m³ Nutzvolumen



5.1.1.5 Gasverwertung

Für die Gasspeicherung bieten sich Doppelmembranspeicher an. Bei flachen und damit großflächigen Faulbehältern kann der Gasspeicher alternativ auch in ein Foliendach integriert werden. Neben dem Gasspeicher ist eine Not-Fackel in das Anlagenkonzept zu integrieren.

Für die Stromerzeugung aus Faulgas werden Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), vorzugsweise mit Gasmotoren betriebene Blockheizkraftwerke, eingesetzt. Gerade im unteren Leistungsbereich von 50 kW wurden in den letzten Jahren hoch effiziente Aggregate entwickelt. Die gesamte KWK-Anlage kann anschlussfertig mit Wärme- und Steuerungstechnik in einem Container geliefert werden und ist an die Strom- und Wärmeversorgung der Kläranlage anzubinden. Für den Betrieb der KWK-Anlage sind die technischen Vorgaben des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG, 2012) zu beachten.

Die Installation von KWK-Anlagen wird nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG, 2012) in Abhängigkeit der installierten elektrischen Leistung gefördert. Aufgrund der degressiven Staffelung ist die Förderung insbesondere für die Betreiber kleinerer KWK-Anlagen von Interesse.

Ein Anspruch auf Zahlung des Zuschlages durch den Netzbetreiber besteht derzeit auch für selbst genutzten KWK-Strom. Der Betreiber der KWK-Anlage muss den Anteil der Wärmenutzung über Messeinrichtungen nachweisen. Die Vergütung für den Anteil des erzeugten Stromes, dessen Wärme gleichzeitig sinnvoll genutzt wird, beträgt nach dem KWKG bis zu 5,41 ct/kWh für einen Zeitraum von 10 Jahren.

Bild 5.4: Gasspeicher Kläranlage Bad Doberan



Bild 5.5: BHKW-Anlage der Kläranlage Radegast (Elektrische Leistung 2 x 25 kW)



5.1.1.6 Wirtschaftlichkeit der Umrüstung

Die Grenze für einen wirtschaftlichen Einsatz der Schlammfäulung auf kommunalen Kläranlagen lag in der Vergangenheit bei einer Anlagengröße von etwa 30.000 EW. Der kontinuierliche Anstieg der Energiekosten während der letzten Jahre, die technische Weiterentwicklung im Bereich der Schlammfäulung und Faulgasnutzung sowie veränderte gesetzliche Rahmenbedingungen haben dazu geführt, dass die Wirtschaftlichkeit für die Verfahrensumstellung heute bereits bei etwa 20.000 EW gesehen wird (Gretzschel et al., 2011). Diese Anschlussgröße entspricht einer Klärschlammmenge von etwa 300 t TS/a an simultan aerob stabilisiertem Schlamm bzw. rund 420 t TS/a an Rohschlamm. Die Wirtschaftlichkeit der Verfahrensumstellung ergibt sich maßgeblich aus der Stromeigenerzeugung und der entsprechenden Reduzierung des Stromfremdbezuges. Für eine Kläranlage der Ausbaugröße von 25.000 EW wird beispielhaft eine KWK-Anlage mit einer Leistung von ca. 50 kW_{el} benötigt. Mit dieser Anlage werden pro Jahr rund 300.000 kW_{el} an regenerativer Energie produziert, die eine Stromeigendeckung der Kläranlage von ca. 50 % ermöglichen. Der vermiedene Stromfremdbezug entspricht bei einem Bezugspreis von 20 ct/kWh_{el} einer Einsparung von rund 60.000 EUR/a. Aus der Förderung der KWK-Anlage nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz ergibt sich ein zusätzlicher Ertrag von rund 12.000 EUR/a für 10 Jahre bei einer 70 %igen Wärmenutzung.

Weitere Kosteneinsparungen ergeben sich aus den folgenden Teilpunkten:

- Reduktion der Belüftungsenergie um ca. 35 %
- Reduktion Rührenergie bei einer Stilllegung von Beckenvolumen um 50 %
- Steigerung des oTS-Abbau um > 30 %
- Verbessertes Betrieb der maschinellen Schlammwässerung
- Reduktion der zu entsorgenden Schlammmenge um ca. 30 %
- Verringerte Transport- und Entsorgungskosten
- Vermeidung eines Einsatzes von Gas oder Öl zur Wärmeerzeugung

Erhöhte Kosten sind demgegenüber mit den folgenden Punkten verbunden:

- Zusätzlicher Energieverbrauch aus dem Betrieb des Faulstufe
- Zusätzliche Stickstoff-Rückbelastung aus der Schlammfäulung
- Wartungs- und Instandhaltungskosten bei der KWK-Anlage
- Zusätzlicher Personaleinsatz durch neue Betriebspunkte
- Hohe Vorhaltekosten für den bedarfsweisen Stromfremdbezug

Die Wirtschaftlichkeit der Umstellung von aerober auf anaerobe Stabilisierung ist gegeben, wenn der betriebliche Ertrag die Aufwendungen für die Errichtung und den Betrieb der neuen Anlagenteile übersteigt bzw. unter den gegenwärtigen Verhältnissen wenigstens diesen entspricht. Der betriebliche Ertrag kann über den Anfall, die Beschaffenheit und den Energiegehalt des Klärschlammes für eine Kläranlage mit einer bestimmten Abwasserlast gut abgeschätzt werden. Die Investitionskosten einer technischen Lösung sind hingegen schwieriger zu prognostizieren, da diese in hohem Maße von den örtlichen Randbedingungen bezüglich einer Nutzung von vorhandener Bausubstanz und der Integration der notwendigen neuen Anlagentechnik abhängen. Es ist jedoch möglich, mit Hilfe des Ertrages aus der Umstellung auf anaerobe Stabilisierung die Investitionskosten zu ermitteln, die eine wirtschaftliche Lösung zulassen. Die Bilanzierung auf der Grundlage von Entsorgungskosten für den Klärschlamm von 30 EUR/t Originalsubstanz ergibt den im Bild 5.6 dargestellten Verlauf der möglichen Investitionskosten in Abhängigkeit von der Ausbaugröße und den Strombezugskosten.

Durchgeführte Planungsstudien zeigen, dass die Umrüstung auf eine Schlammfäulung heute bereits ab einer Ausbaugröße von 20.000 EW wirtschaftlich sein kann (Jakob et al., 2011). Die betrieblichen Erträge lassen bei dieser Ausbaugröße nach der dargestellten Kostenfunktion Investitionen für den Umbau von etwa 1,5 Mio. EUR bzw. eine spezifische Investition von ca. 75 EUR/EW zu.

Steigende Kosten im Stromfremdbezug verbessern die Ertragsseite des Umbaus und ermöglichen höhere Investitionen. Bei größeren Kläranlagen sinken die spezifischen Umbaukosten unabhängig hiervon durch degressive Effekte, so dass die Wirtschaftlichkeit insgesamt leichter erreicht wird. Die Wirtschaftlichkeit der Verfahrensumstellung ist grundsätzlich über eine Einzelfallbetrachtung nachzuweisen. Bei einer aus Kostengründen gewünschten Vereinfachung der einzusetzenden Anlagentechnik ist auf die langfristige Betriebssicherheit des Anlagenumbaus zu achten.

Beispielhaft wurde im Rahmen dieser Studie für die Kläranlage Lübz eine Bilanzierung der Umstellung von aerober auf anaerobe Schlammstabilisierung durchgeführt. Die grundlegende Herangehensweise ist am Beispiel einer Kläranlage mit einer Schlammproduktion von 20.000 EW in der Anlage 2 dokumentiert worden.

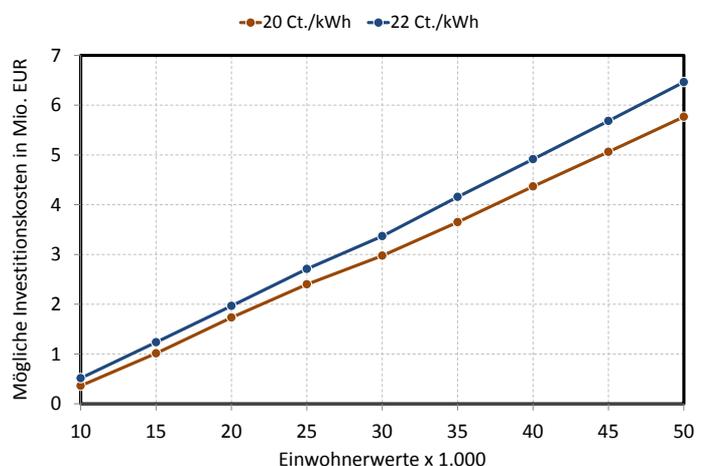


Bild 5.6: Mögliche Investitionskosten für die Umstellung auf anaerobe Stabilisierung

5.1.1.7 Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Co-Fermentation

Der Einsatz von Co-Substraten, wie er unter anderem auf den Kläranlagen Grevesmühlen und Stavenhagen praktiziert wird, führt zu einer erheblichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Schlammbehandlung. Interessant sind besonders Standorte mit Lebensmittelindustrie, wo Co-Substrate mit hohen CSB-Gehalten und geringen Stickstoff- und Phosphoranteilen anfallen. Bei Einsatz von Co-Substraten kann sich die Wirtschaftlichkeit des Umstiegs in der Schlammstabilisierung so sehr steigern, dass auch Kläranlagen mit einer Schlammproduktion von weniger als 20.000 EW mit einer Vorklärung und Faulung ausgerüstet werden können.

Die Stromproduktion unter Einsatz der Co-Fermentation sollte maximal den Stromeigenbedarf der Kläranlage decken, da eine darüber hinaus gehende Stromproduktion bei nur geringer Vergütung nach dem EEG in das Versorgungsnetz einzuspeisen wäre. Unter Berücksichtigung der Kosten der Eigenstromerzeugung und der eventuell erforderlichen zusätzlichen Reststoffentsorgung ist hierfür in der Regel keine Wirtschaftlichkeit gegeben. Auch ist zu beachten, dass infolge der erhöhten Gasproduktion die Kläranlage einen Wärmedeckungsgrad größer 100 % erreicht und die überschüssige Wärmeenergie abgeführt werden muss. Ein KWK-Zuschlag gemäß KWK-Gesetz wird für den Anteil des nicht wärmegenutzten Eigenstroms nicht gewährt. Für den Betrieb der Co-Fermentation sollten die folgenden Kennwerte eingehalten werden:

Die im Einzelfall erreichbare Steigerung der Gasproduktion hängt maßgeblich von den verfügbaren Co-Substraten, von der Auslastung der Faulanlage, den Aggregaten der Faulgasnutzung und der Schlammmentwässerung, der möglichen Rückbelastung der biologischen Stufe und den Kosten für eine Entsorgung anfallender Gärreste ab.

Im Hinblick auf die Akquisition möglicher Co-Substrate ist die Wettbewerbssituation gegenüber privatwirtschaftlich betriebenen Biogasanlagen zu beachten. Es kann daher sinnvoll sein, diese Aufgabe einem regionalen Entsorger zu übertragen und von diesem konfektionierte, d. h. von Störstoffen befreite und ggf. hygienisierte Ware zu beziehen. Dies vereinfacht die Substratannahme und die Einspeisung in die Faulanlage deutlich. Bei einer Annahme von separat abgefahrenen Fettabscheiderinhalten oder von Co-Substraten mit erhöhtem Fettgehalt ist auf eine Beheizung des Annahmebunkers und der Beschickungsleitung zu achten, um eine Ausflockung des Fettes zu vermeiden. Wird der Substratbehälter extern aufgestellt, so ist dieser entsprechend zu dämmen und an das Wärmenetz der Kläranlage anzubinden. Weiterhin sollte ein Umpumpen und Aufmischen des Inhalts durch Kreislaufführung möglich sein. Bei Annahme nicht konfektionierter Rohware sollte zur Vermeidung von Störstoffeinträgen in den Faulbehälter ein Mazerator der Beschickungspumpe vorgeschaltet werden.

Anlagengröße in EW	< 50.000	50.000-100.000	> 100.000
Faulzeit [d]	20 - 30	15 - 20	15 - 18
Raumbelastung [kg oTR/(m ³ *d)]	1,5	3,0	4,5
Org. Säuren [mg/l]	< 300 im täglichen Betrieb		

Tabelle 5.1: Kennwerte bei Einsatz einer Co-Fermentation (MUNLV NRW, 2001)

5.1.2 Optimierte Verbundkonzepte

5.1.2.1 Verfahrenskonzept

Verbundlösungen im Bereich der Schlammbehandlung haben sich in Mecklenburg-Vorpommern seit langem etabliert. Synergien werden hier jedoch vorrangig durch das zentrale Entwässern erzeugt. Dabei wird Klärschlamm, der auf kleineren Kläranlagen anfällt, häufig in den Zulauf der großen Kläranlage (meist Typ A5) eingeleitet und dann gemeinsam mit dem Überschussschlamm dieser Kläranlage abgezogen und entwässert.

Ziel von optimierten Verbundlösungen ist es hingegen, die Vorteile der anaeroben Stabilisierung auch auf kleinen Kläranlagen zu nutzen, auf denen sich die Investition in die Errichtung einer Faulung ansonsten nicht wirtschaftlich darstellen lässt.

Dazu kann eine zentrale Kläranlage vom Typ A5 mit einer Ausbaugröße von < 20.000 EW zu einer Kläranlage vom Typ AN mit Faulung umgebaut werden. Die Wirtschaftlichkeit des Umbaus wird dadurch gewährleistet, dass Kläranlagen vom Typ A3, die bislang nur aerob stabilisierten Schlamm geliefert haben, nun die aerobe Stabilisierung vermeiden, damit gleichzeitig weniger Belüftungsenergie benötigen und eine energetische Verwertung der unstabilierten Klärschlämme auf der umgebauten Kläranlage möglich wird. Der angelieferte Klärschlamm wird nicht mehr in den Zulauf der zentralen Kläranlage eingeleitet, sondern in eine Vorlage und von hier direkt in die Faulung.

Über den Behandlungsweg des Klärschlammes der kleinen Kläranlagen vom Typ A1 und A2 muss in diesem Verbundkonzept je nach Menge, Qualität und Transportentfernung entschieden werden.

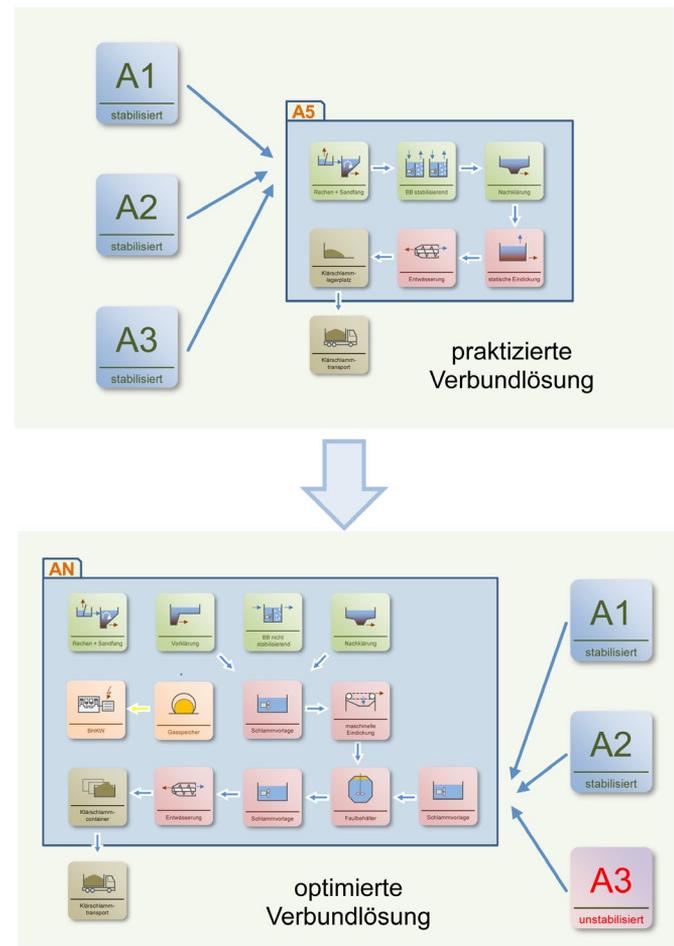


Bild 5.7: Schematische Darstellung einer optimierten Verbundlösung

Aus der Umstellung von der praktizierten zur optimierten Verbundlösung ergeben sich folgende Vorteile:

- Verringerung der Belastung im Zulauf der zentralen Kläranlage
- Reduktion des Energieverbrauchs auf der zentralen Kläranlage (AN) und der dezentralen Kläranlage (A3)
- Wirtschaftliche Nutzung des Energiepotenzials im Abwasser auf der zentralen Kläranlage (AN)
- Reduktion des Klärschlammaufkommens im optimierten Verbundgebiet

Für den Umbau einer zentralen Kläranlage vom Typ A5 zu einer Kläranlage vom Typ AN im Rahmen einer optimierten Verbundlösung ist zu berücksichtigen, dass:

- die Klärschlamm-mengen der dezentralen Kläranlagen vom Typ A3 und damit die Aufwendungen für den Transport leicht ansteigen,
- durch den Import und das anaerobe Stabilisieren von Überschussschlamm auf der zentralen Kläranlage eine größere Stickstofffracht mit dem Trübwasser in die biologische Stufe gelangt und hier sowohl Sauerstoff zehrt (Nitrifikation) als auch Substrat benötigt (Denitrifikation)
- genügend Speichervolumen für das vergleichmäßigte Mitbehandeln des externen Klärschlammes zur Verfügung stehen muss.

5.1.2.2 Errichtung einer Vorklärung auf einer dezentralen Kläranlage

Zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz und Reduzierung des Klärschlammaufkommens kann, basierend auf dem optimierten Verbundkonzept, auf der dezentralen Kläranlage A3 eine Vorklärung errichtet werden.

Durch das Entnehmen von Primärschlamm wird die Belastung im Zulauf der Kläranlage erheblich verringert, so dass entweder eine Belebungsbeckenstraße außer Betrieb genommen werden kann oder der TS-Gehalt in der biologischen Stufe abgesenkt werden muss, um so die simultane aerobe Schlammstabilisierung zu vermeiden.

Der Abbaugrad des in der Vorklärung abgeschiedenen Primärschlammes in einer Faulung ist ungefähr doppelt so hoch wie der von Überschussschlamm. Dadurch sinkt insgesamt der Klärschlamm-anfall nach der anaeroben Stabilisierung auf der zentralen Kläranlage.

Im Rahmen einer Verbundlösung hat Primärschlamm den Vorteil, dass er sich auf der dezentralen Kläranlage einfacher eindicken lässt und aufgrund seines wesentlich geringeren P- und N-Gehaltes weniger Nährstoffe auf die zentrale Kläranlage importiert werden.

Bild 5.8: Vorklärung der Kläranlage Boltenhagen



Auf diesen vorteilhaften Wirkungen basiert die Errichtung einer Vorklärung auf der Kläranlage Boltenhagen im Rahmen eines optimierten Verbundkonzeptes mit der zentralen Schlammbehandlung der Kläranlage Grevesmühlen. Folgende vorteilhafte Wirkungen konnten beobachtet werden:

Für die Kläranlage Boltenhagen:

- Der Energieverbrauch wurde um 38 % reduziert.

Für die Kläranlage Grevesmühlen:

- Die Energieproduktion auf der Kläranlage Grevesmühlen wurde durch den Klärschlamm der KA Boltenhagen um 48 % gesteigert.
- Der Faulschlammanfall mit Bezug auf die KA Boltenhagen wurde um 13 % vermindert.

Für den Verbund:

- Die CO₂-Emission der Abwasser- und Schlammbehandlung wurde insgesamt um 58 % reduziert.
- In der Gesamtbilanz der Kläranlagen Boltenhagen und Grevesmühlen konnte ein beträchtlicher wirtschaftlicher Vorteil dargestellt werden.

5.1.2.3 Separate Behandlung von Prozesswasser

Bei der Schlammfäulung, aber auch bei einer längeren Stapelung schlecht aerob stabilisierter Klärschlämme, wird organisch gebundener Stickstoff hydrolysiert. Die Ammoniumkonzentration im Schlammwasser kann hierdurch Werte von etwa 250 bis 1.000 mg/l erreichen. Mit separat abgezogenem Trübwasser und/oder über die Prozesswässer der Schlammwässerung gelangt der gelöste Stickstoff zurück in die biologische Stufe und muss dort nitrifiziert und denitrifiziert werden. Bei Kläranlagen mit ungünstigem C:N-Verhältnis im Zulauf, bei Verbundfäulungsanlagen mit einem hohen Stickstoff-Import aus angelieferten Fremdschlämmen oder bei einer Zufuhr von stickstoffhaltigen Co-Substraten zur Fäulung kann durch die zurückgeführte Stickstofffracht möglicherweise die geforderte Stickstoffelimination im Ablauf der Kläranlage nicht sicher eingehalten werden. Grundsätzlich sollten die stickstoffhaltigen Prozesswässer in den Zulauf der biologischen Stufe dosiert werden, um eine Stoßbelastung aus der Vorklärung bei plötzlichen Mischwasserzuläufen zu vermeiden. Dies gilt nicht für feststoffbelastete Teilströme aus Eindickern und Stapelbehältern. Auf kleineren aerob stabilisierenden Kläranlagen, die den anfallenden Klärschlamm stapeln und diskontinuierlich über ein Lohnunternehmen entwässern lassen, sollte das Schlammwasser über einen Zwischenspeicher der biologischen Stufe zugeführt werden. Eine separate Prozesswasserbehandlung ist aufgrund der zusätzlichen betrieblichen Aufwendungen und der komplexen Verfahrensbedingungen nur bei großen Kläranlagen der GK 4 und GK 5 sinnvoll.

5.1.2.4 Planung der optimierten Verbundlösung

Die bilanziellen und planerischen Grundsätze für eine Umstellung von simultaner aerober auf anaerobe Schlammstabilisierung, wie auch das Einrichten einer optimierten Verbundlösung, müssen nicht entwickelt werden, sondern können dem Stand der Technik entnommen werden. Die Vorhersage der stofflichen, energetischen und wirtschaftlichen Veränderungen ist grundsätzlich möglich.

Eine Bilanzierung der Ist-Situation und der geplanten Umstellung zur Absicherung der Investition und zur Erfolgskontrolle ist sehr wichtig. Folgende Arbeitsschritte sollte die Bilanzierung mindestens enthalten:

- CSB-, N- und P-Bilanz der Abwasserreinigung und der Schlammstabilisierung
- Energie- und CO₂-Bilanz unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs der biologischen Stufe, der Schlammbehandlung, des Klärschlammtransports und der Energieproduktion
- Wirtschaftlichkeitsanalyse unter Berücksichtigung der Energie- und Schlamm Bilanz, der Personalkosten, des Einsatzes von Betriebsmitteln und der Kapitalkosten.

Zur weiteren Absicherung des Projekterfolges sollte eine Sensitivitätsanalyse ein Bestandteil der Planungen sein, bei welcher die Veränderung von Parametern mit großer Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit untersucht wird. Dazu zählen in besonderem Maße der Strombezugspreis, die Kosten für die Klärschlamm entsorgung und die Investitionskosten.

5.1.3 Optimierung der Schlammbehandlung

5.1.3.1 Desintegration von Rohschlamm

Bei der Schlammfäulung limitiert die biologische Verfügbarkeit der organischen Substanz den erreichbaren Stabilisierungsgrad. Mit einer technischen Anlage zur Klärschlamm-Desintegration lassen sich durch den Eintrag von mechanischer oder thermischer Energie Überschussschlämme stärker aufschließen. Daneben sind auch chemische und biologische Verfahren zur Desintegration möglich. Dabei wird durch die Desintegration die zu entsorgende Klärschlammmenge reduziert und die Faulgasproduktion gesteigert. Bei einer Steigerung der Abbaubarkeit des organischen Anteils im Überschussschlamm um 10 % wird entsprechend der folgenden Tabelle auf einer Kläranlage mit 50.000 EW ein Nutzen von ca. 23.000 EUR/a erzielt. Basis dieser Prognose sind Schlamm entsorgungskosten von 120 EUR/t TS und ein Strompreis von 20 ct/kWh.

Diesen Einsparungen stehen jedoch die Kapitalkosten der Investition und die Kosten für Personal, Energie, Chemikalien etc. entgegen. Eine gewissenhafte Prüfung der Wirtschaftlichkeit ist für jedes Verfahren durchzuführen. Gegenwärtig ist keine Kläranlage in Mecklenburg-Vorpommern mit einer technischen Anlage zur Klärschlamm desintegration ausgerüstet.

	ÜS	oTS-Abbau	Rest ÜS	Stromprod.	Gesamt
	t TS/a	%	t TS/a	kWh/a	
Ohne Desintegration	600	35	390	278.000	
Mit Desintegration	600	45	330	357.000	
Delta			60	79.000	
Einsparung in EUR/a			7.200	15.800	23.000

Tabelle 5.2: Vorteilhafte Wirkung Klärschlamm desintegration für 50.000 EW

5.1.3.2 Klärschlammvererdung

Die Klärschlammvererdung ist eine Verfahrensweise der Schlammbehandlung, die sich in Deutschland etabliert hat und damit zum Stand der Technik gehört. Der als Vererdung bezeichnete Prozess basiert auf einer Langzeitstabilisierung von aerob vorstabilisiertem Klärschlamm in modulartig angelegten Beeten. Durch das Wachstum von Schilf und Binsen wird Sauerstoff in die Beete eingetragen, so dass durch aerobe Prozesse die organische Schlammsubstanz um 30 bis 50 % abgebaut werden kann. Glühverluste im vererdeten Schlamm von < 45 % sind erreichbar. Die Klärschlammvererdung ist die Verfahrensweise in der Schlammbehandlung, die im höchsten Maße klärschlammreduzierend wirkt. In Mecklenburg-Vorpommern sind ca. 10 Klärschlammvererdungsanlagen von 1.000 bis 25.000 EW in Betrieb.

Der Bau von Vererdungsanlagen ist auf Grund der hohen Einsparungen bei der Schlammmentwässerung, dem Transport und der Entsorgung schon heute wirtschaftlich darstellbar. Die Kosteneinsparungen einer Klärschlammvererdung basieren auf der weitergehenden Reduktion

des organischen Anteils im Klärschlamm und dem Entfallen des Zwischenspeicherns und maschinellen Entwässerns des Klärschlammes.

Darüber hinaus ist der Aspekt der hygienisierenden Wirkung der Klärschlammvererdung wichtig. In dem Entwurf zur Novellierung der Klärschlammverordnung werden thermisch, chemisch und biologisch wirkende Verfahren zur Reduktion der Schadorganismen aufgelistet. Zu den biologischen Verfahren gehört neben der Kompostierung von Klärschlamm in Reaktoren die Klärschlammbehandlung in Pflanzenbeeten.

Ein Beet kann etwa 6 bis 10 Jahre beschickt werden. Vor der Räumung wird das entsprechende Pflanzenbeet mindestens 12 Monate lang nicht mehr mit Klärschlamm beschickt, weiter entwässert und nachfolgend geräumt. Der aufgebrachte Klärschlamm entwässert auf Feststoffgehalte von mehr als 20 % TS. Im Vergleich zur maschinellen Entwässerung ist der Betriebsaufwand vergleichsweise gering, da der Energieverbrauch sich

Bild 5.9: Inbetriebnahme einer Klärschlammvererdungsanlage (Kläranlage Dargun)



Bild 5.10: Klärschlammvererdungsanlage Kläranlage Strasburg



auf das Fördern von Schlamm und Filtrat beschränkt. Daneben ist der Personalaufwand für die Pflege der Schilfbeete zu berücksichtigen. Die erzeugte Klärschlamm-erde wird einer landbaulichen Verwertung zugeführt. Die Düngewirkung in Bezug auf P bleibt bei der Vererdung nahezu vollständig erhalten.

Die Beete werden für eine Beschickung mit etwa 30 kg TS/(m²*a) entsprechend etwa 0,6 EW/m² bemessen. Für künstliche Becken mit Winkelstützwänden kann ein Preis von ca. 40 EUR/m² bzw. 60 EUR/EW angesetzt werden. Dies entspricht bei einer Ausbaugröße von 10.000 EW einer Investition von 600.000 EUR. Der hohen Investition stehen jedoch die lange Nutzungsdauer der Anlage und die nicht erforderliche maschinelle Schlammmentwässerung gegenüber. Der große Flächenbedarf beschränkt den Einsatz auf den ländlichen Raum. Im Folgenden werden die Errichtung und der Betrieb einer Zentrifuge zur Entwässerung des Klärschlammes einer Klärschlammvererdung gegenübergestellt.

Aus der Tabelle 5.3 geht hervor, dass ein erheblicher wirtschaftlicher Vorteil von ca. 38.000 EUR/a erzielt werden kann, wenn bei dem Neubau einer Kläranlage für 10.000 EW anstelle einer Schlammmentwässerung eine Klärschlammvererdungsanlage errichtet wird. Allerdings beträgt die Amortisation der Investition in die Klärschlammvererdungsanlage 20 Jahre.

Darüber hinaus ist schon ab Strombezugskosten von 20 ct/kWh und einer Ausbaugröße von 20.000 EW die Umstellung einer Kläranlage auf anaerobe Schlammstabilisierung wirtschaftlicher, so dass die Klärschlammvererdung eher für kleinere Ausbaugrößen wirtschaftlich darstellbar ist.

Entscheidend für den Betreiber der Vererdungsanlage ist jedoch die Entsorgungssicherheit zum Zeitpunkt der Beckenräumung. Sich verändernde Rahmenbedingungen der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung können so rückwirkend Auswirkungen auf den über mehrere Jahre anfallenden Klärschlamm haben. Eine sorgfältige Überwachung der Schadstoffparameter des Klärschlammes vor der Entscheidung für oder gegen eine Klärschlammvererdung ist vor dem Hintergrund einer möglichen Aufkonzentrierung von Schwermetallen sehr zu empfehlen. Aufgrund des niedrigen Heizwertes und der verwurzelten Klärschlammmasse ist eine thermische Entsorgung des vererdeten Klärschlammes teuer bzw. wird vom Entsorgungsunternehmen gar abgelehnt.

Parameter	Zentrifuge	KSV	Einheit
Investition	250.000	700.000	EUR
Kapitalkosten	16.250	10.500	EUR/a
Verringerung KS-Anfall	0	-7.875	EUR/a
FHM-Verbrauch	8.400		EUR/a
Stromverbrauch	4.500		EUR/a
Wartung/Reparatur (1 %)	2.500		
Personal	9.100		EUR/a
Summe	40.750	2.625	EUR/a

Tabelle 5.3: Wirtschaftlichkeit einer Klärschlammvererdungsanlage am Beispiel einer Kläranlage von 10.000 EW

5.1.3.3 Dezentrale Trocknung von Klärschlamm

Eine Voraussetzung für die thermische Klärschlamm-entsorgung ist eine Trocknung des Klärschlammes. Die Trocknung wird meistens mit der Klärschlammverbrennung kombiniert, da die bei diesem Prozess freiwerdende thermische Energie für die Trocknung genutzt werden kann.

Für Klärschlämme, die zukünftig thermisch entsorgt werden müssen, ist jedoch auch eine dezentrale Trocknung am Entstehungsort des Klärschlammes interessant. Eine wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit kann aus den folgenden 3 Aspekten generiert werden:

- Durch die Trocknung wird das Transportvolumen der Klärschlammmenge zu einer zentralen Klärschlammmonoverbrennungsanlage erheblich reduziert.
- Da der Preis für die thermische Entsorgung des Klärschlammes auf einer Tonne Originalsubstanz (Trockensubstanz inklusive Wasser) beruht, sinken die Klärschlammmentsorgungskosten analog zur Wasserentnahme durch die Trocknung
- Durch die Trocknung wird dem Klärschlamm Wasser entzogen und so der Heizwert des Klärschlammes erhöht. Da die Energiebilanz einer Klärschlammmonoverbrennungsanlage aufgrund des Einsatzes von vorwiegend entwässertem Klärschlamm ungünstig ist, wirkt die Annahme von getrocknetem Klärschlamm stabilisierend auf die Energiebilanz.

Zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit der dezentralen Trocknung kann ein Vergleich mit der zentralen Trocknung aufgestellt werden, wie er in der Tabelle 5.5 dokumentiert ist. Dabei ist zu beachten, dass erst über die Ermittlung der Gesamtkosten ein Rückschluss auf die spezifischen Kosten in EUR/t OS möglich ist, da sich aufgrund des unterschiedlichen Wassergehaltes die Bezugsbasis der beiden Varianten beim Transport und bei der Verbrennung unterscheidet.

Klärschlamm	entwässert	getrocknet	H ₂ O-Entzug	Einheit
Originalsubstanz	1.450	476		t OS/a
TS-Gehalt	23	70		%
Trockensubstanz	334	334		t TS/a
Wasser	1.117	143	974	t H ₂ O/a
Heizwert	0,9	7,9		MJ/kg OS
Massenreduktion		67		%

Tabelle 5.4: Massenreduktion und Heizwert bei der Trocknung von Klärschlamm für 20.000 EW

	Spezifik	Dezentrale Trocknung Zentrale Verbrennung	Zentrale Trocknung Zentrale Verbrennung	Einheit
Schlamm	Entwässert	1.450	1.450	t OS/a
	Getrocknet	476	476	t OS/a
Trocknen	Spezifisch	60	-	EUR/t OS
	Gesamt	87.000	-	EUR
Transport	Entfernung	150	150	km
	Spezifisch	21	21	EUR/t OS
	Gesamt	9.906	30.175	EUR
Verbrennung	Spezifisch	30	60	EUR/t OS
	Gesamt	14.280	87.000	EUR
Summe	Spezifisch	77	81	EUR/t OS
	Gesamt	111.186	117.175	EUR

Tabelle 5.5: Vergleich der Wirtschaftlichkeit von dezentraler und zentraler Trocknung

Aus dieser Gegenüberstellung geht hervor, dass auch bei relativ hohen Trocknungskosten der Nutzen aus der Volumenreduzierung und der Heizwerterhöhung so groß sein kann, dass die dezentrale Trocknung wirtschaftlich darstellbar ist.

Eine Möglichkeit der Schlamm-trocknung auf der Klär-anlage selbst ist die solare Schlamm-trocknung. Hierbei handelt es sich um eine Niedertemperatur-trocknung in funktional angepassten Gewächshäusern, bei der das verdunstete Wasser über Ventilatoren aus dem System ausgeschleust wird. Der Schlamm wird primär über die solare Strahlung bei etwa 30° C getrocknet.

Bild 5.11: Solare Klärschlamm-trocknung



5.2 Szenarien der zukünftigen Klärschlammbehandlung

Für eine solare Klärschlamm-trocknung von 20.000 EW ergibt sich bei einer Trocknungsleistung von 0,8 t OS/m² eine Anlagengröße von ca. 1.800 m². Bei angenommenen spezifischen Kosten von 450 EUR/m² kostet die solare Klärschlamm-trocknung 970.000 EUR. Daraus entstehen Kapitalkosten von ca. 63.000 EUR/a bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren und einer Verzinsung von 3 %. Der Energieverbrauch wird mit 30 kWh/t Wasserentzug angegeben und zu insgesamt ca. 6.000 EUR/a abgeschätzt. Für Personalkosten (1h je Arbeitstag) fallen ca. 7.700 EUR/a an und für Wartung/Reparatur werden 1 % der Anlagenkosten entsprechend 10.000 EUR/a angesetzt. Damit ergeben sich Jahreskosten von 86.300 EUR/a bzw. 60 EUR/ t OS.

Es ist jedoch auch denkbar, Klärschlamm an Standorten zu trocknen, an denen ein Wärmeüberschuss besteht und die thermische Energie günstig zur Verfügung gestellt werden kann.

Gegenwärtig sind in Mecklenburg-Vorpommern noch keine Klärschlamm-trocknungsanlagen in Betrieb, da aufgrund der bisher geringen Klärschlamm-entsorgungskosten keine Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage darstellbar ist.

Als wesentlich für eine zukünftige Klärschlamm-behandlung stellen sich technische Verfahren dar, die den Massen- und Volumen-anfall an Klärschlamm reduzieren und die das energetische Potenzial der enthaltenen organischen Substanz weitestgehend nutzen. Anhand der in Tabelle 5.6 aufgeführten Szenarien werden die Auswirkungen bei der Klärschlamm-behandlung, die sich aus einer Einführung der in den Vorkapiteln beschriebenen technischen Modifikationen ergeben können, im Vergleich zu der heutigen Situation dargestellt. Die Szenarien zur Vererdung und Trocknung von Klärschlamm stellen hierbei Grenzbetrachtungen dar, die im großen Umfang nicht zur technischen Umsetzung gelangen werden. Sie sollen die grundsätzlichen Auswirkungen, die sich auf den Klärschlamm-anfall und die Klärschlamm-entsorgung in Mecklenburg-Vorpommern ergeben könnten, aufzeigen.

Für die Szenarien werden jeweils die folgenden Teilaspekte betrachtet:

- die Klärschlamm-menge und -zusammensetzung
- das resultierende Transportvolumen
- die erforderlichen Investitionskosten
- die Entsorgungskosten
- der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen.

Der Berechnung der einzelnen Szenarien werden die in der Anlage 2 aufgeführten spezifischen Kosten und Annahmen zu Grunde gelegt.

Szenario	Stichwort	Beschreibung
0	IST	IST-Situation in Mecklenburg-Vorpommern als Basisszenario
1	Faulung	Anaerobe Klärschlamm-stabilisierung auf mittelgroßen Kläranlagen mit Potenzial für eine Faulung
2	Vererdung	Vererdung von Klärschlamm auf Kläranlagen bis 300 t TS/a
3	Trocknung	Dezentrale Trocknung von Klärschlamm ab 100 t TS/a

Tabelle 5.6: Betrachtete Szenarien zur Klärschlammbehandlung

5.2.1 Szenario 0: IST-Situation

Auf den 580 in Mecklenburg-Vorpommern betriebenen Kläranlagen fallen aktuell rund 41.000 t TS an. Es wird angenommen, dass der auf den 13+1 Kläranlagen mit Faulung anaerob stabilisierte Schlamm (ca. 20.400 t TS/a) vor Abtransport auf 25 % TS und der aerob stabilisierte Schlamm auf mittleren Kläranlagen (ca. 19.200 t TS/a) auf 20 % TS entwässert wird. Der Klärschlamm der kleineren Kläranlagen (ca. 1.400 t TS/a) wird als nur statisch eingedickt mit einem Feststoffgehalt von 4 % TS angesetzt. Unter diesen Annahmen ergibt sich eine Schlammmenge von rund 213.000 t OS/a.

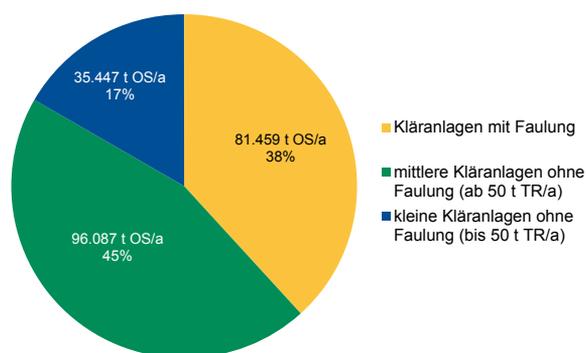


Bild 5.12: In Mecklenburg-Vorpommern anfallende Schlammmenge (Originalsubstanz)

Derzeit werden ca. 75 % des anfallenden Klärschlamms in der Landwirtschaft verwertet und nur ca. 2% des Schlamms einer thermischen Entsorgung zugeführt. Der übrige Schlamm (23 %) wird entweder im Landschaftsbau zu Rekultivierungsmaßnahmen eingesetzt, in andere Bundesländer transportiert oder zwischengelagert. Für die Berechnung der Entsorgungskosten wird angenommen, dass diese 23 % des Klärschlamms vollständig im Landschaftsbau eingesetzt werden. Der in der Statistik aufgeführte zwischengelagerte Schlamm wird früher oder später ebenfalls einem Entsorgungsweg zugeführt, so dass er in der Szenarienbetrachtung nicht gesondert berücksichtigt wird. Nach dieser Aufteilung ergeben

sich Entsorgungskosten von rund 7,7 Mio. EUR/a bzw. spezifische Kosten von rund 2,4 EUR/(EW*a).

Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen, die durch die Abwasserreinigung und die Klärschlammverwertung erzeugt werden, werden der Stromfremdbezug der Kläranlagen sowie die Transportaufwendungen für die Abfuhr des Klärschlamms betrachtet. Die durch die Stromeigenerzeugung aus Faulgas entstehenden Emissionen und die direkten Emissionen aus dem Klärschlamm, z. B. bei einer Kompostierung, werden aufgrund des biogenen Ursprungs vernachlässigt. Diese CO₂-Emissionen entsprechen dem zuvor in der organischen Klärschlammmasse gebundenen CO₂ und sind damit klimaneutral.

Der für die Klärschlammverwertung notwendige Transportaufwand ergibt sich als Produkt aus den Transportentfernungen und der transportierten Klärschlammmenge (Originalsubstanz) als Tonnenkilometer (t OS*km/a). Für den IST-Zustand errechnet sich ein Verkehrsaufwand von rund 2,8 Mio. Tonnenkilometer. Der Stromverbrauch der kommunalen Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern wurde in einer Studie mit 107,7 GWh/a berechnet (LU, 2009). Unter Berücksichtigung der Eigenstromerzeugung der 14 Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung (ca. 18,0 GWh/a) ergibt sich ein Fremdbezug von 89,7 GWh/a. Bei Ansatz üblicher spezifischer Emissionswerte für Transport und Energiebezug, wie sie in der Anlage 2 aufgeführt sind, errechnen sich für den IST-Zustand insgesamt rund 53.800 t CO₂/a an Treibhausgasemissionen. Wird als Vergleichsgröße der EU-Zielwert für den CO₂-Ausstoß von neu zugelassenen PKW (130 g CO₂/km) herangezogen, entsprechen die geschätzten Gesamtemissionen etwa 413 Mio. gefahrenen PKW-km bzw. einem theoretisch zusätzlichen Bestand von rund 27.500 PKW bei einer üblichen Fahrleistung von 15.000 km/(PKW*a).

5.2.2 Szenario 1: Anaerobe Schlammstabilisierung auf mittelgroßen Anlagen

In Mecklenburg-Vorpommern werden derzeit 21 Kläranlagen mit einer Belastung von mehr als 20.000 EW als aerob stabilisierende Anlagen betrieben, für die eine Umrüstung zur Schlammfäulung bereits heute wirtschaftlich darstellbar ist. Für diese Kläranlagen werden unter Verwendung der Kostenfunktion nach Jakob et al. (2011) die erforderlichen Investitionen und die daraus resultierenden Kapitalkosten berechnet. In den Kosten ist der Bau einer Faulstufe mit allen benötigten Peripherieaggregaten, einer Vorklärung, eines Zwischenpumpwerks und einer Überschussschlammwindickung enthalten. Die Investitionskosten für die Umrüstung der 21 Kläranlagen belaufen sich insgesamt auf rund 45,4 Mio. Euro.

Insgesamt werden von den betrachteten 21 Kläranlagen jährlich rund 12.400 t Klärschlamm-trockenmasse deklariert und eine Klärschlammmenge von ca. 62.000 t OS den Entsorgungswegen zugeführt. Durch die Einführung der anaeroben Stabilisierung wird ein höherer Abbau der organischen Anteile im Klärschlamm als bei einer simultanen aeroben Stabilisierung erreicht. Zusätzlich lässt sich ausgefauter Schlamm besser entwässern, so dass der Entwässerungsgrad des Klärschlammes steigt. Die zu entsorgende Klärschlammmenge wird hierdurch um rund 20 % (2.400 t TS/a) bezogen auf die Trockenmasse bzw. um rund 35 % (22.000 t OS/a) bezogen auf die Originalsubstanz gegenüber der heutigen Situation verringert.

Durch die Umstellung der Kläranlagen auf eine anaerobe Schlammstabilisierung können rund 4,6 Mio. m³ Faulgas erzeugt werden. Die Verstromung des Faulgases mit modernen KWK-Anlagen ermöglicht eine Eigenstromproduktion von rund 9,9 GWh/a. Zusätzlich wird durch die Verfahrensumstellung weniger Energie für die Belüftung und Umwälzung der biologischen Stufe benötigt. Die Nutzung der anfallenden Abwärme vermeidet den Einsatz externer Primärenergie in Form von Heizöl oder Erdgas für Heizzwecke.

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden auf der Kostenseite die sich aus den Investitionen ergebenden Kapitalkosten sowie die zusätzlichen Betriebskosten für den Betrieb der Faulstufe berücksichtigt. Dem gegenüber stehen auf der Nutzenseite die Einsparungen durch den verminderten Strombezug und der Eigenwärmeerzeugung sowie die Verringerung der Entwässerungs-, Transport- und Verwertungskosten auf Grund des geringeren Klärschlammfalls.

Die Kosten der Schlammbehandlung und -verwertung können durch den Bau der 21 Faulstufen um rund 1,5 Mio. Euro pro Jahr gesenkt werden. Auch für die auf den Kläranlagen entstehenden CO₂-Emissionen ergeben sich Verbesserungen. So können vor allem durch den geringeren Stromfremdbezug ca. 9.100 t CO₂ pro Jahr und damit ungefähr 17 % der gesamten CO₂-Emissionen des IST-Zustandes eingespart werden.

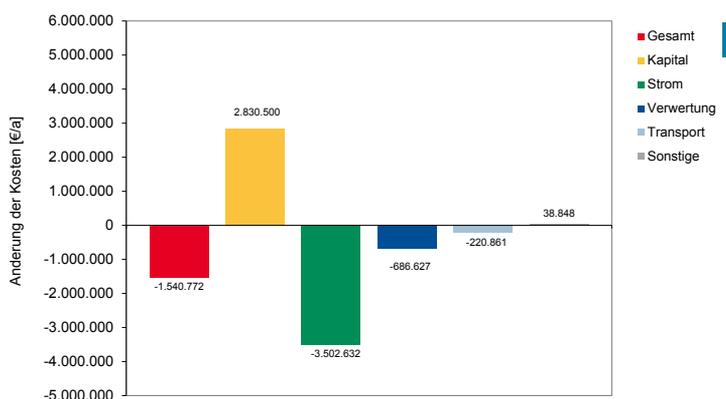


Bild 5.13: Änderung der Kosten für Schlammbehandlung und -entsorgung bei Einführung einer anaeroben Stabilisierung auf 21 Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern

5.2.3 Szenario 2: Klärschlammvererdung auf kleineren Kläranlagen

Die Behandlung von Klärschlamm in Pflanzenbeeten bzw. die Vererdung von Klärschlamm zählt zu den Verfahren, die derzeit für eine Hygienisierung als geeignet eingestuft sind. In diesem Szenario wird eine Klärschlammvererdung ausschließlich für kleine und mittlere Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern mit einer zu deklarierenden Klärschlammmenge von bis zu 300 t TS/a untersucht. Es wird damit angenommen, dass der Schlamm dieser Kläranlagen auch mittelfristig weiter einer landbaulichen Verwertung zugeführt werden soll. Die hiermit erfassten 150 Kläranlagen erzeugen eine Klärschlammmenge von insgesamt rund 4.070 t TS/a.

Die Kosten für den Bau einer Klärschlammvererdung wurden von den in Mecklenburg-Vorpommern gebauten Vererdungsanlagen erfragt und mit Werten aus der Literatur (ATV-DVWK, 2001) abgeglichen. Die spezifischen Baukosten weisen mit Werten zwischen 35 und 110 EUR/EW bzw. 1.500 und 6.000 EUR/t TS eine große Spannbreite auf, die auf die örtlichen Gegebenheiten und den Technisierungsgrad der einzelnen Anlage zurückzuführen ist. Für die Szenarienbetrachtung wurden mittlere spezifische Baukosten von 64 EUR/EW bzw. 3.300 EUR/t TS angesetzt. Es errechnet sich eine erforderliche Investitionssumme für alle 150 Kläranlagen von 13,4 Mio. EUR.

Durch die Vererdung wird der in den Kläranlagen aerob stabilisierte Schlamm weitergehend stabilisiert und entwässert. Eine zusätzliche maschinelle Entwässerung des Klärschlammes vor der Vererdung ist nicht erforderlich, so dass die Kosten und die benötigte Energie für diese entfallen. Insgesamt kann die Klärschlammmenge durch die Vererdung um rund 1.750 t TS/a (entspricht 43 % von 4.070 t TS/a) reduziert werden. Das zu verwerdende Klärschlammvolumen der betrachteten Kläranlagen von aktuell rund 47.700 m³ OS/a kann erheblich auf ca. 5.800 m³ OS/a verringert werden. Dadurch können deutliche Einsparungen beim Klärschlammtransport und

bei der Klärschlammverwertung erzielt werden. Für das hier betrachtete Szenario ergibt sich eine Kosteneinsparung von rund 200.000 EUR pro Jahr gegenüber dem Ist-Zustand.

Bezüglich der Treibhausgasemissionen ergibt sich durch die Klärschlammvererdung ebenfalls eine leichte Verbesserung, da sowohl der Energieverbrauch auf den Kläranlagen durch Entfall der maschinellen Entwässerung sinkt als auch der Transportaufwand für den Klärschlamm reduziert wird. Insgesamt ergibt sich eine leichte Reduktion der CO₂-Emissionen um rund 100 t CO₂/a.

Eine flächendeckende Errichtung von Klärschlammvererdungen in Mecklenburg-Vorpommern, wie sie in diesem Szenario als Grenzbetrachtung gemacht wurde, wird nicht zur technischen Realisierung gelangen. Dennoch stellt die Klärschlammvererdung eine wirtschaftliche Möglichkeit dar, die im Rahmen der Novellierung der Klärschlammverordnung geforderte Hygienisierung zu erreichen. Bei einer verstärkten thermischen Entsorgung der Klärschlämme im Land Mecklenburg-Vorpommern könnte die Vererdung dazu beitragen, die Entsorgungssicherheit für kleinere Kläranlagen in der Fläche auch zukünftig zu gewährleisten. Die praktische Realisierbarkeit ist für die jeweilige Anlage detailliert zu untersuchen.

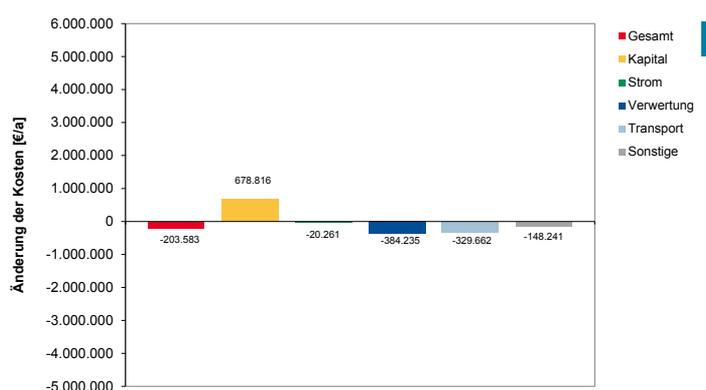


Bild 5.14: Änderung der Kosten für Schlammbehandlung und -entsorgung durch den Bau von Klärschlammvererdungen auf 150 kleineren Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern

5.2.4 Szenario 3: Dezentrale Trocknung auf mittleren und großen Kläranlagen

Durch eine Trocknung von Klärschlamm kann die zu verwertende Klärschlammmenge deutlich reduziert und der Heizwert des Klärschlammes erhöht werden. Der getrocknete Schlamm weist ein erheblich reduziertes Transportvolumen auf und könnte einer externen Verbrennungsanlage zugeführt werden. Für das Szenario wurde angenommen, dass Kläranlagen mit einer Schlammmenge zwischen 100 und 1.000 t TS/a eine solare Klärschlamm-trocknung und alle Kläranlagen mit einer höheren Schlammmenge eine thermische Klärschlamm-trocknung erhalten. Damit würden auf 12 Kläranlagen thermische Trockner für eine Klärschlamm-menge von insgesamt rund 21.000 t TS/a und auf 43 Kläranlagen solare Trocknungsanlagen für eine Klärschlamm-menge von insgesamt ca. 16.000 t TS/a installiert. Damit würden über 90 % des Klärschlammes in Mecklenburg-Vorpommern dezentral getrocknet.

Die Kosten der Trocknung können für eine rein solare Trocknung mit etwa 43 EUR pro Tonne entwässerten Klärschlamm und für eine thermische Trocknung mit rund 51 EUR pro Tonne entwässerten Klärschlamm abgeschätzt werden (LFU, 2011). Davon entfallen bei der solaren Trocknung ca. 35 EUR und bei der thermischen Trocknung etwa 24 EUR auf den Kapitaleinsatz. Unter Annahme einer Nutzungszeit von 20 Jahren ergibt sich ein Gesamtinvestitionsvolumen von rund 65,7 Mio. EUR für den Bau der Trocknungsanlagen auf den 55 betrachteten Kläranlagen.

Es wird angenommen, dass durch die solare Trocknung ein Feststoffgehalt von im Mittel 65 % und durch die thermische Trocknung von 85 % erreicht werden kann. Hierdurch verringert sich die zu verwertende Klärschlamm-menge der 55 betrachteten Kläranlagen von rund 166.300 m³ OS/a auf ca. 49.600 m³ OS/a. Auf diese Weise würden jährlich rund 1,6 Mio. t OS*km Klärschlamm-transport eingespart und die Entsorgungskosten deutlich reduziert.

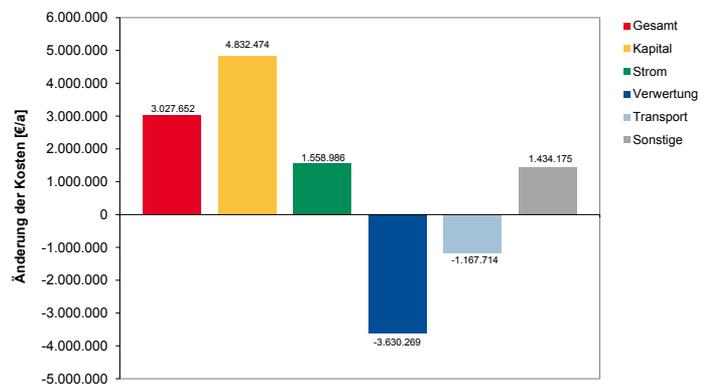


Bild 5.15: Änderung der Kosten für Schlammbehandlung und -entsorgung durch den Bau von dezentralen Klärschlamm-trocknungen auf 57 Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern

Die thermische Trocknung verursacht bei Einsatz von Primärenergieträgern hohe CO₂-Emissionen. Die solaren Trocknungen kommen zwar ohne zusätzliche Wärmezufuhr aus, verursachen jedoch durch den Energieeinsatz z.B. zum Wenden des Schlammes zusätzliche Treibhausgasemissionen. Insgesamt ist mit einer Zunahme der CO₂-Emissionen um rund 18.200 t CO₂/a zu rechnen.

Die Gegenüberstellung der Kosten und Einsparungen zeigt allerdings, dass die flächendeckende Einführung einer dezentralen Klärschlamm-trocknung in Mecklenburg-Vorpommern nicht wirtschaftlich ist. Eine zumindest teilweise Umsetzung dieses Szenarios könnte sich bei einer thermischen Entsorgung nicht landwirtschaftlich verwertbarer Klärschlämme aus Mecklenburg-Vorpommern in anderen Bundesländern ergeben, da durch die Massenreduktion bei der Trocknung die Transportaufwendungen erheblich reduziert werden. Beispielsweise könnte durch eine Nutzung von Überschusswärme aus Biogas- oder Industrieanlagen die Wirtschaftlichkeit einer thermischen Trocknung deutlich verbessert werden. In Mecklenburg-Vorpommern waren im Jahr 2011 insgesamt 241 Biogasanlagen mit einer elektrischen Leistung von rund 230 MW in Betrieb. Die Verteilungsdichte der Biogasanlagen liegt im Mittel bei 1,7/100 km². Insofern kann die Schlamm-trocknung unter Nutzung von Überschusswärme für Einzelstandorte durchaus eine wirtschaftliche Handlungsoption darstellen.

5.2.5 Resümee

Durch eine Anpassung der Behandlung, insbesondere durch eine Ausweitung der anaeroben Stabilisierung, kann gegenüber dem Ist-Zustand eine deutliche Kostensenkung um rund 16 % erzielt werden. Die auf die Belastung von 3,2 Mio. EW bezogenen spezifischen Kosten für die Klärschlammverwertung könnten durch die Einführung zusätzlicher Faulungs- und Verbundanlagen im Landesmittel von 2,4 auf rund 2,0 EUR/(EW*a) reduziert werden. Ein vermehrter Einsatz von Vererdungs- und Trocknungsanlagen wäre demgegenüber mit gleichen bzw. erhöhten spezifischen Kosten verbunden.

Das Klärschlamm-aufkommen in Mecklenburg-Vorpommern lässt sich sowohl durch die in den Szenarien beschriebene anaerobe Stabilisierung als auch durch die Klärschlammvererdung im Vergleich zur IST-Situation verringern. Die Reduktion beschränkt sich allerdings auf maximal 5 % der Klärschlamm-trockensubstanz. Bezüglich der zu entsorgenden Klärschlammoriginalsubstanz können deutlichere Volumenreduktionen insbesondere durch die Einführung der dezentralen Trocknung erzielt werden. Auch durch die Einführung von Vererdungen auf kleineren und mittleren Kläranlagen ist eine Volumenreduktion des zu verwertenden Klärschlamm-s von bis zu 20 % möglich.

Zusammenfassend lässt sich kein Szenario als allein zielführend einstufen. Für eine zukünftige Klärschlammbehandlung und -entsorgung wird es vielmehr auf einen Szenarien-Mix ankommen, der sich neben wirtschaftlichen Kriterien insbesondere an den konkreten örtlichen Gegebenheiten orientieren und dabei die zukünftige Entsorgungssicherheit beachten muss.

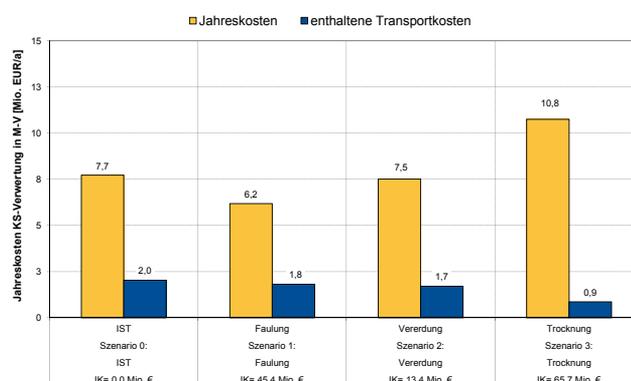


Bild 5.16: Veränderung der Kosten für die Klärschlammverwertung je nach Klärschlammbehandlung in Mecklenburg-Vorpommern

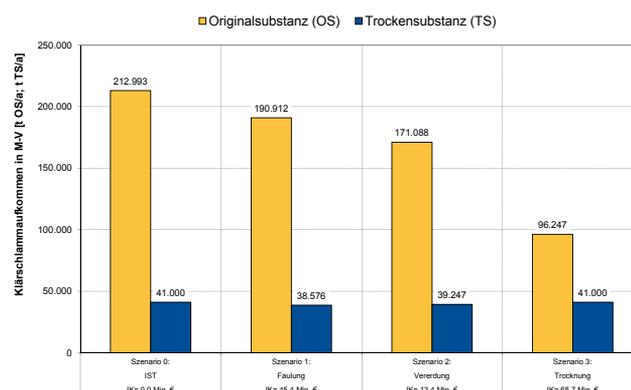


Bild 5.17: Klärschlamm-aufkommen je nach Klärschlammbehandlung in Mecklenburg-Vorpommern

Bild 5.18: Maschinelle Schlammverdickung



6 Zukünftige Klärschlamm Entsorgung

6.1 Einführung

Sobald Klärschlamm die Kläranlage verlässt, wird daraus ein Abfall, der entsprechend der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) den Abfallschlüssel 190805 erhält und fachgerecht entsorgt werden muss. Die Entsorgung schließt sowohl die Verwertung als auch die Beseitigung ein. Der stofflichen Verwertung ist entsprechend der Abfallhierarchie der Vorrang vor der energetischen Verwertung und schließlich vor der Beseitigung einzuräumen.

Klärschlamm ist jedoch nicht irgendein Abfall. Ihm haftet ein Stigma an, das sich aus seinem fäkalen Ursprung ableitet. Für den größten Teil der Öffentlichkeit ist ‚Klärschlamm‘ negativ belegt, seuchenhygienisch bedenklich und eine Schadstoffsenke (Schwermetalle, Medikamentenrückstände). In der Fachwelt hingegen ist Klärschlamm aufgrund seines hohen Nährstoffgehaltes und Energiepotenzials auch als Wertstoff anerkannt.

Der Abfall Klärschlamm ist eine der wichtigen sekundären Phosphorquellen in Mecklenburg-Vorpommern. Abfallwirtschaftlich hat die stoffliche Verwertung von Klärschlamm daher Vorrang vor einer energetischen Verwertung bzw. einer Beseitigung der im Klärschlamm enthaltenen wertvollen Nährstoffressourcen, soweit nicht die Beseitigung die umweltverträglichere Maßnahme ist.

Ein Entsorgungskonzept zur Behandlung von Klärschlämmen, die nach den geltenden gesetzlichen Vorgaben landwirtschaftlich verwertbar sind, ist ohne Einbeziehung von vor- oder nachgeschalteten Maßnahmen zur Phosphatrückgewinnung nur schwer mit den abfallrechtlichen Vorgaben auf europäischer und auf nationaler Ebene in Einklang zu bringen.

Die Herausforderung der Klärschlammentsorgung besteht zukünftig darin, die wertgebenden Eigenschaften des Klärschlammes zu nutzen und die für die Umwelt gefährlichen Bestandteile zu beseitigen bzw. aus dem Kreislauf auszuschleusen.

Monoklärschlammverbrennung Großwilfersdorf (Österreich)



Aufgrund des geringen Klärschlammaufkommens, der guten Qualität (bezüglich der gesetzlichen Anforderungen an die bodenbezogene Klärschlammverwertung) und des großen Angebots an landwirtschaftlicher Nutzfläche ist die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung gegenwärtig der dominierende Entsorgungspfad in Mecklenburg-Vorpommern (siehe Bild 6.1).

Mit der Verschärfung der Grenzwerte durch die Vorgaben der Düngemittelverordnung, insbesondere für die Gehalte von Schwermetallen im Klärschlamm, wird aber auch in Mecklenburg-Vorpommern ab 2015 ein signifikanter Anteil des anfallenden Klärschlammes nicht mehr den Anforderungen für eine landwirtschaftliche Verwertung entsprechen. Dieser Anteil muss dann alternativ so entsorgt werden, dass die enthaltenden Schadstoffe aus dem Kreislauf ausgeschleust werden. Die Verbrennung von Klärschlamm bietet diesbezüglich einen sicheren Entsorgungsweg. In Deutschland beträgt der Anteil an thermisch entsorgtem Klärschlamm gegenwärtig ca. 53 % (siehe Bild 6.2)

In Verbindung mit der Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm oder der Klärschlammmasche ist für viele Klärschlammproduzenten die thermische Entsorgung auch für landwirtschaftlich verwertbare Klärschlämme eine nachhaltige und zukunftsorientierte Lösung. Für das primäre Ziel einer hohen Entsorgungssicherheit für Klärschlamm gilt es, sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Daseinsvorsorge und damit die Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung in ein angemessenes Verhältnis zueinander zu bringen.

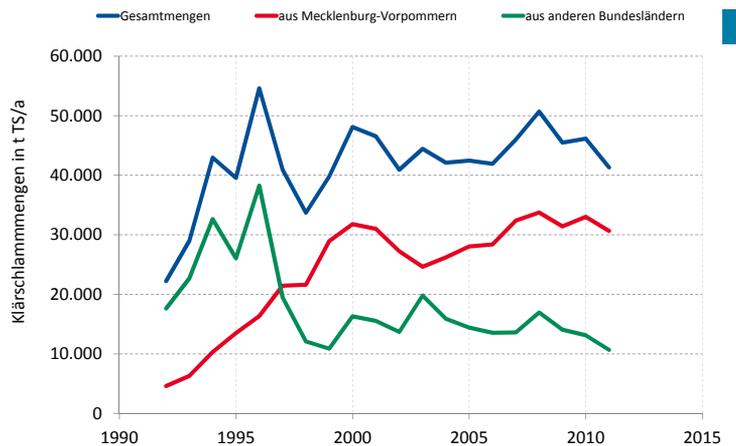


Bild 6.1: Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Mecklenburg-Vorpommern (LMS, 2011)

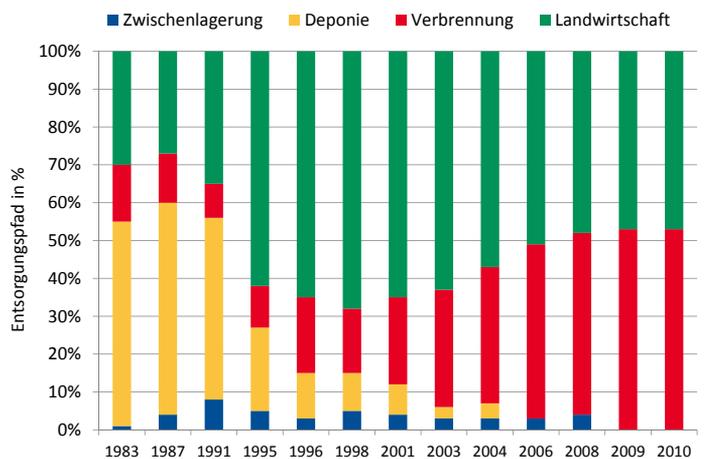


Bild 6.2: Entwicklung der Klärschlamm-entsorgungswege in Deutschland (Adam und Krüger, 2013)

6.2 Möglichkeiten

6.2.1 Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung

Die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung wird in dem landwirtschaftlich geprägten Flächenland Mecklenburg-Vorpommern auch zukünftig eine Entsorgungsoption für die Klärschlämme bleiben, die den rechtlichen Anforderungen für die bodenbezogene Verwertung entsprechen.

Die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung wird durch eine Reihe von Gesetzen und Verordnungen geregelt (siehe Kap 4.1). Folgende wesentliche Punkte sind dabei zu beachten:

Der Klärschlamm muss in halbjährlichen und zweijährigen Untersuchungen auf wichtige Schadstoffe beprobt werden. Nur wenn die in der AbfKlärV und der DüMV festgelegten Schadstoffgrenzwerte eingehalten sind, darf der Klärschlamm bodenbezogen verwertet werden.

Bild 6.3: Klärschlammaufbringung in Mecklenburg-Vorpommern



Vor dem erstmaligen Aufbringen von Klärschlamm auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Boden ist eine Bodenuntersuchung auf die in der AbfKlärV genannten Schwermetalle (Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink) durchzuführen. Diese Untersuchung ist nach 10 Jahren zu wiederholen.

Für die bei der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung genutzten Böden ist ein Klärschlammkataster zu führen.

Der Klärschlammentsorger muss die beabsichtigte Klärschlammaufbringung spätestens zwei Wochen vor der Abgabe gegenüber der zuständigen Behörde (untere Abfallbehörde der Landkreise und kreisfreien Städte) und der landwirtschaftlichen Fachbehörde durch Übersenden einer Durchschrift des ausgefüllten Lieferscheins anzeigen.

Bestandteil des Lieferscheinverfahrens sind unter anderem folgende Erklärungen:

- Uneingeschränkte Eignung der Flächen zur Klärschlammausbringung.
- Übereinstimmung der im Lieferschein angegebenen Flächen mit den tatsächlichen Ausbringungsflächen.
- Die Lage der Flächen außerhalb eines Landschaft-, Natur- oder Wasserschutzgebietes.
- Die Nutzung betrifft nur landwirtschaftliche Nutzflächen, nicht jedoch Dauergrünland, Obst- und Feldgemüseanbauflächen.
- In den letzten 3 Jahren erfolgte keine Klärschlammaufbringung bzw. weniger als 5 t TS/ha.
- Die Länge der angrenzenden Gewässer/Biotope in Verbindung mit den einzuhaltenden Abstandsflächen wurden von der Ausbringungsfläche abgezogen.

6.2.2 Thermische Klärschlamm Entsorgung

Die thermische Entsorgung von Klärschlamm umfasst die Verbrennung in Monoverbrennungsanlagen und die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, in Zementwerken oder in Abfallverbrennungsanlagen. Darüber hinaus wird seit einigen Jahren intensiver an alternativen Entsorgungsmöglichkeiten gearbeitet, wie beispielsweise der Nassoxidation, der Hydrolyse, der Pyrolyse, der Hydrothermale Karbonisierung (HTC) oder der Niedertemperaturkonvertierung.

In Deutschland wird rd. die Hälfte des Klärschlamm (ca. 1 Mio. t TS/a) bereits heute schon thermisch entsorgt. Dabei hat die Monoverbrennung einen Anteil von 43 %. Ein etwa ebenso großer Anteil des Klärschlamm wird in Kraftwerken mitverbrannt. Die Zementindustrie verwertet 10 % thermisch und in Müllverbrennungsanlagen werden ca. 3 % des thermisch entsorgten Klärschlamm verbrannt.

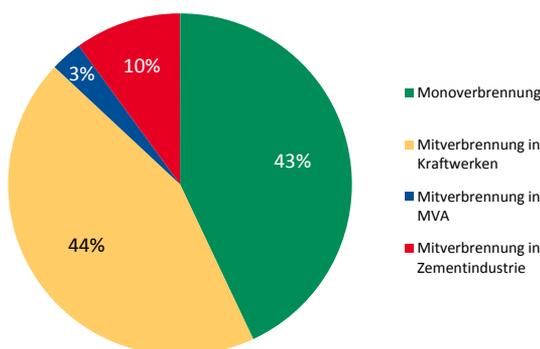


Bild 6.4: Thermische Klärschlamm Entsorgung in Deutschland (Lehmann, 2013)

6.2.2.1 Monoverbrennung

Bei der Monoverbrennung wird grundsätzlich nur Klärschlamm als Brenngut in der Verbrennungsanlage eingesetzt. Da der Heizwert der meisten Nassklärschlämme nicht für eine selbstgängige Verbrennung ausreicht, muss dieser entweder durch Trocknung angehoben werden oder die Verbrennung durch den Zusatz von geringen Mengen an Stützbrennstoff ausgeglichen werden. Diese Brennstoffe müssen für die entsprechende Verbrennungstechnik geeignet sein.

Monoverbrennungsanlagen haben den Vorteil, dass sie – besonders auch im Bereich der Rauchgasreinigung – auf die Schadstoffe im Klärschlamm ausgelegt werden können.

Gegenwärtig sind 26 Monoverbrennungsanlagen in Deutschland in Betrieb. Sie verfügen über eine Kapazität von insgesamt ca. 820.000 t TS/a. Adam und Krüger (2013) geben einen guten Überblick über die Situation der Monoverbrennungsanlagen in Deutschland (siehe Tabelle 6.1).

	Anzahl	Kapazität TS/a	Anteil %
Anlagen insgesamt	26	818.000	
kommunal	20	575.000	70
betrieblich	6	243.000	30
Wirbelschicht	19	663.000	81
Rostfeuerung	2	58.000	7
Alternative Verfahren	5	97.000	12

Tabelle 6.1: Anlagentypen und Kapazitäten der Klärschlammverbrennungsanlagen in Deutschland

Nach Lehrmann (2013) werden derzeit ca. 430.000 t TS/a in Monoverbrennungsanlagen verbrannt. Legt man eine technische Verfügbarkeit der Kapazitäten von 85 % zugrunde, so ergibt sich eine vorhandene freie Kapazität der Anlagen von ca. 38 %.

Räumlich betrachtet ist für Mecklenburg-Vorpommern die Monoklärschlammverbrennungsanlage auf der Kläranlage Köhlbrandhöft in Hamburg (VERA) eine nahe- liegende Option für die thermische Verwertung von Klärschlamm. Aufgrund des hohen Auslastungsgrades

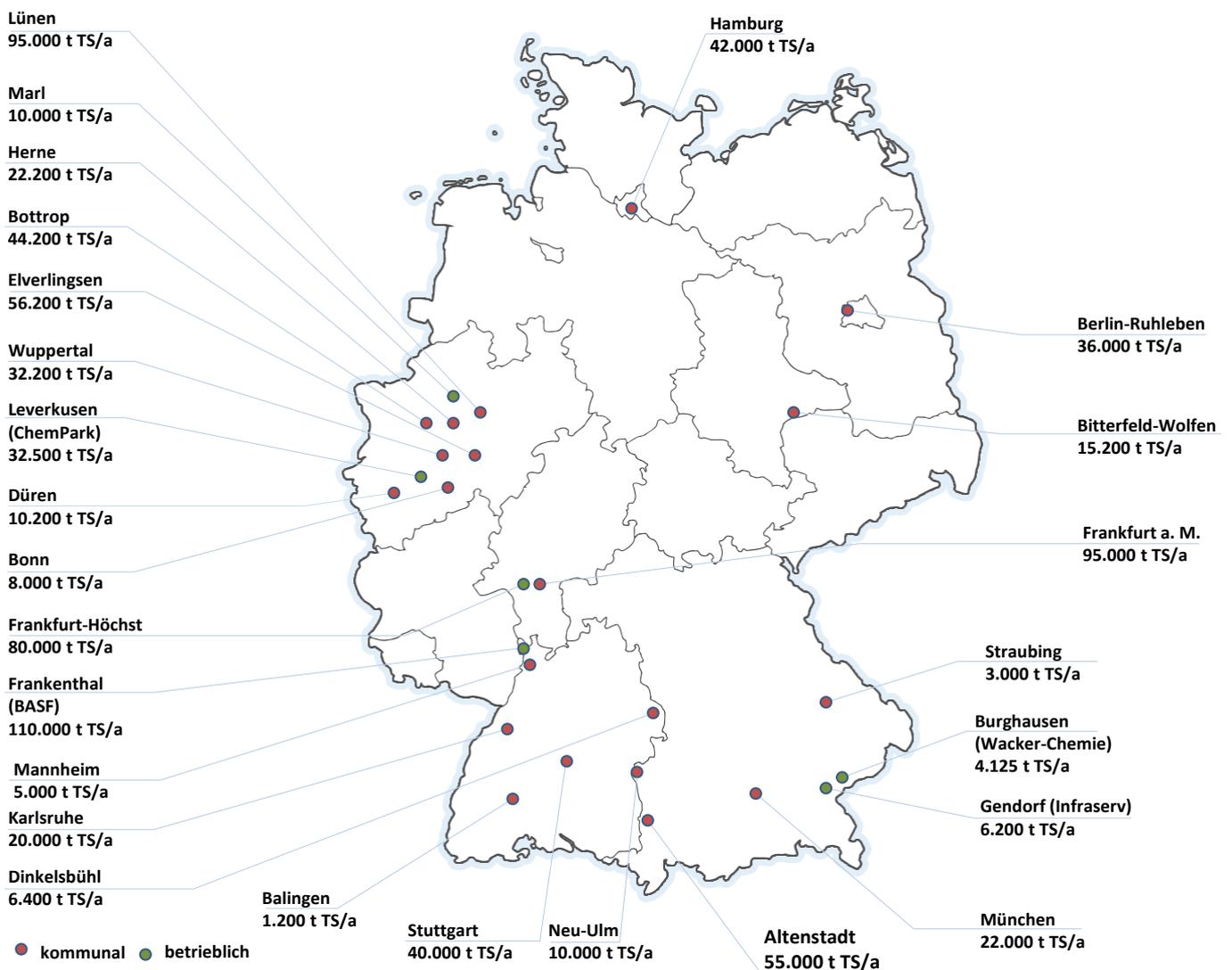


Bild 6.5: Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Deutschland (Adam und Krüger, 2013)

bietet jedoch die VERA nicht die Möglichkeit, den ab 2015 thermisch zu entsorgenden Klärschlamm aus Mecklenburg-Vorpommern vollständig mit zu entsorgen.

Die wichtigsten verfahrenstechnischen Schritte bei der Klärschlammverbrennung sind: Trocknung, Verbrennung und Rauchgasreinigung.

Klärschlamm-trocknung

Vor der Klärschlammverbrennung ist eine Trocknung zum Erreichen des erforderlichen Heizwertes notwendig. Nach dem DWA-Merkblatt 379 (2002) wird zwischen teilgetrocknetem (< 85% TS) und vollgetrocknetem (> 85% TS) Klärschlamm unterschieden.

Klärschlamm kann, wie bereits im Kapitel 5.1.3.3 besprochen, dezentral auf der Kläranlage oder in direkter räumlicher und energetischer Verbindung mit der Verbrennung getrocknet werden.

Der Vorteil der dezentralen Trocknung besteht in der Reduktion des Klärschlammvolumens und der Verringerung der Transportkosten. Nachteilig sind jedoch der notwendige Energiebezug von Dritten bzw. die höheren Kosten.

Der energetische Nutzen des Heizwertes von Klärschlamm ist jedoch am größten, wenn die Trocknung am Standort der Verbrennung erfolgt. Der Energiebedarf für das Trocknen kann vollständig aus der Verbrennungswärme gedeckt werden. Darüber hinaus besteht nach Beckmann (2010) die Möglichkeit, die zum Trocknen eingesetzte thermische Energie mit den Brüden einer weiteren Nutzung zuzuführen.

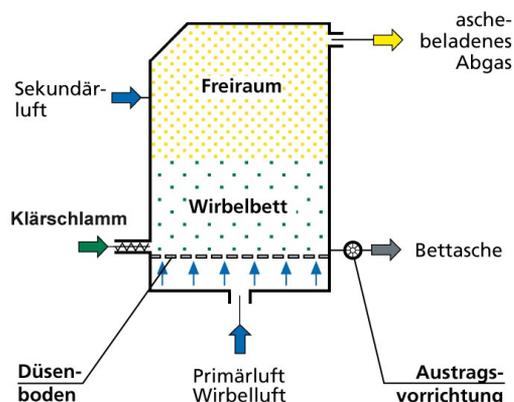


Bild 6.6: Stationäre Wirbelschichtfeuerung (Thome-Kozmiensky, 2013)

Verbrennung

Die besonderen Herausforderungen bei der Verbrennung von Klärschlamm liegen unter anderem in seinem vergleichsweise geringen Heizwert, seinem hohen Wassergehalt und seinem hohen Aschegehalt. Entsprechend der Tabelle 6.1 ist die Verbrennung von Klärschlamm in einem Wirbelschichtreaktor als Stand der Technik anzusehen. Nach Thome-Kozmiensky (2013) ist der Energie- und Stoffaustausch in der Wirbelschichtverbrennung für thermische und chemische Prozesse gerade mit Bezug auf Klärschlamm nahezu ideal.

Rauchgasreinigung

Die Anforderungen an die Rauchgasreinigung sind in der 17. BImSchV geregelt. Wirbelschichtfeuerungsanlagen haben eine höhere Staubbelastung im Rauchgas als andere Feuerungssysteme. Daher schließt sich an den Kessel eine erste Rauchgasreinigungsstufe zur Abscheidung von Flugasche an. Dazu dient ein Zyklon oder ein Elektrofilter. Da bei der Verbrennung des Klärschlammes ein Teil der Schwermetalle verdampft, ist die Flugasche besonders schwermetallhaltig. Grundsätzlich wird zwischen trockenen und nassen Abgasreinigungsverfahren unterschieden (Karpf et al., 2013).

6.2.2.2 Mitverbrennung

Die Mitverbrennung von Klärschlamm findet im überwiegenden Maße in Braunkohlekraftwerken statt. Steinkohlekraftwerke werden aufgrund ihres besseren Regelverhaltens vermehrt als Spitzenkraftwerke eingesetzt und sind daher weniger geeignet für die Mitverbrennung von Klärschlamm.

Im Falle der Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken müssen entsprechende Maßnahmen für die Lagerung, die innerbetriebliche Förderung sowie für die Einbringung in den Kohlekessel getroffen werden. Aus technischer Sicht (z.B. Gewährleistung eines hohen Wirkungsgrades) ist die Mitverbrennung von teiltrocknetem Klärschlamm vorteilhaft. Dementsprechend ist der Annahmepreis von nicht vorgetrocknetem Klärschlamm zur Mitverbrennung höher.

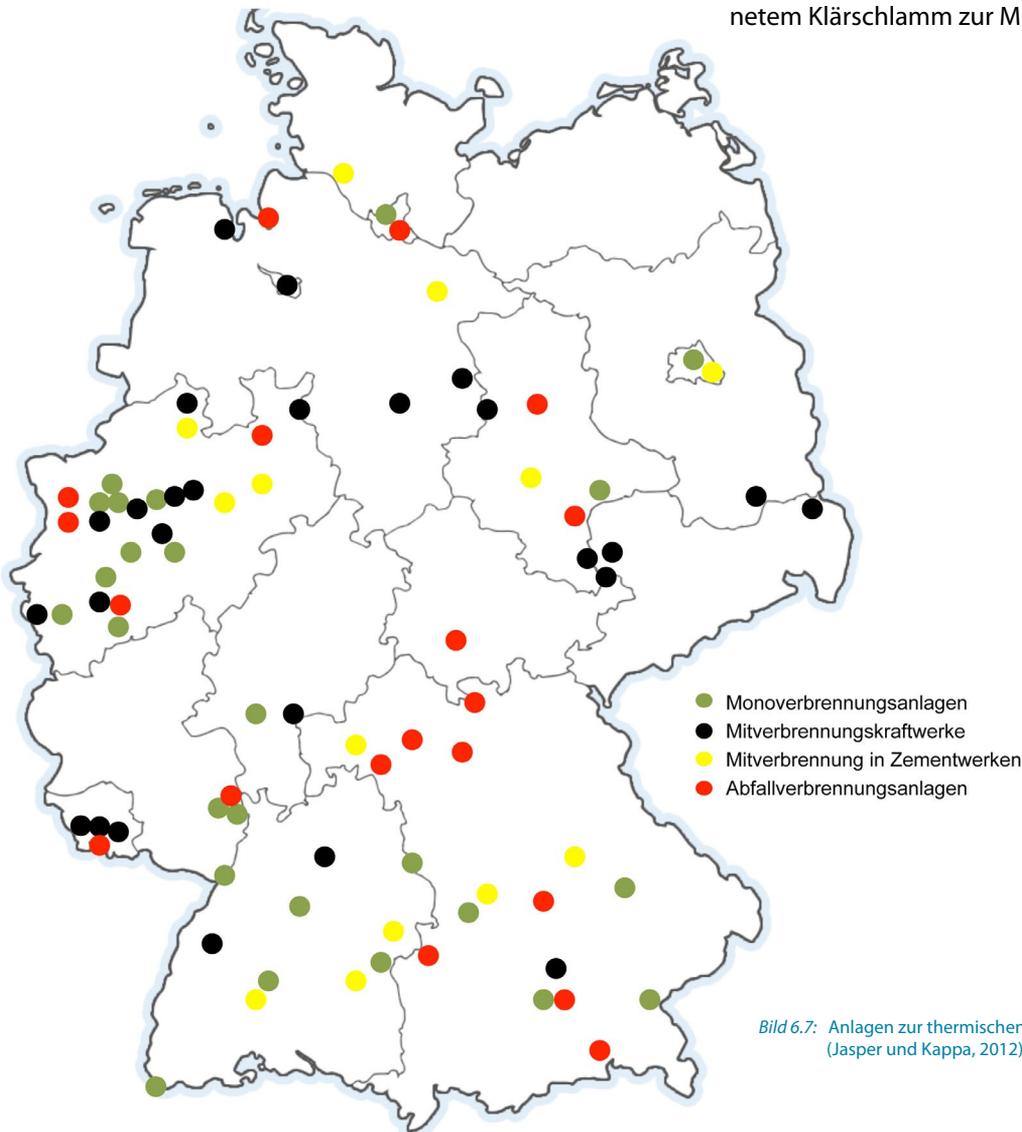


Bild 6.7: Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland (Jasper und Kappa, 2012)

Je nach Schadstoffgehalt des eingesetzten Klärschlammes und dessen Menge ist auch eine Anpassung der Einrichtungen zur Reinigung des Abwassers und des Rauchgases (z.B. flüchtige Schwermetalle) erforderlich. Vor allem Quecksilber wird durch den Klärschlamm eingetragen und findet sich als leichtflüchtige Komponente im Rauchgas wieder.

Lehrmann (2013) und Jasper und Kappa (2012) schätzen die verfügbare Mitverbrennungskapazität der Kohlekraftwerke in Deutschland auf etwa 500.000 t TS/a.

Die Mitverbrennung in Zementwerken setzt eine Volltrocknung des Klärschlammes auf über 90 % TS voraus. Hohe Phosphor- und Quecksilbergehalte beeinflussen die Qualität des Zements nachteilig, so dass nur eine begrenzte Menge an Klärschlamm bei der Mitverbrennung in Zementwerken zum Einsatz kommen kann.

Die Rauchgasreinigung kann bei der Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken problematisch für die Einhaltung der durch die 17. BImSchV vorgegebenen Grenzwerte für Quecksilber werden. Insofern darf der Anteil des mitverbrannten Klärschlammes und dessen Quecksilberkonzentration nicht zu hoch sein.

Darüber hinaus sind lange Stillstandszeiten der Anlagen üblich und machen entsprechende Lager notwendig. Derzeitig existieren Mitverbrennungskapazitäten von ca. 120.000 t TS/a (Jasper und Kappa, 2012).

Müllverbrennungsanlagen sind ebenfalls in der Lage, Klärschlamm mitzuverbrennen. Die Menge und die Konsistenz des Klärschlammes dürfen nicht dazu führen, dass es zu Klumpenbildung kommt. Eine gute Einmischung in den Müll ist daher sehr wichtig. Aufgrund seines niedrigen Heizwertes eignet sich Klärschlamm dazu, den erhöhten Heizwert des Mülls im Sommer zu kompensieren. Eine Trocknung des Klärschlammes ist daher in diesem Fall nicht erforderlich.

Der Vorteil der Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllverbrennungsanlagen besteht in den bereits bestehenden Anlagen zur Abgasreinigung. Müllverbrennungsanlagen haben gegenwärtig eine verfügbare Kapazität für die Mitverbrennung von Klärschlamm von etwa 100.000 t TS/a. Aufgrund der beträchtlichen Überkapazitäten bei der Müllverbrennung ist damit zu rechnen, dass das freie Potenzial für die Mitverbrennung von Klärschlamm genutzt werden wird.

Aus dem Bild 6.7 geht hervor, dass sich die Mehrzahl der thermischen Klärschlammbehandlungsanlagen im Westen und Süden Deutschlands befinden. Im Nordosten und speziell in Mecklenburg-Vorpommern existieren keine Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung. Lediglich die thermische Abfallverwertungsanlage Ludwigslust könnte ggf. kleinere Chargen entwässerten Klärschlammes zur Mitverbrennung annehmen.

6.2.3 Kosten

Die Kosten für die thermische Entsorgung setzen sich im Wesentlichen aus den Transportkosten und den Trocknungs- und Verbrennungskosten zusammen.

Transport

Aus einer Umfrage in Mecklenburg-Vorpommern wurden aktuelle Brutto-Transportkosten in EUR/t OS in Abhängigkeit der Transportentfernung ermittelt. Das Ergebnis dieser Umfrage ist in der Abbildung 6.8 dargestellt. Basis der Kalkulation war entwässertes Klärschlamm mit einer Transportmasse von 25 t.

Dezentrale Trocknung

Die Kosten für die dezentrale Trocknung können erheblich variieren. Maßgeblich sind hier die Investitionskosten für die Trocknungsanlage und die Kosten für die Energiebereitstellung. Im Kap. 5.1.3.3 wurde beispielhaft auf die solare Klärschlamm-trocknung eingegangen, da es sich hier um eine kläranlagenbezogene Klärschlamm-trocknung handelt und keine weiteren Zwischentransporte notwendig sind. Hier wurde ein Brutto-Preis von 60 EUR/t OS ermittelt. Andere Möglichkeiten der dezentralen Trocknung, beispielsweise an Standorten mit Wärmeüberschuss, sind ebenso denkbar. Kosten von weniger als 40 EUR/t OS sind durchaus möglich. Dabei ist jedoch der spezifisch teure Transport von der Kläranlage zur Trocknungsanlage zu berücksichtigen.

Verbrennung mit zentraler Trocknung

Für die Trocknung und Verbrennung von entwässertem Klärschlamm mit einem TS-Gehalt von > 22 % und einem Glühverlust von > 55 % an einem gemeinsamen Standort sind gegenwärtig Brutto-Kosten von 50 bis 60 EUR/t OS üblich. Dabei wird davon ausgegangen, dass 40 % dieser Kosten für die Trocknung und 60 % für die Verbrennung anfallen. Die Kosten der thermischen Entsorgung hängen von der Auslastung der Verbrennungsanlage, der Größe und der Qualität der zu verbrennenden Charge ab.

Spezifische Kosten

Bei der Umstellung von einer landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung auf eine thermische Klärschlamm-entsorgung ist mit einem Anstieg in der Abwassergebühr von ca. 7-8 ct/m³ Abwasser (Schlammproduktion bei 55 kg OS/(EW*a) und Abwasseranfall bei 100 l/(EW*d)) zu rechnen. Bezogen auf die Jahreskosten der Klärschlamm-entsorgung bei einer in Mecklenburg-Vorpommern üblichen Abwassergebühr von beispielsweise 3,00 EUR/m³ würde dies einen Kostenanstieg von 1,6 auf 4,4 EUR/(EW*a) und eine Erhöhung der Abwasser-jahreskosten um 2,5 % bedeuten.

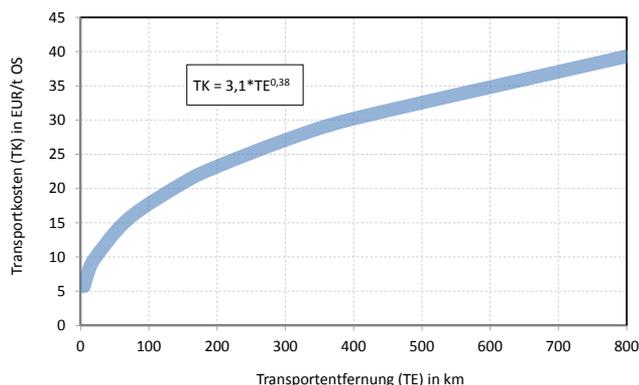


Bild 6.8: Brutto-Transportkosten für entwässerten Klärschlamm



Bild 6.9: Mittlere Jahresabwasserkosten und die darin enthaltenden Klärschlamm-entsorgungskosten

6.3 Phosphorrückgewinnungspotenziale

6.3.1 Möglichkeiten und Grenzen der Phosphorrückgewinnung

Der im Rohabwasser enthaltene gelöste Phosphor wird mit Hilfe des biologischen Wachstums und chemischer Fällprozesse in partikulärer Form aufkonzentriert und mit dem aus der biologischen Stufe abgezogenen Überschussschlamm aus dem Abwasserstrom entfernt. Die verbleibenden niedrigen P-Konzentrationen sind für ein wirtschaftliches P-Recycling aus dem gereinigten Abwasser viel zu niedrig. Durch Rücklösungen bei der Schlammfäulung kann sich die P-Konzentration in den Schlammwässern, insbesondere bei Kläranlagen, die das Verfahren der vermehrten biologischen P-Elimination einsetzen, deutlich erhöhen. Der überwiegende Teil des Phosphors verbleibt jedoch mit der nicht aufgeschlossenen Biomasse und in Form von Fällungsprodukten im ausgefaulten Schlamm. Durch eine thermische Behandlung dieser Schlämme kann der Phosphor in den hierbei erzeugten Aschen weiter aufkonzentriert werden. Die möglichen Verfahrensansätze für ein P-Recycling bei der Schlammbehandlung lassen sich damit in drei Gruppen unterteilen.

Die P-Konzentrationen in den einzelnen Stoffströmen stellen sich wie folgt dar:

- Rohabwasser ca. 8-12 mg P_{ges} /l
- Gereinigtes Abwasser ca. 1-2 mg P_{ges} /l
- Schlammwasser ca. 20-100 mg P_{ges} /l
- Faulschlamm ca. 6,5 % P_2O_5 des TS
- Klärschlammasche ca. 10-20 Mass.-% P_2O_5

Die in der Klärschlammasche erreichbaren P-Gehalte liegen um etwa 50 bis 70 % unter den Phosphatgehalten von Rohphosphatdünger oder Triplesuperphosphat (Waida et al., 2010). Bei der Verbrennung wird der Phosphor zudem in schwerlösliche Mineralphasen mit einer geringen Pflanzenverfügbarkeit überführt. Es ist daher erforderlich, das Phosphat durch eine geeignete thermochemische Reaktion aufzuschließen und in eine für Pflanzen verfügbare Form zu überführen (Drissen, 2012). Aufgrund der hierbei möglichen Extraktion von Schwermetallen können Phosphate aus Klärschlammaschen insbesondere niedrigere Cadmium-Konzentrationen als Rohphosphate aufweisen (Lehmkuhl, 2013). Bei Klärschlammaschen können nach technischer Aufbereitung theoretisch über 90 % des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors nutzbar gemacht werden. Die hierzu eingesetzten technischen Verfahren, wie z.B. PASCH, RecoPhos oder ASH-DEC (Montag et al., 2010), weisen spezifische Recyclingraten von etwa 80 bis über 90 % auf. Unter Annahme einer Elimination von 90 % des im Abwasser enthaltenen Phosphors über den Schlammweg ergibt sich damit ein Recyclingpotenzial von bis zu 80 % bezogen auf die Phosphor-Fracht im Zulauf der Kläranlage.

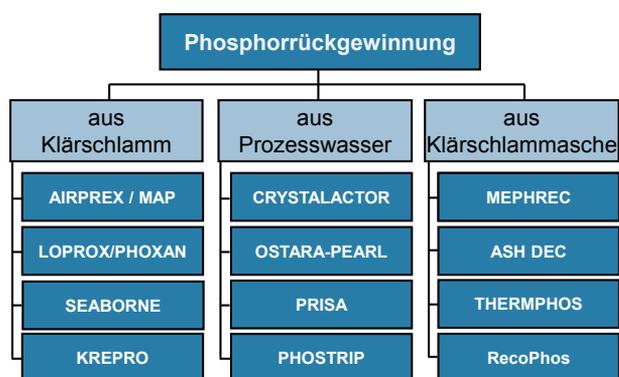


Bild 6.10: Verfahren zur Phosphorrückgewinnung

6.4 Szenarien der Klärschlamm Entsorgung in Mecklenburg-Vorpommern

6.4.1 Ausgangssituation

Eine Besonderheit ergibt sich bei Industrieabwässern, die einen besonders hohen P-Gehalt aufweisen. Hier kann sich eine direkte P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom als wirtschaftlich erweisen. In Mecklenburg-Vorpommern betreibt zum Beispiel die Firma Remondis auf einer Betriebskläranlage der Humana Milchunion eine solche Anlage zur Rückgewinnung von Phosphor aus dem phosphorreichen Abwasserstrom (REPHOS-Verfahren).

6.3.2 Langzeitlagerung von Klärschlamm asche

Die Kosten für die Phosphatgewinnung aus Klärschlamm asche liegen mit 3 bis 6 EUR/kg P_2O_5 (Jardin, 2011) weit über den aktuellen Marktpreisen für Rohphosphat. Zukünftige Preissteigerungen beim Rohphosphat stehen steigenden Bezugskosten beim Strom- und Chemikalieneinsatz gegenüber. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist ein P-Recycling aus Klärschlamm asche bei den heutigen Randbedingungen noch nicht möglich.

In der Novelle der Deponieverordnung vom 02.05.2013 ist die Langzeitlagerung von Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung explizit aufgeführt. Ziel ist eine spätere Rückgewinnung von Phosphor aus diesem „Rohstoffzwischenlager“, wenn es technisch möglich und wirtschaftlich ist. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert hierzu im Rahmen der Fördermaßnahme „r3 - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ das Verbundvorhaben „ZWIPHOS – Entwicklung eines Zwischenlagerungskonzepts für Klärschlammmonoverbrennung aschen für Deutschland mit dem Ziel einer späteren Phosphorrückgewinnung“, welches die rechtlichen und technischen Möglichkeiten einer Zwischenlagerung von Klärschlammmonoverbrennung aschen in Deutschland untersucht.

In diesem Kapitel werden zukünftige Entwicklungstendenzen der Klärschlamm Entsorgung für das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern beschrieben. Die Triebkräfte für die zukünftigen Veränderungen in der Klärschlamm Entsorgung wurden im Kapitel 4 diskutiert. Aus der Bestandsaufnahme des Kapitels 3 geht hervor, dass ca. 30 % der Klärschlamm e in Mecklenburg-Vorpommern ab 2015 nicht mehr den gegenwärtig genutzten Weg der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung gehen können. Damit existiert bereits kurzfristig der Bedarf an alternativen, vornehmlich thermischen Entsorgungsmöglichkeiten in Mecklenburg-Vorpommern. Dieser kann jedoch nur mittelfristig gedeckt und muss möglicherweise langfristig erweitert werden. Die in diesem Kapitel untersuchten Szenarien erhalten daher einen zeitlichen Bezug:

Das **kurzfristige Szenario** für die Klärschlamm Entsorgung der kommenden ca. 5 Jahre betrachtet jene Zeit bis zur Errichtung von Kapazitäten für eine thermische Klärschlamm Entsorgung im Land.

Im Rahmen eines **mittelfristigen Szenarios** wird auf der Basis des Standes der Technik beschrieben, wie eine wirtschaftliche Lösung für eine thermische Klärschlamm Entsorgung in Mecklenburg-Vorpommern strukturiert sein kann. Der Zeithorizont dieses Szenarios beträgt 5 – 15 Jahre.

Als **langfristiges Szenario** wird der Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung betrachtet. Aufgrund der Dynamik von gesellschaftlichen Entwicklungen ist das Skizzieren eines Zeithorizontes für dieses Szenario nicht möglich.

6.4.2 Szenario - Kurzfristige Klärschlamm Entsorgung

6.4.2.1 Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung

Das Ablaufende der Übergangsfrist in der geltenden Düngemittelverordnung für das Einhalten von verschärften Grenzwerten für Schwermetalle im Jahre 2015 liegt im Zeithorizont des kurzfristigen Szenarios. Die Auswirkungen in Mecklenburg-Vorpommern sind signifikant, da ca. 30 % der bisher landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme dann anderweitig entsorgt werden müssen.

In den kurzfristigen Zeithorizont fällt auch das Auslaufen der Übergangsfrist für den Einsatz von synthetischen Polymeren bei der Schlammbehandlung. Gegenwärtig ist unklar, ob die zur Verfügung stehenden synthetischen Polymere die ab 2017 geforderte Abbaubarkeitscharakteristik besitzen.

Des Weiteren ist eine Novellierung der Klärschlammverordnung auf der Basis des letzten Entwurfes von 2010 wahrscheinlich. Aufgrund des dort formulierten Hygienisierungsgebotes wird die Verfahrensweise der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung deutlich erschwert. Es ist zu erwarten, dass gerade kleinere Klärschlammproduzenten Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Klärschlammproduktion und -entsorgung anstreben, da für qualitätsgesicherten Klärschlamm keine Hygienisierungspflicht vorgesehen ist.

6.4.2.2 Thermische Klärschlamm Entsorgung

Für einen großen Teil des Klärschlammes aus Mecklenburg-Vorpommern, der zukünftig verbrannt werden muss, werden die Kosten für die thermische Entsorgung zunächst relativ hoch sein, da der Anteil der Transportkosten nicht mehr nur 10 – 20 % an den Entsorgungskosten ausmacht, wie es in Bundesländern mit eigenen Verbrennungskapazitäten der Fall ist, sondern eher 40 – 50 % betragen wird. Entsorgungskosten von insgesamt 80 – 100 EUR/t OS sind dann für die thermisch zu entsorgende Klärschlämme durchaus denkbar.

Um die thermische Klärschlamm Entsorgung kurzfristig wirtschaftlicher zu gestalten, ist der Klärschlamm aufgrund des hohen Anteils an Transportkosten zukünftig dezentral zu trocknen (siehe Kap. 5.1.3.3). Da jedoch die dezentrale Klärschlamm Trocknung relativ teuer ist, werden besonders Standorte mit Wärmeüberschuss und günstigen Bereitstellungskosten für die thermische Energie interessant.

Für die Klärschlammproduzenten, die von der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung auf thermische Klärschlamm Entsorgung umsteigen, kommt es zu einer erheblichen Steigerung der Entsorgungskosten für Klärschlamm. Damit werden Technologien wirtschaftlicher, die auf eine Reduzierung des Klärschlammaufkommens setzen, wie z.B. anaerobe Stabilisierung und Klärschlamm Desintegration.

Der Wegfall von 12.000 t TS/a für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung bedeutet für Mecklenburg-Vorpommern, dass ca. 4 % mehr Mineraldünger substituiert werden müssen. Bezogen auf die 17.000 ha, auf die in Mecklenburg-Vorpommern jährlich Klärschlamm aufgebracht wird, verringert sich die Klärschlammaufbringung je Hektar von derzeit 2,5 t TS auf 2,1 t TS.

6.4.3 Szenario - Mittelfristige Klärschlamm Entsorgung

6.4.3.1 Ableitung und Beschreibung des Szenarios

Es ist zu erwarten, dass die Errichtung von einer oder mehreren Klärschlammverbrennungsanlagen in Mecklenburg-Vorpommern zu einer Verringerung der Kosten für die thermische Klärschlamm Entsorgung führt.

Das mittelfristige Szenario beschäftigt sich daher mit der Organisation, der Errichtung und dem Betrieb von Kapazitäten der thermischen Klärschlamm Entsorgung in Mecklenburg-Vorpommern.

Basierend auf den Datensätzen der LMS und eigenen Umfragen wird der Klärschlamm von Mecklenburg-Vorpommern nachfolgend hinsichtlich seines möglichen zukünftigen Entsorgungsweges kategorisiert. Auf dieser Grundlage wird eine Klärschlammverbrennungsanlage dimensioniert. In Abhängigkeit der Größe, der Auslastung und anderer Parameter werden die Entsorgungskosten prognostiziert.

Darauf aufbauend wird untersucht, ob die Errichtung von einer oder mehreren Klärschlammverbrennungsanlagen sinnvoll ist und was diesbezüglich vorteilhafte Standorte charakterisiert. Des Weiteren wird hinterfragt, wer die Akteure bei der Errichtung der Verbrennungsanlagen sein können und in welcher Unternehmensform die thermische Entsorgung organisiert werden kann.

6.4.3.2 Herangehensweise

Für die Ermittlung der Klärschlammmenge, die als Basis für die Dimensionierung einer Klärschlammverbrennungsanlage dient, wird der Klärschlamm in 4 Kategorien eingeteilt.

Klärschlamm, der die neuen Grenzwerte der DüMV (gültig ab 2015)

- stets überschreitet: Kategorie A
- gelegentlich überschreitet: Kategorie B
- zu mehr als 80 % ausschöpft: Kategorie C
- sicher einhält: Kategorie D

Die Kategorien A - C werden im Rahmen dieser Szenarienbetrachtung thermisch verwertet. Betreiber mit einem Klärschlamm nach Kategorie D werden hier nicht berücksichtigt. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass der gesamte thermisch zu entsorgende Klärschlamm nur in einer zentralen Klärschlammverbrennungsanlage verbrannt wird.

6.4.3.3 Dimensionierung

In der Tabelle 6.2 sind die Klärschlamm mängen der jeweiligen Kategorien zusammengestellt.

Kat.	Beschreibung	KS Prod. t OS/a	TS Prod. t TS/a	oTS Prod. t oTS/a	Asche Prod t Asche/a	Anteil %
A	Stets GWÜ	53.500	11.500	7.200	4.300	28
B	Gelegentliche GWÜ	2.300	500	300	200	1
C	80 % GWA	7.500	2.000	1.000	800	5
	Summe A - C	63.300	14.000	8.500	5.300	34
D	Sichere GWE	123.600	27.000	17.100	10.100	66
	Summe MV	186.900	41.000	25.600	15.400	100

GWÜ = Grenzwertüberschreitung, GWA = Grenzwertausschöpfung, GWE = Grenzwerteinhaltung

Tabelle 6.2: Klärschlamm mängen mit Bezug auf die Grenzwerteinhaltung nach der DüMV ab 2015

Danach ergibt sich aus der Summe der Kategorien A - C eine Basisgröße von ca. 14.000 t TS/a, entsprechend 34 % des Klärschlammaufkommens in Mecklenburg-Vorpommern, für die Errichtung einer zentralen Klärschlammverbrennungsanlage.

Eine Klärschlammverbrennungsanlage kann unter technischen Gesichtspunkten im unteren Arbeitsbereich mit 70 % Auslastung betrieben werden. Bei diesem Auslastungsgrad und einem jährlichen Entsorgungsbedarf von 14.000 t TS sollte die Verbrennungsanlage für ca. $14.000 / 70\% = 20.000$ t TS/a ausgelegt werden. Bei einem TS-Gehalt von 22 % entspricht das einer Klärschlammmenge von 91.000 t OS/a. Für diese Klärschlammmenge ergibt sich eine vereinfachte Massenbilanz der Klärschlammverbrennungsanlage entsprechend der folgenden Abbildung:

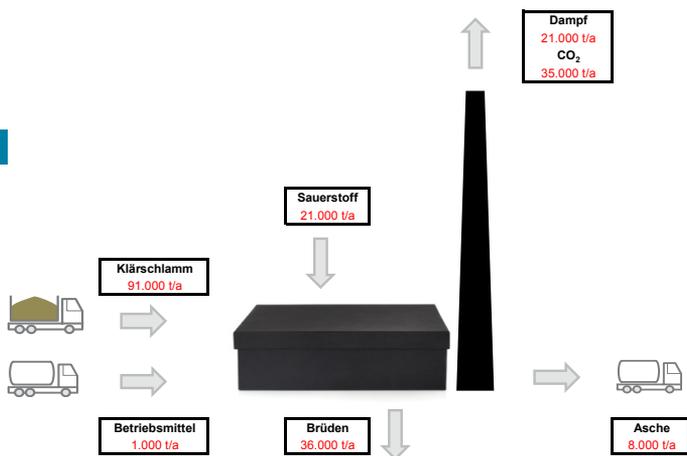


Bild 6.11: Vereinfachte Massenbilanz einer Klärschlammverbrennungsanlage für 20.000 t TS/a

Logistisch bedeutet dies, dass bei einer Transportmenge von 22 t/Ladung am Tag 10 – 15 LKW-Ladungen mit entwässertem Klärschlamm auf der Anlage angenommen werden. Demgegenüber werden pro Woche 5 LKW-Ladungen Asche abgefahren.

6.4.3.4 Technisches Konzept

Auf dem Gebiet der thermischen Klärschlamm-entsorgung hat es in der Vergangenheit eine Vielzahl von technischen Entwicklungen gegeben. Das Konzept für eine Klärschlammverbrennungsanlage, das am häufigsten in Deutschland zu finden ist, besteht im Wesentlichen aus Annahmestation und Klärschlambunker, Kontakttrockner, Wirbelschichtverbrennung, Rauchgasreinigung und Anlagen zur Stromerzeugung aus der überschüssigen Wärme. Darüber hinaus sind diverse Speicher (Asche, Betriebsmittel) und andere periphere Anlagenteile Bestandteil des Anlagenkonzeptes.

Im Rahmen dieses Szenarios wird von einer Teiltrocknung am Standort der Verbrennungsanlage auf einen TS-Gehalt von 45 % zum Erreichen eines notwendigen Heizwertes im Klärschlamm von ca. 4.500 kJ/kg TS für die selbstgängige Verbrennung ausgegangen.

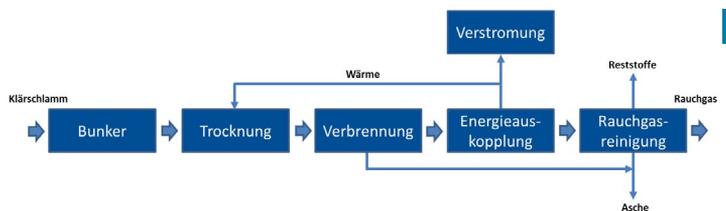


Bild 6.12: Anlagenschema einer Klärschlammverbrennungsanlage

6.4.3.5 Energiebilanz

Bei einer Verfügbarkeit der Anlage von 7.700 h/a ergibt sich eine Brennstoffwärmeleistung von $10 \text{ MW}_{\text{therm}}$ für den Wirbelschichtreaktor. Der vorgeschaltete Trockner hat eine thermische Leistung von $5,2 \text{ MW}_{\text{therm}}$.

Aus einer vereinfachten Energiebilanz entsprechend Bild 6.13 lässt sich ein Wärmeüberschuss von ca. $3,4 \text{ MW}_{\text{therm}}$ (36 %) ableiten, wenn nur entwässerter Klärschlamm angenommen wird.

Basisdaten der Energiebilanz sind ein Heizwert von 13.280 kJ/kg TS bei einem Glühverlust von 62 %. Für das Verdampfen von Wasser wurde für die Kontakttrocknung ein Energieverbrauch von $0,85 \text{ kWh/kg H}_2\text{O}$ angesetzt.

Wird hingegen getrockneter Klärschlamm in einer Größenordnung von beispielsweise 20 % angenommen, so könnte bei einem Trocknungsgrad von 85 % ein thermischer Überschuss von ca. $5,0 \text{ MW}$ (50 %) erwirtschaftet werden können.

Die Energieproduktion aus dem Wärmeüberschuss kann über eine Dampfturbine oder ORC-Module erfolgen. Bei einem elektrischen Wirkungsgrad von nur 17 % wäre es möglich, den Eigenbedarf an Elektroenergie zu decken.

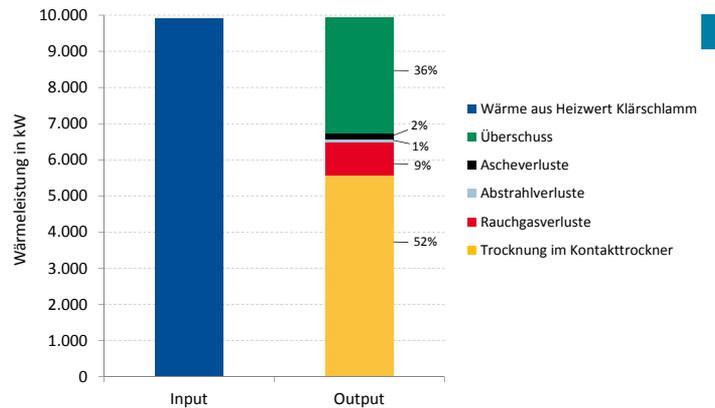


Bild 6.13: Vereinfachte Energiebilanz einer Klärschlammverbrennungsanlage für 20.000 t TS/a

Bild 6.14: Klärschlammmasche



6.4.3.6 Wirtschaftlichkeit

Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit einer Klärschlammverbrennungsanlage werden die Brutto-Kosten in EUR/a und die spezifischen Kosten in EUR/t OS bestimmt. In der Tabelle 6.3 sind die Kostengruppen und deren Berechnungsgrundlage berücksichtigt.

Für die Ermittlung der Kapitalkosten müssen zunächst die Investitionskosten abgeschätzt werden. Dazu wurden Herstellerangebote und reale Kosten von Klärschlammverbrennungsanlagen genutzt, die in der jüngeren Vergangenheit errichtet wurden. Auf dieser Grundlage wurden die im Bild 6.15 dargestellten Kostenfunktionen abgeleitet.

Für eine Klärschlammverbrennungsanlage des mittelfristigen Szenarios entstehen damit Investitionskosten in Höhe von ca. 26 Mio. EUR (brutto) inklusive Planungs- und Nebenkosten.

Diese Kosten sind Bruttokosten und basieren auf einer Auslastung der Anlage von 70 %. Es wird nur entwässertes Schlamm angenommen.

Betriebsmittelverbrauch
Kalkhydrat: Verbrauch ca. 700 t/a; Preis: 160 EUR/t
Herdofenkoks: Verbrauch ca. 38 t/a; Preis: 800 EUR/t
Quarzsand: Verbrauch ca. 120 t/a; Preis: 70 EUR/t
Ascheentsorgung zur Langzeitlagerung
Entsorgungskosten: 40 EUR/t
Strom
Bezugskosten: 0,20 EUR/kWh
Einspeisevergütung: 0,06 EUR/kWh
Personalbedarf
8 Arbeitskräfte mit Std.-Lohn von 35,00 EUR/Std.
Wartung/Reparatur
2,5 % der Investitionskosten der technischen Ausrüstung
Versicherung und Sonstiges
Pauschal 50.000 EUR/a
Kapitalkosten
Nutzungsdauer Bautechnik 30 Jahre
Nutzungsdauer technische Ausrüstung 15 Jahre
Zinssatz: 3,5 %
Wagnis/Gewinn
5 % der Jahreskosten

Tabelle 6.3: Ansätze für die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Klärschlammverbrennung

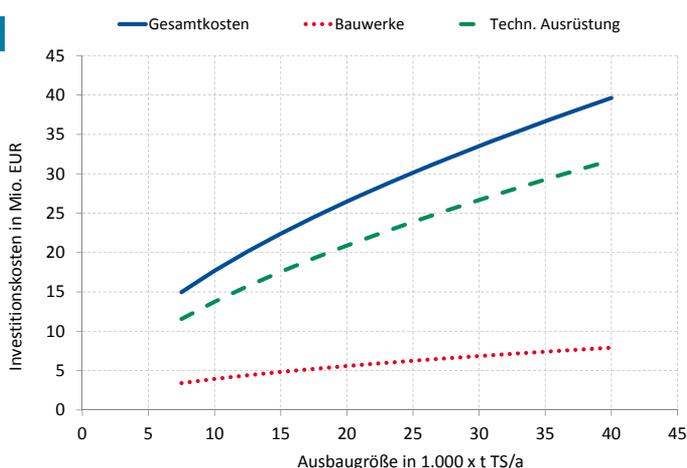


Bild 6.15: Abschätzung der Investitionskosten für Klärschlammverbrennungsanlagen

Kostengruppe			
	EUR/a	EUR/ t OS	%
Betriebsmittel	106.000	1,7	3
Strombezug	-5.000	-0,1	0
Erdgasbezug	8.000	0,1	0
Ascheentsorgung	205.000	3,7	6
Personal	493.000	7,7	13
Versicherung/Sonstiges	50.000	0,8	1
Wartung/Reparatur	626.000	9,8	17
Kapitalkosten	2.041.000	32,0	55
Wagnis/Gewinn 5%	176.000	2,8	5
Summe	3.700.000	58,6	100

Tabelle 6.4: Jahreskosten und spezifische Kosten der Klärschlammverbrennung für 20.000 t TS/a

6.4.3.7 Auslastungsgrad

Ist der Anlagenbetreiber jedoch in der Lage, die Auslastung auf über 70 % zu steigern, so kann entsprechend der folgenden Abbildung der Klärschlamm zu erheblich geringeren Kosten verbrannt werden. Die Entsorgungskosten sinken bei einer Kapazität von 20.000 t TS/a und einer Auslastung von 100 % auf 42,7 EUR/t OS.

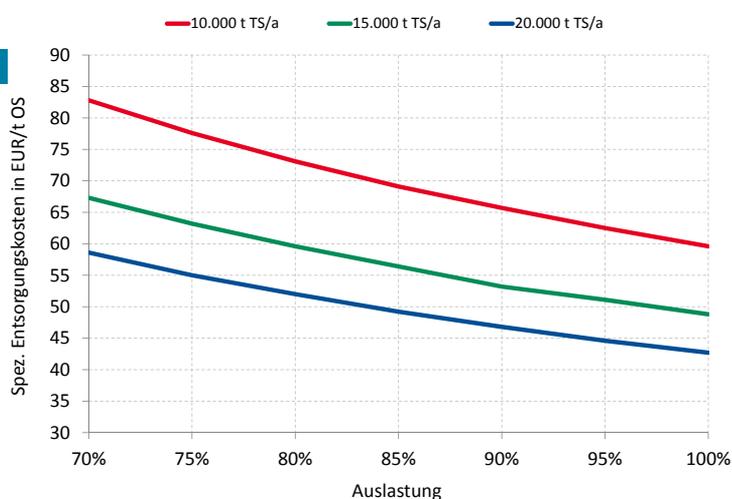


Bild 6.16: Entsorgungskosten in Abhängigkeit der Anlagengröße und der Auslastung

6.4.3.8 Zentrales versus regionales Anlagenkonzept

Darüber hinaus geht aus dem Bild 6.16 hervor, dass die Anlagengröße einen erheblichen Effekt auf die Entsorgungskosten hat. Im Vergleich eines zentralen Anlagenkonzeptes mit 20.000 t TS/a und eines regionalen Anlagenkonzeptes mit 2 Anlagen je 10.000 t TS/a wird angenommen, dass sich die Transportentfernung beim regionalen Anlagenkonzept gegenüber dem zentralen halbiert.

Der Kostenvergleich zeigt, dass der Unterschied beider Varianten bei den Transportkosten (nach der Kostenfunktion entsprechend Bild 6.8) erheblich geringer ist als bei den Verbrennungskosten. Somit ist auf der Basis der zugrunde gelegten Ansätze eine zentrale thermische Klärschlammverwertung wirtschaftlich vorteilhafter als die regionale thermische Klärschlammverwertung. Nachteilig für die zentrale Klärschlammverbrennung sind jedoch die längere Transportstrecke und die damit verbundene schlechtere CO₂-Bilanz. Basierend auf dem Beispiel aus der Tabelle 6.5 ist der CO₂-Ausstoß der zentralen thermischen Klärschlamm Entsorgung aufgrund der längeren Transportwege um ca. 190 t CO₂/a höher. Bezüglich der CO₂-Gesamtemission (Verbrennung und Transport) entspricht das jedoch nur einem Anteil von etwa 1 %.

Für die Entscheidung bezüglich einer oder mehrerer Klärschlammverbrennungsanlagen spielen weiterhin Aspekte, wie Initiativen von Klärschlamm Entsorgern, die Verfügbarkeit von geeigneten Standorten oder die Nähe von Deponien zur Langzeitlagerung von Klärschlammmasche, eine wichtige Rolle.

	zentral	regional	
Anlagengröße	20.000	10.000	t TS/a
Anzahl der Anlagen	1	2	
IK je Anlage	26,5	17,8	Mio. EUR
Verbrennungskosten	43	60	EUR/t OS
Transportstrecke	140	70	km
Transportkosten	20	15	EUR/t OS
Entsorgungskosten	63	75	EUR/t OS

Tabelle 6.5: Wirtschaftlichkeit zentrale und regionale Klärschlammverbrennung

6.4.3.9 Phosphorrückgewinnung

Die Anstrengungen in Europa, Phosphor aus Klärschlamm zurückzugewinnen, sind erheblich. Eine Vielzahl von Ansätzen und Technologien befinden sich in der Entwicklung. Es ist daher mittelfristig möglich, dass sich einzelne dieser Ansätze als technisch zuverlässig und wirtschaftlich vielversprechend entwickeln werden. Eine wichtige Frage ist jedoch, ob sich diese Verfahren allein über den Nutzen und die Vermarktung des Phosphors etablieren werden oder ob auch andere Effekte, wie beispielsweise eine erhöhte Entwässerungsleistung nach der MAP-Fällung, der Phosphorrückgewinnung Rückenwind geben müssen.

Unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen scheint es unwahrscheinlich, dass es in 5 Jahren einen allgemeingültigen Stand der Technik für die Phosphorrückgewinnung geben wird, bei dem ein marktfähiges Düngemittelprodukt entsteht, das mit den bekannten Mineraldüngern unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten konkurrieren kann.

In das mittelfristige Szenario wird daher keines der bereits bekannten und in der Entwicklung befindlichen Verfahren einbezogen, sondern zunächst von einer Langzeitlagerung der Klärschlammaschen ausgegangen.

Für das mittelfristige Szenario wird es gegenüber dem kurzfristigen Szenario nicht zu einer Steigerung des Importes von Mineraldünger kommen.

6.4.3.10 Organisation der thermischen Klärschlammverwertung

Die Errichtung einer Klärschlammverbrennungsanlage setzt vertraglich gesicherte Klärschlammengen voraus. Eine Option ist daher, dass Klärschlammproduzenten mit privatwirtschaftlich arbeitenden Klärschlamm Entsorgern und Anlagenerrichtern in einer gemeinsam agierenden PPP (Public-Private-Partnership) -Gesellschaft kooperieren.

Da in Mecklenburg-Vorpommern die einzelnen Klärschlammproduzenten mit Bezug auf eine thermische Verwertung nur verhältnismäßig kleine Klärschlammengen erzeugen, sind diese Einzelunternehmen kaum in der Lage, als kommunaler Partner im Rahmen einer PPP-Gesellschaft aufzutreten. Daher haben sich 6 größere Klärschlammproduzenten zur „Klärschlammkooperation Mecklenburg-Vorpommern GmbH“ zusammengesetzt. Die Gesellschafter dieser Kooperation verfügen gegenwärtig über ca. 35 % des Klärschlammaufkommens von Mecklenburg-Vorpommern und damit über eine solide Basis für die wirtschaftliche Entsorgung ihres Klärschlammes.

6.4.3.11 Standortbereich der thermischen Entsorgung

Ein Standort für eine Klärschlammverbrennungsanlage wird dort vorteilhafte Effekte bieten, wo sich einerseits ein großer Klärschlammproduzent in der Nähe befindet und andererseits durch die zentrale Lage in Mecklenburg-Vorpommern sich die Transportwege der Zulieferer gleich verteilen. Da der Klärschlammtransport für eine zentrale thermische Klärschlamm Entsorgung eine große Bedeutung hat, ist eine Autobahnanbindung sehr wichtig. Als möglicher Standortbereich kommt somit beispielsweise der Überseehafen der Hansestadt Rostock in Frage. Hier gibt es zusätzlich die Option, die Klärschlammmasche auf dem Seeweg zu einer Deponie oder ggfs. zu einer überregional arbeitenden Phosphorrückgewinnungsanlage zu transportieren.

6.4.4 Szenario – Langfristige Klärschlamm Entsorgung

6.4.4.1 Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung

Das langfristige Szenario beschreibt die Möglichkeit des Ausstiegs aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung. Basis eines solchen Ausstiegs ist eine gesellschaftliche Entwicklung, bei der es zu einem Verzicht auf den landwirtschaftlichen Klärschlammeinsatz kommt.

Beispielgebend für den freiwilligen Verzicht sind diesbezüglich die Initiativen der Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg, die den Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung zur Landesstrategie erklärt haben. Baden-Württemberg war bei der Umsetzung dieser Strategie besonders erfolgreich. Hier konnte innerhalb von 10 Jahren der Anteil an der thermisch entsorgten Klärschlammmenge von 30 % auf über 90 % gesteigert werden. Dies war auch aufgrund vorhandener Kapazitäten in den dortigen Müllverbrennungsanlagen möglich.

Ein gesellschaftlich gewollter Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung bedeutet bei der gegenwärtigen Rechtslage einerseits, dass die Klärschlammproduzenten freiwillig (auch bei Einhaltung der Grenzwerte für Schadstoffe) den Weg der thermischen Klärschlamm Entsorgung wählen. Andererseits müssen auch die Landwirte ebenso freiwillig auf die Verwertung von Klärschlamm auf ihren landwirtschaftlichen Nutzflächen verzichten, da sonst der Import von Klärschlämmen aus anderen Bundesländern oder gar aus Nachbarstaaten einen Ausstieg verhindern würde.

Ohne die Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlamm- asche müssten pro Jahr ca. 2.800 t P₂O₅ zusätzlich als Mineraldünger zur Verfügung gestellt werden.

6.4.4.2 Thermische Klärschlamm Entsorgung

Auf der Grundlage der Tabelle 6.2 wird die notwendige Kapazität für die thermische Klärschlamm Entsorgung für das gesamte Bundesland Mecklenburg-Vorpommern auf 40.000 t TS/a angesetzt, wobei davon ausgegangen wird, dass das Klärschlammaufkommen in der Zukunft aufgrund des steigenden Anteils anaerob stabilisierender Kläranlagen eher zurückgehen wird.

Diese Klärschlammmenge entspricht einer Brennstoffwärmeleistung von etwas mehr als 19 MW_{therm.}. Die Trocknung muss für eine thermische Leistung von ca. 10 MW_{therm.} ausgelegt werden. Bei der thermischen Entsorgung wird eine Aschemenge von ca. 15.000 t/a anfallen.

Auf einer zentralen Klärschlammverbrennungsanlage dieser Größe (40.000 t TS/a) werden pro Tag 30 - 35 LKW mit je 22 t entwässertem Klärschlamm entladen. Die Asche kann mit ca. 3 LKW-Ladungen pro Tag entsorgt werden.

Bei einem Komplettausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung ist nach Tabelle 6.6 eine zentrale Lösung immer noch wirtschaftlich vorteilhafter als eine regionale Lösung mit zwei Klärschlammverbrennungsanlagen. Jedoch ist der Unterschied in den Entsorgungskosten mit 6 EUR/t OS deutlich geringer als im mittelfristigen Szenario (vgl. Tab. 6.5).

	zentral	regional	
Anlagengröße	40.000	20.000	t TS/a
Anzahl der Anlagen	1	2	
IK je Anlage	42,0	28,0	Mio. EUR
Verbrennungskosten	32	43	EUR/t OS
Transportstrecke	140	70	km
Transportkosten	20	15	EUR/t OS
Entsorgungskosten	52	58	EUR/t OS

Tabelle 6.6: Wirtschaftlichkeit therm. Klärschlamm Entsorgung für ganz Mecklenburg-Vorpommern

Bei diesem Vergleich ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass die Kosten für den Klärschlammtransport aufgrund des volatilen Rohölmarktes möglicherweise schneller steigen als die Kosten für die thermische Klärschlamm-entsorgung.

Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass bei einer landesweiten zentralen Lösung Maßnahmen umgesetzt werden, welche die Entsorgungssicherheit dieser Verbrennungsanlage erhöhen, wie beispielsweise das redundante Ausführen von Verfahrensstufen. Das würde zu einer Erhöhung der Investitionskosten über jene der Kostenfunktion entsprechend Bild 6.14 führen. Damit kann eine regionale thermische Klärschlamm-entsorgung mit 2 Klärschlammverbrennungsanlagen für Mecklenburg-Vorpommern als eine realistische Lösung angesehen werden.

6.4.5 Resümee der Szenarienbetrachtungen

Kurzfristig werden etwas mehr als 30 % des Klärschlammaufkommens aufgrund der Verschärfung der Grenzwerte für Schwermetalle nicht mehr landwirtschaftlich verwertet und einer thermischen Entsorgung zugeführt werden müssen. Darüber hinaus wird die Qualitätssicherung bei der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung eine größere Bedeutung bekommen. Es verbleibt eine Unsicherheit bezüglich des Einsatzes von synthetischen Polymeren in der Schlammbehandlung.

Mecklenburg-Vorpommern verfügt über keine Kapazitäten der thermischen Klärschlamm-entsorgung, so dass der Klärschlamm im zeitlichen Rahmen des kurzfristigen Szenarios in anderen Bundesländern verbrannt werden muss. Im Zusammenhang damit werden die Kosten für die thermische Klärschlamm-entsorgung vergleichsweise

hoch sein. Aufgrund des erhöhten Kostendrucks werden Technologien zur Klärschlammreduktion attraktiver.

Mittelfristig ist die Errichtung einer Klärschlammverbrennungsanlage in Mecklenburg-Vorpommern zu erwarten. In Folge dessen wird es, im Vergleich zum kurzfristigen Szenario, zu einer Kostenreduktion bei der thermischen Entsorgung des Klärschlammes in Mecklenburg-Vorpommern kommen. Die wirtschaftliche Basis für die Errichtung einer Klärschlammverbrennungsanlage ist die vertragsmäßige Bindung von Klärschlamm-mengen. Als wirtschaftliche Anlagengröße kann von einer Kapazität entsprechend 15.000 – 20.000 t TS/a ausgegangen werden. Für die Errichtung einer Mono-klärschlammverbrennungsanlage wird mit Investitionskosten in Höhe von 26 Mio. EUR gerechnet. Die Entsorgungskosten werden bei einem Auslastungsgrad von 100 % auf ca. 43 EUR/t OS geschätzt. Die Wirtschaftlichkeit einer Verbrennungsanlage für 20.000 t TS/a ist erheblich höher als von zwei Anlagen mit einer Kapazität von jeweils 10.000 t TS/a. Aus heutiger Sicht ist die Rückgewinnung des im Klärschlamm enthaltenden Nährstoffs Phosphor mittelfristig nicht wirtschaftlich darstellbar. Daher kann nur eine Langzeitlagerung der Klärschlammaschen eine spätere stoffliche Verwertung des Klärschlammes in Aussicht stellen.

Langfristig betrachtet ist aufgrund der gesellschaftlichen Entwicklung ein Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung durchaus möglich, wie es Initiativen anderer Bundesländer zeigen. Die thermisch zu entsorgende Klärschlammmenge in Mecklenburg-Vorpommern ist dann hinreichend groß, um auch zwei Klärschlammverbrennungsanlagen wirtschaftlich betreiben zu können. In Verbindung mit etablierten Verfahrensweisen der Phosphorrückgewinnung könnte die thermische Klärschlamm-entsorgung in der Zukunft den Status der Verwertung erlangen.

7 Ausblick



Eine Abwasserreinigung ohne Produktion von Klärschlamm ist nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht erreichbar. Die Ausbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftliche Nutzflächen wird sowohl durch gesellschaftliche Forderungen als auch durch rechtliche Vorgaben zunehmend eingeschränkt. Der nachteilige Aspekt einer ubiquitären Verteilung von im Klärschlamm enthaltener Mikroschadstoffe wird weiter an Bedeutung gewinnen.

Für die abwasserbeseitigungspflichtigen Körperschaften als Klärschlammherzeuger ergibt sich daher neben den Fragen der Energieeffizienzsteigerung und Kostenoptimierung auch die Notwendigkeit der Überprüfung ihrer betrieblichen Klärschlammkonzepte hinsichtlich Entsorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Hierbei sind folgende Gesichtspunkte von besonderem Belang:

- Langfristige Planungs- und Entsorgungssicherheit für die Betreiber
- Optimierung der Klärschlammherzeugung bei der Abwasserreinigung
- Weitgehende Massenreduktion durch Schlammfäulung und -entwässerung
- Optimierte Nutzung des im Klärschlamm enthaltenen Energiepotenzials
- Verringerung von Transportmengen und -wegen
- Nutzung vorhandener ungenutzter Restwärme z. B. aus Biogasanlagen
- Stufenweiser Ausbau einzelner Verfahrensschritte
- Möglichkeit für die Errichtung regionaler Lösungen.

Zukünftige landesweite Behandlungs- und Entsorgungsoptionen sollten daher die Nutzung des wertgebenden Phosphors erlauben und gleichzeitig die Einbringung

von Schadstoffen in den Boden minimieren. Das kann in letzter Konsequenz nur von Verfahren geleistet werden, bei denen Phosphor vor oder nach einer thermischen Behandlung aus dem Klärschlamm abgetrennt wird. Mittel- bis langfristig ist daher ein Wechsel von der bisher überwiegend landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung zu einer thermischen Klärschlammbehandlung für Mecklenburg-Vorpommern denkbar. Die möglichst hohe Nutzung des im Klärschlamm vorhandenen Energiepotenzials über Faulungsanlagen mit der Möglichkeit einer Eigenstromproduktion bleibt hiervon unberührt.

Wird Klärschlamm mit einem hohen Phosphoranteil einer umfangreichen und herkunftsbezogenen Schadstoffüberwachung unterzogen, sollte schadstoffarmer Klärschlamm auch weiterhin auf landwirtschaftlichen Flächen als Phosphorlieferant verwertet werden können.

Für die Klärschlämme, die die zu erwartenden Vorgaben aus einer novellierten AbfKlärV bzw. die Grenzwerte der DüMV ab 2015 nicht einhalten, sind entsprechende thermische Kapazitäten vertraglich zu sichern bzw. mittelfristig im Land aufzubauen. Der Wirtschaftlichkeit einer thermischen Entsorgung steht im Flächenland Mecklenburg-Vorpommern die erforderliche Zentralisierung mit einem Zusammenführen der benötigten Klärschlamm-mengen gegenüber. Sowohl bei einer zentralen Lösung als auch bei mehreren regionalen Anlagen ist daher die Massen- und Volumenminimierung mit einer Optimierung des Transportaufkommens als wesentliches Ziel der Schlammbehandlung zu berücksichtigen. Im Hinblick auf eine angestrebte Phosphorrückgewinnung sollte vorrangig eine Klärschlammmonoverbrennung in Verbindung mit einer Langzeitlagerung der Aschen verfolgt werden.

8 Abürzungsverzeichnis

Gesetze/Verordnungen

AbfklärV	Klärschlammverordnung
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BlmSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
17. BlmSchV	17. Verordnung zur Durchführung des BlmSchG
DüMV	Düngemittelverordnung
DüG	Düngegesetz
DüV	Düngeverordnung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
KlärEV	Klärschlamm-Entschädigungsfonds- Verordnung
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

Behörden und Institute

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesumweltministerium
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasser- wirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
LU	Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern
MUNLV NRW	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucher- schutz des Landes Nordrhein-Westfalen
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
WidO	Wirtschaftliches Institut der AOK
WHO	World Health Organization
WM	Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern

Chemische Verbindungen/Elemente

AOX	Adsorbierbare organische Halogenverbindungen
B(a)P	Benzo(a)pyren
PCB	Polychlorierte Biphenyle
Ca	Kalzium
Cd	Cadmium
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Fe	Eisen
Hg	Quecksilber
K	Kalium
K ₂ O	Kaliumoxid
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat
Mg	Magnesium
MgO	Magnesiumoxid
N	Stickstoff
Na	Natrium
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
P	Phosphor
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD	Polychlorierte Dibenzodioxine
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane
PFT	Perfluorierte Tenside
P ₂ O ₅	Phosphorpentoxid
Zn	Zink

Parameter

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
bwS	Basisch wirksame Substanzen
GV	Glühverlust
FM	Frischmasse
OS	Originalsubstanz
PS	Primärschlamm
TS	Trockensubstanz
oTS	organische Trockensubstanz
TR	Trockenrückstand
TM	Trockenmasse
ÜS	Überschussschlamm

Einheiten

a	Jahr
d	Tag
°C	Grad Celsius
g	Gramm
kJ	Kilojoule
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
ha	Hektar
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
mg	Milligramm
m ³	Kubikmeter
m ²	Quadratmeter
ng	Nanogramm
Nm ³	Normkubikmeter eines Gases bei 0°C und 1 bar
t	Tonne
%	Prozent

Sonstige Abkürzungen

BHKW	Blockheizkraftwerk
E	Einwohner
EW	Einwohnerwert
EHEC	Enterohämorrhagische Echerichia coli
GK	Größenklasse
HTC	Hydrothermale Karbonierung
IK	Investitionskosten
KA	Kläranlage
NPK-Dünger	Stickstoff-Phosphor-Kalium-Dünger
NP-Dünger	Stickstoff-Phosphor-Dünger
QLA	Qualitätssicherung Landbauliche Abfallverwertung
VERA	Klärschlammverbrennungsanlage Hamburg

9 Literatur

- Adam, C. und Krüger, O. (2013):
Wertstoffpotenzial in deutschen Klärschlammaschen, Energie aus Abfall, Band 10, Karl J. Thome-Kozmiensky,
Michael Beckmann – Neuruppin, TK Verlag Karl Thome Kozmiensky
- ATV-DVWK (2001):
Klärschlammbehandlung in Pflanzenbeeten, Arbeitsbericht des ATV-DVWK-Fachausschuss AK-2, Hennef
- Beckmann, M. (2010):
Stoff- und Energiebilanzen bei der Verbrennung von Klärschlamm, Tagungsunterlagen Fachkonferenz
Klärschlammbehandlung, 27.10.-28.10.2010, Offenbach
- Bergs, C. (2012):
Perspektiven der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung und des Phosphatrecyclings aus Sicht
des Bundes, 3. VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung, Berlin
- BMU (2012):
Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Publikation Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
- Drissen, P. (2012):
Ressourceneffiziente Herstellung von Dünger aus Stahlwerksschlacke und P_2O_5 -haltigen Reststoffen,
FEhs – Institut für Baustoffforschung e.V., Report 19/2, Duisburg
- Gretzschel, O., Hansen, J., Siekmann, K., Jakob, J. (2011):
Das Projekt NaWaS – Motivation und Vorgehensweise. In: Schlammfäulung statt aerober Stabilisierung –
Trend der Zukunft? Schriftenreihe SIWAWI, Heft 30, S. 35-60, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern
- Heck, A.; Könemann, R. und Langenohl, T. (2012):
Zehn Jahre Qualitätssicherung landbauliche Abfallverwertung (QLA), Rückblick, Standortbestimmung
und Ausblick, Korrespondenz-Abwasser, Abfall Nr. 10, 2012
- Holleman-Wiberg (2007):
Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 102. Auflage, de Gruyter, Berlin, S. 1434
- IVA (2011):
Wichtige Zahlen, Düngemittel – Produktion – Markt – Landwirtschaft, Industrieverband Agrar e.V.
Pflanzenernährung, Frankfurt, (<http://www.iva.de>)
- Jakob, J., Siekmann, K., Hansen, J., Gretzschel, O. (2011):
Umsteigen ja oder nein? Entwicklung einer Checkliste zur Prüfung im Rahmen des Projektes NaWaS,
In: Schlammfäulung statt aerober Stabilisierung – Trend der Zukunft? Schriftenreihe SIWAWI,
Heft 30, S. 61-84, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern

- Jardin, N. (2011):
Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammasche – Stand der Entwicklungen,
In: 7. DWA Klärschlammstage, DWA, Fulda
- Jasper, M. und Kappa, S. (2012):
Sind Kapazitätsengpässe bei der Mitverbrennung durch gesetzliche Änderungen zu erwarten?
Korrespondenz Abwasser, Abfall 10/12, 59. Jahrgang, S. 923 - 933
- Karpf, R., Krüger, T. und Conrad, Y. (2013):
Konzepte der Abgasreinigungsverfahren, Energie aus Abfall, Band 10, Karl J. Thome-Kozmiensky,
Michael Beckmann – Neuruppin, TK Verlag Karl Thome Kozmiensky
- Langenohl, T. (2007):
Konsequenzen der neuen Klärschlammverordnung auf die Qualitätssicherung von Klärschlämmen nach
QLA, In: 5. DWA Klärschlammstage, DWA, Hildesheim
- Lehmkuhl, J. (2013):
Industrielle Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Tiermehlaschen, 8. Klärschlammstage
vom 4.- 6. 6. 2013 in Fulda
- Lehrmann, F. (2013):
Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung – Trocknung, Monoverbrennung und
Mitverbrennung, Energie aus Abfall, Band 10, Karl J. Thome-Kozmiensky, Michael Beckmann –
Neuruppin, TK Verlag Karl Thome Kozmiensky
- LFU (2011):
Klärschlamm Entsorgung in Bayern, Planungshilfe für Kommunen, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg
- LMS (2009a):
Fachinformation DüV-BL-0901 der LFB, Düngungsniveau und Nährstoffbilanzen auf dem Ackerland von MV -
Stickstoff, LMS Landwirtschaftsberatung, Rostock
- LMS (2009b):
Fachinformation DüV-BL-0902 der LFB, Düngungsniveau und Nährstoffbilanzen auf dem Ackerland von MV –
Phosphor und Kalium, LMS Landwirtschaftsberatung, Rostock
- LMS (2011):
Klärschlamm-Aufbringungsplan Mecklenburg-Vorpommern 2010, Landwirtschaftsberatung Mecklenburg-
Vorpommern/Schleswig-Holstein GmbH, Rostock
- LU (2009):
Leitfaden zum Energieeinsatz auf Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern, Ministerium für Landwirtschaft,
Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin

- Miron Y., Zeeman G., van Lier J.B. and Lettinga G. (2000):
The role of sludge retention time in the hydrolysis and acidification of lipids, carbohydrates and proteins during digestion of primary sludge in CSTR systems, *Water Res.* 34(5), 1705-1713
- Montag, D., Everding, W., Pinnekamp, J. (2010):
Stand und Perspektiven der Rückgewinnung von Phosphat aus Abwasser und Klärschlamm, In: 43. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, GWA, Heft 220, S. 36/1-36/17, RWTH Aachen, Aachen
- MUNLV NRW (2001):
Co-Fermentation von biogenen Abfällen in Faulbehältern von Kläranlagen, Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- Neulen, S. und Christian-Bickelhaupt, R. (2012):
Gesetzliche Entwicklungen bei der Verwertung von Klärschlämmen und Bioabfällen, *Korrespondenz-Abwasser, Abfall* Nr. 10, 2012
- Peters, U. (2013):
Phosphorrückgewinnung aus Aschen der Mitverbrennung in Braunkohlekraftwerken der RWE Power AG, 8. Klärschlammtage vom 4.-6. 6. 2013 in Fulda
- Thome-Kozmiensky, K. J. (2013):
Verbrennung in Wirbelschichtreaktoren, *Energie aus Abfall*, Band 10, Karl J. Thome-Kozmiensky, Michael Beckmann – Neuruppin, TK Verlag Karl Thome Kozmiensky
- Waida, C., Weinfurtner, K., Gäth, S.A. (2010):
Bewertung verschiedener Sekundärphosphate aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche, In: 43. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, GWA, Heft 220, S. 39/1-39/12, RWTH Aachen, Aachen
- WHO (2006):
Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Vol. 4: Excreta and greywater use in agriculture, download in http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gsuweg4/en/
- WidO Wissenschaftliches Institut der AOK (2013):
Pressemitteilung vom 17 Mai 2013
Witte, H. et al. (2000a): Systematische Einordnung von Klärschlamm und anderen Reststoffen aus Abwasserkanalisation und -reinigung in der Abfallwirtschaft, *Müllhandbuch*, Kennzahl 3002, Lieferung 8/00, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- Witte, H. et al. (2000a):
Systematische Einordnung von Klärschlamm und anderen Reststoffen aus Abwasserkanalisation und -reinigung in der Abfallwirtschaft, *Müllhandbuch*, Kennzahl 3002, Lieferung 8/00, Erich Schmidt Verlag, Berlin

Anlage 1

Summenhäufigkeiten der Schadstoffparameter des Klärschlammes in Mecklenburg-Vorpommern

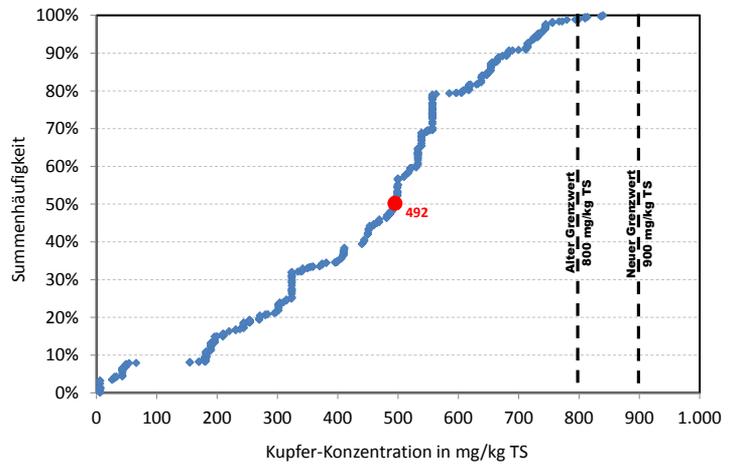


Bild Anlage 1.1: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für Kupfer

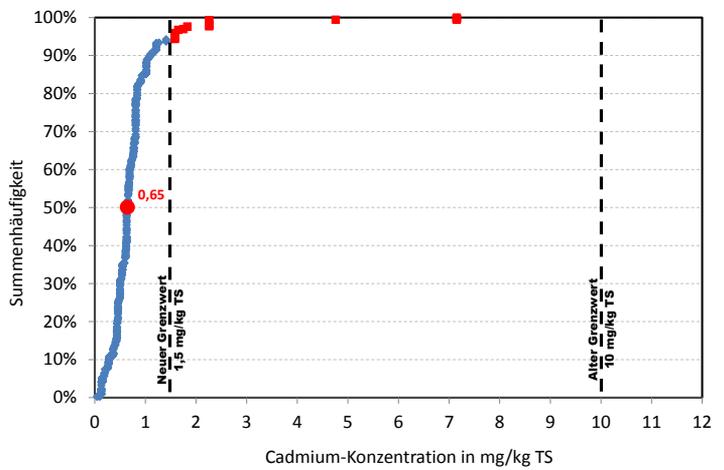


Bild Anlage 1.2: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für Cadmium

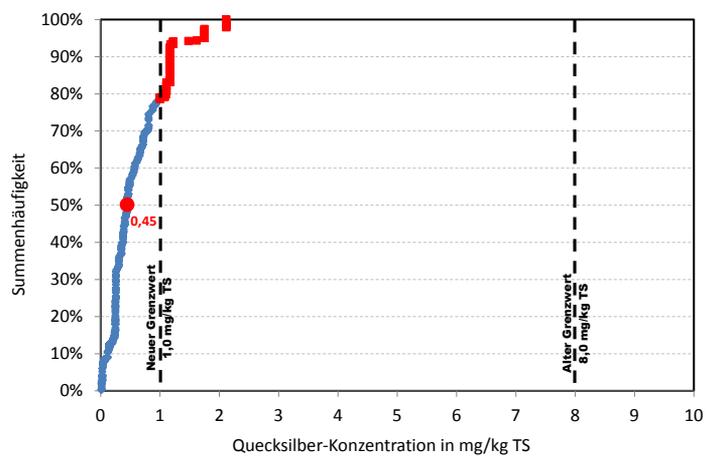


Bild Anlage 1.3: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für Quecksilber

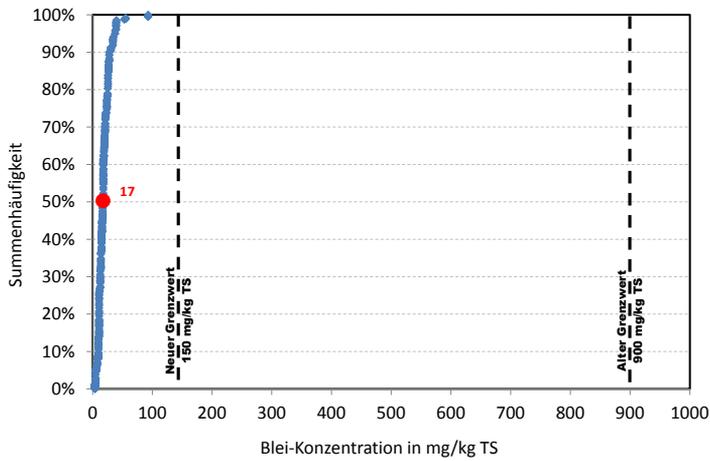


Bild Anlage 1.4: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für Blei

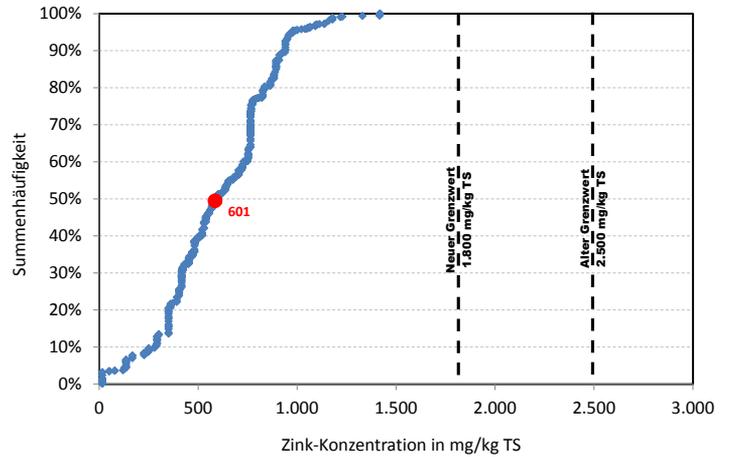


Bild Anlage 1.7: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für Zink

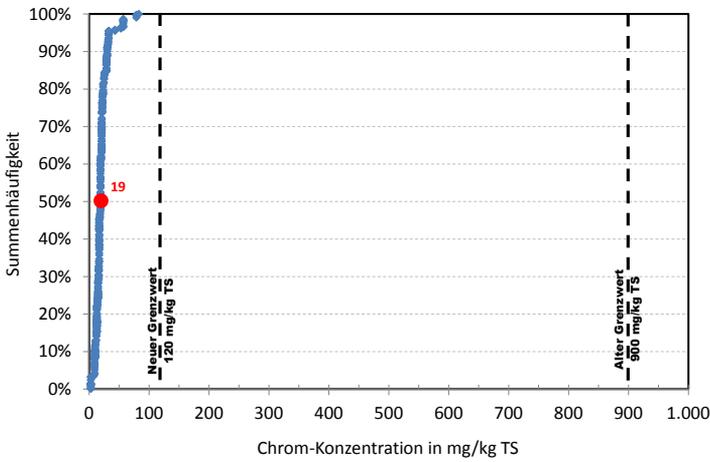


Bild Anlage 1.5: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für Chrom

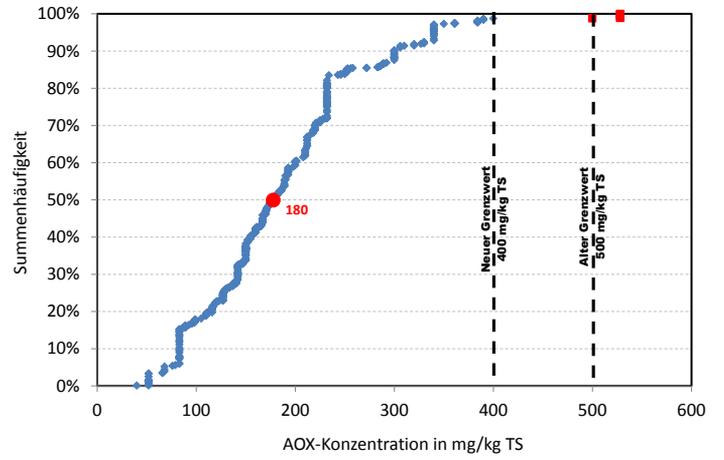


Bild Anlage 1.8: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für den Parameter AOX

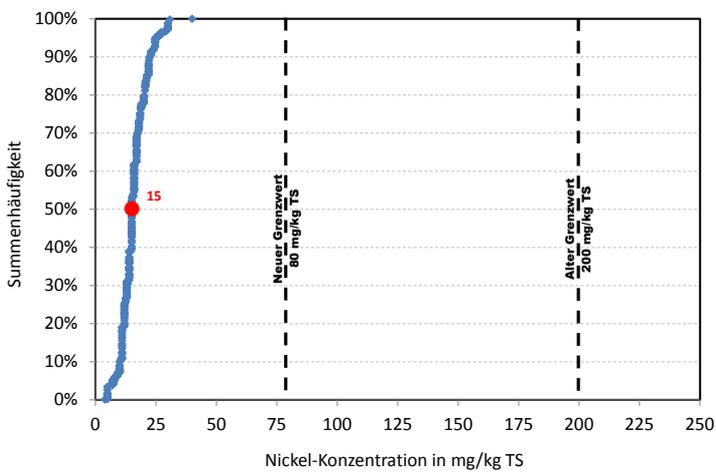


Bild Anlage 1.6: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für Nickel

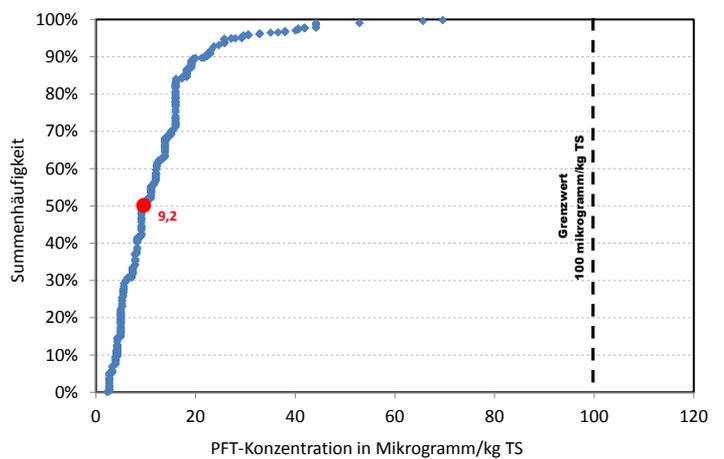


Bild Anlage 1.9: Frachtengewichtete Summenhäufigkeit für den Parameter PFT

Anlage 2

Bilanzierung des Umstiegs von aerober zur anaeroben Schlammstabilisierung

Am Beispiel einer Kläranlage mit einer
Schlammproduktion von 20.000 EW

	Parameter	Symbol	Variante 1 Aerob	Variante 2 Anaerob	Einheit
Varianten Kennwerte	Einwohnerwerte	EW	20.000	20.000	EW
	Volumen Belebung	VBB	10.400	5.200	m ³
	Belebtschlammkonz.	TSBB	3,5	2,5	kg TS/m ³
	Schlammalter	tTS	40	18	d

1. Massenbilanz

1.1 Abwasser	Jahresabwassermenge	Qd	876.000	876.000	m ³ /a
	CSB-Konzentration	CSB _{zu}	1.000	1.000	mg/l
	CSB-Fracht	MCSB _{zu}	876.000	876.000	kg/a
	spezifische CSB-Fracht	CSB _e	120	120	g CSB/E*d
	AFS-Konzentration	AFS _{zu}	417	417	mg/l
	AFS-Fracht	MAFS _{zu}	365.000	365.000	kg/a
	spezifische AFS-Fracht	AFS _e	50	50	g TS/E*d
1.2 Primärschlamm	Abscheidegrad VKB AFS	WG AFS	0	50	%
	PS-Fracht	MPS	0	182.500	kg/a
	TS-Konzentration PS	TSPS	0	30	kg/m ³
	Volumenstrom PS	QPS	0	6.083	m ³ /a
	Glühverlust PS	GVps	0	72	%
	org. PS-Fracht	MoTS	0	131.400	kg/a
	CSB-Gehalt org. PS-Fracht	fcv.ps	0	1,8	kg CSB/kg oTS
	CSB-Fracht PS	CSB-PS	0	236.520	kg/a
	Abscheidegrad VKB CSB	WG CSB	0	27	%
	spezifische PS-Fracht	PSew	0	25	g AFS/EW*d
1.3 Zulauf BB	CSB-Fracht in BB	M CSB BB	876.000	639.480	kg/a
	CSB-Konzentration in BB	CSB BB	1.000	730	mg/l
	AFS-Fracht in BB	MAFS BB	365.000	182.500	kg/a
	AFS-Konzentration in BB	AFS BB	417	208	mg/l
1.4 Überschussschlamm	ÜSS-Fracht	M TS ÜSS	331.802	258.794	kg/a
	spez. ÜSS-Produktion	sp ÜSS	0,38	0,40	kg TS/kg CSB
	GV im nicht stabilisierten ÜSS	GV ÜSS	67	73	%
	org. ÜSS-Fracht	MoTS ÜSS	222.307	188.920	kg/a
	CSB-Gehalt org. ÜSS-Fracht	fcv,üs	1,48	1,48	kg CSB/kg oTS
	CSB-Fracht in ÜSS	M CSB ÜSS	329.015	279.601	kg/a
	Verhältnis CSB ÜSS : PS	CSB ÜSS:PS		1,18	kg CSB ÜSS/kg CSB PS
1.5 Ablauf	CSB Ablaufkonzentration	CSB _{ab}	32	32	mg/l
	CSB-Ablauffracht	M CSB _{ab}	28.032	28.032	kg/a
1.6 Belüftung	Oxidation in der Belebung	M CSB _{ox}	518.953	331.847	kg/a

	Parameter	Symbol	Variante 1 Aerob	Variante 2 Anaerob	Einheit
--	-----------	--------	---------------------	-----------------------	---------

2. Energieverbrauch

2.1 Rühren BB	Volumen	V_{BB}	10.400	5.200	m ³
	spez. Energieverbrauch	sp. EV	2,0	2,0	W/m ³
	elektr. Arbeit pro Jahr	W_{el}	182.208	91.104	kWh/a
	Strompreis	SP	0,220	0,220	EUR/kWh
	Kosten pro Jahr	EK RW	40.086	20.043	EUR/a
	spez. Energieverbrauch	sp. EV	9,1	4,6	kWh/EW*a
	CO ₂ -Ausstoß je elektrischer kWh	sp. CO ₂	0,5	0,5	kg CO ₂ /kWh
	CO ₂ -Produktion	M CO ₂	91.104	45.552	kg CO ₂ /a

2.1 Oxidation BB	CSB in der Belebung oxidiert	CSB _{ox}	518.953	331.847	kg/a
	Energieverbrauch pro Jahr	EV _{ox}	345.969	221.231	kWh/a
	Strompreis	SP	0,220	0,220	EUR/kWh
	Kosten pro Jahr	EK	76.113	48.671	EUR/a
	spez. Energieverbrauch	sp. EV	17,3	11,1	kWh/EW*a
	CO ₂ -Ausstoß je elektrischer kWh	sp. CO ₂	0,5	0,5	kg CO ₂ /kWh
	CO ₂ -Produktion	M CO ₂	172.984	110.616	kg CO ₂ /a

3. Energieproduktion

3.1 Fermentation Primärschlamm

3.1.1 Rohschlamm	PS-Fracht	M PS	0	182.500	kg/a
	org. PS-Fracht	M oPS	0	131.400	kg/a
	CSB-Fracht PS	CSB-PS	0	236.520	kg/a
	CSB-Abbau als Anteil	CSB _{ab} %	0	70	%
	CSB-Abbau als Fracht	M CSB _{ab}	0	165.564	kg/a
	TS-Abbau	TS _{ab} %	0	50	%
3.1.2 Faulschlamm	Rest-CSB in Faulschlamm	CSB FS	0	70.956	kg/a
	MoTS im Faulschlamm	M oTS FS	0	39.420	kg/a
	MTS im Faulschlamm	M TS FS	0	90.520	kg/a
	GV im Faulschlamm	GV FS	0	44	%
3.1.3 Klärgas und Energie	Methanproduktion	CH ₄ -Prod.	0	57.947	m ³ /a
	Klärgasproduktion	BG-Prod.	0	91.980	m ³ /d
	spez. Biogasproduktion	sp. BG-Prod.	0	700	l BG/kg oTS*d
	Energiegehalt von Biogas	Hu BG	0	6,3	kWh/m ³
	elektrischer Wirkungsgrad BHKW	WG _{el}	0	36	%
	Energieproduktion pro Jahr	EPa	0	208.611	kWh/a
	Vermiedene CO ₂ -Produktion	M CO ₂	0	104.305	kg CO ₂ /a
	Strompreis	SP	0	0,22	EUR/kWh
Vergütung Elektroenergie	Evergüt	0	45.894	EUR/a	

	Parameter	Symbol	Variante 1 Aerob	Variante 2 Anaerob	Einheit
3.2 Fermentation Überschussschlamm					
3.2.1 Rohschlamm	ÜSS-Fracht	M ÜSS	0	258.794	kg/a
	org. ÜSS-Fracht	M oÜSS	0	188.920	kg/a
	GV im Faulschlamm	GV FS	0	73	
	CSB-Fracht ÜSS	CSB-ÜSS	0	279.601	kg/a
	CSB-Abbau als Anteil	CSB _{ab} %	0	35	%
	CSB-Abbau als Fracht	M CSB _{ab}	0	97.860	kg/a
	TS-Abbau	TS _{ab} %	0	26	%
3.2.2 Faulschlamm	Rest-CSB in Faulschlamm	CSB FS	0	181.741	kg/a
	MoTS im Faulschlamm	M oTS FS	0	122.798	kg/a
	MTS im Faulschlamm	M TS FS	0	192.672	kg/a
	GV im Faulschlamm	GV FS	0	64	%
3.1.3 Klärgas und Energie	Methanproduktion	CH ₄ -Prod.	0	34.251	m ³ /a
	Klärgasproduktion	BG-Prod.	0	54.367	m ³ /a
	spez. Biogasproduktion	sp. BG-Prod.	0	288	l BG/kg oTS*d
	Energiegehalt von Biogas	Hu BG	0	6,3	kWh/m ³
	elektrischer Wirkungsgrad BHKW	WG _{el}	0	36	%
	Energieproduktion pro Jahr	EPa	0	123.304	kWh/a
	Vermiedene CO ₂ -Produktion	M CO ₂	0	61.652	kg CO ₂ /a
	Strompreis	SP	0	0,22	EUR/kWh
	Vergütung Elektroenergie	EVerгүй	0	27.127	EUR/a

3.3 Zusammenfassung Energieproduktion

3.2.1 Rohschlamm	RS-Fracht	M RS	0	441.294	kg/a
	org. RS-Fracht	org. M RS	0	320.320	kg/a
	CSB in RS-Fracht	CSB M RS	0	516.121	kg/a
	TS-Abbau	TS _{ab} %	0	36	%
	oTS-Abbau	oTS _{ab} %	0	49	%
3.2.2 Faulschlamm	FS-Fracht	M FS	0	283.192	kg/a
	org. FS-Fracht	org. M FS	0	162.218	kg/a
	GV-Faulschlamm	GV FS	0	57	%
	CSB in FS-Fracht		0	240.083	
3.1.3 Klärgas und Energie	Klärgasproduktion	BG-Prod.	0	146.347	Nm ³ /a
	spez. Biogasproduktion	sp. BG-Prod.	0	457	l BG/kg oTS*d
	Energieproduktion	EPa	0	331.915	kWh/m ³
	Leistung	EP	0	38	kW
	spez. Energieproduktion	spez. EPe	0	17	kWh/E*a
	Vermiedene CO ₂ -Produktion	M CO ₂	0	165.957	kg CO ₂ /a
	KWK-Bonus	KWK	0	12.570	EUR/kWh
	Vergütung Elektroenergie	EVerгүй	0	85.591	EUR/a

	Parameter	Symbol	Variante 1 Aerob	Variante 2 Anaerob	Einheit
--	-----------	--------	---------------------	-----------------------	---------

4. Schlammengen

4.1 Mengen	ÜSS eingedickt		331.802	258.794	kg/a
	Konzentration		60	60	kg/m ³
	Menge		5.530	4.313	m ³ /a
	PS maschinell eingedickt		0	182.500	kg/a
	Konzentration		0	60	kg/m ³
	Menge		0	3.042	m ³ /a

5. Anlagenbetrieb und KS-Entsorgung

5.1 Schlammvoreindickung	spez. FHM-Verbrauch ÜSS		0	1,8	kg WS/t TS
	einzudickende TS-Fracht		0	441	t TS/a
	Kosten FHM		0	4.766	EUR/a
	spez. Elektroenergieverbrauch		0	0,73	kWh/E*a
	Elektroenergie		0	3.212	EUR/a
	Personaleinsatz		0	7	h/Wo
	Personalkosten		0	12.340	EUR/a
	Kosten pro Jahr		0	20.318	EUR/a
	spez. Kosten		0	46,0	EUR/t TS

5.2 Faulung	Rohschlamm Fracht		0	441	kg TS/a
	spez. Elektroenergieverbrauch		0	1,10	kWh/E*a
	Elektroenergie		0	4.840	EUR/a
	Personaleinsatz		0	12	h/Wo
	Personalkosten		0	21.154	EUR/a
	Kosten pro Jahr		0	25.994	EUR/a
	Rohschlammvolumenstrom		0	7.355	m ³ /a
	Faulvolumen		0	967	m ³

5.3 BHKW-Anlage	Klärgasmenge		0	146.347	Nm ³ /a
	Primärenergieemenge		0	921.986	kWh/a
	Elektrische Energieproduktion		0	331.915	kWh/a
	Mittlere Elektrische Leistung		0	38	kW
	Gewählte Elektrische Leistung		0	50	kW
	Laufzeit pro Jahr		0	6.638	h/a
	Betriebskosten BHKW		0	11.064	EUR/a

	Parameter	Symbol	Variante 1 Aerob	Variante 2 Anaerob	Einheit
5.4 Schlammwässerung	spez. FHM-Verbrauch stab. TS		10,0	7,5	kg TS/a
	zu entwässernde TS-Fracht		332	283	t TS/a
	Kosten FHM		19.908	12.744	EUR/a
	Energieverbrauch pro tTS		70	70	kWh/t TS
	Energieverbrauch pro Jahr		23.226	19.823	kWh/a
	Elektroenergie		5.110	4.361	EUR/a
	Personaleinsatz		7	7	h/Wo
	Personalkosten		12.340	12.340	EUR/a
	Kosten pro Jahr		37.357	29.444	EUR/a
	spez. Kosten		112,6	104,0	EUR/t TS

5.5 Schlammensorgung	Primärschlamm stabilisiert		0	90.520	kg TS/a
	Überschussschlamm stabilisiert		331.802	192.672	kg TS/a
	Klärschlammfracht		331.802	283.192	kg TS/a
	Entwässerungsgrad		210	230	kg TS/m ³
	Klärschlammmenge		1.580	1.231	m ³ OS/a
	Kosten pro t TS		30	30	EUR/t TS
	Kosten pro Jahr		47.400	36.938	EUR/a
	Klärschlammreduktion			22	%
	Vorteil opt. Variante			48.609	kg TS/a

6. Zusammenfassung

6.1 CSB-Bilanz

6.1.1 VKB und Biologie	Zulauf		876	876	t CSB/a
	Primärschlamm		0	237	t CSB/a
	Überschussschlamm		329	280	t CSB/a
	in BB oxidiert wird		519	332	t CSB/a
	Ablauf		28	28	t CSB/a
6.1.2 anaerobe Stabilisierung	CSB in Rohschlamm PS		0	237	t CSB/a
	CSB in Rohschlamm ÜSS		329	280	t CSB/a
	Rohschlamm		329	516	t CSB/a
	CSB in Biogasproduktion aus PS		0	166	t CSB/a
	CSB in Biogasproduktion aus ÜSS		0	98	t CSB/a
	CSB in Faulschlamm aus PS		0	71	t CSB/a
	CSB in Faulschlamm aus ÜSS		329	182	t CSB/a
	Rohschlamm=Biogas+Faulschlamm		329	516	t CSB/a
6.1.3 Global	Zulauf		876	876	t CSB/a
	Belüftung		519	332	t CSB/a
	Biogas aus PS		0	166	t CSB/a
	Biogas aus ÜS		0	98	t CSB/a
	Faulschlamm aus PS		0	71	t CSB/a
	Faulschlamm aus ÜS		329	182	t CSB/a
	Ablauf		28	28	t CSB/a

	Parameter	Symbol	Variante 1 Aerob	Variante 2 Anaerob	Einheit
6.2 Energie					
6.2.1 Energieverbrauch	+ aus Primärschlamm		0	-208.611	kWh/a
	+ aus Überschussschlamm		0	-123.304	kWh/a
	- für Belüftung		345.969	221.231	kWh/a
	- für Rühren Belebung		182.208	91.104	kWh/a
	- für Eindickung		0	14.600	kWh/a
	- für Faulung		0	22.000	kWh/a
	- für Schlammwässerung		23.226	19.823	kWh/a
	= Gesamtenergieverbrauch		551.403	36.844	kWh/a
	Vorteil opt. Variante			514.559	kWh/a
	Vorteil opt. Variante			93	%
6.2.2 sp. Energieverbrauch	+ aus Primärschlamm		0,0	-10,4	kWh/EW*a
	+ aus Überschussschlamm		0,0	-6,2	kWh/EW*a
	- für Belüftung		17,3	11,1	kWh/EW*a
	- für Rühren Belebung		9,1	4,6	kWh/EW*a
	- für Eindickung		0,0	0,7	kWh/EW*a
	- für Faulung		0,0	1,1	kWh/EW*a
	- für Schlammwässerung		1,2	1,0	kWh/EW*a
	= Gesamtenergieverbrauch		27,6	1,8	kWh/EW*a
	Vorteil opt. Varianten			25,7	kWh/EW*a
6.3 Kosten					
nach Verfahrensstufen	+ Einspeisung Energie aus PS		0	-45.894	EUR/a
	+ Einspeisung Energie aus ÜS		0	-27.127	EUR/a
	+ KWK-Bonus		0	-12.570	EUR/a
	- Energiebezug Belüftung		76.113	48.671	EUR/a
	- Rühren Belebungsbecken		40.086	20.043	EUR/a
	- Voreindickung		0	20.318	EUR/a
	- Faulung		0	25.994	EUR/a
	- BHKW		0	11.064	EUR/a
	- Entwässerung		37.357	29.444	EUR/a
	- Entsorgung		47.400	36.938	EUR/a
	- Geschätzte Kapitalkosten			48.333	EUR/a
	= Summe		200.957	155.214	EUR/a
	Vorteil Varianten 2		0	94.076	EUR/a
	Mögliche Investitionskosten		0	1.946.000	EUR/a
	Geschätzte Investitionskosten			1.000.000	EUR/a
Amortisation der geschätzten IK			11	a	
nach Rubriken	Einnahmen Energieproduktion		0	-74.527	EUR/a
	Kosten Energiebezug		121.309	6.600	EUR/a
	Personalkosten		12.340	45.833	EUR/a
	Kosten FHM		19.908	17.510	EUR/a
	Schlamm Entsorgung		47.400	36.938	EUR/a
	Geschätzte Kapitalkosten		0	48.333	EUR/a
	Summe		200.957	155.214	EUR/a

	Parameter	Symbol	Variante 1 Aerob	Variante 2 Anaerob	Einheit
CO ₂ -Bilanz	Primärschlamm		0,0	-104,3	kg CO ₂ /a
	Überschussschlamm		0,0	-61,7	t CO ₂ /a
	Belüftung		173	111	t CO ₂ /a
	Rühren		91	46	t CO ₂ /a
	Eindickung		0	7	t CO ₂ /a
	Faulung		0	11	t CO ₂ /a
	Entwässerung		12	10	t CO ₂ /a
	= Summe		276	18	t CO ₂ /a
	Spezifischer CO ₂ -Ausstoß		13,8	0,9	kg CO ₂
	Vorteil opt. Varianten			257	t CO ₂ /a
	Reduktion um			93	%

Ansätze für die vorstehende Bilanzierung

		Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Zulauf	Abwasserlast	Einwohnerwerte	EWcsb	20.000	EW
		sp Tagesabwassermenge	Qew	0,120	m ³ /E*d
		Tagesabwassermenge	Qd	2.400	m ³ /d
		sp. CSB-Fracht	CSBeW	0,12	kg CSB/E*d
		CSB-Tagesfracht	M CSB	2.400	kg/d
		spez. AFS-Fracht	AFS	0,050	kg AFS/E*d
		AFS-Tagesfracht	M AFS	1.000	kg/d
	Ablauf	CSB-Konzentration im Ablauf	CSB _{ab}	32	mg/l
Vorklärung	Primärschlamm	Abscheidegrad AFS	WG AFS	50	%
		CSB-Gehalt des oTS im PS	fcv,ps	1,80	g CSB/goTS
		Glühverlust im PS	GVPS	72	%
		Abbaugrad PS	AGps	70	%
		TS-Konzentration im PS	TSPS	30	kg TS/m ³
		TS-Konzentration im PS eingedickt	TSPSed	60	kg TS/m ³
Belebung	Volumina	Volumen Belebung 1. Straße	V _{BB}	5.200	m ³
		Volumen Belebung 1. Straße Variante 1	V _{BB,1}	5.200	m ³
		Volumen Belebung 1. Straße Variante 2	V _{BB,2}	0	m ³
		Anteil Deni-Zone		0,4	-
		Spez. Energieverbrauch Rühren	SEVR	2,0	W/ m ³
	TSBB	TS-Konzentration im Belebungsbecken	TSBB	3,5	kg TS/ m ³
		TS-Konzentration im Belebungsbecken	TSBB2	2,5	kg TS/ m ³
	Überschussschlamm	Temperaturkorrektur	Ft	1,0	
		Schlammalter V1		40,0	d
		Schlammalter V2		18,0	d
		Glühverlust ÜSS unstabilisiert	GVÜSS _{ust}	73	%
		Glühverlust ÜSS aerob stabilisiert	GVÜSS _{st}	67	%
		Abbaugrad ÜSS unstabilisiert	AGu	35	%
		Abbaugrad ÜSS aerob stabilisiert	AGs	10	%
		TS-Konzentration im ÜS	TSÜS	9,0	kg TS/ m ³
		CSB-Gehalt des oTS im ÜS	fcv	1,48	g CSB/goTS
		O ₂ -Eintrag	Temperatur in der Belebung	Tbb	15
	Sauerstofffertrag		O ₂ E	3	kg O ₂ /kWh
	Alpha-Wert		Alpha	0,6	-
	O ₂ -Sättigung		O ₂ S	12	mg/l
O ₂ -Konzentration	O ₂ C		2	mg/l	
O ₂ -Defizit	O ₂ D		1,20		

		Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Schlammbehandlung	Eindickung	TS-Konz. masch. Eindickung	TSÜSed	60	kg TS/m ³
		spez. FHM-Verbrauch PS+ÜSS	SpFHM	1,8	kg WS/t TS
		spez. FHM-Verbrauch ÜSS	SpFHM	4	kg WS/t TS
		Kosten FHM	KoFHM	6	EUR/kg WS
		Elektroenergieverbrauch	SpEVED	1	kWh/E*a
		Eindickung pro Tag	EDd	8,0	h/d
		Arbeitszeit pro Woche	AZED	7	h/Wo
	Faulung	Wirkungsgrad BHKW	WG	36	%
		Methangehalt Biogas	CH4x	63	%
		Elektroenergieverbrauch	SpEVFB	1,10	kWh/E*a
		Arbeitszeit pro Woche	AZFB	12	h/Wo
		Aufenthaltszeit	anRT	30	d
	Entwässerung	TS-Konz. nach SE ohne PS	Tsse	210	kg TS/m ³
		TS-Konz. nach SE mit PS	Tsse	230	kg TS/m ³
		sp. Energieverbrauch	EVse	70	kWh/tTS
		spez. FHM-Verbrauch unstab. TS	SpFHMSE	10	kg WS/t TS
		spez. FHM-Verbrauch stab. TS	SpFHMSE	8	kg WS/t TS
		Arbeitszeit pro Woche	AZSE	7,000	h/Wo
	Wirtschaftlichkeit	BHKW	Betriebskosten BHKW	BK BHKW	1,67
Entsorgung		KS-Entsorgung	KSE	130	EUR/t TS
		KS-Entsorgung		30	EUR/t OS
Energiekosten		Elektroenergie bezogen	SPb	0,2200	EUR/kWh
		Elektroenergie eingespeist	Spe	0,070	EUR/kWh
		KWK-Bonus	KWK	0,054	EUR/kWh
		Stromprod. mit Wärmenutzung		70	
Kapitaldienst		Zinssatz		0,01	
		Abschreibungszeitraum Bautechnik		50	a
		Abschreibungszeitraum Ausrüstung		15	a
Personal	Personalkosten		33,9	EUR/h	
Nachhaltigkeit	CO ₂	CO ₂ -Ausstoß je elektrischer kWh		0,5	kg CO ₂ /kWh

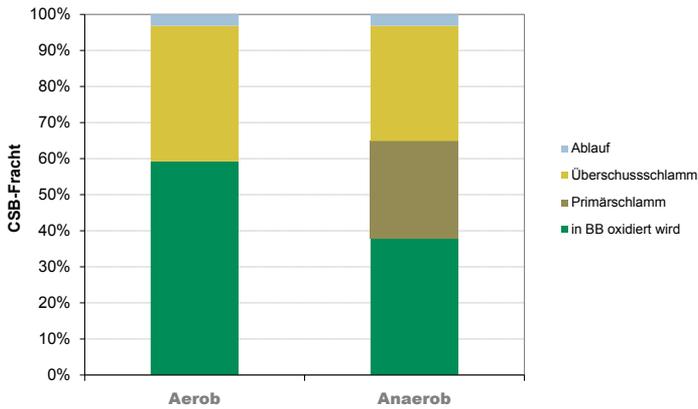


Bild Anlage 2.1: CSB-Bilanz der Abwasserbehandlung

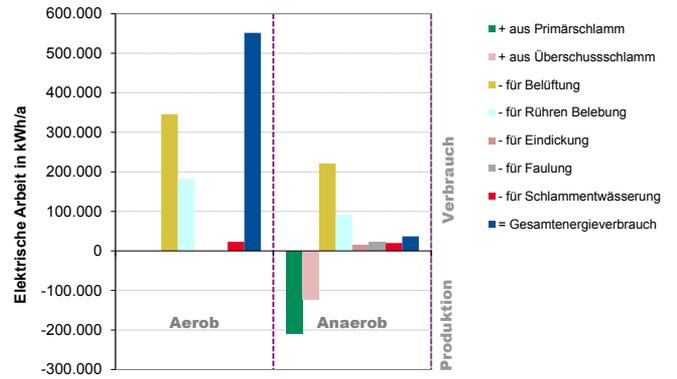


Bild Anlage 2.3: Energiebilanz (absolut) der Umstellung auf anaerobe Stabilisierung

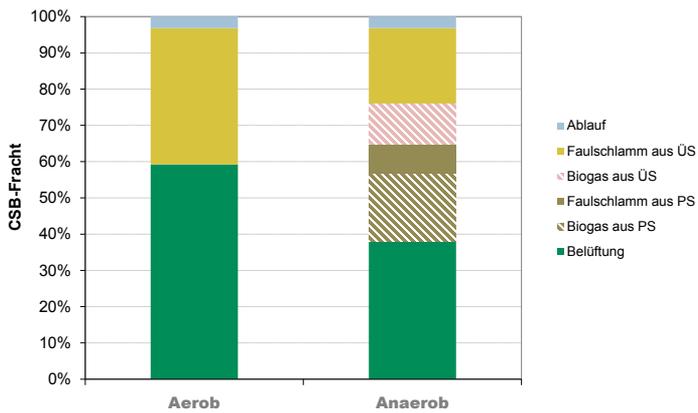


Bild Anlage 2.2: CSB-Bilanz der Abwasser- und Schlammbehandlung

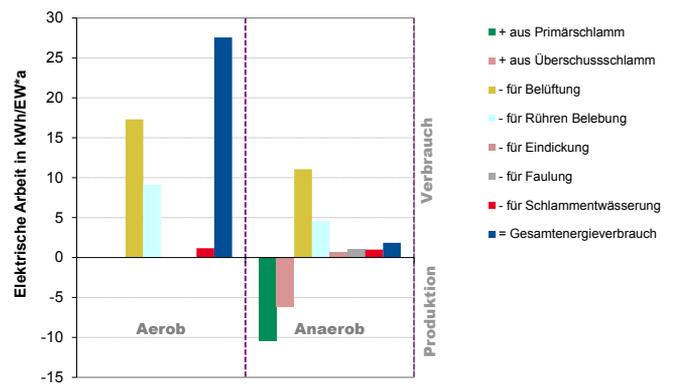


Bild Anlage 2.4: Energiebilanz (spezifisch) der Umstellung auf anaerobe Stabilisierung

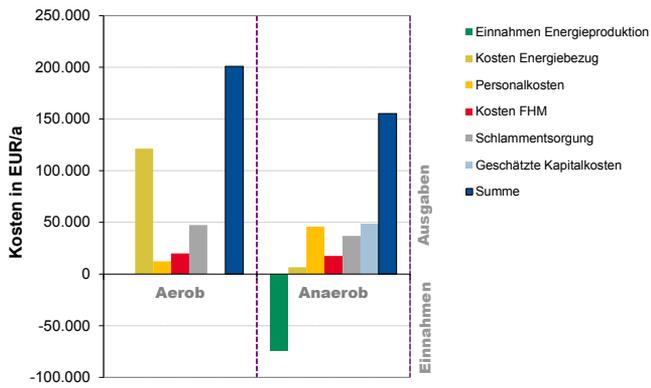


Bild Anlage 2.5: Kosten nach Rubriken für die Umstellung auf anaerobe Stabilisierung

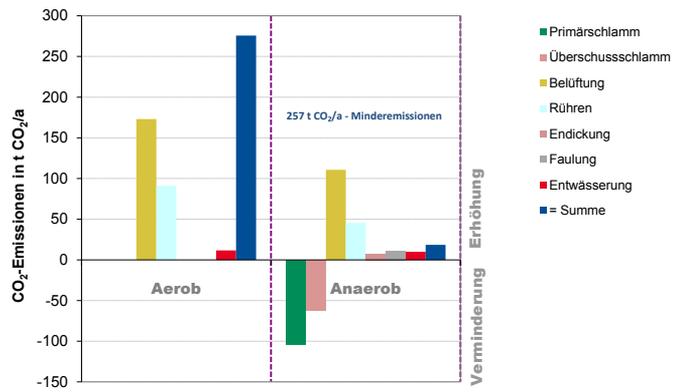


Bild Anlage 2.7: Vereinfachte CO₂-Bilanz für die Umstellung auf anaerobe Stabilisierung

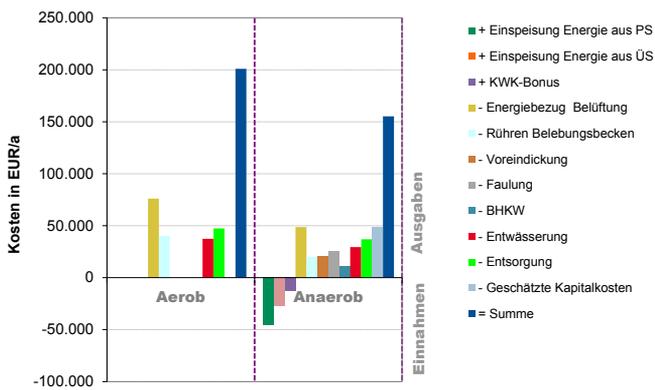


Bild Anlage 2.6: Kosten nach Verfahrensstufen für die Umstellung auf anaerobe Stabilisierung

Anlage 3

**Annahmen und Kostenfunktionen
für die Szenarien der zukünftigen
Klärschlammbehandlung**

Beschreibung	Wert	Formel	Quelle
EW-Belastung in M-V	3.193.000,00	EW	Datenauswertung
spez. Wasserverbrauch in M-V	102,0	l/EW/d	LU, 2009
Wasserverbrauch in MV	37,23	m ³ /EW/a	LU, 2009
Tatsächliche KS-Menge MV	41.000,00	t TS/a	Datenauswertung
spez. Kosten für LW-Verwertung (entw. 25% TS)	150,00	EUR/t TS	UBA, 2012
spez. Kosten für LW-Verwertung (flüssig)	285,00	EUR/t TS	UBA, 2012
spez. Kosten für Rekultivierung (entw. 25% TS)	200,00	EUR/t TS	UBA, 2012
spez. Kosten für Verbrennung (entw. 25% TS)	290,00	EUR/t TS	UBA, 2012
Anteil landwirtschaftliche KS-Verwertung	74,73	%	Datenauswertung
Anteil thermische KS-Entsorgung	1,95	%	Annahme
Anteil KS-Verwertung im Landschaftsbau	23,32	%	Annahme
spez. Stromverbrauch Entwässerung	1,50	kWh/m ³ _{Entwzu}	MUNLV, 1999
spez. Kosten für Entwässerung	3,50	EUR/ m ³ _{Entwzu}	Jakob et al., 2011
spez. Kosten für Transport in Abh. von Transportweg	$2,5424 * x^{-0,5392}$	EUR/t OS/km	Eigene Untersuchungen
spez. Investitionskosten für die Umstellung auf Faulung in Abh. von EW-Belastung	$81,098 * x^{-0,684}$	EUR/EW	Jakob et al., 2011
spez. Kapitalkosten für die Umstellung auf Faulung in Abh. von EW-Belastung	$5,610,9 * x^{-0,694}$	EUR/EW/a	Jakob et al., 2011
spez. Betriebskosteneinsparung bei Umstellung auf Faulung in Abh. von EW-Belastung	$1,13E^{-13} * x^3 - 1,1E^{-8} * x^2 + 3,9E^{-4} * x + 1,7839$	EUR/EW/a	Jakob et al., 2011
spez. Investitionskosten einer Klärschlammvererdung	64,39	EUR/EW	Eigene Untersuchungen
spez. Kapitalkosten einer solaren Klärschlamm-trocknung	35,00	EUR/t KS _{entw.} /a	LfU, 2011
spez. Jahreskosten einer solaren Klärschlamm-trocknung	43,00	EUR/t KS _{entw.} /a	LfU, 2011
spez. Kapitalkosten einer solarunterstützten Klärschlamm-trocknung	25,50	EUR/t KS _{entw.} /a	LfU, 2011
spez. Jahreskosten einer solarunterstützten Klärschlamm-trocknung	43,00	EUR/t KS _{entw.} /a	LfU, 2011
spez. Kapitalkosten einer thermischen Klärschlamm-trocknung	24,00	EUR/t KS _{entw.} /a	LfU, 2011
spez. Jahreskosten einer thermischen Klärschlamm-trocknung	50,50	EUR/t KS _{entw.} /a	LfU, 2011
CO ₂ -Ausstoß Klärschlammtransport	93,00	g CO ₂ /tkm	LfU, 2011
CO ₂ -Ausstoß Strombezug	597,00	g CO ₂ /kWh _{el}	LfU, 2011
CO ₂ -Ausstoß Wärme (Erdgas)	250,00	g CO ₂ /kWh _{th}	LfU, 2011
Glühverlust von Rohschlamm (PS und ÜS gemischt)	70,00	%	Annahme
Glühverlust von aerob stabilisiertem Schlamm	63,00	%	Annahme
TS-Gehalt von einged. aerob stabilisiertem Schlamm	4,00	% TS	Annahme
TS-Gehalt von entw. aerob stabilisiertem Schlamm	20,00	% TS	Annahme
Glühverlust von anaerob stabilisiertem Schlamm	54,00	%	Annahme
TS-Gehalt von anaerob stabilisiertem Schlamm	25,00	% TS	Annahme
Glühverlust von vererdetem Schlamm	35,00	%	A TV-DVWK, 2001
TS-Gehalt des Schlamms nach Vererdung	40,00	% TS	A TV-DVWK, 2001
spez. Faulgasanfall	400,00	l FG/kg oTS _{zu}	MUNLV, 1999
Methangehalt des Faulgases	65,00	%	Annahme
Elektrischer Wirkungsgrad BHKW	33,00	%	Annahme
Preis für Stromfremdbezug	20,00	Ct/kWh	Annahme
Zinssatz für Abschreibung	4,00	%	Annahme
Nutzungsdauer (für Vererdung)	40,00	a	Annahme
Nutzungsdauer (für Trocknung)	20,00	a	Annahme

Notizen

