

Green Infrastructure Maßnahmen aus Klärschlamm- Kaskadennutzung (greenIKK) mittels grenzüberschreitender interregionaler Zusammenarbeit

Gefördert durch die Europäische Union



Europäische Union

Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



Ziel ETZ
Freistaat Bayern –
Tschechische Republik
2014 – 2020 (INTERREG V)

Abschlussbericht

Inhalt

1.	Rechtliche Rahmenbedingungen	6
1.1	Das Abfallrecht	7
1.1.1	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	8
1.2	Klärschlammverordnung (AbfKlärV)	9
1.2.1	Künftige Untersuchungspflichten für Kläranlagenbetreiber	10
1.2.2	Geltende Untersuchungspflichten für Kläranlagenbetreiber	13
1.2.3	Anzeige- und Lieferscheinverfahren	17
1.2.4	Fazit zur Klärschlammverordnung	19
1.3	Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen	20
1.4	EG-Abfallverbringungsverordnung	21
1.5	Düngemittelrecht	22
1.5.1	Änderungen im Düngegesetz	22
1.5.2	Düngeverordnung	23
1.5.3	Düngemittelverordnung	25
1.6	Fazit zur rechtlichen Lage in Deutschland	29
1.7	Rechtliche Situation Tschechien	30
1.7.1	Kläranlagen und Klärschlammfall	30
1.7.2	Kostenaufwand der Schlammentsorgung	30
1.7.3	Übersicht der Gesetzgebung bezgl. des Klärschlamm	31
1.7.4	Nachtrag und Fazit zur rechtlichen Situation in CZ	32
2.	Klärschlammfall und -behandlung in der Zielregion	34
2.1	Klärschlammreduzierung	35
2.1.1	Bewertung der Verfahren zur Klärschlammreduzierung	36
2.1.2	Fazit Klärschlammreduzierung	37
2.2	Bewertung von Modellen einer semizentralen anaeroben Klärschlammbehandlung mit Hilfe der dynamischen Simulation	39
2.2.	Entwässerung	42
2.2.1	Entwässerungskonzept	45
2.3	Trocknung	46
2.4	Thermische Behandlung	50
2.4.1	Verbrennungsverfahren	50
2.4.2	Vergasungs- und Pyrolyseverfahren	50
2.4.3	Bewertung der Verfahren zur thermischen Behandlung	50
2.4.4	Bewertungsergebnis	52
2.4.5	Lösungsvorschläge für eine thermische Behandlung im Zielgebiet	53

2.4.6	Integration einer Verbrennungsanlage in die Region	54
2.4.7	Zwischenlagerung des entwässerten Klärschlamm	56
2.4.8	Ausblick	58
2.4.9	Alternative thermische Verfahren	59
2.4.9.1	Hydrothermale Carbonisierung	59
2.4.9.2	Thermo-Katalytisches Reforming - TCR®	61
2.5	Phosphorrückgewinnung	62
2.5.1	Untersuchung und Bewertung von Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammasche	64
2.5.1.1	Technologieauswahl	64
2.5.1.2	Technologiebewertung	66
2.5.1.3	Fazit Phosphorrückgewinnung	70
2.5.2	Bewertung des STRUVIA™-Verfahrens	71
2.5.1.1	Ökobilanz	71
2.5.1.2	Ökonomische Aspekte	75
2.5.1.3	Soziale Aspekte	76
2.6	Transportlogistik	77
3.	Potenzialanalyse Düngemittel aus Sekundärphosphaten	80
3.1	Bodenproben und Waldzustandserhebung	80
3.1.1	Waldzustandserhebung im Forstbezirk Přimda	80
3.1.2	Waldzustandserhebung im Oberpfälzer Wald	85
3.1.3	Bodenproben auf landwirtschaftlichen Flächen	87
3.2	Pflanzversuche mit Klärschlammprodukten	90
3.2.1	Feldversuche mit Klärschlammasche-Düngemittel	90
3.2.1.1	Feldversuche in den tschechischen Wäldern	90
3.2.1.2	Versuche in Baumschule	93
3.2.1.3	Topfversuche	94
3.2.1.4	Feldversuche auf landwirtschaftlichen Flächen	96
3.3	Pflanzenverfügbarkeit von P-Rezyklaten	96
4.	Interkommunale Zusammenarbeit	98
4.1	Europäischer Verbund für territoriale Zusammenarbeit	98
4.1.1	Rechtslage	98
4.1.2	Ziele eines EVTZ	98
4.1.3	Partnerstruktur, innere Organisation und Rechtspersönlichkeit	99
4.1.4	Genehmigungsverfahren	100
4.1.5	Fazit zu EVTZ	101
4.2	Zweckverband	102

5 Zusammenfassung	104
Abbildungsverzeichnis	108
Tabellenverzeichnis	109

Partnerstruktur „greenIKK“

Leadpartner



Zweckverband
IKomStiftland

Assoziierende Partner



Gemeinde
Speichersdorf

Projektpartner



Technologiezentrum
Energie der
Hochschule für
angewandte
Wissenschaften
Landshut



Stadt Plana



Chevak, a.s. (CZ)



Výzkumný ústav
lesního
hospodářství a
myslivosti, v. v. i.
(VÚLHM) (CZ)

Die Projektdurchführung erfolgte gemäß den im Antrag festgelegten Arbeitspaketen und Aktivitäten durch alle Projektpartner.

Aktivität		Arbeitsanteil
A1.1	Analyse Ist-Verfahren	TZE: 60 % IKomStiftland: 15 % Chevak: 15 % VÚLHM: 10 %
A1.2	Analyse und Entwicklung Zukunftsverfahren	TZE: 55 % IKomStiftland: 5 % Chevak: 5 % VÚLHM: 35 %
A1.3	Nachhaltigkeitsbewertung für Zukunftsverfahren	TZE: 70 % VÚLHM: 30 %
A1.4	Aufbau Ökosystemdienstleistung	TZE: 50 % VÚLHM: 30 % IKomStiftland: 10 % Chevak: 10 %
A1.5	Projektmanagement	IKomStiftland: 100 %

1. Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Novelle der Düngemittelverordnung (DüMV) sowie der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) führt seit der Verabschiedung 2017 zu großen Entsorgungsproblemen der Kläranlagenbetreiber, da teilweise Klärschlamm-Abnahmemöglichkeiten voll ausgelastet sind bzw. die landwirtschaftliche Verwertung für Klärschlamm kaum mehr zulässig ist.

Rechtlich bindend für die Entsorgung von Klärschlämmen sind das Kreislaufwirtschaftsgesetz, sowie bei der Verwertung auf Böden die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) und das Düngemittelrecht mit Düngeverordnung (DüV) und Düngemittelverordnung (DüMV).

Für die Städte und Gemeinden im Landkreis Tirschenreuth bedeutet die Novellierung der Gesetze, dass ab spätestens 2031 Phosphor aus Klärschlamm zurückgewonnen werden muss, wenn der Grenzwert von 20 mg P_{Gesamt} je kg Trockensubstanz im Klärschlamm erreicht oder überschritten wird (§ 3 AbfKlärV).

Im Jahr 2023 sind allerdings zunächst alle Städte und Gemeinden dazu verpflichtet bei der zuständigen Aufsichtsbehörde anzuzeigen, wie der Klärschlamm bzw. das Phosphorrecycling ab dem Jahr 2031 vollzogen werden soll. Festhalten muss man aber auch, dass die Kläranlagenbetreiber, deren Kläranlagen unter 50.000 Einwohnerwerte (EW) liegen unterschiedliche andere Entsorgungswege einschlagen können, was auf alle Kläranlagenbetreiber im Landkreis Tirschenreuth zutrifft.

Rechtlich sind daher künftig für diese Kläranlagen folgende Entsorgungswege zulässig:

- a) Phosphorentfrachtung bzw. Abreicherung der Klärschlämme auf Kläranlagen mit nachfolgender Mitverbrennung, wie z.B. in Zementwerken, Industriefeuerungsanlagen oder Müllverbrennungsanlagen.
- b) Verbrennung nicht phosphorentfrachter Klärschlämme in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus den Klärschlammaschen.
- c) Verwertung auf Böden durch Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen, zu Rekultivierungszwecken, oder durch Kompostierung sowie Vererdung mit anschließender Aufbringung auf Böden. Die Vorgaben der AbfKlärV sowie des Düngerechts sind dabei zu beachten.

Hierbei ist allerdings zu beachten, dass bei der Verwertung von Klärschlämmen auf Böden **erhebliche Risiken** z.B. durch „neue“ Schadstoffe, Mikroplastik oder pathogene Stoffe, wie multiresistente Keime, bezüglich der Akzeptanz der Abnehmer (Landwirte oder Besitzer von

Rekultivierungsflächen) bestehen und es auch grundsätzlich der politische Wille ist, die Verwertung des Klärschlammes auf Böden weitestgehend zu minimieren.

Nach Art 5 Nr. 4 § 3 (3) ist eine anderweitige Abfallentsorgung nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz, z.B. der Beseitigung in Müllverbrennungsanlagen, nach Zustimmung der zuständigen Aufsichtsbehörde möglich und bietet somit eine bewährte Alternative zur Klärschlamm Entsorgung.¹ Allerdings wird bei diesem Verwertungspfad, nach heutigem Kenntnisstand, kein Phosphor zurückgewonnen.

Nachfolgend wird die rechtliche Situation analysiert und verschiedene Teilaspekte werden näher erläutert u.a. unter Einbeziehung der Klärschlammprobenprotokolle aus dem Projektzielgebiet.

1.1 Das Abfallrecht

Das Abfallrecht als übergeordnetes Gesetz regelt in Deutschland den Transport, die Verwertung, die Entsorgung sowie den Umgang mit Abfällen jeglicher Art. Die Hierarchie reicht von europäischem Recht bis zum kommunalem Abfallrecht, welches unter anderem die Gebührenerhebung regelt.² Seit dem 1. Juni 2012 ist das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) in Kraft getreten. Durch das KrWG wird die europäische Richtlinie (Richtlinie 2008/98/EG), zum Umgang mit Abfall, in nationales Recht umgesetzt. Dadurch soll die Abfallwirtschaft mehr auf Kreislaufwirtschaft ausgerichtet werden. Laut Paragraph § 6 des KrWG (Abfallhierarchie) ist folgende Rangordnung zur Vermeidung und Bewirtschaftung von Abfall verankert:

1. Vermeidung
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung
3. Recycling,
4. sonstige Verwendung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung
5. Beseitigung

Daraus folgt, dass jeder in der Pflicht steht, Abfall so gut es geht zu vermeiden, falls das nicht möglich ist, müsse dieser möglichst hochwertig verwertet werden. Bei Klärschlamm bedeutet das,

¹ vgl. AbfKlärV, 2017; https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKl%C3%A4rV.pdf;

² Umweltbundesamt - Abfallrecht, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfallressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht>.

dass landwirtschaftliche Ausbringung, Phosphorrückgewinnung und energetische Verwertung das Ziel bei der Entsorgung sein müssen.³

1.1.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Was dem Schutz des Menschen und der Umwelt am dienlichsten ist, ist als Maßnahme zur Abfallbewirtschaftung, unter Berücksichtigung von technischen, sozialen und wirtschaftlichen Eckpunkten zu wählen. Weiterführend wird daher über § 9 des KrWG (Getrennthalten von Abfällen zur Verwertung, Vermischungsverbot) das Mischen von Abfällen geregelt. Unter Berücksichtigung von § 7 und § 8 des KrWG, welche den Schutz des Menschen und der Umwelt überordnen. Dieser Vorrang gilt nicht für Abfälle die unmittelbar und üblicherweise durch Maßnahmen der Forschung und Entwicklung anfallen. Die Vermischung und Verdünnung von gefährlichen Abfällen mit anderen gefährlichen Abfällen, Stoffen und Materialien ist nicht zulässig. Ausnahmen hierfür sind:

- die Vermischung durch eine durch den Bundes-Immissionsschutz zugelassene Anlage.
- die Anforderungen an eine schadlose und ordnungsgemäße Verwertung (§ 7 Absatz 3 des KrWG), welche dafür sorgt, dass die schädlichen Auswirkungen auf Menschen und Natur nicht verstärkt werden durch die Abfallbewirtschaftung.
- der Vermischungsakt dem Stand der Technik entspricht.

Laut dem Beschluss des Bundesverwaltungsgerichts (BVerwG) vom 07.02.2017 ist die Beseitigung des Klärschlammes der Abwasserbeseitigung in kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen unterworfen. Vorausgehend stellte sich die Frage, ob das Einsammeln und der Transport von Klärschlamm bundesrechtlich dem abfall- oder dem abwasserrechtlichen Teil zugeordnet werden muss. Die Abgrenzung erfolgt durch § 2 Abs.2 Nr. 9 des KrWG. Danach gelten die Vorschriften des KrWG nicht für Stoffe, sobald sie in Gewässer oder Abwasserbehandlungsanlagen eingebracht werden.⁴ Das BVerwG führte am 07.02.2017 aus, dass die Regelung des Paragraphen § 54 Abs. 2 Satz 2 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) klarstellt, dass die Mischung von Klärschlamm, sofern er danach in ein Klärwerk gefahren wird, wo dementsprechende Reinigungsschritte vollzogen werden, rechtens ist.⁵ Klärschlamm darf daher, sofern der Bestimmungsort eine Abwasserreinigungsanlage mit den vorgesehenen Reinigungsschritten ist, vermischt werden. Das bedeutet insgesamt auch, dass mehrere Klärwerke durch ein Klärschlammtransportunternehmen angefahren werden, um Klärschlamm in

³ KrWG §6, <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>.

⁴ vgl. ebd.

⁵vgl. Beschluss vom 07.02.2017 BVerwG 9 B 30.16, <https://datenbank.nwb.de/Dokument/Anzeigen/691898/>.

die Kläranlagen zu verbringen. Der bearbeitete Klärschlamm fällt jedoch unter das KrWG und darf nicht mehr mit Schlamm aus anderen Anlagen vermengt werden. Lediglich bei der weiteren Verwertung bei einem Entsorger ist dies möglich.⁶

Die Paragraphen § 53 und § 54 des KrWG enthalten eine Regelung für Sammler, Beförderer, Händler und Makler von Abfällen. Maßgeblich für die Abfallbehandlung ist das Abfallgefährdungspotenzial. Der Transport nicht gefährlicher Abfälle ist nach §53 des KrWG anzuzeigen, für gefährliche Abfälle greift der Paragraph § 54 des KrWG. Zu beachten ist, dass Fahrzeuge seit Juni 2012 für jegliche Arten von Abfalltransport mit A-Schildern zu kennzeichnen sind (§ 55 des KrWG). Jedes Transportmittel das Klärschlamm transportiert, muss als solches Fahrzeug gekennzeichnet sein. Für den Transport von Klärschlamm müssen eine Transportgenehmigung und eine Beförderungserlaubnis vorliegen.⁷

1.2 Klärschlammverordnung (AbfKlärV)

Die Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost, im Folgenden AbfKlärV, regelt die Verwertung von Klärschlamm und wurde im Jahr 2017 novelliert. Des Weiteren treten in den nächsten Jahren verschiedene weitere Artikel in Kraft, welche die Phosphorrückgewinnung, die in § 3 AbfKlärV allgemein genannt wird, genauer definieren. Stark begrenzt wird demnach die bodenbezogene Ausbringung wie zum Beispiel die Verwertung in der Landwirtschaft, die ab dem Jahr 2031 nur noch für Kläranlagen unter 50.000 EW zulässig ist, unabhängig davon ob der Phosphorgehalt über 20g pro kg Klärschlamm liegt. Die Phosphorrückgewinnung sowie die landwirtschaftliche Ausbringung werden daher zukünftig über ein abgestuftes Inkrafttreten neuer Regelungen und Verschärfungen bis zum Jahr 2032 geregelt. **Allerdings müssen im Jahr 2023 die Klärschlammherzeuger die zuständigen Behörden informieren, welche Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung, zur bodenbezogenen Klärschlammverwertung oder zur sonstigen Klärschlamm Entsorgung, wie z.B. einer thermischen Verwertung in einer Mitverbrennungsanlage, ergriffen werden.**⁸ Durch die Übergangsfristen haben die Kläranlagenbetreiber Zeit, alternative Entsorgungswege zur landwirtschaftlichen Ausbringung zu vergleichen und schließlich geeignete Verfahren zu implementieren, um eine stoffliche und energetische Verwertung des Klärschlammes im Sinne der Klärschlammverordnung durchzuführen.⁹

⁶ vgl. KrWG, 2017, <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>.

⁷ vgl. ebd.

⁸ vgl. Art 4 § 3a AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

⁹ vgl. Art 5 und Art. 6 AbfKlärV 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf;

1.2.1 Künftige Untersuchungspflichten für Kläranlagenbetreiber

Die Novellierung der Klärschlammverordnung ist durch ein abgestuftes Inkrafttreten geregelt. Die derzeitigen Vorgaben der seit 03.10.2017 geltenden AbfKlärV werden nachfolgend behandelt. Durch drei weitere Artikel wird diese bis zum Jahr 2032 erweitert.

Neuerungen bezüglich des Verbots der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlamm gelten in Zukunft zunächst nur für Kläranlagen mit Ausbaugrößen ab 50.000 EW beziehungsweise 100.000 EW. Demnach ist ab dem 01.01.2032 die Klärschlammausbringung auf landwirtschaftlichem Flächen für Anlagen größer 50.000 EW nicht mehr zulässig und ab dem 01.01.2029 für Ausbaugrößen über 100.000 EW. Betrachtet man sämtliche Anlagen in der Zielregion auf dt. Seite bzw. deren Ausbaugrößen, so fallen diese zunächst nicht in die oben genannte Regelung, da keine die Größe von 50.000 EW überschreitet. **Jedoch ist die landwirtschaftliche und landbauliche Verwertung bereits jetzt nur für vollständig stabilisierte Schlämme zulässig beziehungsweise die Ausbringung von Rohschlämmen unzulässig.**¹⁰ Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 3 sowie Kläranlagen der Größenklasse 4, die keinen Faulturm besitzen, erfüllen diese Vorgabe der Klärschlammverordnung oft nicht. Ist dies der Fall, so ist eine bodenbezogene Verwertung für diese Klärschlämme nicht mehr zulässig. Somit sind auch die Anlagen der Projektregion von dieser Regelung betroffen.^{11 12}

Die Phosphorrückgewinnung i. A. wird in der novellierten Klärschlammverordnung bisher nur zum Ziel erklärt, wobei derzeit keine Pflichten oder Richtlinien genannt werden, die bereits in Kraft getreten sind. Diese treten aber in den nächsten Jahren stufenweise in Kraft und verpflichten die Abwasserentsorger zur Rückgewinnung von Phosphor bzw. geben auch für die Verwertung von Klärschlamm dann konkrete Vorgaben. Bisher wird lediglich darauf verwiesen, dass der anfallende Schlamm möglichst hochwertig zu verwerten sei, sofern dies möglich ist. Beträgt der Phosphorgehalt im Klärschlamm mehr als 20 g/kg TS, so gelten in Zukunft Pflichten zu dessen Rückgewinnung. Die Vorgaben gelten hier, wie oben in Bezug auf die bodenbezogene Verwertung für die Ausbaugrößen von 100.000 EW ab dem 01.01.2029 beziehungsweise für 50.000 EW ab dem 01.01.2032. Die Untersuchungen sind pro angefangene 500 Tonnen Trockenmasse oder höchstens alle sechs Monate vorzunehmen.¹³

¹⁰ vgl. § 2 Abs. 3, AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf;

¹¹ Vgl. § 15 Abs. 1, AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf;

¹² Vgl. § 3 Abs. 1, AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf;

¹³ Vgl. § 5, AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

Eine Phosphat-Nutzungspflicht gilt zukünftig weiterhin nicht für Kläranlagen mit Ausbaugrößen bis zu 100.000 EW. Unabhängig vom Phosphorgehalt des Klärschlammes gibt es ein Wahlrecht, ob man den grundsätzlichen Pflichten des § 3 Abs. 1 folgt, also Phosphor technisch zurückgewinnt oder ob der Klärschlamm stattdessen auf oder in Böden verwertet wird bzw. nach behördlicher Zustimmung einer anderweitigen, in der Regel thermischen, Abfallentsorgung zugeführt wird.¹⁴ Dieses Wahlrecht betrifft theoretisch alle Anlagen der Projektregion. Wobei hier anzumerken ist, dass gerade auch die kleineren Anlagen wesentlich zur Rückgewinnung von Phosphor beitragen können und dies, falls es wirtschaftlich darstellbar ist, auch tun sollten.

Nachfolgend wird in Tabelle 1 ein Überblick über mögliche Entsorgungsmöglichkeiten gegeben.

Tabelle 1 Überblick über Entsorgungsmöglichkeiten¹⁵

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

¹⁴ Vgl. Art. 5 § 3 Abs. 3 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKl%C3%A4rV.pdf.

¹⁵ vgl. Korrespondenz Abwasser, Abfall 2018 (65) Nr. 8, Auswirkung der neuen Klärschlammverordnung auf die Klärschlamm Entsorgung

Erläuterung zur Tabelle 1:

- ¹) Artikel 5 Nummer 4 § 3 Absatz 2 zweiter Satz: „Von der Pflicht nach Satz 1 sind ausgenommen Betreiber einer Klärschlammverbrennungsanlage und Betreiber einer Klärschlammmitverbrennungsanlage, in denen ausschließlich Klärschlamm mit einem Phosphorgehalt von weniger als 20 Gramm je Kilogramm Trockenmasse eingesetzt wird.“
- ²) Artikel 5 Nummer 4 § 3 Absatz 3: „Abweichend von Absatz 1 kann der Klärschlammherzeuger, der eine Abwasserbehandlungsanlage mit einer genehmigten Ausbaugröße von bis zu 100000 Einwohnerwerten (bzw. nach Änderung mit Artikel 6: „bis zu 50000“) betreibt, den in dieser Anlage anfallenden Klärschlamm unabhängig vom Phosphorgehalt nach Maßgabe der in den Teilen 2 und 3 genannten Anforderungen auf oder in Böden verwerten oder nach Zustimmung der zuständigen Behörde einer anderweitigen Abfallentsorgung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zu-führen.“
- ³) Der Betreiber bleibt in der Pflicht bezüglich der Phosphorrückgewinnung. Er muss den beauftragten Entsorger bzw. Betreiber der Verbrennungsanlage verpflichten, eine ordnungsgemäße Phosphorrückgewinnung nach Maßgabe der AbfKlärV 2017 durchzuführen.
- ⁴) Artikel 5 Nummer 4 § 3 Absatz 3 letzter Satz: „Eine Verwertung des Klärschlammes auf oder in Böden ist nicht zulässig, sofern der Klärschlamm einer ordnungsgemäßen Phosphorrückgewinnung nach Absatz 1 Nummer 1 zugeführt wurde.“ Schlämme mit einem Phosphorgehalt unter 20 g P/kg TM unterliegen den Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und können stofflich oder thermisch verwertet werden ohne Pflicht zur P-Rückgewinnung.
- ⁵) Artikel 5 Nummer 4 § 3 Absatz 2 letzter Satz: „Wurde bereits eine ordnungsgemäße Phosphorrückgewinnung aus einem Klärschlamm nach Absatz 1 Nummer 1 durchgeführt, ist im Fall einer Zuführung des Klärschlammes in eine Klärschlammverbrennungsanlage oder eine Klärschlammmitverbrennungsanlage eine Phosphorrückgewinnung nach Satz 1 nicht erforderlich.“
- ⁶) Artikel 5 Nummer 4 § 3 Absatz 4: „Der Klärschlammherzeuger, der eine Abwasserbehandlungsanlage mit einer genehmigten Ausbaugröße von mehr als 100 000 Einwohnerwerten betreibt (bzw. nach Änderung mit Artikel 6: „bis zu 50 000“), kann den in dieser Anlage anfallenden Klärschlamm einer anderweitigen Abfallentsorgung zuführen, sofern der Klärschlamm einen Phosphorgehalt von weniger als 20 Gramm je Kilogramm Trockenmasse aufweist oder bereits einer Phosphorrückgewinnung nach Absatz 1 Nummer 1 unterzogen wurde.“
- ⁷) Zusätzlich: Artikel 4 § 3a Absatz 2 (Artikel tritt am 1. Januar 2023 in Kraft) Im Kalenderjahr 2023 haben alle Klärschlammherzeuger (unabhängig von der Ausbaugröße!) Proben des anfallenden Klärschlammes auf den Phosphorgehalt und den Gehalt an basisch wirksamen Stoffen insgesamt, bewertet als Calciumoxid, untersuchen zu lassen. Diese Untersuchung ist im Kalenderjahr 2027 zu wiederholen. Bis spätestens 31. Dezember 2023 haben alle Klärschlammherzeuger (unabhängig von der Ausbaugröße!) der zuständigen Behörde einen Bericht über die geplanten und eingeleiteten Maßnahmen zur Sicherstellung der ab 1. Januar

2029 durchzuführenden Phosphorrückgewinnung, zur Auf- oder Einbringung von Klärschlamm auf oder in Böden oder zur sonstigen Klärschlammensorgung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes vorzulegen.“¹⁶

Für einen Überblick über die Phosphorgehalte in der Zielregion und die damit zusammenhängende theoretische Rückgewinnungspflicht dient die nachfolgende Abbildung.

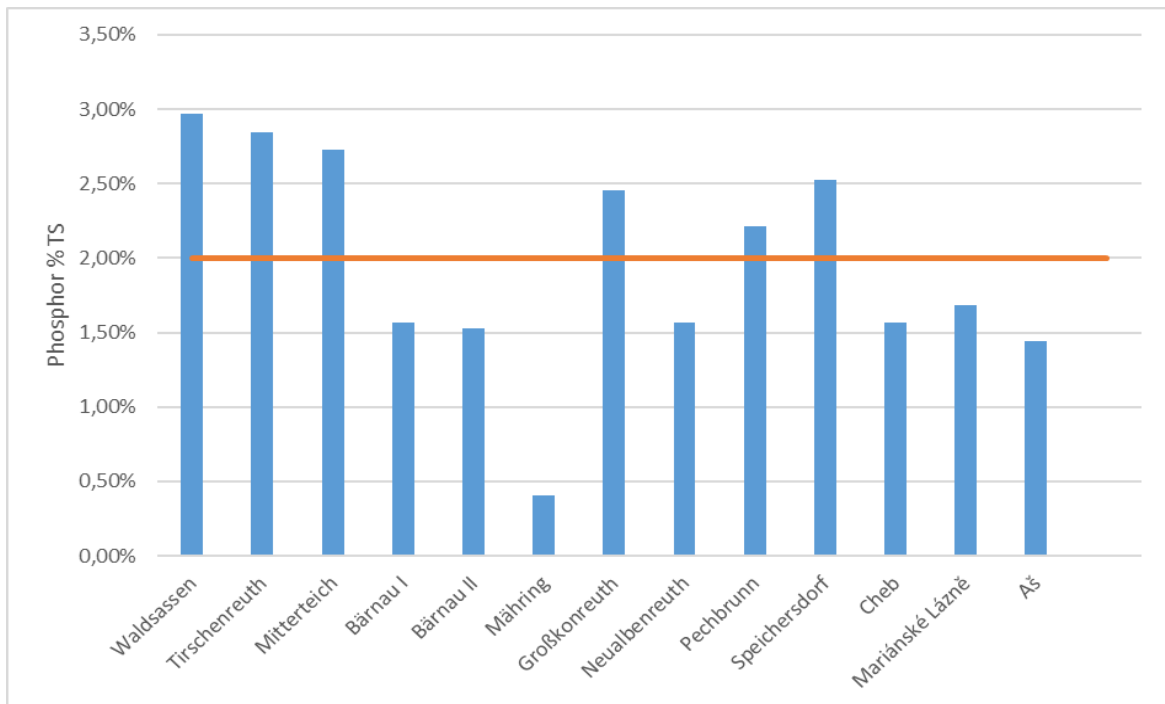


Abbildung 1 Durchschnittlicher P-Gehalt sowie künftiger Grenzwert¹⁷

Bei den gemessenen Werten der Klärschlammuntersuchungen handelt es sich um den Phosphatgehalt (P_2O_5). Um den tatsächlichen Phosphatgehalt zu bestimmen, muss der Phosphatgehalt mit 0,436 multipliziert werden. Somit ergeben sich die Phosphatgehalte der Anlagen, die in Abbildung 1 dargestellt sind.¹⁸ Demnach liegen die Werte von sechs Kläranlagen über 20 Gramm Phosphor pro Kilogramm Trockensubstanz. Demzufolge ist eine effiziente Rückgewinnung, vor allem bei diesen betroffenen Anlagen, anzustreben.

1.2.2 Geltende Untersuchungspflichten für Kläranlagenbetreiber

Wird Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht, so gelten gewisse Untersuchungspflichten, die im gleichnamigen Abschnitt der Klärschlammverordnung geregelt

¹⁶ vgl. Korrespondenz Abwasser, Abfall 2018 (65) Nr. 8, Auswirkung der neuen Klärschlammverordnung auf die Klärschlammensorgung

¹⁷ Bachelorarbeit Estner, haw Landshut 2018.

¹⁸ Landwirtschaftskammer Luxemburg 2014, Strategien fürs Feld.Luxemburg, S. 1.

sind. Zunächst hat der Erzeuger von Klärschlamm beziehungsweise der Kläranlagenbetreiber die Böden, auf denen er den Klärschlamm ausbringen möchte, unter anderem auf den Phosphatgehalt und pH-Wert zu untersuchen.¹⁹ Diese Untersuchungen sind alle zehn Jahre durchzuführen. Bei einer Ausbaugröße von weniger als 1.000 EW können diese Untersuchungszyklen entfallen. So gilt diese Ausnahmeregelung lediglich für die kommunale Kläranlage Plößberg I. Die Ausbaugröße dieser Anlage beträgt 700 EW.^{20 21}

Die Untersuchungspflichten vor der Abgabe des Klärschlammes an den Endnutzer betreffen den Klärschlammhersteller. Dieser hat sicherzustellen, dass der produzierte Klärschlamm unter anderem auf Metalle wie Chrom, Kupfer und Nickel sowie den Phosphorgehalt den pH-Wert und die organische Substanz untersucht wird. Diese Untersuchungen sind pro angefangene 250 Tonnen Trockenmasse durchzuführen, doch nur höchstens einmal im Monat. Für die Kläranlagen in der Projektregion sind diese Untersuchungen mindestens alle drei Monate durchzuführen, da eine jährliche Höchstmenge von 750 Tonnen Trockenmasse bei den betrachteten Anlagen nicht überschritten wird und sich die vorgegebenen Untersuchungszyklen nach der anfallenden Menge richten. Dies wird aus den Anlagenwerten der Jahre 2013 bis 2016 ersichtlich.²²

Die zulässigen Grenzwerte zur Ausbringung des Klärschlammes sind unter anderem in der Anlage der Klärschlammverordnung definiert, auf die in den entsprechenden Paragraphen verwiesen wird. Außerdem gilt es, weitere Grenzwerte Düngemittelverordnung (DüMV). In der AbfKlärV heißt es hierzu:

„Die Abgabe des Klärschlammes durch den Klärschlammhersteller sowie die Auf- oder Einbringung des Klärschlammes auf oder in den Boden ist nur zulässig, wenn die Untersuchungen nach § 5 Absatz 1 und 2 ergeben, dass die Grenzwerte nach Anlage 2 Tabelle 1.4 Spalte 4 der Düngemittelverordnung sowie die zusätzlichen Grenzwerte nach Anlage 1 nicht überschritten werden. Für Kupfer gilt als Grenzwert der zulässige Höchstgehalt nach Anlage 1 Abschnitt 4.1 Nummer 4.1.1 Spalte 6 Absatz 2 der Düngemittelverordnung.“²³

Die Untersuchungspflichten mit den zugehörigen Grenzwerten für Zink, adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX), Benzo(a)pyren (B(a)P) sowie Polychlorierte Biphenyle (PCB) sind hierbei festgeschrieben. Für die restlichen zu untersuchenden Stoffe wird wie im Gesetzestext gezeigt auf die Düngemittelverordnung verwiesen. Nachfolgend ist die Tabelle mit den zu

¹⁹ § 4 Abs. 1 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

²⁰ § 4 Abs. 4 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

²¹ § 4 Abs. 7 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

²² § 5 Abs. 1 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

²³ § 8 Abs. 1 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

untersuchenden Stoffen und den zugehörigen neuen sowie alten Grenzwerten vor der Novellierung der AbfKlärV zu sehen.²⁴

Tabelle 2 Neue und alte Grenzwert der AbfKlärV^{25, 26}

Stoffbezeichnung	neuer Grenzwert [mg/kg TS]	alter Grenzwert [mg/kg TS]
Zink	4000	2500
Summe organischer Halogenverbindungen als adsorbierte organisch gebundene Halogene (AOX)	400	500
Benzo(a)pyren (B(a)P)	1	-
Polychlorierte Biphenyle (PCB), jeweils für die Kongenere 28, 52, 101, 138, 153, 180	0,1	0,2

Wie in Tabelle 2 dargestellt, sind die Grenzwerte für die Stoffe AOX sowie PCB verschärft worden. Für das Jahr 2016 liegen jeweils zwei Messwerte der Anlagen für die jeweiligen Stoffe vor. Aus diesen Werten wird der Jahresdurchschnitt gebildet, welcher als Vergleichswert gilt. Für den Vergleich mit den zulässigen Grenzwerten aus der AbfKlärV sind lediglich die AOX- sowie Zinkwerte repräsentativ, da für andere zu untersuchende Stoffe keine, beziehungsweise nur Werte weniger Anlagen vorliegen. In Bezug auf die Zink- und AOX-Werte liegt jede Anlage unterhalb der zulässigen Höchstmenge, womit eine bodenbezogene Ausbringung nach wie vor möglich ist, sofern die anderen zu untersuchenden Stoffen auch innerhalb der Grenzen liegen. Die nachfolgende Abbildung 2 soll dies verdeutlichen.

²⁴ Schaum et al. 2018, S. 22.

²⁵ Anlage 1 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKl%C3%A4rV.pdf.

²⁶ Langenohl, Thomas (2017): Umsetzung der Klärschlammverordnung aus kommunaler Sicht.

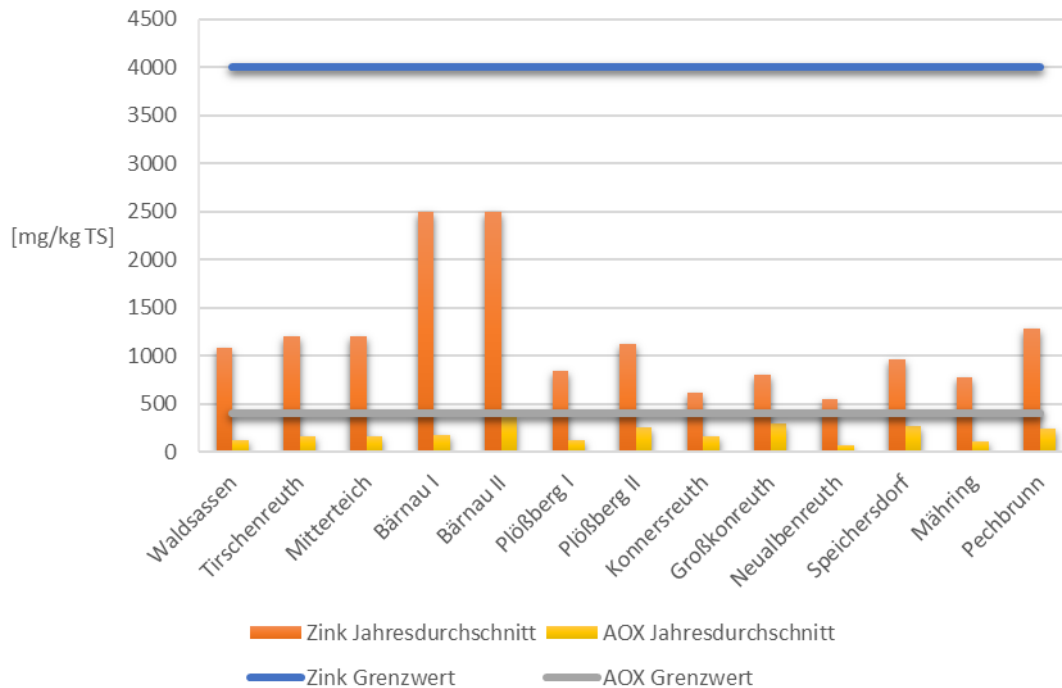


Abbildung 2 Durchschnittliche Messwerte 2016 sowie Grenzwerte nach AbfKlärV²⁷

Wie in Abbildung 2 klar ersichtlich wird, liegen vor allem die gemessenen Zinkwerte aller Anlagen deutlich unter dem Grenzwert. Der maximal zulässige AOX-Wert wird ebenfalls von keiner Anlage überschritten. Auf die anderen Grenzwerte, welche laut Klärschlammverordnung zu untersuchen sind, wird bei der Düngemittelverordnung eingegangen und mit den Anlagewerten verglichen. Unabhängig von der Ausbaugröße und den gemessenen Werten sowie ohne entsprechende Übergangszeiten gibt es in der neuen Verordnung Einschränkungen, was die Abgabe des Klärschlammes beziehungsweise dessen Ausbringung auf Böden angeht. Von großer Relevanz ist dabei das Verbot der Ausbringung von unbehandelten Klärschlämmen. Schlämme, die aus Anlagen stammen, in die zuvor Abwasser aus der industriellen Kartoffelverarbeitung eingeleitet wurde, dürfen ebenfalls nicht ausgebracht werden. Des Weiteren ist die Ausbringung auf Böden, welche als Grünland, Ackerbaufutteranbaufläche, Anbaufläche für Mais und Zuckerrüben sowie Obst, Gemüse und Hopfen genutzt werden, nicht zulässig.^{28 29 30}

²⁷ Bachelorarbeit Estner, haw Landshut 2018.

²⁸ § 15 Abs. 1 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

²⁹ § 15 Abs. 4 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

³⁰ § 15 Abs. 5 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

1.2.3 Anzeige- und Lieferscheinverfahren

Bei der landwirtschaftlichen bzw. bodenbezogenen Klärschlammverwertung sind folgende bodenbezogene Untersuchungsparameter zu beachten. Neben der Bodenart sind, der pH-Wert, der Humusgehalt (neu), das Phosphat, die Schwermetalle sowie PCB und als neuer Untersuchungswert Benzo(a)pyren zu untersuchen. Auch eine differenzierende Grenzwertgestaltung bei Schwermetallen im Boden in Abhängigkeit von der Bodenart und dem pH-Wert bzw. dem Humusgehalt sind zu beachten. Klärschlammbezogene Untersuchungsparameter werden um das bisherige Untersuchungsspektrum erweitert, um Phosphor (Pgesamt), basisch wirksame Stoffe (bewertet als CaO, bisheriges CaO entfällt) und Benzo(a)pyren. Eisen, Arsen, Thallium und Chrom VI und Perfluortenside (PFOA + PFOS) sind bereits nach der DüMV vorgesehen und müssen notwendigerweise auch in die Analyse einbezogen werden. Die Untersuchungshäufigkeit für Klärschlämme alle 3 Monate bzw. eine Untersuchung je angefangene 250 t Klärschlamm Trockenmasse sind obligatorisch und zeitlich enger gesetzt als bislang. Die Voranzeigenfrist beträgt mindestens 3 Wochen vor dem geplanten Ausbringungszeitpunkt. Weiterhin müssen die neuen, erweiterten Mustervorlagen für die Voranzeigen und Lieferscheine beachtet werden. Außerdem wurde neu festgehalten, wie die Lieferungen zur landbaulichen Verwertung (Rekultivierung, Landschaftsbau), die Lieferungen an Klärschlammgemisch- und Klärschlammkomposthersteller, zusammen mit den Nachweisen (Lieferscheine) der endgültigen Aufbringung, die Voranzeige- und Lieferscheinverfahren für die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlammgemischen, die Meldungen an Träger der Qualitätssicherung sowie die Dokumentationsrichtlinien und der Austausch mit Kreisverwaltungsbehörden, die jährlich Auf- und Einbringungspläne für Klärschlamm, Klärschlammgemische und Klärschlammkomposte erstellen müssen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass sämtliche Lieferungen detailliert in einem Register abzulegen und bis spätestens zum 15. März des Folgejahres elektronisch an die Behörden zu melden sind.³¹ Nachfolgend werden in Tabelle 3 Klärschlammbezogene Untersuchungsparameter dargestellt.

³¹ vgl. § 16 und § 17 AbfKlärV 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKl%C3%A4rV.pdf.

Tabelle 3 Klärschlammbezogene Untersuchungsparameter³²

Klärschlammbezogene Untersuchungsparameter	Analysengültigkeit
!! Basis der Analysengültigkeit ist das Analysedatum, nicht wie bisher das Probenahmedatum !!	bei <= 750 t TM pro Jahr
Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Chrom VI, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Thallium und Zink	3 Monate
Summe der organischen Halogenverbindungen als adsorbierte organisch gebundene Halogene (AOX)	3 Monate
Gesamtstickstoff, Ammoniumstickstoff	3 Monate
Phosphor (Pgesamt)	3 Monate
Trockenrückstand	3 Monate
Organische Substanz	3 Monate
Basisch wirksame Stoffe insgesamt, bewertet als Calciumoxid	3 Monate
Eisen	3 Monate
pH-Wert	3 Monate
polychlorierte Biphenyle, polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane, dioxinähnliche polychlorierte-Biphenyle (dl-PCB), Benzo(a)pyren	24 Monate
Polyfluorierte Verbindungen mit den Einzelsubstanzen Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	24 Monate
Seuchen- und Phytohygiene: derzeit nur Salmonellen (nicht verpflichtend, entsprechend Vorgaben nach DüMV, § 5)	3 Monate
Bodenbezogene Untersuchungsparameter	
Bodenart, pH-Wert, Humusgehalt (neu), Phosphat	3 Jahre
Schwemetalle	10 Jahre
Polychlorierte Biphenyle und Benzo(a)pyren (Untersuchungen werden ab 03.04.2018 benötigt)	10 Jahre
Differenzierende Grenzwertgestaltung bei Bodenbezogenen Untersuchungsparametern	
Bei Schwemetallen im Boden in Abhängigkeit von der Bodenart und dem pH-Wert bzw. bei polychlorierten Biphenylen und Benzo(a)pyren vom Humusgehalt.	

³² Eigene Darstellung nach § 16 und § 17 AbfKlärV 2017.

1.2.4 Fazit zur Klärschlammverordnung

Die Novellierung der Klärschlammverordnung aus dem Jahr 2017 sieht tiefgreifende Änderungen vor in der Verwertung und Nutzung des Klärschlammes. Wie den oben angeführten Punkten zu entnehmen ist, ändern sich nicht nur die Verwertungsmöglichkeiten- und Verwertungspflichten, sondern auch der Wettbewerb in der Düngemittelindustrie durch die forcierte Phosphorrückgewinnungspflicht.

Zusammengefasst sind für die zukünftige Verwertung von Klärschlämmen und Klärschlammgemischen folgende Fakten festzuhalten. Theoretisch ist eine bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen weiterhin möglich, vor allem bei Kläranlagen, deren Ausbaugröße unter 50.000 EW beträgt. Ausgenommen von der Phosphorrückgewinnung sind sie jedoch nicht, auch wenn es grundsätzlich die Möglichkeit geben wird, Klärschlamm nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz zu verwerten, ohne Phosphor zurückzugewinnen. Dennoch wird die bodenbezogene Verwertung immer schwieriger umzusetzen sein, da der Wettbewerb zwischen Gülle und Gärresten weiter zunehmen wird und die Ausbringung im Herbst stark eingeschränkt ist. **Ausgebracht werden dürfen allerdings nur stabilisierte Schlämme, was vor allem kleine Kläranlagen beachten müssen, deren Klärschlamm z.T. nur stabilisiert sind.** Die Phosphor-Rückgewinnung wird insgesamt eine große Herausforderung, aber viele Wege sind möglich und rechtlich zulässig. Ein weiteres Problem könnte durch steigende Entsorgungs- und Abwasserkosten hinzukommen, um die neuen Regelungen wirtschaftlich umsetzen zu können. Auch wird kurz- und mittelfristig ein steigender Bedarf thermischer Verwertungsanlagen entstehen. Abschließend ist auch festzuhalten, dass Produkte aus Klärschlamm eindeutig als „kein Klärschlamm“ deklariert werden, wenn sie so behandelt worden sind, dass klärschlammtypische, stoffcharakteristische Merkmale nicht mehr vorhanden sind wie der AbfKlärV in § 2 Abs. 2 zu entnehmen ist.³³

³³ vgl. § 2 Abs. 2 AbfKlärV 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKI%C3%A4rV.pdf.

Tabelle 4 Neuordnung der Klärschlamm Entsorgung – Phosphorrückgewinnungspflicht³⁴

Zulässige Entsorgung	Ausbaugröße ≤ 50.000 EW	Ausbaugröße >50.000 EW und <100.000EW	Ausbaugröße > 100.000 EW
bodenbezogene Verwertung	Verwertung unbefristet zulässig	15 Jahre Übergangsfrist bis zum Jahr 2031	12 Jahre Übergangsfrist bis zum Jahr 2029
Mitverbrennung ohne Phosphorrückgewinnung	Mitverbrennung Unbefristet zulässig	Phosphorgehalt in Schlamm <20g/Kg TS unbefristet zulässig	Phosphorgehalt im Schlamm <20g/kg unbefristet zulässig
Monoverbrennung ohne Phosphorrückgewinnung / Aschelagerung	Monoverbrennung und Aschelagerung unbefristet zulässig	Bis 2032 zulässig	Bis 2029 zulässig

1.3 Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen

Klärschlamm fällt unter das Kreislaufwirtschaftsgesetz und ist somit als Abfall deklariert, weshalb es sich bei derartigen (Mono- oder Mit-) Verbrennungsanlagen um Abfallverbrennungsanlagen handelt.³⁵ Aus diesem Grund gilt die Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen, im Folgenden 17. BImSchV, für den Betrieb derartiger Anlagen. Nachfolgend wird hier auf die Vorgaben eingegangen, die bei der Bewertung der Monoverbrennung von Relevanz sind beziehungsweise für den Betrieb einer solchen Anlage.^{36 37 38}

Für den Betrieb von Klärschlammverbrennungsanlagen ist eine Mindesttemperatur von 850 °C bei der Verbrennung vorgeschrieben. Um solch ein Temperaturniveau zu erreichen, werden zum Teil zusätzliche Brennstoffe zugefügt. Des Weiteren ist sicherzustellen, dass im Betrieb eine möglichst vollständige Verbrennung der eingesetzten Stoffe garantiert ist.^{39 40}

Während dem Anlagenbetrieb sind kontinuierlich Messungen zu tätigen. Gemessen werden hierbei unter anderem Emissionen, das Sauerstoffvolumen im Abgas sowie die Temperatur, die benötigt wird.

³⁴Eigene Darstellung: IKom Stifftland

³⁵ KrWG, 2012, <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>.

³⁶ § 1 Abs. 1 17. BImSchV, 2013, https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_1_2010/BJNR003800010.html.

³⁷ § 2 Abs. 1 17. BImSchV, 2013, https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_1_2010/BJNR003800010.html.

³⁸ § 3 Abs. 1 KrWG 2012, <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>.

³⁹ § 6 Abs. 1 17. BImSchV, 2013, https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_1_2010/BJNR003800010.html.

⁴⁰ § 5 Abs. 4 17. BImSchV, 2013, https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_1_2010/BJNR003800010.html.

Dabei müssen die Tagesmittelwerte unter anderem von Stoffen wie Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid sowie der Gesamtstaub, unterhalb der vorgeschriebenen Grenzwerte liegen. Diese werden in Kapitel sieben im Zuge der Bewertung einer Monoverbrennungsanlage auch behandelt. Für Stickstoffdioxid sowie Quecksilber sind zusätzliche Grenzwerte der Jahresmittelwerte einzuhalten.^{41 42 43}

1.4 EG-Abfallverbringungsverordnung

Der Vorrangige Zweck dieser Verordnung ist der Umweltschutz, der internationale Handel ist zweitrangig. Die Überwachung und Kontrolle der Verbringung von Abfällen muss so geregelt werden, dass sie als Ziel die Qualität der Umwelt und der Gesundheit des Menschen zu schützen hat. Die Verbringung gefährlicher Abfälle (Artikel 4 Absatz 2 Buchstabe d des Basler Übereinkommens der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (VVA)) ist auf ein Mindestmaß zu beschränken unter Berücksichtigung einer wirksamen Behandlung.^{44 45} **Nach dem Anhang IV der VVA ist Klärschlamm mit dem Code AC270 gelistet und befindet sich auf der gelben Liste, die vom Ein- und Ausfuhrverbot (§ 34 - § 37 der VVA) betroffen sind und einem Notifizierungsverfahren unterliegen. Die Unterscheidung erfolgt anhand des Zwecks der Ausfuhr, der Abfallart und dem Herkunfts- oder Zielland.**

Diese Vorschriften gelten sowohl für den privaten als auch für den gewerblichen Gebrauch. **Für jede Art von Transport von Klärschlamm über die Staatsgrenze muss dieser notifiziert werden.**⁴⁶ Beim Notifizierungsverfahren muss jeder Abfall vor Beginn der Verbringung und für jeden Transport vorkontrolliert werden. Der Exporteur hat dieses mittels eines Notifizierungsformulars und eines Begleitformulars sowie weiterer erforderlicher Unterlagen bei seinem Heimatland zuständigen Amt zu beantragen. Die grenzüberschreitende Verbringung ist nur dann zulässig, wenn vorher die zuständigen Behörden am Bestimmungsland und am Versandort schriftlich zugestimmt haben. Für die Durchfuhr (Transitstaaten) reicht eine stillschweigende Zustimmung. Die Zustimmungen aller Behörden müssen gesammelt vorliegen. Über den Im- und Export von notifizierungspflichtigen Abfällen in Deutschland entscheiden gemäß

⁴¹ § 8 Abs. 1 17. BImSchV, 2013.

⁴² § 10 Abs. 1 17. BImSchV, 2013.

⁴³ § 16 Abs. 1 17. BImSchV, 2013.

⁴⁴ vgl. Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/abfallverzeichnisverordnung_2016.pdf.

⁴⁵ vgl. Verordnung (EG) Nummer 1013 / 2006 über die Verbringung von Abfällen, <https://www.bmu.de/gesetz/verordnung-eg-nummer-10132006-ueber-dieverbringung-von-abfaellen/>.

⁴⁶ vgl. Grenzüberschreitende Abfallverbringung, <http://www.regierung.niederbayern.bayern.de>.

§ 14 des Abfallverbringungsgesetzes (AbfVerbrG) die Bundesländer. Zuständig im Fall der Ausfuhr, ist die Behörde in deren Zuständigkeitsbereich die Beförderung beginnt. Bei der Einfuhr ist maßgebend, wo der Abfall erstmalig gelagert, behandelt oder abgelagert werden soll. Die Bundesländer bestimmen die Genehmigungsbehörden, die eine abfallrechtliche Prüfung von Im- und Exportanträgen zur grenzüberschreitenden Abfallverbringung vornehmen. Für die Durchführung durch Deutschland ist das Umweltbundesamt zuständig.⁴⁷

1.5 Düngemittelrecht

Das Düngegesetz regelt im Wesentlichen die Herstellung, das Inverkehrbringen und die Anwendung von Düngemitteln. Zweck des Gesetzes ist es u.a., die Ernährung von Nutzpflanzen zu sichern; die Fruchtbarkeit des Bodens, insbesondere den standort- und nutzungstypischen Humusgehalt zu erhalten oder nachhaltig zu verbessern, Gefahren für die Gesundheit von Menschen und Tieren sowie für den Naturhaushalt vorzubeugen oder abzuwenden, die durch das Herstellen, Inverkehrbringen oder die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffe, Pflanzenhilfsmitteln sowie Kultursubstraten oder durch andere Maßnahmen des Düngens entstehen können; einen nachhaltigen und ressourceneffizienten Umgang mit Nährstoffen bei der landwirtschaftlichen Erzeugung sicherzustellen. Insbesondere sollen Nährstoffverluste in die Umwelt so weit wie möglich vermieden werden sowie Rechtsakte der Europäischen Gemeinschaft oder der Europäischen Union umgesetzt werden. Die Sachbereiche dieses Gesetzes, insbesondere über den Verkehr mit oder die Anwendung von Düngemitteln betreffend, müssen umgesetzt werden.⁴⁸

1.5.1 Änderungen im Düngegesetz

Seit 2018 müssen tierhaltende Betriebe mit mehr als 2,5 Großvieheinheiten (GV) je Hektar und mehr als 30 ha landwirtschaftliche Nutzfläche oder mehr als 50 GV eine Stoffstrombilanz erstellen; ab 2023 gilt dies für alle Betriebe mit mehr als 20 ha landwirtschaftliche Nutzfläche oder mehr als 50 GV und wird somit weiter verschärft. Für beide Varianten gilt dabei, dass sobald dem Betrieb im jeweiligen Wirtschaftsjahr Wirtschaftsdünger aus anderen Betrieben zugeführt wird, eine Stoffstrombilanz erstellt werden muss. Bei Zuwiderhandlungen bewegt sich der Bußgeldrahmen

⁴⁷ vgl. Notifizierungsverfahren, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfallressourcen/grenzueberschreitende-abfallverbringung/notifizierungsverfahren>.

⁴⁸ vgl. §1 DüngG, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/d_ngg/BJNR005400009.html

bei bestimmten Verstößen der Düngeverordnung auf bis zu 150.000 Euro und wurde somit deutlich erhöht.⁴⁹

Die zuständigen Länderbehörden haben die Befugnis zum Datenabgleich mit Erhebungen aus anderen Rechtsbereichen und soll so für düngerechtliche Überwachungszwecke dienen (z. B. Daten aus InVeKos, der HIT-Datenbank oder bestimmte Daten, die bei den bau- oder immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsbehörden vorliegen). Die Schaffung eines bundesweit einheitlichen Rahmens, auf dessen Grundlage ein freiwilliges Qualitätssicherungssystem für Wirtschaftsdünger aufgebaut werden kann, soll eingeführt werden. Die Länder können die hierfür erforderlichen Regelungen bei Bedarf in einer Rechtsverordnung erlassen, sofern der Bund zukünftig von seiner Verordnungsermächtigung keinen Gebrauch macht.⁵⁰

Die Einfügung von Vorschriften zum Umgang mit Nährstoffen im Betrieb sowie die Schaffung von Verordnungsermächtigungen sollen gewährleisten, dass in der Düngeverordnung Regelungen zu Nährstoffvergleichen für den Gesamtbetrieb erlassen werden können. Damit könnte der Einführung einer Hoftorbilanz der Weg geebnet werden. Nur durch die Novellierung des Düngegesetzes wird die Verabschiedung der Novellierung der Düngeverordnung möglich.

1.5.2 Düngeverordnung

Die Düngeverordnung präzisiert die Anforderungen an die gute fachliche Praxis der Düngung und regelt, wie mit der Düngung verbundene Risiken - beispielsweise Nährstoffverluste - zu verringern sind. Danach ist der Stickstoffdüngbedarf der Kulturpflanzen für Ackerland und Grünland als standortbezogene Obergrenze vor der Aufbringung zu ermitteln. Die Düngbedarfsermittlung muss so erfolgen, dass ein Gleichgewicht zwischen dem voraussichtlichen Nährstoffbedarf und der Nährstoffversorgung gewährleistet ist.⁵¹

Dazu sind bei den Stickstoffbedarfswerten insbesondere das Ertragsniveau der Kulturen, die Stickstoffmengen, die im Boden verfügbar sind, die Stickstoffmengen, die während des Pflanzenwachstums zusätzlich pflanzenverfügbar werden und die Nachlieferung von Stickstoff

⁴⁹ vgl. StoffBilV, <https://www.gesetze-im-internet.de/stoffbilv/>

⁵⁰ vgl. § 12 DüngG, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/d_ngg/BJNR005400009.html

⁵¹ vgl. § 1 und § 3 DüV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/.

aus der Anwendung von Düngemitteln im Vorjahr und aus Vor- und Zwischenfrüchten zu berücksichtigen.⁵²

Der Nährstoffbedarf einer Kultur wird einerseits durch die zu erwartende Erntemenge bestimmt; andererseits wird er beeinflusst durch die Qualitätsansprüche bei der Vermarktung. Dabei sind der Düngezeitpunkt und die Düngermenge so zu wählen, dass den Pflanzen die erforderlichen Nährstoffe zeit- und bedarfsgerecht zur Verfügung stehen. Die Düngebedarfsermittlung für Stickstoff (und Phosphat) auf Acker- und Grünland wird bundeseinheitlich geregelt und konkretisiert. Auch ertragsabhängige standort- und kulturartenbezogene Obergrenzen für die Stickstoffdüngung werden eingeführt. Die Vorgaben für das Aufbringen von stickstoff- und phosphathaltigen Düngemitteln auf überschwemmten, wassergesättigten, gefrorenen oder schneebedeckten Boden werden präzisiert und verschärft. Die Zeiträume, in denen keine Düngemittel ausgebracht werden dürfen, verlängern sich grundsätzlich (Ackerland: nach der Ernte der Hauptfrucht bis 31.01.; Grünland: 01.11. – 31.01., Einführung einer Sperrzeit für die Aufbringung von Festmist und Kompost: 15.12. – 15.01.; die zuständigen Behörden können Beginn/Ende jeweils um bis zu vier Wochen verschieben). Die zulässige Stickstoffgabe im Herbst wird beschränkt auf 60 kg Gesamtstickstoff je Hektar. Die Abstände für die Stickstoff- und Phosphatdüngung in der Nähe von Gewässern und im hängigen Gelände vergrößern sich. Die Kontrollwerte für die Differenz von Zu- und Abfuhr im Nährstoffvergleich (ab 2020 sind nur noch 50 kg N je Hektar zulässig) werden verringert.

Bundeseinheitliche Vorgaben für das Fassungsvermögen von Anlagen zur Lagerung von flüssigen Wirtschaftsdüngern und flüssigen Gärrückständen aus dem Betrieb einer Biogasanlage (grundsätzlich größer als benötigte Kapazität zur Überbrückung der Sperrfristen, mindestens jedoch sechs Monate, Betriebe mit hohem Tierbesatz oder ohne eigene Ausbringungsflächen müssen ab 2020 mindestens neun Monate Lagerkapazität vorweisen) sowie Festmist, festen Gärrückständen und Kompost (zwei Monate) werden eingeführt. Weiterhin werden die Länder verpflichtet, in Gebieten mit hoher Nitratbelastung sowie in Gebieten, in denen stehende oder langsam fließende oberirdische Gewässer durch Phosphat, was nachweislich aus der Landwirtschaft stammt, eutrophiert sind, mindestens drei zusätzliche Maßnahmen aus einem vorgegebenen Katalog zu erlassen.⁵³

⁵² vgl. § 4 DüV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/.

⁵³ vgl. §2, §5 DüV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/.

Die Änderungen des nationalen Düngerechts wurden vorgenommen, um es an neue fachliche Erfordernisse zur Verbesserung der Wirksamkeit der Düngung und Verringerung von Umweltbelastungen anzupassen. Die Düngeverordnung wurde am 01. Juni 2017 im Bundesgesetzblatt verkündet und ist seit dem 02. Juni 2017 in Kraft.

1.5.3 Düngemittelverordnung

Zunächst muss unterschieden werden zwischen Grenzwerten, die es einzuhalten gilt, und Stoffen, für die lediglich eine Untersuchungspflicht besteht. Bei Inhaltsstoffen wie Schwermetallen gelten Grenzwerte, anhand derer die bodenbezogene Verwertung zulässig beziehungsweise nicht zulässig ist. Diese werden nachfolgend aufgezeigt. Bei Phosphor oder dem pH-Wert besteht lediglich eine Untersuchungspflicht und es sind keine Grenzwerte laut Düngemittelverordnung vorgegeben, so herrscht für Dünger beispielsweise ab einem gewissen Phosphatgehalt lediglich eine Kennzeichnungspflicht.^{54 55}

Seit dem 01.01.2015 ist die Übergangsvorschrift der Düngemittelverordnung von 2012 für überschrittene Grenzwerte abgelaufen. So durften bis zum 31.12.2014 Klärschlämme bei einer Überschreitung der in der Düngemittelverordnung definierten Grenzwerte nach wie vor landwirtschaftlich ausgebracht werden, sofern die deutlich niedrigeren Grenzwerte für die gleichen Stoffe aus der Klärschlammverordnung von 1992 eingehalten wurden. Somit gelten seit dem Jahr 2015 die schärferen Grenzwerte aus der Düngemittelverordnung für die Metalle Blei, Cadmium, Nickel und Quecksilber. Zusätzlich wurde im Rahmen der neuen Klärschlammverordnung der Untersuchungsumfang für Klärschlamm um weitere Stoffe ausgedehnt, welche auch in der Düngemittelverordnung definiert sind. Dadurch müssen nun weitere Untersuchungen für Arsen, Chrom, Thallium, Eisen, Benzo(a)pyren, polyfluorierte Verbindungen sowie dioxinähnliche PCB durchgeführt werden. Diese Regelungen treffen unabhängig von der Ausbaugröße auf alle Kläranlagenbetreiber zu und müssen somit auch von sämtlichen Anlagen in der bayerischen Projektregion eingehalten werden. Im Folgenden werden die alten sowie neuen Grenzwerte aufgezeigt und anschließend mit den Probemessungen der Bestandsabfrage verglichen.^{56 57}

⁵⁴ § 5 Abs. 1 AbfKlärV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKl%C3%A4rV.pdf.

⁵⁵ Tabelle 1, DüMV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/D%C3%BCMV.pdf.

⁵⁶ § 10 Abs. 3 DüMV, 2012, https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/D%C3%BCMV.pdf.

⁵⁷ DWA 2017, S. 1.

Tabelle 5 Neue und alte Grenzwert der DüMV^{58 59}

Verbindung	neuer Grenzwert (DüMV) [mg/kg TS]	alter Grenzwert (AbfklärV) [mg/kg TS]
Arsen	40	-
Blei	150	900
Cadmium	1,5	10
Chrom	2	-
Kupfer	900	-
Nickel	80	200
Quecksilber	1	8
Thallium	1	-
Zink	4.000	-
Perfluorierte Tenside (PFT)	0,1	-
Summe der Dioxine und dl-PCB	30 ng WHO-TEQ	-

In der Tabelle 5 sind sämtliche Schadstoffe der DüMV aufgelistet, ab deren Überschreitung eine bodenbezogene Verwertung gemäß § 8 Abs. 1 AbfklärV nicht mehr zulässig ist. Deutlich erkennbar sind vor allem die Verschärfungen für Cadmium, Blei, Nickel sowie Quecksilber. Wie bereits zuvor, werden diese nun mit den Messwerten von 2016 verglichen und Überschreitungen hervorgehoben. Die Anlagen Waldsassen, Mitterteich, Bärnau I, Bärnau II, Plößberg II sowie Speichersdorf weisen überhöhte Cadmiumwerte auf, womit eine bodenbezogene Ausbringung für den Klärschlamm dieser Anlagen nicht mehr rechtmäßig ist. In der nachfolgenden Abbildung werden diese Überschreitungen aufgezeigt.

⁵⁸ Tabelle 1, DüMV, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/D%C3%BCMV.pdf.

⁵⁹ Agrolab.

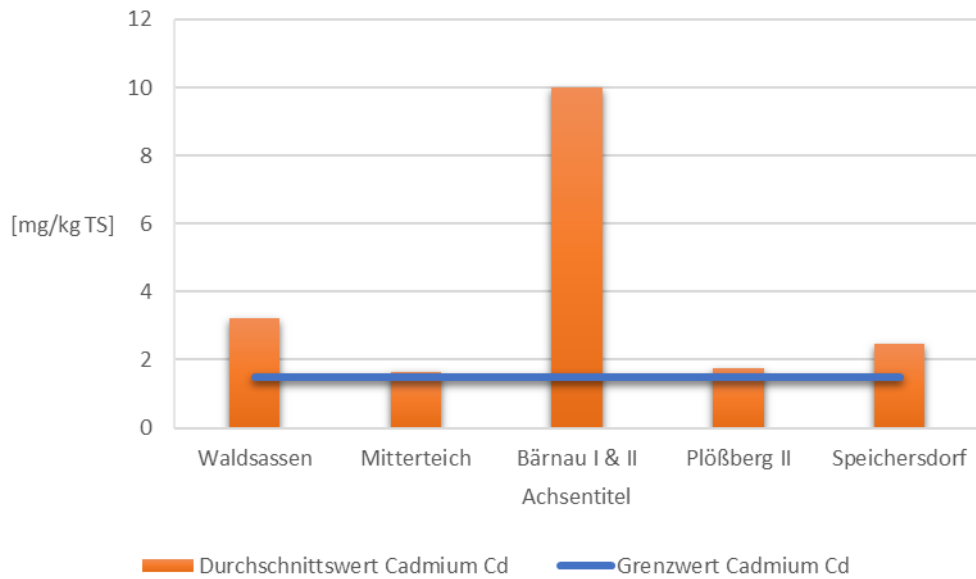


Abbildung 3 Durchschnittliche Cadmiumwerte 2016 und Grenzwerte lt. DüMV⁶⁰

Sehr deutlich erkennbar in Abbildung 3 sind die um ein Vielfaches zu hohen Cadmiumwerte der Anlagen Bärnau I und Bärnau II, die über das sechsfache des Grenzwertes betragen. Bei der alten Regelung wären die meisten Anlagen unter dem damaligen Grenzwert von 10 mg/kg TS gelegen und die Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen wäre noch zulässig. Des Weiteren wurden in Bärnau I und Bärnau II überhöhte Blei-, Quecksilber- sowie Nickelwerte gemessen, die auch jeweils deutlich über den Grenzwerten liegen. Anhand der nachfolgenden Abbildung sollen die zu hohen Messwerte von Bärnau I und Bärnau II nochmal separat veranschaulicht werden.

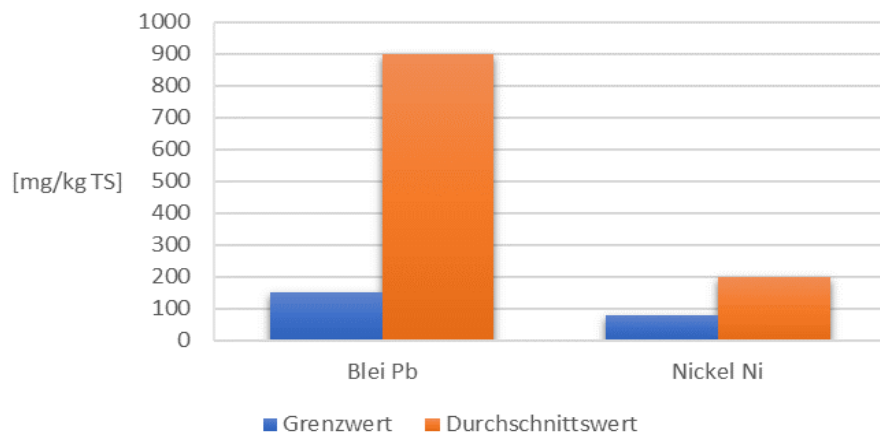


Abbildung 4 Durchschnittsmesswerte von 2016 der Anlagen Bärnau I/II mit Grenzwerten⁶¹

⁶⁰ Bachelorarbeit Estner, haw Landshut 2018.

⁶¹ Bachelorarbeit Estner, haw Landshut 2018.

Nicht in der Abbildung dargestellt ist der auch um ein Vielfaches zu hohe Quecksilberwert von 8 mg/kg TS (zulässiger Höchstwert liegt bei 1 mg/kg TS).

Bei neun der deutschen Kläranlagen befinden sich die gemessenen Proben aus dem Jahr 2016 innerhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzen. Zur Veranschaulichung wird das Mittel aus allen Jahresdurchschnittswerten der Anlagen gebildet und in den nachfolgenden Grafiken dargestellt.

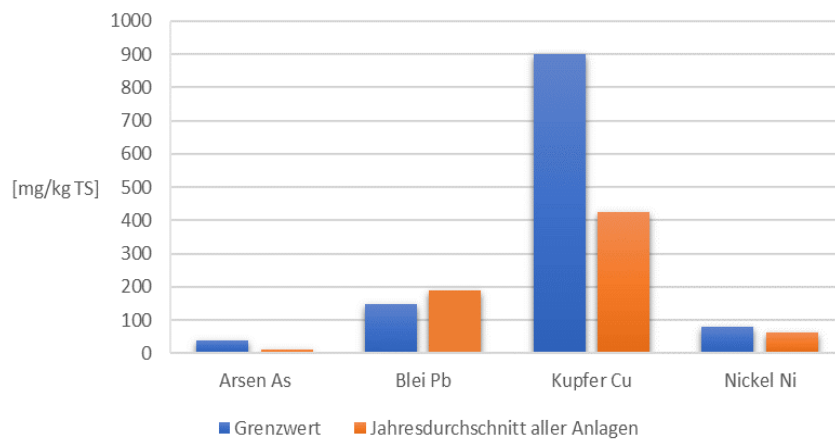


Abbildung 5 Durchschnittswerte aller Anlagen 2016 und Grenzwerte laut DüMV⁶²

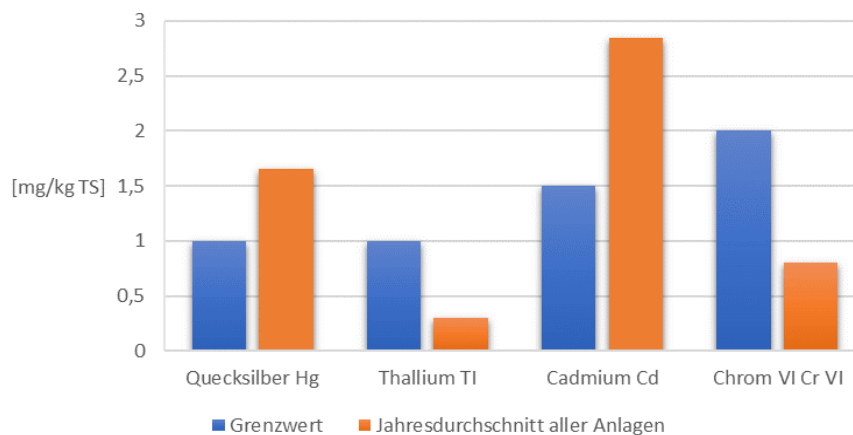


Abbildung 6 Durchschnittswerte aller Anlagen 2016 und Grenzwerte laut DüMV⁶³

62 Bachelorarbeit Estner, haw Landshut 2018.

63 Bachelorarbeit Estner, haw Landshut 2018.

Wie man Abbildung 5 und 6 entnehmen kann, liegen die gemessenen Werte für Cadmium, Blei sowie Quecksilber durchschnittlich über dem Grenzwert, somit liegen diese in überhöhter Konzentration im Klärschlamm vor. Hierbei ist jedoch zu sagen, dass der Jahresdurchschnitt von Blei sowie Quecksilber nur auf Grund stark überhöhter Werte der Anlagen Bärnau I und Bärnau II den Grenzwert übersteigt und somit als nicht repräsentativ für andere Anlagen anzunehmen ist.

1.6 Fazit zur rechtlichen Lage in Deutschland

Zur Verwertung kommunaler Klärschlämme und deren Reststoffe müssen, wie vorhergehend beschrieben, verschiedene Gesetze und Verordnungen beachtet werden, die ineinandergreifen. Zusammenfassend kann man für die neuen Gesetze im Düngerecht und der Abfallentsorgung folgendes feststellen:

Die Grenzwerte verschiedener Schadstoffe und Nährstoffe sind verschärft worden. Während die neuen Grenzwerte der Klärschlammverordnung die stoffliche Verwertung nicht beeinträchtigen werden, sind die Grenzwerte der Düngemittelverordnung sehr anspruchsvoll.

Bei der Umsetzung der neuen Klärschlammverordnung kann es problematisch werden, dass kleinere Anlagenbetreiber eine geeignete eigene Lösung zur Phosphorrückgewinnung finden, da die technischen Verfahren derzeit noch nicht marktreif sind. Daher könnten die Städte und Gemeinden versuchen Klärschlamm über die Ausnahmegenehmigung aus §3 der Klärschlammverordnung ohne Phosphorrückgewinnung zu entsorgen. Ziel sollte es jedoch sein, dass sich mehrere Städte und Gemeinden zusammenschließen, um eine gemeinsame Strategie für die Klärschlamm Entsorgung und die damit verbundene mögliche Phosphorrückgewinnung zu entwickeln. Der aufkommende finanzielle Druck durch steigende Abwasser- und Klärschlamm Entsorgungsgebühren könnte dies beschleunigen. Vor allem auch durch die Novellierung der Düngemittelverordnung nimmt die Problematik der Klärschlamm Entsorgung weiter zu, da davon auszugehen ist, dass die bisherigen Mengen, die in kleineren Kläranlagen anfallen, nicht mehr wie bis heute häufig in der Praxis angewendet auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden können, da die Grenzwerte und Abgabesperrn die Ausbringung auf Feldern reduzieren werden. Es ist in diesem Zusammenhang auch davon auszugehen, dass die Abnahmekosten des Klärschlamm in den nächsten Jahren stetig weiter steigen werden.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass es durch Sperrabgabefristen in der Düngung und fehlende Klärschlamm Endabnehmer zu einem erhöhten Lagerbedarf kommen könnte und somit eine dezentrale Klärschlammbehandlung bzw. -verwertung unumgänglich wäre.

1.7 Rechtliche Situation Tschechien

Die rechtliche Situation in Tschechien wird nachfolgend dargestellt. Diese Ausführungen wurden durch den Projektpartner Chevak, a.s. formuliert, daher sind für die einzelnen Punkte keine Quellenangaben vorhanden.

1.7.1 Kläranlagen und Klärschlammanfall

Laut der Angaben aus „Ausgewählten Kennzahlen der Vermögensevidenz (VUME), die vom Landwirtschaftsministerium der ČR veröffentlicht werden, gab es in der Tschechischen Republik im Jahr 2013 **2.572 Kläranlagen** (KA) mit einer Auslegungskapazität von über 50 EW.

Die höchste Anzahl mit 941 Kläranlagen waren im Bereich von 51 – 500 EW. Die zweite meist verbreitete Kategorie der KA in der CR ist im Bereich von 501 – 1000 EW und zwar 493. Im Bereich über 30.000 EW gibt es 90 Kläranlagen. Im Bereich über 100.000 EW gibt es 25 Kläranlagen. Die tatsächliche Auslastung der Kläranlagen, gemäß dem Abwasserzulauf, ist bei den meisten Kläranlagen geringer als sie ursprünglich ausgelegt wurden und zwar um 37 %.

Die theoretische Schlammproduktion kann gemäß aktueller Auslastung max. 190.000 Tonnen jährlich erreichen.⁶⁴

1.7.2 Kostenaufwand der Schlammentsorgung

Die Kosten für den Schlammtransport von kleinen Kläranlagen ohne Schlammverarbeitung zu den „großen“ Kläranlagen liegen, bei Anwendung der gängigsten Container (Volumen 10 m³) im Bereich von 30 – 60 CZK/km (1,17€ - 2,35€/km). Für die Verarbeitung des Klärschlammes d.h. anaerobe Stabilisierung, Entwässerung, Hygienisierung und nachfolgende Verfahren (Kompostierung usw.) entstehen Kosten von 150 – 350 CZK/m³ (5,86€ - 13,68€/m³).

Der entwässerte Schlamm aus den Kläranlagen hat, abhängig von der technologischen Stabilisierung und der Entwässerung, ein Trockensubstanzvolumen von 18 - 35 %. Dieser Schlamm wird daran anschließend an berechnigte Firmen übergeben (Abfallfirmen), wenn sich der Preis inkl. Transport im Bereich von 450 – 700 CZK (17,69€ - 27,37€) pro Tonne Schlamm bewegt. Der aktuelle Preis der Schlamm Lagerung auf einer Deponie beträgt netto ca. 1.100 CZK (43,00€).

Der aktuelle Preis für die Schlammdeponierung zur Kompostierung war netto ca. 200 – 250 CZK (7,82€-9,77€). Allerdings nehmen die Kompostierungsanlagen den Klärschlamm immer seltener an, da der hohe Prozentsatz des gebundenen Wassers, welches sich im Prozessverlauf der

⁶⁴ CENIA, Gesamte Klärschlammproduktion Tschechien (Katalog 190805, Schlamm aus der Abwasserklärung)

Deponierung freisetzt und dann geklärt werden muss, sehr hoch ist. Das Vorhandensein des Wassers im Schlamm erschwert die Umgrabung des Kompostes. Daher muss die Ablagefläche gegen Versickerung in das Grundwasser gesichert sein, da es sonst zur Kontaminierung des Kompostes mit Bakterien (Salmonellen) kommen kann.

1.7.3 Übersicht der Gesetzgebung bezgl. des Klärschlamm

- Gesetz Nr. 185/2001 Slg. zu Abfällen, in Fassung späterer Vorschriften
- Ausruf Nr. 376/2001 Slg., zur Bewertung gefährlicher Abfalleigenschaften, in Fassung späterer Vorschriften
- Ausruf Nr. 381/2001 Slg., mit dem ein Katalog der Abfälle und eine Aufstellung der Abfälle zwecks Ausfuhr, einfuhr und Transit der Abfälle festgelegt wird und die Vorgangsweise zur Bewilligungserteilung Ausfuhr, Einfuhr und dem Transit des Abfälle (Katalog der Abfälle), in Fassung späterer Vorschriften
- Ausruf Nr. 437/2016 Slg. Bedingungen der Anwendung von aufbereiteten Schlamm auf landwirtschaftlichen Böden und der Änderung des Ausrufes Nr. 383/2001 Slg. zu Einzelheiten der Abfallwirtschaft und der Änderung des Ausrufes Nr. 341/2008 Slg. und der Änderung des Ausrufes Nr. 294/2005 zu Bedingungen der Abfalldponierung und dessen Nutzung auf Terrainoberflächen und der Änderung des Ausrufes Nr. 383/2001 Slg. zu Einzelheiten der Abfallwirtschaft (Ausruf zu Einzelheiten des Wirtschaftens mit biologisch abbaubaren Abfällen)
- Ausrufes Nr. 383/2001 Slg. zu Einzelheiten der Abfallwirtschaft in Fassung späterer Vorschriften
- Ausruf Nr. 387/2016 Slg. durch den der Ausruf Nr. 294/2005 Slg. geändert wird zu Bedingungen der Abfalllagerung auf Abfalldponien und deren Nutzung auf Terrainoberflächen und der Änderung des Ausrufes Nr. 383/2001 Slg. zu Einzelheiten der Abfallbehandlung, in Fassung späterer Vorschriften und Ausruf Nr. 383/2001 Slg. zu Einzelheiten der Abfallwirtschaft, in Fassung späterer Vorschriften
- Vor der Verabschiedung die Novellierung (2017) des Ausrufes Nr. 474/2000 Slg. zur Bestimmung der Bedingungen der Düngungsmittel, in Fassung späterer Vorschriften
- Richtlinie des Rates 91/271/EHS vom 21. Mai 1991 zur Klärung des städtischen Abwassers
- Richtlinie des Rates 86/278 vom 12. Juni 1986 zum Umweltschutz und vor allem der Böden bei Anwendung von Klärschlamm aus Kläranlagen in der Landwirtschaft

- Richtlinie 91/676/EHS vom 12. Dezember 1991 zum Schutz des Wassers vor Verunreinigung durch Nitrate aus landwirtschaftlichen Ressourcen.

1.7.4 Nachtrag und Fazit zur rechtlichen Situation in CZ

Ausruf Nr. 437/2016 über die Bedingungen für die Verwendung von behandeltem Schlamm auf landwirtschaftlichen Flächen und der Änderung des Ausrufes Nr. 383/2001 Slg., über Einzelheiten der Abfallbewirtschaftung und der Änderung des Ausrufes Nr. 341/2008 Slg. zu Einzelheiten der Entsorgung biologisch abbaubarer Abfälle und zur Änderung des Ausrufes Nr. 294/2005 Slg. über die Bedingungen für die Ablagerung von Abfällen auf Deponien und ihre Verwendung auf Geländeoberflächen und Änderung des Ausrufes Nr. 383/2001 Slg. über Einzelheiten der Abfallentsorgung (Ausruf über Einzelheiten der Entsorgung biologisch abbaubarer Abfälle) - gültig ab 1.1. 2017.

Das Umweltministerium bestimmt in Zusammenarbeit mit dem Landwirtschaftsministerium und dem Gesundheitsministerium gemäß § 33 Abs. 4, § 33b Abs. 3 und § 39 Abs. 14 des Gesetzes Nr. 185/2001 Slg. zur Abfallwirtschaft und zu Änderungen weiterer Gesetze in Fassung des Gesetzes Nr. 314/2006 Slg. und des Gesetzes Nr. 223/2015 Slg. (im Folgenden das „Gesetz“) folgendes:

Biologisch abbaubare Abfälle dürfen nicht deponiert werden.

Die Pflichten der Kläranlagenbetreiber sehen vor, dass bis 2020 sich alle Schlammhygienetechnologien als wirksam erweisen müssen. (10 Stichproben von Input und Output analysiert). Schlammbehandlungstechnik in Kläranlagen und Schlammbehandlungsanlagen, die vor Inkrafttreten dieses Ausrufes in Betrieb genommen wurden und die behandelten Schlamm produzieren sowie die Grenzwerte der in Anhang 4 oder Anhang 7 aufgeführten Indikatormikroorganismen in der in Anhang 5 dieses Ausrufes angegebenen Häufigkeit erfüllen, gelten bis 31. Dezember 2019 als verifiziert.

Gleichzeitig muss man, wenn weiterhin Schlamm durch Übergabe zur Verwendung auf landwirtschaftlichen Flächen entsorgt wird, für eine wirksame Sanierung sorgen, falls sie zurzeit eine solche Anforderung nicht mehr erfüllen. Dies erfordert entweder eine weitere Ausstattung der Klärtechnologie oder die Überführung von Schlamm in Schlammbehandlungsanlagen. Diese Änderung wirkt sich nicht auf kleine Kläranlagen aus, die ihren Schlamm als Abwasser an andere Kläranlagen zur Schlammbewirtschaftung übertragen. Die Verpflichtung, unbehandelten Schlamm, der zur Verwendung auf landwirtschaftlichen Flächen bestimmt ist, ausschließlich einer nach § 14 Abs. 1 des Abfallgesetzes genehmigten Schlammbehandlungsanlage zu übergeben, schränkt die Möglichkeit der Übergabe von Schlamm aus Kläranlagen ohne

Schlammbewirtschaftung an eine andere Kläranlage mit Schlammbewirtschaftung nicht ein, verpflichtet auch diejenigen Kläranlagen die den Klärschlamm annehmen, dass sie aufgrund einer Zustimmung gemäß § 14 Abs. 1 des Abfallgesetzes betrieben werden.

Schlämme, die von einer anderen Kläranlage in die Schlammbewirtschaftung einer anderen Kläranlage verbracht werden, gelten nach Ansicht des Umweltministeriums als Abwasser, das vom Anwendungsbereich des Abfallgesetzes ausgenommen ist. Das Umweltministerium hat zu diesem Thema eine Stellungnahme abgegeben, in der dieser Ansatz erläutert wird (MZP 2016a). Die Änderung des Ausrufes Nr. 341/2008 Slg. ermöglichte, dass der Kläranlagenbetreiber unhygienisierten Schlamm an eine biologisch abbaubare Abfallentsorgungsanlage liefern kann (Biogasanlagen und Kompostieranlagen). Die Kläranlagen der Chevak sind als Einrichtung zur Aufbereitung der gelisteten Abfälle zugelassen. Gemäß der Änderung des Ausrufes kann der behandelte Schlamm vor der Anwendung unter Bedingungen gelagert werden. Im Falle der Übergabe unseres Schlammes an einen anderen berechtigten Abnehmer zum Beispiel zum Zwecke der Herstellung von Rückgewinnungssubstraten, handelt es sich gemäß Ausruf 341/2008 Slg. um Materialeinsatz und sollte die angegebenen Bedingungen erfüllen. Für die Nutzung auf landwirtschaftlichen Flächen sollten wir den Schlamm nur unter bestimmten Bedingungen an den direkten Landwirt übergeben.

Die durch die Novelle des Abfallgesetzes und der Schlammverordnung eingebrachten Änderungen in Form einer Vorschrift für die Überprüfung der Effizienz der Schlammbehandlungstechnologie, hinsichtlich ihrer Hygienisierung und der damit verbundenen Änderung der mikrobiologischen Kriterien, werden einen wesentlichen Einfluss auf die Umgestaltung der Schlammbewirtschaftung in der Tschechischen Republik haben. Die Verwendung von Schlamm auf landwirtschaftlichen Flächen wird sicherer, aber auch teurer.⁶⁵

⁶⁵ Chevak, a.s. Tschechien, Hr. Steffen Zagermann (Vorstandsvorsitzender bis 09/2019) und Hr. Ivan Korol, Verfahrenstechniker.

2. Klärschlammfall und -behandlung in der Zielregion

Im Rahmen des Projekts wurden Daten von allen Kläranlagen der Projektpartner IKom Stifftland und Chevak a.s. erhoben und ausgewertet.

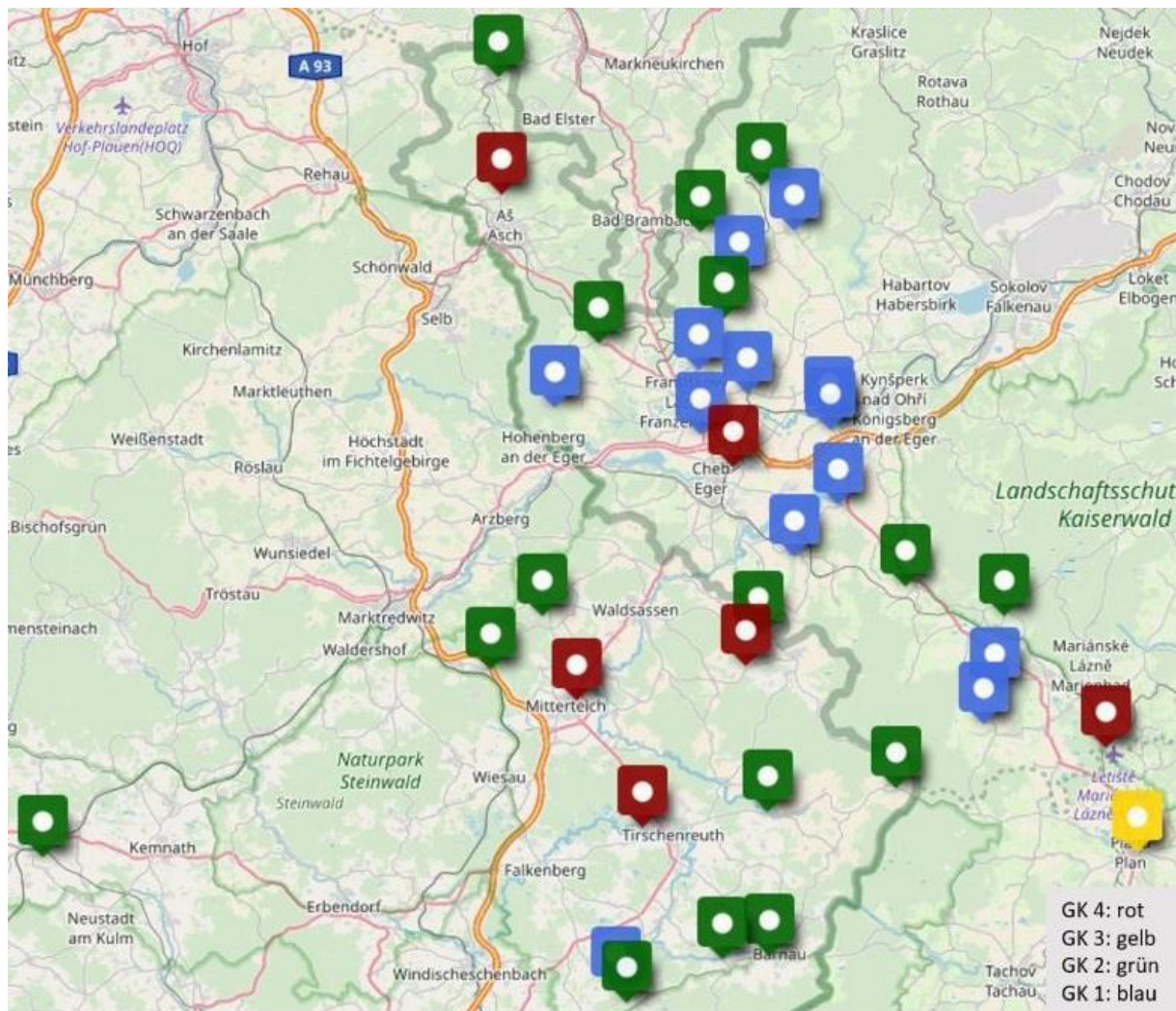


Abbildung 7 Kläranlagen der Zielregion - Kartenbild von OpenStreetMap (Daten: ODbL 1.0)

Im Rahmen der Datenerfassung wurden die Klärschlamm-mengen auf den teilnehmenden Kläranlagen in den Jahren 2013 bis 2016 erfasst. Um Schwankungen zwischen den Jahren auszugleichen, wird die Klärschlamm-menge im Durchschnitt betrachtet. Abbildung 9 zeigt die Klärschlamm-mengen der Anlagen. Die Kläranlagen Plößberg II und Konnersreuth liefern ihren Klärschlamm an die Anlagen Waldsassen und Plößberg I und sind in deren Klärschlamm-menge mit erfasst und daher nicht mit aufgeführt. Die tschechischen Anlagen Cheb, Mariánské Lázně und Aš nehmen den Klärschlamm aller übrigen kleinen Anlagen der Chevak auf, weshalb diese nicht in der Abbildung enthalten sind.

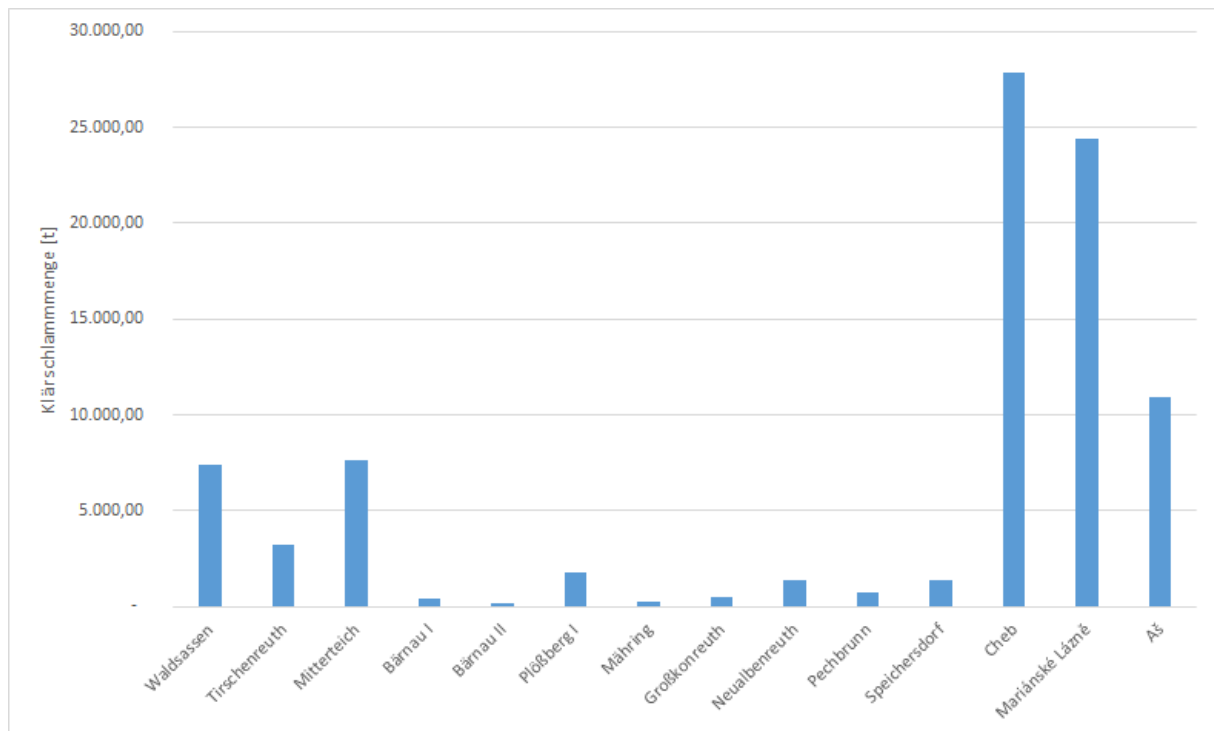


Abbildung 8 Durchschnittlicher Klärschlammfall in der Zielregion

Die Kläranlagen der IKOMStiftland haben zusammen eine Klärschlammmenge von ca. 25.000 t, die Anlagen der Chevak a.s. ca. 65.000 t jährlich. Im gesamten Zielgebiet gilt es also eine Menge von ca. 90.000 t Tonnen Nassschlamm pro Jahr zu behandeln und zu verwerten.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen technischen Möglichkeiten zur Behandlung und Verwertung des Klärschlammes betrachtet.

2.1 Klärschlammreduzierung

Grundlage für die Abwasserbehandlung in Kläranlagen sind die Selbstreinigungsvorgänge von Gewässern. In Kläranlagen werden diese, teils wochenlang dauernden Prozesse, in wenigen Stunden vollzogen.⁶⁶

Im Rahmen des Projekts wurden die folgenden Technologien zur Klärschlammreduzierung betrachtet:

- Faulung (anaerobe Stabilisierung)

⁶⁶ H. Felber, M. Fischer, *Klärwärter-Taschenbuch: 50 Jahre*, 18th ed., Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef 2018.

- Effektive Mikroorganismen
- Hochleistungsfaulung
- Bioelektrochemische Brennstoffzelle
- Hydrothermale Karbonisierung

2.1.1 Bewertung der Verfahren zur Klärschlammreduzierung

In Tabelle 6 sind in der linken Spalte alle Bewertungsaspekte mit ihren Gesichtspunkten aufgelistet. In der mittleren Spalte sind die Bewertungskriterien erläutert. In der rechten Spalte sind die Bewertungspunkte nach den erläuterten Bewertungskriterien definiert. Durch diese Bewertung wird versucht, die Verfahren mit einander zu vergleichen. Es ist wichtig, dass jedoch unbedingt der individuelle Anwendungsfall geprüft werden sollte. Möglicherweise kann ein Verfahren, falls es nach anderen Kriterien bewertet wird, deutlich besser abschneiden.

Tabelle 6 Bewertungsmatrix⁶⁷

Bewertungsaspekt	Bewertungskriterium	1	2	3	4
Organisatorischer Aufwand					
Platzbedarf	benötigter Platzbedarf der Anlage m ²	> 100	< 100	Kein Platzbedarf	Platzeinsparung
Personalaufwand	Personalaufwand h/Monat	> 5	< 5	gleicher Aufwand	weniger Aufwand
Wirtschaftlichkeit/Nachhaltigkeit					
Investitionskosten	€	> 1.000.000	< 1.000.000	< 50.000	keine Kosten
Einsparungsmöglichkeiten	%	höhere Kosten	gleiche Kosten	80 % der Kosten	< 80 % der Kosten
Energiebedarf	qualitativ	erhöht	keine Änderung	elektr. Energie	elektr. u. therm. Energie
Klärschlammfall	%	erhöht	gleich	100 - 80 %	< 80 %
Technologischer Reifegrad					
TRL	TRL	1 - 3	4 - 5	6 - 7	8 - 9

⁶⁷ Kleiber, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

2.1.2 Fazit Klärschlammreduzierung

Es bestehen große Chancen durch bestimmte Verfahren in der Abwasserbehandlung einerseits die Wirtschaftlichkeit und andererseits die ökologische Bilanz zu verbessern. Häufig steht die Wirtschaftlichkeit an erster Stelle. Deshalb sollte versucht werden, umweltschonende Verfahren bis zur Wirtschaftlichkeit weiter zu entwickeln.

Anhand des folgenden Bewertungsschemas wurden die Technologien miteinander verglichen.

Tabelle 7 Bewertung der Verfahren zur Klärschlammreduzierung⁶⁸

Bewertungsaspekt	Faulung	EM	Hochlast-faulung	BioBZ	HTC
Organisatorischer Aufwand					
Platzbedarf	1	3	1	2	1
Personalaufwand	1	3	1	2	1
Wirtschaftlichkeit/Nachhaltigkeit					
Investitionskosten	1	2	1	3	1
Einsparungsmöglichkeiten	4	3	4	-	4
Energiebedarf	4	2	4	-	4
Klärschlammfall	4	4	4	-	4
Technologischer Reifegrad					
TRL	4	3	4	2	4
Gesamtbewertung	19	20	19	9	19

Die Klärschlammfaulung ist ein auf Kläranlagen mit mehr als 20.000 EW Standardprozess der Klärschlammbehandlung. Der Anstieg der Energiepreise sowie der Entsorgungskosten für Klärschlamm ermöglicht den wirtschaftlichen Einsatz der Klärschlammfaulung auch auf kleineren Kläranlagen unter 20.000 EW. Das entstehende Faulgas stellt auch einen regenerativen Energieträger dar, der auf Kläranlagen zur Strom- und Wärmeenergieerzeugung genutzt werden kann. Für das Verfahren sind bauliche Änderungen vorzunehmen und es müssen Summen bis zu 3,3

⁶⁸ Kleiber, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019

Millionen Euro investiert werden⁶⁹. Auch eine Erhöhung des Arbeitsaufwandes ist zu berücksichtigen. Im Vergleich zum Belebungsverfahren ist die Ökobilanz besser und es können erhebliche Energiekosten gespart werden.

Der Einsatz Effektiver Mikroorganismen in der Abwasserbehandlung ist zwar nicht so gut erforscht wie die Faulung, trotzdem gibt es einige vielversprechende Ansätze sowohl zur Schlammreduzierung als auch zu Phosphorrückgewinnung oder Geruchsneutralisierung durch den Einsatz von EM. Die großen Vorteile sind hierbei, dass einerseits eine völlig natürliche Methode angewandt wird, welche auf jegliche Chemie verzichtet, und andererseits, dass die Investitionskosten oftmals nur bei wenigen tausend Euro liegen. Auch hier konnte der Schlammanfall teilweise signifikant verringert werden, während kaum mehr Aufwand generiert wurde. Möglicherweise kann auch eine erhöhte Faulgasausbeute durch den Einsatz von EM erzielt werden. Alles in allem stellen EM eine chancenreiche Technologie dar, welche sich noch in der Entwicklung befindet. Durch die relativ einfache Handhabung sowie die geringen Kosten ist dies eine einfache Möglichkeit zur Reduzierung von Klärschlamm auf kleinen Kläranlagen. Allerdings bestehen von fachlicher Seite Bedenken bezüglich der Wirksamkeit von EM auf Kläranlagen bezüglich der Mengenreduktion von Klärschlämmen, da die bisher erhaltenen Ergebnisse z.T. nicht verifiziert werden konnten.

Die Hochleistungsfaulung ist eine Art Weiterentwicklung der herkömmlichen Faulung. Hier werden durch ein modifiziertes Verfahren kürzere Faulzeiten im Vergleich zur Faulung angewandt, wodurch weniger Platz benötigt wird. Bei diesem Verfahren werden höhere Biogasausbeuten erzielt sowie Energie eingespart. Die Investitionskosten liegen auch hier bei bis zu 3,3 Millionen Euro⁷⁰. Durch die Gewinnung von Faulgas werden auch hier Energiekosten gesenkt. Baulicher sowie personeller Aufwand ist nötig, jedoch benötigt die Hochleistungsfaulung weniger Platz als die herkömmliche Faulung. Die Reduzierung des Klärschlammes beläuft sich auf circa 30 % und das Verfahren wird aktuell wirtschaftlich auf einer Kläranlage mit 10.000 EW betrieben.

Die bioelektrochemische Brennstoffzelle ist nicht nur der Gewinner des deutschen Nachhaltigkeitspreises 2018, sondern stellt auch eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung von Klärschlamm auf kleinen Kläranlagen dar. Bei diesem Verfahren wird Strom durch Nutzung des

⁶⁹ I. Henrich, Einsatz von Zusatzstoffen auf der KA Petershausen mit dem Ziel der Reduktion des ÜS, Darstellung und Vergleiche, von Auswirkungen und Einsparpotentialen, der Anwendungsbereiche, sowie deren Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb 2011.

⁷⁰ Stadt Karlsruhe, Vereinfachter schematischer Verfahrensablauf der hydrothermalen Carbonisierung (HTC), <http://www.karlsruhe-macht-klima.de/klimaschutzvorort/forschungentwicklung/demonstrationsanlage.de> (13.05.2019).

organischen Anteils im Abwasser gewonnen. Durch den CSB-Abbau führt das Verfahren zu einer Reduzierung des Klärschlammes von bis zu 80 % im Vergleich zu dem Belebtschlammverfahren. Die Stromkosten können bei diesem Vergleich um ca. 50 % gesenkt werden. Derzeit kann die BioBZ nicht wirtschaftlich eingesetzt werden. Es laufen aber Forschungsprojekte, um die Produktionskosten zu senken. Ein Einsatz wird nach derzeitigen Berechnungen nur auf kleinen Kläranlagen Sinn machen, da hier die hohen Energiekosten für das Belebungsbecken verringert werden können.

Die Hydrothermale Karbonisierung (HTC) oder auch wässrige Verkohlung, wandelt Klärschlamm in hydrothermale Kohle um. Hierdurch werden Entwässerungskosten eingespart, sowie Kohle als Energieträger gewonnen. Auch dieser Energieträger kann zur Substitution von fossilen Brennstoffen genutzt werden. HTC-Anlagen sind derzeit erst ab circa 3.500 Tonnen Klärschlamm (TR 25 %) jährlich wirtschaftlich zu realisieren. Diese Anlagen werden in eine Kläranlage mit Faulungsanlage integriert. Somit ist für dieses Verfahren nur die Möglichkeit für eine interkommunale Anwendung als zentrale Lösung gegeben. Grundsätzlich kann auch durch dieses Verfahren Geld eingespart sowie Klärschlamm reduziert werden. Auch beim HTC-Verfahren gibt es Möglichkeiten zur Phosphorrückgewinnung.⁷¹

2.2 Bewertung von Modellen einer semizentralen anaeroben Klärschlammbehandlung mit Hilfe der dynamischen Simulation

In einer Bachelorarbeit wurden mögliche Synergien durch eine gemeinsame anaerobe Schlammstabilisierung der Kläranlagen Mitterteich, Wiesau und Pechbrunn untersucht. Detaillierte Informationen sind der Bachelorarbeit zu entnehmen. Hierzu wurden drei Varianten eines neuen Faulungskonzeptes für die Kläranlage Mitterteich näher geprüft:

1. Ersatz der Faulung nur für die Kläranlage Mitterteich.
In der neuen Faulung werden nur der Primärschlamm und der Überschussschlamm der KA Mitterteich ausgefault. Hierzu muss das Schlammalter der Belebung reduziert werden.
2. Ersatz der Faulung unter Berücksichtigung der Schlämme von Mitterteich und Pechbrunn.
Neben den Schlämme der Kläranlage Mitterteich wird zusätzlich der Überschussschlamm der Kläranlage Pechbrunn mitbehandelt. Für einen energetisch

⁷¹ Kleiber, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

optimalen Einsatz sollte auf der Kläranlage Pechbrunn das Schlammalter reduziert werden.

3. Ersatz der Faulung unter Berücksichtigung der Schlämme von Mitterteich, Pechbrunn und Wiesau.

Neben den Schlämmen der Kläranlagen Mitterteich und Pechbrunn wird die Faulung auch den Rohschlamm der Kläranlage Wiesau aufnehmen können.

Für eine realitätsnahe Bewertung der verschiedenen Varianten werden die Kläranlagen in der dynamischen Simulation, mit der Software SIMBA#, im heutigen Betrieb abgebildet.

Drei Varianten einer semizentralen Klärschlammfäulung werden betrachtet. Diese sind:

1. Bau eines neuen Faulbehälters auf dem Gelände der Kläranlage Mitterteich für die Behandlung des anfallenden Primär- und Überschussschlammes. Des Weiteren sollen in einem neuen Gebäude eine maschinelle Überschussschlammindickung und Schlammwässerung entstehen.
2. Zusätzlich zur Variante 1 wird in dem neuen Faulbehälter der voreingedickte Überschussschlamm aus der Kläranlage Pechbrunn in Mitterteich behandelt.
3. Aufbauend auf die Variante 2 erfolgt die zusätzliche Mitbehandlung des voreingedickten Rohschlammes aus der Kläranlage Wiesau. Hierzu wird der alte Faulbehälter mit 20 % des anfallenden Schlammes weiterbetrieben.⁷²

Handlungsempfehlung

Zur heutigen Betriebsweise der Schlammbehandlung auf der Kläranlage Mitterteich wurden drei alternative Varianten verglichen, welche teilweise die Mitbehandlung von Klärschlamm aus benachbarten Kläranlagen vorsehen. Gesamtwirtschaftlich sind diese nur näherungsweise nutzungsgleich, da durch die erhöhte Faulgasproduktion die Eigenstromerzeugung erhöht werden kann, sodass Ressourcen geschont werden können. Die gezielte Stabilisierung des Rohschlammes führt insbesondere bei Variante 1 zu geringeren Treibhausgasemissionen. Dies wird in der Kostenvergleichsrechnung zunächst nicht berücksichtigt. Von der Bundesregierung wird für bestimmte Bereiche zukünftig ein CO₂-Preis erhoben. Dieser wird so auf Kläranlagen nicht umgelegt. Trotzdem wurde eine monetäre Abschätzung der Treibhausgasemissionen vorgenommen.

⁷² Hurzmeier, Bachelorarbeit, HAW Landshut 2020.

Bei einem Zinssatz von 3 % p.a. und einer realen Preissteigerungsrate von 1 % p.a., ohne die Berücksichtigung der Treibhausgasemissionen, ist keine der drei Alternativvarianten wirtschaftlich darstellbar. Die Wirtschaftlichkeit lässt sich erst bei einem Zinssatz von 1 % p.a. und einer realen Preissteigerung von > 3 % p.a. darstellen. Allein auf dieser Basis ist eine Erweiterung der Faulung in Mitterteich nicht anzuraten.

Derzeit werden wasserwirtschaftliche Vorhaben über die RZWas 2018, unter der Voraussetzung, dass seit 1993 ein gewisser Betrag pro Einwohner investiert wurde, gefördert. Ab einer Reduzierung der Investitionskosten um rund 870.000 € ist Variante 1 bereits wirtschaftlich darstellbar. Da die Kläranlage Mitterteich im Jahr 1999 mit einer neuen biologischen Stufe ausgerüstet wurde, besteht eine realistische Möglichkeit, dass eine Förderung gewährt wird. Unter dieser Prämisse ist bei einem Zinssatz von 3 % p.a. und einer Preissteigerungsrate von 1 % p.a. eine Wirtschaftlichkeit der Variante 1 gegeben. Bei höheren Fördersätzen kann auch die Mitbehandlung des Rohschlammes von der Kläranlage Pechbrunn wirtschaftlich dargestellt werden.

Unter der Berücksichtigung der globalen Anstrengungen im Bereich des Klimaschutzes und der monetären Würdigung der Treibhausgasemissionen ist eine Realisierung der Faulung auf der Kläranlage Mitterteich angezeigt.

Sofern das Projekt im aufgezeigten Umfang förderfähig ist, wird dem Betreiber angeraten, eine neue Faulung in Mitterteich zu realisieren. Für eine abschließende Entscheidung über die Projektrealisierung sollte die wirtschaftliche Situation der Brauerei als größter Indirekteinleiter mitberücksichtigt werden. Ein Wegfall der Frachten würde zu einem wesentlich geringerem Schlammanfall führen, was in dieser Kostenvergleichsrechnung nicht betrachtet wurde.

Eine Mitbehandlung des Rohschlammes der Kläranlage Wiesau ist unter den heutigen Rahmenbedingungen wirtschaftlich nicht sinnvoll. Bei einer veränderten Rechtslage, z.B. der Auflage einer Stabilisierungspflicht, müssen die Investitionen in der Kostenvergleichsrechnung berücksichtigt werden. Diese wirkt sich auf den Projektkostenbarwert aus, sodass eine semizentrale Klärschlammfaulung in Mitterteich Vorteile haben kann.

Grundsätzlich wäre eine gezielte Schlammbehandlung auf der Kläranlage Wiesau wünschenswert. Bei einem Besuch durch den Verfasser dieser Studie am 19.09.2019 war eine signifikante Geruchsentwicklung durch die Schlamm Lagerung vernehmbar. Durch den nichtstabilisierten Rohschlamm kommt es zu erheblichen Emissionen im Umfeld der Kläranlage. Diese erhöhen sich bei einer Umwälzung des Schlamm Speichers, bspw. bei der Entwässerung,

um ein Vielfaches. Eine anaerobe Schlammstabilisierung würde zu einer deutlichen Verbesserung der Geruchsemissionen beitragen.⁷³

2.2. Entwässerung

Durch das Entwässern und Trocknen kann die Klärschlammmenge erheblich reduziert werden, wie aus Abbildung 18 ersichtlich ist. Dies hat den Vorteil, dass die zu entsorgende Menge wesentlich geringer ist und somit die Entsorgungskosten sinken.

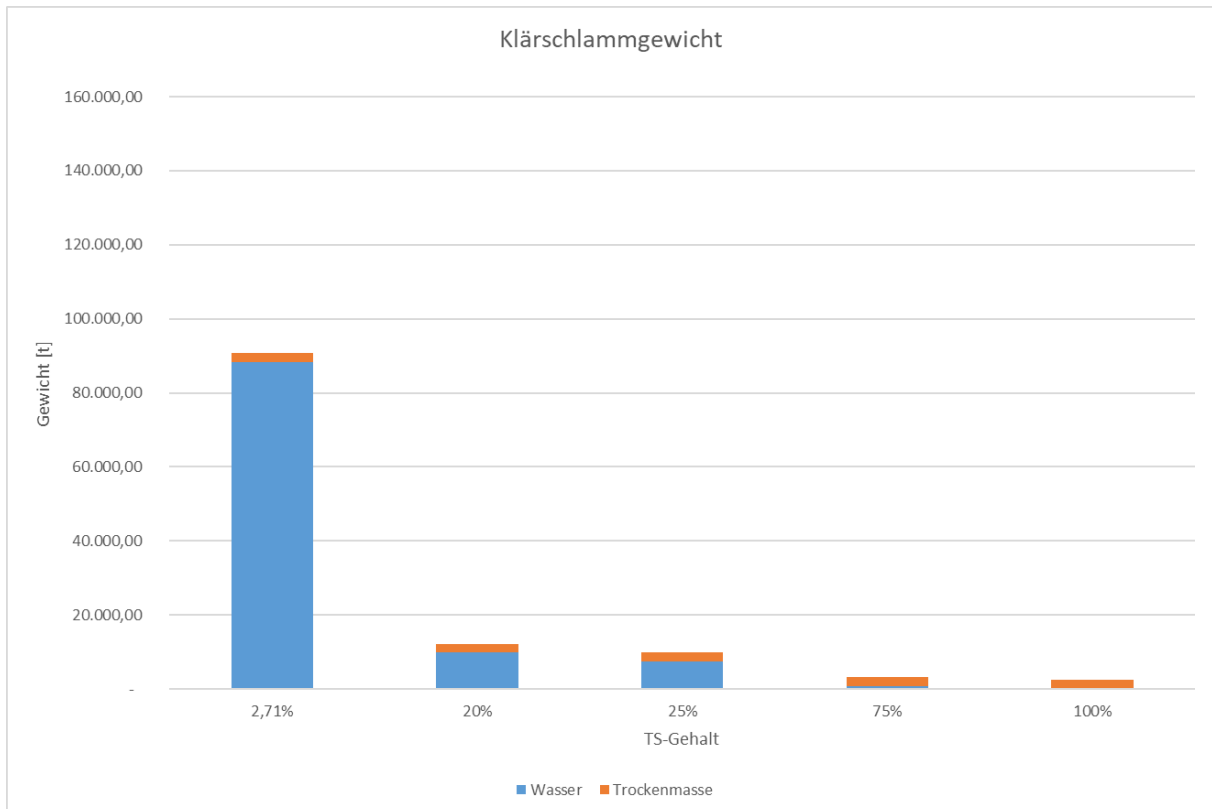


Abbildung 9 Klärschlammgewicht im Zielgebiet in Abhängigkeit vom TS-Gehalt

Da die Entwässerung im Projektzielgebiet derzeit meist mobil geschieht, kann eine gemeinsame Entwässerung zentral bei einer der Kläranlagen im Projektzielgebiet sinnvoll sein. Hierfür wurden verschiedene Entwässerungstechniken analysiert und dargestellt.

⁷³ Hurzmeier, Bachelorarbeit, HAW Landshut 2020.

Tabelle 8 Vor- und Nachteile mobile Entwässerung⁷⁴

Vorteile	Nachteile
Personal wird von Dienstleister gestellt	Ggf. schlechteres Entwässerungsergebnis
Keine Kapitalbindung	Diskontinuierliche Rückbelastung der Kläranlage
Kosten leicht kalkulierbar	Ggf. Schlamm Speicher notwendig

In Tabelle 9 wird ein Überblick über die verschiedenen Entwässerungsverfahren und deren Eigenschaften gegeben.

Tabelle 9 Überblick Entwässerungsverfahren⁷⁵

	Band- filter- presse	Sack- entwässer- ung	Kammer- filter- presse	Membran- filter- presse	Schlauch- filter- presse	Vaku- um- filter	Schnecken- - presse	Zentrifuge
Kontinuierlich arbeitend	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
Durchsatz [m ³ /h]	2 - 40				5 - 40	ca. 1,5	1 - 30	1 - 200
TR %	26 - 32	50 - 90	26 - 45	28 - 49	25 - 40		24 - 30	26 - 32
Mobilität	Ja	Ja/ Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Anschaffungskosten	80.000 – 250.000		150.000 - 350.000	> 150.000	180.000 - 400.000	ab 50.000	ab 40.000	100.000 - 250.000
spez. pFM-Verbrauch [kg/Mg TM]	6 - 12		6 - 12		8 - 15		6 - 12	8 - 14
Energieverbrauch ¹ [kWh/m ³]	0,5 - 0,8	-	0,7 - 0,9	1,0 - 1,2			0,2 - 0,5	1,0 - 1,6
Wartungsintensität	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	hoch
1) Stromverbrauch der Maschine bezogen auf den Schlamm durchsatz ohne Konditionierungsmittelmenge. Angaben ohne den Stromverbrauchs der Beschickungspumpe und Konditionierungsanlage.								

⁷⁴ Reinewald, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2017.

⁷⁵ Reinewald, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2017.

Momentan wird der Klärschlamm auf den Kläranlagen im Projektgebiet hauptsächlich durch externe Entsorgungsdienstleister mit mobilen Anlagen entwässert. Hier kommen hauptsächlich Zentrifugen und Filterpressen zum Einsatz. Für kleine Kläranlagen mit einem geringen Schlammanfall könnte sich ggf. eine Sackentwässerung eignen, da diese ohne den Einsatz von zusätzlicher Energie betrieben werden kann, was die Kosten und die Umweltauswirkungen der Entwässerung deutlich reduzieren könnte. Vor einer Umstellung des Entwässerungsverfahrens muss jedoch immer eine Einzelfallprüfung hinsichtlich des Investitions- und Personalaufwands durchgeführt werden.

Tabelle 10 Gesamtkosten der Entwässerungsverfahren⁷⁶

	Band-Filter- presse	Sack- entwäss- erung	Kammer- Filter- presse	Hydrau- lische Presse	Vaku- um- bandfilter	Schnecken- presse	Zentrifuge
Anschaffun- gskosten [€]	80.000 - 250.000		150.000 - 350.000	180.000 - 400.000	ab 50.000	40.000	100.000 - 250.000
Betriebs- kosten	nied- rig	niedrig	mäßig	hoch	-	niedrig	hoch

⁷⁶ Reinewald, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2017.

2.2.1 Entwässerungskonzept

Eine Entwässerung der anfallenden Klärschlämme im Verbund birgt Synergiepotenziale und damit Einsparung. Durch den Einsatz von mobilen Systemen können Transporte und damit Kosten und negative Umweltauswirkungen reduziert werden.

Tabelle 11 Klärschlammtransporte nach Entwässerung IKOM⁷⁷

Kläranlage	Klärschlamm- menge [m³/a]	TS- Gehalt [%]	Ausbaugröße [EW]	TS [kg]	Transport flüssig LKW je 20 m³	Transport entwässert auf 20% TS LKW je 20 t
Tirschenreuth	2.913	4,63	25.000	134.719,31	146	34
Plößberg I	1.340	3,60	4.000	48.249,00	67	12
Mitterteich	6.834	3,33	22.000	227.222,19	342	57
Konnersreuth	1.208	3,80	2.700	45.885,00	60	11
Pechbrunn	644	5,38	3.500	34.634,41	32	9
Bärnau I	380	3,00	4.100	11.410,00	19	3
Bärnau II	137	3,50	1.100	4.795,00	7	1
Plößberg II	260	3,09	700	8.034,00	13	2
Mähring	204	2,50	1.000	5.100,00	10	1
Großkonreuth	447	2,99	1.600	13.339,19	22	3

Durch eine Kooperation mit dem kommunalen Verband der Steinwald Allianz können weitere Einsparungen erzielt werden.

Tabelle 12 Klärschlammtransporte nach Entwässerung Steinwald Allianz⁷⁸

Kläranlage	Klärschlamm- menge [m³/a]	TS- Gehalt [%]	Ausbaugröße [EW]	TS [kg]	Transport flüssig LKW je 20 m³	Transport entwässert auf 20% TS LKW je 20 t
Steinwaldallianz						
Neusorg	2.388	2,50	5.000	59.700,00	119	15
Wiesau	3.838	3,43	12.000	131.434,38	192	33
Kemnath	52.451	1,00	50.000	525.821,28	2.623	131
Krummennaab	958	4,78	7.500	45.750,47	48	11
Erbendorf	1.954	2,58	7.800	50.462,05	98	13
Ebnath	571	4,80	2.000	27.417,60	29	7
Friedenfels	249	0,88	7.000	2.175,47	12	1
Witzlasreuth	225	7,20	400	16.200,00	11	4
Brand	637	3,50	1.800	22.295,00	32	6

⁷⁷ AMCON Deutschland GmbH, 2020.

⁷⁸ AMCON Deutschland GmbH, 2020.

Eine gemeinsame Entwässerung könnte sich wie folgt gestalten:

Die Kläranlagen mit einem hohen Klärschlammanfall betreiben eigene, stationäre Entwässerungsanlagen.

- IKOM: Tirschenreuth, Mitterteich
- Steinwald: Wiesau, Kemnath

Die übrigen, kleineren Anlagen teilen sich (mehrere) mobile Anlagen, die von Anlage zu Anlage transportiert werden können.

2.3 Trocknung

Neben der Entwässerung stellt die Trocknung ein großes Potential dar, um die Klärschlammengen reduzieren zu können. Hierbei kann sowohl eine solare Trocknung als auch eine Trocknung auf Basis von Wärme aus Blockheizkraftwerken (BHKW) zum Einsatz kommen, sofern Faulgas zur Verfügung steht (Faulturm vorausgesetzt). Auch eine Trocknung mit Abwärme aus Biogasanlagen in unmittelbarer räumlicher Nähe wäre denkbar. Vorab sollten allerdings die Abnahmekapazitäten der Verbrennungsanlagen für getrockneten Klärschlamm geprüft werden, um die abschließende thermische Fremdverwertung sicherzustellen. Viele Verbrennungsanlagenbetreiber bieten entweder nur die Annahme entwässerter Schlämme oder von Schlämmen mit geringerem Trocknungsgrad an, als technisch realisierbar wäre (bis zu 90% Trockenmasse möglich).

Tabelle 13 Überblick Trocknungsverfahren⁷⁹

	Solartrockner	Solarunterstützte Trockner	Bandtrockner
Beheizung	Solarstrahlung	Solarstrahlung, Faulgas, Abgase, Warmwasser	Erdgas, Faulgas, Abgase, Warmwasser
Wärmeträger	Solarstrahlung, Luft	Solarstrahlung, Luft, Warmwasser	Luft < 150°C
Wasserverdampfungsleistung	0,7 – 1,0 t/m ² a	von zusätzlicher Wärmequelle abhängig	100 – 25.000 kg/h
Trocknungstemperatur [°C]	< 40	60	60 – 70
Temperatur der Wärmequelle [°C]	n.a.	< 90	> 70
thermischer Energiebedarf in kWh/t verdampftem Wasser	n.a.	n.a.	> 700
elektrischer Energiebedarf in kWh/t verdampftem Wasser	30	60 - 80	> 50
Abluftmenge [m ³ /h]	hoch	hoch	5.000 - 80.000
Abluftreinigung erforderlich	nein	muss geprüft werden	Ja
Endproduktqualität	Granulat	Granulat	75 - 85 % TR "Spaghetti" 90 % TR Granulat
Investitionskosten	hoch	mittel	gering
Betriebskosten	gering	mittel	Hoch

In der folgenden Tabelle werden die Klärschlamm-mengen der einzelnen Kläranlagen im Stiftland inkl. des Trockensubstanz- und des Wassergehalts dargestellt. Aus dem Wassergehalt ergibt sich der Bedarf an thermischer Energie, die für eine Volltrocknung auf einen TS-Gehalt von 90 % benötigt wird.

⁷⁹ Koller, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2018.

Tabelle 14 Klärschlammmenge Stiffland, Steinwald Allianz, Chevak und zur Trocknung benötigte Wärmemenge bei (*) Bandtrockner und (**) solarunterstützter Trocknung

		KS-Menge	TS	TS		TS	KS-Menge	Wassermenge		TS	KS-Menge	Wassermenge	Wärmemenge*	Wärmemenge**
		[t/a]	[%]	[t]		[%]	[t/a]	[t/a]		[%]	[t/a]	[t/a]	[MWh]	[MWh]
IKOM Stiffland mit Speichersdorf	Waldsassen	5.888	3,18	187	Entwässerung	25	749	562	Trocknung	90	208	21	649	519
	Tirschenreuth	3.262	4,63	151		25	604	453		90	168	17	524	419
	Mitterteich	7.654	3,33	254		25	1.020	766		90	283	29	884	707
	Bärnau I	426	3	13		25	51	38		90	14	1	44	35
	Bärnau II	153	3,5	5		25	21	16		90	6	1	19	15
	Plößberg I	1.501	3,6	54		25	216	162		90	60	6	187	150
	Plößberg II	291	3,09	9		25	36	27		90	10	<1	31	25
	Konnnersreuth	1.352	3,8	51		25	206	155		90	57	6	178	142
	Mähring	228	2,5	6		25	23	17		90	6	0,33	20	16
	Großkonreuth	500	2,99	15		25	60	45		90	17	2	52	41
	Neualbenreuth	1.424	3,23	46		25	184	138		90	51	5	159	128
	Pechbrunn	722	5,38	39		25	155	116		90	43	4	135	108
	Speichersdorf	1.389	2,63	37		25	146	110		90	41	4	127	101
	Neusorg	2.675	2,5	67		25	268	201		90	74	7	232	185
	Wiesau	4.298	3,43	147		25	590	443		90	164	17	511	409
Steinwald Allianz	Kemnath	58.745	1	589	25	2.350	1.761	90	653	64	2.036	1.629		
	Krummennaab	1.073	4,78	51	25	205	154	90	57	6	178	142		
	Erbendorf	2.188	2,58	57	25	226	169	90	63	6	196	157		
	Friedenfels	278	0,88	2	25	10	8	90	3	1	8	7		
	Witzlasreuth	252	7,2	18	25	73	55	90	20	2	63	50		
	Ebnath	640	4,8	31	25	123	92	90	34	3	106	85		
	Brand	713	3,5	25	25	100	75	90	28	3	87	69		
Chevak	Cheb	27.843	2,3	645	25	2.578	1.934	90	716	72	2.234	1.788		
	Mariánské Lázně	24.425	2,4	579	25	2.318	1.738	90	644	64	2.009	1.607		
	Aš	10.890	2,1	224	25	895	671	90	249	25	776	621		

Um eine Deckung des Wärmebedarfs aus der Abwärme von Biogasanlagen in der Region zu prüfen, wurden anhand von Fragebögen Daten von Biogasanlagen in der Umgebung eruiert und ausgewertet (siehe Abbildung 19). Die von den Biogasanlagen produzierte Wärme ist in Tabelle 13 dargestellt.



Abbildung 10 Standorte der Biogasanlagen (Kartendaten © 2019 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google Deutschland)

Tabelle 15 Daten der Biogasanlagen⁸⁰

Nr.	installierte Leistung elektrisch	installierte Leistung thermisch	Eigenverbrauch thermische Leistung	Jahresproduktion Strom	Jahresproduktion Wärme	Wärmeabgabe an Dritte	Potenziell verfügbare Wärmemenge
	[kW]	[kW]	[kW]	[kWh]	[kWh]		
1	800	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	15 - 20 %	n.a.
2	990	990	100	3.400.000	n.a.	ca. 1/4	n.a.
3	970	2.508	100	3.918.797	10.132.312	1.109.000 kWh	9.023.012 kWh
4	1.210	1.280	300	9.600.000	10.000.000	3.500.000 kWh	6.500.000 kWh
5	240	268	440	3.346.000	3.108.746	420 kW	n.a.

⁸⁰ Befragung der Anlagenbetreiber.

6	1.145	1.300	250	4.350	4.600	700 kW	n.a.
7	570	570	150	4.750.000	4.750.000	250 kW	n.a.
8	2.440	3.000	600	4.810.000	5.000.000	n.a.	n.a.
9	280	n.a.	150	n.a.	550	0	ca. 500 kWh

2.4 Thermische Behandlung

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Verfahren zur thermischen Behandlung des Klärschlammes dargestellt und bewertet.

2.4.1 Verbrennungsverfahren

Es existieren unterschiedliche Verfahren zur Verbrennung von Klärschlamm. Die bedeutendsten

- Wirbelschicht
- Drehrohrkessel
- Staubfeuerungsverfahren
- Top-Bio-Verfahren
- Rostfeuerung

wurden im Rahmen des Projekts miteinander verglichen.

2.4.2 Vergasungs- und Pyrolyseverfahren

Zur Monoklärschlammverbrennung gehören neben den klassischen Verbrennungsverfahren auch Pyrolyse- und Vergasungsverfahren.⁸¹ Im Rahmen des Projekts wurden das SynGas-Verfahren und das PYREG®-Verfahren betrachtet.

2.4.3 Bewertung der Verfahren zur thermischen Behandlung

In den folgenden Teilkapiteln werden die ausgewählten Technologien anhand von definierten Bewertungskriterien beurteilt. Im Anschluss an die Bewertung ist das Bewertungsergebnis in einer Tabelle dargestellt, aus der die Platzierung des jeweiligen Verfahrens im Vergleich zu den

⁸¹ DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011) Merkblatt DWA-M 386. Thermische Behandlung von Klärschlämmen - Monoverbrennung, Hennef.

anderen bewerteten Verfahren hervorgeht. Aufgrund von fünf ausgewählten Verfahren erfolgt die Bewertung mittels einer Skala von ein bis fünf Punkten. Es werden die Aspekte Technologie, Ökonomie und Ökologie betrachtet. Die detaillierte Bewertung ist den Originalstudien zu entnehmen.^{82,83,84}

Im Rahmen der Technologiebewertung werden die einzelnen Technologien anhand der Bewertungskriterien Anlagenverfügbarkeit, Betriebsweise, Verfahrenskomplexität und Flächenbedarf bewertet.

Im Rahmen der ökonomischen Bewertung werden die Technologien bezüglich ihrer Investitionskosten, jährlichen Betriebskosten, der jährlich aufzubringenden Abschreibung sowie ihren spezifischen Verwertungskosten pro Tonne entwässerten Klärschlamm beurteilt. Anzumerken ist, dass die Kostendaten aus unterschiedlichen Kalkulationen und Kostenschätzungen stammen. Bei der Interpretation der Daten ist deshalb zu berücksichtigen, dass daraus eine erste Kostentendenz abgeleitet werden kann. Die genauen Kosten müssten für jeden Standort einer potentiellen Anlage individuell kalkuliert und im Rahmen einer Detailplanung ermittelt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Datengrundlagen und vorliegenden Angaben über die Lieferumfänge der einzelnen Anlagen kann keine vergleichende Bewertung durch die ökonomischen Kriterien erfolgen.

Für alle aufgeführten Anlagen sind Investitionskosten von mehreren Millionen Euro zu erwarten. Die spezifischen Verwertungskosten sind in diesem Kapitel für zwei Anlagen dargestellt. Ausschlaggebend ist bei der ökonomischen Betrachtung, wie hoch die spezifischen Entsorgungskosten bei einer thermischen Verwertung im Zielgebiet ausfallen. Hierbei müssen neben den spezifischen Verwertungskosten, die durch die Verbrennungsanlage anfallen auch die Kosten für die vorausgehende Abwasserbehandlung mit einberechnet werden.

Zur Ökologiebeurteilung werden die Energiebilanz, die Verwendung von Zusatzbrennstoffen und die entstehenden Reststoffe als Bewertungskriterien herangezogen.

Einleitend ist anzumerken, dass die Energiebilanz bei jedem Klärschlamm aufgrund der unterschiedlichen Glühverluste bzw. Aschegehalte und erzielten Entwässerungsgrade anders ausfällt. Die Menge der anfallenden Reststoffe hängt von der Zusammensetzung des

⁸² Burk, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

⁸³ Bauer, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

⁸⁴ Estner, Bachelorarbeit, HAW Landshut 2018.

Klärschlamm ab. Da es sich im Folgenden um Angaben handelt, denen unterschiedliche Klärschlamm Daten zugrunde liegen, ist dies bei der Interpretation zu beachten.

Generell gilt für Aschen aus der Monoklärschlammverbrennung und somit für die drei im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Monoverbrennungsverfahren, dass die zurückbleibenden Aschen abhängig von der Zusammensetzung nach den Vorgaben der DüMV und AbfKlärV, granuliert oder staubgebunden als Dünger verwendet können.^{85, 86} Zudem kann aus den Aschen durch ein entsprechendes Verfahren Phosphor zurückgewonnen werden. Aufgrund dieser beiden Möglichkeiten, Phosphor aus der Asche zu nutzen, fließt dies bei allen bewerteten Monoverbrennungsverfahren positiv in die Bewertung ein.

Da Aschen oder Karbonisate aus der Vergasung oder Pyrolyse von Klärschlamm nicht als Düngemittelausgangsstoffe in der DüMV gelistet sind, dürfen daraus hergestellte Düngemittel mit dem darin enthaltenen Phosphor in Deutschland nicht als Dünger verwendet werden, was ebenfalls in die Bewertung eingeht.

Soll eine Phosphorrückgewinnung aus Asche oder kohlenstoffhaltigen Rückständen erfolgen und stehen noch keine Phosphorrückgewinnungsverfahren großflächig zur Verfügung, müssen die Produkte aus der thermischen Verwertung für ein späteres Phosphorrecycling nach der DepV⁸⁷ ohne gegenseitige Vermischung und ohne die Vermischung mit anderen Abfällen deponiert werden.

2.4.4 Bewertungsergebnis

In der nachfolgenden Tabelle sind die Bewertungsergebnisse ersichtlich. Es fällt auf, dass alle Verfahren, zu denen Daten vorliegen, kontinuierlich betrieben werden, was aus dem Kriterium „Betriebsweise“ hervorgeht, und dass sie die Grenzwerte der 17. BImSchV einhalten können. Des Weiteren kann nach der 4. BImSchV für alle bewerteten Anlagen ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren durchgeführt werden. Durch die weiteren Kriterien werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren im Vergleich zueinander deutlich.⁸⁸

⁸⁵ vgl. Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung. AbfKlärV.

⁸⁶ vgl. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2012) Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV).

⁸⁷ vgl. Bundesregierung Deutschland, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2009) Verordnung über Deponien und Langzeitlager. (Deponieverordnung - DepV).

⁸⁸ Burk, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

Tabelle 16 Bewertungsergebnisse⁸⁹

Kriterien	Wirbelschicht	Drehrohrkessel	Staubfeuerung	SynGas-Verfahren	TopBio-Verfahren	BioConT MERS	PYREG®-Verfahren
Technologie							
Anlagenverfügbarkeit	-	-	5	4	3	4	4
Betriebsweise	-	5	5	5	4	4	-
Verfahrenskomplexität	4	3	5	3	5	4	4
Flächenbedarf	-	3	3	4	3	2	5
Ökologie							
Energiebilanz	*	5	4	3	3	4	*
Zusatzbrennstoffe	1	1	5	5	1	5	1
Reststoffe	4	5	4	3	4	3	2
Gesetze							
Genehmigungsverfahren	5	5	5	5	-	-	5
Grenzwerte 17. BImSchV	-	-	5	-	4	-	5
Gesamtbewertung							
Punktzahl	14	27	41	32	27	26	26

* Kein Vergleich möglich aufgrund unterschiedlicher Datengrundlage

2.4.5 Lösungsvorschläge für eine thermische Behandlung im Zielgebiet

Aus der Bewertung kann abgeleitet werden, dass die Technologien Staubfeuerungsverfahren und stationäre Wirbelschicht von allen bewerteten Verfahren am vielversprechendsten für das Zielgebiet des Projekts greenIKK sind. Zudem kommt das SynGas-Verfahren unter Umständen für die Projektregion in Frage.

Das Staubfeuerungsverfahren ist aufgrund des einfachen Brenneraufbaus und des schnellen An- und Abfahrprozesses positiv hervorzuheben. Des Weiteren kann die Anlage über das komplette Jahr betrieben werden. Der Personalbedarf ist gering, da er voraussichtlich mit vorhandenem

⁸⁹ Burk, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

Kläranlagenpersonal gedeckt werden kann. Diese Punkte sprechen für die Umsetzung des Verfahrens in einem Gebiet mit kleinen Kläranlagen.

Wie die Anlage auf Rügen zeigt, ist die stationäre Wirbelschichttechnologie auch für niedrigere Klärschlamm durchsätze geeignet. Die zu behandelnde Klärschlammmenge von rund 2.000 Tonnen TS ist mit der des Zielgebiets vergleichbar. Zudem existieren viele Referenzen in der Großtechnik. Die Technologie ist etabliert und ausgereift, was sich positiv auf die Entsorgungssicherheit auswirkt. Somit kommt auch diese Technologie für das Zielgebiet in Frage.

Beim Drehrohrkessel sollte zunächst der Pilotbetrieb des Verfahrens abgewartet werden, damit der Dauerbetrieb bei der Klärschlammverwertung nachgewiesen wird.

Die Produkte der beiden Verfahren SynGas und PYREG® dürfen im Hinblick auf die düngerechtlichen Vorgaben, in Deutschland nicht als Düngemittelausgangsstoffe verwendet werden. Somit ist die Verwertung der Produkte derzeit erschwert, weshalb die beiden oben genannten konventionellen Verbrennungsverfahren primär für das Zielgebiet in Frage kommen.

Allerdings kommt es auch auf den Schad- bzw. Schwermetallgehalt des Klärschlammes im Zielgebiet an. Kann wegen der Klärschlammzusammensetzung keine Verwertung der Asche als Dünger erfolgen, muss unter Umständen eine Phosphorrückgewinnung durchgeführt werden. Hier wird das Phosphat aus der Asche extrahiert und die Asche fällt als Reststoff an. In diesem Fall kann das SynGas-Verfahren als thermischer Vorbehandlungsschritt des Phosphorrecyclings als Alternative zu den klassischen Verbrennungsverfahren in Betracht gezogen werden, da es aus ökologischer Sicht positiv hervorzuheben ist und zudem skalierbar ist. Beim PYREG®-Verfahren wird ein Düngemittel erzeugt, das nach den aktuellen rechtlichen Vorgaben nicht eingesetzt werden darf, weshalb das Verfahren nicht für die Zielregion geeignet ist. Nachfolgend werden wesentliche Rahmenbedingungen für die Realisierung einer Verbrennungsanlage in der Region aufgezeigt.⁹⁰

2.4.6 Integration einer Verbrennungsanlage in die Region

In der nachfolgenden Abbildung sind neben den Kläranlagenstandorten der Projektregion auch die Standorte des kommunalen Zweckverbandes Steinwaldallianz ersichtlich (Standortmarkierungen in Tropfenform). Bei Einbeziehung der Kläranlagen der Nachbarregion, würde sich die zu behandelnde Klärschlammmenge von ca. 2.400 auf rund 3.350 Tonnen TS erhöhen, was die spezifischen Verwertungskosten einer Verbrennungsanlage reduziert. Aus diesem Grund wäre eine zukünftige gemeinsame Klärschlammverwertungslösung des

⁹⁰ Burk, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 20019.

kommunalen Zweckverbandes IKom Stiftland und der Steinwaldallianz auf deutscher Seite und der CHEVAK auf tschechischer Seite zweckmäßig und wirtschaftlich sinnvoll.

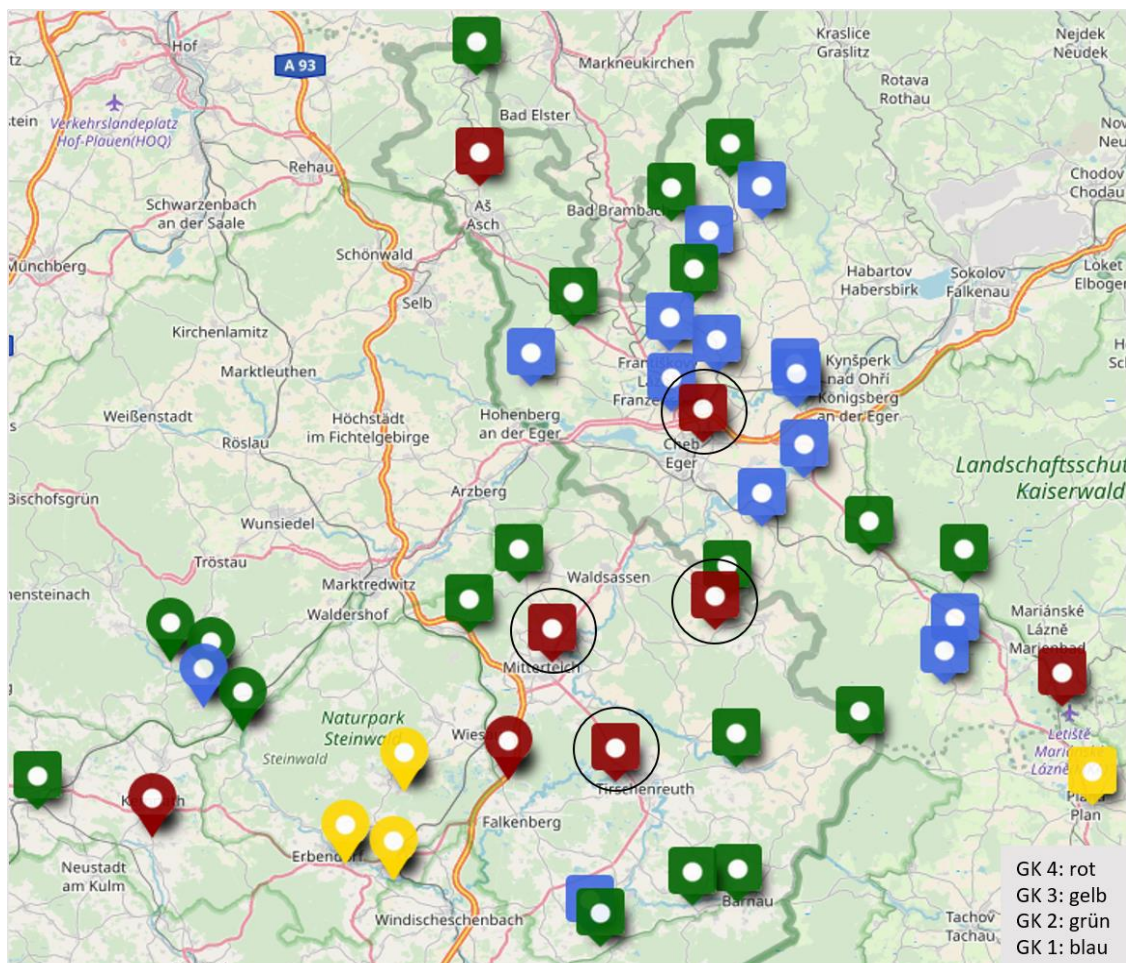


Abbildung 11 Kläranlagenstandorte in der Projektregion inklusive der Steinwaldallianz – Kartenbild von OpenStreetMap (Daten: ODbL 1.0)⁹¹

Bei einer Verwertung des anfallenden Klärschlammes der Zielregion durch eine Verbrennungsanlage sollte die Anlage auf einer großen Kläranlage mit hohem Klärschlammaufkommen errichtet werden, die möglichst zentral liegt. Dadurch würde die Menge des zu transportierenden Klärschlammes reduziert und die Transportwege so kurz wie möglich gehalten werden, was sich dann aus ökonomischer und ökologischer Sicht positiv auswirkt. Mögliche Standorte für eine Anlage sind in der Abbildung markiert.

Im Zielgebiet sind von den Kläranlagen der Größenklasse 4 die Standorte Cheb (65.000 EW), Waldsassen (13.000 EW), Mitterteich (22.000 EW) und Tirschenreuth (25.000 EW) aufgrund ihrer Ausbaugrößen und relativ zentralen Lagen dazu geeignet, als Standort für eine

⁹¹ Burk, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

Verbrennungsanlage in Erwägung gezogen zu werden. Der entwässerte Klärschlamm der weiteren Kläranlagen könnte somit zur zentralen Verbrennungsanlage transportiert werden, die sich auf einem der potentiellen Standorte befindet.

Freie Flächen für eine Anlage sind auf der Kläranlage Tirschenreuth mit 1.531 m² und in Waldsassen mit 2.008 m² sowie 580 m² vorhanden. Mitterteich bietet eine Fläche von 645 m². Auf dem Gelände der Kläranlage Cheb steht eine Fläche von 629 m² zur Verfügung. Tirschenreuth und Waldsassen bieten genügend freie Fläche für eine Verwertungsanlage. In Mitterteich und Cheb sind die Flächen voraussichtlich ausreichend. In Verbindung mit einer möglichen Klärschlammzwischenlagerung im Zielgebiet, worauf im Folgenden eingegangen wird, sollte dies allerdings noch im Detail überprüft werden.

Für eine Verbrennungsanlage ist mit Investitionskosten von mehreren Millionen Euro zu rechnen. Um die betreffenden Kommunen finanziell zu entlasten, wäre die Errichtung einer Anlage im Rahmen eines geförderten Forschungsprojekts empfehlenswert.⁹²

2.4.7 Zwischenlagerung des entwässerten Klärschlammes

Bisher ist bei dem bewerteten Staubfeuerungsverfahren noch keine Referenzanlage in Betrieb. Sollte eine Anlage im Zielgebiet errichtet werden, kann durch ein Zwischenlager gewährleistet werden, dass der anfallende Klärschlamm nach einer Entwässerung auch bei einer eventuell längeren Inbetriebnahme- und Optimierungsphase fachgerecht gelagert wird. Auch bei der in Frage kommenden Wirbelschichttechnologie und bei dem unter Umständen für die Projektregion geeigneten SynGas-Verfahrens kann eine Anlagenanpassung an individuelle Gegebenheiten notwendig sein.

Zudem kann durch ein Zwischenlager die Planungs-, Genehmigungs- und Bauphase einer Anlage leichter überbrückt und nötige Wartungszeiten abgedeckt werden⁹³. Außerdem kann ein Zwischenlager in Verbindung mit einer Verbrennungsanlage am gleichen Standort errichtet werden und dann entwässerte Klärschlämme aus der Region annehmen, die nach der Lagerung in der Verbrennungsanlage verwertet werden.

Nachfolgend werden einige wesentliche Aspekte für ein Zwischenlagerkonzept im Zielgebiet erläutert.

Standort

⁹² Burk, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

⁹³ Mauer P. (2019) Genehmigungsrechtliche und logistische Rahmenbedingungen bei der Klärschlamm Lagerung. <https://www.dwa-hrps.de/de/ea-sgd-nord.html>.

Im Allgemeinen ist das Gelände einer Kläranlage als Standort für ein Klärschlammzwischenlager geeignet. Alternativ kommen auch Landwirtschaftsbetriebe, die sich in oder außer Betrieb befinden, als Standorte für Klärschlammzwischenlager in Frage. Jedoch sollte dort keine Tierhaltung betrieben werden, da sonst der zuständige Amtstierarzt mit in das Genehmigungsverfahren einbezogen werden müsste und dessen Empfehlungen zusätzlich berücksichtigt werden müssten. Der entwässerte Schlamm wird von Lastkraftwagen angeliefert, weshalb die Zufahrtswege zum Klärschlamm Lager dafür geeignet sein müssen.⁹⁴

Als Standort für ein Zwischenlager, das als zentrales Eingangslager einer Verbrennungsanlage für entwässerte Klärschlämme aus der Region dient, kommen aufgrund der Platzverhältnisse Tirschenreuth und Waldsassen in Frage.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Lagerung von entwässertem Klärschlamm auf den Kläranlagen ihrer Entstehung bis zum Abtransport zur Verbrennungsanlage. Bei der Lagerung von weniger als einem Jahr könnte dafür, abhängig von der Lagerkapazität, ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren durchgeführt werden.

Anforderungen an Klärschlamm Lager

Ein Klärschlamm Lager sollte überdacht sein. Außerdem muss es so aufgebaut sein, dass Regen und Sonne den Schlamm nicht erreichen können. Zudem sollte ein kontinuierlicher Luftdurchzug durch eine offene Seite des Lagers und Luftöffnungen auf der gegenüberliegenden Seite gewährleistet sein, damit Dämpfe und Gerüche nach außen transportiert werden. Aufgrund der konstanten Belüftung wird eine Konzentration von gesundheitsschädlichen oder explosiven Dämpfen verhindert.⁹⁵

Systeme die der Entwässerung oder Zufuhr in das Schlamm Lager dienen, sind so zu errichten, dass keine Berührung des Klärschlamm durch Personal stattfindet⁹⁶.

Am tiefsten Punkt des Lagers sollte sich eine Sammelstelle für austretendes Wasser befinden. Der Klärschlamm wird vor der Lagerung stabilisiert, jedoch ist das Lager wegen etwaiger Geruchsbelastungen mit ausreichendem Abstand zu Wohnsiedlungen zu errichten.⁹⁷

⁹⁴ Eigenbetriebe und kommunale Unternehmen Rheinland-Pfalz, DWA Landesverband Hessen/Rheinland-Pfalz/Saarland (2018) Handreichung für die Konzipierung eines Klärschlamm Lagers und der hierfür aufzustellenden Genehmigungsunterlagen unter Berücksichtigung der Anforderungen aus dem BImSchG. http://www.klaerschlammkoooperation-rlp.de/klaerschlammkoooperation_rlp/Materialien%20und%20Arbeitshilfen/Allgemeine%20Informationen/Handreichung%20BImSchG%20Lagerpl%C3%A4tze%202018-02-08.pdf. Zugegriffen: 30. Oktober 2019.

⁹⁵ ebd.

⁹⁶ ebd.

⁹⁷ ebd.

2.4.8 Ausblick

Für die Projektregion ist eine thermische Klärschlammverwertung generell sinnvoll, da so die Unabhängigkeit von externen Betreibern gewährleistet ist und zudem weniger Transportkosten im Vergleich zur Mitverbrennung anfallen. Durch eine eigene Verbrennungsanlage wäre die Entsorgungssicherheit langfristig sichergestellt.

Für das Zielgebiet kommen aufgrund der derzeitigen Regelungen der DüMV bevorzugt Verfahren der konventionellen Verbrennung in Frage, da bei diesen Verfahren die Asche als Granulat in Verkehr gebracht werden kann oder eine Phosphorrückgewinnung aus den Aschen erfolgen kann. Hier ist das Staubfeuerungsverfahren aufgrund seines verhältnismäßig einfachen Aufbaus und die Wirbelschichttechnologie wegen der nachweislich ausgereiften und etablierten Technik bei der Klärschlammverwertung zu empfehlen.

Im Fall einer Entscheidung für eine thermische Verwertung, sollten Vergleichsangebote für die stationäre Wirbelschichttechnologie eingeholt werden. Die Technologie wird von mehreren Firmen angeboten.

Beim Drehrohrkessel ist zunächst der Pilotbetrieb abzuwarten, um sicherzustellen, dass Klärschlamm im Dauerbetrieb vollständig ausbrennt. Für die Zukunft weist diese Technologie allerdings ebenfalls Potential im dezentralen Bereich auf, da sie auf standardisierten Modulen von 500 kW basiert und deshalb für entsprechend kleine Durchsätze geeignet ist.

Allerdings bestehen auch offene Fragen. So ist bei dem projektbezogenen Klärschlamm zukünftig noch zu überprüfen, ob eine Düngemittelherstellung aus Klärschlammaschen der Monoverbrennung nach den Vorgaben der DüMV möglich ist. Dies hängt mit den enthaltenen Schwermetallen zusammen, die sich in der Asche aufkonzentrieren.

Ist keine Düngemittelherstellung aus den Aschen möglich und eine Phosphorrückgewinnung durch ein entsprechendes Verfahren erforderlich, kann das SynGas-Verfahren als Alternative zur klassischen Verbrennung für die thermische Vorbehandlung in Erwägung gezogen werden. Es sollte jedoch zunächst die Wiederinbetriebnahme der Anlage in Mannheim und die Inbetriebnahme der Anlage in Koblenz abgewartet werden, damit die Zuverlässigkeit der Technologie sicher gewährleistet ist.

Das PYREG®-Verfahren kommt zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund der düngerechtlichen Vorschriften nicht in Frage, weil das entstehende Karbonisat nicht als Dünger eingesetzt werden kann.

Falls ein Phosphorrecycling als zusätzlicher Schritt nötig ist, kommen für eine Rückgewinnungsanlage weitere Investitionskosten auf die Kommunen zu. Bis zu einem etwaigen

Phosphorrecycling müsste die Asche nach der thermischen Verwertung deponiert werden. Der Entwicklungsfortschritt der einzelnen Phosphorrückgewinnungsverfahren sollte im Auge behalten werden.

Für eine Verbrennungsanlage fallen hohe Investitionskosten an. Deshalb ist der Zusammenschluss möglichst vieler Kläranlagenbetreiber zu einem Zweckverband sinnvoll, um die spezifischen Verwertungskosten einer potentiellen Anlage zu reduzieren.

Die durchgeführte Studie zeigt mögliche geeignete Standorte für eine Verbrennungsanlage und ein Klärschlammzwischenlager auf. Hier sollte unter Berücksichtigung der Transportkosten und standortspezifischen Bedingungen wie beispielsweise der Zugang zu einer guten Infrastruktur, ein optimaler Aufstellungsort identifiziert werden.⁹⁸

2.4.9 Alternative thermische Verfahren

Neben den Verfahren zur Verbrennung, Pyrolyse und Vergasung existieren noch weitere, alternative Verfahren zur thermischen Behandlung von Klärschlamm durch Carbonisieren.

2.4.9.1 Hydrothermale Carbonisierung

Die Hydrothermale Carbonisierung wird am Beispiel des TerraNova Ultra®-Verfahrens dargestellt.

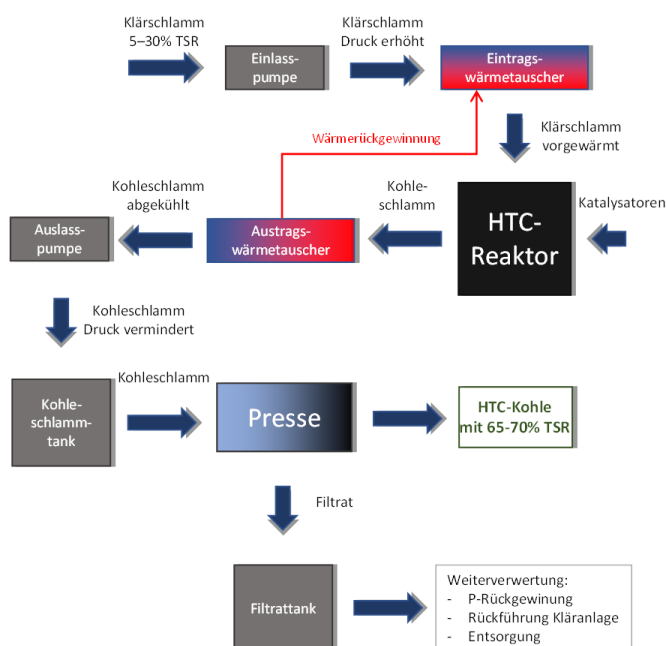


Abbildung 12 Verfahrensfliessbild TerraNova Ultra®⁹⁹

⁹⁸ Burk, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

⁹⁹ Häubl, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

Mit dem TerraNova Ultra®-Verfahren wird Biomasse, in diesem Fall Klärschlamm, mit Hilfe der hydrothermalen Carbonisierung zu einer Bio-Kohle carbonisiert. Diese wird auch als HTC-Kohle oder Bio-Kohle bezeichnet. Da Klärschlamm als nachwachsender Rohstoff angesehen wird, kann das Verfahren als regenerativ bezeichnet werden. In Abbildung 12 wird der Verfahrensablauf dargestellt. Zuerst wird der Klärschlamm mit 5 bis 30 Prozent Trockensubstanzgehalt über einen Trichter in die Einlasspumpe geführt. Diese erhöht den Druck und pumpt die Masse in den Eintragswärmetauscher. Im Eintragswärmetauscher wird die Masse, durch die Abwärme des Verfahrens, vorgewärmt und in den HTC-Reaktor gegeben. Unter ständigem Rühren, bei 10 bar und ca. 240 Grad Celsius, wird der Klärschlamm innerhalb von drei Stunden zu Kohleschlamm carbonisiert. Hierbei werden Katalysatoren und Additive, zum Beispiel Zitronen- oder Schwefelsäure, zugegeben. Die Wärmeenergie wird durch einen Thermoölkreislauf in den Reaktor geführt. Durch das stetige Rühren entsteht eine homogene Masse, die sich langsam absetzt und nach dem Prozess der Carbonisierung als Kohleschlamm in den Austragswärmetauscher gelenkt wird. Hier wird die, durch den exothermen Prozess erhitzte Kohleschlammmasse, abgekühlt. Die hier entstandene Abwärmeenergie wird zu großen Teilen, durch eine Wärmerückgewinnung mit Hilfe eines Thermoölkreislaufes, zurück zum Eintragswärmetauscher geführt. Die Auslasspumpe vermindert den Druck und pumpt die Masse in den Kohleschlammtank. Anschließend wird der Kohleschlamm bis zu einem TSR von 65 bis 70 Prozent entwässert. Dies geschieht zum Beispiel in einer Kammerfilterpresse. In diesem Zustand hat die Kohle einen Heizwert von 9,5 MJ/Kg. Das durch die Pressung entstandene Filtrat wird in den Filtrattank geleitet. Eine Nährstoffrückgewinnung, zum Beispiel eine Phosphorrückgewinnung, ist mit dem Filtrat möglich, da sich in diesem noch die meisten Stickstoff- und Phosphorteile des Klärschlammes befinden. Da Phosphor nicht in der Kohle gebunden ist, lässt sich diese leichter entwässern. Die Verwendung des Filtrats als Flüssigdünger ist ebenfalls möglich. Die TerraNova Ultra®-Anlage ist in eine bestehende Kläranlage einzubinden und somit wird ermöglicht, das Filtrat wieder in den Abwasserreinigungsprozess zu führen. Dadurch ist eine Steigerung der Methanproduktion von bis zu 10 Kilowattstunden pro Tonne möglich.¹⁰⁰

In nachfolgender Tabelle sind die Daten einer TerraNova Ultra®-Anlage zur Verarbeitung von 1.000 Tonnen TS aufgelistet.

¹⁰⁰ Häubl, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

Tabelle 17 Daten einer TerraNova Ultra®-Anlage mit 1.000 Tonnen TS pro Jahr¹⁰¹

	Wert	Einheit		Wert	Einheit		Wert	Einheit
Eckdaten			Energieverbrauch			Rückgewinnung		
Betriebstage	320	d/a	Wärmeenergie	130	kWh/t	Wärme- rückgewinnung	50	kWh/t
Betriebsstunden	7680	h/a	elektrische Energie	18	kWh/t			
Lebensdauer	15	a				Heizwert		
Preis pro Anlage	2000000	€	Emissionen			Klärschlamm 25% TR	1,5	Mj/kg
benötigte Fläche	150	m ²	Kohlendioxid	2,66	m ³ /t	Bio-Kohle 65% TR	9,5	Mj/kg
Arbeitstemperatur Reaktor	240	°C	Stickstoff	1,33	m ³ /t	Bio-Kohle 90% TR	14,2	Mj/kg
Säurebedarf	2	%						

2.4.9.2 Thermo-Katalytisches Reforming - TCR®

Das Fraunhofer-Institut UMSICHT entwickelte das Thermo-Katalytische Reforming (TCR®). In diesem Verfahren werden aus biogenen Reststoffen drei qualitativ hochwertige Produkte nach dem Prinzip der intermediären Pyrolyse erzeugt: Öl, Gas und Biokohle.¹⁰²



Abbildung 13 Aufbau TCR®-Verfahren¹⁰³

¹⁰¹ Häubl, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

¹⁰² Fraunhofer UMSICHT 2019,

<https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/abteilungen/energietechnik/biomassekonversion-mittels-tcr-.html>.

¹⁰³ Fraunhofer UMSICHT, 2019, https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/Infomaterial/160711%20prdbl_Die%20Biobatterie_TCR_de_gesch%C3%BCtzt.pdf

Tabelle 18 Produkte des TCR®-Verfahrens¹⁰⁴

Bio-Öl	Synthesegas	Karbonisat
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Qualität Stabiles Öl • Mischbar mit fossilen Ölen und Kraftstoff • Motorengängig, auch in Mischungen • Kein Teer-Problematik • Hoher Heizwert • Geringe TAN 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserstoffreiches Gas • Teer- und Staubfrei • Direkte Motorengängigkeit • Hoher Wasserstoff-Anteil; bis zu 50 Vol.-% 	<ul style="list-style-type: none"> • Stabil und speicherbar • Erfüllt Anforderungen an PK-Dünger • Hohe Stabilität im Boden • Sehr geringe H und O Anteile • Hoher C-Anteil • Enthält Mineralanteil des Einsatzstoffs

2.5 Phosphorrückgewinnung

Phosphor (P) ist ein essenzielles und nicht substituierbares Element. Wichtige phosphathaltige Verbindungen sind beispielsweise die Kernsäure (DNA, RNA) und das Adenosintriphosphat (ATP). Phosphor wird als Baustein für die Zähne benötigt und ist in der Knochenmasse von Wirbeltieren wiederzufinden. Das pflanzliche Wachstum ist ebenfalls von Phosphor abhängig. Es kann nur gewährleistet werden, wenn eine ausreichende Versorgung mit Phosphat vorhanden ist. Deshalb ist Phosphor ein wichtiger Bestandteil der Ernährung von Menschen, Tieren sowie Pflanzen.

Phosphor kommt in diversen Mineralienvarianten in der Erdkruste vor. Allerdings handelt es sich hierbei um eine begrenzte und degenerative Rohstoffquelle. Durch die tiefer liegenden phosphorhaltigen Minerale steigt der Aufwand zur Gewinnung der Rohphosphate an. Des Weiteren enthalten die Rohphosphate immer mehr unerwünschte Begleitelemente wie Cadmium (Cd) und Uran (U). Mit einer zunehmenden Weltbevölkerung wächst der Bedarf an phosphorhaltigen Düngemitteln. Daraus resultiert die Frage, wie die zukünftige Versorgung der Menschheit mit Phosphor sichergestellt werden kann.

Die Möglichkeit der Rückgewinnung von Nährstoffen aus dem Abwasser stellt hier eine gute Alternative zu Rohphosphaten dar. Die Verwertung von Klärschlamm wurde mit dem Inkrafttreten der novellierten Klärschlammverordnung (AbfKlärV) im Oktober 2017 neu geregelt. Dadurch werden die Kläranlagen zur Phosphorrückgewinnung verpflichtet. Die Umsetzung dieser Regelung wird bis zum Jahr 2029 und 2032 abhängig von der Ausbaugröße der Kläranlagen stattfinden. Allerdings sind entsprechende Rückgewinnungskonzepte bereits bis 2023 zu

¹⁰⁴ Fraunhofer UMSICHT, 2019.

erstellen. Somit ist eine schnelle Umsetzung von Phosphorrückgewinnungsverfahren in Kläranlagen erforderlich.

Im Rahmen des Projekts wurde eine Studie zur Bewertung von unterschiedlichen P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm und Klärschlammasche durchgeführt. Sie dient als Orientierungshilfe, um eine Entscheidung für potenzielle Phosphorrückgewinnungsverfahren treffen zu können. Das übergeordnete Ziel der Studie besteht darin, einen generellen Vergleich unter wirtschaftlicher und ökologischer Sicht zu ermöglichen. Hierzu werden die unterschiedlichen Verfahren bewertet und Empfehlungen für die Umsetzung gegeben. Außerdem werden Voraussetzungen für eine Implementierung der Prozesse dargestellt. Die vollständige Studie liegt als Anlage vor und wird daher in diesem Bericht nur in Auszügen wiedergegeben. Die detaillierte Bewertung ist der Studie "Untersuchung und Bewertung von Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammasche" zu entnehmen.

2.5.1 Untersuchung und Bewertung von Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammmasche

2.5.1.1 Technologieauswahl

Eine Vielzahl von Technologien wurde bereits für die Phosphorrückgewinnung entwickelt. Diese Studie analysiert ausschließlich die Technologien, die in Hinsicht auf den technologischen Reifegrad, den Zugang zu Informationen und Daten, die Potenz des Anbieters und das Entwicklungspotenzial vielversprechend sind. Im Sinne der Transparenz und Nachverfolgbarkeit erfolgt die Technologieauswahl unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien. Die Beurteilung erfolgt auf Grundlage von eigenem Wissen und verfügbarer Literatur.

Die Kriterien für die Technologieauswahl sind Technologiereifegrad, Zugang zu Informationen und Daten, Verfahrenskomplexität und Potenz des Anbieters. Die Kriterien werden anhand von Faktoren wie in der nachfolgenden Tabelle dargestellt unterschiedlich gewichtet.

Tabelle 19 Gewichtungsfaktoren

Kriterium	Gewicht
Technologischer Reifegrad (TRL)	2,0
Zugang zu Informationen und Daten	1,5
Verfahrenskomplexität	0,5
Potenz des Anbieters	0,5

Die nachfolgenden Tabellen stellen die Ergebnisse nach den Auswahlkriterien dar. Die dunkelgrün markierten Verfahren haben die höchste Punktzahl erreicht und werden für die Technologiebewertung herangezogen. Die hellgrün markierten Verfahren erreichen ebenfalls eine hohe Punktzahl, werden aber aus unterschiedlichen Gründen nicht ausgewählt. Orange markierte Technologien werden aufgrund des hohen technologischen Umsetzungsgrads in Betracht gezogen. Die in grau markierten Technologien werden nicht berücksichtigt, somit hat ihre Punktzahl keine Bedeutung.

Tabelle 20 Bewertungsmatrix für die Verfahrensauswahl - Schlammwasser und Klärschlamm

	Verfahren	TRL	TRL Bewertung	Zugang zu Info und Daten	Verfahrens-komplexität	Potenz des Anbieters	Mittelwert	Anforderungen an P-Elimination	Technologie
1	Extraphos	TRL6	3,5	3	2	2	13,5	-	Säureaufschluss
2	Stuttgarter	TRL6	3,5	4	1	2	14,5	-	Säureaufschluss
3	Gifhorn	TRL7	4	3	1	1	13,5	-	Säureaufschluss
4	Kemicond								
5	AirPrex	TRL9	5	3	3	3	17,5	Bio	Kristallisation/Fällung
6	FIX Phos	TRL7	4	3	3	2	15	Bio	Kristallisation
7	PECO	TRL4	2,5	2	3	2	10,5	Bio	Kristallisation
8	ANPHOS	TRL7	4	1	3	2	12	Bio	Kristallisation
9	DHV-Crystalactor	TRL9	5	3	3	3	17,5	Bio	Kristallisation
10	CSIR	TRL4	2,5	1	2	2	8,5	Bio	Kristallisation
11	Ekobalans	TRL6	3,5	2	3	2	11,5	Bio	Kristallisation
12	Heatphos	TRL7	4	2	3	2	13,5	Bio	Fällung
13	Kurita	-	-	1	3	2	-	Bio	Kristallisation
14	Naskeo	TRL7	4	1	3	2	12	Bio	Kristallisation
15	Nishihara	TRL6	3,5	2	3	2	12,5	Bio	Kristallisation
16	Nuresys	TRL9	5	2	3	3	16	Bio	Kristallisation
17	Nutritec	TRL6	3,5	1	3	3	11,5	Bio	Kristallisation
18	Ostara Pearl	TRL9	5	3	3	3	17,5	Bio	Kristallisation
19	Phosiedi	TRL5	3	2	3	2	11,5	Bio	Ionenaustausch
20	Rem Nut	TRL6	3	2	3	1	11,5	*	Ionenaustausch
21	Phosnix	TRL9	5	2	3	3	16	Bio	Kristallisation
22	PHOSPAAQ								
23	PhosphoGreen	TRL9	5	2	3	3	16	Bio	Kristallisation
24	PhoStrip	TRL7	4	2	3	3	14	Bio	Fällung
25	PRISA	TRL5	3	3	3	2	13	Bio	Fällung
26	P-Roc	TRL6	3,5	4	3	2	15,5	Bio	Kristallisation
27	Rephos								
28	Struvia	TRL7	4	2	3	3	14	Bio	Kristallisation
29	Sydney	TRL5	2,5	1	3	2	9	Bio	Kristallisation
30	Treviso	TRL7	4	1	3	1	11,5	Bio	Kristallisation
31	e Phos	TRL6	3,5	3	3	3	14,5	Bio	Sonderverfahren
32	SuPaPhos	TRL5	3	2	3	2	11,5	*	Sonderverfahren
33	RecyPhos								
34	Aqua-Reci	TRL6	3,5	2	1	2	11,5	-	Hydrothermisch
35	CAMBI								
36	Phoxnan	TRL4	2,5	4	1	1	12	-	Hydrothermisch

Tabelle 21 Bewertungsmatrix für die Verfahrensauswahl - Klärschlammasche

	Verfahren	TRL	TRL Bewertung	Zugang zu Info und Daten	Verfahrens-komplexität	Potenz des Anbieters	Mittelwert	Anforderungen an P-Elimination	Technologie
1	Ash Dec	TRL6	3,5	4	2	3	15,5	-	Thermochemisch
2	Ash2®Phos	TRL6	3,5	3	2	3	14	-	Säureaufschluss
3	ATZ-Eisenbadreaktor	TRL5	3	2	2	1	10,5	-	
4	BioCon	TRL5	3	2	2	1	10,5	-	Säureaufschluss
5	Eberhard Verfahren								
6	Ecophos	TRL8	4,5	4	2	2	17	-	Säureaufschluss
7	Ephos	TRL4	2,5	3	3	1	11,5	-	Elektrokinetisch
8	Leachphos	TRL7	4	4	2	3	16,5	-	Säureaufschluss
9	Lotus Gifu City	TRL9	5	-	-	-	-	-	Säureaufschluss
10	Mephrec	TRL7	4	2	1	1	12	-	Schmelzvergasung
11	Parforce	TRL6	3,5	4	-	1	13,5	-	Säureaufschluss
12	Pasch	TRL5	3	4	1	1	13	-	Säureaufschluss
13	Seraplant	TRL9	5	2	3	2	15,5	-	Säureaufschluss
14	SePhos	TRL1	1	2	2	1	6,5	-	Säureaufschluss
15	sePura	TRL8	4,5	2	3	2	14,5	-	-
16	P-Bac Verfahren/Inocre	TRL4	2,5	1	3	3	9,5	-	Bioleaching
17	SESAL-PHOS	TRL1	1	4	2	1	9,5	-	Säureaufschluss
18	TetraPhos®	TRL6	4	4	2	3	16,5	-	Säureaufschluss
19	Thermphos								

Die Begründung der Auswahl der Verfahren ist der Studie zu entnehmen.

2.5.1.2 Technologiebewertung

Um die einzelnen Verfahren miteinander vergleichen zu können, wird eine einfache Punktbewertung durchgeführt. Zunächst werden Bewertungsgruppen festgelegt, die wiederum einzelne Bewertungskriterien beinhalten. Die Einzelkriterien werden alle gleich gewichtet. Bei der Bewertung werden für jedes Kriterium zwischen 1 und 4 Punkte vergeben. Im Folgenden werden die aufgestellten Bewertungsgruppen mit den enthaltenen Einzelkriterien erläutert.

Die Bewertungsgruppen werden im Folgenden erläutert.

Struktur und Komplexität

Die Gruppe Struktur und Komplexität beinhaltet drei Kriterien für die Bewertung der Verfahren. Zunächst wird der Platzbedarf, den eine Anlage zum Betrieb des Verfahrens benötigt, qualitativ

bewertet. Es werden die grundlegenden Anlagenkomponenten aufgezeigt und die besonders platzintensiven Bauteile hervorgehoben. Das zweite Kriterium beinhaltet die Integrierbarkeit eines Verfahrens in eine bestehende Kläranlage. Darunter ist die Anforderung, die ein Verfahren an die Abwasserreinigung stellt, zu verstehen. Je nach Art des vorangegangenen Abwasserreinigungsprozesses variiert die Einsetzbarkeit der unterschiedlichen P-Rückgewinnungsverfahren. Der technologische Aufwand bewertet die benötigten Prozessschritte bis zur Erzeugung des P-Rezyklates. Dadurch kann auf die Komplexität des Verfahrens rückgeschlossen werden. Durch dieses Kriterium wird ersichtlich, ob die Komplexität eines Prozesses in Relation zum potenziellen Einsatzgebiet steht.

Wirtschaftlichkeit

Die Bewertungsgruppe Wirtschaftlichkeit enthält drei Einzelkriterien. Um die Wirtschaftlichkeit der Verfahren bewerten zu können, müssen die Verfahrenskosten bekannt sein. Deswegen gehen zwei Kostenkriterien in die Bewertung ein. Dies betrifft die Betriebskosten sowie den Preis in [€/kg Endprodukt] der durch das erzeugte Sekundärphosphat am Markt erzielt werden kann. In die Betriebskosten gehen Betriebsmittelverbrauch, Stromkosten für die einzelnen Anlagenkomponenten und Personalkosten ein. Des Weiteren wird die P-Rückgewinnungsrate [%] des Verfahrens bezogen auf das in dem Verfahren eingesetzte Material (Klärschlamm, Schlammwasser, Klärschlammasche) bewertet. Ein hohes Rückgewinnungspotential erhöht oft die Wirtschaftlichkeit von Verfahren, allerdings kann dadurch auch der Betriebsmittelverbrauch steigen, was sich wiederum negativ auf das Bewertungskriterium Betriebskosten auswirken kann.

Ökologie

Diese Bewertungsgruppe bildet sich aus den drei Einzelkriterien Chemikalieneinsatz, Energiebedarf und Reststoffe. Damit ein Prozess eine gute Bewertung erhält, muss er sich durch einen geringen Ressourcenverbrauch (Chemikalieneinsatz [t/t P] und Energiebedarf [kWh/t P]) auszeichnen. Zudem müssen die eingesetzten Chemikalien ungefährlich sein. Bei dem Kriterium Reststoffe wird ein Verfahren als gut bewertet, wenn es keine nicht verwertbaren Abfälle produziert.

Produktqualität

Unter Produktqualität fallen zwei Einzelkriterien. Zunächst wird der Phosphorgehalt des Produktes in Prozent dargestellt. Das nächste Kriterium bildet die „Kompatibilität mit rechtlichen Rahmenbedingungen“ mit der Klärschlamm- und Düngemittelverordnung. Die Verfahren werden

mit einem oder vier Punkten bewertet, da es entweder kompatibel oder inkompatibel mit den rechtlichen Rahmenbedingungen ist.

Die folgende Tabelle stellt die Entwicklung der Bewertungsmethode dar, um die ausgewählten Technologien hinsichtlich Struktur & Komplexität, Wirtschaftlichkeit, Ökologie sowie Produktqualität zu bewerten.

Tabelle 22 Bewertungsmethode

Struktur & Komplexität				
Platzbedarf	1	2	3	4
Benötigter Platzbedarf der Anlage [qualitativ]	Sehr groß	Groß >1000m ²	Gering <1000 m ²	Außerhalb ARA umsetzbar
Integrierbarkeit	1	2	3	4
Anforderung an die Abwasserreinigung [qualitativ]	mehrere			Keine
Technologischer Aufwand	1	2	3	4
Benötigte Prozessschritte und Komplexität des Verfahrens [qualitativ]	Komplex, viele Prozessschritte			technologisch Einfach, wenige Prozessschritte
Wirtschaftlichkeit				
Kosten	1	2	3	4
Betriebskosten [€/kg P]	>12	8-12	4-8	<4
Erlöse	1	2	3	4
Endprodukt - Erlöse aus Produktabsatz [€/t P-Rezyklat]	<150	150-250	251-350	>350
Effizienz	1	2	3	4
P-Rückgewinnungsgrad bezogen auf P im Rohabwasser [%]	<25	25-50	51-75	> 75
Ökologie und Nachhaltigkeit				
Ressourcenaufwand	1	2	3	4
Chemikalieneinsatz [t/t P]	> 5t, Gefahrstoff	< 5t, Gefahrstoff	> 5t, kein Gefahrstoff	< 5t, kein Gefahrstoff
Energiebedarf [kWh/t P]	> 10000	50000 – 10000	2000 - 5000	<2000
Abfall	1	2	3	4
Reststoffe [qualitativ]	Schwermetallreiche Reststoff / Sonderabfälle / Säure			Keine
Produktqualität				
Endprodukt P-Rezyklat	1	2	3	4
P ₂ O ₅ Gehalt im Endprodukt [%]	<15	15-30	31-45	>45
Kompatibilität rechtl. Rahmenbedingungen	Grenze der DüMV wird nicht eingehalten			Grenze der DüMV wird eingehalten

Die Bewertungsergebnisse sind in Tabelle 39 zusammengefasst

Tabelle 23 Bewertungsergebnisse

	Faulschlamm, Schlammwasser und Klärschlamm								Klärschlammasche						
	AirPrex	DHV Chystallactor	Extraphos	Fix-Phos	Gifhorner	Ostara-Pearl	P-Roc	Stuttgarter	AshDec	Ash2®Phos	Ecophos	Leachphos	Mephrec	Seraplant	TetraPhos
Struktur und Komplexität															
Benötigter Platzbedarf der Anlage	3	3	3	3	2	3	3	2	3	-	2	2	2	3	2
Anforderung an die Abwasserreinigung/ Klärschlammbehandlung	1	1	3	1	2	1	1	2	4	4	4	4	4	4	4
Technologischer Aufwand	4	4	3	4	1	4	4	2	1	3	3	2	1	4	3
Wirtschaftlichkeit															
Betriebskosten	-	3	-	4	-	4	-	1	4	-	3	3	1	-	4
Endprodukt	4	-	-	-	4	3	3	4	2	-	3	4	1	4	3
P-Rückgewinnungsgrad	1	2	2	-	3	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4
Ökologie und Nachhaltigkeit															
Chemikalieneinsatz	-	-	-	3	1	-	3	1	4	-	1	1	4	1	1
Energiebedarf	-	-	-	4	1	-	1	1	3	-	2	2	3	2	2
Reststoffe	4	4	4	4	1	4	4	1	1	1	1	1	1	4	1
Produktqualität															
P ₂ O ₅ Gehalt im Endprodukt	2	2	2	2	3	2	2	2	2	4	4	3/4*	1	3	3/4*
Kompatibilität recht. Rahmenbedingungen (DüMV, AbklärV)	1	1	1	1	4	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4
Kompatibilität mit Zielgebiet															
Technologie im Zielgebiet einsetzbar	Nein	Nein	bedingt	Nein	Nein	Nein	Nein	bedingt	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein

2.5.1.3 Fazit Phosphorrückgewinnung

Die Verfahren zur P-Rückgewinnung aus der Asche sind mit allen vorhandenen Prozessstrukturen der Abwasserreinigungsanlagen kompatibel, da ihre Funktionsweise unabhängig von der P-Elimination erfolgt. Diese Technologien sind aufgrund anspruchsvoller Aggregate und einer hohen Anzahl der Prozessschritte technisch komplexe Verfahren. Dennoch weisen sie einen sehr hohen Phosphorrückgewinnungsgrad von über 75 Prozent auf. Technologien, die Phosphor aus Klärschlammaschen zurückgewinnen, erfordern aufgrund der hohen Investitionskosten einen höheren Aschedurchsatz und sind für das Zielgebiet nicht geeignet. Um diesen höheren Wert bei einer Region mit kleinen und mittelgroßen Kläranlagen zu erreichen, kann eine Technologie an einem zentralen Ort implementiert werden, an dem Aschen aus der Monoverbrennung gesammelt werden können.

Bei den Verfahren für die P-Rückgewinnung aus Klärschlamm kommt ein Verfahren eingeschränkt für das Zielgebiet in Frage. Ein zweites Verfahren kann ebenfalls nur unter bestimmten Bedingungen in der Projektregion zum Einsatz kommen. Das Extraphos-Verfahren ist für das Zielgebiet bezüglich der Integrierbarkeit in die Kläranlageninfrastruktur geeignet. Das Verfahren kann allerdings die Vorgabe der AbfKlärV 50 % des Phosphors bezogen auf den Ausgangsschlamm zurückzugewinnen nicht erfüllen. Zudem befindet es sich noch im Entwicklungsstadium und wird anhand von Pilotanlagen getestet. Eine großtechnische Umsetzung wurde noch nicht durchgeführt, weswegen eine Umsetzung des Verfahrens für das gesamte Zielgebiet zu diesem Zeitpunkt nicht in Frage kommt. Eine Pilotierung auf einer der größeren Kläranlagen im Zielgebiet die eine P-Elimination betreiben kann aber in Erwägung gezogen werden. Das Stuttgarter-Verfahren ist sehr komplex, weswegen es für große Kläranlagen geeignet ist. Außerdem befindet sich das Verfahren ebenfalls noch im Entwicklungsstadium. Mit dem Verfahren können die Rahmenbedingungen der AbfKlärV im Gegensatz zum Extraphos-Verfahren aber eingehalten werden. Eine Pilotierung der oben beschriebenen MSE-Versuchsanlage kann ebenfalls für die größeren Kläranlagen in der Projektregion die eine P-Elimination und einen Faulturm besitzen in Erwägung gezogen werden. Das Verfahren ist für viele Kläranlagen des Zielgebietes allerdings nicht geeignet. Ein weiterer Lösungsansatz besteht darin, dass Stuttgarter Verfahren zentral zu implementieren, um den Klärschlamm der umliegenden Kläranlagen zu behandeln. Das Gifhorn-Verfahren kommt für das Zielgebiet nicht in Frage, da es zu komplex ist und deshalb für nur große Kläranlagen geeignet ist (KA Gifhorn 50.000 EW). Außerdem wurde der Betrieb eingestellt und es konnte im Rahmen der Recherche nicht herausgefunden werden, ob derzeit weitere Entwicklungen zu dem Verfahren stattfinden. Alle Kristallisations- und Fällungsverfahren sind wie schon erwähnt nicht Zielgebiet geeignet, da sie eine biologische P-Elimination voraussetzen.

Vorbehaltlich kommt die Einsetzung eines P-Rückgewinnungsverfahrens aus Klärschlammasche in einer Region mit niedrigen Einwohnerwerten aufgrund der hohen Investitionskosten nicht in Betracht. Von allen in diesem Bericht bewerteten Verfahren für die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, ist schlussendlich ein Verfahren im Vergleich zu den anderen bewerteten Verfahren für den Einsatz in der Projektregion am vielversprechendsten. Das Extraphos-Verfahren befindet sich allerdings noch im Entwicklungsstadium, deshalb kann als Empfehlung für die Kommunen ausgesprochen werden, unter interkommunaler Zusammenarbeit, eine Pilotierung des Verfahrens auf einer der Kläranlagen in der Projektregion zu arrangieren. Somit wird die Einsetzbarkeit des Verfahrens auf kleineren Kläranlagen, wie sie im Zielgebiet anzutreffen sind, getestet. Außerdem kann rückgeschlossen werden, ob eine Übertragung des Verfahrens auf weitere kommunale Kläranlagen der Region mit gleichen oder ähnlichen Abwasserreinigungsschritten möglich ist.

2.5.2 Bewertung des STRUVIA™-Verfahrens

Im Rahmen einer weiteren Studie wurde das STRUVIA™-Verfahren der Firma veolia untersucht. Die Ergebnisse werden in diesem Bericht in Auszügen vorgestellt.

Die Entnahme der Phosphate erfolgt über das in der Kläranlage entstehende Prozesswasser aus der Schlammbehandlung. Dieses bildet die Grundlage zur Wiedergewinnung. Im Vergleich zu anderen Technologien hat das Verfahren eine sehr kompakte Bauweise und eine hohe Ausbeute an MAP. Die im Reaktor gebildeten homogenen Kristalle in sandartiger Form können ohne Vorbehandlung als Dünger verwendet werden.¹⁰⁵

2.5.1.1 Ökobilanz

Um die Umweltaspekte und –wirkungen von STRUVIA™ zu analysieren, wird im Folgenden eine Ökobilanzierung durchgeführt. Aufgrund der definierten Methode zur Durchführung findet die Bilanzierung anhand der Normen DIN EN ISO 14044:2018-05 und DIN EN ISO 14040:2009-11 statt.

In der Wirkungsabschätzung zu STRUVIA™ sind die Ergebnisse der Technologie dargestellt und erläutert.

¹⁰⁵ Kurth, Peter; Oexle, Anno; Faulstich, Martin (Hg.) (2018): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden: Springer Vieweg. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-17045-5>.

Der kumulierte Energieaufwand (cumulative energy demand) ist hierbei eine, auf den Input der Prozesse bezogene Bilanzgröße. Der Energieaufwand ist in die drei LCIA-Faktoren der nicht erneuerbaren Energien in die Bereiche nuklear, fossil und Primärwald (Urwald) unterteilt. Aufgrund des geringen Anteils des Faktors „Primärwald“ wird dieser nur gesamtheitlich in der Skalierung auf 100 % betrachtet.

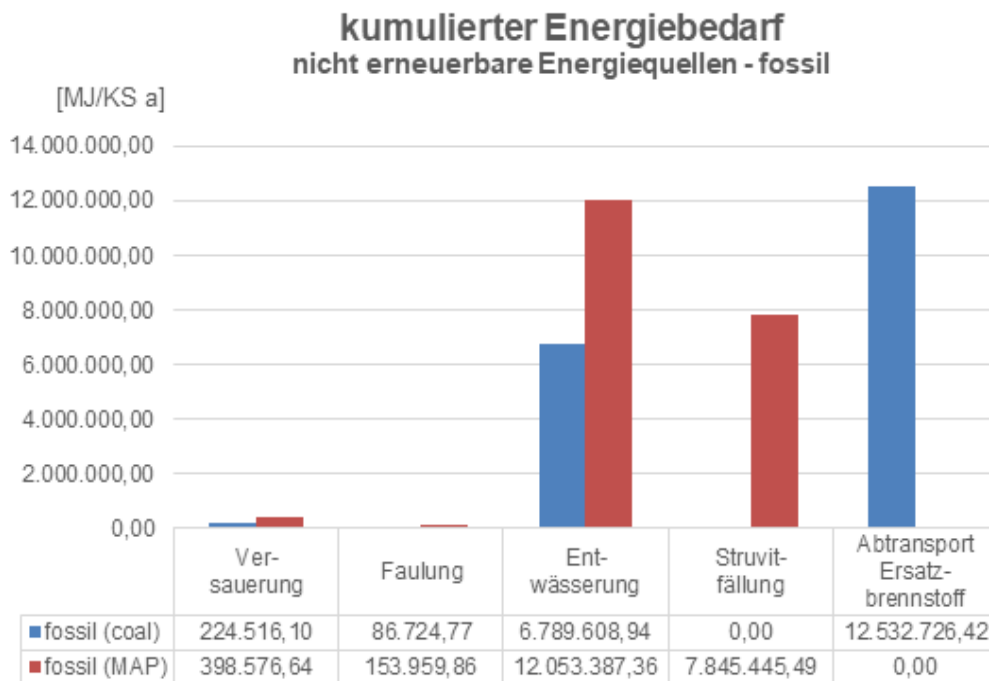


Abbildung 13 Energiebedarf fossiler Brennstoffe (aus Umberto LCA+)¹⁰⁶

Der Abtransport des Klärschlammes zur thermischen Verwertung in dem Kohlekraftwerk in Chemnitz, zeigt den hohen kumulierten Energiebedarf fossiler Brennstoffe. Dies ist auf den Kraftstoffverbrauch der LKW zurückzuführen. Folglich verringert sich dieser Wert, je geringer die Transportstrecke ist. Der jährliche höchste Verbrauch fossiler Energiequellen in Bezug auf die Gewinnung von MAP, liegt bei der Entwässerung vor. Die Ursache hierfür ist der größte Stromverbrauch im gesamten System.

Bei der Nutzung nuklearer Energiequellen liegt der Höchstwert bei der Struvitfällung vor. Die Ursache hierfür ist die Bereitstellung der Energie in Form von Strom.

¹⁰⁶ Bauer, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

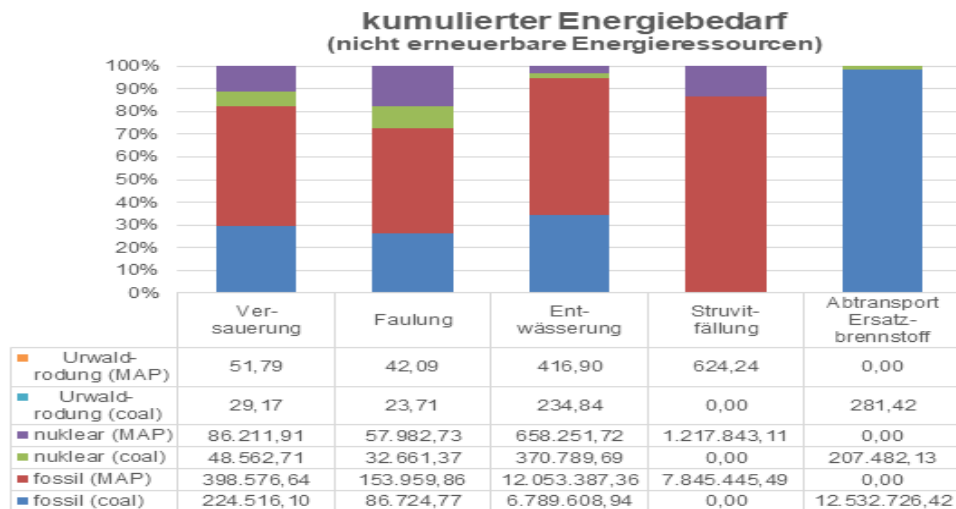


Abbildung 14 kumulierter Energiebedarf nicht erneuerbarer Energien (aus Umberto LCA+)¹⁰⁷

Zur übersichtlichen Darstellung der Energieverbräuche, sind diese auf 100 % skaliert und in Abbildung 14 dargestellt. Daraus geht hervor, dass für die Versauerung, Schlammfäulung, Entwässerung und Struvitfällung die meiste Energie, aus fossilen Quellen, für die Gewinnung von MAP benötigt wird.

Grundlegend ist festzustellen, dass eine enorme Menge fossiler Ressourcen, im Vergleich zu den anderen Energiequellen benötigt wird.

Um die Umweltauswirkungen in Form von Emissionen zu ermitteln, werden Wirkungskategorien verwendet, die sich auf den Output beziehen. Verwendet werden hierbei folgende Wirkungskategorien:

- Humantoxizität (HTP100)
- Klimaänderung (GWP100)
- Süßwassereutrophierung (FEP)
- terrestrische Versauerung (TAP100)

Um signifikante Parameter zu identifizieren, dienen als Kriterien die Anteile der Prozesse am Indikatorwert, betrachtet über den gesamten Lebensweg und der Anteil eines Stoffes am Indikatorwert.

¹⁰⁷ ebd.

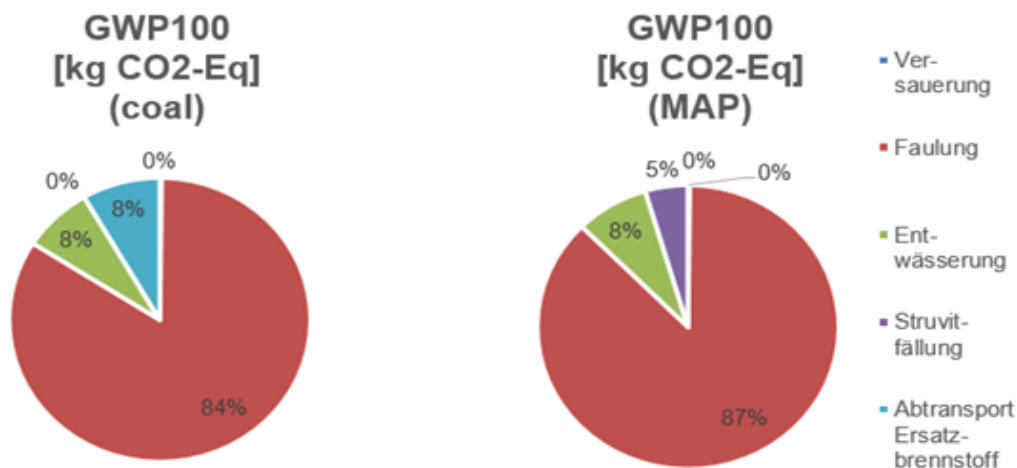


Abbildung 15 Signifikante Parameter Treibhauspotential (aus Umberto LCA+)¹⁰⁸

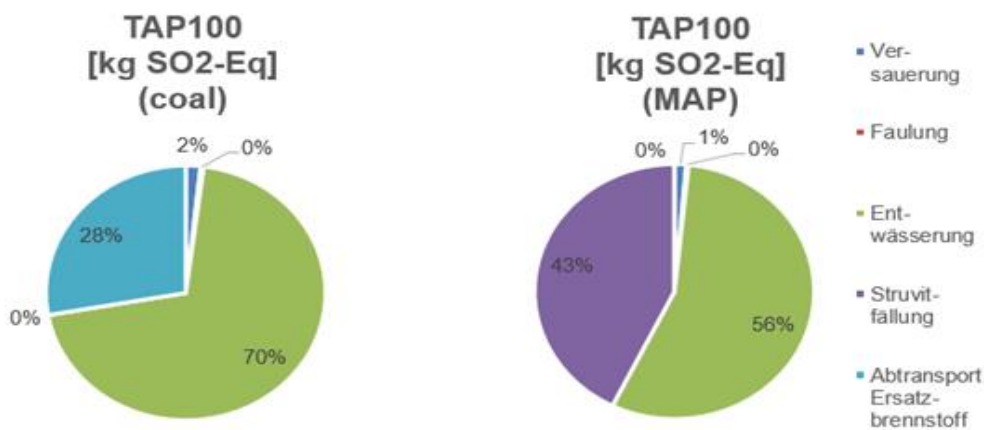


Abbildung 16 Signifikante Parameter terrestrische Versauerung (aus Umberto LCA+)¹⁰⁹

Der Prozess „Faulung“ hat mit 84 % beim Referenzfluss des Ersatzbrennstoffs beziehungsweise mit 87 % bei MAP-Gewinnung den größten Anteil am Treibhauspotential. Mit der Entwässerung des Schlammes geht der größte Anteil (70 %) der terrestrischen Versauerung hervor. Ebenso bei dem Referenzfluss der MAP-Gewinnung tritt bei der Entwässerung der größte Anteil an Versauerung auf.

¹⁰⁸ Bauer, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

¹⁰⁹ Bauer, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

2.5.1.2 Ökonomische Aspekte

Die Kosten für die einzelnen Bestandteile der Anlage sowie der Stromverbrauch wurden beim Hersteller angefragt. Diese Werte beziehen sich auf den insgesamt anfallenden Klärschlamm der Zielregion. Die Kosten hierzu basieren auf ungefähren Angaben, da diese verschiedenen Einflüssen wie Personalkosten, geografische Lage oder Infrastruktur unterliegen. Jedoch sind sie ein guter Anhaltspunkt, um eine relativ exakte Schätzung des Kostenumfanges abzugeben.

Tabelle 24 Kostenübersicht STRUVIATM-Anlage in Anlehnung an Veolia Wasser Deutschland, 2019¹¹⁰

Modul/Bauteil	Kosten [€]
Investitionskosten	
Bioversäuerungstank	375.000,00
Entwässerung	600.000,00
Struviareaktor	1.000.000,00
Struvitentwässerung	150.000,00
Mischbehälter	35.000,00
Verrohrung und Pumpen	130.000,00
Fundament/Halle	300.000,00
Investitionskosten, gesamt	2.590.000,00
jährliche Kosten	
Instandhaltungskosten	40.000,00
Stromkosten (30,22)	83.105,00
Transportkosten	261.300,00
Chemikalienkosten	1.336.980,36
jährliche Kosten, gesamt	1.721.385,36

Der Stromverbrauch zum Betrieb der Anlage ist vom Hersteller mit 275.000 Kilowattstunden pro Jahr angegeben. Die Kosten pro Kilowattstunde Strom sind durch eine Internetrecherche¹¹¹ ermittelt. Die jährlichen Kosten für Personal sind nicht miteinbezogen, da keine Informationen zur benötigten Mitarbeiteranzahl vorliegen. Um eine Aussage zu den Transportkosten treffen zu

¹¹⁰ ebd.

¹¹¹ Finanztip Verbraucherinformation gemeinnützige GmbH 2019.

können, sind diese mit einem Preis von 1,00 € pro km angenommen. Die Kosten zum Transport sind sehr individuell somit liegt die Quintessenz bei der Auswahl dieses Wertes in der Umrechnung. Als Transportmenge pro LKW sind 32,00 t angenommen, was auf die Klärschlammmenge von 55.743,07 t eine Anzahl von 1.742 Fahrten ergibt. Die Fahrtenanzahl mit der Transportstrecke von 150 km ergeben eine Gesamtstrecke von 261.300 km.

Die Kosten für Chemikalien sind ebenfalls durch Preise aus der Internetrecherche angenommen. Aufgrund der stark variierenden Preisspanne in Bezug auf den Umfang der Abnahmemenge sind diese Werte ungenügend repräsentativ und dienen nur als ungefährender Anhaltspunkt. Anhand folgender Annahmen¹¹² sind die Gesamtkosten für die Chemikalien berechnet worden:

- NaCl (85) à 1.090,00 € pro t $\hat{=}$ 92.650,00 € pro Jahr

- MgCl₂ (815) à 400,00 € pro t $\hat{=}$ 326.000,00 € pro Jahr

- Al(OH)₃ (1.665,45) à 550,00 € pro t $\hat{=}$ 915.997,50 € pro Jahr

- NaHSO₄ (28,14) à 1.149,00 € pro t $\hat{=}$ 32.332,86 € pro Jahr

Ein großer Vorteil dieser Technologie ist die Möglichkeit der direkten Verwendung des Struvits als Düngemittel¹¹³. Hierdurch entsteht das Einsparpotenzial einer gesonderten Düngemittelproduktion. Energie, chemische Zusatzstoffe, bis auf Magnesiumchlorid und Natronlauge, sowie Transportwege, die zur Herstellung benötigt werden, entfallen. Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit trägt ebenso der Erlös aus dem Verkauf des produzierten Magnesiumammoniumphosphats bei.

2.5.1.3 Soziale Aspekte

Der größte soziale Aspekt von STRUVIA™ liegt in der Rückgewinnung von Phosphor, da es ein begrenztes Vorkommen aufweist und essentiell für alle Lebewesen ist. Aufgrund der stetig wachsenden Weltbevölkerung und dem steigenden Nahrungsmittelbedarf, erhöht sich der Bedarf an Phosphor, um fruchtbare Böden zu gewährleisten¹¹⁴. Der STRUVIA™-Reaktor gewinnt

¹¹² Bauer, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

¹¹³ Kurth et al. 2018, S. 399.

¹¹⁴ Holm, Olaf; Thomé-Kozmiensky, Elisabeth; Quicker, Peter; Kopp-Assenmacher, Stefan (Hg.) (2018): Verwertung von Klärschlamm, S.520, TK Verlag. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.

Phosphor nicht erst aus der Verbrennungsasche, sondern setzt bereits bei der Entwässerung ein und fällt die größtmögliche Menge aus dem Prozesswasser. Hierdurch steigt die Gewinnung an Phosphor, was eine erhöhte Phosphorrückgewinnung aus der gesamten Klärschlammbehandlung zur Folge hat.

Mit Blick in die Zukunft lässt sich sagen, dass eine soziale Nachhaltigkeit gegeben ist, welche die Grundbedürfnisse, in Form von Nahrungsmitteln, zukünftiger Generationen längerfristig sicherstellt. Ebenso reduziert sich durch das Phosphatrecycling eine Abhängigkeit von Regionen, wie Nordafrika, Naher Osten, China und den USA¹¹⁵, die das Rohphosphat abbauen.¹¹⁶

2.6 Transportlogistik

Im Rahmen einer Teilstudie wurde die bestehende Klärschlammlogistik der Zielregion analysiert mit dem Ziel Verbesserungspotenziale aufzudecken. Ziel der Studie war es einen geeigneten Standort für eine Klärschlammverwertung innerhalb der Zielregion zu finden. Zu diesem Zweck wurden unter Einbeziehung der Koordinaten und des Klärschlammfalls zwei mögliche Standorte errechnet.

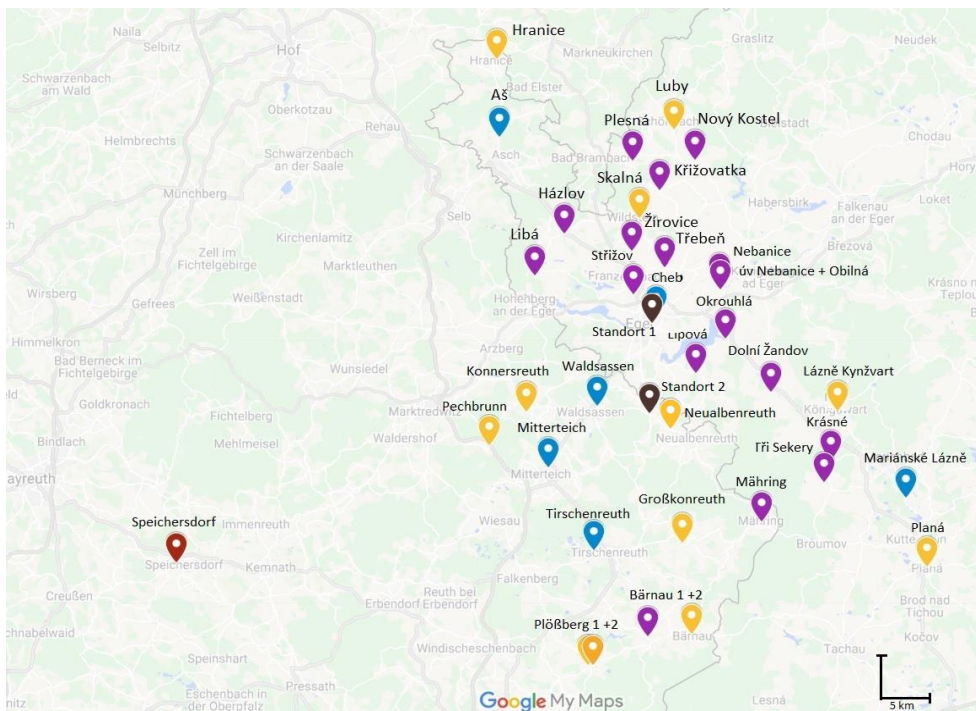


Abbildung 17 Berechnete Standorte (Kartendaten © 2019 Geo-Bais-DE/BKG (©2009)¹¹⁷

¹¹⁵ ebd. S. 521.

¹¹⁶ Bauer, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

¹¹⁷ Fuchs, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

Hier in Schwarz wurden die beiden Schwerpunkte unter den Namen Standort 1 (Schwerpunkt 1) und Standort 2 (Schwerpunkt 2) eingetragen. Standort 1 befindet sich im tschechischen Raum in der Stadt Eger nahe zum Klärwerk Cheb. Der Standort 2 (Schwerpunkt 2) liegt auf deutscher Seite nahe an der Grenze zu Tschechien und im näheren Umfeld zum Klärwerk in Neualbenreuth.

Die beiden mathematisch idealen Standorte werden anhand von unterschiedlichen Standortfaktoren miteinander verglichen. Diese Punktebewertung ist an der Methode der einfachen Punktebewertung in der Fabrikplanung angelehnt.¹¹⁸

Tabelle 25 Punktebewertung; 1 gut; 0,5 annehmbar; 0 schlecht¹¹⁹

Standortfaktoren	Standort 1	Standort 2	Gewichtung
Straßenanbindung	1	1	8
Schiienenanbindung	1	0	4
Lohnniveau	1	0,5	3
Arbeitskraft	1	0,5	5
Dienstleistungen	1	1	3
Gesetze	1	0,5	6
Fläche	0,5	1	10
Entsorgung	1	0,5	6
Geruchsbelästigung	0	1	10
Infrastruktur	1	0	6
Umbaukosten	0	1	8
Bewertung	45	50	

Diese Bewertung soll lediglich als Anhaltspunkt dienen zur Entscheidungsfindung. Die Gewichtung ist gestaffelt von 0-10, wobei 10 hier als wichtigster Punkt gilt. Die Standortfaktoren Fläche und Geruchsbelästigung wurden mit einer 10 bewertet, weil sie zum Bau mit die wichtigsten Punkte sind.¹²⁰ Rein geographisch ist der Standort 1 dem Standort 2 zu bevorzugen, aber das Problem ist, dass für die Berechnung von Standort 1 alle Klärwerke miteinbezogen wurden, auch diese, die nicht entwässern. Nicht stabilisierter Klärschlamm kann nicht in einer

¹¹⁸ H-R. Greim H. Kettner, J. Schmidt. Leitfaden der systematischen Fabrikplanung, Hanser, 2010., S. 118.

¹¹⁹ Fuchs, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

¹²⁰ H-R. Greim H. Kettner, J. Schmidt. Leitfaden der systematischen Fabrikplanung, Hanser, 2010. S. 118.

Anlage ohne weiteres entsorgt werden, deswegen müsste eine zentrale aerobe Klarschlammstabilisierung und ggf. noch eine Entwässerungsanlage zusätzlich gebaut werden oder dezentral, vor Ort, bei jedem Klarwerk nachgerüstet werden. Dieser Punkt wurde unter Umbaukosten in der Bewertung berücksichtigt. Der gewählte Schwerpunkt muss auch nicht automatisch der günstigste sein, weil nicht alle Gesichtspunkte beleuchtet werden. Zum Beispiel konnten Gründe, die gegen den Standort sprechen, sein, dass sich das Areal in einem Natur- oder Wasserschutzgebiet befindet oder das Grundstück durch den Eigentümer nicht zum Verkauf steht. Des Weiteren ist wichtig, falls als Standort das nahegelegene Klärwerk gewählt wird, ob dies genug Kapazitäten besitzt und das Areal auch groß genug ist.¹²¹

¹²¹ Fuchs, Bachelorarbeit, HAW Landshut, 2019.

3. Potenzialanalyse Düngemittel aus Sekundärphosphaten

Die im Rahmen des Projekts untersuchten Verfahren zur Klärschlammbehandlung haben als Output ein P-haltiges Klärschlammprodukt in Form von Klärschlamm, -asche oder –karbonisat. Im diesem Kapitel werden die durchgeführten Untersuchungen zur Eignung dieser Produkte als Düngemittel in der Zielregion dargestellt.

3.1 Bodenproben und Waldzustandserhebung

Zuerst wurde durch Bodenproben der Bedarf an Nährstoffen im Zielgebiet analysiert.

3.1.1 Waldzustandserhebung im Forstbezirk Přimda

Erste Boden- und Nadelproben wurden im Oktober 2017 gesammelt. Bei 21 Flächen wurden Bodenproben und bei 11 Flächen Nadelproben entnommen. Alle Nadelproben werden im selben Bestand wie die Bodenproben gesammelt oder in direkt angrenzenden Bereichen. Alle Probeflächen liegen in den drei Revieren des Forstbezirks Přimda und wurden in Kooperation mit den Förster gewählt. Bestände in diesen drei Revieren zeigen schon fast oder auch mehr als 20 Jahre verschiedene Beschädigungen, wie z. B. Vergilbung von Nadeln, Verlichtung von Baumkronen und Zeit auch Absterben von Bäumen.

Methodik Bodenproben:

Innerhalb eines Bestandes sind an (mindestens) drei Entnahmestellen jeweils Oberflächenhumus- und Mineralbodenproben entnommen worden. Aus den Einzelproben der jeweiligen Horizonte werden anschließend Mischproben hergestellt. Folgende Horizonte werden beprobt:

- organischer Auflagehorizont FH ohne frisches Streu (fermentierte und humifizierte organische Auflage);
- organisch-mineralischer Horizont A - mineralischer Oberbodenhorizont mit Akkumulation von Substanz aus dem organischen Auflagehorizont (Humusschicht). Der Horizont unterscheidet sich durch seine dunkle Farbe und ist unter den Rohhumusschichten normalerweise 1-5 cm stark;
- mineralischer Horizont B - bei den Probenahmen geht es nicht um den im Laufe der Bodengenese entstandenen Bodenhorizont, sondern um die unter dem Horizont A liegende, bis in ca. 30 cm Tiefe reichende mineralische Schicht.

Methodik Nadelproben:

Die Proben der Assimilationsorgane werden meist in Fichtenbeständen entnommen. Hierfür gibt es mehrere Gründe:

- in den Gebieten, die unter einem Mangel an basischen Nährstoffen leiden, wird die Baumartenzusammensetzung in der Regel voll und ganz von Fichten dominiert;
- bei der Fichte sind die Grenzwerte der Nährstoffgehalte in den Nadeln gut bekannt und wurden hinreichend überprüft;
- von den immergrünen Nadelbäumen können Nadeln auch im Spätherbst entnommen werden, während die für die Blattentnahme geeignete Zeit bei den Bäumen, die ihre Blätter verlieren, relativ kurz ist.

Die Entnahme der Nadelproben erfolgt üblicherweise an denselben Stellen wie die Bodenprobennahme, oder aber in deren Nähe. Bevorzugt werden dabei Bestände der mittleren Altersklasse und Jungwüchse, da die Baumkronen hier leichter zu erreichen sind als in ausgewachsenen Beständen. Die Zweige werden aus dem oberen, besonnten Teil der Krone, möglichst aus dem vierten bis sechsten Wirtel, entnommen. Für die chemische Analyse werden Mischproben erstellt, und zwar vom ersten (jüngsten) und vom zweiten Nadeljahrgang. Für jede Probe müssen Zweige von mindestens fünf Bäumen aus Beständen der mittleren Altersklasse oder von zehn Bäumen aus Jungwüchsen entnommen werden.

Analyse:

Die entnommenen Proben werden in den Labors des VÚLHM analysiert. In den Bodenproben wird die Bodenreaktion (pH-Wert in Wasser oder in 1 molarer KCl-Lösung) sowie mittels Elementaranalyse die Gesamtgehalte an Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel bestimmt.

Die Gehalte der verfügbaren Elemente werden beim VÚLHM in Ammoniumchlorid-Auszügen und die Gesamtgehalte der Elemente in Königswasser-Auszügen mit anschließender spektralphotometrischer Bestimmung in einem ICP-OES-Gerät festgestellt.

Die in den Nadeln enthaltenen Nährstoffe werden analysiert, indem die Nadeln in einem Mikrowellenofen mineralisiert und die Nährstoffgehalte anschließend mittels ICP-OES spektralphotometrisch bestimmt werden.

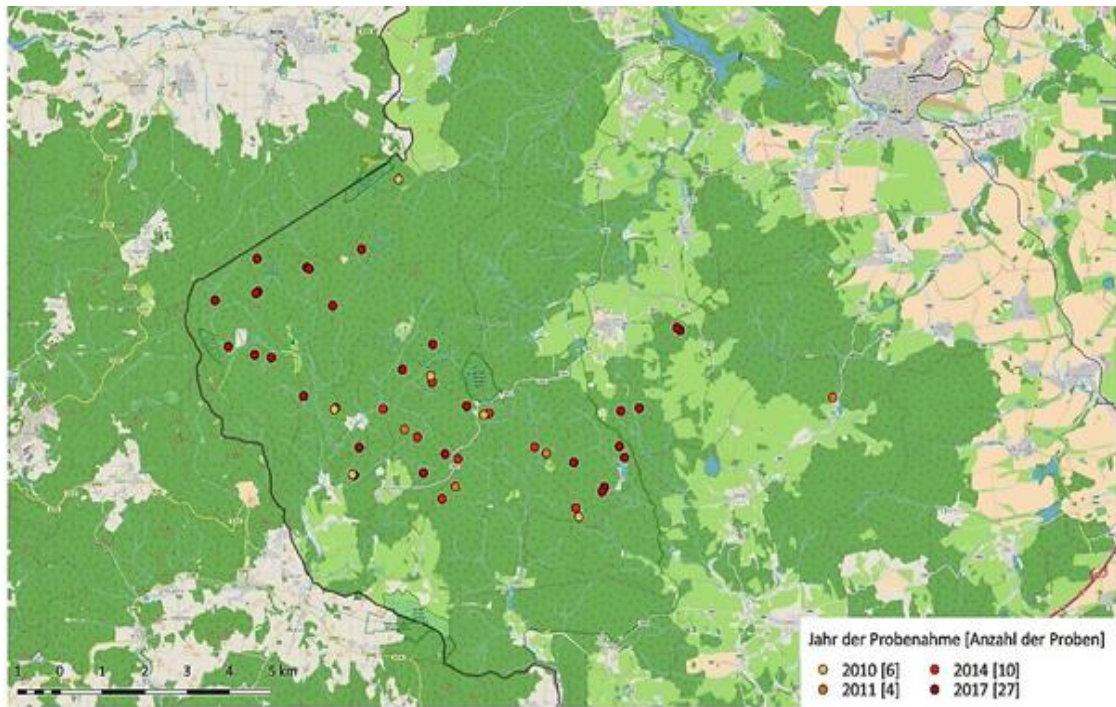


Abbildung 18 Bodenproben im Forstbezirk Pímda während 2010-2017

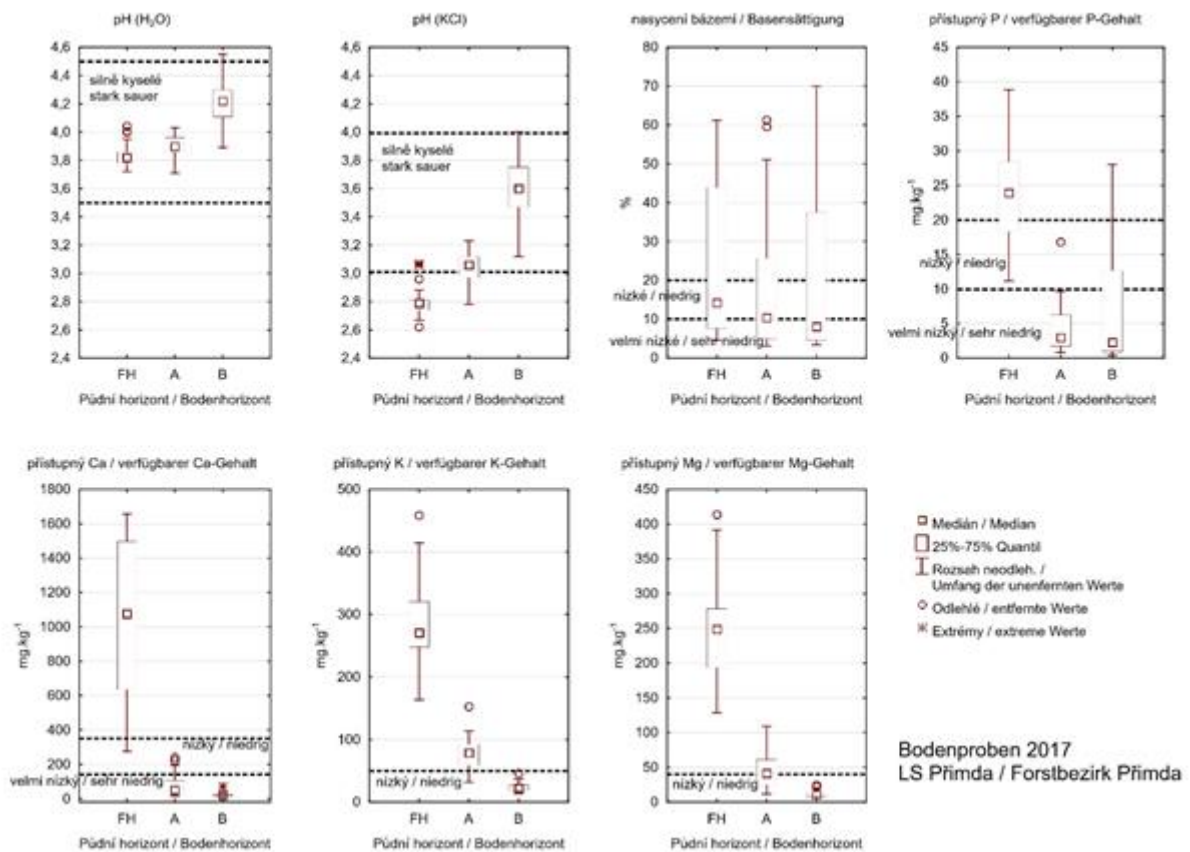


Abbildung 19 Bodenreaktion und verfügbarer Nährstoffgehalt in den Bodenproben des Jahres 2017

Der Boden ist stark sauer (pHKCl < 4) oder sehr stark sauer (pHKCl < 3) und speziell im Mineralboden (Schicht A und B bis zur 30 cm Tiefe) ist ein Mangel oder starker Mangel an Hauptnährstoffen (P, Ca, K, Mg). Nährstoffmangel heißt dann, niedrige oder sehr niedrige Basensättigung von basischen Nährstoffen. In der Humusschicht ist der Nährstoffgehalt besser, aufgrund der Blätter und Nadeln, die auf Boden fallen.

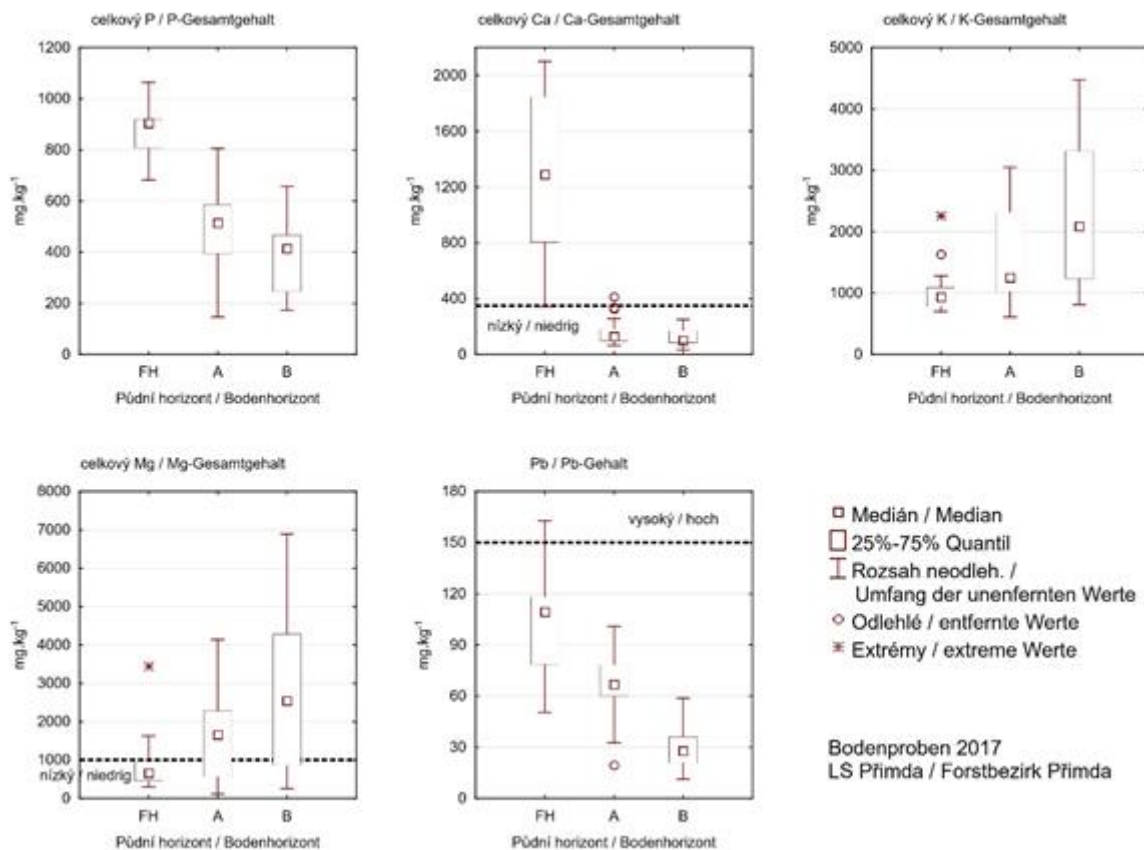


Abbildung 20 Nährstoffgehalt in Königswasser-Auszügen in den Bodenproben des Jahres 2017

Die im Königswasserextrakt bestimmte Gesamtnährstoffkonzentration zeigt einen Kalziummangel und teilweise auch Magnesium- und Phosphormangel. Kalzium und Magnesium werden normalerweise im Boden verwendet, um saure Substanzen zu neutralisieren, die mit den Niederschlägen in den Boden gelangen. Bei längerer saurer Belastung können diese wichtigen Elemente im Boden fehlen. Die erhöhte Bleikonzentration bestätigt die historische Belastung der Region. Die Quelle der Bleiverbindungen kann sowohl durch den Transport als auch durch die Industrie entstanden sein.

Forstbezirk Pfmida / LS Pfmida (Proben / Vzorky 2017)

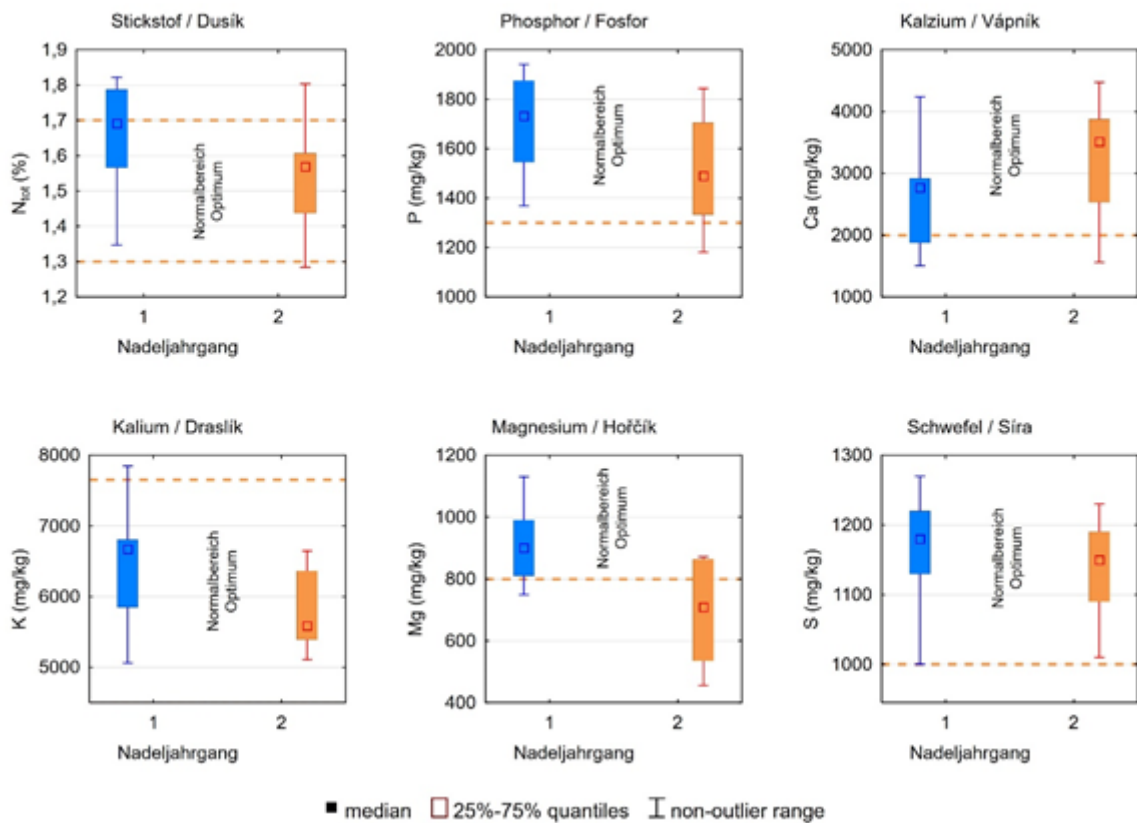


Abbildung 21 Nährstoffgehalt in Fichtennadeln im Jahr 2017 gesammelt (Nadeljahrgang 1: jüngste Nadeln eines Triebes, NJ. 2: Nadeln des Vorjahres)

Der Nährstoffmangel im Boden spiegelt sich auch im Nährstoffgehalt in den Fichtennadeln wider. Der Boden hat hauptsächlich einen Mangel an Kalzium und auch an Phosphor und Magnesium. Das gleiche gilt für Fichtennadeln – die Nährstoffkonzentration sinkt in den Defizitbereich bei Phosphor und Magnesium (2. Nadeljahrgang) und bei Kalzium (beide analysierte Nadeljahrgänge).

Der Mangel an Kalium und Stickstoff ist eine Ausnahme und die Schwefelkonzentrationen können als normal / optimal eingestuft werden.

Bodenproben zeigen, dass die Situation nicht gut ist – Waldboden ist stark sauer, arm an Basen (Ca, Mg, K), arm an Phosphor. Nährstoffe fehlen im Mineralboden, wo die Bäume wurzeln und Nadelproben dann zeigen, dass Phosphor, Kalzium und Magnesium nicht immer im Optimum sind.

3.1.2 Waldzustandserhebung im Oberpfälzer Wald

Boden- und Nadelproben wurden im Oktober 2018 gesammelt. Bei 24 Flächen wurden Bodenproben und bei 12 Flächen Nadelproben entnommen. Alle Nadelproben werden im selben Bestand wie die Bodenproben gesammelt oder in direkt angrenzenden Bereichen.

Boden ist stark sauer ($\text{pH}_{\text{KCl}} < 4$) oder sehr stark sauer ($\text{pH}_{\text{KCl}} < 3$) und speziell im Mineralboden (Schicht A und B bis zur 30 cm Tiefe) ist ein Mangel oder starker Mangel an Hauptnährstoffen (P, Ca, K, Mg). Das heißt dieselbe oder sehr ähnliche Situation wie auf tschechischer Seite der Grenze oder wie z. B. bei pH ist die Situation schlimmer als in Tschechien (siehe Abb. 52). Nährstoffmangel heißt dann, niedrige oder sehr niedrige Basensättigung von basischen Nährstoffen. In der Humusschicht ist der Nährstoffgehalt besser, aufgrund der Blätter und Nadeln, die auf Boden fallen.

Die im Königswasserextrakt bestimmte Gesamtnährstoffkonzentration zeigt einen Kalziummangel im Mineralboden und teilweise auch Magnesium- und Phosphormangel. Kalzium und Magnesium werden normalerweise im Boden verwendet, um saure Substanzen zu neutralisieren, die mit den Niederschlägen in den Boden gelangen. Bei längerer saurer Belastung können diese wichtigen Elemente im Boden fehlen.

Die erhöhte Bleikonzentration ($> 150 \text{ mg Pb/kg}$) bestätigt die historische Belastung der Region. Die Quelle der Bleiverbindungen kann sowohl durch den Transport als auch durch die Industrie entstanden sein.

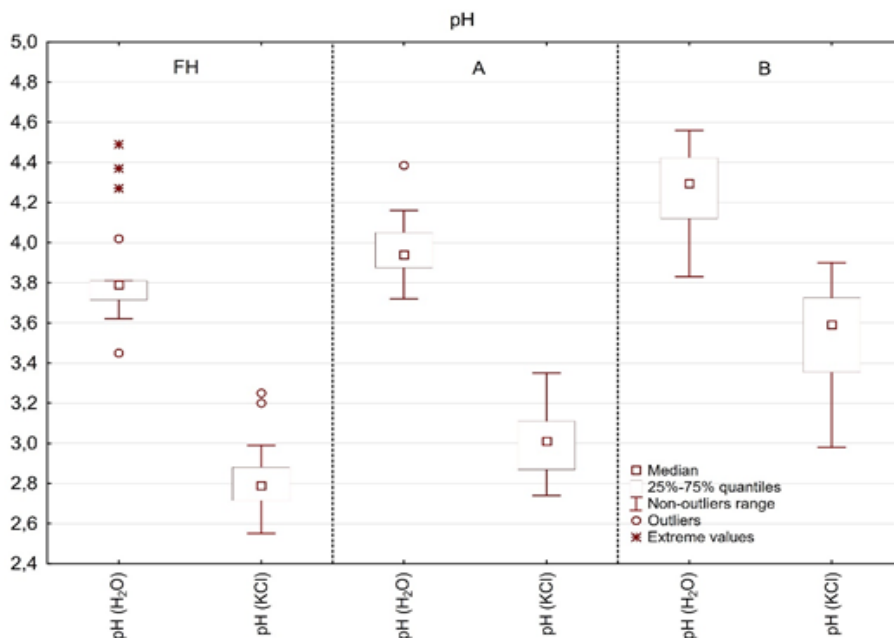


Abbildung 22 pH-Wert

pH_{KCl} unter dem Wert 3 heißt sehr stark sauer Boden! Die Situation ist teilweise noch schlimmer als auf der tschechischen Seite.

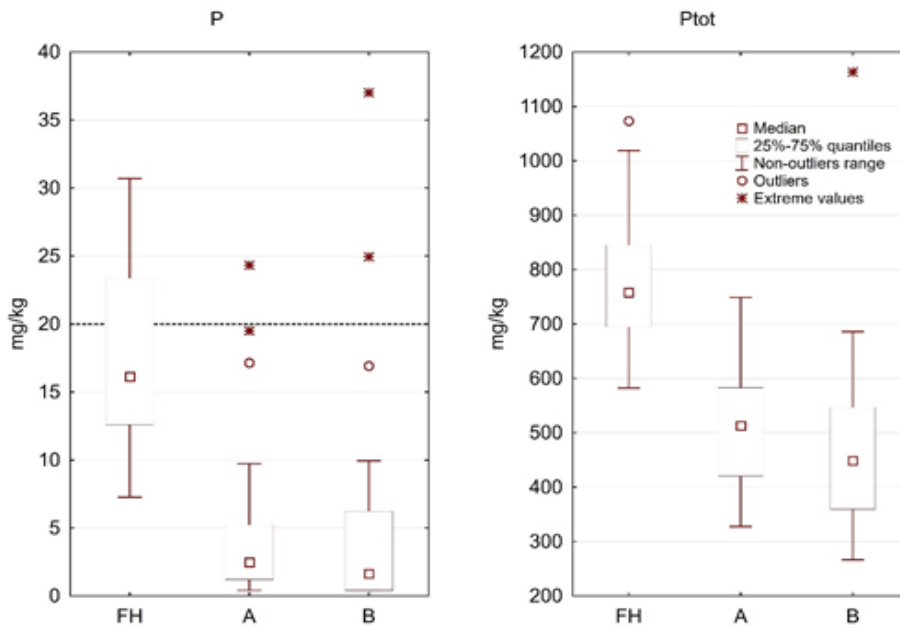


Abbildung 23 Phosphor

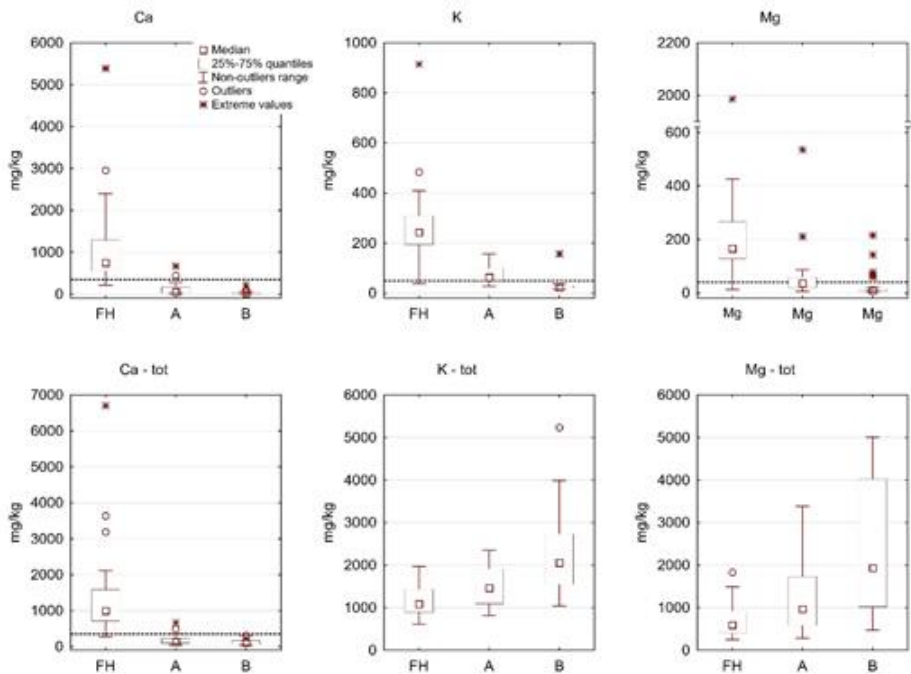


Abbildung 24 Nährstoffe

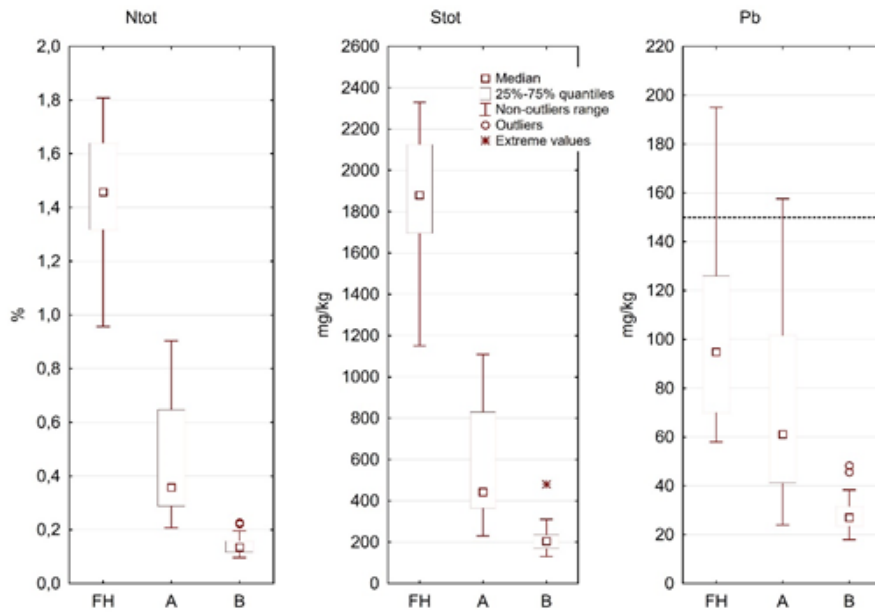


Abbildung 25 Nährstoffe

3.1.3 Bodenproben auf landwirtschaftlichen Flächen

Für diese Versuche wurden zwei Felder auf der CZ-DE Grenze ausgewählt. Beide wurden im Frühjahr 2019 (10. – 11. 4. 2019) beprobt. Die Ergebnisse der Analysen wurden dem Landwirt mitgeteilt.



Abbildung 26 Landwirtschaftliche Feldversuche

Tabelle 26 Ergebnisse der Bodenproben landwirtschaftliche Fläche

Proben- nummer	Proben- kennzeich- nung	Trocken- masse % des Gewichts	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	C _{tot} mg/100 mg Trocken- masse	N _{tot} mg/100 mg Trocken- masse	S _{tot} mg/kg Trocken- masse	P _{verfügbar.} mg/kg Trocken- masse	Al mg/kg Trocken- masse	BaCl ₂ -Lösung						aqua regia Lösung			
										Ca mg/kg Trocken- masse	Fe mg/kg Trocken- masse	K mg/kg Trocken- masse	Mg mg/kg Trocken- masse	Mn mg/kg Trocken- masse	Na mg/kg Trocken- masse	Ca mg/kg Trocken- masse	K mg/kg Trocken- masse	Mg mg/kg Trocken- masse	P _{gesamt} mg/kg Trocken- masse
18600	HR 101	98,26	7,78	6,80	1,30	0,129	180	39,3	<45,2	1561	<1,29	89,3	314	0,878	8,55	3159	1963	1805	606
18601	HR 102	98,43	7,82	6,91	1,82	0,168	250	107	<45,2	1726	<1,29	124	344	0,893	8,48	4418	1933	2133	838
18602	HR 103	98,31	7,71	6,75	1,83	0,165	260	90,8	<45,2	1638	1,43	97,1	443	1,35	9,08	3773	2085	2102	884
18603	HR 104	97,60	7,77	6,77	2,23	0,210	290	47,3	<45,2	2040	1,82	157	516	1,09	9,62	4650	2671	2651	921
18604	HR 105	97,98	7,37	6,38	1,78	0,166	270	70,8	<45,2	1602	<1,29	145	410	2,48	8,50	3230	2340	2229	724
18605	HR 106	97,56	7,59	6,54	2,34	0,213	300	39,1	<45,2	2279	1,47	96,6	506	1,13	12,0	4243	2570	2690	792
18606	HR 107	98,04	7,67	6,69	1,85	0,177	310	46,2	<45,2	2013	<1,29	99,4	412	1,07	11,2	3958	2495	2722	913
18607	HR 108	97,92	7,52	6,52	2,39	0,228	360	79,8	<45,2	2189	1,90	197	457	2,22	13,8	3907	2655	2383	943
18608	HR 109	97,72	7,68	6,68	1,90	0,185	280	64,9	<45,2	2314	3,54	76,6	451	1,26	9,48	4617	2252	2517	904
18609	HR 110	97,75	7,77	6,68	1,67	0,155	240	44,8	<45,2	1973	3,17	103	505	1,18	8,77	3822	2901	2534	690
18610	HR 111	97,93	7,27	6,20	1,64	0,153	250	57,0	<45,2	1795	2,90	100	525	2,47	8,58	3121	2362	2327	762
18611	HR 112	97,50	7,44	6,45	2,47	0,227	330	92,5	<45,2	2200	2,81	157	559	1,63	7,36	3848	2692	2220	1003
18612	HR 113	97,85	7,63	6,60	1,82	0,174	250	65,1	<45,2	1920	3,10	126	412	1,54	7,94	3317	1993	1931	755
18613	HR 114	97,98	7,63	6,67	1,93	0,185	260	80,7	<45,2	1762	2,74	121	423	1,24	6,59	3607	2136	2149	797
18614	HR 115	98,07	7,62	6,58	1,59	0,160	210	37,0	<45,2	1831	2,55	142	259	1,70	6,90	3163	2175	1789	599
18615	HR 116	97,34	7,51	6,46	2,10	0,200	260	21,4	<45,2	1925	3,10	142	415	1,70	7,51	2787	2372	1889	662
18616	HR 117	97,75	7,64	6,63	2,01	0,190	260	28,0	<45,2	2122	2,79	166	332	1,79	10,1	3161	2507	1737	771
18617	HR 118	97,38	7,51	6,42	1,97	0,189	270	19,7	<45,2	2113	2,71	133	406	2,61	10,2	3104	2540	2098	712
18618	HR 119	98,05	7,54	6,44	1,64	0,156	240	29,4	<45,2	1810	2,72	80	310	1,75	7,36	3000	1706	2106	598
18619	HR 120	97,90	7,62	6,60	1,90	0,174	270	29,5	<45,2	1850	2,42	180	321	3,14	8,40	3431	1996	2165	694
18620	HR 121	97,89	7,35	6,22	1,51	0,154	200	16,4	<45,2	1879	2,27	105	307	2,68	9,04	2523	2680	2022	613
18621	HR 122	97,78	7,33	6,30	1,93	0,178	280	32,0	<45,2	1697	2,63	74,9	369	2,86	10,2	2533	1781	1818	758
18622	HR 123	97,91	7,41	6,35	1,81	0,183	270	33,2	<45,2	1755	3,30	90,9	328	2,48	9,87	2990	2103	2048	744
18623	HR 124	98,11	7,56	6,41	1,43	0,149	210	20,5	<45,2	1621	3,02	67,4	326	1,77	10,3	2845	2307	2096	634

18624	HR 125	98,14	7,19	6,12	1,69	0,173	220	25,5	<45,2	1607	3,63	68,5	344	3,38	10,4	2500	2302	2140	698
18625	HR 126	98,29	7,40	6,27	1,52	0,158	200	28,6	<45,2	1588	3,89	101	363	2,68	8,91	2565	2689	2527	651
18626	HR 127	98,16	7,56	6,46	1,48	0,156	230	26,5	<45,2	1713	4,12	112	351	2,25	9,12	2813	2455	2487	595
18627	HR 128	98,32	7,62	6,57	1,70	0,189	260	28,2	<45,2	1927	3,84	108	311	1,60	9,36	3401	2197	2241	643
18628	HR 129	98,06	7,32	6,21	1,54	0,165	230	34,1	<45,2	1614	3,30	88,7	358	2,87	9,37	2519	2755	2330	639
18629	HR 130	98,00	7,49	6,41	1,67	0,172	240	32,8	<45,2	1748	3,25	100	375	2,18	9,69	2670	2141	2228	649
18630	HR 131	98,44	6,96	5,80	1,80	0,185	230	23,6	<45,2	1540	3,29	100	290	5,46	10,6	2191	2256	2037	574
18631	HR 201	97,99	7,22	6,17	1,85	0,192	260	50,4	<45,2	1823	3,15	147	341	4,47	6,67	2657	2434	2202	900
18632	HR 202	98,27	7,28	6,19	1,68	0,175	240	77,0	<45,2	1734	3,04	146	323	3,43	6,37	2643	2390	2415	890
18633	HR 203	98,09	7,06	6,06	2,10	0,215	250	67,5	<45,2	1627	1,77	165	377	3,78	8,29	2719	2523	2565	827
18634	HR 204	98,19	7,25	6,17	1,59	0,168	220	63,3	<45,2	1699	2,15	170	346	3,21	8,69	2933	3186	2940	800
18635	HR 205	98,70	7,15	6,03	1,54	0,162	200	57,9	<45,2	1548	2,41	111	311	3,51	7,45	2539	1933	2340	723
18636	HR 206	98,75	7,07	5,98	1,92	0,200	240	99,8	<45,2	1517	1,88	263	331	3,73	7,67	2590	2406	2512	882
18637	HR 207	98,39	7,31	6,24	1,73	0,180	240	74,6	<45,2	1743	2,30	148	381	3,19	10,5	2960	2780	2868	834
18638	HR 208	98,75	7,02	6,01	1,94	0,192	240	73,4	<45,2	1526	2,15	136	326	4,50	10,3	2525	2402	2375	785
18639	HR 209	98,85	7,35	6,28	1,64	0,175	230	93,4	<45,2	1741	2,38	199	381	3,12	8,61	2901	2998	2696	871
18640	HR 210	98,44	7,35	6,27	1,80	0,186	240	79,7	<45,2	1818	2,34	163	375	3,81	9,94	2831	2702	2075	864
18641	HR 211	98,61	7,40	6,39	1,94	0,194	260	78,2	<45,2	1867	2,52	172	374	2,54	9,89	3161	2524	2413	913
18642	HR 212	98,64	7,32	6,22	1,68	0,178	240	83,9	<45,2	1811	3,46	183	352	3,12	10,2	2814	2907	2681	899
18643	HR 213	98,75	6,89	5,81	1,75	0,179	220	54,2	<45,2	1331	2,83	202	282	5,71	7,85	2211	2262	2260	754
18644	HR 214	98,84	7,13	6,09	1,77	0,189	230	116	<45,2	1467	3,06	227	292	3,88	6,88	2211	2081	2944	871
18645	HR 215	99,01	7,08	6,07	1,71	0,189	220	149	<45,2	1258	3,19	252	277	2,76	6,37	2068	1832	3125	982
18646	HR 216	98,82	6,93	5,90	2,13	0,229	280	152	<45,2	1553	2,74	200	327	4,62	5,70	2467	2093	3035	1112
18647	HR 217	98,90	7,01	6,02	1,92	0,202	230	143	<45,2	1500	3,11	234	310	5,12	5,93	2387	2470	2289	1040
18648	HR 218	98,93	7,13	6,15	1,83	0,195	240	171	<45,2	1644	3,12	167	313	2,84	6,32	2539	2030	2195	1179
18649	HR 219	98,57	7,19	6,13	2,08	0,206	250	112	<45,2	1797	3,72	244	340	4,16	7,89	2772	2794	2172	1063
18650	HR 220	98,74	6,96	5,93	1,97	0,207	250	60,5	<45,2	1364	3,64	322	295	6,37	6,66	2144	2714	2298	857

3.2 Pflanzversuche mit Klärschlammprodukten

Um die Pflanzenverfügbarkeit von P aus Klärschlammprodukten zu bewerten, wurden diese in unterschiedlichen Pflanzversuchen analysiert.

3.2.1 Feldversuche mit Klärschlammasche-Düngemittel

Das Forschungsinstitut Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i. (VÚLHM) aus Tschechien hat im Projektzeitraum verschiedene Feldversuche mit Klärschlammaschen durchgeführt, um die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe wie Phosphor zu erproben. Nachfolgende wird daher kurz das Vorgehen in den unterschiedlichen Bereichen skizziert.

3.2.1.1 Feldversuche in den tschechischen Wäldern

Methodik

In den ausgewählten Waldbeständen wurden Versuchs- und Kontrollfläche markiert, die mit Holzpflöcken in roter und oranger Farbe abgesteckt worden sind. Die Versuchsflächen können dabei die Form von Vierecken (Quadrat) oder Rechteck haben. In jeder dieser Versuchsfläche sollen mindestens 30, besser aber bis zu 50 (100) Jungpflanzen stehen. Dies ist wichtig, da man mindestens 30 Pflanzen zur statistischen Auswertung benötigt. Daher ist es gut, zwei oder drei Versuchsflächen vorzubereiten. Deshalb sollten drei Versuchsflächen mit 30-50 Jungpflanzen und dazu eine Kontrollfläche mit rund 50 Pflanzen ausgewählt werden oder zwei Kontrollflächen mit 30-50 Jungpflanzen. Dies ist nicht nur aus statistischen Gründen wichtig, sondern auch, da die Bäume auch vom Wild geäst werden können, durch Dürre beschädigt sein können o.ä.. Grundsätzlich wird also angenommen ist anzunehmen, dass die Anzahl der Pflanzen während des Jahres sinkt.

Die Düngung sollte im Frühling, nachdem der Schnee getaut und das Baumwachstum begonnen hat (April – Mai) oder im Herbst, nachdem das Wachstum schon beendet ist (September, Oktober), realisiert werden. Die Dosis der Düngung ist vom Nährstoffgehalt im Düngemittel abhängig, dabei wird dann das Düngemittel gleichmäßig um die Jungpflanze gestreut.

Die Boden- und Nadelproben wurden vor der Düngung und dann am Ende der Vegetationsperiode (Herbst) bzw. im Frühjahr/Herbst vor der nächsten Saison gesammelt. Sowohl Kontroll- als auch Versuchsflächen wurden beprobt und der Unterschied zwischen dem Elementengehalt in den gedüngten und Kontrollpflanzen ausgewertet. Weiterhin konnten auch die Pflanzenhöhen gemessen und Unterschiede ausgewertet werden.

Erste Boden- und Nadelproben wurden im Oktober 2017 gesammelt. Bei 21 Flächen wurden Bodenproben und bei 11 Flächen Nadelproben entnommen. Alle Nadelproben werden im selben Bestand wie die Bodenproben gesammelt oder in direkt angrenzenden Bereichen.

Innerhalb eines Bestandes sind an (mindestens) drei Entnahmestellen jeweils Oberflächenhumus- und Mineralbodenproben entnommen worden. Aus den Einzelproben der jeweiligen Horizonte werden anschließend Mischproben hergestellt. Folgende Horizonte werden beprobt:

- organischer Auflagehorizont FH ohne frisches Streu (fermentierte und humifizierte organische Auflage);
- organisch-mineralischer Horizont A - mineralischer Oberbodenhorizont mit Akkumulation von Substanz aus dem organischen Auflagehorizont (Humusschicht). Der Horizont unterscheidet sich durch seine dunkle Farbe und ist unter den Rohhumusschichten normalerweise 1-5 cm stark;

mineralischer Horizont B - bei den Probenahmen geht es nicht um den im Laufe der Bodengenese entstandenen Bodenhorizont, sondern um die unter dem Horizont A liegende, bis in ca. 30 cm Tiefe reichende mineralische Schicht.

Die Proben der Assimilationsorgane werden meist in Fichtenbeständen entnommen. Hierfür gibt es mehrere Gründe:

- in den Gebieten, die unter einem Mangel an basischen Nährstoffen leiden, wird die Baumartenzusammensetzung in der Regel voll und ganz von Fichten dominiert;
- bei der Fichte sind die Grenzwerte der Nährstoffgehalte in den Nadeln gut bekannt und wurden hinreichend überprüft;
- von den immergrünen Nadelbäumen können Nadeln auch im Spätherbst entnommen werden, während die für die Blattentnahme geeignete Zeit bei den Bäumen, die ihre Blätter verlieren, relativ kurz ist.

Die Entnahme der Nadelproben erfolgt üblicherweise an denselben Stellen wie die Bodenprobennahme, oder aber in deren Nähe. Bevorzugt werden dabei Bestände der mittleren Altersklasse und Jungwüchse, da die Baumkronen hier leichter zu erreichen sind als in ausgewachsenen Beständen. Die Zweige werden aus dem oberen, besonnten Teil der Krone, möglichst aus dem vierten bis sechsten Wirtel, entnommen. Für die chemische Analyse werden Mischproben erstellt, und zwar vom ersten (jüngsten) und vom zweiten Nadeljahrgang. Für jede

Probe müssen Zweige von mindestens fünf Bäumen aus Beständen der mittleren Altersklasse oder von zehn Bäumen aus Jungwüchsen entnommen werden.

Die entnommenen Proben werden in den Labors des VÚLHM analysiert. In den Bodenproben wird die Bodenreaktion (pH-Wert in Wasser oder in 1 molarer KCl-Lösung) sowie mittels Elementaranalyse die Gesamtgehalte an Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel bestimmt.

Die Gehalte der verfügbaren Elemente werden beim VÚLHM in Ammoniumchlorid-Auszügen und die Gesamtgehalte der Elemente in Königswasser-Auszügen mit anschließender spektralphotometrischer Bestimmung in einem ICP-OES-Gerät festgestellt.

Die in den Nadeln enthaltenen Nährstoffe werden analysiert, indem die Nadeln in einem Mikrowellenofen mineralisiert und die Nährstoffgehalte anschließend mittels ICP-OES spektralphotometrisch bestimmt werden.

Für Feldversuch wurden zwei Waldbestände/Lokalität in der Kooperation mit Forstverwaltung (Forstbezirk Přimda) gewählt. Versuchsfläche wurden gegründet, wie oben geschrieben ist, immer Variante „PYREG“, SynGas“ und Kontroll“, auf jede Lokalität wurden sowohl Fichte als auch Buche gedüngt. Das heißt zusammen zwölf Flächen. Die Dosis war 40-50 g/Pflanze und Düngung wurde mit speziellen Rückenapplikator gemacht. Vor der Düngung wurden Bodenproben entnommen, zusammen 16 Proben.



Abbildung 27 Markierte Fläche mit Fichtenanpflanzung



Abbildung 28 Gedüngte Buche und Fichte

3.2.1.2 Versuche in Baumschule

In der Baumschule werden ebenfalls Versuchs- und Kontrollflächen gewählt und markiert (vgl. 5.1). Jetzt kann man das Düngemittel entweder vor der Anpflanzung in den Boden einarbeiten oder während der Vegetationsperiode auf den Boden streuen, um die Bäume zu düngen. Eine berechnete Dosis Klärschlammmasche wird dabei gleichmäßig auf die ganze Versuchsfläche gestreut. Die Boden- und Nadelproben sollten vor der Düngung und am Ende der Vegetationsperiode (Herbst) oder im Frühjahr/Herbst vor der nächsten Saison gesammelt werden. Auch werden die Kontroll- sowie Versuchsflächen beprobt und der Unterschied zwischen den Nährstoffgehalt in den gedüngten und Kontrollpflanzen ausgewertet. Weiterhin kann in der Versuchs- und Kontrollfläche auch die Pflanzenhöhe gemessen und dann die Unterschiede ausgewertet werden.

Diese Versuche sind mit eine Baumschule in der Nähe von Tachov (Tachau) verabredet, aber es gibt zu wenig KS-Produkte für die Realisation. Das könnte noch im Jahr 2020 realisieren. Diese Informationen können auch interessant/wichtig sein.

3.2.1.3 Topfversuche

Für nicht zertifizierte oder nicht zugelassene Düngemittel kann man Topfversuche realisieren. Deshalb haben wir Topfversuche mit Fichten und Buchen geplant und dort mit Klärschlammasche aus Vergasung (Kopf SynGas) und einem Pyrolyse Karbonisat (Pyreg) gedüngt. Dies haben wir bei etwa 30, mit zwei Wiederholungen gedüngt. Jedes Düngemittel wurde zweimal für die Düngung verwendet.

Die Boden- und Nadelproben sollten vor der Düngung und am Ende der Vegetationsperiode (Herbst) oder im Frühjahr/Herbst vor der nächsten Saison gesammelt werden. Auch werden die Kontroll- sowie Versuchsflächen beprobt und der Unterschied zwischen den Nährstoffgehalt in den gedüngten und Kontrollpflanzen ausgewertet. Weiterhin kann in der Versuchs- und Kontrollfläche auch die Pflanzenhöhe gemessen und dann die Unterschiede ausgewertet werden.

Topfversuch wurde im Juli 2019 realisiert. Wir haben folgende Variante vorbereitet: Fichte gedüngt und ungedüngt, Buche gedüngt und ungedüngt (ca 50cm hoch), Buche gedüngt und ungedüngt (Pflänzlinge).

Wir haben rechtzeitig nur ein KS-Produkt bekommen (von PYREG), das zweite (von Kopf SynGas) erst im November kamm und konnte nicht benutzt werden. Man wurde Jungpflanzen von Arten Rotbuche und Gemeine Fichte benutzt, die Dosis war ca 50 g/Pflanze. Während Sommerr wurden Jungpflanzen regelmäßig gegossen. Im Herbst (November) wurden Bodenproben entnommen, getrennt Kontroll- und Gedüngtpflanzen (zusammen 6 Bodenproben + KS-Asche Kopf SynGas). Proben sind jetzt (Dezember) im Labor. Bodenproben wurden auch gleich vor der Düngung entnommen (9 Bodenproben + KS-Karbonisat PYREG) und die Ergebnisse werden später vergleichen und auswerten.



Abbildung 29 Topfversuch Buchenpflanzen



Abbildung 30 Topfversuch Fichtenpflanzen



Abbildung 31 Topfversuch – Buchenpflanzen (kleine Pflänzlinge)

3.2.1.4 Feldversuche auf landwirtschaftlichen Flächen

Die Durchführung von Feldversuchen auf landwirtschaftlichen Flächen gestaltet sich aus unterschiedlichen Gründen schwierig. Zunächst konnte in der Projektzielregion kein Landwirt gefunden werden, der seine Flächen zur Verfügung gestellt hätte. Als man dann einen Landwirt gefunden hatte, konnte nicht genug Klärschlammasche zur Düngung bereitgestellt werden, weshalb die Felder nur vor einer Düngung genauer beprobt und untersucht worden sind.

3.3 Pflanzenverfügbarkeit von P-Rezyklaten

Im Rahmen des Projekts wurde eine Studie zum Thema Pflanzenverfügbarkeit von Phosphaten aus der P-Rückgewinnung durchgeführt. Das primäre Ziel dieser Studie bestand darin einen allgemeinen Überblick über die Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirksamkeit von unterschiedlichen Recyclingprodukten aus Phosphorrückgewinnungsverfahren, die im Klärschlamm, im Schlammwasser oder in der Klärschlammasche ansetzen zu liefern. Diese Erkenntnisse sind einerseits von Bedeutung, um Phosphorrückgewinnungsverfahren zu identifizieren, die verwertbare Produkte für die Landwirtschaft produzieren und sie andererseits in ein Konzept für die Klärschlammverwertung im Zielgebiet des Forschungsprojekts greenIKK einfließen zu lassen. Die Studie wird hier in Teilen wiedergegeben. Es wurden die folgenden Produktgruppen untersucht:

- Magnesiumammoniumphosphate/Struvit und Magnesiumphosphat
- Calciumphosphate
- Ascheprodukte und Karbonisate

Insgesamt stellen sich die MAP-Produkte als die wirksamsten Recyclingprodukte heraus, da diese Rezyklate in allen Versuchen im Vergleich zu den Referenzdüngern wie TSP und den weiteren Rezyklaten auf ähnlichem Niveau liegen oder auch teilweise besser abschneiden. Jedoch weisen auch Calciumphosphate zum Teil hohe Düngewirksamkeiten auf. Vor allem die P-RoC®-Produkte sind bei sauren Bedingungen nach den hier ausgewerteten Daten vielversprechend. Zu den weiteren CaPs liegen nicht genügend Daten für ein abschließendes Fazit vor. Die thermisch behandelten Produkte zeigen verschiedene Wirksamkeiten. Die besten Ergebnisse bewirken zum einen die mit Na₂CO₃ behandelten Produkte aus dem AshDec®-Verfahren, die je nach Versuch mit TSP oder CaP vergleichbar sind. Zum anderen der Dünger des Seraplant®-Verfahrens, der bei dem vorliegenden Ergebnis zur Phosphoraufnahme von Zierpflanzen etwas über dem Niveau der CaP-Referenz liegt. Das PYREG®- und das Mephrec®-Rezyklat sind nach den analysierten Daten nicht mit konventionellen Düngemitteln zu vergleichen, obwohl das Mephrec®-Produkt teilweise gute Ergebnisse auf neutralem Boden zeigt.

Wie auch in der Literatur¹²² festgestellt wird, wo verschiedene Versuchsergebnisse zur Düngewirksamkeit von Phosphor-Rezyklaten dokumentiert werden, wird auch hier empfohlen, dass künftig weitere Pflanzenversuche zu den unterschiedlichen Rezyklaten unter variierenden Boden-pH-Werten stattfinden sollten, um weitere Erkenntnisse zur Pflanzenverfügbarkeit von Sekundärphosphatprodukten zu sammeln.

Die Kommunen im Zielgebiet des Forschungsprojekts greenIKK sollten bei einem etwaigen Entscheidungsprozess für oder gegen bestimmte Phosphorrückgewinnungsverfahren neben Weiterem auch die Pflanzenverfügbarkeit der jeweils produzierten Produkte im Blick haben, wenn sie in der Landwirtschaft eingesetzt werden sollen. Die Studie kann bei der Entscheidung unterschützen, da hier eine Einordnung einiger Recyclingprodukte bezüglich ihrer Wirkung auf Pflanzen erfolgt. Allerdings sollten zukünftig wenn möglich weitere Vergleichsdaten hinzugezogen werden, um sie bei Bedarf für die Verfahrensauswahl zu verwenden oder auch generell bei der Ausarbeitung des nach der AbfklärV bis 31.12.2023 zu erstellenden Klärschlammverwertungskonzepts. Insbesondere ist dies bei Produkten sinnvoll, zu denen in diesem Bericht weniger Daten zur Verfügung stehen. Im Speziellen handelt es sich dabei um mehrere CaPs, unbehandelte Klärschlammaschen sowie um die Produkte aus dem RecoPhos und dem PYREG®-Verfahren.

In der Studie werden unterschiedliche Produkte des Phosphorrecyclings allein unter dem Blickwinkel der Düngewirksamkeit und Pflanzenverfügbarkeit betrachtet, jedoch müssen sie weiteren Anforderungen entsprechen, wenn sie vermarktet und in der Landwirtschaft eingesetzt werden sollen.

So sind beispielsweise Schadstoffgehalte und die Konformität mit allen weiteren gesetzlichen Regelungen von Bedeutung, auf die in diesem Bericht in einigen Punkten eingegangen wird. Zudem sollte das Ausbringen der Recyclingdünger auf die Felder möglichst mit konventionellem Equipment möglich sein und sich die Produktkosten für Rezyklate auf geringerem Niveau befinden als bei altbewährten klassischen Düngemitteln, um sie im bestehenden Markt eingliedern zu können¹²³.

¹²² DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 (2018) Phosphor: Von der Rückgewinnung zum Recycling. Dritter Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 65(8):S. 710–717.

¹²³ ebd.

4. Interkommunale Zusammenarbeit

Die Gründung eines Europäischen Verbund für territoriale Zusammenarbeit (EVTZ) wurde als Ziel im Projekt „greenIKK“ ausgegeben. Grundsätzlich erfüllen die Projektpartner alle rechtlichen Anforderungen, um einen EVTZ in der Grenzregion Deutschland / Tschechien zu implementieren. Allerdings, wie nachfolgend aufgezeigt wird, ist dies nicht ganz einfach und unproblematisch. Weiterhin werden auch noch weitere Möglichkeiten erläutert, wie eine interkommunale Zusammenarbeit aussehen könnte.

4.1 Europäischer Verbund für territoriale Zusammenarbeit

Der Europäische Verbund für Territoriale Zusammenarbeit (EVTZ) ist eine Rechtsform des europäischen Rechts, welche eine interkommunale grenzüberschreitende Zusammenarbeit erleichtern und fördern soll. Durch den EVTZ wird eine institutionelle Grundlage für die Durchführung von interkommunalen grenzüberschreitenden Projekten aus verschiedenen Mitgliedstaaten gefördert.¹²⁴ Der EVTZ ist vergleichbar mit der Rechtsform des Zweckverbands auf nationaler Ebene.

4.1.1 Rechtslage

Die Verordnung (EG) Nr.1082/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5.Juli 2006 über den Europäischen Verbund für territoriale Zusammenarbeit (EVTZ) sowie die Verordnung (EU) Nr. 1302/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Dezember 2013 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1082/2006 über den Europäischen Verbund für territoriale Zusammenarbeit (EVTZ) im Hinblick auf Präzisierungen, Vereinfachungen und Verbesserungen im Zusammenhang mit der Gründung und Arbeitsweise solcher Verbände sind maßgeblich für die Gründung und Ausgestaltung eines EVTZ.

4.1.2 Ziele eines EVTZ

Nach Art. 1 Abs. 2 EVTZ-VO werden die Ziele des EVTZ näher erläutert: Demnach soll der EVTZ der Erleichterung und Förderung der territorialen Zusammenarbeit zwischen seinen Mitgliedern und der Stärkung des wirtschaftlichen, sozialen und territorialen Zusammenhalts der Union nützen. Dabei versteht man unter der Begrifflichkeit der territorialen Zusammenarbeit, nach Art. 3 Abs. 2 c) VO (EG) Nr. 1083/2006 folgendes: Das Ziel Europäischer territorialer Zusammenarbeit liegt in der Stärkung der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit durch gemeinsame lokale und

¹²⁴ vgl. Hochschule Schmalkalden, <http://wdb.fh-sm.de/EVTZ>.

regionale Initiativen, der Stärkung der transnationalen Zusammenarbeit zur integrierten Raumentwicklung, dem Ausbau der interregionalen Zusammenarbeit und des Erfahrungsaustauschs auf geeigneter territorialer Ebene¹²⁵. Erfasst werden von diesem Ziel sowohl die Nutzung der kulturellen, touristischen und bildungspolitischen Infrastruktur als auch die Einrichtungen grenzüberschreitender Wasser-, Abfallentsorgungs- und Energieanlagen¹²⁶. Wie jetzt nachzuvollziehen ist, bietet ein EVTZ, durch das breite Anwendungsspektrum eine Vielzahl an Möglichkeiten, bestehende grenzüberschreitende Kooperationen zu vertiefen, aber auch die Möglichkeit, neue Beziehungen zu schaffen und europäische Potenziale besser zu nutzen.

4.1.3 Partnerstruktur, innere Organisation und Rechtspersönlichkeit

Ein EVTZ kann von Partnern aus dem Hoheitsgebiet von mindestens zwei Mitgliedstaaten (oder einem Mitgliedstaat und einem oder mehreren Nicht-EU-Staaten) gegründet werden, die zu einer oder mehreren der folgenden Kategorien gehören: Mitgliedstaaten oder Gebietskörperschaften auf nationaler Ebene, die folgendermaßen definiert sind; regionale Gebietskörperschaften; lokale Gebietskörperschaften; öffentliche Unternehmen oder Einrichtungen des öffentlichen Rechts; Unternehmen, die mit Dienstleistungen von allgemeinem wirtschaftlichem Interesse betraut sind; nationale, regionale oder lokale Behörden oder Einrichtungen bzw. Unternehmen aus Drittländern (vorbehaltlich bestimmter Bedingungen); Verbände aus Einrichtungen, die zu einer oder mehreren dieser Kategorien gehören¹²⁷.

Für die Organisationsstruktur innerhalb des EVTZ ist nach Art. 10 EVTZ-VO folgende Regelung festgelegt. Jeder EVTZ muss mindestens eine Versammlung, die aus den Vertretern der Mitglieder des Verbunds besteht sowie einen Direktor, der den EVTZ vertritt und für ihn handelt, einrichten. Zusätzlich können die Mitglieder weitere, den Anforderungen des EVTZ entsprechende Organe vorsehen, wie z.B. verschiedene Abteilungen, die bestimmte Ziele verfolgen. Darüber hinaus müssen die Mitglieder als Grundlage des EVTZ eine Übereinkunft sowie eine Satzung beschließen. Diese sind die beiden maßgebenden Dokumente, welche u.a. die Zielsetzung des EVTZ, seine Organe und ihre Kompetenzen sowie Fragen der Haftung regeln. Bei Abfassung von Übereinkunft und Satzung sind die durch die EVTZ-VO vorgegebenen Mindestinhalte zu

¹²⁵ vgl. VO (EG) Nr. 1083/2006, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:210:0025:0078:DE:PDF>.

¹²⁶ vgl. Pechstein/Deja 2011, Was ist und wie funktioniert ein EVTZ?, Zeitschrift Europarecht, Ausgabe 3, S. 357 – 362.

¹²⁷ vgl. Art. 3 f. EVTZ-VO, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32006R1082>.

berücksichtigen¹²⁸. Die Versammlung verabschiedet den jährlichen Haushaltsvoranschlag des EVTZ, der Gegenstand eines von unabhängigen Sachverständigen erstellten und beglaubigten jährlichen Tätigkeitsberichts ist. Im Schuldenfall steht die finanzielle Haftung der Mitglieder im Verhältnis zu ihrem Beitrag. Zudem müssen sich die Mitglieder in Satzung und Übereinkunft auf einen gemeinsamen Sitzstaat des EVTZ einigen. Dieser ist unter anderem deshalb von Bedeutung, weil der EVTZ in den Bereichen, die nicht durch die EVTZ-VO geregelt sind, dem nationalen Recht seines Sitzstaates unterliegt. Der EVTZ besitzt gem. Art. 1 Abs. 3 und 4 der EVTZ-VO eigene Rechtspersönlichkeit und ist rechts- und geschäftsfähig. Der EVTZ handelt im Namen ihrer Mitglieder, die ihre Satzung durch besondere Übereinkünfte festlegen, in denen die Organisation und die Tätigkeiten der EVTZ dargelegt werden. Außerdem werden die Befugnisse des EVTZ durch die jeweiligen Befugnisse ihrer Mitglieder beschränkt. Hoheitliche Befugnisse, zum Beispiel politische Entscheidungs- oder Regelungsbefugnisse, können nicht auf einen EVTZ übertragen werden. Zu nennen sind hier: z. B.: polizeiliche und justizielle Zusammenarbeit, Gesetzgebung und Außenpolitik ¹²⁹.

4.1.4 Genehmigungsverfahren

Über die rechtlichen Regelungen, die die Verfasstheit des EVTZ festlegen, hinaus sind bei der Gründung eines EVTZ die Regelungen des Genehmigungsverfahrens zu beachten, welche die EVTZ-VO definiert. Eingeleitet wird das Verfahren mit der Einreichung von Satzung und Übereinkunft bei den jeweils beteiligten Mitgliedstaaten. Diese prüfen die Teilnahme des potenziellen Mitglieds an dem EVTZ. Dabei entscheidet der Mitgliedstaat hinsichtlich der Genehmigung innerhalb eines Zeitraums von sechs Monaten, ob der Antrag zulässig ist. Abgelehnt darf dieser nur werden, wenn die Beteiligung am EVTZ nicht mit anderen Regelungen übereinstimmt, die Beteiligung öffentlichen Interessen entgegensteht, die Satzung nicht übereinstimmt mit den Regelungen des EVTZ. Verläuft das Genehmigungsverfahren erfolgreich, so erwirbt der EVTZ seine Rechtspersönlichkeit an dem Tag, wenn die Registrierung bzw. Veröffentlichung im Sitzstaat erfolgt ¹³⁰. Beteiligt sind bei der Genehmigung in Deutschland auf Grund der föderalen Struktur: das Bundesland sowie das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie¹³¹.

¹²⁸ vgl. Art. 8 EVTZ-VO, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32006R1082>.

¹²⁹ vgl. ebd.

¹³⁰ vgl. Art. 4 EVTZ-VO, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32006R1082>.

¹³¹ vgl. BMVI 2014, S.30ff.,

https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/ministerien/BMVI/VerschiedeneThemen/2014/DL_EVTZ_Trans.pdf;jsessionid=CB15F74B0856A95144361DC06F8AE818.live21304?__blob=publicationFile&v=3.

4.1.5 Fazit zu EVTZ

Der EVTZ bietet einige Vorteile für die interkommunale grenzüberschreitende Zusammenarbeit. Zum einen handelt es sich um eine eigene Rechtspersönlichkeit¹³², die vergleichbar ist auf nationaler Ebene mit einem Zweckverband, der seit vielen Jahren erfolgreich in Deutschland in der interkommunalen Zusammenarbeit etabliert ist. Der EVTZ ist daher selbst Träger von Rechten und Pflichten, kann Vermögen besitzen und Aufgaben der Mitglieder zentralisiert abwickeln, was dazu führt, dass die Verwaltungen entlastet werden und Aufgaben einheitlich und kontinuierlich abgearbeitet werden können.

Darüber hinaus schafft der Verbund aufgrund der strukturellen Vorgaben der EVTZ-VO einen einheitlichen Rahmen für die Verwaltung europäischer Projekte, hier im Speziellen bezgl. der stofflichen und energetischen grenzüberschreitenden, interregionalen Klärschlammverwertung und gewährleistet aufgrund der grenzüberschreitend einheitlich tätigen Organe Stabilität und Effektivität bei der kommunalen Zusammenarbeit.

Insgesamt betrachtet kann ein EVTZ das Ansehen und die Verbindlichkeit im Auftreten nach außen stärken, das akquirieren von eigenen Fördermitteln, dem EVTZ-Zweck entsprechend, verbessern und auch die grenzüberschreitende Zusammenarbeit stärker fokussieren, da die einheitlichen und für alle gleichermaßen geltenden Regelungen Entscheidungsprozesse vereinfachen, die Rechtsverbindlichkeit Sicherheit für die Mitglieder bei der Umsetzung von Entscheidungen bietet und ein langfristiges und partnerschaftliches Vorgehen sichert.¹³³ Gebietskörperschaften können also im Rahmen eines EVTZ im Grenzraum, eine koordinierte und effektive Zusammenarbeit erreichen und Synergien nutzen, weshalb die Schaffung eines EVTZ, im Bereich der Klärschlammverwertung (Ziel ETZ-Projekt „greenIKK“) durchaus Sinn macht und die Projektziele Emissionen sowie Investitions- und Logistikkosten zu reduzieren, erreicht werden können.

Herausforderungen bei der Gründung eines EVTZ sind vor allem dahingehend zu sehen, dass zuerst der politische Wille in den Mitgliedsstaaten bzw. bei den beteiligten Partnern vorliegt, einen EVTZ zu gründen und mit Leben zu füllen. Weiterhin entstehen den Mitgliedern auch Kosten: Zu nennen sind hier vor allem Personalkosten sowie Büro- und Verwaltungskosten, Reisekosten etc., die je nach Ausgestaltung des EVTZ und der Projekte schnell anwachsen können.

Schwierig könnte auch die Wahl des Sitzstaates werden, was auch politisch gelöst werden muss. Diese Schwierigkeit könnte z.B. durch die Einführung weiterer Organe umgangen werden, die den

¹³² vgl. Art. 1 Abs. 3 EVTZ-VO, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32006R1082>.

¹³³ vgl. Pechstein/Deja, **2011**: Was ist und wie funktioniert ein EVTZ?, Zeitschrift Europarecht, Ausgabe 3, S. 357.

Sitz im anderen Land haben. Allerdings kann dies auch dazu führen, dass es eine Aufteilung der Organe auf unterschiedliche Länder dazu führt, dass die Handlungsfähigkeit und Effizienz des EVTZ eingeschränkt ist. Ein weiterer Nachteil ist „[...] die langwierige Gründungsprozedur. Es ist zu erwarten, dass die Gründung - wegen mangelnder Erfahrung und wegen der Notwendigkeit, eine Genehmigung zu erlangen [...] lang dauern wird. Da die Genehmigung der Gründung des EVTZ eine gebundene Verwaltungsentscheidung ist, kann diese beim Vorliegen der rechtlichen Voraussetzungen auch gegen den Willen der Aufsichtsbehörde durchgesetzt werden.“ (Hochschule Schmalkalden). Des Weiteren muss man festhalten, dass keine Privaten in den EVTZ direkt integriert werden können und wegen fehlender Praxiserfahrungen mit dem EVTZ nicht alle Rechtsfragen verbindlich geklärt sind ¹³⁴.

Grundsätzlich sind die Hürden einen EVTZ zu gründen aber überwindbar. Vor allem vom politischen Willen der potentiellen Mitglieder ist eine Gründung abhängig, kann aber genau daran scheitern, da oftmals kommunale Aufgaben selbst erledigt werden wollen und keine übergeordnete Struktur, die „zusätzliches Geld“ kostet, dies vornehmen soll. Allein das Gerüst des EVTZ wird nicht ausreichen, um die Klärschlammverwertung interregional zu lösen.

Möglich wäre daher auch die Gründung oder Nutzung eines bestehenden Zweckverbands auf nationaler Ebene, um die energetische und stoffliche Verwertung von Klärschlamm nachhaltig zu sichern. Dort würde das Sitzland klar sein, die Gründung erprobt und kurzfristig realisierbar sowie die Strukturen auf nationaler Ebene einfach zu implementieren. Beide Rechtsformen können daher als geeignet angesehen werden.

4.2 Zweckverband

Kommunen können sich zu einem Zweckverband zusammenschließen und diesen einzelne Aufgaben übertragen. Der Zweck kann dabei unterschiedlichen Branchen zugeordnet sein. Beispielsweise können Wasserversorgungsverbände, Abwasserverbände oder Rettungszweckverbände, etc. gegründet werden, um eine interkommunale Zusammenarbeit zu implementieren.

Mitglied in einem Zweckverbände können Gemeinden, Landkreise, Bezirke und diesem Gleichgestellte (Verwaltungsgemeinschaften, Eigentümer gemeindefreier Grundstücke, Zweckverbände und Kommunalunternehmen), sonstige Körperschaften, Anstalten und Stiftungen des öffentlichen Rechts, aber auch natürliche und juristische Personen des Privatrechts sein.

¹³⁴ vgl. ebd.

Für die Gründung eines Zweckverbands ist die Vereinbarung der Verbandssatzung durch sämtliche Beteiligte notwendig. Dort müssen folgende Dinge geregelt sein: der Name und der Sitz des Zweckverbands, die Verbandsmitglieder, der räumliche Wirkungsbereich, Aufgaben, Sitz- und Stimmenverteilung in der Verbandsversammlung sowie die Finanzierung, durch die beteiligten Verbandsmitglieder.

Die Satzung eines Zweckverbands bedarf der Genehmigung durch die Aufsichtsbehörde. Je nachdem welche Mitglieder an einem Zweckverband beteiligt sind, ändert die zuständige Aufsichtsbehörde. Das Staatsministerium des Inneren gilt als Aufsichtsbehörde, wenn an einem Zweckverband ein Bezirk oder der Freistaat Bayern beteiligt sind sowie wenn ein anderes Land, eine Gemeinde bzw. Gemeindeverbund aus einem anderen Land oder der Bund beteiligt sind. Die Regierung gilt als Aufsichtsbehörde, wenn ein Kreis bzw. eine kreisfreie Stadt an einem Zweckverband beteiligt ist. Für alle weiteren Zweckverbandsgenehmigungen ist die Kreisverwaltungsbehörde zuständig.

Die Verbandssatzung und ihre Genehmigung werden von der Aufsichtsbehörde in ihrem Amtsblatt amtlich bekannt gemacht. Der Zweckverband entsteht frühestens am Tag nach dieser Bekanntmachung.¹³⁵

¹³⁵ vgl. Zweckverbandssatzung, <https://www.freistaat.bayern/dokumente/leistung/479294278842>

5 Zusammenfassung

Durch die Novellierung der Klärschlammverordnung und des Düngerechts haben sich die Anforderungen an die Entsorgung von Klärschlamm verschärft. Grundsätzlich gilt nun eine Phosphorrückgewinnungspflicht, die ab den Jahren 2029 bzw. 2031 alle Betreiber zur Rückgewinnung verpflichtet sowie eine Einschränkung in der bodenbezogenen Verwertung (Landwirtschaft, Landbau), die die Ausnahme bleiben soll. In dieser Übergangszeit, bis die P-Rückgewinnung in Kraft tritt, von 9 bzw. 11 Jahren, müssen alle Kläranlagenbetreiber ein Konzept zur Phosphorrückgewinnung bzw. Klärschlamm Entsorgung anfertigen und implementieren. Dafür ist vorgesehen, dass im Jahr 2023 die Kläranlagenbetreiber an die Aufsichtsbehörde das angedachte Entsorgungskonzept weitergeben und den Entsorgungsprozess schrittweise implementieren.

Auch Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von weniger als 50.000 EW, die ihren Klärschlamm laut AbfKlärV weiterhin landwirtschaftlich verwerten dürfen, sind von den gesetzlichen Anforderungen betroffen. Einerseits durch die verschärften Anforderungen an Düngemittel und die damit verbundene Reduzierung der Möglichkeiten zur landwirtschaftlichen Entsorgung, andererseits durch das Verbot der bodenbezogenen Ausbringung nicht vollstabilisierter Schlämme.

Eine Ausnahme von der P-Rückgewinnungspflicht ist nur mit behördlicher Genehmigung möglich.

Basierend auf den im Projekt greenIKK durchgeführten und in diesem Bericht dargelegten Analysen können die folgenden Handlungsoptionen abgeleitet werden:

- Option 1: Stabilisierung – Realisierung einer neuen Faulung für KA Mitterteich
- Option 2: Klärschlamm entwässerung im kommunalen Verbund
- Option 3a: Klärschlamm trocknung im Verbund - Solarunterstützte Trocknung
- Option 3b: Klärschlamm trocknung im Verbund - Bandtrockner
- Option 3c: Nutzung vorhandener Trocknungskapazitäten
- Option 4: Thermische Behandlung im Verbund - Klärschlammverbrennung

Im Folgenden soll zusammenfassend auf die Vor- und Nachteile der Optionen eingegangen werden.

Option 1: Stabilisierung – Realisierung einer neuen Faulung für KA Mitterteich

Bau eines neuen Faulbehälters auf dem Gelände der Kläranlage Mitterteich für die Behandlung des anfallenden Primär- und Überschussschlammes (siehe Variante 1 Kap. 2.2). Des Weiteren sollen in einem neuen Gebäude eine maschinelle Überschussschlamm eindickung und Schlamm entwässerung entstehen. Diese Variante ist nur durch eine teilweise Finanzierung mit Fördergeldern wirtschaftlich darstellbar. Weiterhin sollte die wirtschaftliche Situation der Brauerei

als größter Indirekteinleiter mitberücksichtigt werden. Ein Wegfall der Frachten würde zu einem wesentlich geringeren Schlammanfall führen.

Weiterhin wird eine gezielte Schlammbehandlung auf der Kläranlage Wiesau empfohlen. Durch den nichtstabilisierten Rohschlamm kommt es zu erheblichen Emissionen im Umfeld der Kläranlage. Diese erhöhen sich bei einer Umwälzung des Schlammspeichers, bspw. bei der Entwässerung, um ein Vielfaches. Eine anaerobe Schlammstabilisierung würde zu einer deutlichen Verbesserung der Geruchsemissionen beitragen.

+	-
Geringere Treibhausgasemissionen	Nur mit Förderung wirtschaftlich
Eigenstromerzeugung	Wirtschaftliche Situation der Einleiter berücksichtigen
Ggf. förderfähig	

Option 2: Klärschlamm entwässerung im Verbund

Die Kommunen, die über keine eigene, stationäre Entwässerung verfügen, betreiben ein gemeinsames Entwässerungssystem im Verbund. Je nach Größe der KA und Klärschlammfall erfolgt eine stationäre oder mobile Entwässerung.

+	-
Betrieb durch Klärwerkpersonal möglich	Zusätzlicher Personalaufwand
Mobilität	Kapitalbindung
Unabhängiger Betrieb	Wartungsaufwand

Option 3a: Solarunterstützte Trocknung

Die Kommunen errichten auf einer geeigneten Fläche eine solare Trocknung, die durch eine Fußbodenheizung ergänzt wird, und betreiben diese gemeinsam. Als Wärmequelle für die Fußbodenheizung wird die zur Verfügung stehende Wärme umliegender Biogasanlagen genutzt (siehe Kapitel 2.3 Klärschlamm-trocknung). Der Klärschlamm kann so auf bis zu 90 % TS getrocknet werden. Der getrocknete Klärschlamm muss anschließend entsorgt werden. Als potenzielle Abnehmer kommen z.B. die geplante Monoverbrennung in Straubing oder die TCR-Anlage in Hohenburg in Frage. Es ist unbedingt darauf zu achten, die Abnahmekapazitäten für getrockneten Klärschlamm im Vorfeld zu klären.

+	-
Nutzung regenerativer Energie	Hoher Flächenbedarf
Niedrige laufende Kosten	Hohe Investitionskosten
Volumenreduzierung	Abnahmekapazitäten beachten!

Option 3b: Bandrockner

Die Kommunen errichten auf einer geeigneten Fläche eine Bandtrocknungsanlage und betreiben diese im Verbund. Als Wärmequelle wird, analog zu 2a, die verfügbare Wärme aus den Biogasanlagen der Region genutzt. Als potenzielle Abnehmer des getrockneten Klärschlamm kommen, wie in Option 2a, die geplante Monoverbrennung in Straubing oder die TCR-Anlage in Hohenburg in Frage. Die Technologie des Bandrockners verfügt auch über die Option die Abwärme aus einer Klärschlammverbrennung zum Trocknen einzusetzen. Daher ist Option 2b sowohl als eigenständige Lösung als auch in Kombination mit Option 3 anwendbar.

+	-
Geringerer Flächenbedarf	Höherer Wärmebedarf
Niedrigere Investitionskosten	Abluftreinigung und Brüdenbehandlung
Kombination mit therm. Behandlung möglich	Abnahmekapazitäten für getrockneten KS beachten!
Nutzung regionaler Abwärme	

Option 3c: Nutzung vorhandener Trocknungskapazitäten

Eine weitere Möglichkeit bietet die Nutzung der vorhandenen Trocknungsanlagen der Region. Diese werden mit Holzvergasern betrieben. Derzeit befindet sich eine Anlage in Schirnding im Bau und eine weitere Anlage in Wunsiedel ist in Planung. Die Kommunen würden sich nicht selbst um die Behandlung des Klärschlamm kümmern, sondern einen Vertrag mit dem Betreiber abschließen, der auch die Entsorgung miteinschließt.

+	-
Kein Betreiberisiko	Abhängigkeit von Entsorgungskapazitäten
Preisbindung für 1 Jahr	Kosten für Zeitraum > 1 Jahr können schwanken
Trocknung inkl. Verwertung	KS-Verwertung in Mitverbrennung
Bewährte Technologie (seit 13 Jahren in Betrieb)	

Option 4: Thermische Behandlung im Verbund

Die Kommunen beschaffen, errichten und betreiben eine eigene thermische Klärschlammbehandlungsanlage. Die Technologie, die im Rahmen der Bewertung im Projekt am besten abschnitt, ist die Monoverbrennung. Um die Entsorgungssicherheit nicht zu gefährden und die finanziellen Risiken zu reduzieren, wird diese Option nur im Rahmen einer Kooperation mit weiteren (kommunalen) Partnern und in Kombination mit der Beantragung von Fördermitteln empfohlen.

+	-
Unabhängigkeit von Entsorgern	Betreiberrisiko
Ggf. durch Förderung finanzierbar	Hohe Investitionssumme
P-Rückgewinnung aus Asche möglich	Entsorgungssicherheit ggf. nicht gewährleistet
	Akzeptanz in der Bevölkerung?
	Immissionsrechtliche Vorgaben

Die obengenannten Handlungsmöglichkeiten wurden auf Grundlage der im Projekt durchgeführten Bewertungen erstellt. Die Bewertungen basieren auf den erhobenen Daten der Projektpartner, Berechnungen, Untersuchungen und Sekundärdaten (Literaturwerte, Herstellerangaben). Die genaue Auslegung und Budgetierung der einzelnen Optionen muss für jeden Anwendungsfall individuell geprüft werden. Die vollständige Beschreibung der Bewertungsmethoden ist der jeweiligen Originalstudie zu entnehmen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Durchschnittlicher P-Gehalt sowie künftiger Grenzwert.....	13
Abbildung 2 Durchschnittliche Messwerte 2016 sowie Grenzwerte nach AbfKlärV	16
Abbildung 3 Durchschnittliche Cadmiumwerte 2016 und Grenzwerte lt. DüMV	27
Abbildung 4 Durchschnittsmesswerte von 2016 der Anlagen Bärnau I/II mit Grenzwerten	27
Abbildung 5 Durchschnittswerte aller Anlagen 2016 und Grenzwerte laut DüMV	28
Abbildung 6 Durchschnittswerte aller Anlagen 2016 und Grenzwerte laut DüMV	28
Abbildung 7 Kläranlagen der Zielregion - Kartenbild von OpenStreetMap (Daten: ODbL 1.0).....	34
Abbildung 8 Durchschnittlicher Klärschlammanfall in der Zielregion	35
Abbildung 9 Klärschlammgewicht im Zielgebiet in Abhängigkeit vom TS-Gehalt.....	42
Abbildung 10 Standorte der Biogasanlagen (Kartendaten © 2019 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google Deutschland).....	49
Abbildung 11 Kläranlagenstandorte in der Projektregion inklusive der Steinwaldallianz – Kartenbild von OpenStreetMap (Daten: ODbL 1.0)	55
Abbildung 12 Verfahrensfliessbild TerraNova Ultra®	59
Abbildung 13 Energiebedarf fossiler Brennstoffe (aus Umberto LCA+).....	72
Abbildung 14 kumulierter Energiebedarf nicht erneuerbarer Energien (aus Umberto LCA+).....	73
Abbildung 15 Signifikante Parameter Treibhauspotential (aus Umberto LCA+)	74
Abbildung 16 Signifikante Parameter terrestrische Versauerung (aus Umberto LCA+)	74
Abbildung 17 Berechnete Standorte (Kartendaten © 2019 Geo-Bais-DE/BKG (©2009)	77
Abbildung 18 Bodenproben im Forstbezirk Pirmda während 2010-2017	82
Abbildung 19 Bodenreaktion und verfügbarer Nährstoffgehalt in den Bodenproben des Jahres 2017	82
Abbildung 20 Nährstoffgehalt in Königswasser-Auszügen in den Bodenproben des Jahres 2017	83
Abbildung 21 Nährstoffgehalt in Fichtennadeln im Jahr 2017 gesammelt (Nadeljahrgang 1: jüngste Nadeln eines Triebes, NJ. 2: Nadeln des Vorjahres).....	84
Abbildung 22 pH-Wert	85
Abbildung 23 Phosphor	86
Abbildung 24 Nährstoffe	86
Abbildung 25 Nährstoffe	87
Abbildung 26 Landwirtschaftliche Feldversuche	87
Abbildung 27 Markierte Fläche mit Fichtenanpflanzung	92
Abbildung 28 Gedüngte Buche und Fichte.....	93
Abbildung 29 Topfversuch Buchenpflanzen.....	95
Abbildung 30 Topfversuch Fichtenpflanzen	95
Abbildung 31 Topfversuch – Buchenpflanzen (kleine Pflänzlinge)	95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Überblick über Entsorgungsmöglichkeiten	11
Tabelle 2 Neue und alte Grenzwert der AbfKlärV	15
Tabelle 3 Klärschlammbezogene Untersuchungsparameter	18
Tabelle 4 Neuordnung der Klärschlammentsorgung – Phosphorrückgewinnungspflicht.....	20
Tabelle 5 Neue und alte Grenzwert der DüMV	26
Tabelle 6 Bewertungsmatrix	36
Tabelle 7 Bewertung der Verfahren zur Klärschlammreduzierung	37
Tabelle 8 Vor- und Nachteile mobile Entwässerung	43
Tabelle 9 Überblick Entwässerungsverfahren.....	43
Tabelle 10 Gesamtkosten der Entwässerungsverfahren	44
Tabelle 11 Klärschlammtransporte nach Entwässerung IKOM.....	45
Tabelle 12 Klärschlammtransporte nach Entwässerung Steinwald Allianz	45
Tabelle 13 Überblick Trocknungsverfahren.....	47
Tabelle 14 Klärschlammmenge Stiftland, Steinwald Allianz, Chevak und zur Trocknung benötigte Wärmemenge bei (*) Bandrockner und (**) solarunterstützter Trocknung	48
Tabelle 15 Daten der Biogasanlagen	49
Tabelle 16 Bewertungsergebnisse	53
Tabelle 17 Daten einer TerraNova Ultra®-Anlage mit 1.000 Tonnen TS pro Jahr	61
Tabelle 18 Produkte des TCR®-Verfahrens.....	62
Tabelle 19 Gewichtungsfaktoren	64
Tabelle 20 Bewertungsmatrix für die Verfahrensauswahl - Schlammwasser und Klärschlamm	65
Tabelle 21 Bewertungsmatrix für die Verfahrensauswahl - Klärschlammasche	66
Tabelle 22 Bewertungsmethode.....	68
Tabelle 23 Bewertungsergebnisse	69
Tabelle 24 Kostenübersicht STRUVIATM-Anlage in Anlehnung an Veolia Wasser Deutschland, 2019....	75
Tabelle 25 Punktebewertung; 1 gut; 0,5 annehmbar; 0 schlecht	78
Tabelle 26 Ergebnisse der Bodenproben landwirtschaftliche Fläche	88