

# **Untersuchungen zur Entwässerung, Trocknung und Entsorgung von Klärschlamm kleiner und mittlerer Kläranlagen**

**Abschlussbericht  
im Auftrag des  
Bayerischen Landesamtes für Umwelt**

## Mitteilungen / Institut für Wasserwesen – Heft 136

Universität der Bundeswehr München  
Institut für Wasserwesen  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
D-85577 Neubiberg  
[www.unibw.de/wasserwesen](http://www.unibw.de/wasserwesen)

### **Untersuchungen zur Entwässerung, Trocknung und Entsorgung von Klärschlamm kleiner und mittlerer Kläranlagen** ***Abschlussbericht*** ***im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt***

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum  
Dr.-Ing. Sebastian Chalupczok  
Johannes Blattenberger, M.Sc.  
Christian Hubert, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Krause  
Bettina Steiniger, M.Sc.  
*Universität der Bundeswehr München – Institut für Wasserwesen*  
*Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik*

Dr.-Ing. Konstantinos Athanasiadis  
Maria Egeler, M.Sc.  
*Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH*

*Projektleitung durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU)*  
Dipl.-Ing. (FH) Karla Mix-Spagl  
Dipl.-Ing. Stefan Bleisteiner

Copyright 2023



Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ CC BY- Lizenz 3.0 DE (Namensnennung 3.0 Deutschland) zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/legalcode>.

**ISSN 2700-7332**

**ISBN 978-3-943207-74-3**

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	V
Tabellenverzeichnis .....	XI
Abkürzungsverzeichnis (Auswahl) .....	XV
1 Einleitung .....	1
1.1 Veranlassung und Zielsetzung .....	1
1.2 Arbeitsprogramm .....	2
1.3 Danksagung .....	4
2 Klärschlammentsorgung kleiner und mittlerer Kläranlagen .....	5
2.1 Kleine und mittlere Kläranlagen in Bayern .....	5
2.1.1 Definition kleine und mittlere Kläranlagen .....	5
2.1.2 Kleine und mittlere Kläranlagen in Bayern .....	5
2.2 Kommunale Klärschlammentsorgung in Deutschland und Bayern .....	10
2.2.1 Situation der Klärschlammentsorgung in Deutschland .....	10
2.2.2 Situation der Klärschlammentsorgung in Bayern .....	11
2.2.3 Abwasserteichanlagen in Bayern .....	13
3 Untersuchungspflichten und Analysekosten bei der bodenbezogenen Klärschlammverwertung .....	17
3.1 Untersuchungspflichten – Boden und Klärschlamm .....	17
3.2 Bodenbezogene Untersuchungspflichten .....	17
3.2.1 Untersuchungspflichten und -häufigkeiten .....	17
3.2.2 Grenzwerte bei der bodenbezogenen Verwertung .....	18
3.2.3 Beschränkungen bei der bodenbezogenen Verwertung .....	19
3.3 Klärschlammbezogene Untersuchungspflichten .....	20
3.3.1 Klärschlammverordnung (AbfKlärV) .....	20
3.3.2 Düngemittelverordnung (DüMV) .....	24
3.3.3 Düngeverordnung (DüV) .....	28
3.3.4 Analysekosten bei der bodenbezogenen Verwertung und Verbrennung .....	29
3.3.5 Vergleich der Analysekosten bei bodenbezogener Verwertung und thermischer Behandlung .....	31

---

4	Messprogramm zur Klärschlammwässerung auf kleineren und mittleren Kläranlagen in Bayern.....	33
4.1	Probenahme und Analyseverfahren.....	33
4.1.1	Auswahl der Kläranlagen für Probenahmen .....	33
4.1.2	Analyseverfahren.....	34
4.2	Ergebnisse der Analysen zur Klärschlammwässerung .....	35
4.2.1	Kurzbeschreibung der Kläranlagen.....	35
4.2.2	Steckbriefe der Kläranlagen (Betriebsdaten).....	37
4.2.3	Ergebnisse der Analysen .....	45
4.3	Bewertung der gemessenen Konzentrationen auf die Rückbelastung.....	54
5	Entwicklung von Bewertungskriterien für eine zukunftsfähige Klärschlammbehandlung und -entsorgung .....	57
5.1	Motivation und Ziel der Entwicklung von Bewertungskriterien .....	57
5.2	Grundlagen der Klärschlammwässerung und -trocknung .....	58
5.2.1	Verfahren zur Klärschlammwässerung .....	58
5.2.2	Verfahren zur Klärschlamm-trocknung.....	63
5.2.3	Kosten bei der Entwässerung, Trocknung und Entsorgung von Klärschlamm .....	66
5.3	Variantenentwicklung einer Klärschlammbehandlung und -entsorgung .....	68
5.3.1	Verfahrenstechnische Grundkonzeption der Modellkläranlagen .....	69
5.3.2	Verfahrenstechnische Aspekte Abwasserteichanlagen (V1).....	71
5.3.3	Verfahrenstechnische Aspekte Belebtschlammverfahren (V2 – V4) .....	72
5.4	Kostenvergleichsrechnung zur Klärschlammbehandlung und -entsorgung .....	86
5.4.1	Darstellung der untersuchten Umsetzungskonzepte .....	86
5.4.2	Gewählte Modellkläranlagen.....	87
5.4.3	Grundlagen der Kostenschätzung .....	87
5.4.4	Investitionskostenschätzung der Neuinvestitionen .....	88
5.4.5	Betriebskostenabschätzung.....	89
5.4.6	Ergebnis der Kostenvergleichsrechnung .....	90



---

5.5	Bewertungskriterien.....	91
5.5.1	Variantenentwicklung.....	91
5.5.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	93
5.5.3	Technik .....	93
5.5.4	Betrieb.....	94
5.5.5	Ökonomie.....	95
5.5.6	Ökologie (Methanemissionen) .....	96
6	Handlungsempfehlungen für eine zukunftsfähige Klärschlammbehandlung und -entsorgung .....	99
6.1	Grundlagenermittlung.....	99
6.2	Unbelüftete Abwasserteichanlagen.....	99
6.3	Belebtschlammverfahren.....	101
6.4	Klärschlammbehandlung und -entsorgung im Verbund .....	103
6.4.1	Konzept einer interkommunalen Zusammenarbeit .....	103
6.4.2	Verfahrenstechnische Aspekte für eine Fremdschlammannahme .....	104
6.4.3	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	106
6.4.4	Wege einer interkommunalen Zusammenarbeit.....	106
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	109
	Literaturverzeichnis .....	113



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	a) 2.624 Kläranlagen (KA) in Bayern unterteilt in > 50.000 EW (82 KA) und > 100.000 EW (36 KA) sowie b) unterteilt in Größenklasse 1 (1.232 KA), Größenklasse 2 (783 KA) und Größenklasse 3 (214 KA). Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Stand: 2014). ©OpenStreetMap and contributors, CC-BY-SA. ....	6
Abbildung 2:	Verteilung der angewandten Verfahrenstechniken bei der Abwasserbehandlung von Kläranlagen GK 1 bis 3 in Bayern (LfU, 2021, (Stand: 2020)). ....	7
Abbildung 3:	Qualitätsanforderungen nach Bescheid (links) im Ablauf von kommunalen Kläranlagen im Vergleich zu gemessenen Überwachungswerten (rechts, Kontrollmessung bei bayerischen kommunalen Kläranlagen der GK 1 bis 3 für die Parameter CSB, $P_{ges}$ , $NH_4-N$ und mineralischen Stickstoff (TIN). Stichprobenzahl (n) für Anforderungen/Messwerte: CSB: 1983/1990; $P_{ges}$ : 1967/1987; $NH_4-N$ : 575/1987; TIN: 1960/1987 (Daten: 2022, DABay-Abfrage, LfU 2022). ....	9
Abbildung 4:	Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung in Deutschland seit 1998 bis 2020. Sonstige stoffliche Verwertung z. B. Vererdung, Kompostierung. (Statistisches Bundesamt 2020; Roskosch und Heidecke 2018). ....	11
Abbildung 5:	a) Prozentuale Verteilung der Klärschlamm Entsorgung in Deutschland (Stand: 2020). b) Prozentuale Verteilung der Klärschlamm Entsorgung in Bayern (Stand: 2020) (Statistisches Bundesamt 2020). ....	11
Abbildung 6:	Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung in Bayern seit 1995 bis 2020 (Daten: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022). ....	13
Abbildung 7:	Entsorgungswege für anfallenden Klärschlamm der GK 1 bis 3 sortiert nach Verfahrenstechnik zur Abwasserbehandlung (Stand: 2019, DABay). Die Anzahl der Kläranlagen mit entsprechendem Entsorgungsweg ist als Zahl angegeben. Sonstige Verwertung entspricht Rekultivierung, Kompostierung und Rekultivierung, Kompostierung und Landschaftsbau. AB: Abwasserteichanlage belüftet, A: Abwasserteich unbelüftet, A+X: Abwasserteichanlage mit technischer Zwischenstufe, B: Belebungsanlage, BS: Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabilisierung, MECH: Mechanische Reinigungsanlage/Behelfsanlage, B+X: Mehrstufige biologische Kläranlage, PF/BIFOS/SVA: Pflanzenkläranlage/Bepflanzter Bodenfilter/Hybridanlagen, RK: Rotationskörperanlage, TK: Tropfkörperanlage. ....	14
Abbildung 8:	Bodenbezogene Untersuchungspflichten nach § 4 AbfKlärV. ....	18
Abbildung 9:	Klärschlammbezogene Untersuchungspflichten nach § 5 Abs. 1 AbfKlärV („kleine“ Untersuchung). ....	21

Abbildung 10: Klärschlammbezogene Untersuchungspflichten nach § 5 Abs. 2 AbKlärV („große“ Untersuchung: § 5 Abs. 1 und 2 AbfKlärV).....	22
Abbildung 11: Standorte der beprobten Kläranlagen. ©OpenStreetMap and contributors, CC-BY-SA.....	35
Abbildung 12: Anlagenschema Kläranlage SB#01.....	37
Abbildung 13: Anlagenschema Kläranlage SB#02.....	38
Abbildung 14: Anlagenschema Kläranlage SB#03.....	38
Abbildung 15: Anlagenschema Kläranlage SB#04.....	39
Abbildung 16: Anlagenschema Kläranlage SB#05.....	39
Abbildung 17: Anlagenschema Kläranlage SB#06.....	40
Abbildung 18: Anlagenschema Kläranlage SB#07.....	40
Abbildung 19: Anlagenschema Kläranlage SB#08.....	41
Abbildung 20: Anlagenschema Kläranlage MB#09.....	41
Abbildung 21: Anlagenschema Kläranlage MB#10.....	42
Abbildung 22: Anlagenschema Kläranlage MB#11.....	42
Abbildung 23: Anlagenschema Kläranlage NB#12.....	43
Abbildung 24: Anlagenschema Kläranlage NB#13.....	43
Abbildung 25: Anlagenschema Kläranlage NB#14.....	44
Abbildung 26: Anlagenschema Kläranlage NB#15.....	44
Abbildung 27: Box-Plot für die gemessenen Parameter des Schlammwassers a) Leitfähigkeit und b) pH-Wert sowie Temperatur auf den ausgewählten Kläranlagen.....	49
Abbildung 28: Box-Plot für die gemessenen Parameter des Schlammwassers a) AFS-Konzentration und b) des $CSB_{ges}$ - und $CSB_{gel}$ -Konzentration auf den ausgewählten Kläranlagen.....	49
Abbildung 29: Abhängigkeit der $CSB_{ges}$ -Konzentration des Schlammwassers von der AFS-Konzentration ( $R^2 = 0,875$ ; $c(CSB_{ges}) = 1,28 c(AFS) + 585 \text{ mg/L}$ ). Darstellung des Analyseumfangs für Kategorie A (schwarz) und Kategorie B (rot).....	50
Abbildung 30: Box-Plot für die gemessenen Parameter des Schlammwassers TKN- und $NH_4-N$ -Konzentration auf den ausgewählten Kläranlagen.....	51
Abbildung 31: Abhängigkeit der Leitfähigkeit ( $\kappa$ ) von der a) $NH_4-N$ -Konzentration ( $R^2 = 0,891$ ) sowie der b) TKN-Konzentration ( $R^2 = 0,949$ , ohne zwei schwarzen Ausreiser bei ca. 400 mg/L) in Schlammwasser auf ausgewählten Kläranlagen. Darstellung des Analyseumfangs für Kategorie A (schwarz) und Kategorie B (rot). ....	51

Abbildung 32: Lineare Abhängigkeit von der Differenz der TKN- und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration ( $\Delta(c(\text{TKN}) - c(\text{NH}_4\text{-N}))$ ) zur AFS-Konzentration im Schlammwasser ( $R^2 = 0,918$ ).....	52
Abbildung 33: Box-Plot für die gemessenen Parameter des Schlammwassers a) $P_{\text{ges}}$ - und b) $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentration auf den ausgewählten Kläranlagen.....	53
Abbildung 34: Lineare Abhängigkeit von der Differenz der $P_{\text{ges}}$ - und $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentration ( $\Delta(c(P_{\text{ges}}) - c(\text{PO}_4\text{-P}))$ ) zur AFS-Konzentration im Schlammwasser ( $R^2 = 0,698$ ).....	53
Abbildung 35: Vereinfachte Darstellung zur Bilanzierung der Rückbelastung.....	55
Abbildung 36: Spezifische Rückbelastung von Schlammwasser anhand vorheriger Analyseuntersuchungen im Zulauf von Kläranlagen unter der Annahme einer kontinuierlichen Schlammwasserrückführung in den Hauptstrom der Kläranlage.....	56
Abbildung 37: Volumenreduktion des Klärschlammes in Abhängigkeit der Behandlungsschritte (verändert nach (DWA-M 366 2013). Angenommene Dichte von $1,0 \text{ g/cm}^3$ .....	58
Abbildung 38: Übersicht über ausgewählte Parameter zur Beeinflussung des Entwässerungsergebnisses nach (DWA-M 383 2019). Die Pfeile symbolisieren eine Steigerung und Reduzierung des entsprechenden Parameters. ....	62
Abbildung 39: Übersicht über die betrachteten Varianten zur Abwasserbehandlung.....	70
Abbildung 40: Klärschlammfall in Abhängigkeit der Einwohnerwerte der Größenklasse 1 bis 3 von statisch eingedicktem ( $2,5 \% \text{ TR}$ ) sowie entwässerten Klärschlamm ( $25 \% \text{ TR}$ ) in $\text{m}^3/\text{d}$ (Umrechnung von $\text{kg}/\text{d}$ mit $\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$ ; Annahme: $b_{\text{TM,E,d}} = 48,4 \text{ g TM}/(\text{E} \cdot \text{d})$ bei Belebung mit aerober Stabilisierung mit $15 \text{ }^\circ\text{C}$ aus (DWA-M 368 2014)). ....	73
Abbildung 41: Benötigte Lagerkapazität eines Schlammstapelbehälters in Abhängigkeit der Einwohnerzahl für Kläranlagengrößen 1 bis 3. SSB-Volumen berechnet anhand des spezifischen Speichervolumens von $q_{\text{d,ÜS}} = 2,0 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$ und bezogen auf angenommene Lagerdauer von 1 Monat bis 12 Monaten ohne Sicherheitsfaktor. ....	74
Abbildung 42: Erforderlicher Klärschlammumsatz bei der Entwässerung des im Schlammstapelbehälter enthaltenen Klärschlammes innerhalb von 7 Tagen in Abhängigkeit der Lagerzeit und der Einwohnerzahl.....	75
Abbildung 43: Abhängigkeit der Entwässerungsdauer (Bereich von 3 bis 30 Tage) auf den erforderlichen Klärschlammumsatz zur stationären Entwässerung des im Schlammstapelbehälter enthaltenen Klärschlammes in Bezug zur Lagerzeit und der Einwohnerzahl. Die durch die farbigen Geraden begrenzten Bereiche markieren die gewählte minimale (3 Tage) und maximale (30 Tage) Entwässerungsdauer. Skalierung bezogen auf den Einsatzbereich	

- von stationären Zentrifugen (200 m<sup>3</sup>/h). Gestrichelte Linien zeigen den maximalen Einsatzbereich von Bandfilterpressen (40 m<sup>3</sup>/h; orange) sowie Schneckenpressen (30 m<sup>3</sup>/h; grün) bei der stationären Entwässerung. ....76
- Abbildung 44: Abhängigkeit der Entwässerungsdauer (Bereich von 7 bis 30 Tage) auf den erforderlichen Klärschlammumsatz zur mobilen Entwässerung des im Schlammstapelbehälter enthaltenen Klärschlammes in Bezug zur Lagerzeit und der Einwohnerzahl. Die durch die farbigen Geraden begrenzten Bereiche markieren die gewählte minimale (3 Tage) und maximale (30 Tage) Entwässerungsdauer. Angabe des maximal möglichen Umsatzes von Zentrifugen bis 70 m<sup>3</sup>/h. Gestrichelte Linien zeigen den maximalen Einsatzbereich von Filterpressen (bis 20 m<sup>3</sup>/h; orange) bei der mobilen Entwässerung. ....78
- Abbildung 45: Polymerer Flockungsmittelverbrauch ( $B_{pFM}$  in kg pro Tag) in Abhängigkeit des Entwässerungsaggregates und der Einwohnerzahl. Spezifischer pFM-Verbrauch von Zentrifugen beträgt 8 bis 14 kg pFM/t TM und von Bandfilter- sowie Schneckenpressen 6 bis 12 kg pFM/t TM. ....79
- Abbildung 46: Energieverbrauch bei der Entwässerung in Abhängigkeit des Entwässerungsaggregates und der Einwohnerzahl. Spezifische Stromverbräuche bezogen auf Schlammumsatz einschließlich Stromverbrauch der Beschickungspumpe und Konditionierungsanlage aus Tabelle 18. ....80
- Abbildung 47: Benötigte Speicherkapazität für das bei der Entwässerung anfallende Schlammwasser in Abhängigkeit der Einwohnerzahl für Kläranlagengrößen 1 bis 3. SWS-Volumen berechnet anhand des spezifischen Schlammwasser-Rückbelastung von  $q = 1,7 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$  und bezogen auf angenommene Lagerdauern von 1 Monat bis 12 Monaten im SSB ohne Sicherheitsfaktor. ....81
- Abbildung 48: Anfallendes Schlammwasser in Abhängigkeit der Entwässerungsdauer (Bereich von 7 bis 30 Tage) bei einer Entwässerung des Klärschlammes auf 25 % TR in Bezug zur Lagerzeit im Schlammstapelbehälter und der Einwohnerzahl. Die farbigen Bereiche markieren die gewählte minimale (7 Tage) und maximale (30 Tage) Entwässerungsdauer. ....82
- Abbildung 49: Theoretisch mittlerer benötigter Sauerstoffbedarf ( $OV_{d,am}$ ) zum Kohlenstoffabbau und zur Nitrifikation berechnet aus der CSB-Fraktionierung nach (DWA-A 131 2016) und den Konzentrationen im Zulauf nach Tabelle 28 in Abhängigkeit von der täglichen Schlammwassermengen aus der Entwässerung von Klärschlamm (Daten siehe Tabelle 28). ( $n = 17$ ). Beispielkläranlage mit 3.000 EW (schwarz) und 8.000 EW (rot). ....85
- Abbildung 50: Theoretischer täglicher Fällmittelbedarf ( $Q_{d,FM}$ ) zur Phosphorelimination mit Eisen-III-Chloridsulfat berechnet aus den Zulaufkonzentrationen in Tabelle 28 in Abhängigkeit von der täglichen Schlammwassermengen aus der

---

Entwässerung von Klärschlamm (Daten siehe Tabelle 28). ( $n = 17$ ). Beispielkläranlage mit 3.000 EW (schwarz) und 8.000 EW (rot). .....	86
Abbildung 51: Kostenvergleichsrechnung für drei Konzepte (Konzept 1: landwirtschaftliche Verwertung; Konzept 2: mobile Entwässerung; Konzept 3: stationäre Entwässerung) mit Darstellung der a) Jahreskosten in €/a und b) spezifischen Kosten €/t $TM^{-1}$ in Abhängigkeit der Einwohnerwerte.....	90
Abbildung 52: Ablaufschema zur systematischen Entwicklung von Varianten zur Klärschlammbehandlung für kleine und mittlere Kläranlagen.....	92
Abbildung 53: Vereinfachte Darstellung eines möglichen Aufbaus für ein gemeinsames Entsorgungskonzeptes zur Klärschlammbehandlung und -entsorgung....	104
Abbildung 54: Annahmemöglichkeiten von Fremdschlämmen bei einer zentralen Entsorgung von Klärschlämmen in Abhängigkeit der Schlammqualität....	105





## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Darstellung der Arbeitspakete.....	2
Tabelle 2:	Probenahme- und Analyseumfang. ....	3
Tabelle 3:	Abfrageergebnisse zur Entwässerung und Trocknung mit Angabe zur Ausbaugröße und Anzahl kommunaler Kläranlagen in Bayern. Keine Angabe bei a: 245 KA, b: 275 KA, c: 276 KA und d: 299 KA. (LfU, 2021 (Stand: 2020), DABay-Abfrageergebnisse zur Entwässerung und Trocknung (Stand: 2019). ....	7
Tabelle 4:	Abfrageergebnisse (DABay, Stand: 2019) zur Entwässerungsart für Kläranlagen der GK 1 bis 3. AB: Abwasserteichanlage belüftet, A: Abwasserteich unbelüftet, A+X: Abwasserteichanlage mit technischer Zwischenstufe, B: Belebungsanlage, BS: Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabilisierung, MECH: Mechanische Reinigungsanlage/Behelfsanlage, B+X: Mehrstufige biologische Kläranlage, PF/BIFOS/SVA: Pflanzenkläranlage/Bepflanzter Bodenfilter/Hybridanlagen, RK: Rotationskörperanlage, TK: Tropfkörperanlage.....	8
Tabelle 5:	Übersicht des bayerischen Klärschlammfalls nach Regierungsbezirken und Strukturen aufgeteilt. Aufteilung ländlich: $\leq 125$ E/km <sup>2</sup> ; ländlich dicht: $> 125$ bis $\leq 500$ E/km <sup>2</sup> , städtisch: $> 500$ bis $\leq 1.750$ E/km <sup>2</sup> , großstädtisch: $> 1.750$ E/km <sup>2</sup> (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021). ....	12
Tabelle 6:	Grenzwerte für Schwermetalle und organische Stoffe nach BBodSchV Anhang 2. ....	18
Tabelle 7:	Grenz- und Schwellenwerte nach der AbfKlärV und DüMV in Anlehnung an (DWA-M 384 GD 2021).....	24
Tabelle 8:	Kennzeichnungsschwellen nach Anlage 2 Tabelle 1 DüMV. Entsprechende Toleranzen, Einschränkungen, Ergänzungen und Hinweise sind der Anlage 2 Tabelle 1 DüMV zu entnehmen. ....	26
Tabelle 9:	Grenzwerte für Fremdbestandteile nach § 4 Abs. 1 Nr. 4 DüMV.....	26
Tabelle 10:	Analysekosten für die klärschlammbezogenen Untersuchungspflichten nach AbfKlärV. *DüMV-Parameter im Angebot enthalten. Stand 2021. ....	29
Tabelle 11:	Untersuchungsparameter und ungefähre Analysekosten bei der Einfachbestimmung für deklarationspflichtige Parameter aus der DüMV mit Angabe von Empfehlungen nach (Agrolab Group 2019). Stand 2021.....	30
Tabelle 12:	Vergleich der Analysekosten bei bodenbezogener Verwertung und Verbrennung von Klärschlamm. Stand: 2021. ....	32
Tabelle 13:	Übersicht der ausgewählten bayerischen Kläranlagen zur Untersuchung des Schlammwassers mit Darstellung von ausgewählten Kenndaten. SB#00: Südbayern, MB#00: Mittelbayern, NB#00: Nordbayern, BS:	

	Belebung mit gemeinsamer Schlammstabilisierung, SBR: Sequencing Batch Reactor, B&F: Belebung und Faulung, Z: Zentrifuge, KFP: Kammerfilterpresse, SP: Schneckenpresse. ....	36
Tabelle 14:	Analysierte Parameter (Kategorie B) von Schlammwasser aus der Klärschlammwässerung bei ausgewählten bayerischen Kläranlagen. *Angaben von Kläranlagen im Jahr 2020. ....	46
Tabelle 15:	Analysierte Parameter (Kategorie A) von Schlammwasser aus der Klärschlammwässerung bei ausgewählten bayerischen Kläranlagen. ....	47
Tabelle 16:	TR-Verläufe des zu entwässernden und des entwässerten Klärschlammes aus den Entwässerungsprotokollen für die Kläranlagen SB#01, SB#02, SB#03, SB#06, SB#07, und MB#11 (Probenahmen jeweils im Laufe der Entwässerung, meist an 1 bis 5 Tagen).....	48
Tabelle 17:	Konzentrationen im Schlammwasser auf ausgewählten bayerischen Kläranlagen und Berechnung der spezifischen Rückbelastung bei direkter Rückführung des Schlammwassers in den Zulauf der Kläranlage. Berechnung der spezifischen Werte $b_{x,E,d} = C_x \cdot q_{\text{Schlammwasser}}$ mit $q_{\text{Schlammwasser}} = 1,7 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$ . ....	55
Tabelle 18:	Leistungsdaten von Entwässerungssystemen (DWA-M 366 2013).....	59
Tabelle 19:	Vor- und Nachteile einer mobilen und stationären Entwässerung in Anlehnung an (DWA Arbeitsgruppe AK-13.4 2010).....	61
Tabelle 20:	Vor- und Nachteile der solaren Trocknung von Klärschlamm in Anlehnung an (DWA-M 379 2021).....	65
Tabelle 21:	Zulauffrachten und Rohschlammengen gemäß (DWA-M 368 2014) und (ATV-DVWK-A 198 2003) bezogen auf 8.000 EW und 3.000 EW.....	72
Tabelle 22:	Erforderliche Schlammstapelbehälter-Kapazität in Abhängigkeit von der Lagerdauer bezogen auf 3.000 EW und 8.000 EW ohne Sicherheitsfaktor. ....	74
Tabelle 23:	Kenndaten von verschiedenen Entwässerungsaggregaten für die stationäre Entwässerung nach (DWA-M 366 2013). ....	75
Tabelle 24:	Erforderliche Schlammumsatzmenge in Abhängigkeit des Entwässerungsintervalls bei einer angenommenen stationären Entwässerung des gesamten Klärschlammes innerhalb von 3, 7, 14 und 30 Tagen bezogen auf 3.000 EW und 8.000 EW. Die markierten Zellen symbolisieren den Einsatzbereich der Entwässerungsaggregate nach Tabelle 23 (grün: Zentrifugen, orange: Bandfilterpressen und Zentrifugen, blau: Schneckenpresse, Bandfilterpresse und Zentrifuge; Durchsätze bei stationärer Entwässerung: Schneckenpressen (1 m <sup>3</sup> /h bis 30 m <sup>3</sup> /h), Bandfilterpresse (2 m <sup>3</sup> /h bis 40 m <sup>3</sup> /h) und Zentrifuge (1 m <sup>3</sup> /h bis 200 m <sup>3</sup> /h). ....	77

Tabelle 25:	Erforderliche Schlammdurchsatzmenge in Abhängigkeit des Entwässerungsintervalls bei einer angenommenen mobilen Entwässerung des gesamten Klärschlammes innerhalb von 3, 7, 14 und 30 Tagen bezogen auf 3.000 EW und 8.000 EW. Die markierten Zellen symbolisieren den Einsatzbereich der Entwässerungsaggregate (grün: Zentrifugen, orange: Filterpressen und Zentrifugen).....	78
Tabelle 26:	Erforderliche Schlammwasser-Kapazität in Abhängigkeit von der Lagerdauer im SSB bezogen auf 3.000 EW und 8.000 EW ohne Sicherheitsfaktor. ....	81
Tabelle 27:	Anfallende Schlammwassermengen und -frachten in Abhängigkeit der Lagerzeit im Schlammstapelbehälter und einer angenommenen Entwässerung des Klärschlammes innerhalb von 3, 7, 14 und 30 Tagen bezogen auf 3.000 EW und 8.000 EW. Prozentuale Anteile beziehen sich auf die Grundbelastung bei 3.000 EW (450 m <sup>3</sup> /d; 33 kg TKN/d) und 8.000 EW (1.200 m <sup>3</sup> /d; 88 kg TKN/d). Prozentuale Anteile bei 8.000 EW entsprechen denen bei 3.000 EW. Mittlere TKN-Konzentration im Schlammwasser $C_{TKN} \approx 250$ mg/L. ....	83
Tabelle 28:	Berechnete Konzentration im Zulauf der Beispielkläranlage mit 3.000 EW bestehend aus Grundlast und Rückbelastung in Abhängigkeit der Entwässerungsdauer und Lagerung im Schlammstapelbehälter. Konzentrationen berechnet über die Fracht ( $B_{d,x,Zulauf} + B_{d,SW}$ ) und Abwassermengen ( $Q_{d,x,Zulauf} + Q_{d,SW}$ ). $B_{d,SW}$ berechnet mit mittleren Schlammwasserkonzentrationen aus Tabelle 17 und Schlammwassermengen über 1,7 L/(E·d). Grundbelastung (0 d) der Beispielkläranlage mit 3.000 EW in Tabelle 21. Sauerstoffbedarf für den Kohlenstoffabbau ( $OV_{d,C}$ ) und für die Nitrifikation ( $OV_{d,N}$ ) berechnet anhand CSB-Fraktionierung nach (DWA-A 131 2016). Mittlerer Sauerstoffbedarf ( $OV_{d,aM}$ ) als Summe von $OV_{d,C}$ und $OV_{d,N}$ . Fällmittelbedarf für die Phosphorelimination aufgrund der Phosphor-Zulaufkonzentrationen und eine Wirksubstanz von 12,3 %, $\beta_{Fall} = 1,2$ , $\rho = 1,52$ kg/dm <sup>3</sup> .....	84
Tabelle 29:	Klärschlammfall in Abhängigkeit der Einwohnerwerte als Voraussetzung für die Kostenvergleichsrechnung der Modellkläranlagen. ....	87



## Abkürzungsverzeichnis (Auswahl)

Symbol	Beschreibung
<b>A</b>	Abwasserteich unbelüftet
<b>a</b>	Jahr
<b>A+X</b>	Abwasserteichanlage mit technischer Zwischenstufe
<b>AbfKlärV</b>	Klärschlammverordnung (Bundesregierung 2017)
<b>AbwV</b>	Abwasserverordnung (Bundesregierung 1997)
<b>AFS</b>	Abfiltrierbare Stoffe
<b>AP</b>	Arbeitspaket
<b>B</b>	Belebungsanlage
<b>B&amp;F</b>	Belebung und Faulung
<b>B+X</b>	Mehrstufige biologische Kläranlage
<b>BBodSchV</b>	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (Bundesregierung 1999)
<b>BS</b>	Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabilisierung
<b>CSB</b>	Chemischer Sauerstoffbedarf
<b>d</b>	Tag
<b>DABay</b>	Datenverbund Abwasser Bayern
<b>DüMV</b>	Düngemittelverordnung (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2012)
<b>DüV</b>	Düngeverordnung (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; Bundesministerium der Finanzen 2017)
<b>EPS</b>	Extrazelluläre Polymere Substanzen
<b>EW</b>	Einwohnerwert
<b>GK</b>	Größenklasse
<b>GV</b>	Glühverlust
<b>KA</b>	Kläranlagen
<b>KFP</b>	Kammerfilterpresse

Symbol	Beschreibung
<b>M</b>	Mittelwert
<b>MB#00</b>	Mittelbayern
<b>MECH</b>	Mechanische Reinigungsanlage/Behelfsanlage
<i>n</i>	Anzahl der Stichproben
<b>NB#00</b>	Nordbayern
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	Ammonium-Stickstoff
<b>NO<sub>2</sub>-N</b>	Nitrit-Stickstoff
<b>NO<sub>3</sub>-N</b>	Nitrat-Stickstoff
<b>OV</b>	Sauerstoffbedarf
<b>PF/BIFOS/SVA</b>	Pflanzenkläranlage/Bepflanzter Bodenfilter/Hybridanlagen
<b>pFM</b>	polymeres Flockungsmittel
<b>P<sub>ges</sub></b>	Gesamtphosphor
<b>PO<sub>4</sub>-P</b>	Orthophosphat-Phosphor
<b>PS</b>	Primärschlamm
<b>RK</b>	Rotationskörperanlage
<b>SB#00</b>	Südbayern
<b>SBR</b>	Sequencing Batch Reactor
<b>SD</b>	Standardabweichung
<b>SP</b>	Schneckenpresse
<b>SSB</b>	Schlammstapelbehälter
<b>SW</b>	Schlammwasser
<b>SWS</b>	Schlammwasserspeicher
<i>T</i>	Temperatur
<b>TK</b>	Tropfkörperanlage
<b>TM</b>	Trockenmasse
<b>TN<sub>b</sub></b>	gesamt gebundener Stickstoff
<b>TR</b>	Trockenrückstand
<b>TS</b>	Trockensubstanz
<b>ÜSS</b>	Überschussschlamm

---

Symbol	Beschreibung
<b>V</b>	Variante
<b>WS</b>	Wirksubstanz
<b>Z</b>	Zentrifuge





# 1 Einleitung

## 1.1 Veranlassung und Zielsetzung

Aufgabe der Klärschlammbehandlung ist es, die bei der Abwasserbehandlung anfallenden Klärschlämme derart vorzubereiten, dass sie schadlos, d. h. möglichst ohne negativen gesamtökologischen Einfluss entsorgt werden können.

Die Entsorgungsstruktur von Klärschlamm hat sich nicht zuletzt durch die novellierte Klärschlammverordnung (AbfKlärV; (Bundesregierung 2017)) zunehmend verändert. Die getroffenen Änderungen erfordern eine Anpassung bei der landwirtschaftlichen Verwertung, wobei die rechtlichen Anforderungen der Düngerverordnung (DüV; (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; Bundesministerium der Finanzen 2017)) und Düngemittelverordnung (DüMV; (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2012)) zu berücksichtigen sind. Die Änderungen haben auch Auswirkungen auf die Analyse- und Untersuchungspflichten.

In Zukunft wird erwartet, dass im Gegensatz zur bodenbezogenen Klärschlammverwertung die thermische Klärschlammbehandlung weiter an Bedeutung gewinnen wird, ggf. in Verbindung mit einem lokalen Klärschlammverbund, bestehend aus einer interkommunalen Zusammenarbeit mehrerer Kläranlagenbetreiber.

In besonderer Weise sind Betreiber kleiner und mittlerer Kläranlagen der Größenklasse 1 bis 3, d. h. bis zur einer Ausbaugröße von 10.000 Einwohnerwerten (EW) betroffen, da in der Regel keine stationäre Klärschlammmentwässerung vorhanden ist. Neben der Fragestellung der maschinellen (mobilen) Entwässerung muss hierbei auch das anfallende Schlammwasser aus der Entwässerung berücksichtigt werden, was bei der Schlammbehandlung anfällt und zu Rückbelastungen auf der Kläranlage führt. Aufgrund der gestiegenen Anforderungen wird der Weg über die landwirtschaftliche Verwertung zunehmend erschwert.

Im Rahmen des Vorhabens soll daher der Leitfaden „*Klärschlammbehandlung auf kleinen und mittleren Kläranlagen*“ erarbeitet werden, welcher die aktuellen Erkenntnisse übersichtlich zusammenstellt. Damit sollen Kläranlagenbetreibern und Planern Informationen und Kriterien zur Unterstützung des Betriebs und zur Erstellung von nachhaltigen Konzepten für eine gesicherte Klärschlamm Entsorgung geliefert werden.

## 1.2 Arbeitsprogramm

Durch die novellierte Klärschlammverordnung hat sich die Art der Klärschlammentsorgung zunehmend geändert, was vorwiegend für die landwirtschaftliche Verwertung bei kleineren und mittleren Kläranlagenbetreibern unterschiedliche Analyse- und Untersuchungspflichten mit sich bringt. Dieses Vorhaben zielt aus diesem Grund darauf ab, Kläranlagenbetreibern der Größenklasse 1 bis 3 sowie Planern und Behörden einen Leitfaden bereit zu stellen, um nachhaltige Konzepte für eine gesicherte Klärschlammentsorgung unter Berücksichtigung von ökonomischen und betrieblichen Aspekten zu erarbeiten.

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der Arbeitspakete für die Erarbeitung des Leitfadens.

Im ersten Schritt (Arbeitspaket 1) werden die Untersuchungspflichten bei der landwirtschaftlichen sowie landschaftsbaulichen Verwertung anhand der geltenden Gesetzeslage im Detail zusammengetragen und hinsichtlich der zu untersuchenden Parameter sowie der Untersuchungshäufigkeiten übersichtlich dargestellt. Auf Grundlage dieser Zusammenstellung werden die entstehenden Untersuchungskosten für Kläranlagenbetreiber ermittelt und hinsichtlich der betrieblichen, gesetzlichen und wirtschaftlichen Aspekte bewertet.

Im weiteren Schritt (Arbeitspaket 2) werden ausgewählte bayerische Kläranlagen der GK 1 bis 3 besichtigt und der Ist-Zustand der (mobilen) Entwässerung des Klärschlammes im Hinblick auf die aktuelle Abwasserbehandlung der Kläranlagen sowie die Zusammensetzung der Schlammwasserbeschaffenheit aufgenommen. Daneben werden die Kontextdaten wie bspw. der Stand der Schlamm Speicher/Speicher für Schlammwasser und die derzeitige Klärschlamm Trocknung erfasst, um den saisonalen Betrieb der Klärschlamm Entwässerung bei der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zu berücksichtigen. Anhand der aufgenommenen Daten werden die Auswirkungen auf die Verfahrenstechnik zur Entwässerung und Trocknung beurteilt. Bei den Vor-Ort-Terminen werden Proben aus dem Filtrat bzw. Zentratwasser der (mobilen) Entwässerung entnommen und hinsichtlich der abwasserrelevanten Parameter analysiert.

Die zu untersuchenden Kläranlagen werden in zwei Kategorien (A) und (B) unterteilt, vgl. Tabelle 2.

Tabelle 1: Darstellung der Arbeitspakete.

Arbeitspaket	Beschreibung
AP 1	Zusammenstellung der Untersuchungspflichten und Abschätzung der Analysekosten bei der bodenbezogenen Verwertung
AP 2	Durchführung eines Messprogramms auf ausgewählten Kläranlagen
AP 3	Erarbeitung und Zusammenstellung von Informationen und Kriterien für eine nachhaltige Klärschlammentsorgung inkl. Verfahrenstechnik
AP 4	Erstellen eines Leitfadens zur Schlammbehandlung

Tabelle 2: Probenahme- und Analyseumfang.

Kategorie	(A)	(B)
Anzahl Kläranlagen	4 Süd- 2 Mittel- 1 Nordbayern	2 Süd- 2 Mittel- 2 Nordbayern
Umfang	jeweils an 3 Tagen je 2 Proben	einmalig
Parameter	Abfiltrierbare Stoffe (AFS) gesamt gebundener Stickstoff (TN <sub>b</sub> ) Gesamtphosphor (P <sub>ges</sub> ) Orthophosphat-Phosphor (PO <sub>4</sub> -P) Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) Ammonium-Stickstoff (NH <sub>4</sub> -N) Nitrit-Stickstoff (NO <sub>2</sub> -N) Nitrat-Stickstoff (NO <sub>3</sub> -N)	Abfiltrierbare Stoffe (AFS) gesamt gebundener Stickstoff (TN <sub>b</sub> ) Gesamtphosphor (P <sub>ges</sub> ) Orthophosphat-Phosphor (PO <sub>4</sub> -P) Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) Ammonium-Stickstoff (NH <sub>4</sub> -N)

Neben dem in Tabelle 2 genannten Analyseumfang und den physikalisch/chemischen Parametern (pH-Wert, Temperatur und Leitfähigkeit) werden zusätzlich Proben des entwässerten Klärschlammes genommen und die Parameter Trockenrückstand (*TR*) und Glühverlust (*GV*) als Leitparameter analysiert. Anhand der Untersuchungen können Schlussfolgerungen auf die Rückbelastung durch die Rückführung von Schlammwasser aus der (mobilen) Entwässerung gezogen werden.

Im Hinblick auf die Bewertung der Belastungssituation der Kläranlagen sowie der betrieblichen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen einer Rückbelastung werden die gewonnenen Erkenntnisse aus den Analysenauswertungen des Filtrat- und Zentratwassers, sowie einer Bestandsaufnahme bereits durchgeführter Studien/Publicationen zum Thema Klärschlamm-entwässerung und Rückbelastung, zusammengefasst. Aus den Erkenntnissen lassen sich Kriterien und Randbedingungen festlegen, mit dem Ziel ein Bewertungsverfahren zu entwickeln, das die Kläranlagenbetreiber beim Entscheidungsprozess der zukünftigen Klärschlamm-entsorgung unterstützt (Arbeitspaket 3).

Abschließend wird in Abstimmung mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) der Leitfaden „Klärschlammbehandlung auf kleinen und mittleren Kläranlagen“ erstellt (Arbeitspaket 4). Die Ergebnisse aus den Grundlagen der Klärschlammbehandlung, der relevanten Aspekte der Klärschlammbehandlung und der Entscheidungskriterien lassen sich hierfür mit den zuvor gewonnenen Erkenntnissen aus den Arbeitspaketen 1 bis 3 bündeln.

**Der vorliegende Abschlussbericht beinhaltet die detaillierten Ergebnisse des gesamten Vorhabens und bildet dabei die Grundlage für den Leitfaden (separates Dokument).**

### 1.3 Danksagung

Die Projektbearbeitung zur Erstellung eines Leitfadens zur Entwässerung, Trocknung und Entsorgung von Klärschlamm kleiner und mittlerer Kläranlagen war nur durch die Unterstützung durch diverse Stellen möglich, wozu ein ausdrücklicher Dank gilt:

Der Projektfortschritt wurde in regelmäßigen Projektbesprechungen mit Vertreterinnen und Vertretern aus dem Bayerischen Landesamt für Umwelt sowie dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz diskutiert.

Die Probenahme und Vor-Ort-Aufnahme wurde unterstützt durch zahlreiche Kläranlagenbetreiber sowie von Betreibern von mobilen Klärschlammwässerungen.

Die besondere Situation von Abwasserteichanlagen wurde im Rahmen von Expertengesprächen mit verschiedenen Vertretern von bayerischen Wasserwirtschaftsämtern sowie Betreibern von Abwasserteichanlagen diskutiert.

Die Analysen der Schlammwasser- und Klärschlammproben erfolgten durch das Labor der Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität der Bundeswehr München, insbesondere durch Frau Hannelore Bauer, Karolina Eggersdorfer, Sybille Rupertseder sowie Renate Solmsdorf.

## 2 Klärschlamm Entsorgung kleiner und mittlerer Kläranlagen

### 2.1 Kleine und mittlere Kläranlagen in Bayern

#### 2.1.1 Definition kleine und mittlere Kläranlagen

Gemäß der Abwasserverordnung (AbwV; (Bundesregierung 1997)) sind Kläranlagen der Größenklasse (GK) 1 bis 3 definiert als Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von < 1.000 EW (GK 1), 1.000 bis 5.000 EW (GK 2) sowie 5.001 bis 10.000 (GK 3). Die Kläranlagen der GK 1 und 2 müssen nach AbwV Anforderungen bezüglich der Kohlenstoffelimination, die GK 3 zusätzlich Anforderungen der Nitrifikation erfüllen. Abhängig von den örtlichen Randbedingungen sind zusätzliche weitergehende Anforderungen möglich.

Definitionsgemäß sind Kleinkläranlagen Abwasserbehandlungsanlagen, die getrennt erfasstes häusliches Schmutzwasser bis max. 50 Einwohnerwerte (EW) behandeln. Ab 50 bis 5.000 EW handelt es sich um kleine Kläranlagen und liegen im Geltungsbereich der GK 1 bis 2 (Loy und Seyler 2011; Merkel 2010; Boller et al. 2002) .

Bedingt durch die betrieblichen und wasserrechtlichen Anforderungen an die Abwasserbehandlung kommen in Abhängigkeit von der Größe der Kläranlage bevorzugt bestimmte verfahrenstechnische Konzepte zum Einsatz:

GK 1: (Rechen, Sandfang) Abwasserteichanlage (un-/ belüftet), Tropfkörper-, Rotationstauchkörperanlage

GK 2: Rechen, Sandfang, Belebung mit gemeinsamer aerober Schlammstabilisierung (Stabilisierungsanlage)

GK 3: Rechen, Sandfang, Belebung mit gemeinsamer aerober Schlammstabilisierung, (Stabilisierungsanlage)

In aller Regel findet eine Klärschlammfäulung, insbesondere bei Kläranlagen der GK 1 und 2, nicht statt.

Das bei Stabilisierungsanlagen hohe Schlammalter (> 25 d) bedingt eine Stabilisierung des Klärschlammes. Der Überschussschlamm wird regelmäßig abgezogen und in Stapelbehältern gespeichert, ggf. auch in Kombination mit einer (maschinellen) Überschussschlammverdickung (DWA-A 226 2009).

#### 2.1.2 Kleine und mittlere Kläranlagen in Bayern

In Bayern findet sich eine Vielzahl von kleinen ländlichen Kläranlagen (GK 1, < 1.000 EW), die etwa 45 % (1.101 Kläranlagen) der derzeitigen 2.439 kommunalen Kläranlagen ausmachen (LfU 2021).

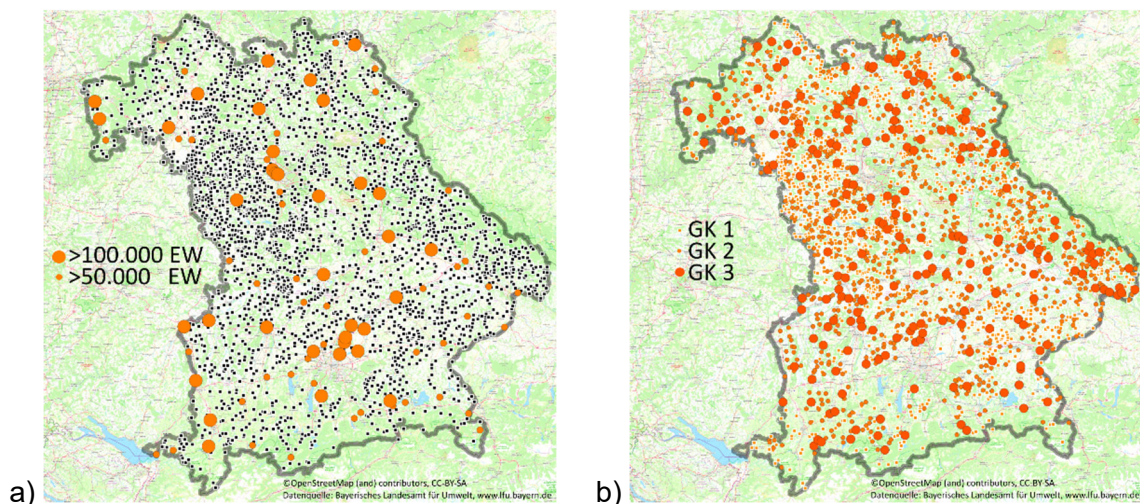


Abbildung 1: a) 2.624 Kläranlagen (KA) in Bayern unterteilt in > 50.000 EW (82 KA) und > 100.000 EW (36 KA) sowie b) unterteilt in Größenklasse 1 (1.232 KA), Größenklasse 2 (783 KA) und Größenklasse 3 (214 KA). Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Stand: 2014). ©OpenStreetMap and contributors, CC-BY-SA.

Eine Übersicht der geografischen Lage der bayerischen Kläranlagen aus dem Jahr 2014<sup>1</sup> nach Einwohnerwerten und Größenklasse 1 bis 3 sind in Abbildung 1 a) und b) dargestellt. Vor allem in Mittelfranken finden sich viele Kläranlagen der GK 1 und GK 2.

Die Verteilung der angewandten Verfahrenstechnik zur Abwasserbehandlung bei Kläranlagen der GK 1 bis 3 für das Jahr 2020 ist in Abbildung 2 dargestellt. Abwasserbehandlungsanlagen der GK 1 werden zu etwa 50 % als unbelüftete Abwasserteichanlagen betrieben. Hinzu kommen weitere Abwasserteichvarianten wie belüftete Abwasserteichanlagen (ca. 5 %) und Abwasserteichanlagen mit technischer Zwischenstufe (ca. 10 %). Bei GK 2-Anlagen erfolgt die Abwasserbehandlung überwiegend (ca. 50 %) mit Stabilisierungsanlagen, welche auch bei Abwasserbehandlungsanlagen der GK 3 den größten Anteil ausmachen (ca. 70 %) (LfU 2021).

Nach der DABay-Abfrage<sup>2</sup> (Stand: 2019) entwässern primär kleine und mittlere Kläranlagen mit  $GK < 3$  den anfallenden Klärschlamm mit mobilen Entwässerungsaggregaten, wobei auch bei Kläranlagen der GK 4 eine vergleichbare Anzahl angegeben worden ist. Erwartungsgemäß nimmt die Anzahl an stationären Entwässerungssystemen mit der Ausbaugröße der Kläranlagen zu. Nach der DABay-Abfrage werden vorübergehend auch mobile Entwässerungsaggregate auf Kläranlagen der GK 5 angewandt, z. B. bei der Leerung und Reinigung von Faultürmen.

<sup>1</sup> Die Anzahl der Kläranlagen variiert in Abhängigkeit vom Bezugsjahr, vor allem durch das Auflösen von Kleinkläranlagen/kleinen Kläranlagen.

<sup>2</sup> Datenverbund Abwasser Bayern (DABay), <https://dabay.bayern.de/dabay-portal-startseite/>



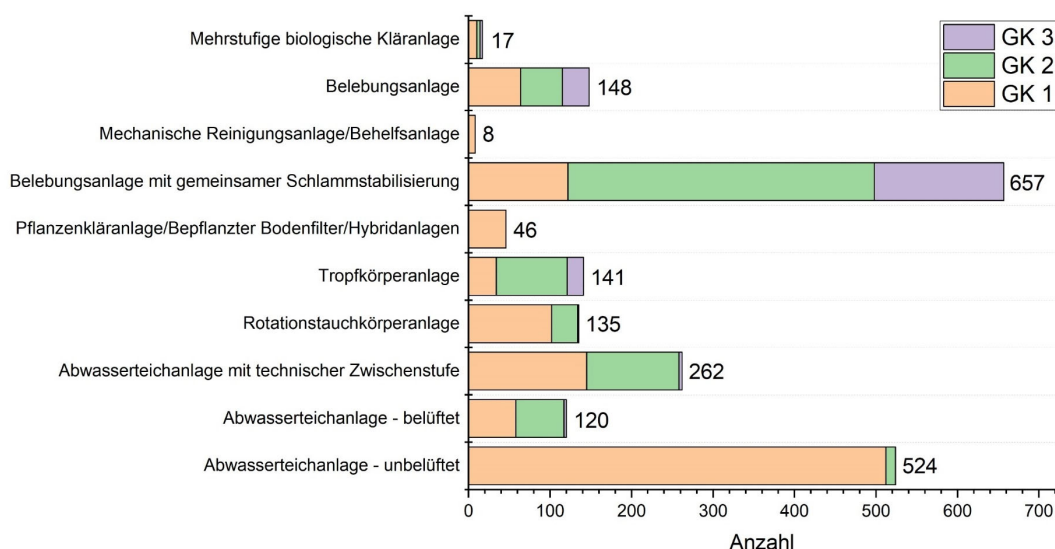


Abbildung 2: Verteilung der angewandten Verfahrenstechniken bei der Abwasserbehandlung von Kläranlagen GK 1 bis 3 in Bayern (LfU 2021, (Stand: 2020)).

Tabelle 3: Abfrageergebnisse zur Entwässerung und Trocknung mit Angabe zur Ausbaugröße und Anzahl kommunaler Kläranlagen in Bayern. Keine Angabe bei a: 245 KA, b: 275 KA, c: 276 KA und d: 299 KA. (LfU 2021 (Stand: 2020), DABay-Abfrageergebnisse zur Entwässerung und Trocknung (Stand: 2019)).

Ausbaugröße	GK	Anzahl komm. Kläranlagen (LfU 2021)	Anzahl Abfrageergebnisse	Entwässerung		Trocknung	
				mobil <sup>a</sup>	stationär <sup>b</sup>	Standort <sup>c</sup>	extern <sup>d</sup>
in EW	-	-	-				
< 1.000	1	1.101	909	24	6	8	17
1.000 bis 5.000	2	734	661	158	39	20	63
5.001 bis 10.000	3	223	200	77	51	10	19
10.001 bis 100.000	4	345	317	118	174	26	46
> 100.000	5	36	34	4	28	8	3
<b>Summe</b>		<b>2.439</b>	<b>2.121</b>	<b>381</b>	<b>298</b>	<b>72</b>	<b>148</b>

Basierend auf einer detaillierten DABay-Abfrage zur Entwässerungsart der GK 1 bis 3 wird ersichtlich, dass bei Kläranlagen der GK 1 nur vereinzelt mobile Entwässerungen stattfinden (Tabelle 4). Bei unbelüfteten Abwasserteichanlagen wurden Stand 2019 nur 4 mobile und 3 stationäre Entwässerungen durchgeführt. Bei belüfteten Abwasserteichanlagen wurde lediglich eine mobile Entwässerung durchgeführt.

Tabelle 4: Abfrageergebnisse (DABay, Stand: 2019) zur Entwässerungsart für Kläranlagen der GK 1 bis 3. AB: Abwasserteichanlage belüftet, A: Abwasserteich unbelüftet, A+X: Abwasserteichanlage mit technischer Zwischenstufe, B: Belebungsanlage, BS: Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabilisierung, MECH: Mechanische Reinigungsanlage/Behelfsanlage, B+X: Mehrstufige biologische Kläranlage, PF/BIOF/SVA: Pflanzenkläranlage/Bepflanzter Bodenfilter/Hybridanlagen, RK: Rotationskörperanlage, TK: Tropfkörperanlage.

Anlagensystem	GK 1			GK 2			GK 3							
	mobil	stationär	Summe	mobil	stationär	Summe	mobil	stationär	Summe					
	k.A.	Ja	Nein	k.A.	Ja	Nein	k.A.	Ja	Nein					
AB	13	1	33	12	-	35	47	-	1	1	-	-	2	2
A	98	4	350	105	3	344	452	4	1	4	-	5	9	-
A+X	21	7	98	24	2	100	126	8	10	90	13	2	93	108
B	6	-	43	6	-	43	49	3	13	34	3	6	41	50
BS	11	7	69	13	1	73	87	13	113	216	20	26	296	342
MECH	1	-	5	1	-	5	6	-	-	-	-	-	-	-
B+X	-	-	5	-	-	5	5	-	2	2	-	-	4	4
PF/ BIOF/SVA	5	-	27	6	-	26	32	-	-	-	-	-	-	-
RK	8	4	70	8	-	74	82	2	4	23	2	-	27	29
TK	4	1	18	4	-	19	23	12	15	46	13	5	55	73
<b>Summe</b>	<b>167</b>	<b>24</b>	<b>718</b>	<b>179</b>	<b>6</b>	<b>724</b>	<b>909</b>	<b>52</b>	<b>158</b>	<b>451</b>	<b>65</b>	<b>39</b>	<b>557</b>	<b>661</b>
	<b>10</b>	<b>77</b>	<b>113</b>	<b>14</b>	<b>51</b>	<b>135</b>	<b>200</b>							



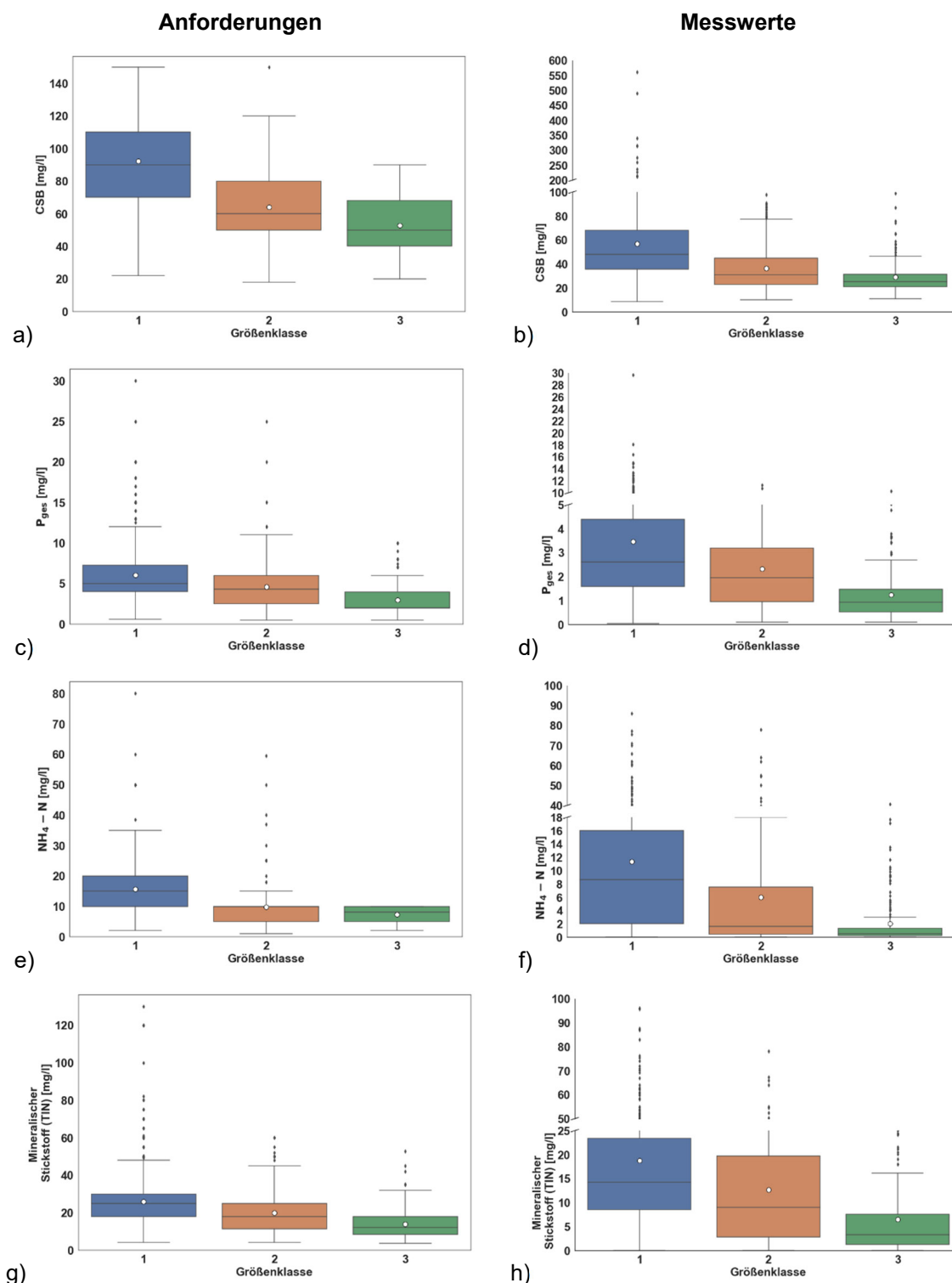


Abbildung 3: Qualitätsanforderungen nach Bescheid (links) im Ablauf von kommunalen Kläranlagen im Vergleich zu gemessenen Überwachungswerten (rechts, Kontrollmessung bei bayerischen kommunalen Kläranlagen der GK 1 bis 3 für die Parameter CSB, P<sub>ges</sub>, NH<sub>4</sub>-N und mineralischen Stickstoff (TIN). Stichprobenzahl (n) für Anforderungen/Messwerte: CSB: 1983/1990; P<sub>ges</sub>: 1967/1987; NH<sub>4</sub>-N: 575/1987; TIN: 1960/1987 (Daten: 2022, DABay-Abfrage, LfU 2022).

Die geforderten Ablaufwerte von bayerischen Kläranlagen (vgl. Abbildung 3) unterscheiden sich anhand ihrer Größenklasse 1 bis 3, wobei mit zunehmender Größenklasse die Anforderungen an die Ablaufwerte steigen. Wie in Abbildung 3 in der rechten Spalte zu sehen, liegen die gemessenen Überwachungswerte deutlich unter den geforderten Anforderungen. Besonders beim Ammonium-Stickstoff bei Kläranlagen der GK 3 (Abbildung 3 e) und f)) liegen die Kontrollmesswerte deutlich unter den geforderten Konzentrationen.

## **2.2 Kommunale Klärschlammentsorgung in Deutschland und Bayern**

### **2.2.1 Situation der Klärschlammentsorgung in Deutschland**

In Deutschland entstehen durch die kommunale Abwasserbehandlung rd. 1,74 Mio. t TM Klärschlamm pro Jahr, welche sich auf die thermische Behandlung, stoffliche Verwertung und sonstige direkte Entsorgung verteilen (Stand 2020). Die jährlich anfallende Klärschlammmenge hat dabei kontinuierlich abgenommen. Während im Jahr 1998 noch rd. 2,2 Mio. t TM angefallen sind, betrug die Klärschlammmenge im Jahr 2010 bereits rd. 1,88 Mio. t TM/a (Statistisches Bundesamt 2020).

Abbildung 4 zeigt die prozentuale Entwicklung der Klärschlammentsorgung in Deutschland seit 1998 und den steigenden Anteil an thermischer Behandlung. Stand 2020 wurden 77 % des anfallenden Klärschlammes thermisch behandelt, welche zu rd. 32 % der thermischen Monoverbrennung zugeführt wurden. Die landschaftsbauliche Verwertung nimmt seit 1998 kontinuierlich ab und betrug im Jahr 2020 lediglich 1,4 %, während die landwirtschaftliche Verwertung bei ca. 15 % lag. Die Deponierung von Klärschlamm ist nicht mehr zulässig (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019). In den kommenden Jahren ist mit einer Zunahme an thermischer Behandlung zu rechnen, während die landwirtschaftliche Verwertung deutlich eingeschränkt wird (Schaum et al. 2020; Statistisches Bundesamt 2020; Roskosch und Heidecke 2018).

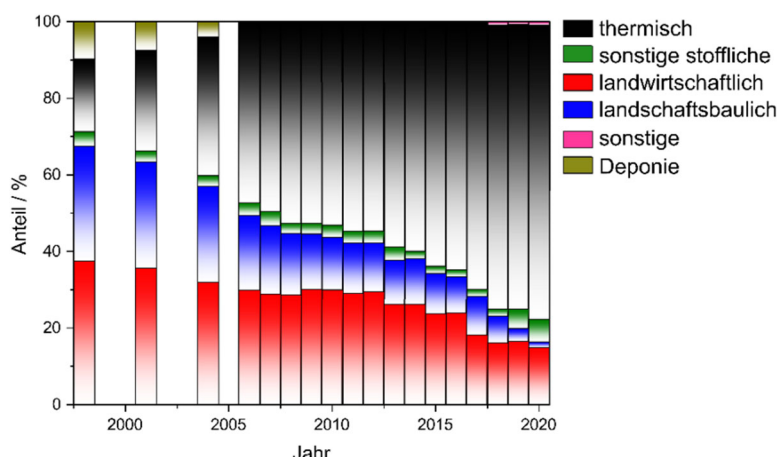


Abbildung 4: Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung in Deutschland seit 1998 bis 2020. Sonstige stoffliche Verwertung z. B. Vererdung, Kompostierung. (Statistisches Bundesamt 2020; Roskosch und Heidecke 2018).

### 2.2.2 Situation der Klärschlamm Entsorgung in Bayern

Im Jahr 2020 sind in Bayern insgesamt 270.502 t TM angefallen, welche sich in Abhängigkeit von der Struktur und Dichte der Besiedlung in Bayern verteilen (Tabelle 5). Die spezifische Klärschlammmenge betrug im Durchschnitt 20,7 kg TM/(E·a).

Von dem angefallenen Klärschlamm wurden 67 % innerhalb von Bayern (180.843 t TM/a) und 33 % (89.659 t TM/a) außerhalb von Bayern entsorgt. Vom landwirtschaftlich verwerteten Anteil wurden dabei 89 % innerhalb und lediglich 11 % außerhalb von Bayern entsorgt ((Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021) in Sonderauswertung zur Abfallbilanz).

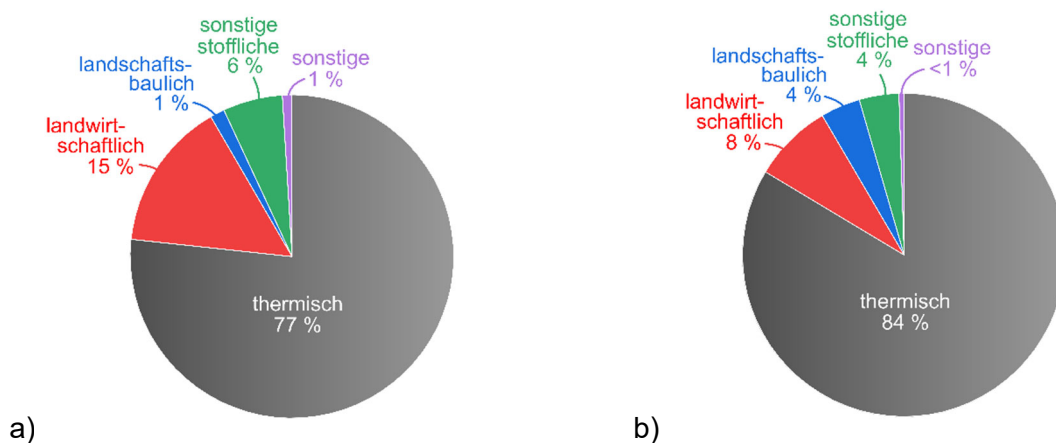


Abbildung 5: a) Prozentuale Verteilung der Klärschlamm Entsorgung in Deutschland (Stand: 2020). b) Prozentuale Verteilung der Klärschlamm Entsorgung in Bayern (Stand: 2020) (Statistisches Bundesamt 2020).

Tabelle 5: Übersicht des bayerischen Klärschlammmanfalls nach Regierungsbezirken und Strukturen aufgeteilt. Aufteilung ländlich:  $\leq 125 \text{ E/km}^2$ ; ländlich dicht:  $> 125 \text{ bis } \leq 500 \text{ E/km}^2$ , städtisch:  $> 500 \text{ bis } \leq 1.750 \text{ E/km}^2$ , großstädtisch:  $> 1.750 \text{ E/km}^2$  (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021).

Regierungsbezirk	Klärschlammmanfall	spez. Klärschlammmenge	
		t TM/a	kg TM/(E·a)
Oberbayern	86.186	18,3	50,1
Niederbayern	26.865	21,6	59,1
Oberpfalz	23.500	21,1	57,9
Oberfranken	22.961	21,6	59,2
Mittelfranken	32.601	18,4	50,4
Unterfranken	29.480	22,4	61,4
Schwaben	48.909	25,7	70,4
<b>Bayern gesamt</b>	<b>270.502</b>	<b>20,7</b>	<b>56,6</b>
ländlich	86.875	21,3	58,4
ländlich dicht	86.616	18,0	49,3
städtisch	36.920	22,3	61,1
großstädtisch	60.091	23,3	63,8

Wie auch die Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung in Deutschland zeigt, hat die landwirtschaftliche Verwertung in Bayern seit Mitte der 1990er Jahre stetig abgenommen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019). Während im Jahr 2015 der Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung noch bei rd. 15 % lag, betrug dieser im Jahr 2020 lediglich rd. 8 %. Im Gegensatz dazu ist der Anteil der thermischen Behandlung seit 2015 bis 2020 um 23 % angestiegen, auf rd. 84 % (siehe Abbildung 5 b, Stand: 2020 (Statistisches Bundesamt 2020)). Die Entwicklung der Klärschlamm Entsorgungswege in Bayern seit 1995 bis 2020 zeigt Abbildung 6.

Die Bayerische Staatsregierung hat beschlossen, dass das Ausbringen von Klärschlamm in der Landwirtschaft im Interesse eines nachhaltigen Verbraucherschutzes und aus Gründen des vorsorgenden Boden- und Gewässerschutzes mittelfristig beendet werden soll (siehe AbfPV Abschnitt III Nr. 1.2.4) (Bayerische Staatsregierung 2014).

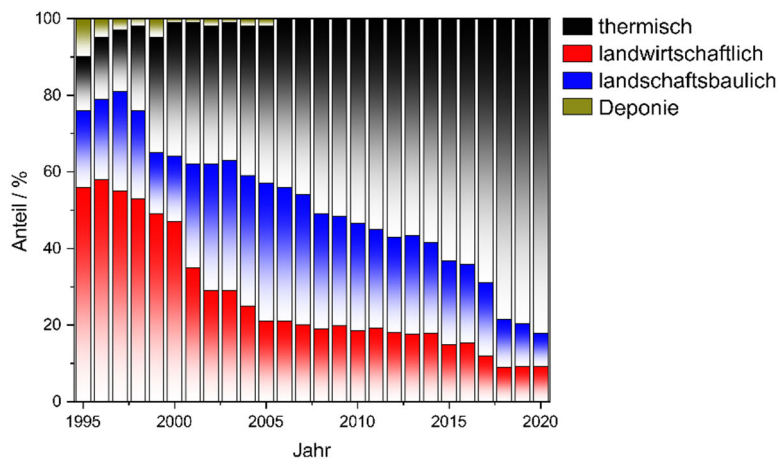


Abbildung 6: Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung in Bayern seit 1995 bis 2020 (Daten: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022).

### 2.2.3 Abwasserteichanlagen in Bayern

Die Kläranlagen der GK 1 bis 3 in Bayern sind zu einem Großteil kleine ländliche Kläranlagen. Dabei bestehen rd. 50 % der Abwasserbehandlungsanlagen mit der GK 1 in Bayern aus unbelüfteten Abwasserteichanlagen. Daneben finden sich belüftete Abwasserteichanlagen (rd. 5 %) und Abwasserteichanlagen mit technischer Zwischenstufe (rd. 10 %) (siehe Abbildung 2). Abwasserteichanlagen dienen zur mechanisch-biologischen Abwasserbehandlung von kommunalen Abwässern und zählen zu den großräumigen und naturnahen Verfahren.

Abwasserteiche unterteilen sich aufgrund ihrer Reinigungsvorgänge in Absetzteiche (Vorstufe vor einer weiteren Behandlung mit dem Ziel Schlämme abzutrennen und zu sammeln), unbelüftete und belüftete Teiche, Schönungsteiche (Qualitätsverbesserung und Konzentrationsausgleich) und Abwasserteichanlagen mit technischer Zwischenstufe (z. B. zwischengeschaltete Tropf- und Rotationstauchkörper) (LfU Sachsen-Anhalt 2006; DWA-A 201 2005).

Nur wenige Abwasserteichanlagen (un-/ belüftet oder mit technischer Zwischenstufe) entwässern den anfallenden Klärschlamm, was auch Tabelle 4 zeigt. Die Nassschlämme der Abwasserteichanlagen der GK 1 werden überwiegend direkt landwirtschaftlich verwertet oder zu anderen Kläranlagen transportiert. Im Gegensatz dazu entwässern Belebungsanlagen der GK 2 den anfallenden Klärschlamm in der Regel, wodurch der Anteil an der thermischen Behandlung deutlich zu nimmt (siehe Abbildung 7).

Durch lange Lagerzeiten ist der Schlamm aufgrund von Kaltfaulung anaerob stabilisiert. Bei einer Entschlammung und der maschinellen Entwässerung vor Ort kann das anfallende Schlammwasser i. d. R. nicht uneingeschränkt in die Teichanlage eingeleitet werden. Bei jahrelanger Lagerung werden geringere oTR-Gehalte erreicht, welche die Rückbelastung durch das anfallende Schlammwasser gering halten (DWA-A 201 2005).

Wenn im Anlagenzulauf kein Rechen vorhanden ist, müssen bei der direkten landwirtschaftlichen Verwertung von Nassschlamm die nicht verrotteten Bestandteile entfernt werden. Das Rechengut muss schließlich getrennt entsorgt werden, wobei der Stababstand im Schlammstrom 10 mm nicht überschreiten darf. Daneben müssen sich die Schlammstapelzeiten in den Teichen sowie die Entschlammung der Teiche an die zeitlichen Bedürfnisse der Landwirte richten. Ferner empfiehlt sich bei langjähriger Lagerung den Schlamm zwischen den Räumintervallen auf die Analysenparameter gemäß der Klärschlammverordnung zu untersuchen (DWA-A 201 2005).

Oft verfügen Abwasserteichanlagen jedoch nicht über einen Rechen, was zu Problemen bei Schlammernahme und -transport führen kann. Grobe Störstoffe können zu Verstopfungen und Beschädigungen von Ansaugpumpen führen, was die Kosten zur Entsorgung bzw. zum Transport erhöht. Mobile Entwässerungsfirmen besitzen meist eine Zerkleinerungsmaschine, um die vorhandenen Grobstoffe im Klärschlamm zu zerkleinern. Jedoch ist dafür die Pumpfähigkeit des Klärschlammes eine Voraussetzung.

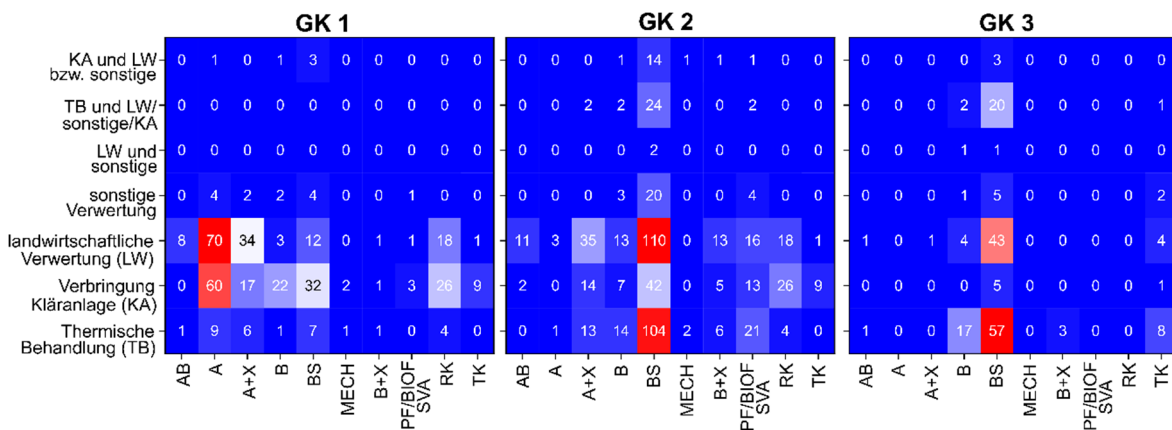


Abbildung 7: Entsorgungswege für anfallenden Klärschlamm der GK 1 bis 3 sortiert nach Verfahrenstechnik zur Abwasserbehandlung (Stand: 2019, DABay). Die Anzahl der Kläranlagen mit entsprechendem Entsorgungsweg ist als Zahl angegeben. Sonstige Verwertung entspricht Rekultivierung, Kompostierung und Rekultivierung, Kompostierung und Landschaftsbau. AB: Abwasserteichanlage belüftet, A: Abwasserteich unbelüftet, A+X: Abwasserteichanlage mit technischer Zwischenstufe, B: Belebungsanlage, BS: Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabilisierung, MECH: Mechanische Reinigungsanlage/Behelfsanlage, B+X: Mehrstufige biologische Kläranlage, PF/BIOF/SVA: Pflanzenkläranlage/Bepflanzter Bodenfilter/Hybridanlagen, RK: Rotationskörperanlage, TK: Tropfkörperanlage.

Als ein weiteres Problem stellt sich der oft fehlende Stromanschluss bei Abwasserteichanlagen dar, wodurch die Entfernung von Störstoffen mit Hilfe eines Rechens und auch eine mobile Entwässerung erschwert werden. Darüber hinaus müssen für eine maschinelle Entwässerung die Zufahrtsmöglichkeiten, eine befestigte Fläche und die Möglichkeit einer Klärschlamm- sowie Schlammwasser-Zwischenspeicherung gegeben sein. Für die Konditionierung des Schlammes (Polymerdosierstation) und zur Reinigung des Entwässerungsaggregates muss daneben ein Wasseranschluss vorhanden sein, was oft auf Abwasserteichanlagen nicht der Fall ist.

Von Rechengut vorgereinigte Klärschlämme können direkt in den Primärschlamm schacht bzw. direkt in den Schlamm speicherbehälter hinzugegeben werden.

Bei der Verbringung eines „nicht vorgereinigten“ Klärschlammes (durch Rechen oder Sandfang) auf eine andere Kläranlage wird dieser i. d. R. abhängig von der Klärschlammmenge zunächst zur Grobreinigung durch ein Annahmesystem geführt. Der Klärschlamm wird daraufhin in den Zulauf der Kläranlage gegeben, um weitere Feststoffteile und Sand zu entfernen. Von einer direkten Einbringung von nicht vorher „gereinigtem“ Klärschlamm in die Faulung wird abgeraten, da der erhöhte Feststoffanteil zu Problemen (z. B. Verzopfungen, geringerer Gasertrag) im Faulbehälter und bei der Entwässerung führen kann. Daneben kann es zu Ablagerungen durch einen erhöhten Sandanteil kommen, wodurch sich das Faulbehältervolumen verringert.





### **3 Untersuchungsspflichten und Analysekosten bei der bodenbezogenen Klärschlammverwertung**

#### **3.1 Untersuchungsspflichten – Boden und Klärschlamm**

Im Sinne eines nachhaltigen Umwelt- und Ressourcenschutzes wurden die Anforderungen an die bodenbezogene Klärschlammverwertung geändert. Ab dem Jahr 2029 ist die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm für Kläranlagen größer 100.000 EW sowie ab 2032 größer 50.000 EW rechtlich nicht mehr gestattet.

Für kleine und mittlere Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 3 besteht durch die novellierte AbfKlärV die Möglichkeit die anfallenden Klärschlämme nach Zustimmung und Überwachung der zuständigen Behörde bodenbezogen zu verwerten.

Nachfolgend werden die boden- und klärschlammbezogenen Untersuchungspflichten sowie -häufigkeiten dargestellt.

#### **3.2 Bodenbezogene Untersuchungspflichten**

Der Klärschlammnutzer hat dem Klärschlammherzeuger die vorgesehene Auf- oder Einbringungsfläche mitzuteilen. Der Klärschlammherzeuger muss spätestens drei Wochen vor Auf- oder Einbringung des Klärschlammes der zuständigen Behörde die Auf- oder Einbringung anzeigen (§ 16 AbfKlärV).

Die Anzeige hat die Angaben nach Anlage 3 Abschnitt 1 Nr. 1 bzw. für Klärschlammgemische /-komposte nach Anlage 3 Abschnitt 2 Nr. 2 AbfKlärV zu enthalten.

##### **3.2.1 Untersuchungspflichten und -häufigkeiten**

Für die vorgesehene Auf- oder Einbringungsfläche muss der Klärschlammherzeuger die Bodenart (DIN 19682-2 „Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 2: Bestimmung der Bodenart“) bestimmen sowie entsprechend der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) Bodenuntersuchungen durchführen lassen. Darunter fallen u. a. Schwermetalle aus der BBodSchV, sowie der pH-Wert und der Phosphatgehalt. Eine Übersicht über die nötigen Bodenuntersuchungen ist in Abbildung 8 dargestellt. Die erforderlichen Bodenuntersuchungen müssen mind. alle 10 Jahre durchgeführt werden.

Die Abstände zwischen den Untersuchungen können von der zuständigen Behörde, im Einvernehmen mit der zuständigen landwirtschaftlichen Fachbehörde, verkürzt bzw. auf einzelne Schwermetalle oder auf den pH-Wert beschränkt werden. Wiederkehrende Untersuchungspflichten können bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von < 1.000 EW, nach vorheriger Zustimmung der zuständigen Behörden, entfallen. Bei vorhandener Bodenuntersuchung nach der Bioabfallverordnung erübrigen sich die Untersuchungen, falls diese nicht älter als 10 Jahre alt sind. Kleinkläranlagen eines landwirtschaftlichen Betriebs für Selbstbewirtschaftung müssen ebenfalls keine Untersuchungen durchführen.

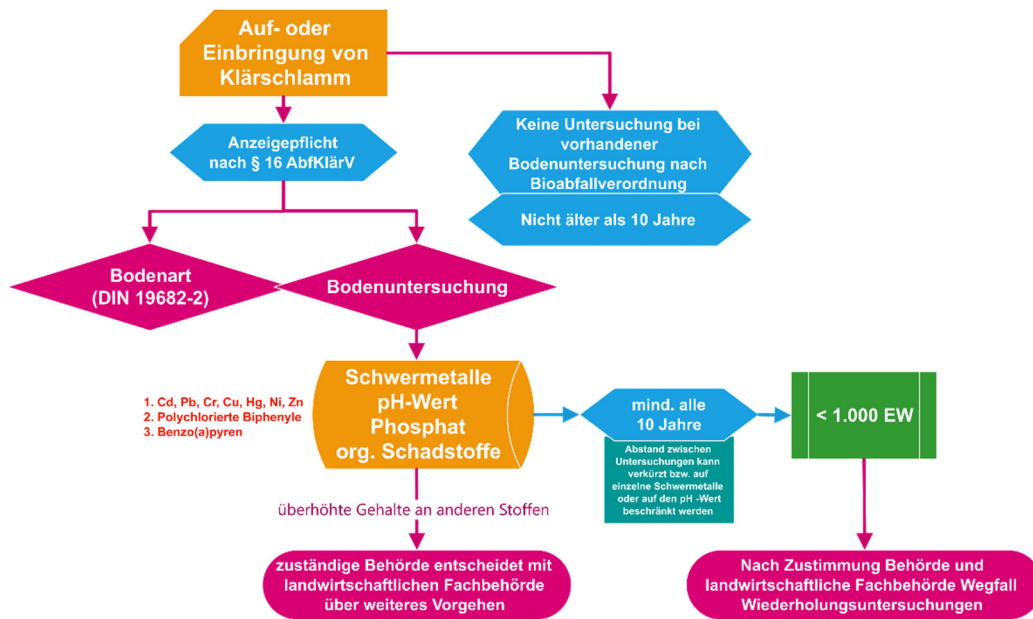


Abbildung 8: Bodenbezogene Untersuchungspflichten nach § 4 AbfKlärV.

### 3.2.2 Grenzwerte bei der bodenbezogenen Verwertung

Abhängig von der Bodenart werden nach der AbfKlärV i. V. m. der BBodSchV verschiedene Vorsorge- und Grenzwerte definiert, welche in Tabelle 6 abhängig vom pH-Wert und dem Humusgehalt des Bodens dargestellt sind. Die Bodenart wird anhand DIN 19682-2 klassifiziert (DIN 19682-2 2014).

Tabelle 6: Grenzwerte für Schwermetalle und organische Stoffe nach BBodSchV Anhang 2.

Böden	Schwermetalle in mg/kg TM (Feinböden)										
	Cd		Pb		Cr	Cu	Hg	Ni		Zn	
Bodenart	≥ 6	< 6	≥ 5	< 5				≥ 6	< 6	≥ 6	< 6
Ton	1,5	1	100	70	100	60	1	70	50	200	150
Lehm/Schluff	1	0,4	70	40	60	40	0,5	50	15	150	60
Sand	0,4		40		30	20	0,1	15		60	
Humus- gehalt	Polychlorierte Biphenyle (PCB <sub>6</sub> )			Benzo(a)pyren			Polycycl. Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK <sub>16</sub> )				
> 8 %	0,1			1			10				
≤ 8 %	0,05			0,3			3				

Die Grenzwerte für Schwermetalle unterscheiden sich abhängig vom pH-Wert und entfallen ab einem Humusgehalt von > 8 %, wobei die zuständigen Behörden für diese Böden ggf. gebietsbezogene Festsetzungen treffen können. Bei Ackerböden beträgt der Humusgehalt im Allgemeinen etwa bis 4 % (DWA-M 384 GD 2021).

### 3.2.3 Beschränkungen bei der bodenbezogenen Verwertung

Die Auf- oder Einbringung von Klärschlamm aus Anlagen mit Abwässern aus industrieller Kartoffelverarbeitung sowie in Wasserschutzgebieten der Schutzzonen I, II und III sind untersagt (§ 15 AbfKlärV). Daneben ist die bodenbezogene Verwertung nicht zulässig bei Böden mit Nutzung:

- als Grünland und Dauergrünland,
- als Ackerfutteranbaufläche,
- als Anbaufläche
  - Mais  
(ausgenommen zur Körnernutzung und zur Verwendung in der Biogaserzeugung, sofern keine Einarbeitung von Klärschlamm vor der Saat erfolgt ist),
  - Zuckerrüben  
(sofern die Zuckerrübenblätter verfüttert werden sollen und im Anbaujahr keine Auf- oder Einbringung von Klärschlamm vor der Saat erfolgt ist),
  - Gemüse, Obst oder Hopfen,
- als Haus-, Nutz- oder Kleingarten,
- zu forstwirtschaftlichen Zwecken

Das Auf- und Einbringen ist zudem nicht zulässig in Wasserschutzgebieten der Schutzzone I, II und III sowie in Naturschutzgebieten, Nationalparks, nationalen Naturmonumenten, Naturdenkmälern, geschützten Landschaftsbestandteilen und gesetzlich geschützten Biotopen.

In Ausnahmefällen kann die zuständige Behörde im Einvernehmen mit der zuständigen Naturschutzbehörde und der landwirtschaftlichen Fachbehörde die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm (Klärschlammgemisch/-kompost) für Ackerfutteranbauflächen zulassen (§ 15 AbfKlärV Abs. 6). Neben den genannten Beschränkungen können weitere Vorgaben nach DüV und DüMV entstehen, wobei die gute fachliche Praxis der Düngung einzuhalten ist (DWA-M 384 GD 2021).

### 3.3 Klärschlammbezogene Untersuchungspflichten

#### 3.3.1 Klärschlammverordnung (AbfKlärV)

In der AbfKlärV werden verbindliche Untersuchungspflichten und -häufigkeiten für den Klärschlammherzeuger vor Abgabe des Klärschlammes an den Klärschlammnutzer abhängig von der Ausbaugröße der Kläranlage sowie der Klärschlamm-Trockenmasse geregelt (§ 5 AbfKlärV; (Bundesregierung 2017)). Eine Übersicht über die Untersuchungshäufigkeiten und Parameter der „kleinen“ Klärschlammuntersuchung nach § 5 Abs. 1 AbfKlärV ist in Abbildung 9 zu sehen. Dabei werden folgende Parameter analysiert:

- Schwermetalle:  
Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Chrom(VI), Kupfer, Nickel, Quecksilber, Thallium und Zink,
- Summe der organischen Halogenverbindungen als adsorbierte organisch gebundene Halogene (bestimmt als AOX),
- Gesamtstickstoffgehalt und Ammoniumgehalt
- Phosphorgehalt,
- Trockenrückstand,
- Organische Substanz,
- Gehalt an basisch wirksamen Stoffen insgesamt, bewertet als Calciumoxid,
- Eisengehalt und
- pH-Wert.

Bei Kläranlagen < 1.000 EW muss der Klärschlamm mindestens alle zwei Jahre untersucht werden, wobei die zuständige Behörde den Abstand zwischen den Untersuchungen verkürzen (bis zu 6 Monate) oder verlängern (bis zu 48 Monate) kann (§ 6 AbfKlärV).

Weiterhin richtet sich die Untersuchungshäufigkeit nach der Menge an jährlich anfallender Trockenmasse (hier ist der bodenbezogen verwertete Anteil maßgeblich), wobei sich die Intervalle ab einer Grenze von 750 t TM/a unterscheiden. Bei einem jährlichen Klärschlammfall von 750 t TM oder weniger muss je angefangene 250 t TM/a, mindestens alle 3 Monate eine „kleine“ Klärschlammuntersuchung erfolgen. Liegt der Anfall über 750 t TM jährlich muss je angefangene 250 t TM/a, jedoch höchstens einmal pro Monat die Untersuchung durchgeführt werden. Im Fall der Herstellung eines Klärschlammgemisches oder Klärschlammkomposts hat die Untersuchung je angefangene 500 t TM zu erfolgen.

Die Untersuchungsergebnisse müssen innerhalb von vier Wochen nach Durchführung der zuständigen Behörde vorgelegt werden.

In der AbfKlärV werden zudem erstmalig Anforderungen an eine Qualitätssicherung (§ 21 AbfKlärV) geregelt (DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5 2018). Bei qualitätsgesichertem Klärschlamm wird die Untersuchungshäufigkeit verringert. Je angefangene 500 t TM/a muss eine Untersuchung durchgeführt werden, höchstens jedoch alle zwei Monate. Für Klärschlammgemische und -komposte wird je angefangene 1.000 t TM/a eine monatliche Untersuchung verlangt (§ 31 AbfKlärV).

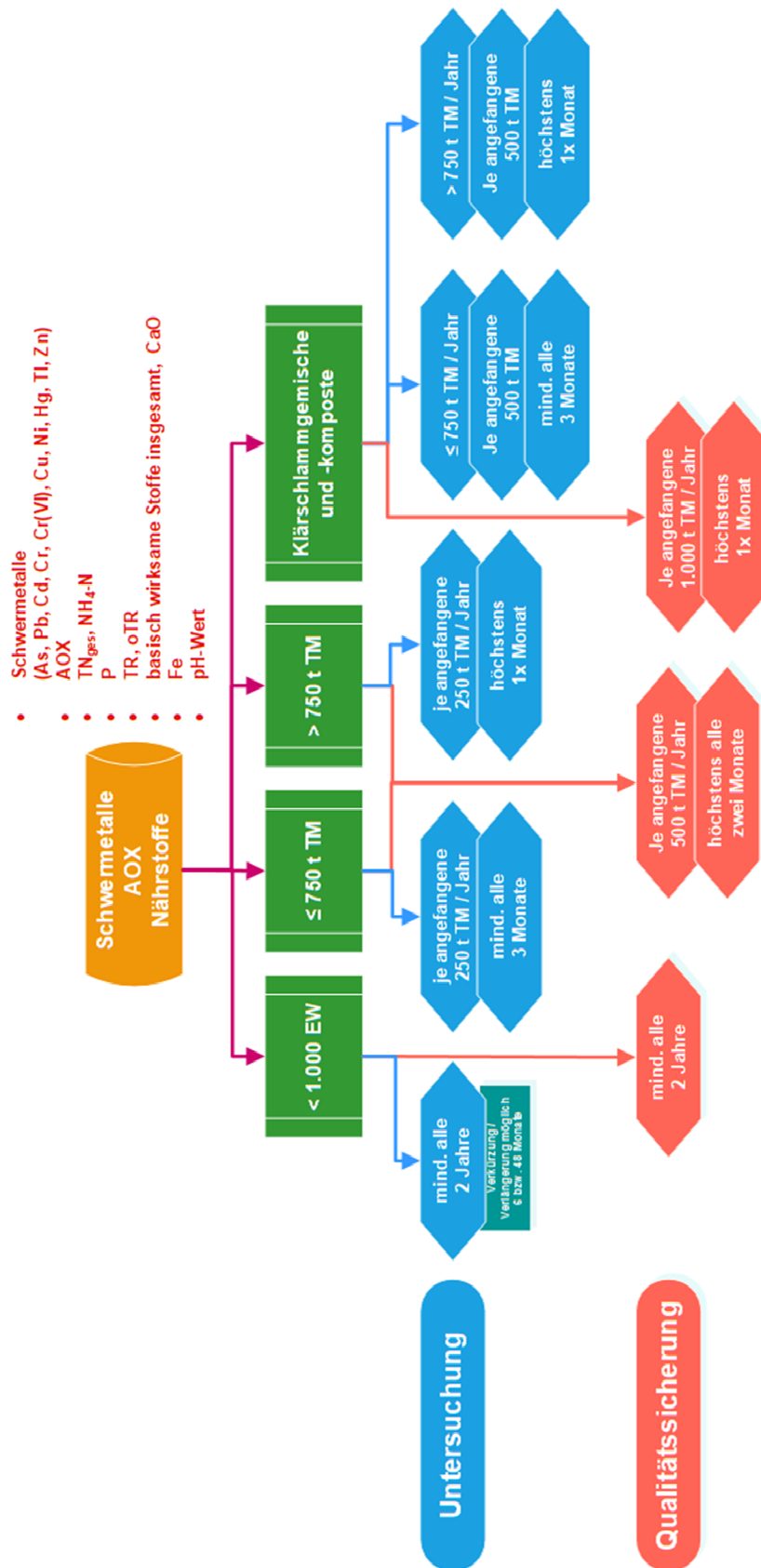


Abbildung 9: Klärschlammbezogene Untersuchungspflichten nach § 5 Abs. 1 AbfKlärV („kleine“ Untersuchung).

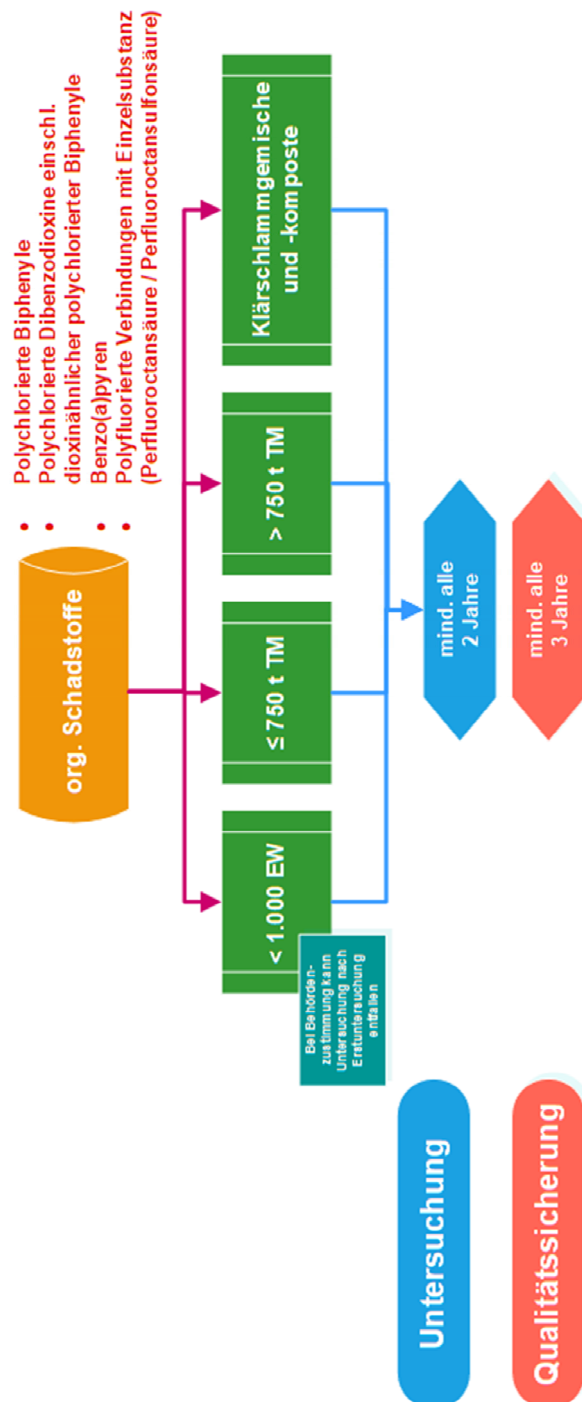


Abbildung 10: Klärschlammbezogene Untersuchungspflichten nach § 5 Abs. 2 AbKlärV („große“ Untersuchung: § 5 Abs. 1 und 2 AbfKlärV).

Bei der „großen“ Klärschlammuntersuchung nach § 5 Abs. 1 und 2 AbfKlärV werden zusätzlich die organischen Schadstoffe untersucht. Bei der Analyse werden berücksichtigt:

- polychlorierte Biphenyle,
- polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane einschl. dioxinähnlicher polychlorierter Biphenyle,
- Benzo(a)pyren und
- Polyfluorierte Verbindungen mit den Einzelsubstanzen Perfluorooctansäure und Perfluorooctansulfonsäure.

Die von der Ausbaugröße der Kläranlage und anfallenden Klärschlammmenge in Trockenmasse abhängigen Untersuchungshäufigkeiten zeigt Abbildung 10. Unabhängig von der Ausbaugröße und Menge an Trockenmasse ist mindestens alle zwei Jahre eine Untersuchung zu veranlassen. Lediglich bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von < 1.000 EW kann die wiederholende Untersuchung nach Erstuntersuchung und Zustimmung der zuständigen Behörde im Einvernehmen mit der landwirtschaftlichen Fachbehörde entfallen.

### **Grenzwerte nach AbfKlärV und DüMV**

Nach § 8 AbfKlärV ist die Auf- oder Einbringung von Klärschlamm nur zulässig, wenn die Grenzwerte nach Anlage 2 Tabelle 1.4 Spalte 4 der Düngemittelverordnung (DüMV) sowie zusätzliche Grenzwerte nach Anlage 1 AbfKlärV 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 DüMV. Eine Übersicht der aktuell geltenden Grenzwerte und Kennzeichnungsschwellen nach der DüMV zeigt Tabelle 7. Weiterhin gelten Kennzeichnungsschwellen für Nährstoffe wie beispielsweise Stickstoff und Phosphat ( $P_2O_5$ ) bei Düngemitteln nach Anlage 2 Tabelle 1 DüMV.

Tabelle 7: Grenz- und Schwellenwerte nach der AbfKlärV und DüMV in Anlehnung an (DWA-M 384 GD 2021).

Parameter	AbfKlärV und DüMV	Kennzeichnungsschwelle DüMV
	mg/kg TM (Ausnahmen sind angegeben)	
As	40	20
Pb	150	100
Cd < 5 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> FM	1,5	1,0
Cr <sup>1)</sup> (ges.)	-	300
Cr(VI)	2	1,2
Cu	900	200
Ni	80	40
Hg	1,0	0,5
Tl	1,0	0,5
Zn	4.000	200
Fe <sup>1)</sup> (als % TM)	-	0,04 1 für Landwirtschaft
AOX	400	-
Polychlorierte Biphenyle (PCB), jeweils für die Kongenere 28, 52, 101, 138, 153, 180	0,1	0,05
Summe der Dioxine und dl-PCB (WHO-TEQ 2005)	30 ng TE/kg TM	8 ng TE/kg TM
Benzo(a)pyren	1,0	-
Perfluorierte Tenside (PFOA + PFOS)	0,1	0,05

<sup>1)</sup> Für Eisen und Chrom bestehen gemäß § 5 Absatz 1 AbfKlärV eine Untersuchungspflicht; ein Grenzwert existiert allerdings weder in der DüMV noch in der AbfKlärV.

### 3.3.2 Düngemittelverordnung (DüMV)

Die Düngemittelverordnung regelt u. a. die Zulassung (§ 3 DüMV), das Inverkehrbringen (§ 4 DüMV) sowie die Kennzeichnung (§ 5 DüMV) von Düngemitteln. Dabei muss ein Klärschlamm, der vom Erzeuger an den Klärschlammnutzer für die Verwendung als Düngemittel abgegeben wird (Inverkehrbringen), weitere Anforderungen und Grenzwerte einhalten. Durch eine düngemittelrechtliche Deklaration des Klärschlammherstellers müssen dem Klärschlammnutzer die erforderlichen Informationen zur Klärschlammbeschaffenheit für jede abgegebene Charge vorgelegt werden. Die entsprechenden Parameter der DüMV ergänzen die gem. AbfKlärV regelmäßig zu untersuchenden Stoffe. Im Gegensatz zur AbfKlärV enthält die DüMV jedoch keine weiteren Vorgaben z. B. zu Untersuchungshäufigkeiten. Es empfiehlt sich, die kennzeichnungspflichtigen Parameter regelmäßig analysieren zu lassen, um die Vorgaben und Toleranzen der DüMV hinsichtlich der Deklarationspflicht einzuhalten (DWA-M 384 GD 2021).



## Seuchen- und Phytohygiene

Nach § 5 DüMV dürfen keine Krankheits- und Schaderreger oder Toxine enthalten sein, welche die Gesundheit von Menschen, Tieren und Nutzpflanzen gefährden. Die Anforderungen an die Seuchen- und Phytohygiene gelten als nicht eingehalten, wenn:

- in 50 g Probenmaterial Salmonellen gefunden werden (Seuchenhygiene),
- Ausgangsstoffe pflanzlicher Herkunft, auch in Mischungen, verwendet werden, die von widerstandsfähigen Schadorganismen, insbesondere
  - in Richtlinie 2000/29/EG genannte Schadorganismen,
  - thermoresistente Viren (insb. solche aus der Tobamovirus-Gruppe) oder
  - pilzliche Erreger mit widerstandsfähigen Dauerorganen, insb. *Synchytrium enobioticum*, *Sclerotinia*-Arten, *Rhizoctonia solani*, *Plasmodiophora brassicae*

enthalten sind und nicht einer geeigneten hygienisierenden Behandlung unterzogen wurden (Phytohygiene).

Die seuchenhygienischen Anforderungen gelten bei der Abgabe an Personen, die im Rahmen ihrer beruflichen Tätigkeit Düngemittel, Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel anwenden, jedoch als eingehalten, wenn auf die bestehende Belastung hingewiesen wird und als Anwendungsvorgaben gekennzeichnete Hinweise gegeben werden (§ 5 Abs. 3 DüMV). Weiterhin ist für die Abgabe von Klärschlamm geregelt, dass die Anforderungen an die Seuchenhygiene erfüllt sind, wenn dieser auf Flächen aufgebracht wird, die im Zuständigkeitsbereich der am Sitz der Kläranlage für den Vollzug der Düngeverordnung zuständigen landwirtschaftlichen Fachbehörde liegen. Ausnahmen hierzu gelten, wenn der Abgeber Mitglied eines Trägers einer regelmäßigen Qualitätsüberwachung ist und die ordnungsgemäße Aufbringung sichert.

## Nährstoffe

Bei der bodenbezogenen Verwertung dient Klärschlamm als organischer Dünger, wobei dieser auch als Klärschlammkompost im Landschaftsbau Anwendung findet (DWA-M 384 GD 2021). Entsprechend den Anforderungen an die Kennzeichnung nach § 6 DüMV müssen bei in Verkehr gebrachten Düngemitteln, Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel mit Angaben der DüMV gekennzeichnet (deklariert) werden. Abhängig von der Deklaration des Düngemittels gelten nach Anlage 2 Tabelle 1 DüMV entsprechende Kennzeichnungsschwellen (siehe auch Tabelle 8). Je nach Entwässerungsgrad/-verfahren sowie der Herkunft des Abwassers können verschiedene Nährstoffgehalte im Klärschlamm vorhanden sein (DWA-M 384 GD 2021).

Tabelle 8: Kennzeichnungsschwellen nach Anlage 2 Tabelle 1 DüMV. Entsprechende Toleranzen, Einschränkungen, Ergänzungen und Hinweise sind der Anlage 2 Tabelle 1 DüMV zu entnehmen.

Nährstoffe in Düngemitteln außer Wirtschaftsdünger, die nicht den Düngemitteltyp bestimmen.	
Kennzeichnung ab % TM	
N	1,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,5
K <sub>2</sub> O	0,75
S	0,3
MgO	0,3
Na	0,2
Ca wasserlöslich	5,7

### Fremdstoffe

Beim in Verkehr bringen von Düngemitteln dürfen die Grenzwerte von Fremdbestandteilen nach § 4 Abs. 1 Nr. 4 DüMV nicht überschritten werden und werden wie folgt zusammengefasst:

Tabelle 9: Grenzwerte für Fremdbestandteile nach § 4 Abs. 1 Nr. 4 DüMV

Parameter	Siebdurchgang in mm	Grenzwert in % TM
Steine	> 10 mm	≤ 5
Summe aus Altpapier, Karton, Glas, Metalle und plastisch nicht verformbare Kunststoffe	> 1 mm	≤ 0,4
Sonstige nicht abgebaute Kunststoffe	> 1 mm	≤ 0,1

### Polymere

Bei der landwirtschaftlichen Verwertung entwässerter Klärschlämme müssen die Auflagen für synthetische Polymere beachtet werden (Anlage 2 Tabelle 8 Nummer 8.1.3 DüMV). Sobald synthetische Polymere verwendet werden, muss dies gemäß DüMV gekennzeichnet werden. Dazu gehören (DWA-M 384 GD 2021):

- Angabe des Zwecks der Zugabe (z. B. Konditionierungsmittel),
- ab einem Mengenanteil von 0,5 % TM Angabe des zugegebenen Stoffs in Verbindung mit der Angabe des Zwecks der Zugabe (z. B. Entwässerung unter Verwendung von synthetischen Polymeren),
- ggf. Ergänzung der Kennzeichnung (Anhang 2 Tabelle 8.1 Zeile 8.1.3 Spalte 3 DüMV).

Klärschlämme, die synthetische Polymere enthalten, dürfen auf derselben Fläche nur so angewendet werden, dass die aufgebrachte Menge an synthetischen Polymeren 45 kg Wirksubstanz/ha innerhalb von 3 Jahren nicht überschreitet. Falls die eingesetzten Polymere sich innerhalb von zwei Jahren um mind. 20 % abbauen, entfällt die Kennzeichnungspflicht und es ergeben sich keine Einschränkungen.

### **Weitere Haupt- und Nebenbestandteile nach DüMV**

In der DüMV finden sich neben den genannten Parametern (Tabelle 8) weitere Haupt- (Anlage 2 Tabelle 7 DüMV) und Nebenbestandteile (Anlage 2 Tabelle 8 DüMV), welche weiteren Vorgaben unterliegen.

Gemäß Anlage 2 Tabelle 7 Nr. 7.4.3 DüMV sind solche Klärschlämme gemäß AbfKlärV als Hauptbestandteile von Düngemitteln zulässig, für die eine Aufbringung nach AbfKlärV zulässig ist. Als ergänzende Anforderungen werden u. a. vorgegeben, dass (DWA-M 384 GD 2021):

- die Zugabe von Kalk nur in einer Qualität, die zugelassenen Düngemitteln entspricht, zugelassen ist.
- die Zugabe von Bioabfällen, nur im Rahmen der Aufbereitung (z. B. im Faulturn) und nur in einer Qualität, die der Bioabfallverordnung entspricht, zugelassen ist. (Beachtung von Co-Substraten mit Hinweis auf Merkblatt DWA-M 380 „Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen“)
- die Aufbereitung der Ausgangsstoffe nur mit Stoffen zulässig ist, die der notwendigen Abwasser- und Schlammbehandlung einschl. Hygienisierung oder sonstigen notwendigen Behandlung dienen (speziell Anlage 2 Tabelle 8 DüMV).
- die Rückführung von Rechengut, Sandfanggut sowie die Rückführung von Flotaten oder Fettabscheiderinhalten aus fremden Kläranlagen nicht zulässig ist. Rechen- und Sandfanggut sind keine Düngemittel nach der DüMV. Erlaubt ist die Übernahme und Mitbehandlung von Flotaten und Fettabscheiderinhalten (z. B. aus Großküchen, die der Bioabfallverordnung entsprechen), soweit diese Stoffe als Bioabfälle angenommen werden. Sie dürfen aber nicht von einer fremden Kläranlage geliefert werden.
- zugegebene Stoffe, die bei der Aufbereitung verwendet wurden, mit der Nennung des Zwecks angegeben werden müssen (z. B. Konditionierung, Fällung etc.). Bei der Zugabe von Kalken ist die Angabe des Anteils in % erforderlich. Bei Kalk als Fällungsmittel i. V. m. Anlage 2 Tabelle 8 Nr. 8.1.4 DüMV.

Das Merkblatt DWA-M 384 „Bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen – Rechtliche Rahmenbedingungen und ihre Umsetzung in der Praxis“ stellt die wesentlichen Grundlagen einer künftigen bodenbezogenen Verwertung von Klärschlämmen dar.

### 3.3.3 Düngeverordnung (DüV)

Die Düngeverordnung (DüV) dient zur Umsetzung der Vorgaben der EU-Nitrat-Richtlinie (91/676/EWG) mit dem Ziel, die Wasserqualität der Grund- und Oberflächengewässer vor Nitrat-Verunreinigungen aus der Landwirtschaft zu schützen. Aus der DüV ergeben sich somit keine Untersuchungspflichten wie bei der AbfklärV. Bei der Umsetzung der DüV ist eine Düngbedarfsermittlung nach § 4 DüV (z. B. Stickstoffdüngbedarf für Ackerland Anlage 4 Tabelle 1 bis 7 DüV) notwendig. Zudem muss spätestens zwei Tage nach der Düngung jede Düngemaßnahme protokolliert werden (§ 10 DüV). Die DüV beinhaltet dabei Sperrfristen und Begrenzungen für die Nährstoffgabe, die sich wie folgt zusammenfassen lassen (DWA-M 384 GD 2021), vgl. auch (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2021):

- Herstdüngung (bis 01.10.)
- Vorgaben für die Ausbringung von Klärschlamm:
  - mit wesentlichen Gehalten an Stickstoff (§ 6 Abs. 8 DüV)
  - mit wesentlichen Gehalten an Phosphat (§ 6 Abs. 8 DüV)
  - Düngeverbot auf gefrorenem Boden
- Böden mit > 20 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100 g Boden
  - Phosphatdüngung nur in Höhe des Nährstoffbedarfs
- Reduzierte N- und P-Düngung an Gewässern/Gewässer grenzende Hanglagen (§ 5 Abs. 2 und 3 DüV)
- Gebiets- und Kulturabhängige Beschränkungen
  - Grundwasser „rote Gebiete“: Reduzierung der N-Düngung um 20 % im Betriebsdurchschnitt
  - Düngung zu Wintergerste und -raps nicht mehr zulässig
    - ausgenommen: Winterhaps-Düngung bei nachgewiesener Menge von N<sub>min</sub>-Gehalt < 45 kg/a.

### 3.3.4 Analysekosten bei der bodenbezogenen Verwertung und Verbrennung

Zur Ermittlung der Analysekosten bei der bodenbezogenen Verwertung wurden drei Labore angefragt entsprechende Angebote abzugeben.

Generell gilt bei der Untersuchung der Proben, dass die Probenahme, -vorbereitung und -analyse von einer unabhängigen und notifizierten Untersuchungsstelle durchgeführt werden müssen (§ 32 AbfKlärV).

Die Probenahme aus einem Klärschlamm hat nach DIN EN ISO 5667-13 und bei Klärschlammgemischen und -komposten nach DIN 19698-1 zu erfolgen. Entsprechende Analysemethoden finden sich in Anlage 2 Nr. 2.3 AbfKlärV. Die Untersuchungsergebnisse sind 10 Jahre lang aufzubewahren und auf Verlangen der zuständigen Behörde vorzulegen.

Tabelle 10 zeigt dabei, dass sich die Analysekosten für die „kleine“ Untersuchung nach § 5 Abs. 1 AbfKlärV (vgl. Kapitel 3.3.1) in einer Preisspanne von rd. 185 bis 280 € befinden. Manche Labore bieten standardmäßig bereits die Parameter aus der DüMV mit an (z. B. Labor (2)) und empfehlen diese mind. einmal jährlich durchzuführen, da diese eine Gültigkeit von einem Jahr hat.

In dem Analyseumfang von Labor (2) sind demnach die nach § 5 Abs. 1 AbfKlärV geforderten Parameter, sowie weitere Metalle (K als  $K_2O$ , Mg, B, Co, Mn, Mo, Na, S, Se) und Nitratstickstoff enthalten.

Die Parameter der DüMV sind nicht untersuchungspflichtig und müssen nicht bei jeder Analyse untersucht werden. Jedoch unterliegen die Parameter der DüMV einer Deklarationspflicht beim Inverkehrbringen von Klärschlamm (siehe Kapitel 3.3.2).

Tabelle 10: Analysekosten für die klärschlammbezogenen Untersuchungspflichten nach AbfKlärV. \*DüMV-Parameter im Angebot enthalten. Stand 2021.

Klärschlammbezogene Untersuchungspflichten	Labor (1)	Labor (2)	Labor (3)	Preisspanne
§ 5 Abs. 1 AbfKlärV – Doppelbestimmung „kleine“ Untersuchung	185	280*	280	185 bis 280
§ 5 Abs. 1 und 2 AbfKlärV – Doppelbestimmung „große“ Untersuchung	850	1.000*	1.150	850 bis 1.150

Tabelle 11: Untersuchungsparameter und ungefähre Analysekosten bei der Einfachbestimmung für deklarationspflichtige Parameter aus der DüMV mit Angabe von Empfehlungen nach (Agrolab Group 2019). Stand 2021.

Parameter	Umfang	Empfehlung	Kosten in EUR
Gesamt-Metalle	K, Mg, Na, S, Mn, Mb, B, Co, S	Ergänzung von DüMV-Parametern zu § 5 AbfKlärV	45
wasserlösliche Metalle (ohne Selen)	B, Ca, Fe, Mn, Mb, Co, Cu, Zn, Mg, Na, S	mind. 1x bestimmen/ deklarationspflichtig	70
verfügbarer Stickstoff	verfügbarer Stickstoff des in CaCl <sub>2</sub> -Lösung löslichen NO <sub>3</sub> -N und NH <sub>4</sub> -N	deklarationspflichtig	20
lösliche Phosphate	wasserlösliches und neutral-ammonicitratlösliches Phosphat	deklarationspflichtig	65
<b>Summe der weiteren deklarationspflichtigen Parameter</b>			<b>200</b>
wasserlösliches Selen		nur wenn Schwellwert überschritten und Wasserlöslichkeit > 25 % vom Gesamtanteil beide Fälle extrem selten	20
Salmonellen		bei Ausbringung mit sofortiger Einarbeitung nicht notwendig	30
Fremdstoffe	Hartstoffe (Glas, Kunststoff, Metall), verformbare Kunststoffe, Steine	ggf. bei Teichkläranlagen, bei Kläranlagen mit mechanischer Reinigung nicht notwendig	70

Die für die Analysen zuständigen Labore geben grundsätzlich Empfehlungen, bei welcher Analyse welcher zusätzliche Parameter und welche Häufigkeiten für eine weitere Untersuchung des entwässerten Klärschlammes notwendig sind (Agrolab Group 2019). Demnach können nach Tabelle 11 noch zusätzliche Kosten von bis zu ca. 200 € für Parameter aus der DüMV anfallen. Bei Teichkläranlagen ohne vorherige mechanische Reinigung des Abwassers wird zudem empfohlen, Fremdstoffe wie Glas, Kunststoffe etc. mit zu untersuchen, da diese Grenzwerten nach Tabelle 9 unterliegen.

Für die vorherige bodenbezogene Untersuchung zur Auf- oder Einbringung von Klärschlamm fallen Kosten zwischen rd. 150 bis 200 € pro Probe an (zusammengesetzt aus Kosten für Anfahrt, Probenahme und Analytik).

### 3.3.5 Vergleich der Analysekosten bei bodenbezogener Verwertung und thermischer Behandlung

Im Hinblick auf die derzeitige bayerische Klärschlamm Entsorgung hat die thermische Behandlung von Klärschlamm in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Aus diesem Grund wurden zu den Analysekosten bei der bodenbezogenen Verwertung die Untersuchungskosten von Klärschlamm zur Verbrennung angefragt. Grundsätzlich geben die jeweiligen Verbrennungsanlagen die benötigten Parameter vor, die bei der Annahme von Klärschlamm analysiert werden müssen. Aus der Erfahrung der untersuchenden Labore lassen sich jedoch die Analyseumfänge abschätzen.

Tabelle 12 zeigt, dass sich die Untersuchungskosten von Klärschlamm zur Verbrennung im Bereich von rd. 880 bis 1.740 € befinden. Eine Erstuntersuchung von Klärschlamm nach der AbfklärV und DüMV (Einfachbestimmung) liegt im Rahmen von rd. 1.200 €. Der Umfang beider Untersuchungen entspricht auch dem angefragten Untersuchungsumfang zur thermischen Verwertung in Monoverbrennungsanlagen (Otte-Witte 2019). Dieser Vergleich zeigt, dass sich die Analysekosten bei der bodenbezogenen Verwertung sowie der Verbrennung nicht wesentlich unterscheiden. Die Unterschiede ergeben sich im Untersuchungsumfang und in der Bestimmungsmethode (Doppel- oder Einfachbestimmung).

Vor der Annahme von Klärschlamm zur Verbrennung werden oftmals die gleichen Parameter wie bei der bodenbezogenen Verwertung gefordert. Die Parameter der AbfklärV benötigen jedoch oft nur eine Einfachbestimmung. Die Analysen können einzeln, im Rahmen einer Erst-, Grunduntersuchung oder nur die Leitparameter für entwässerten Klärschlamm vollzogen werden. Wenn die Parameter einzeln analysiert werden, werden zur Komplettierung des Analyseumfanges zur Verbrennung noch weitere Parameter benötigt (Zusatzpaket, welches z. B. polyzyklische aromatische Kohlenstoffe (PAK), org. Chlorverbindungen und Fremdstoffe beinhaltet).

Die Erstuntersuchung zur Verbrennung enthält alle benötigten Parameter inklusive der geforderten Parameter aus AbfklärV und DüMV (physikalische Parameter, Nährstoffe, perfluorierte Tenside, Schwermetalle, flüchtige, niederchlorierte Kongenere (z. B. PCB 28, PCB 52), non ortho Kongenere (z. B. PCB 77, PCB 81), mono ortho Kongenere (z. B. PCB 105, PCB 114), Halogene, Dioxine und Furane, PAK, org. Chlorverbindungen und Fremdstoffe nach der DüMV). Bei der Grunduntersuchung werden hingegen nicht alle Kongenere analysiert und es wird sich auf die 6 Indikator-Kongenere beschränkt (PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 138, PCB 153, PCB 180). Daneben werden auch einzelne Schwermetalle wie Cr(VI), Cd sowie einzelne Nährstoffe nicht analysiert. Je nach Anforderung des Verbrenners ist es möglich die Leitparameter für entwässerten Klärschlamm vorzulegen. Diese beinhalten nicht alle Parameter wie bei der Erstuntersuchung. Beispielsweise werden nicht alle physikalischen Parameter, Nährstoffe, Dioxine und Furane, PAK sowie nur die 6 Indikator-Kongenere analysiert. Ebenfalls werden bei den Leitparametern die Fremdstoffe nach der DüMV nicht analysiert. Die geforderten Parameter zur Klärschlammverbrennung werden individuell von den Verbrennern festgelegt.

Tabelle 12: Vergleich der Analysekosten bei bodenbezogener Verwertung und Verbrennung von Klärschlamm. Stand: 2021.

Parameter	Bodenbezogene Verwertung	Verbrennung			
		AbfKlärV und DüMV für Verbrennung	Erstuntersuchung (AbfKlärV; DüMV) in EUR	Grunduntersuchung	Leitparameter entwässerter Klärschlamm
§ 5 Abs. 1 und 2 AbfKlärV	850 bis 1.150 (Doppelbestimmung)	640 (Einfachbestimmung)			
DüMV Empfehlungen deklarationspflichtig	200 (Einfachbestimmung)	200 (Einfachbestimmung)			
Zusatzpaket		900			
<b>Summe</b>	<b>1.050 bis 1.350</b>	<b>1.740</b>	<b>1.200</b>	<b>1.040</b>	<b>880</b>



## **4 Messprogramm zur Klärschlamm entwässerung auf kleinen und mittleren Kläranlagen in Bayern**

### **4.1 Probenahme und Analyseverfahren**

Bei der Entwässerung von Klärschlamm fällt Schlammwasser an, welches anschließend in die Abwasserbehandlung zurückgeführt wird. Die Rückbelastung durch die darin enthaltenen gelösten Stoffe kann erheblichen Einfluss auf die biologische Stufe der Abwasserbehandlung haben und ist im weiteren Betrieb der Kläranlage zu berücksichtigen.

Schlammwasser wird als abgetrennte Flüssigkeit definiert und wird je nach angewandtem Entwässerungsverfahren unterschiedlich bezeichnet (Überstandswasser (statischer Eindicker), Zentrat (Zentrifuge) oder Filtrat (Filtrationsverfahren), vgl. (DIN EN 1085:2007-05), (DWA-M 366 2013).

Im Folgenden werden die ausgewählten Kläranlagen sowie die eingesetzten Analyseverfahren beschrieben.

#### **4.1.1 Auswahl der Kläranlagen für Probenahmen**

Die Entwässerung durch mobile Aggregate erfolgt bei Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 3 meist nur wenige Male im Jahr über einige Tage hinweg im Batchbetrieb. Zur Untersuchung der Schlammwässer wurden Kläranlagen ausgewählt, bei denen im Zeitraum von Oktober 2021 bis Mai 2022 eine Entwässerung geplant war. Diesbezüglich stand die Universität der Bundeswehr München in enger Abstimmung mit Kläranlagenbetreibern und Entwässerungsunternehmen, um bei den z. T. kurzfristig geplanten Terminen die Probenahmen durchzuführen. Die Auswahl konzentrierte sich überwiegend auf Kläranlagen, die Abwasser in einer Belebungsstufe mit aerober simultaner Schlammstabilisierung aufbereiten, da diese im Vergleich zu anderen Aufbereitungsverfahren prozentual den größten Anteil (32 % von insgesamt 2.058 Kläranlagen der GK 1 bis 3) ausmachen (siehe Abbildung 2). Tabelle 13 gibt eine Übersicht der ausgewählten Kläranlagen, welche im Wesentlichen der GK 2 und 3 zugeordnet werden. Lediglich die Kläranlagen SB#07 und SB#08 liegen in GK 4, jedoch nur knapp über der Grenze zur GK 3. Diese sind verfahrenstechnisch mit den Kläranlagen der GK 2 und 3 vergleichbar. Die Kläranlage NB#14 liegt mit einer Ausbaugröße von 13.500 EW über der GK 3-Grenze, jedoch liegt die aktuelle Belastung bei rd. 9.006 EW. Zudem stellt diese Kläranlage aufgrund der verfügbaren Klärschlammfäulung vor Ort einen Sonderfall dar. Kläranlage NB#15 verfügt über ein stationäres Entwässerungsaggregat, welches den Klärschlamm jedoch nicht kontinuierlich, sondern ähnlich der Betriebsform einer mobilen Entwässerung diskontinuierlich entwässert.

Bei jedem Entwässerungstermin wurden zunächst die Kläranlagen besichtigt und der aktuelle Stand der Abwasserbehandlung sowie weitere Kenndaten (bspw. aktuelle Belastung, Rohschlammanfall, Art der Schlammkonditionierung, Phosphorelimination, Anzahl und Größe von Schlamm- und Schlammwasserbehältern) aufgenommen. Anschließend wurden Schlammwasserproben aus der Entwässerung sowie Proben vom entwässerten Klärschlamm genommen und im Labor analysiert. Die Schlammwasserproben wurden direkt Vor-Ort auf die physikalischen Parameter Leitfähigkeit, pH-Wert und Temperatur analysiert.

### 4.1.2 Analyseverfahren

Für die Untersuchungen der Schlammwasser-Proben wurden folgende Messgeräte und Analyseverfahren angewendet:

#### Schlammwasser, physikalischer Parameter

- Leitfähigkeit,
- pH-Wert und
- Temperatur Gerät: WTW Multi 3430

#### Schlammwasser, Gesamtprobe

- Abfiltrierbare Stoffe (AFS) (DIN 38409-2:1987-03)  
Filterpapier: Schleicher und Schüll Schwarzband
- Kjeldahl-Stickstoff (TKN) (DIN EN 25663:1993-11)  
Aufschluss mit Selen (ISO 5663:1984)
- Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) (DIN ISO 15705:2003-01)  
Küvettest (ISO 15705:2002)  
– Merck 1.13431.0001 (25 - 1.500 mg/L) ggfs. in Verdünnung
- Gesamtphosphor ( $P_{\text{ges}}$ ) (DIN EN ISO 15681-2:2019-05)  
mittels Fließanalytik (FIA und CFA) – Gerät: SEAL AA500

#### Schlammwasser, nach 0,45 µm Filtration

- Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) (DIN ISO 15705:2003-01)  
Küvettest (ISO 15705:2002)  
– Merck 1.13431.0001 (25 - 1.500 mg/L) ggfs. in Verdünnung
- Orthophosphat-Phosphor ( $PO_4\text{-P}$ ) (DIN EN ISO 15681-2:2019-05)  
mittels Fließanalytik (FIA und CFA) – Gerät: SEAL AA500
- Ammonium-Stickstoff ( $NH_4\text{-N}$ ) (ISO 5664:1984-05)  
mittels Destillation und Titration
- Nitrit-Stickstoff ( $NO_2\text{-N}$ ) (DIN EN ISO 13395:1996-12)  
mittels Fließanalytik (FIA und CFA) und spektrometrischer Detektion  
Gerät: SEAL AA500
- Nitrat-Stickstoff ( $NO_3\text{-N}$ ) (DIN EN ISO 13395:1996-12)  
mittels Fließanalytik (FIA und CFA) und spektrometrischer Detektion  
Gerät: SEAL AA500

#### Klärschlamm

- Trockenrückstand (*TR*) (DIN EN 12880:2001-02)
- Glühverlust (*GV*) (DIN EN 12879:2001-02)

## 4.2 Ergebnisse der Analysen zur Klärschlammmentwässerung

### 4.2.1 Kurzbeschreibung der Kläranlagen

Eine Übersicht der ausgewählten Kläranlagen zur Untersuchung des Schlammwassers mit den jeweiligen Kenndaten ist in Tabelle 13 dargestellt. Abbildung 11 zeigt die Standorte der beprobten Kläranlagen.

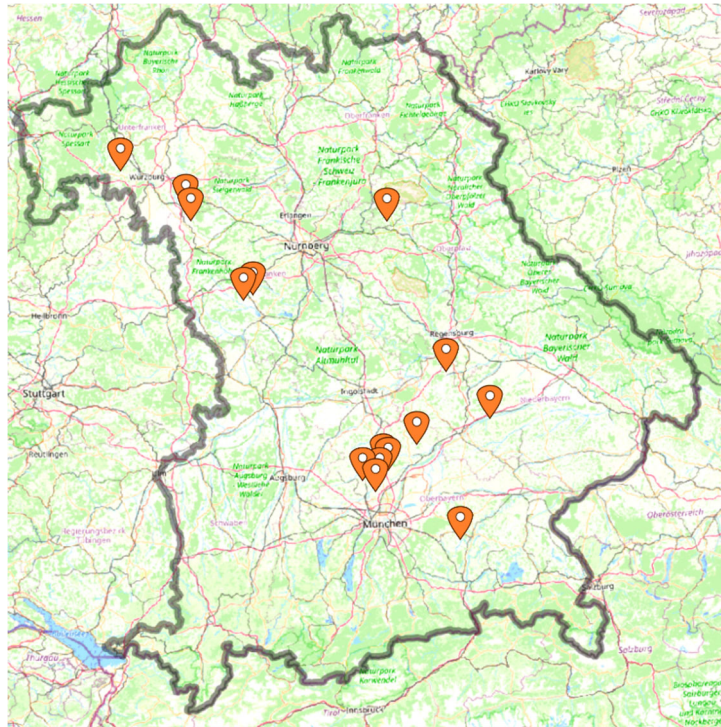


Abbildung 11: Standorte der beprobten Kläranlagen. ©OpenStreetMap and contributors, CC-BY-SA.

Tabelle 13: Übersicht der ausgewählten bayerischen Kläranlagen zur Untersuchung des Schlammwassers mit Darstellung von ausgewählten Kenndaten. SB#00: Südbayern, MB#00: Mittelbayern, NB#00: Nordbayern, BS: Belebung mit gemeinsamer Schlammstabilisierung, SBR: Sequencing Batch Reactor, B&F: Belebung und Faulung, Z: Zentrifuge, KFP: Kammerfilterpresse, SP: Schneckenpresse.

Kläranlage	Ausbaugröße	Belastung	Verfahren	Entwässerungsart	Entwässerungen pro Jahr	Messkategorie
	EW	EW	-	-	-	-
SB#01	10.000	6.500	SBR	Z (KFP)	2 bis 3	B
SB#02	6.000	6.510	BS	Z	3 bis 5	B
SB#03	4.950	3.550	BS	Z	4	B
SB#04	3.000	2.350	BS	KFP	1 bis 3	B
SB#05	4.800	4.000	BS	SP	3 bis 4	A
SB#06	7.000	5.000	SBR	Z	1 bis 3	A
SB#07	12.900	8.500	BS	Z	3 bis 4	A
SB#08	12.000	10.000	BS	Z	4 bis 6	A
MB#09	9.900	8.800	BS	Z	1 bis 2	B
MB#10	4.000	2.000	BS	KFP	3	B
MB#11	4.000	2.500	BS	Z	1	A
NB#12	3.000	1.500	BS	Z	2	A
NB#13	2.000	1.700	BS	KFP	3 bis 4	B
NB#14	13.500	9.006	B&F	KFP	2	B
NB#15	5.500	1.523	BS	SP	1	B

Im Rahmen des Projekts wurden an 15 bayerischen Kläranlagen Probenahmen durchgeführt. Die Anlagen verfügen, wie für die untersuchten Größenklassen üblich, über ein einstufiges Belebungsverfahren, wobei es sich bei zwei Anlagen, im Unterschied zum konventionellen Durchlaufverfahren, um SBR-Anlagen handelt (SB#01 und SB#06 in Tabelle 13). Bei der Kläranlage NB#14 handelt es sich als Sonderfall um eine Belebung mit einer Faulung für die Klärschlammbehandlung.

Jede Kläranlage verfügt über einen oder mehrere Schlammstapelbehälter (SSB), vier Kläranlagen verfügen zusätzlich über einen hauptsächlich oder ausschließlich für Schlammwasser genutzten Speicher. Eine Kläranlage (SB#05) führt das Schlammwasser in kleinen Mengen direkt in die Kläranlage zurück, da kein Schlammwasserspeicher vorhanden ist. Bei großen Schlammwassermengen besteht die Möglichkeit dieses in entleerten Schlammstapelbehältern aufzubewahren. Bis auf Kläranlage SB#05 wird bei allen Kläranlagen das Schlammwasser zwischengespeichert. Üblicherweise entwässern die Kläranlagen

2- bis 4-mal im Jahr, woraus sich eine maximale Aufenthaltszeit in den Schlammstapelbehältern von ca. 90 bis 180 Tagen ergibt. Als mobile Entwässerungseinheiten kommen überwiegend Zentrifugen (60 %), gefolgt von Kammerfilterpressen (27 %) und Schneckenpressen (13 %) zum Einsatz. Zwei der Anlagen behandeln gewerbliche/industrielle Abwässer im Einzugsgebiet (siehe Kapitel 4.2.2). Zur Phosphorelimination kommt überwiegend die chemische Phosphorelimination zum Einsatz (73 %). Eine Kombination aus erhöhter biologischer und chemischer Phosphorelimination findet bei 20 % der Anlagen statt. Eine rein biologische Phosphorelimination findet nur bei einer der beprobten Anlagen Anwendung.

#### 4.2.2 Steckbriefe der Kläranlagen (Betriebsdaten)

Nachfolgend werden die beprobten Kläranlagen in Form von kurzen Steckbriefen mit den wichtigsten Kennwerten dargestellt. Die Angaben von *TR* und *GV* des Überschussschlammes (ÜSS) beschreiben den Klärschlamm im Zulauf der Entwässerung bzw. nach der maximalen Aufenthaltszeit im Schlammstapelbehälter und stammen meist aus den Entwässerungsprotokollen vergangener/laufender Entwässerungen. Als Maßstab für das Entwässerungsergebnis ist der analysierte *TR*-Gehalt des entwässerten Klärschlammes aufgeführt. Bei den Kläranlagen SB#01, SB#02, SB#03 und SB#04 konnte keine Probe des entwässerten Klärschlammes entnommen werden, deswegen wurden hier die Angaben aus dem Entwässerungsprotokoll oder die Angaben der Kläranlagenbetreiber verwendet. Die Anlagen und ihr grundlegender verfahrenstechnischer Aufbau sind in Abbildung 12 bis Abbildung 22 dargestellt.

##### SB#01

Ausbaugröße/Belastung:	10.000 EW/6.500 EW
Verfahren:	SBR
<i>TR</i> / <i>GV</i> ÜSS:	4,9 %/75 %
SSB/Schlammwasserspeicher (SWS):	2 x 685 m <sup>3</sup> SSB
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	120 bis 180 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis :	KFP/27 bis 28 % <i>TR</i>

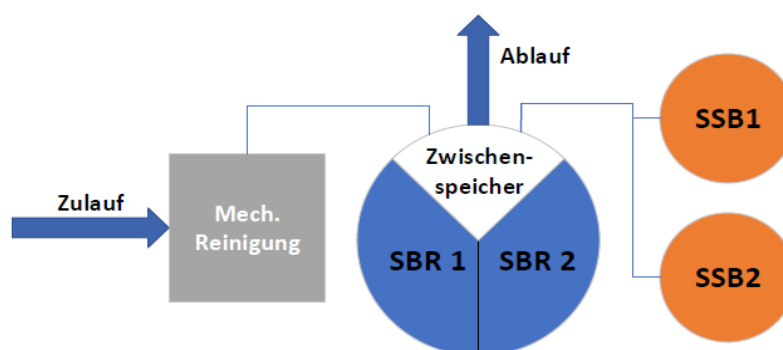


Abbildung 12: Anlagenschema Kläranlage SB#01.

**SB#02**

Ausbaugröße/Belastung:	6.000 EW/6.510 EW
Verfahren:	BS
TR/GV ÜSS:	2,3 bis 2,9 %/61 bis 71 %
Schlammalter:	rd. 29 Tage
SSB/SWS:	3 x 500 m <sup>3</sup> SSB/500 m <sup>3</sup> SWS
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	70 bis 90 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis:	Z/23 bis 24 % TR
Besonderheit:	Großbäckerei im Einzugsgebiet

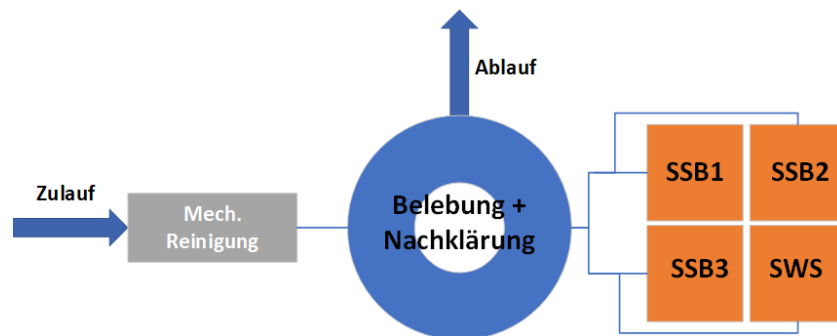


Abbildung 13: Anlagenschema Kläranlage SB#02.

**SB#03**

Ausbaugröße/Belastung:	4.950 EW/3.550 EW
Verfahren:	BS
TR/GV ÜSS:	2,2 bis 2,9 %/64 bis 68 %
Schlammalter:	rd. 40 Tage
SSB/SWS:	2 x 450 m <sup>3</sup> SSB, 1.000 m <sup>3</sup> SWS
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	rd. 180 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis:	Z/23 % TR

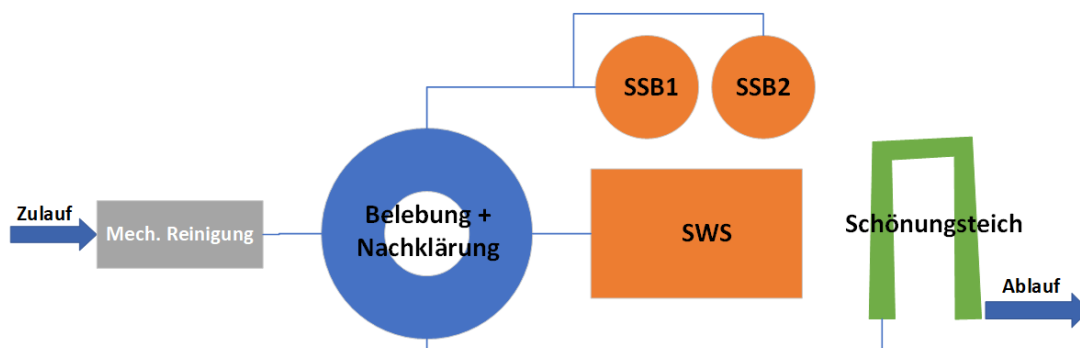


Abbildung 14: Anlagenschema Kläranlage SB#03.

**SB#04**

Ausbaugröße/Belastung: 3.000 EW/2.350 EW  
 Verfahren: BS  
 TR/GV ÜSS: 2,9 bis 3,2/k. A.  
 SSB/SWS: 2 x 450 m<sup>3</sup> SSB, 450 m<sup>3</sup> SWS  
 Aufenthaltszeit Schlamm im SSB: 120 bis 180 Tage  
 Entwässerungsart /-ergebnis: KFP/25 bis 32 % TR

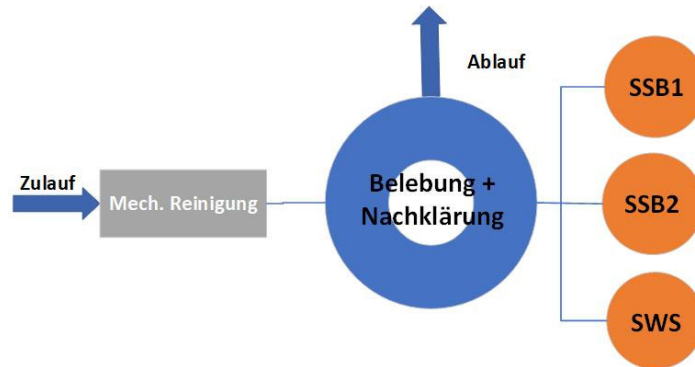


Abbildung 15: Anlagenschema Kläranlage SB#04

**SB#05**

Ausbaugröße/Belastung: 4.800 EW/4.000 EW  
 Verfahren: BS  
 TR/GV ÜSS: k. A./78,0 %  
 Schlammalter: 15 bis 20 Tage  
 SSB/SWS: 830 m<sup>3</sup> und 2 x 300 m<sup>3</sup> SSB  
 Aufenthaltszeit Schlamm im SSB: 90 bis 120 Tage  
 Entwässerungsart /-ergebnis: SP/13 bis 14 % TR  
 Besonderheit: Brauerei im Einzugsgebiet

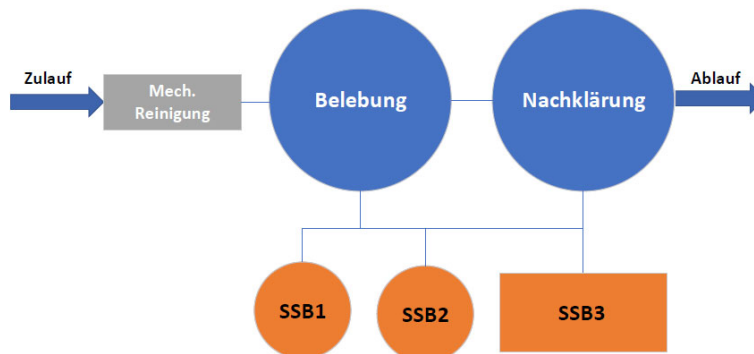


Abbildung 16: Anlagenschema Kläranlage SB#05.



**SB#06**

Ausbaugröße/Belastung:	7.000 EW/5.000 EW
Verfahren:	SBR
TR/GV ÜSS:	2,8 bis 3,2 %/58 %
Schlammalter:	rd. 35 Tage
SSB/SWS:	3 x SSB
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	rd. 120 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis:	Z/24 bis 26 % TR

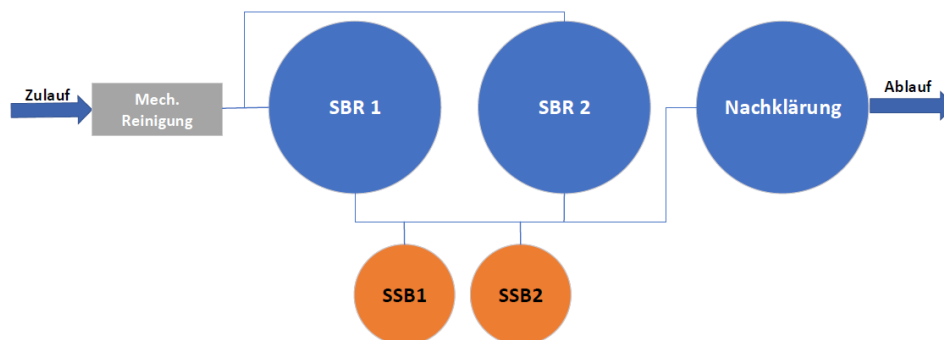


Abbildung 17: Anlagenschema Kläranlage SB#06.

**SB#07**

Ausbaugröße/Belastung:	12.900 EW/8.500 EW
Verfahren:	BS
TR/GV ÜSS:	2,4 %/66 %
Schlammalter:	rd. 24 Tage
SSB/SWS:	4 x 1.075 m <sup>3</sup> SSB
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	rd. 120 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis:	Z/20 % TR
Besonderheit:	solare Klärschlamm-trocknung

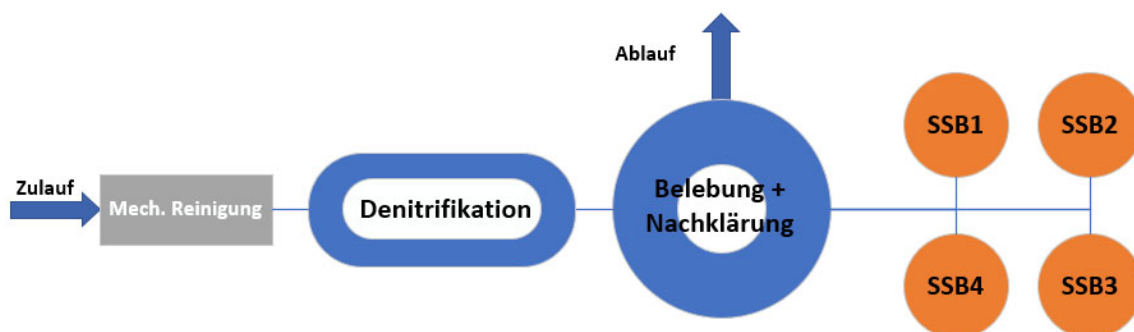


Abbildung 18: Anlagenschema Kläranlage SB#07.



**SB#08**

Ausbaugröße/Belastung: 12.000 EW/10.000 EW  
 Verfahren: BS  
 TR/GV ÜSS: 1,5 bis 2,2 %/67 %  
 Schlammalter: rd. 30 Tage  
 SSB/SWS: 600 m<sup>3</sup> und 2 x 1.150 m<sup>3</sup> SSB  
 Aufenthaltszeit Schlamm im SSB: 60 bis 90 Tage  
 Entwässerungsart /-ergebnis: Z/22 % TR

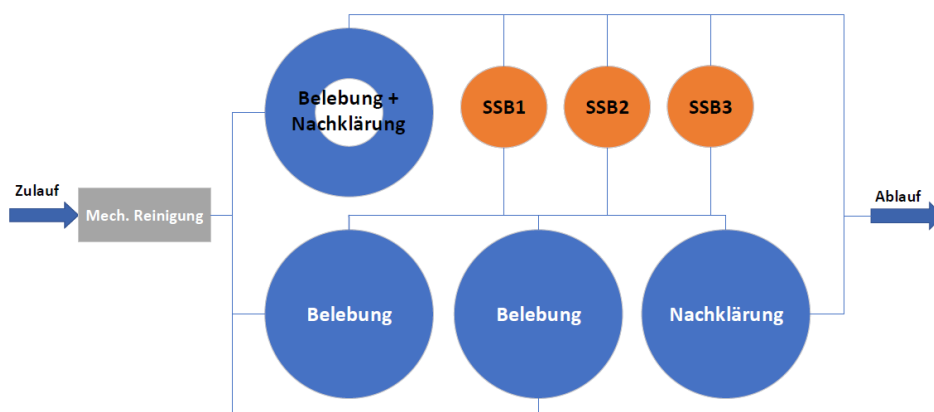


Abbildung 19: Anlagenschema Kläranlage SB#08.

**MB#09**

Ausbaugröße/Belastung: 9.900 EW/8.800 EW  
 Verfahren: BS  
 TR/GV ÜSS: 3,5 bis 4 %/54 %  
 Schlammalter: rd. 35 Tage  
 SSB/SWS: 2 x 500 m<sup>3</sup> SSB  
 Aufenthaltszeit Schlamm im SSB: rd. 180 Tage  
 Entwässerungsart /-ergebnis: Z/27 % TR

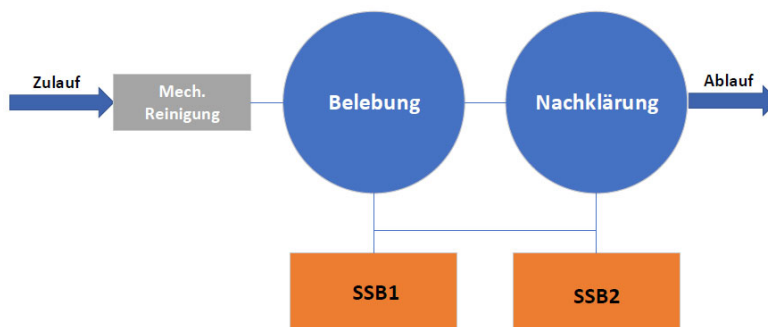


Abbildung 20: Anlagenschema Kläranlage MB#09.

**MB#10**

Ausbaugröße/Belastung:	4.000 EW/2.000 EW
Verfahren:	BS
TR/GV ÜSS:	2,6 %/60 %
Schlammalter:	rd. 20 Tage
SSB/SWS:	4 x 215 m <sup>3</sup> SSB
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	rd. 120 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis:	KFP/25 % TR

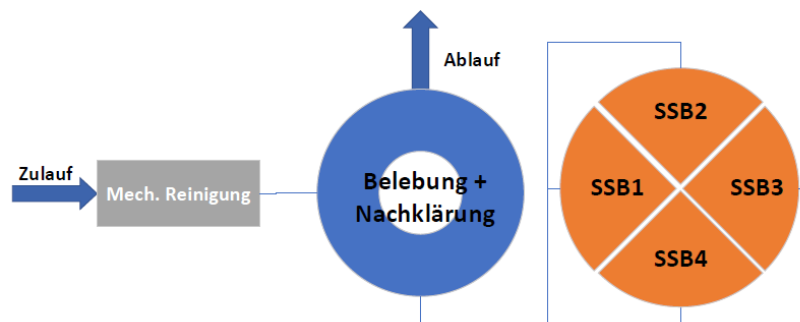


Abbildung 21: Anlagenschema Kläranlage MB#10.

**MB#11**

Ausbaugröße/Belastung:	4.000 EW/2.500 EW
Verfahren:	BS
TR/GV ÜSS:	2,0 bis 2,4 %/62 bis 67 %
Schlammalter:	rd. 24 Tage
SSB/SWS:	3 x SSB
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	rd. 360 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis:	Z/24 % TR

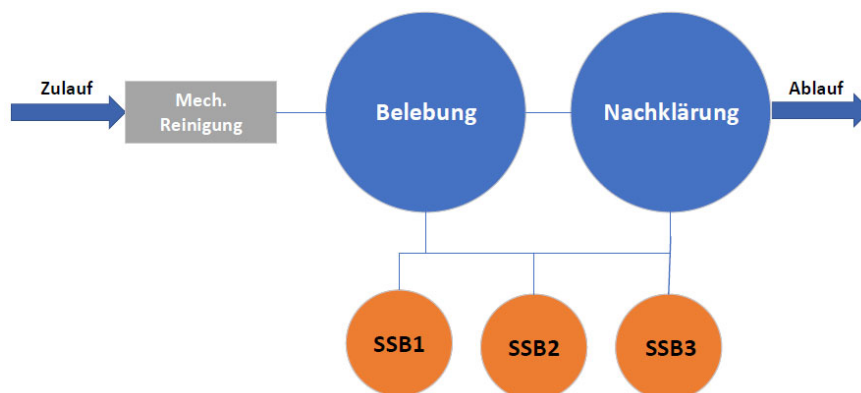


Abbildung 22: Anlagenschema Kläranlage MB#11.

**NB#12**

Ausbaugröße/Belastung:	3.000 EW/1.500 EW
Verfahren:	BS
TR/GV ÜSS:	3,9 bis 4,7 %/54 bis 59 %
SSB/SWS:	3 x SSB
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	rd. 180 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis:	Z/25 % TR

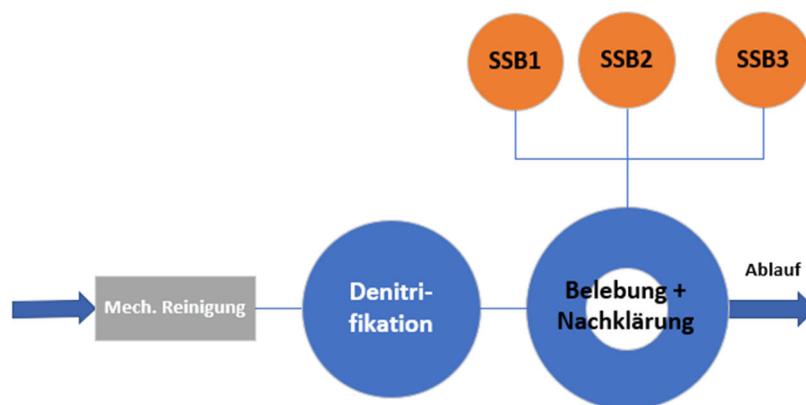


Abbildung 23: Anlagenschema Kläranlage NB#12.

**NB#13**

Ausbaugröße/Belastung:	2.000 EW/1.700 EW
Verfahren:	BS
TR/GV ÜSS:	2,1 bis 2,6 %/51 bis 63 %
Schlammalter:	rd. 24 Tage
SSB/SWS:	1 x SSB, 1 x SWS
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	rd. 90 bis 120 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis:	KFP/25 % TR

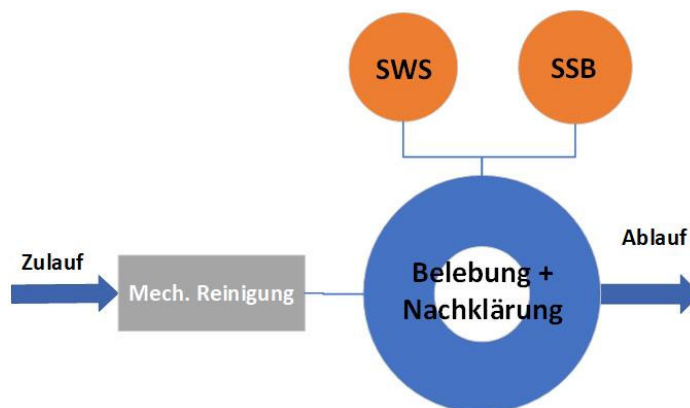


Abbildung 24: Anlagenschema Kläranlage NB#13.

**NB#14**

Ausbaugröße/Belastung:	13.500 EW/9.006 EW
Verfahren:	B&F
TR/GV ÜSS:	2,9 bis 3,0 %/66 bis 75 %
Schlammalter:	rd. 60 Tage
SSB/SWS:	2 x SSB
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	rd. 180 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis:	KFP/28 bis 33 % TR

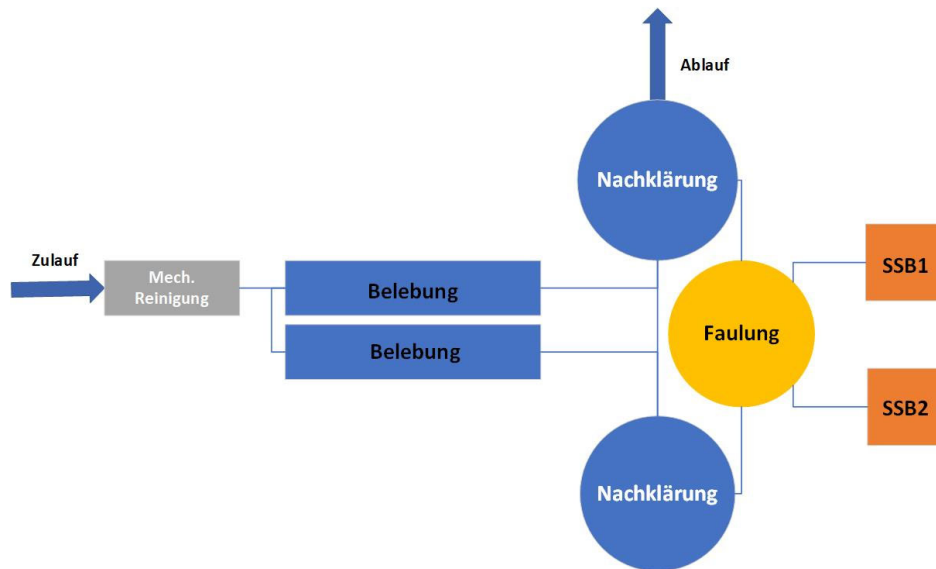


Abbildung 25: Anlagenschema Kläranlage NB#14.

**NB#15**

Ausbaugröße/Belastung:	5.500 EW/1.523 EW
Verfahren:	BS
TR/GV ÜSS:	k. A./k. A.
Schlammalter:	rd. 40 Tage
SSB/SWS:	2 x SSB
Aufenthaltszeit Schlamm im SSB:	rd. 360 Tage
Entwässerungsart /-ergebnis:	KFP/32 % TR

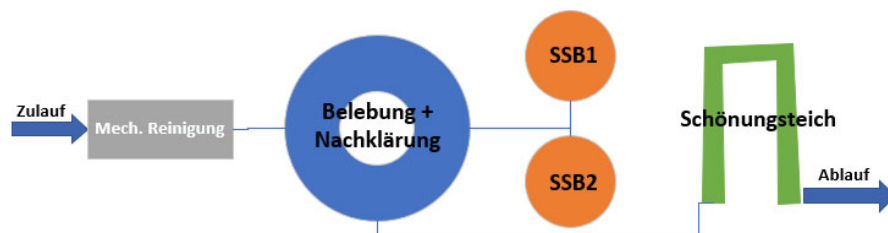


Abbildung 26: Anlagenschema Kläranlage NB#15.

### 4.2.3 Ergebnisse der Analysen

Die Probenahme erfolgte nach Möglichkeit direkt aus dem Ablauf (Schlammwasser) bzw. vom Abwurf (entw. Klärschlamm) des Entwässerungsaggregats. Die Analyseergebnisse für Beprobungen der Kategorie B sind in Tabelle 14, für Beprobungen der Kategorie A in Tabelle 15 dargestellt. Aufgrund der 4-tägigen Entwässerung bei Kläranlage NB#12 wurden die Analysen der Kategorie A-Beprobung um einen Tag verlängert. Bei den Kläranlagen SB#01, SB#02 und SB#04 war die Entwässerung schon beendet und die Schlammwasserproben wurden aus den jeweiligen Speichern entnommen. Bei der kurzen Aufenthaltszeit im Schlammwasserspeicher (Probenahme spätestens 1 bis 3 Tage nach Abschluss der Entwässerung) ist jedoch davon auszugehen, dass der zeitliche Versatz keine nennenswerten Auswirkungen auf die Analyseergebnisse im Vergleich zu den „frischen“ Proben hat. Gleiches gilt für die mehrtägigen Beprobungen der Kategorie A. Die durchgeführten Analysen zu *TR*/*AFS*/*TKN* stellen Stichproben für den jeweiligen Entwässerungsprozess dar. Es ist davon auszugehen, dass die inhomogene Verteilung von Feststoffpartikeln im Schlammwasser den *AFS* stark beeinflusst. Die Kläranlage NB#15 verfügt nach Angaben des Kläranlagenbetreibers über einen hohen Lehmanteil in der Belebtschlammflocke, was sich in einem hohen *TR*-Gehalt (38,7 %) und einem geringen *GV*-Gehalt (22,8 %) widerspiegelt.

Eine differenzierte Darstellung des Gesamtergebnisses der Klärschlammwässerung bzgl. *TR* ermöglichen die über die Prozessparameter und -ergebnisse geführten Entwässerungsprotokolle. Diese konnten für die Kläranlagen SB#01, SB#02, SB#03, SB#06, SB#07 und MB#11 erhoben werden. Der *TR* des ÜSS, sowie des entwässerten Klärschlammes aus den Entwässerungsprotokollen sind in Tabelle 16 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Entwässerungsergebnis über die Dauer des Entwässerungsprozesses (meist 1 bis 5 Tage) weitestgehend konstant bleibt.

Sind mehrere SSB verfügbar erfolgt die Befüllung während des Betriebs und die Zufuhr zum Entwässerungsaggregat aus den SSB der Reihe nach. Unterschiedliche Verweilzeiten der Schlämme in den SSB, einhergehend mit veränderten Schlammeigenschaften sind die Folge. In Tabelle 15 ist der Wechsel der SSB zwischen dem zweiten und dritten Tag der Probenahme an der Kläranlage MB#11 an einer deutlichen Veränderung des *GV* erkennbar (von rd. 62% auf rd. 67%), einhergehend mit einer Veränderung der Schlammwasserqualität.

Tabelle 14: Analysierte Parameter (Kategorie B) von Schlammwasser aus der Klärschlammmentwässerung bei ausgewählten bayerischen Kläranlagen. \*Angaben von Kläranlagen im Jahr 2020.

Kläranlage	GK	Leitfähigkeit	T	pH	AFS	CSB <sub>gts</sub>	CSB <sub>gpl</sub>	TKN	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	P <sub>gts</sub>	PO <sub>4</sub> -P	TR	GV
SB #01	3	5,24	-	-	179	370	198	594	560	<0,5	<1,0	56	11	27,8*	-
SB #02	3	3,66	12,7	7,9	27	458	99	338	330	<0,1	<1,0	13	11	26,3*	-
SB #03	2	2,63	13,1	7,6	142	296	108	214	210	<0,1	<1,0	30	22	26,1*	-
SB #04	2	3,81	10,7	7,4	<10	220	88	359	357	<0,1	<1,0	37	30	24,0*	-
MB #09	3	2,64	9,3	7,7	38	644	86	244	231	<0,1	1,50	13	8,2	27,3	50,9
MB #10	2	4,24	10,9	7,2	12	552	277	391	364	<0,1	<1,0	28	16	24,8	60,5
NB #13	2	2,63	16,3	6,8	70	996	813	200	186	<0,1	<1,0	8,4	7,2	23,8	66,3
NB #14	4	4,23	19,3	7,9	32	283	139	405	400	<0,1	<1,0	23	21	31,6	44,0
NB #15	2	2,18	16,7	7,5	19	341	307	117	114	<0,1	<1,0	6,6	6,4	38,7	22,8

Tabelle 15: Analysierte Parameter (Kategorie A) von Schlammwasser aus der Klärschlammmentwässerung bei ausgewählten bayerischen Kläranlagen.

Kläranlage	Tag	GK	Leitfähigkeit	T	pH	CSB <sub>ges</sub>	CSB <sub>gel</sub>	TKN	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	P <sub>ges</sub>	PO <sub>4</sub> -P	AFS	TR	GV
SB #05	1	2	2,85	8,5	6,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,3	74,5
			2,90	10,1	6,8	2.010	514	273	156	<0,1	<0,5	100	50	951		
	2	2,88	11,4	6,74	3.530	163	396	154	<0,1	0,86	150	52	2.459	13,9	73,6	
		2,84	10,7	6,77	1.660	174	252	154	0,14	0,9	90	44	671			
	3	2,91	11,1	6,81	2.640	205	294	161	<0,1	<0,5	116	45	1.444	13	68,2	
		2,46	10,1	6,83	4.380	224	399	147	0,22	<0,5	-	37	2.827			
<b>M</b>	<b>2,81</b>	<b>10,3</b>	<b>6,79</b>	<b>2.844</b>	<b>256</b>	<b>323</b>	<b>154</b>	<b>&lt;0,1</b>	<b>&lt;0,5</b>	<b>144</b>	<b>46</b>	<b>1.670</b>	<b>13,7</b>	<b>72,1</b>		
<b>SD</b>	<b>0,16</b>	<b>0,9</b>	<b>0,03</b>	<b>997</b>	<b>131</b>	<b>62</b>	<b>4</b>			<b>23</b>	<b>5</b>	<b>840</b>	<b>0,6</b>	<b>2,8</b>		
SB #06	1	2	2,19	9,2	7,2	920	331	176	168	<0,1	<0,5	33	9,3	138	24,2	58,4
			2,21	9,4	7,2	940	404	176	168	<0,1	<0,5	28	7,9	53		
	2	2,19	8,6	7,24	865	320	182	161	<0,1	<0,5	24	8,3	32	24,7	58	
		2,19	8,1	7,29	930	346	182	151	0,1	<0,5	23	7,4	118			
	3	2,18	7,6	7,2	1.050	424	179	154	0,26	<0,5	23	7,9	104	24,3	58,2	
		2,18	8,6	7,25	1.050	349	179	154	0,3	<0,5	21	7,2	102			
<b>M</b>	<b>2,19</b>	<b>8,6</b>	<b>7,23</b>	<b>959</b>	<b>362</b>	<b>179</b>	<b>159</b>	<b>0,2</b>	<b>&lt;0,5</b>	<b>25</b>	<b>8,0</b>	<b>91</b>	<b>24,4</b>	<b>58,2</b>		
<b>SD</b>	<b>0,01</b>	<b>0,6</b>	<b>0,03</b>	<b>68</b>	<b>38</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>0,1</b>		<b>4</b>	<b>0,7</b>	<b>37</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>		
SB #07	1	4	2,96	10	7,19	684	64	265	238	<0,1	<0,5	21	6,5	126	20,3	66,4
			2,94	9,6	7,2	651	57	265	238	<0,1	<0,5	20	6,4	134		
	2	3,03	9,9	7,18	669	60	275	238	<0,1	<0,5	21	6,4	178	20,4	66,7	
		2,92	9,2	7,2	960	61	273	252	<0,1	<0,5	28	6	374			
	3	2,95	11,3	7,14	693	75	270	252	<0,1	<0,5	21	5,6	78	20,3	66,8	
		2,97	10,4	7,19	768	74	273	238	0,44	<0,5	24	5,5	196			
<b>M</b>	<b>2,96</b>	<b>10,1</b>	<b>7,18</b>	<b>738</b>	<b>65</b>	<b>270</b>	<b>243</b>	<b>&lt;0,1</b>	<b>&lt;0,5</b>	<b>23</b>	<b>6,1</b>	<b>181</b>	<b>20,3</b>	<b>66,6</b>		
<b>SD</b>	<b>0,03</b>	<b>0,7</b>	<b>0,02</b>	<b>106</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>7</b>			<b>3</b>	<b>0,4</b>	<b>94</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>		
SB #08	1	4	2,43	8,2	6,99	1.160	20	171	123	<0,01	<0,5	18	8,2	882	22,1	68
			2,40	9,8	7,04	1.300	39	182	123	<0,01	<0,5	24	9,8	884		
	2	2,42	8	7,1	692	32	168	124	<0,01	<0,5	20	8	301	21,9	68,1	
		2,46	10,3	7,01	647	50	168	124	<0,01	<0,5	21	10,3	204			
	3	2,45	9,6	7,04	633	19	159	128	<0,01	<0,5	19	9,6	237	22,3	67,8	
		2,45	9,7	7,05	730	35	167	129	<0,01	<0,5	18	9,7	136			
<b>M</b>	<b>2,43</b>	<b>9,3</b>	<b>7,04</b>	<b>860</b>	<b>33</b>	<b>169</b>	<b>125</b>	<b>&lt;0,01</b>	<b>&lt;0,5</b>	<b>20</b>	<b>9,3</b>	<b>441</b>	<b>22,1</b>	<b>68,0</b>		
<b>SD</b>	<b>0,02</b>	<b>0,9</b>	<b>0,03</b>	<b>266</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>2</b>			<b>2</b>	<b>0,9</b>	<b>317</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>		
MB #11	1	2	3,14	10,6	7,4	613	234	273	280	0,6	<0,5	17	17	18	24,1	61,7
			3,15	10,5	7,3	674	236	280	280	0,3	<0,5	17	15	70		
	2	3,17	9,8	7,5	729	200	286	280	0,6	<0,5	18	15	104	24,1	62,1	
		3,18	10	7,5	790	190	286	280	0,5	<0,5	21	15	214			
	3	2,59	10,4	7,2	1.130	690	203	154	0,3	<0,5	16	12	158	23,8	66,7	
		2,57	10,9	7,2	1.170	668	203	154	0,3	<0,5	16	12	167			
<b>M</b>	<b>2,96</b>	<b>10,4</b>	<b>7,4</b>	<b>851</b>	<b>370</b>	<b>255</b>	<b>238</b>	<b>0,4</b>	<b>&lt;0,5</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>122</b>	<b>24,0</b>	<b>63,5</b>		
<b>SD</b>	<b>0,27</b>	<b>0,4</b>	<b>0,1</b>	<b>218</b>	<b>219</b>	<b>37</b>	<b>59</b>	<b>0,1</b>		<b>2</b>	<b>2</b>	<b>65</b>	<b>0,1</b>	<b>2,3</b>		
NB #12	1	2	2,29	16,1	6,9	1.790	972	183	138	<0,1	<0,5	20	3,2	578	22,7	58,6
			2,32	16,5	6,9	1.610	969	176	140	<0,1	<0,5	14	3,2	376		
	2	2,31	16,5	6,9	1.820	977	184	140	<0,1	<0,5	16	3,1	480	22,4	58,7	
		2,24	16,3	7,1	946	152	185	141	<0,1	<0,5	19	5,4	505			
	3	2,30	15,7	7,1	958	138	192	148	<0,1	<0,5	21	5,5	511	25,0	53,6	
		2,31	15,3	7,2	788	146	185	148	<0,1	<0,5	12	5,1	241			
4	2,32	16,5	7,2	780	131	179	147	<0,1	<0,5	12	4,8	248	24,6	53,5		
	2,32	16,5	7,2	780	131	179	147	<0,1	<0,5	12	4,8	248				
<b>M</b>	<b>2,30</b>	<b>16,1</b>	<b>7,0</b>	<b>1.242</b>	<b>498</b>	<b>183</b>	<b>143</b>	<b>&lt;0,1</b>	<b>&lt;0,5</b>	<b>16</b>	<b>4,3</b>	<b>420</b>	<b>23,7</b>	<b>56,1</b>		
<b>SD</b>	<b>0,02</b>	<b>0,4</b>	<b>0,1</b>	<b>440</b>	<b>411</b>	<b>5</b>	<b>4</b>			<b>4</b>	<b>1</b>	<b>124</b>	<b>1,1</b>	<b>2,6</b>		

Tabelle 16: TR-Verläufe des zu entwässernden und des entwässerten Klärschlammes aus den Entwässerungsprotokollen für die Kläranlagen SB#01, SB#02, SB#03, SB#06, SB#07, und MB#11 (Probenahmen jeweils im Laufe der Entwässerung, meist an 1 bis 5 Tagen).

	SB#01		SB#02		SB#03		SB#06		SB#07		MB#11	
	TR ÜSS	TR entwässert	TR ÜSS	TR entwässert	TR ÜSS	TR entwässert	TR ÜSS	TR entwässert	TR ÜSS	TR entwässert	TR ÜSS	TR entwässert
	%											
	4,8	27,6	2,6	23,6	2,2	22,8	2,8	24,5	3,3	20,4	2,4	25,1
	4,8	27,7	2,4	23,4	2,3	22,6	3,1	24,0	3,3	20,1	2,4	24,6
	5,0	28,2	2,3	23,4	2,4	22,0	-	24,0	3,3	20,3	2,4	24,3
	5,0	28,1	2,5	22,9	2,3	22,5	3,2	24,9	3,4	19,5	2,4	24,5
	5,0	27,4	2,4	22,7	2,2	22,6	3,0	24,2	3,4	19,9	2,2	24,2
	4,9	27,7			2,3	22,4	-	23,8			2,2	24,5
	4,8	27,8					3,0	24,2			2,1	24,3
							-	23,8			2,0	27,9
							3,0	24,6				
							3,0	24,4				
							-	24,7				
<b>M</b>	4,9	27,8	2,4	23,2	2,3	22,5	3,0	24,3	3,3	20,0	2,3	24,9
<b>n</b>	7	7	5	5	6	6	7	11	5	5	8	8
<b>SD</b>	0,1	0,3	0,1	0,3	0,0	0,2	0,1	0,4	0,1	0,3	0,2	1,2

### Physikalische Parameter

In Abbildung 27 sind die Parameter a) Leitfähigkeit sowie b) pH-Wert und Temperatur anhand von Box-Plots dargestellt. Die Leitfähigkeit variiert zwischen 2.180 bis 5.240  $\mu\text{S}/\text{cm}$  mit einem Mittelwert und Standardabweichung von  $2.772 \pm 625 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Die Beprobungen haben gezeigt, dass die Leitfähigkeiten stark schwanken und allgemein größer als 2,0 mS/cm sind.

Die Temperatur des Schlammwassers schwankte im Bereich von 7,6 bis 19,6 °C und war abhängig von der Umgebungstemperatur während der Probenahme. Bei dem pH-Wert wurde im Mittel ein  $\text{pH} = 7,2 \pm 0,3$  gemessen, wobei sich der Messbereich zwischen  $\text{pH} = 6,7$  bis 7,9 erstreckte.



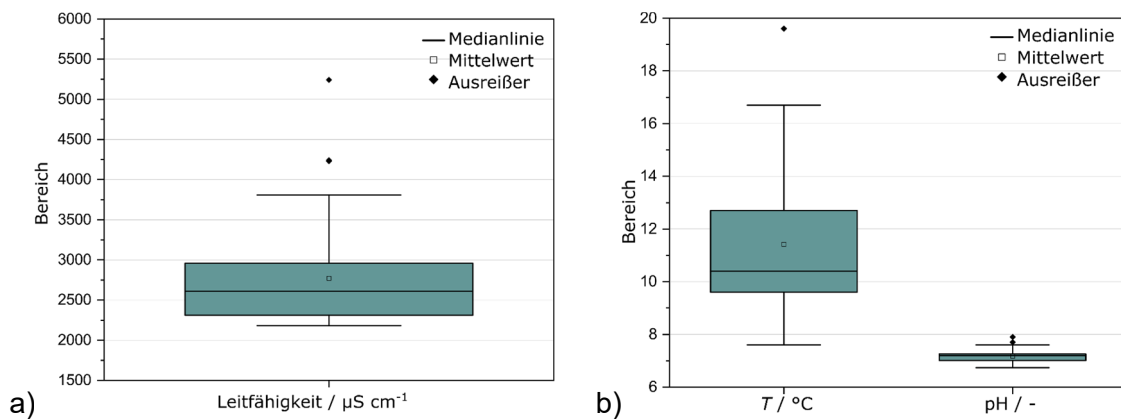


Abbildung 27: Box-Plot für die gemessenen Parameter des Schlammwassers a) Leitfähigkeit und b) pH-Wert sowie Temperatur auf den ausgewählten Kläranlagen.

### AFS und Chemischer Sauerstoffbedarf

Die AFS-Konzentration zeigte einen hohen Schwankungsbereich von 12 bis 2.827 mg/L mit einem Mittelwert und Standardabweichung von  $382 \pm 577$  mg/L. Wie in Abbildung 28 a) dargestellt, sind im Box-Plot mehrere Ausreißer AFS  $> 500$  mg/L zu erkennen. Gleiches wurde bei der  $\text{CSB}_{\text{ges}}$ -Konzentration beobachtet, welche im Mittel bei  $\text{CSB}_{\text{ges}} = 1.056 \pm 791$  mg/L lag. Es ist davon auszugehen, dass sich absetzende und aufschwimmende Feststoffpartikel bei den Probenahmen aus den meist undurchmischten Speicherbehältern aber auch bei den Probenahmen direkt am Entwässerungsaggregat die starken Schwankungen in den Analyseergebnissen verursachen.

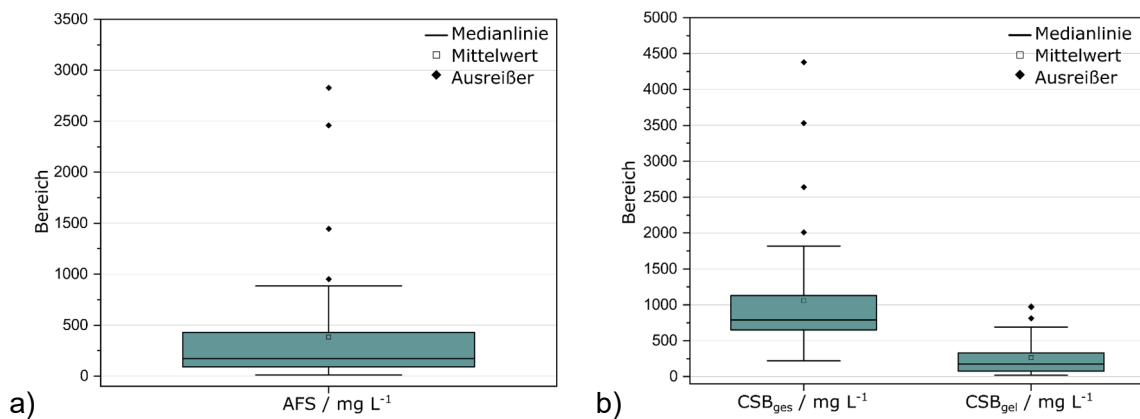


Abbildung 28: Box-Plot für die gemessenen Parameter des Schlammwassers a) AFS-Konzentration und b) des  $\text{CSB}_{\text{ges}}$ - und  $\text{CSB}_{\text{gel}}$ -Konzentration auf den ausgewählten Kläranlagen.

Die  $\text{CSB}_{\text{gel}}$ -Konzentration war aufgrund der  $0,45 \mu\text{m}$  Filtration erwartungsgemäß geringer bei einer mittleren Konzentration von  $\text{CSB}_{\text{gel}} = 264 \pm 261$  mg/L (siehe Abbildung 28 b).

In Abbildung 29 a) ist zu erkennen, dass die  $\text{CSB}_{\text{ges}}$ -Konzentration mit zunehmender AFS-Konzentration im Schlammwasser mit einer Korrelation von  $R^2 = 0,875$  steigt.

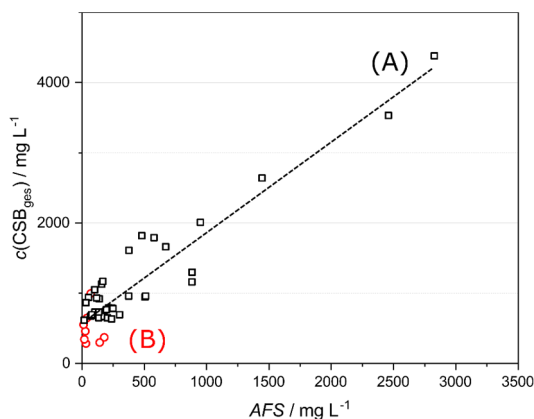


Abbildung 29: Abhängigkeit der  $c(\text{CSB}_{\text{ges}})$ -Konzentration des Schlammwassers von der AFS-Konzentration ( $R^2 = 0,875$ ;  $c(\text{CSB}_{\text{ges}}) = 1,28 c(\text{AFS}) + 585 \text{ mg/L}$ ). Darstellung des Analyseumfangs für Kategorie A (schwarz) und Kategorie B (rot).

Eine hohe AFS-Konzentration führt dabei allgemein zu einer hohen gesamten CSB-Konzentration, was meist aus einem schlechten Entwässerungsergebnis (bzw. der Abscheideleistung) resultiert. Die AFS-Konzentration bei den beprobten Anlagen lag bei dem Einsatz von Kammerfilterpressen bei  $< 20 \text{ mg/L}$ . Bei der Verwendung von mobilen Schneckenpressen (SB#05) wurden dagegen hohe AFS-Konzentrationen gemessen, was sich auch in einem schlechteren Entwässerungsergebnis (13 bis 14 %  $TR$ ) widerspiegelt. Dahingegen kann der  $TR$ -Austrag durch stationäre Schneckenpressen erhöht werden, da diese an die individuellen Bedürfnisse des anfallenden Klärschlammes angepasst sind.

### Stickstoff

Die Ergebnisse der Untersuchungen auf ausgewählten bayerischen Kläranlagen in Tabelle 14 haben eine Leitfähigkeit ( $\kappa$ ) zwischen 2.180 bis 5.240  $\mu\text{S/cm}$  gezeigt, welche wie zu erwarten mit der Konzentration von  $\text{NH}_4\text{-N}$  und TKN korrelieren (siehe auch Abbildung 31 a) und b)).

Die gemessenen Ammoniumkonzentrationen lagen im Bereich zwischen 114 bis 560  $\text{mg/L NH}_4\text{-N}$  mit einem Mittelwert von  $203 \pm 90 \text{ mg/L NH}_4\text{-N}$ . Für die TKN-Konzentration erstreckte sich der Messbereich von 117 bis 594  $\text{mg/L}$  mit einem Mittelwert bei  $244 \pm 89 \text{ mg/L}$  (siehe Abbildung 30).

Die TKN-Konzentration  $c(\text{TKN})$  setzt sich zusammen aus der Ammonium-Stickstoff-Konzentration  $c(\text{NH}_4\text{-N})$  und organischen Stickstoffverbindungen. Durch die Analysen des Schlammwassers wurde gezeigt, dass  $c(\text{TKN})$  hauptsächlich aus der  $c(\text{NH}_4\text{-N})$  besteht (ca. 93 bis 99 %). Die Konzentrationen von  $\text{NO}_3\text{-N}$  sowie  $\text{NO}_2\text{-N}$  sind vernachlässigbar gering.

Bei den Kläranlagen der Kategorie B wurden Konzentration von  $c(\text{NH}_4\text{-N}) > 200 \text{ mg/L}$  gemessen, wobei bei allen betrachteten Kläranlagen die Ammonium-Stickstoffkonzentration bei  $c(\text{NH}_4\text{-N}) > 100 \text{ mg/L}$  lag.

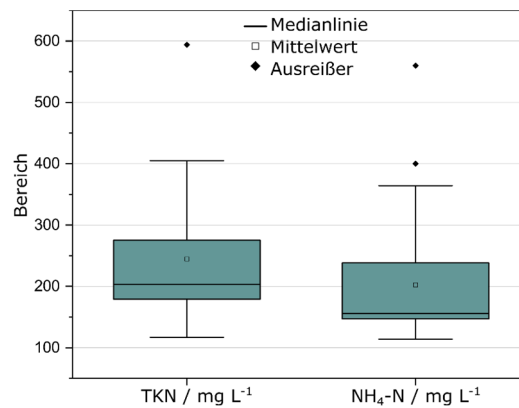


Abbildung 30: Box-Plot für die gemessenen Parameter des Schlammwassers TKN- und NH<sub>4</sub>-N-Konzentration auf den ausgewählten Kläranlagen.

Die mehrtägigen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Ammonium-Stickstoff-Konzentrationen bei gleichbleibenden Bedingungen (bspw. gleicher Schlammstapelbehälter) relativ konstant verhalten. Lediglich bei MB#11 war vom zweiten auf den dritten Tag ein Rückgang der Ammonium-Stickstoff-Konzentration von 280 mg/L auf 154 mg/L zu beobachten (siehe Tabelle 15). Nach Rücksprache mit dem Kläranlagenbetreiber wurde in dem Zeitraum der Beprobung der zu entwässernde Schlammstapelbehälter gewechselt, wobei dieser Schlammstapelbehälter Klärschlamm mit einer kürzeren Verweilzeit beinhaltete.

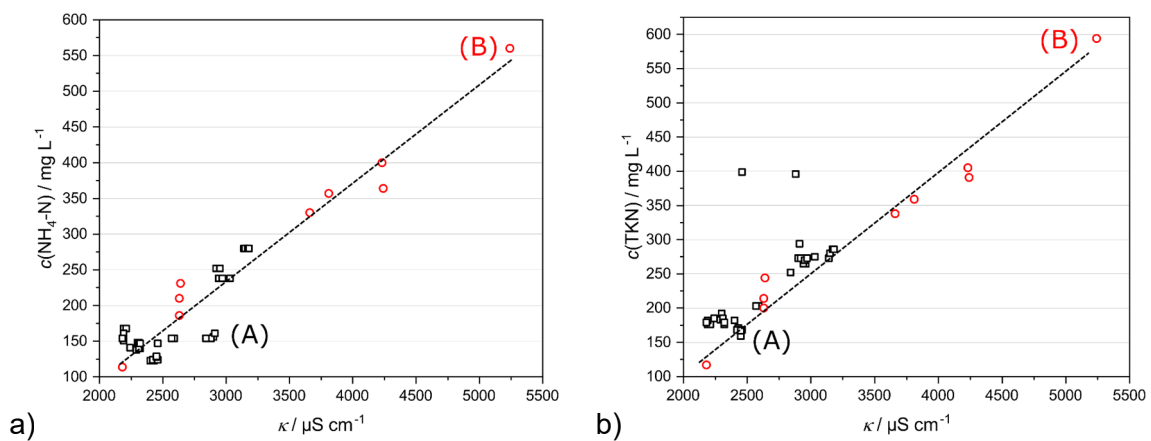


Abbildung 31: Abhängigkeit der Leitfähigkeit ( $\kappa$ ) von der a) NH<sub>4</sub>-N-Konzentration ( $R^2 = 0,891$ ) sowie der b) TKN-Konzentration ( $R^2 = 0,949$ , ohne zwei schwarzen Ausreiser bei ca. 400 mg/L) in Schlammwasser auf ausgewählten Kläranlagen. Darstellung des Analyseumfangs für Kategorie A (schwarz) und Kategorie B (rot).

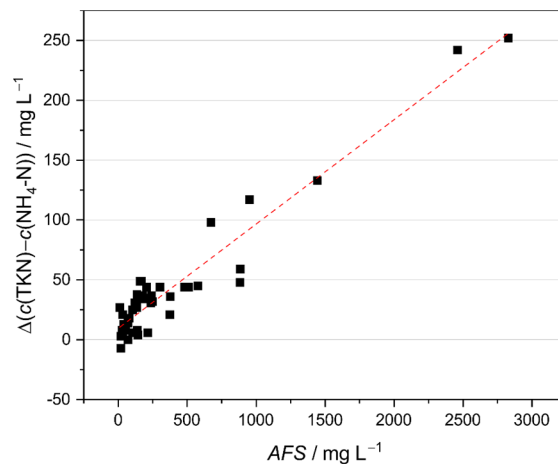


Abbildung 32: Lineare Abhängigkeit von der Differenz der TKN- und NH<sub>4</sub>-N-Konzentration ( $\Delta(c(\text{TKN}) - c(\text{NH}_4\text{-N}))$ ) zur AFS-Konzentration im Schlammwasser ( $R^2 = 0,918$ ).

Es liegt die Vermutung nahe, dass sich in dem Schlammstapelbehälter schnell anaerobe Bedingungen einstellen. Lange Verweilzeiten im Schlammstapelbehälter begünstigen die Hydrolyse von Schlamm zu Ammonium und führen damit zu steigenden Ammonium-Stickstoff-Konzentrationen. Bei der Umstellung des Betriebes auf den Schlammstapelbehälter mit der kürzeren Verweilzeit wurden aus diesem Grund eine geringere Ammonium-Stickstoff-Konzentrationen im Schlammwasser gemessen. Somit ist die Freisetzung von Ammonium abhängig von der Lagerdauer im Schlammstapelbehälter.

Weiterhin wurde beobachtet, dass bei niedrigen AFS-Konzentrationen die Differenz zwischen der TKN- und NH<sub>4</sub>-N-Konzentration geringer ist. Während die NH<sub>4</sub>-N-Konzentration von der Aufenthaltsdauer im Schlammstapelbehälter abhängt, befindet sich zudem ein erheblicher Stickstoffanteil in der Schlammflocke. Bei einer schlechten Entwässerung steigt somit der Anteil an organischen Stickstoffverbindungen im Schlammwasser, was sich an der Differenz beider Konzentrationen im Verhältnis zur AFS-Konzentration beobachten lässt (siehe Abbildung 32).

### Phosphor und Phosphat

Die gemessene Gesamtphosphor-Konzentration ( $P_{\text{ges}}$ ) lag im Bereich von 7 bis 150 mg/L. Aus Abbildung 33 a) geht ebenfalls eine starke Schwankung der Messwerte hervor, wobei sich der Mittelwert bei einer Konzentration von  $c(P_{\text{ges}}) = 29 \pm 29$  mg/L befindet. Ähnlich zeichnet sich der Verlauf der PO<sub>4</sub>-P-Konzentration ab, welcher ein Mittelwert bei  $c(\text{PO}_4\text{-P}) = 14 \pm 13$  mg/L bei einem Messbereich von 3 bis 52 mg/L zeigt (siehe Abbildung 33 b).

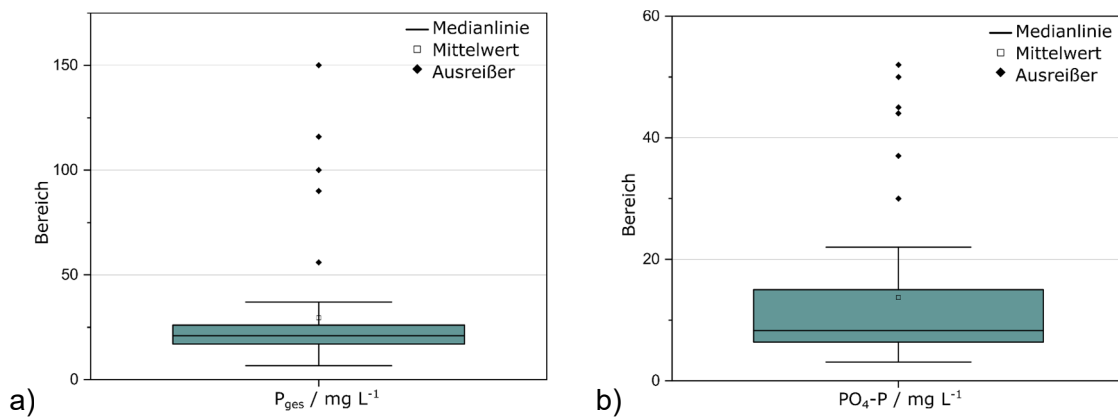


Abbildung 33: Box-Plot für die gemessenen Parameter des Schlammwassers a)  $P_{ges}$ - und b)  $PO_4-P$ -Konzentration auf den ausgewählten Kläranlagen.

Aus diesem Grund ist die Wahl der Phosphorelimination bei Kläranlagen entscheidend für das Entwässerungsergebnis. Eine Phosphorelimination durch chemische Fällung (durch Eisen- bzw. Aluminiumsalze) führt zu einer entsprechenden Bindung des Phosphors im Klärschlamm, welcher während der Entwässerung nur bedingt rückgelöst werden kann und diese verbessert (Schaum et al. 2020). Aus diesem Grund ist der Einfluss der Phosphatrückbelastung bei Kläranlagen mit chemisch-physikalischer Phosphorelimination als vernachlässigbar gering einzustufen (DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 2000).

Analog zur Abhängigkeit der Differenz aus TKN- und  $NH_4-N$ -Konzentration ist auch die Differenz aus  $P_{ges}$ - zur  $PO_4-P$ -Konzentration mit zunehmender AFS-Konzentration gestiegen (siehe Abbildung 34). Jedoch ist die Korrelation mit  $R^2 = 0,698$  aus der Differenz der  $P_{ges}$ - zur  $PO_4-P$ -Konzentration geringer als bei der Stickstoff-Abhängigkeit (siehe Abbildung 32).

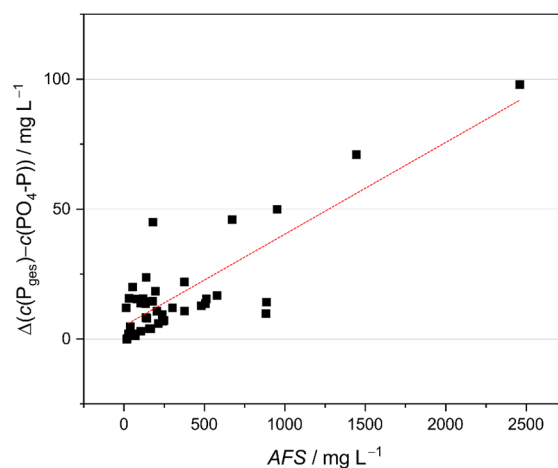


Abbildung 34: Lineare Abhängigkeit von der Differenz der  $P_{ges}$ - und  $PO_4-P$ -Konzentration ( $\Delta(c(P_{ges}) - c(PO_4-P))$ ) zur AFS-Konzentration im Schlammwasser ( $R^2 = 0,698$ ).

### 4.3 Bewertung der gemessenen Konzentrationen auf die Rückbelastung

Abhängig vom Entwässerungsaggregat wurden Zusammenhänge von der AFS-Konzentration mit der  $CSB_{ges}$ -Konzentration festgestellt. Im Schlammwasser machen die Ammonium-Stickstoff-Konzentration den vorwiegenden Anteil an der Rückbelastung in Kläranlagen aus, wobei diese im Mittel bei  $c(NH_4-N) > 100$  mg/L lag. Vergleichbare Ammonium-Stickstoff-Konzentrationen im Überstand der Schlammstapelbehälter wurden ebenfalls bei Untersuchungen weiterer bayerischer Kläranlagen nachgewiesen (Hilliges und Kinshofer 2016). Die Konzentrationen von  $NO_3-N$  sowie  $NO_2-N$  sind vernachlässigbar gering.

Die Aufenthaltszeit im Schlammstapelbehälter beeinflusst den Glühverlust. Mit zunehmender Lagerdauer sinkt der Glühverlust, wodurch es zu einer Nachstabilisierung des Klärschlammes kommt. Unter diesen anaeroben Bedingungen kommt es im Schlammstapelbehälter zu höheren Ammonium-Stickstoff-Konzentrationen, die sich bei der Entwässerung in einer höheren Ammonium-Stickstoff-Rückbelastung im Schlammwasser widerspiegeln. Daneben beeinflusst das Schlammalter die Gasbildungsrate im Schlammstapelbehälter, wobei es v. a. beim Rühren bzw. Entwässern von Klärschlamm zu Methanausgasungen kommen kann (Hilliges und Kinshofer 2016), vgl. auch Kapitel 5.5.6.

Zur Beurteilung der Rückbelastung erfolgt eine Abschätzung der Frachten auf Basis von Standardwerten aus der Literatur.

Im Zulauf zur Kläranlage werden die einwohnerspezifischen Frachten nach (ATV-DVWK-A 198 2003) für Rohabwasser herangezogen.

Der spezifische Rohschlammanfall für Kläranlagen mit gemeinsamer aerober Stabilisierung richtet sich nach (DWA-M 368 2014) für eine angenommene Temperatur von  $15$  °C. Daraus ergeben sich für 50-Perzentile der Frachten im Rohabwasser ein Schlammanfall von  $b_{TM,E,d} = 48,4$  g/(E·d) sowie  $q_{E,d} = 6,9$  L/(E·d). Die Konzentration des anfallenden Rohschlammes resultiert hieraus zu  $C_{Schlamm(roh)} = 7,0$  g TML.

Durch die Lagerung im Schlammstapelbehälter (einschl. dem Abzug von Trübwasser) erfolgt eine Eindickung auf einen Trockenrückstand (TR) von 2,5 % bzw. entsprechend einer Konzentration von  $C_{Schlamm(Eind)} = 25$  g TML und damit eine spezifische Schlammfracht von  $q_{Schlamm(Eind)} = 1,9$  L/(E·d).

Im Rahmen der Entwässerung kann eine  $TR_{ÜS}$ -Konzentration von 25 % erzielt werden bzw. entsprechend einer Konzentration von  $C_{Schlamm(Entw)} = 250$  g TML und damit eine spezifische Schlammfracht von  $q_{Schlamm(Entw)} = 0,2$  L/(E·d).

Aus der Differenz der beiden spezifischen Frachten  $q_{Schlamm(Eind)}$  und  $q_{Schlamm(Entw)}$  berechnet sich eine spezifische Schlammwasser-Rückbelastung von  $q_{Schlammwasser} = 1,7$  L/(E·d).

Für das in Abbildung 35 dargestellte Szenario ergeben sich anhand der analysierten Parameter die spezifische Rückbelastung bei direkter Rückführung des Schlammwassers in die Kläranlage nach Tabelle 17.

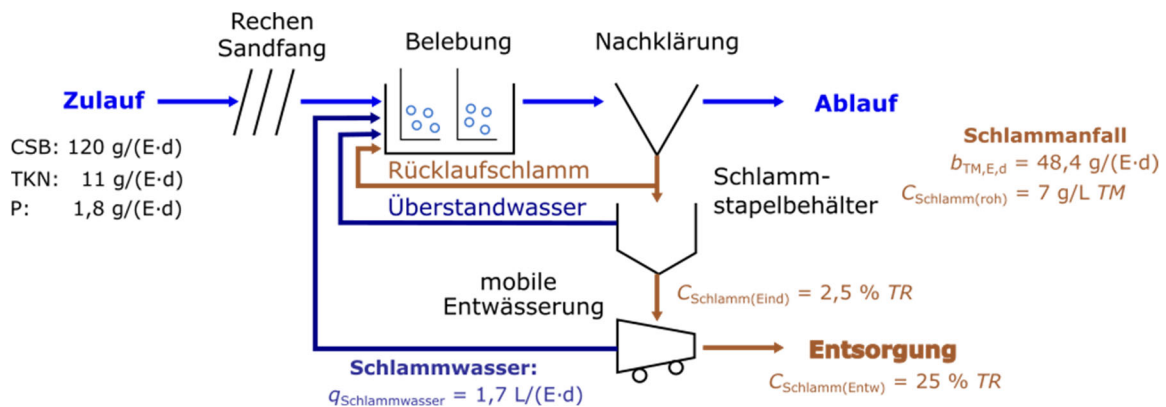


Abbildung 35: Vereinfachte Darstellung zur Bilanzierung der Rückbelastung.

Tabelle 17: Konzentrationen im Schlammwasser auf ausgewählten bayerischen Kläranlagen und Berechnung der spezifischen Rückbelastung bei direkter Rückführung des Schlammwassers in den Zulauf der Kläranlage. Berechnung der spezifischen Werte  $b_{x,E,d} = C_x \cdot q_{\text{Schlammwasser}}$  mit  $q_{\text{Schlammwasser}} = 1,7 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$ .

Konzentration	Min	Max	M	SD	Min	Max	M	SD
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	g/(E·d)	g/(E·d)	g/(E·d)	g/(E·d)
CSB <sub>ges</sub>	220	4.380	1.056	791	0,4	7,6	<b>1,8</b>	1,4
CSB <sub>gel</sub>	19	977	264	261	0,03	1,7	<b>0,5</b>	0,5
TKN	117	594	244	89	0,2	1,0	<b>0,4</b>	0,2
NH <sub>4</sub> -N	114	560	203	90	0,2	1,0	<b>0,4</b>	0,2
P <sub>ges</sub>	7	150	29	29	0,01	0,3	<b>0,1</b>	0,1
PO <sub>4</sub> -P	3	52	14	13	0,01	0,1	<b>0,1</b>	0,1
AFS	12	2.827	382	577	0,02	4,9	<b>0,7</b>	1,0

Bezogen auf die spezifische Stickstofffracht im Zulauf der Kläranlagen trägt der Anteil der Stickstofffracht aus der Klärschlammmentwässerung rd. 2 bis 9 % (im Mittel 4 %). Hierbei ist zu beachten, dass dies nur für eine kontinuierliche Rückführung gilt (bspw. bei einer kontinuierlichen Entwässerung oder durch eine Schlammwasserbewirtschaftung mittels Schlammwasserspeicher). Sobald dies nicht der Fall ist, kann sich die Rückbelastung bei einer saisonalen, mobilen Klärschlammmentwässerung aus einem Schlammstapelbehälter deutlich erhöhen. Sofern man an einem Tag einen Schlammstapelbehälter mit einer Lagerdauer von 120 d entwässern würde, würde sich eine Rückbelastung von (im Mittel) 48 g/(E·d) ergeben bzw. entsprechend zum Zulauf rd. 436 %. Dieses Extrembeispiel (Worst Case Szenario) soll die hohe Relevanz der Schlammwasserbewirtschaftung verdeutlichen.

Wenngleich für die Betriebsstabilität der Abwasserbehandlung die Stickstoffrückbelastung die höchste Relevanz hat, so ist doch auch die Rückbelastung von AFS, CSB und P<sub>ges</sub> zu beachten.

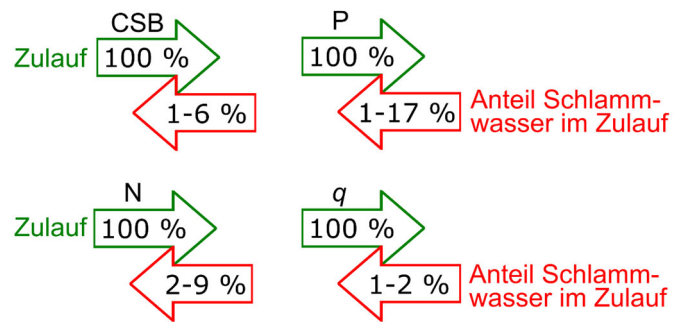


Abbildung 36: Spezifische Rückbelastung von Schlammwasser anhand vorheriger Analyseuntersuchungen im Zulauf von Kläranlagen unter der Annahme einer kontinuierlichen Schlammwasserrückführung in den Hauptstrom der Kläranlage.



## **5 Entwicklung von Bewertungskriterien für eine zukunftsfähige Klärschlammbehandlung und -entsorgung**

### **5.1 Motivation und Ziel der Entwicklung von Bewertungskriterien**

In Kläranlagen anfallender Klärschlamm durchläuft mehrere Behandlungsschritte bis zur endgültigen Verwertung bzw. Entsorgung. Unter Berücksichtigung der Kläranlagengröße sowie der Belastungssituation ist es notwendig, die betrieblichen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der möglichen Klärschlammbehandlungs- und -entsorgungsschritte zu bewerten und Einflüsse wie beispielsweise die Rückführung von Zentrat- und Filtratwasser zu berücksichtigen. Eine zukunftsfähige Klärschlammbehandlung und -entsorgung muss daher nicht nur betriebliche Aspekte betrachten, sondern ebenfalls die Faktoren der Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und Entsorgungssicherheit mit daraus resultierenden verfahrenstechnischen Entscheidungen und innovativen Strategien zur Ausnutzung von Synergieeffekten.

Anhand der zuvor gewonnenen Ergebnisse sowie einer aktuellen Bestandsaufnahme aus bereits durchgeführten Studien und Publikationen zum Thema Klärschlammmentwässerung und Rückbelastung sollten Kriterien und Randbedingungen festgelegt werden, die den Kläranlagenbetreibern von kleinen und mittleren Kläranlagen beim Entscheidungsprozess für eine zukunftsfähige Klärschlammbehandlung und -entsorgung unterstützen sollen.

Hierbei sollen vor allem Entscheidungskriterien aufgezeigt werden, ob

- die Entwässerung auf der eigenen Kläranlage durchgeführt werden soll (stationäre versus mobile Entwässerung),
- die Entwässerung oder Behandlung auf einer benachbarten Kläranlage im Rahmen einer interkommunalen Zusammenarbeit erfolgen kann,
- die Entsorgung in der Landwirtschaft erfolgen kann,
- eine Trocknung am Kläranlagenstandort sinnvoll ist.

Ziel ist es ein Bewertungsverfahren aufzubauen und so zu erweitern, um Kläranlagenbetreibern, Planern sowie kommunalen Entscheidungsträger unter Berücksichtigung spezifischer Standort- und Anlagenbedingungen die Entscheidung der Klärschlamm Entsorgung und nötiger weiterer Behandlungsschritte zu erleichtern.

Im Zusammenhang mit Entscheidungskriterien sollen u. a. wirtschaftliche, ökologische und betriebliche Aspekte sowie Fragen der langfristigen Entsorgungssicherheit berücksichtigt werden. Die entwickelten Handlungskriterien sollen dabei einen Beitrag zur langfristigen Entsorgungssicherheit auf kleinen und mittleren Kläranlagen leisten.

## 5.2 Grundlagen der Klärschlammmentwässerung und -trocknung

### 5.2.1 Verfahren zur Klärschlammmentwässerung

Abhängig von der Entstehung und der Herkunft des Klärschlammes besteht dieser im Rohzustand zu mehr als 90 %, aus Wasser, welches sich in freies, nicht an Schlammpartikel gebundenes, und gebundenes Wasser (Zwischenraum-, Oberflächen-, Zellinnen-, Hydratwasser und in Hydrogelsystemen gebundenes Wasser) unterteilt. Durch die maschinelle Entwässerung lässt sich primär das freie Wasser abtrennen. Zur weiteren Entwässerung des gebundenen Wassers müssen thermische Verfahren eingesetzt werden (DWA-M 383 2019).

Um das freie Wasser aus dem Klärschlamm abzutrennen muss Energie aufgewendet werden, wofür es verschiedene Arten der maschinellen Schlammmentwässerung gibt. Diese mechanischen Trennverfahren werden grundsätzlich in Filtration und Zentrifugation unterteilt. Bei der Filtration (Bandfilterpressen, Kammerfilterpressen, Membranfilterpressen, Schneckenpressen) erfolgt die Trennung der Fest- und Flüssigphase durch ein Filtermedium und dem entstehenden Filterkuchen unter Druck. Bei Dekantierzentrifugen wird die Trennung durch Sedimentation unter Einwirkung von Zentrifugalkräften erzeugt.

In Abhängigkeit der Verfahren zur Eindickung, Entwässerung und Trocknung lässt sich die erreichbare Volumenreduktion des Klärschlammes unter Steigerung des Trockenrückstands in Abbildung 37 darstellen (DWA-M 366 2013).

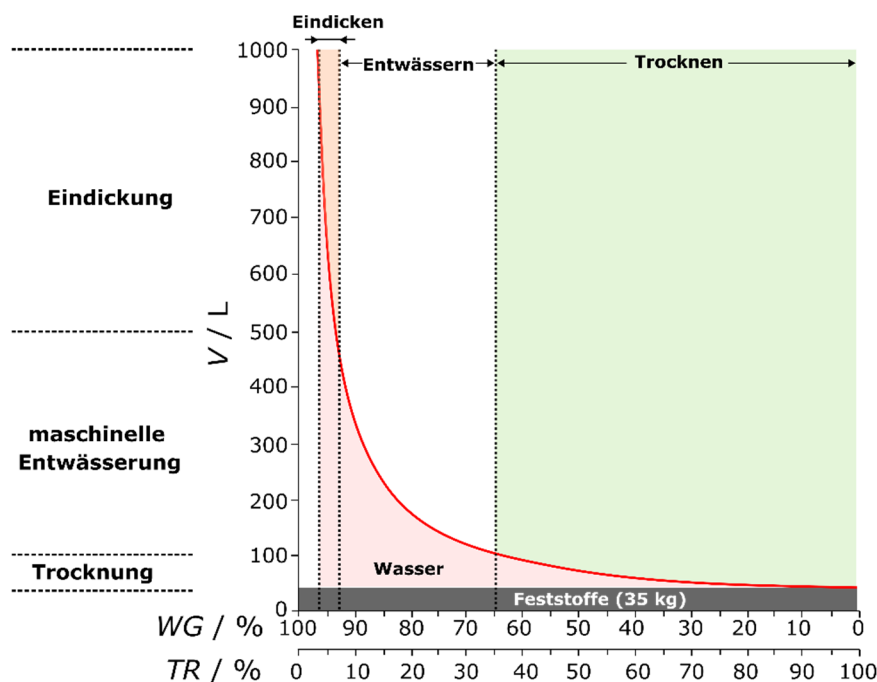


Abbildung 37: Volumenreduktion des Klärschlammes in Abhängigkeit der Behandlungsschritte (verändert nach (DWA-M 366 2013). Angenommene Dichte von  $1,0 \text{ g/cm}^3$ .

Der erreichte Trockenrückstand und der Abscheidegrad sind die entscheidenden Kriterien, um das Ergebnis der Entwässerung zu beschreiben. Abhängig von der Klärschlammart und dem Entwässerungssystem lassen sich verschiedene *TR*-Gehalte erreichen, die je nach Anwendung einen unterschiedlichen Strom- und Konditionierungsmittelbedarf benötigen (DWA-M 366 2013; DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5 2019). Eine Übersicht ist in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Leistungsdaten von Entwässerungssystemen (DWA-M 366 2013).

Entwässerung		Zentri- fuge	Bandfilter- presse <sup>1</sup>	Filterpresse:		Schnecken- presse
				Kammerfilterpresse <sup>3</sup> Schlauchfilterpresse	Kalk-/ Eisen- Konditionierung <sup>2</sup>	
				pFM		
Primär- schlamm	% <i>TR</i>	32 - 40	30 - 35	32 - 40	35 - 45	30 - 40
Misch- schlamm aus PS + ÜSS (Fracht-Ver- hältnis ca. 1:1)	% <i>TR</i>	26 - 40	24 - 30	26 - 32	33 - 45	24 - 30
Aerob stabili- sierter ÜSS (ohne Vorklä- rung)	% <i>TR</i>	18 - 24	15 - 22	18 - 24	28 - 35	18 - 24
Faulschlamm	% <i>TR</i>	22 - 30	20 - 28	22 - 30	30 - 40	20 - 28
<b>Verbrauch polymerer Flockungsmittel (bezogen auf die polymere Wirksubstanz WS)</b>						
spez. pFM- Verbrauch	kg/t <i>TM</i>	8 - 14	6 - 12	6 - 12 8 - 15 <sup>4</sup>	-	6 - 12
<b>Stromverbrauch</b>						
spez. Strom- verbrauch <sup>5</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	1,0 - 1,6	0,5 - 0,8	0,7 - 0,9 1,0 - 1,2 <sup>7</sup>	1,0 - 1,2	0,2 - 0,5
	kWh/t <i>TM</i>	40 - 60	20 - 30	30 - 40 40 - 50 <sup>7</sup>	30 - 40	8 - 16
spez. Strom- verbrauch <sup>6</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	1,6 - 2,2	1,1 - 1,4	1,5 - 1,8	1,8 - 2,0	0,6 - 1,0
	kWh/t <i>TM</i>	60 - 90	40 - 50	60 - 70	70 - 80	20 - 40

1: *TR* im Zulauf zwischen 2 % und 7 %.

2: Abhängig von Zugabemengen von Kalk und Eisen.

3: Membranfilterpressen (MFP) erreichen im Vergleich zu Kammerfilterpressen 2 - 4 % höhere *TR*-Gehalte; Stromverbrauch bei MFP ist etwas höher.

4: pFM-Verbrauch von Schlauchfilterpressen.

5: Bezogen auf Schlammdurchsatz bzw. Feststofffracht ohne Konditionierungsmittelmenge.

6: Wie 5, einschließlich Stromverbrauch der Beschickungspumpe und Konditionierungsmittelanlage.

7: Stromverbrauch von MFP.

Das Entwässerungsergebnis wird durch viele verschiedene Parameter und komplexe Prozesse beeinflusst, die vom Ursprung des Klärschlammes (Primär-, Überschussschlamm etc.) bis hin zum Faulungsprozess reichen. Für die Dokumentation der Entwässerungseigenschaften sollten regelmäßige Analysen sog. Basiskennwerte (*TR*, *GV*, Temperatur, pH-Wert etc.) aufgenommen werden, die in (DWA-M 383 2019) dargestellt sind und wofür auch ein „Beispiel einer Checkliste zur Schlammentwässerung“ angegeben wird.

Die Qualität des Entwässerungsergebnisses wird primär von der Herkunft und der Zusammensetzung des anfallenden Abwassers und Rohschlammes bestimmt. Ein wichtiger Parameter zur Bestimmung der Entwässerbarkeit ist der Glühverlust, welcher den Anteil an organischen Bestandteilen widerspiegelt. Hohe organische Anteile haben eine geringe Dichte und eine höhere Kompressibilität sowie ein starkes Wasserbindungsvermögen (z. B. von Fasern, Fetten, EPS), was die Entwässerung erschwert. Abbildung 38 gibt eine ausgewählte Übersicht an Parametern, die den organischen Anteil beeinflussen (z. B. Proteingehalt, erhöhter ÜSS-Anteil). Eine allgemeingültige Abschätzung des Entwässerungsergebnisses durch den *GV* ist jedoch nicht verlässlich. Im Gegensatz dazu sind anorganische Bestandteile besser zu entwässern (z. B. hoher Sandanteil aufgrund besserem Drainageeffekt), können jedoch zu einer Erhöhung des polymeren Flockungsmittel-(pFM)-Bedarfs führen (DWA-M 383 2019).

Neben weiteren chemisch-physikalischen Parametern wie bspw. dem pH-Wert und der Leitfähigkeit (siehe Abbildung 38), kann auch die Betriebsführung das Entwässerungsergebnis beeinflussen. Bei einem Schlammalter von  $> 30$  d können sehr kleine Flocken des ÜSS-Schlammes entstehen und zu einem erhöhten pFM-Bedarf führen. Dies betrifft in besonderer Weise kleinere Kläranlagen, die den ÜSS-Schlamm nicht täglich abziehen. Ein hohes Schlammalter i. V. m. einer geringen Sauerstoffkonzentration kann zu fadenförmigen Mikroorganismen und hohen EPS-Gehalten führen, welche die Entwässerung verschlechtern. Eine detaillierte Erklärung einzelner Parameter und Verfahrensweisen, welche die Schlammentwässerung beeinflussen ist dem (DWA-M 366 2013)-Merkblatt zu entnehmen.

Die Entwässerung kann entweder durch eine mobile oder durch eine stationäre Entwässerung erfolgen. Bei einer diskontinuierlichen (mobilen) Entwässerung sind entsprechend größere Speicherkapazitäten für Schlamm Speicher- und Schlammwasserbehälter notwendig, um zum einen den anfallenden Klärschlamm zwischenspeichern zu können und zum anderen durch ein geeignetes Schlammwassermanagement die Betriebssicherheit zu erhöhen. Im Vergleich dazu kann eine stationäre Entwässerung zur Entsorgungssicherheit und Preisunabhängigkeit beitragen, wodurch sich die Investition bei ausreichender Amortisationszeit rechnet. Die Vor- und Nachteile einer stationären oder mobilen Entwässerung stellt Tabelle 19 dar.

Tabelle 19: Vor- und Nachteile einer mobilen und stationären Entwässerung in Anlehnung an (DWA Arbeitsgruppe AK-13.4 2010).

	Vorteile	Nachteile
mobil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringer Personalaufwand</li> <li>- keine Investitionen</li> <li>- ggf. Vermietung von Entwässerungsaggregaten ohne Personal</li> <li>- kalkulierbare Jahreskosten (ohne Einfluss von Krisen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hohe Preisabhängigkeit</li> <li>- kurze Entwässerungsdauern können bei nicht vorhandenem SWS zu hohen Rückbelastungen führen → erforderlicher SWS</li> <li>- i. d. R. höhere Durchsatzmengen nötig (da sonst unwirtschaftlich) → größere SWS</li> <li>- ggf. schlechteres Entwässerungsergebnis, da nicht individuell angepasst an Bedürfnisse</li> <li>- Abhängigkeit von saisonalen Einflüssen (Witterungsbedingungen)</li> <li>- organisatorischer Aufwand für Beauftragung des Entwässerungsunternehmens</li> </ul>
stationär	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringer Flächenbedarf für SSB und SWS</li> <li>- bessere Planbarkeit und damit höhere Entsorgungssicherheit</li> <li>- Preisunabhängigkeit (Energie- und Rohstoffpreise)</li> <li>- höhere Flexibilität</li> <li>- besseres Strommanagement</li> <li>- optimiertes Entwässerungsergebnis der individuellen Bedürfnisse</li> <li>- individuelle Schlammwasserrückführung (geringere Rückbelastung), ggf. Verzicht auf SWS</li> <li>- unabhängig von saisonalen Einflüssen (Witterungsbedingungen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoher Personalaufwand (Betrieb, Wartung ...)</li> <li>- hohe Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten</li> <li>- erhöhter Flächenbedarf</li> <li>- organisatorischer Aufwand (Beschaffung von Polymeren, Klärschlamm Entsorgung)</li> </ul>

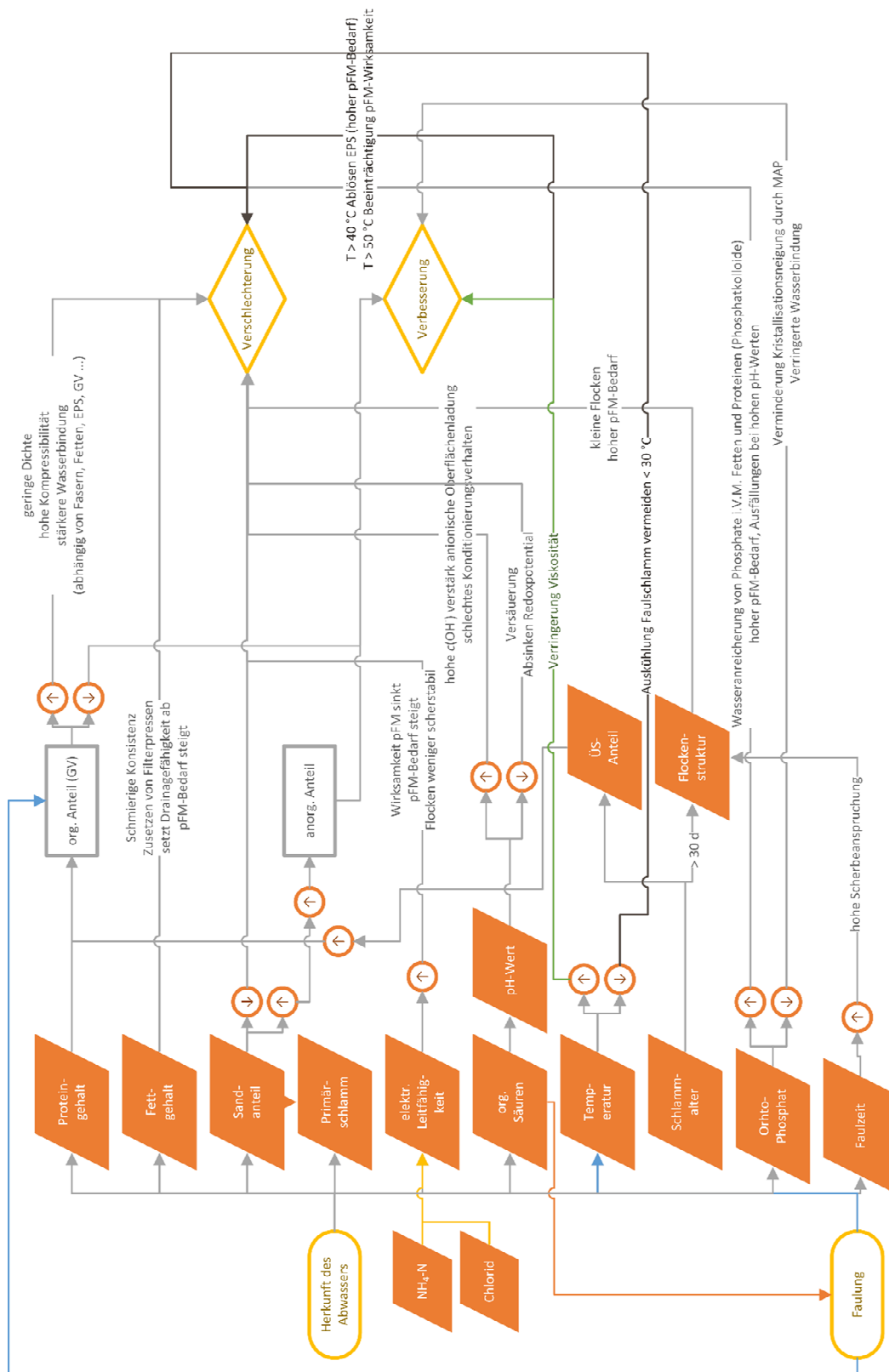


Abbildung 38: Übersicht über ausgewählte Parameter zur Beeinflussung des Entwässerungsergebnisses nach (DWA-M 383 2019). Die Pfeile symbolisieren eine Steigerung und Reduzierung des entsprechenden Parameters.

### 5.2.2 Verfahren zur Klärschlamm-trocknung

Zur Steigerung des *TR*-Gehaltes kann der entwässerte Klärschlamm für die weitere Entsorgung nach verschiedenen Verfahren getrocknet werden. Die Trocknung des entwässerten Klärschlammes ist mit einem erhöhten Energieeinsatz verbunden, steigert jedoch den Heizwert des Klärschlammes und reduziert die anfallenden Transport- und Entsorgungskosten. Die Wirtschaftlichkeit von Trocknungsverfahren richtet sich nach dem Grad der vorherigen Entwässerung. Dabei sind *TR*-Gehalte von 40 % bis zu 95 % möglich (siehe Abbildung 37) (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

Abhängig vom *TR*-Gehalt wird von einer Teiltrocknung (40 bis 90 % *TR*), wobei der getrocknete Klärschlamm nicht komplett biologisch stabil ist, bzw. von einer Volltrocknung bei  $\geq 90$  % *TR* mit biologisch stabilem Endergebnis, gesprochen. Dabei ist bei der Trocknung zwischen 40 bis 65 % *TR* auf die sog. Leimphase zu achten. In dieser Phase der Trocknung ist der Klärschlamm besonders verquollen und erdartig, was zu haftenden Anhäufungen führen kann und damit Probleme bei der weiteren Trocknung verursacht. Durch eine vorherige Vermischung des zu trocknenden Klärschlammes mit bereits getrocknetem Klärschlamm kann diese Problematik bei den meisten Verfahren verhindert werden (DWA-M 379 2021).

Prinzipiell werden die Trocknungsverfahren in Konvektions- (Heizmedium: bis zu 600 °C) und Kontaktrockner (Heizmedium: 170 bis 200 °C) unterschieden, wobei eine in- oder direkte Wärmezufuhr stattfindet. (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019; DWA-M 379 2021).

Der zu trocknende Klärschlamm wird bei der Konvektionstrocknung mit einem Trockengas umspült und steht in direktem Kontakt mit dem Wärmeträger. Zu den Konvektionstrocknern zählen Band- und Trommeltrockner. Bei einem Bandrockner ist die Produktqualität gut einstellbar und benötigt je nach Produktaufgabe eine Abstimmung der Materialwahl von Presse und Lochmatrix. Nachteilig ist die bestehende Brandgefahr aufgrund von lokalen Überhitzungen und Staubanreicherungen aufgrund der Zunahme von Trockengutzerfall.

Die Trocknung findet bei Kontaktrocknern durch die Wärmeübertragung einer beheizten Oberfläche statt, mit direktem Kontakt zum Klärschlamm. Scheibentrockner zeigen eine gute Wärmeübertragung und sind geeignet für große Durchsatzmengen, jedoch ist ein diskontinuierlicher Betrieb ungünstig. Daneben existieren Dünnschichtrockner, welche unempfindlich gegenüber schwankenden *TR*-Gehalten sind, jedoch ein großes Bauvolumen bei der Volltrocknung benötigen.

Bei der Strahlungstrocknung erfolgt die Wärmezufuhr durch Infrarotlicht, Elektromagnetismus oder Sonnenenergie. Die solare Trocknung verfügt über geringe spezifische Energiekosten und eine einfache Verfahrenstechnik, benötigt jedoch einen größeren Flächenbedarf und die Trocknungszeiten werden verlängert. Solartrockner arbeiten mit Strahlungs- und Konvektionsenergie. Dabei muss der Klärschlamm regelmäßig umgewälzt werden, um u. a. die Bildung von anaeroben Zonen zu minimieren. Durch die saisonale Verfügbarkeit von Sonnenenergie ist die solare Trocknung abhängig von den Jahreszeiten, wodurch ggf. längere Aufenthaltszeiten bei gleichbleibendem Austrags-*TR* berücksichtigt werden müssen. Abhilfe können zusätzliche alternative Energiequellen wie die Abwärmenutzung schaffen,



wodurch der verfahrenstechnische Aufwand zum Betrieb dieser Anlagen steigt. (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019; Schaum und Lux 2011).

Nach (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019) ist eine thermische Trocknungsanlage erst ab einem Klärschlammfall von rd. 5.000 t/a entwässertem Klärschlamm wirtschaftlich darstellbar. Daher liegt der Fokus der weiteren Betrachtung für kleine und mittlere Kläranlagen auf einer solaren Klärschlamm-trocknung. Die solare Trocknung bietet die Möglichkeit zur Klärschlamm-trocknung mit einfacher Verfahrenstechnik und geringen spezifischen Energiekosten.

### *Solare Klärschlamm-trocknung*

Für die solare Trocknung werden i. d. R. mechanisch vorentwässerte Klärschlämme (18 bis 30 % TR) verwendet, welche in solaren, abwärmegestützten oder rein abwärmegespeisten Hallentrocknern in beispielsweise transparenten eingedeckten Gewächshäusern oder isolierten Hallen getrocknet werden. Die Trocknung erfolgt auf Grundlage von physikalischen Abhängigkeiten bei einer Trocknungsluft 0 bis 30 K über der Umgebungstemperatur (meist < 50 °C), kann durch externen Wärmeeintrag jedoch erhöht werden. Dabei sind abhängig von den saisonalen und lokalen Gegebenheiten sowie der verfahrenstechnischen Ausführung TR-Gehalte von 60 bis 90 % erzielbar (DWA-M 379 2021).

Grundlage für die solare Trocknung sind primär die Solarstrahlung und das Trocknungspotenzial der Umgebungsluft. Aufgrund von saisonalen Einflüssen, den täglich variierenden Temperaturschwankungen sowie Witterungseinflüssen ist auch die Trocknungsleistung schwankend. Abhängig von der relativen Feuchte und damit vom Wasseraufnahmevermögen der Luft können die Verdunstungsraten tages- und jahresabhängig schwanken. Die relative Feuchte der Luft liegt dabei im Jahresmittel bei rd. 70 bis 80 %, wobei die Luftwechselrate die nutzbare Wärmemenge limitiert. Primär muss bei der solaren Trocknung Niederschlagswasser ferngehalten, sowie für eine optimale Verdunstungsrate eine entsprechende Be- und Entlüftungssteuerung (bzw. Luftumwälzung) eingehalten werden. Zur Vermeidung von anaeroben Zonen muss daneben eine regelmäßige Umwälzung (beispielsweise durch Wenderoboter, Schub, Schlaufen, Portalwender oder kettengezogene Rechen) des Klärschlammes stattfinden. Zusätzlich zur Solarstrahlung bietet sich die Niedertemperaturwärme aus Warmwasser oder -luft als unterstützende Energiequelle an. Bei vorhandenen externen (Ab-)Wärmequellen kann die Wärmeenergie zur Steigerung der Trocknungsleistung herangezogen werden. Der Flächenbedarf wird durch den Einsatz externer Energiequellen verringert. Hierzu eignen sich Abwärmequellen wie BHKW, Turbinen oder Warmluft von industriellen Prozessen oder Kompressoren. Bei steigenden Schlammttemperaturen sind jedoch die höheren Geruchsemissionen zu beachten. Von der Nutzung von Primärenergie zur Klärschlamm-trocknung wird aus ökologischer und ökonomischer Sicht abgeraten (DWA-M 379 2021).

Bei einer rein solaren Trocknung kann in Deutschland im Mittel mit einer Wasserverdunstung von 1 t/(m<sup>2</sup>·a) gerechnet werden, welche abhängig von den regionalen Gegebenheiten und jahreszeitlichen Schwankungen ist. Bei abwärmeunterstützten Hallentrocknern können bis zu 5 t Wasserverdunstung/(m<sup>2</sup>·a) erzielt werden. Dabei unterscheiden sich die Betriebs- und Energiekosten je nach eingesetzter Verfahrenstechnik. Bei reiner Solartrocknung wird



ein elektrischer Energiebedarf von 20 bis 40 kWh/t Wasserverdampfung und bei abwärme-gestützter Trocknung von 40 bis 70 kWh/t Wasserverdampfung benötigt (DWA-M 379 2021). Tabelle 20 zeigt die Vor- und Nachteile einer solaren Trocknung.

Neben der Variante der solaren Klärschlamm-trocknung von entwässertem Klärschlamm kann auch Flüssigschlamm in kleinen Kläranlagen durch eine Solartrocknung zur Reduktion von pathogenen Keimen führen und die Klärschlammqualität verbessern (Bux et al. 2002; Reuß und Hainzmeier 1998). An einer Beispielkläranlage mit 1.500 EW mit rd. 600 t aerob stabilisiertem Schlamm (2 bis 4 % TR) konnten TR-Gehalte über 90 % TR erzielt werden. Die Befüllmenge betrug dabei 0,3 bis 0,5 m<sup>3</sup> Schlamm pro m<sup>2</sup> Anlagenfläche mit einer Trocknungsdauer von 30 bis 80 Tagen. Dadurch konnten im Jahresmittel 2 bis 3 m<sup>3</sup> Schlamm pro m<sup>2</sup> Anlagenfläche getrocknet werden (Bux et al. 2002).

Die Abluft aus der solaren Trocknung muss ggf. einer weiteren Abluftbehandlung zugeführt werden.

Es muss beachtet werden, dass die Schlammqualität klimatisch bedingt starken Schwankungen unterliegt, was für die Abgabe an externe Entsorger (z. B. Monoverbrennungsanlagen) zu Problemen führen kann.

Tabelle 20: Vor- und Nachteile der solaren Trocknung von Klärschlamm in Anlehnung an (DWA-M 379 2021).

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringer spezifischer Energiebedarf (reine Solartrocknung)</li> <li>- einfache Verfahrenstechnik</li> <li>- Niedertemperaturwärme-Nutzung (externe Abwärme)</li> <li>- umgängliches Betriebsverhalten</li> <li>- Möglichkeit des diskontinuierlichen Betriebs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoher Flächenbedarf</li> <li>- witterungsabhängige Wasserverdunstung</li> <li>- lange Trocknungszeiten (reine Solartrocknung)</li> <li>- schwankender TR im jahreszeitlichen Verlauf → Probleme bei der Entsorgung in Mit- oder Monoverbrennungsanlagen</li> <li>- jahreszeitliche Schwankungen der Trocknungsleistung</li> </ul>

### 5.2.3 Kosten bei der Entwässerung, Trocknung und Entsorgung von Klärschlamm

Bei der Entwässerung, Trocknung und Entsorgung von Klärschlamm sind bei einer gesamtheitlichen Betrachtung einer (mobilen oder stationären) Entwässerung verschiedene Kostenfaktoren zu berücksichtigen. Um eine wirtschaftliche Entwässerung zu gewährleisten, müssen folgende Kriterien beachtet werden (DWA-M 366 2013):

- Investitions- und Kapitalkosten
  - Maschinen-, Elektro- und Bautechnik
- Personalkosten
  - Bedienung und Wartung
- Betriebsmittelkosten
  - Strom
  - Konditionierungsmittel
  - Brauch- oder Trinkwasser
  - Transport und Entsorgung
- Reparaturen und Ersatzteile
  - Maschinen- und Elektrotechnik
- Betrachtungshorizont/ Nutzungsdauer
- Realzins und Kostensteigerung

Aus einer Wirtschaftlichkeitsvergleichsrechnung der DWA von 2013 für eine Musterkläranlage (100.000 EW) geht hervor, dass die Entwässerungskosten abhängig von der Entwässerungsmaschine im Bereich zwischen rd. 220 bis 280 €/t *TM* lagen. Neben den Entsorgungskosten (abhängig von der Feststoffkonzentration im Austrag) wurden weitere Belastungen mit Kapital, Strom, Konditionierung, Wartung und Personal berücksichtigt, wobei die Entsorgungskosten den größten Anteil ausmachen (DWA-M 366 2013).

Für die solare Trocknung sind Investitionskosten aufgrund des steigenden Flächenbedarfs zu berücksichtigen. Die spezifischen Investitionskosten belaufen sich zwischen 36 bis 100 €/t entwässerten Klärschlamm (im Mittel 68 €/t). Eine ebenfalls große Spannweite tritt bei den Betriebskosten einer rein solaren Trocknung auf, welche sich im Bereich zwischen 20 bis 102 €/t (im Mittel 61 €/t) entwässerten Klärschlamm belaufen. Bei solarunterstützten Trocknungsanlagen müssen zusätzlich Betriebskosten für den Stromverbrauch durch beispielsweise Gebläse einbezogen werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

In den letzten Jahren sind die Entsorgungskosten für Klärschlamm gestiegen, ob in der Landwirtschaft als Nassschlamm, entwässerter Schlamm oder im Landschaftsbau (TransMIT GmbH 2021; Hilmer 2019). Nach einer Umfrage im Regierungsbezirk Kassel gaben 256 Kläranlagen (davon ca. 31 % der GK 1 bis 3) an, dass sich die im (Stand: 2019) jährlichen Entsorgungskosten für entwässerten Klärschlamm auf ca. 281 €/t *TM* beliefen, jedoch ohne die Berücksichtigung der Entwässerungskosten. Für die Entwässerungskosten können ca. 9 bis 11 € pro m<sup>3</sup> Nassschlamm (inkl. Gestellung, Energie, Polymere, Personal)

für eine mobile Entwässerung angenommen werden, was bei 4 % *TM* ca. 200 bis 300 €/t *TM* entspricht (TransMIT GmbH 2021).

Die Umfrage einer Machbarkeitsstudie ergab zudem, dass sich die Entsorgungspreise für Nassschlamm in die Landwirtschaft im Jahr 2019 auf ca. 526 €/t *TM* beliefen und im Landschaftsbau bei ca. 263 €/t *TM* (zzgl. der Entwässerungskosten) lagen. Die mittleren Kosten bei der Nassschlammverwertung belaufen sich nach dieser Umfrage auf ca. 20 € pro m<sup>3</sup> Nassschlamm, wobei je nach Anforderungen und örtlichen Begebenheiten mit einer erheblichen Spannweite zu rechnen ist (11 bis 30 € pro m<sup>3</sup> Nassschlamm). Somit ergeben sich im allgemeinen Kosten für die Entwässerung und Entsorgung von Klärschlamm (als Nassschlamm, entwässertes Schlamm oder im Landschaftsbau) von etwa 500 bis 560 €/t *TM*.

Die Entsorgungspreise bei der Verbrennung (Mono- und Mitverbrennung) betragen im Jahr 2019 ca. 542 €/t *TM* im Raum Kassel (TransMIT GmbH 2021). Eine andere Umfrage ergab vergleichbare Kostenbereiche für die Verwertung bzw. Entsorgung von Klärschlamm, wobei die Kosten für die landwirtschaftliche Verwertung von entwässerten Klärschlamm im Mittel ca. 425 €/t *TM* (inkl. Kosten für Ladung, Transport, Zwischenlagerung, Bodenproben, Landwirt, Landwirtschaftskammer) für das Jahr 2019 betragen (Hilmer 2019).

Abhängig von der Klärschlammbehandlung fallen unterschiedliche Transportkosten an.

Bei kurzen Transportwegen wird **Nassschlamm** mit landwirtschaftlichen Gülle- bzw. Silo-Anhängern transportiert. Die reinen Transportkosten richten sich nach der Entfernung bis 15 km mit rd. 5,0 €/m<sup>3</sup> und bis 25 km mit rd. 7,5 €/m<sup>3</sup>. Bei größeren Entfernungen werden Tank-Auflieger verwendet. Die Kosten für die Nassschlamm-Logistik von Kläranlagen auf die Felder (inkl. Verteilung mit Schleppschuh) betragen rd. 9,5 €/m<sup>3</sup> bis 15 km und 10,5 €/m<sup>3</sup> bis 25 km reine Transport- und Aufbringungskosten zzgl. Kosten von rd. 15 bis 17 €/m<sup>3</sup> Nassschlamm für Einarbeitung, Bodenprobe, Analytik, Lieferschein etc. (Stand: 2021) (TransMIT GmbH 2021).

Bei **entwässerten Schlämmen** (mit rd. 25 % *TM*) richten sich die Transportkosten ebenfalls nach der Entfernung. Diese betragen (Stand: 2021) rd. 8,0 €/t (bis 60 km), 12,5 €/t (bis 100 km) und 18,5 €/t (bis 150 km) bei einem Kippsattelaufliieger (pro Transport ca. 27 bis 28 t) zzgl. Beladung mit Radlader (TransMIT GmbH 2021).

Für **getrocknete Schlämme und Aschen** (> 90 % *TM*) werden Silo-Lastkraftwagen (pro Transport ca. 24 bis 25 t) verwendet mit Kosten von rd. 6,0 €/t (bis 15 km), 10,0 €/t (bis 60 km), 17,0 €/t (bis 100 km) und 24,0 €/t (bis 150 km) (TransMIT GmbH 2021).

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer (mobilen) Entwässerung sind zu den benötigten Analysekosten die Ausgaben für Personal, Betriebsmittel, ggf. Phosphorrecycling etc. zu berücksichtigen, da diese im Verhältnis stärker ins Gewicht fallen. Die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm steht dabei zunehmend im Wettbewerb mit der Ausbringung von Gülle und Gärrückständen, was bei der Planung von Entsorgungsmöglichkeiten individuell einbezogen werden muss. Dabei tragen regionale bzw. lokale Gegebenheiten wie Transportentfernungen, Klärschlammaufkommen etc. ebenfalls zur Preisstruktur bei (Roskosch und Heidecke 2018).

Durch die in den letzten Jahren stark gestiegenen Entsorgungspreise haben daher immer mehr Entwässerungsbetriebe neue Konzepte herausgearbeitet, um eine wirtschaftliche, gesicherte und nachhaltige Klärschlamm Entsorgung zu garantieren.

**Hinweis:** Weltweit kam es seit 2020 zu einer starken Veränderung der Wirtschaft, bedingt durch die Auswirkungen der Corona Pandemie sowie dem Krieg in der Ukraine mit Auswirkungen auf die Preise bei allen Sektoren (bspw. Rohstoffe, Energie etc.). Im Bereich der Klärschlamm Entsorgung kam es zusätzlich zu veränderten Entsorgungsstrukturen, mit entsprechenden Effekten auf die Preissituation. Dementsprechend ist bei allen Angaben zu Kosten das entsprechende Bezugsjahr zu beachten.

### 5.3 Variantenentwicklung einer Klärschlammbehandlung und -entsorgung

Zum Aufbau eines Bewertungsverfahrens und zur Berücksichtigung von verschiedenen Standort- und Anlagenbedingungen werden vier Varianten der Klärschlammbehandlung und -entsorgung definiert:

- |                   |  |
|-------------------|--|
| Variante 1 (V1)   | keine Klärschlamm entwässerung;<br>Nassschlamm Entsorgung über Kläranlage<br>(interkommunale Zusammenarbeit /<br>direkte Entsorgung in der Landwirtschaft) |
| Variante 2A (V2A) | Mobile Klärschlamm entwässerung ohne Schlammwasserspeicher   |
| Variante 2B (V2B) | Mobile Klärschlamm entwässerung mit Schlammwasserspeicher  |
| Variante 3 (V3)   | Stationäre Klärschlamm entwässerung  |
| Variante 4 (V4)   | Stationäre Klärschlamm entwässerung und -trocknung   |

Die Variante 1 betrifft insbesondere Kläranlagen der Größenklasse 1 (Ausbaugröße < 1.000 EW, bspw. unbelüftete Abwasserteichanlagen). Da sich die Rahmenbedingungen deutlich von den Kläranlagen der Größenklasse 2 und 3 abgrenzen (bspw. fehlende technische Infrastruktur wie Strom und Wasser), unterscheiden sich auch die entsprechenden Handlungsempfehlungen.

Bei den Varianten 2 bis 4 werden Belebtschlammverfahren betrachtet, die neben unbelüfteten Abwasserteichanlagen den größten Anteil an der Abwasserbehandlung in Bayern bei Kläranlagengrößen 1 bis 3 haben (Abbildung 2).

Bei allen Varianten sind grundsätzlich die bodenbezogene Klärschlammverwertung und thermische Klärschlammbehandlung als Entsorgungsweg möglich.

### 5.3.1 Verfahrenstechnische Grundkonzeption der Modellkläranlagen

Abbildung 39 zeigt eine Zusammenstellung der Varianten:

Variante 1 umfasst Kläranlagen der Größenklasse 1 und unterscheidet sich grundsätzlich von den restlichen Varianten, da bspw. bei unbelüfteten Abwasserteichanlagen i. d. R. keine mechanische Vorklärung des zuströmenden Abwassers stattfindet. Zur schematischen Darstellung und Vereinfachung dieses Modells wird Variante 1 als „Black-Box“-Modell betrachtet, mit einem Zu- und Ablauf des Abwassers. Beim Entsorgungspfad des Klärschlammes sind bei dieser Variante 1 besonders standortspezifische Faktoren zu berücksichtigen, wie der Zugang zu Strom und Wasser sowie die Infrastruktur (u. a. befestigte Flächen zur mobilen Entwässerung oder die weitere Behandlung bzw. Transport von Klärschlamm).

Die Grundkonzeption der Modellkläranlage (Variante 2A) beinhaltet eine mechanische Abwasserbehandlung durch einen Rechen bzw. Sandfang, gefolgt von der Belebung (Kohlenstoffelimination und Nitrifikation) und Nachklärung. Das Grundkonzept der Modellkläranlage verfügt daneben über einen Schlammstapelbehälter, wobei der Schlamm durch eine mobile Entwässerung behandelt wird. Das Schlammwasser wird nach der mobilen Entwässerung direkt in die Abwasserbehandlung zurückgeführt. Als Variation zur Variante 2A wird das Schlammwasser bei Variante 2B in einem Schlammwasserspeicher vorgehalten.

Zur Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile einer mobilen und stationären Entwässerung wird in Variante 3 anstelle der mobilen eine stationäre Entwässerung betrachtet. Daraus können sich verfahrenstechnische und betriebliche Vor- und Nachteile ergeben.

Als Variante 4 wird zur stationären Entwässerung die Trocknung vor der Klärschlamm-entsorgung als weitere Behandlungsstufe eingefügt.

Die Verfahrenstechnik der Varianten 2 bis 4 bezieht sich auf eine Modellkläranlage mit einer theoretischen Grundbelastung. Bei Rückbelastungen durch Schlammwasser werden zusätzliche Kapazitäten in der Belebung nicht berücksichtigt und müssen im Einzelfall geprüft werden. Die ausgearbeiteten Szenarien eignen sich für eine Einschätzung der Auswirkungen und der damit zu treffenden Entscheidungen bei der entsprechenden Variante.

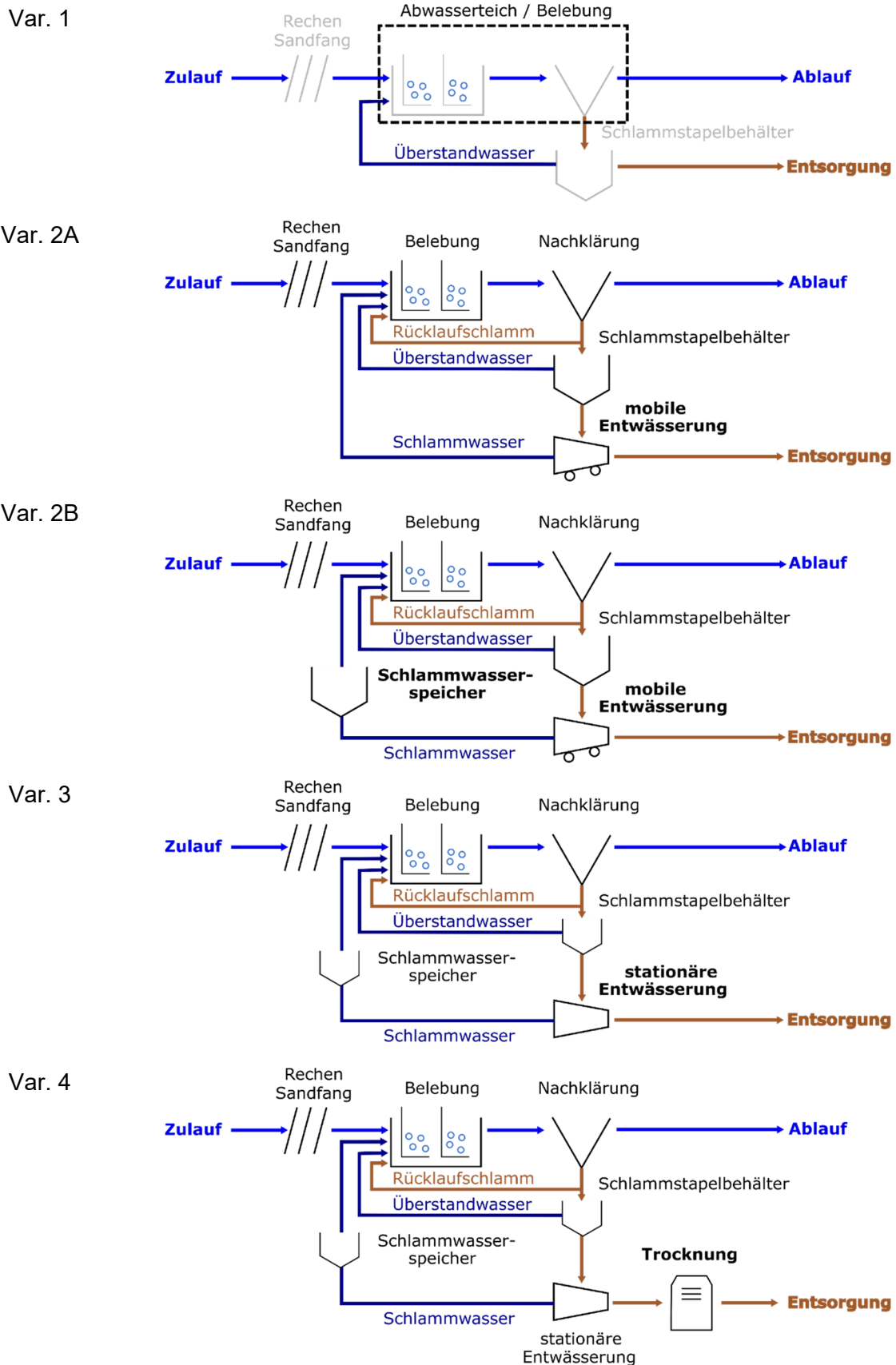


Abbildung 39: Übersicht über die betrachteten Varianten zur Abwasserbehandlung.

### 5.3.2 Verfahrenstechnische Aspekte Abwasserteichanlagen (V1)

Die verfahrenstechnische Betrachtung von Abwasserteichanlagen benötigt einen gesonderten Blick auf die Entsorgung des anfallenden Klärschlammes. Zum einen erfolgt eine mobile oder stationäre Entwässerung nur in seltenen Fällen, weshalb der überwiegende Anteil von Abwasserteichanlagen den Nassschlamm landwirtschaftlich verwertet bzw. diesen auf andere Kläranlagen verbringt. Aus diesem Grund findet auch keine Rückbelastung durch Schlammwasser bei Abwasserteichanlagen statt.

Eine mobile Entwässerung auf Abwasserteichanlagen würde folgende verfahrenstechnische Rahmenbedingungen voraussetzen:

- die Zufahrtsmöglichkeiten und ein geeigneter Standort für Entwässerungsaggregate sowie Speicherkapazitäten (entwässerter Schlamm und Schlammwasser) sind gegeben,
- ein Strom- und Wasseranschluss steht zur Verfügung und
- ggf. wurden bereits Störstoffe durch einen Rechen abgetrennt.

Viele Abwasserteichanlagen besitzen jedoch keinen Rechen und Sandfang im Zulauf, wobei eine Entnahme von Grobstoffen die Teichanlagen entlasten würde (DWA-A 201 2005).

Für die Auslegung unbelüfteter Abwasserteiche werden flächenbezogene Einwohnerwerte herangezogen (beispielsweise  $A_E \geq 10 \text{ m}^2/\text{E}$  bzw.  $A_E \geq 8 \text{ m}^2/\text{E}$  bei vorhandenen Absetzteichen und einer Tiefe von rd. 1,0 m). Bei Regenwasserbehandlung ist ein Zuschlag von  $A_{E, \text{Mi}} = 5 \text{ m}^2/\text{E}$  erforderlich. Ohne vorgeschalteten Absetzteich kann eine anfallende Klärschlammmenge von  $200 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{a})$  angenommen werden (DWA-A 201 2005). Der Schlamm aus Abwasserteichen muss regelmäßig durch Ausbaggern oder Abpumpen entnommen werden. Eine Schlammräumung ist bei vorgeschalteten Absetzteichen in der Regel einmal jährlich, bei unbelüfteten Abwasserteichen in größeren Zeitintervallen erforderlich.

### 5.3.3 Verfahrenstechnische Aspekte Belebtschlammverfahren (V2 – V4)

#### Klärschlammfall in Abhängigkeit der Kläranlagengröße

Die Berechnung der Zulaufmengen und Schlammengen erfolgt gemäß (ATV-DVWK-A 198 2003) und (DWA-M 368 2014) (siehe Tabelle 21). Zur spezifischen Fallunterscheidung dienen zwei Größenklassen mit jeweils 3.000 EW (GK 2) sowie 8.000 EW (GK 3).

Tabelle 21: Zulaufmengen und Rohschlammengen gemäß (DWA-M 368 2014) und (ATV-DVWK-A 198 2003) bezogen auf 8.000 EW und 3.000 EW.

Quelle	Parameter	$b_x$ bzw. $q_x$	$C_x$	8.000 EW	3.000 EW
		g/(E·d) bzw. L/(E·d)	mg/L	$B_{d,x}$ in kg/d bzw. $Q_d$ in m <sup>3</sup> /d	$B_{d,x}$ in kg/d bzw. $Q_d$ in m <sup>3</sup> /d
Rohabwasser					
(ATV-DVWK-A 198 2003)	<b>Q</b>	150	-	1.200	450
	<b>CSB</b>	120	800	960	360
	<b>BSB<sub>5</sub></b>	60	400	480	180
	<b>TS</b>	70	467	560	210
	<b>TKN</b>	11	73	88	33
	<b>P</b>	1,8	12	14,4	5,4
Rohschlammmenge					
(DWA-M 368 2014)		6,9 L/(E·d) <sup>1</sup>	-	55,2	20,7
		48,4 g TM/(E·d) <sup>1</sup>	-	387,2	145,2
(Hilliges und Kinshofer 2016)		1,0 bis 1,8 L/(E·d) <sup>2</sup>	-	8,0 bis 14,4	3,0 bis 5,4
		35 bis 50 g TM/(E·d) <sup>2</sup>	-	280 bis 400	105 bis 150

<sup>1</sup> 50-Perzentil,  $T_{TS,Bem}=25$  d,  $T = 15^\circ\text{C}$ , TR zwischen 0,6 – 0,8 %

<sup>2</sup> Abschätzung des Schlammfalls (voreingedickt) mit maximal 3,5 % TR

Die anfallende Klärschlammmenge in Abhängigkeit der Einwohnerzahl (GK 1 bis 3) bei der statischen Eindickung (2,5 % TR) sowie nach der Entwässerung (25 % TR) ist in Abbildung 40 dargestellt und zeigt die steigende Klärschlammmenge mit zunehmenden Einwohnerwerten. Der ermittelte Klärschlammfall dient als Grundlage für die weiteren Betrachtungen der Klärschlammbehandlung und -entsorgung.



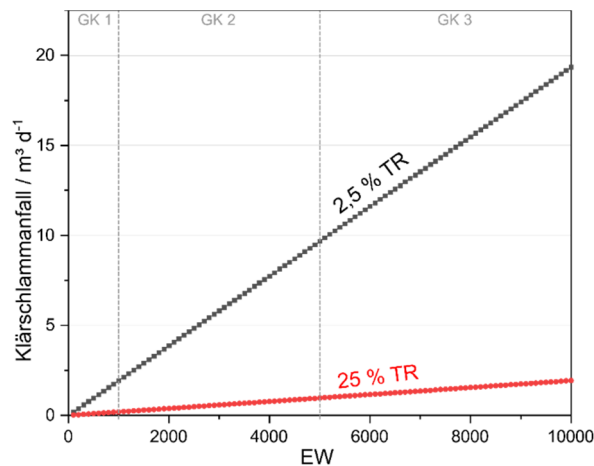


Abbildung 40: Klärschlammmanfall in Abhängigkeit der Einwohnerwerte der Größenklasse 1 bis 3 von statisch eingedicktem (2,5 % TR) sowie entwässertem Klärschlamm (25 % TR) in m<sup>3</sup>/d (Umrechnung von kg/d mit  $\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$ ; Annahme:  $b_{\text{TM,E,d}} = 48,4 \text{ g TM}/(\text{E} \cdot \text{d})$  bei Belebung mit aerober Stabilisierung mit 15 °C aus (DWA-M 368 2014)).

#### Schlammstapelbehälter

Bei der Grundkonzeption des Belebtschlammverfahrens (V2 bis V4) ist ein Schlammstapelbehälter vorhanden, welcher abhängig von der Größenklasse und dem damit anfallenden Klärschlamm ein unterschiedliches Vorratsvolumen (Lagerkapazität) halten muss. Zur Abschätzung des erforderlichen Speichervolumens wurden vereinfacht die spezifischen Annahmen von (Hilliges und Kinshofer 2016) herangezogen, unter den Randbedingungen von Tabelle 21:

- $q_{\text{d,ÜS,min}} = 1,0 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$   
mit 90 bis 150 d Lagerkapazität entspricht das 90 bis 150 L/E und
- $q_{\text{d,ÜS,max}} = 2,5 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$   
mit 90 bis 150 d Lagerkapazität entspricht das 225 bis 375 L/E.

Für die Abschätzung des Speichervolumens wurde ein mittlerer Wert von  $q_{\text{d,ÜS}} = 2,0 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$  verwendet und in Abhängigkeit von der Lagerdauer (1 Monat bis 12 Monate) berechnet (siehe Abbildung 41).

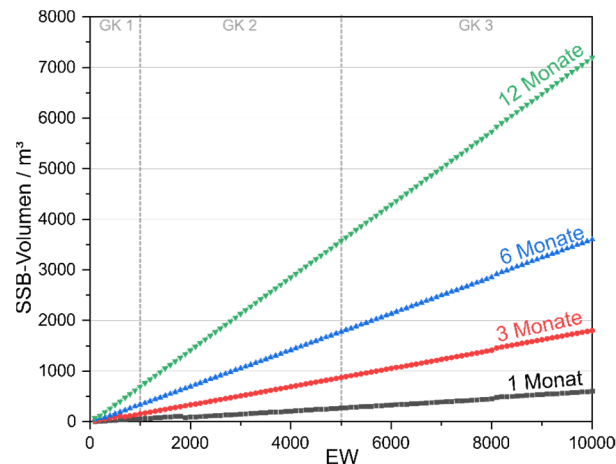


Abbildung 41: Benötigte Lagerkapazität eines Schlammstapelbehälters in Abhängigkeit der Einwohnerzahl für Kläranlagengrößen 1 bis 3. SSB-Volumen berechnet anhand des spezifischen Speichervolumens von  $q_{d,\text{ÜS}} = 2,0 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$  und bezogen auf angenommene Lagerdauer von 1 Monat bis 12 Monaten ohne Sicherheitsfaktor.

In Anlehnung an Abbildung 41 ergeben sich für die betrachteten Fälle von 3.000 EW und 8.000 EW erforderliche SSB-Kapazitäten in Abhängigkeit von der Lagerdauer in Tabelle 22. Beispielsweise beträgt die erforderliche SSB-Kapazität bei 3.000 EW und einer durchschnittlichen Lagerdauer von 3 Monaten ca.  $540 \text{ m}^3$ , während bei einer Lagerung von 12 Monaten  $2.160 \text{ m}^3$  benötigt werden, was wiederum einen ausreichenden Flächenbedarf erfordert.

Tabelle 22: Erforderliche Schlammstapelbehälter-Kapazität in Abhängigkeit von der Lagerdauer bezogen auf 3.000 EW und 8.000 EW ohne Sicherheitsfaktor.

EW	erforderliche SSB-Kapazität in $\text{m}^3$ in Abhängigkeit von der Lagerdauer			
	1 Monat	3 Monate	6 Monate	12 Monate
3.000	180	540	1.080	2.160
8.000	480	1.440	2.880	5.760

### Klärschlamm entwässerung

Abhängig vom Entwässerungsaggregat können bei der *stationären Entwässerung* unterschiedliche Durchsatzmengen erzielt werden (siehe Tabelle 23). Bei Kammerfilterpressen richtet sich die Durchsatzmenge nach der Anzahl und Abmessungen der Filterplatten, Kammertiefe, Zyklusdauer und der Leistung der Befüllpumpe. Zum Vergleich der Durchsatzleistung wird die Filterfläche auf den hydraulischen ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ ) bzw. auf den Feststoffdurchsatz ( $\text{kg TM}/\text{h}/\text{m}^2$ ) bezogen (DWA-M 366 2013).

Bei der *mobilen Entwässerung* kommen bis auf wenige Einschränkungen Zentrifugen, Bandfilterpressen oder Kammer- und Membranfilterpressen zum Einsatz, wobei der Einsatz von mobilen Entwässerungsaggregaten abhängig von Transportabmessungen und dem zulässigen Gesamtgewicht gemäß der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) ist.

Dadurch sind auch die Durchsätze der jeweiligen Entwässerungsaggregate eingeschränkt. Bei mobilen Zentrifugen können Durchsätze von 15 m<sup>3</sup>/h bis 70 m<sup>3</sup>/h erzielt werden, wobei Filterpressen Durchsätze von 10 m<sup>3</sup>/h bis 20 m<sup>3</sup>/h haben (DWA-M 366 2013).

Tabelle 23: Kenndaten von verschiedenen Entwässerungsaggregaten für die stationäre Entwässerung nach (DWA-M 366 2013).

Entwässerungs- aggregat	Schlammdurchsatz- Menge	Fest- stofffracht	Elektrische Anschluss- leistung
	m <sup>3</sup> /h	kg/h	kW
<b>Zentrifuge</b>	1 bis 200	20 bis 4.000	10 bis 300
<b>Bandfilterpresse</b>	2 bis 40	100 bis 2.000	7 bis 20
<b>Schlauchfilterpresse</b>	5 bis 40	130 bis 800	18 bis 37
<b>Schneckenpresse</b>	1 bis 30	10 bis 1.000	0,25 bis 5,5

Zur Ermittlung der erforderlichen Leistung des Entwässerungsaggregats in Abhängigkeit von der Lagerdauer des Klärschlammes im Schlammstapelbehälter wurde angenommen, dass der gesammelte Klärschlamm (1 Monat bis 12 Monate) innerhalb von 7 Tagen entwässert wird (Abbildung 42). Durch die Lagerung wird zusätzlich angenommen, dass eine gleichmäßige Beschaffenheit des Klärschlammes vorliegt und somit konstante Prozessbedingungen für eine maschinelle Entwässerung existieren.

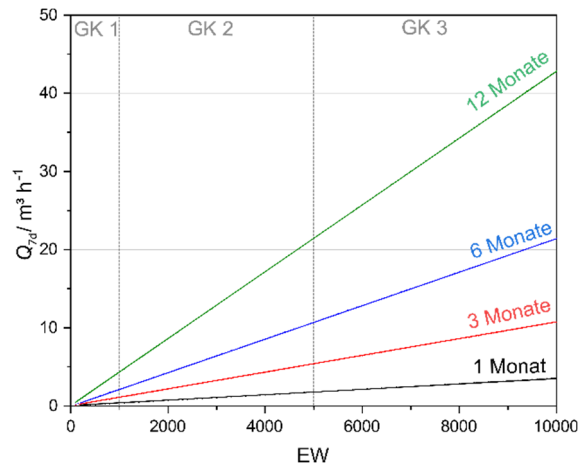


Abbildung 42: Erforderlicher Klärschlammdurchsatz bei der Entwässerung des im Schlammstapelbehälter enthaltenen Klärschlammes innerhalb von 7 Tagen in Abhängigkeit der Lagerzeit und der Einwohnerzahl.

Abbildung 42 sowie Tabelle 23 lassen bereits erkennen, dass die minimale sowie maximale erforderliche Schlammdurchsatz-Menge bei stationären Zentrifugen (1 bis 200 m<sup>3</sup>/h) abhängig von der Lagerdauer und der Einwohnerzahl erreicht werden kann. Bei einer Entwässerungsdauer von 7 Tagen tritt lediglich bei Schneckenpressen (bis 30 m<sup>3</sup>/h) eine Begrenzung ab einer Einwohnerzahl von rd. 6.900 EW und einer Lagerungsdauer von 12 Monaten auf.

Die Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Aggregate bei der stationären Entwässerung richten sich nach der Entwässerungsdauer. Abbildung 43 stellt den Einsatzbereich der stationären Entwässerungsaggregate in Abhängigkeit der Entwässerungsdauer von 3 bis 30 Tagen sowie des Entwässerungsintervalls dar. Stationäre Zentrifugen können den für 12 Monate im Schlammstapelbehälter zwischengelagerten Schlamm innerhalb von 3 Tagen entwässern, während der Einsatz von Filter- und Schneckenpressen begrenzt ist. Filterpressen können beispielsweise bis ca. 8.000 EW den für 6 Monate zwischengelagerten Schlamm innerhalb von 3 Tage entwässern, während Schneckenpressen bis zu einer Größe von ca. 5.900 EW eingesetzt werden können.

Für die gewählten Beispiele der Kläranlagen mit 3.000 EW und 8.000 EW ergeben sich somit Grenzbereiche für einsetzbare Entwässerungsaggregate in Abhängigkeit vom Entwässerungsintervall und der Entwässerungsdauer in Tabelle 24. Während bei der Kläranlage mit 3.000 EW theoretisch eine jährliche Entwässerung mit einer Schneckenpresse innerhalb von 3 Tage möglich ist, muss im gleichen Fall die Beispielkläranlage mit 8.000 EW eine stationäre Zentrifuge verwenden, oder die Entwässerungsdauer verlängern. Bei Filterpressen müsste eine Entwässerung des Klärschlammes innerhalb von 3 Tagen mind. 2-mal jährlich stattfinden

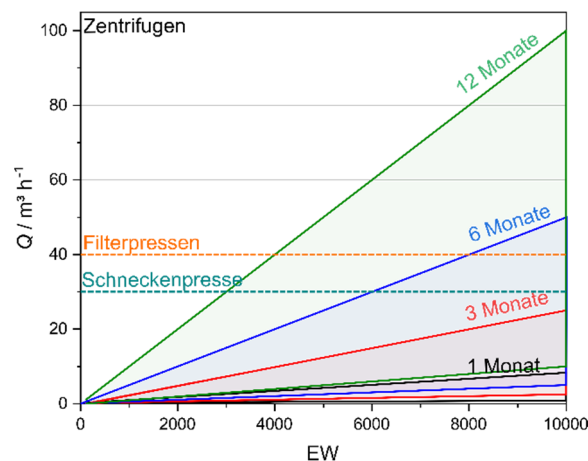


Abbildung 43: Abhängigkeit der Entwässerungsdauer (Bereich von 3 bis 30 Tage) auf den erforderlichen Klärschlammumsatz zur stationären Entwässerung des im Schlammstapelbehälter enthaltenen Klärschlammes in Bezug zur Lagerzeit und der Einwohnerzahl. Die durch die farbigen Geraden begrenzten Bereiche markieren die gewählte minimale (3 Tage) und maximale (30 Tage) Entwässerungsdauer. Skalierung bezogen auf den Einsatzbereich von stationären Zentrifugen ( $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Gestrichelte Linien zeigen den maximalen Einsatzbereich von Bandfilterpressen ( $40 \text{ m}^3/\text{h}$ ; orange) sowie Schneckenpressen ( $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ; grün) bei der stationären Entwässerung.

Tabelle 24: Erforderliche Schlammdurchsatzmenge in Abhängigkeit des Entwässerungsintervalls bei einer angenommenen stationären Entwässerung des gesamten Klärschlammes innerhalb von 3, 7, 14 und 30 Tagen bezogen auf 3.000 EW und 8.000 EW. Die markierten Zellen symbolisieren den Einsatzbereich der Entwässerungsaggregate nach Tabelle 23 (grün: Zentrifugen, orange: Bandfilterpressen und Zentrifugen, blau: Schneckenpresse, Bandfilterpresse und Zentrifuge; Durchsätze bei stationärer Entwässerung: Schneckenpressen (1 m<sup>3</sup>/h bis 30 m<sup>3</sup>/h), Bandfilterpresse (2 m<sup>3</sup>/h bis 40 m<sup>3</sup>/h) und Zentrifuge (1 m<sup>3</sup>/h bis 200 m<sup>3</sup>/h).

EW	Entwässerungs- dauer in d	Erforderliche Schlammdurchsatzmenge in m <sup>3</sup> /h zur Entwässerung des gesamten Klärschlammes in Abhängigkeit des Entwässerungsintervalls			
		1 Monat	3 Monate	6 Monate	12 Monate
<b>3.000</b>	3	2,5	7,5	15,0	30,0
	7	1,1	3,2	6,4	12,9
	14	0,5	1,6	3,2	6,4
	30	0,3	0,8	1,5	3,0
<b>8.000</b>	3	6,7	20,0	40,0	80,0
	7	2,9	8,6	17,1	34,3
	14	1,4	4,3	8,6	17,1
	30	0,7	2,0	4,0	8,0

Bei der mobilen Entwässerung werden der Einsatzbereich und die Durchsatzmengen durch die zulässigen Transportabmessungen und das zulässige Gesamtgewicht gemäß der StVZO begrenzt (DWA-M 366 2013). Demnach richtet sich die Wahl des Entwässerungsaggregates und des -intervalls stärker nach der Entwässerungsdauer als bei der stationären Entwässerung. Die Wahl der mobilen Entwässerung hängt dabei ebenfalls von den Möglichkeiten der Schlammwasserspeicherung oder der direkten Rückführung des Schlammwassers in den Abwasserbehandlungsprozess ab. Bei verfügbaren Schlammwasserspeichern wird die Entwässerungsdauer oftmals kürzer ausfallen können, wobei das zwischengespeicherte Schlammwasser dann kontrolliert zurückgeführt werden muss, um keine wesentlichen Rückbelastungen zu erhalten.

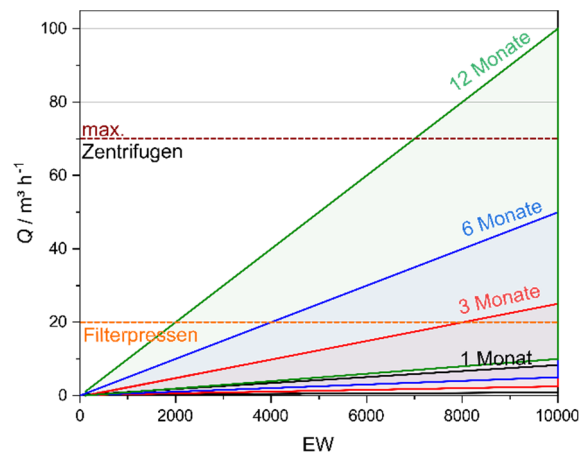


Abbildung 44: Abhängigkeit der Entwässerungsdauer (Bereich von 7 bis 30 Tage) auf den erforderlichen Klärschlamm-Durchsatz zur mobilen Entwässerung des im Schlammstapelbehälter enthaltenen Klärschlammes in Bezug zur Lagerzeit und der Einwohnerzahl. Die durch die farbigen Geraden begrenzten Bereiche markieren die gewählte minimale (3 Tage) und maximale (30 Tage) Entwässerungsdauer. Angabe des maximal möglichen Durchsatzes von Zentrifugen bis 70 m<sup>3</sup>/h. Gestrichelte Linien zeigen den maximalen Einsatzbereich von Filterpressen (bis 20 m<sup>3</sup>/h; orange) bei der mobilen Entwässerung.

Tabelle 25: Erforderliche Schlamm-Durchsatzmenge in Abhängigkeit des Entwässerungsintervalls bei einer angenommenen mobilen Entwässerung des gesamten Klärschlammes innerhalb von 3, 7, 14 und 30 Tagen bezogen auf 3.000 EW und 8.000 EW. Die markierten Zellen symbolisieren den Einsatzbereich der Entwässerungsaggregate (grün: Zentrifugen, orange: Filterpressen und Zentrifugen).

EW	Entwässerungs- dauer in d	Erforderliche Schlamm-Durchsatz-Menge in m <sup>3</sup> /h zur Entwässerung des gesamten Klärschlammes			
		1 Monat	3 Monate	6 Monate	12 Monate
3.000	3	2,5	7,5	15,0	30,0
	7	1,1	3,2	6,4	12,9
	14	0,5	1,6	3,2	6,4
	30	0,3	0,8	1,5	3,0
8.000	3	6,7	20,0	40,0	80,0
	7	2,9	8,6	17,1	34,3
	14	1,4	4,3	8,6	17,1
	30	0,7	2,0	4,0	8,0

### Einsatz von Konditionierungsmitteln

Zur Verbesserung der Entwässerungseigenschaften werden dem Klärschlamm Konditionierungsmittel zugegeben. Abhängig von der Art der Konditionierung können verschiedene Anlagen, Chemikalien und Verfahren eingesetzt werden. Dabei müssen Faktoren wie die Auswahl eines geeigneten Konditionierungsmittels, der Dosiermengen sowie der Aufbereitung berücksichtigt werden. Durch die Dosierung von organischen polymeren Flockungsmitteln wird die Fest-Flüssig-Trennung unterstützt und die Koagulation sowie Agglomeration der Schlammflocken unterstützt. Die Vorteile von organischen polymeren Flockungsmitteln sind die hohe mechanische Stabilität der Flocken gegenüber Scherbeanspruchungen (z. B. bei Zentrifugen, Schlauchfilterpressen) sowie die geringen Einsatzmengen (DWA-M 366 2013).

Während bei der mobilen Entwässerung Ansetzstationen zur Aufbereitung der polymeren Flockungsmittel vom Lohnentwässerungsunternehmen zur Verfügung gestellt werden, muss dieses bei einer stationären Entwässerung berücksichtigt werden. Neben Mehrkammer-Chargenanlagen mit entsprechenden Rührwerken muss Ansatzwasser und das benötigte Personal zu Vor- und Aufbereitung zur Verfügung stehen (DWA-M 366 2013). Entsprechend der in Tabelle 18 genannten spezifischen Parameter für den Verbrauch polymerer Flockungsmittel wurden in Abhängigkeit des anfallenden Klärschlammes je EW die benötigten Mengen an Flockungsmittel berechnet. Der Verbrauch richtet sich nach der polymeren Wirksubstanz (Polymergehalt) im Produkt. Als spezifischer Polymerverbrauch werden jeweils die spezifischen Verbrauchsbereiche für Zentrifugen, Bandfilter- und Schneckenpressen herangezogen (Tabelle 18).

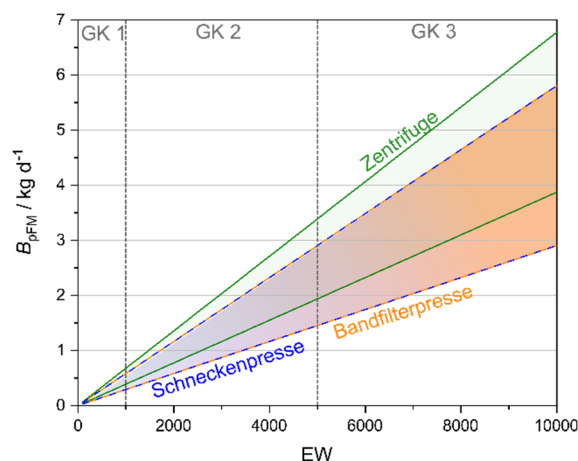


Abbildung 45: Polymerer Flockungsmittelverbrauch ( $B_{pFM}$  in kg pro Tag) in Abhängigkeit des Entwässerungsaggregates und der Einwohnerzahl. Spezifischer pFM-Verbrauch von Zentrifugen beträgt 8 bis 14 kg pFM/t TM und von Bandfilter- sowie Schneckenpressen 6 bis 12 kg pFM/t TM.

Der Flockungsmittelverbrauch ist bei Zentrifugen i. d. R. höher als bei Bandfilter- und Schneckenpressen (siehe Abbildung 45). Je nach Klärschlammbeschaffenheit und -qualität kann die Wirksamkeit des pFM variieren. Dadurch können Bandfilter- sowie Schneckenpressen einen vergleichbaren Austrags-*TR* wie Hochleistungs-Zentrifugen erzielen (DWA-M 366 2013).

### *Energieverbrauch bei der Entwässerung*

Zur Betrachtung des Energieverbrauchs bei der Entwässerung werden die spezifischen Stromverbräuche aus Tabelle 18 herangezogen, welche auf den Schlammumsatz bzw. die Feststofffracht und dem Stromverbrauch für die Beschickungspumpe und die Konditionierungsanlage bezogen werden. Dabei werden Anlagenkomponenten wie z. B. Schneckenantrieb bei Zentrifugen, Spritzwasserpumpe zur Bandreinigung bei Bandfilterpressen berücksichtigt. Abhängig vom Abscheide- und Auslastungsgrad können unterschiedliche spezifische Stromverbräuche resultieren, wobei sich diese bei Zentrifugen u. a. nach dem Leistungsbedarf für die Leerlaufleistung, der Leistung für die Flüssigkeitsbeschleunigung sowie dem Schneckenantrieb bei Zentrifugen zusammensetzen (DWA-M 366 2013).

Abbildung 46 zeigt den Energieverbrauch der jeweiligen Entwässerungsaggregate in Anlehnung an die spezifischen Stromverbräuche in Tabelle 18. Schneckenpressen haben danach den geringsten Energieverbrauch, wobei die Durchsatzmengen bei der stationären und mobilen Entwässerung begrenzt sind (siehe Abbildung 43 und Abbildung 44).

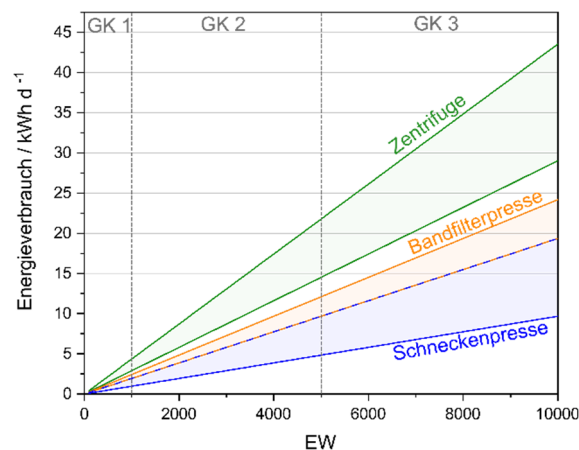


Abbildung 46: Energieverbrauch bei der Entwässerung in Abhängigkeit des Entwässerungsaggregates und der Einwohnerzahl. Spezifische Stromverbräuche bezogen auf Schlammumsatz einschließlich Stromverbrauch der Beschickungspumpe und Konditionierungsanlage aus Tabelle 18.



### Schlammwasserspeicher

Zur Abschätzung der erforderlichen Schlammwasserspeicherkapazität wird angenommen, dass die spezifische Schlammwasser-Rückbelastung  $q_{\text{Schlammwasser}} = 1,7 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$  beträgt (siehe Kapitel 4.3). Mit den Annahmen der Varianten der Klärschlamm-speicherung (1 bis 12 Monate im Schlammstapelbehälter) ergibt sich die speziell dafür notwendige Schlammwasserspeicherkapazität zur Bevorratung (siehe Abbildung 47).

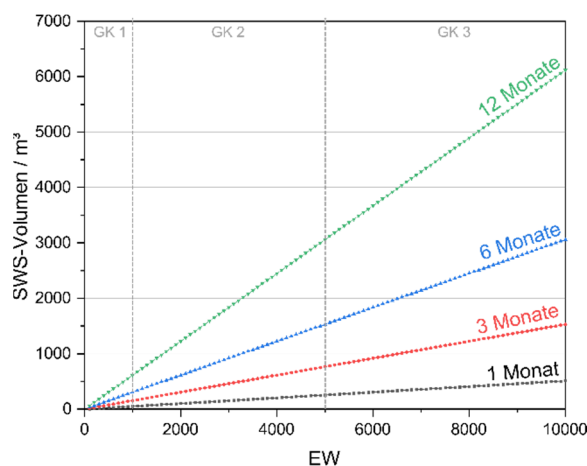


Abbildung 47: Benötigte Speicherkapazität für das bei der Entwässerung anfallende Schlammwasser in Abhängigkeit der Einwohnerzahl für Kläranlagengrößen 1 bis 3. SWS-Volumen berechnet anhand des spezifischen Schlammwasser-Rückbelastung von  $q = 1,7 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$  und bezogen auf angenommene Lagerdauern von 1 Monat bis 12 Monaten im SSB ohne Sicherheitsfaktor.

Für das Beispiel mit 3.000 EW resultiert bei einer vorgesehenen Speicherung des anfallenden Klärschlammes im Schlammstapelbehälter für 1 Monat ein benötigtes Volumen von  $174 \text{ m}^3$  (SSB, siehe Tabelle 22), wofür bei einer Entwässerung auf 25 %  $TR$  für den Schlammwasserspeicher  $153 \text{ m}^3$  (SWS, siehe Tabelle 26) benötigt werden. In diesem Beispiel fallen dadurch  $17 \text{ m}^3$  entwässerter Klärschlamm pro Entwässerung mit 25 %  $TR$  an.

Tabelle 26: Erforderliche Schlammwasser-Kapazität in Abhängigkeit von der Lagerdauer im SSB bezogen auf 3.000 EW und 8.000 EW ohne Sicherheitsfaktor.

EW	erforderliche SWS-Kapazität in $\text{m}^3$ in Abhängigkeit von der Lagerdauer			
	1 Monat	3 Monate	6 Monate	12 Monate
<b>3.000</b>	153	459	918	1.836
<b>8.000</b>	408	1.224	2.448	4.896

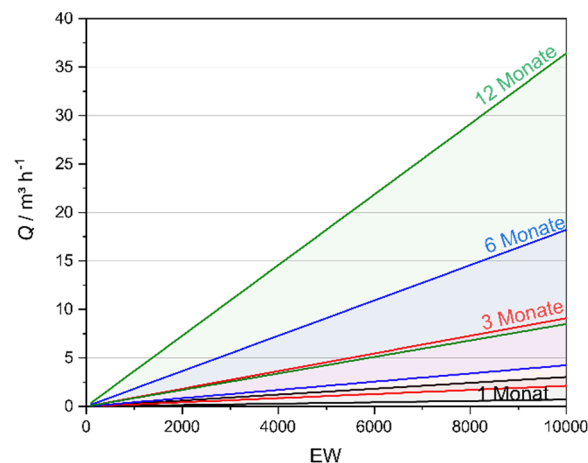


Abbildung 48: Anfallendes Schlammwasser in Abhängigkeit der Entwässerungsdauer (Bereich von 7 bis 30 Tage) bei einer Entwässerung des Klärschlammes auf 25 %  $TR$  in Bezug zur Lagerzeit im Schlammstapelbehälter und der Einwohnerzahl. Die farbigen Bereiche markieren die gewählte minimale (7 Tage) und maximale (30 Tage) Entwässerungsdauer.

In Abhängigkeit von der Entwässerungsdauer (7 bis 30 Tage) fällt eine unterschiedliche Menge an Schlammwasser pro Stunde an. Zur Abschätzung der Rückbelastung bei einem nicht vorhandenen Schlammwasserspeicher (Variante 2A) und einer theoretischen Reduktion des Schlammwasserspeichers (Variante 3) aufgrund einer stationären Entwässerung wurden die anfallenden Schlammwassermengen aus Abbildung 47 auf die pro Stunde anfallenden Mengen in Abhängigkeit der Entwässerungsdauer aufgetragen (Abbildung 48 und Tabelle 27).

Abhängig von der Lagerdauer des Klärschlammes im Schlammstapelbehälter und der vorgesehenen Entwässerungsdauer steigt die Menge an Schlammwasser bei kurzen Entwässerungs- und langen Lagerungszeiten.

Zur Bewertung der Rückbelastung wurden die berechneten Schlammwassermengen mit der mittleren TKN-Konzentration ( $C_{TKN} \approx 250 \text{ mg/L}$ ) aus den vorangegangenen Untersuchungen des Schlammwassers in Kapitel 4.3 in Tabelle 17 zur Frachtberechnung herangezogen und auf die Grundbelastung für 3.000 EW und 8.000 EW bezogen. Der zusätzliche prozentuale Anteil der TKN-Fracht zur Grundbelastung bei 3.000 EW und 8.000 EW ist in Abhängigkeit der Entwässerungszeit und Lagerdauer im Schlammstapelbehälter in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27 zeigt, dass der prozentuale Anteil der Rückbelastung mit kurzen Entwässerungs- und langen Lagerzeiten deutlich steigt. Während bei einer regelmäßigen 1-monatigen Entwässerung (3 Tage) zusätzlich rd. 38 % der TKN-Fracht bei der Abwasserbehandlung berücksichtigt werden müssen, zeigt sich bei gleicher Entwässerungsdauer und 1-jähriger Entwässerung eine zusätzliche Fracht von rd. 460 %, was eine Schlammwasserbewirtschaftung und dementsprechende Schlammwasserspeicher benötigen.

Tabelle 27: Anfallende Schlammwassermengen und -frachten in Abhängigkeit der Lagerzeit im Schlammstapelbehälter und einer angenommenen Entwässerung des Klärschlammes innerhalb von 3, 7, 14 und 30 Tagen bezogen auf 3.000 EW und 8.000 EW. Prozentuale Anteile beziehen sich auf die Grundbelastung bei 3.000 EW (450 m<sup>3</sup>/d; 33 kg TKN/d) und 8.000 EW (1.200 m<sup>3</sup>/d; 88 kg TKN/d). Prozentuale Anteile bei 8.000 EW entsprechen denen bei 3.000 EW. Mittlere TKN-Konzentration im Schlammwasser  $C_{TKN} \approx 250$  mg/L.

EW	Ent.-dauer in d	Schlammwassermengen und -frachten in Abhängigkeit der Lagerzeit im Schlammstapelbehälter und Entwässerungsdauer							
		1 Monat		3 Monate		6 Monate		12 Monate	
		$Q_{h,SW}$	$B_{d,TKN,SW}$	$Q_{h,SW}$	$B_{d,TKN,SW}$	$Q_{h,SW}$	$B_{d,TKN,SW}$	$Q_{h,SW}$	$B_{d,TKN,SW}$
		m <sup>3</sup> /h	kg/d	m <sup>3</sup> /h	kg/d	m <sup>3</sup> /h	kg/d	m <sup>3</sup> /h	kg/d
<b>3.000</b>	3	2,125	12,6	6,375	37,9	12,750	75,9	25,500	151,8
		<b>11 %</b>	<b>38 %</b>	<b>34 %</b>	<b>115 %</b>	<b>68 %</b>	<b>230 %</b>	<b>136 %</b>	<b>460 %</b>
	7	0,911	5,4	2,375	16,3	5,464	32,5	10,929	65,0
		<b>5 %</b>	<b>16 %</b>	<b>13 %</b>	<b>49 %</b>	<b>29 %</b>	<b>98 %</b>	<b>58 %</b>	<b>197 %</b>
	14	0,455	2,7	1,366	8,1	2,732	16,3	5,464	32,5
		<b>2 %</b>	<b>8 %</b>	<b>7 %</b>	<b>25 %</b>	<b>15 %</b>	<b>49 %</b>	<b>29 %</b>	<b>98 %</b>
	30	0,213	1,3	0,638	3,8	1,275	7,3	2,550	15,2
		<b>1 %</b>	<b>4 %</b>	<b>3 %</b>	<b>11 %</b>	<b>7 %</b>	<b>22 %</b>	<b>14 %</b>	<b>46 %</b>
<b>8.000</b>	3	5,667	33,7	17,000	101,2	34,000	202,4	68,000	404,7
	7	2,429	14,5	7,286	43,4	14,571	86,7	29,143	173,5
	14	1,214	7,2	3,643	21,7	7,286	43,4	14,571	86,7
	30	0,567	3,4	1,700	10,1	3,400	20,2	6,800	40,5

Die im Zulauf der Kläranlage anfallende TKN-Fracht (Grundbelastung und Rückbelastung) berechnet sich als Summe der Fracht von Schlammwasser und Grundbelastung (z. B. (33 + 12,6) kg/d = 45,6 kg/d). Durch Berücksichtigung der summierten Wassermenge ergibt sich die im Zulauf enthaltene Konzentration (z. B. (45,6 kg/d)/(501 m<sup>3</sup>/d) = 91 mg/L mit  $Q_{d,Z} = 450$  m<sup>3</sup>/d + 2,125 m<sup>3</sup>/h · 24 h/d = 501 m<sup>3</sup>/d).

Basierend auf diesem Vorgehen werden die mittleren Konzentrationen aus dem analysierten Schlammwasser für  $CSB_{ges}$ , TKN,  $P_{ges}$ , AFS (siehe Tabelle 17) herangezogen, um die im Zulauf der Kläranlage mit 3.000 EW anfallende Gesamtkonzentration aus Grundlast und Rückbelastung zu berechnen (siehe Tabelle 28). Auf Grundlage dieser Annahmen lässt sich der für die Kohlenstoffelimination und Nitrifikation benötigte Sauerstoffbedarf nach vorheriger CSB-Fraktionierung nach (DWA-A 131 2016) berechnen. Als erstes wurde dazu der gesamte Sauerstoffverbrauch für den Kohlenstoffabbau  $OV_{d,C}$  aus der CSB-Bilanz errechnet und als zweites der Sauerstoffverbrauch für die Nitrifikation  $OV_{d,N}$ . Als Ablaufkonzentration  $S_{NO_3,AN}$  wurde das 0,8-fache des angenommenen Überwachungswertes von 10 mg/L angenommen ( $T = 15$  °C,  $t_{TS,aerob,Bem} = 25$  d;  $BSB_5 = 400$  mg/L;  $f_S = 0,05$ ;  $f_A = 0,3$ ;  $f_B = 0,25$ ;  $f_{CSB} = 0,2$ ).

Tabelle 28: Berechnete Konzentration im Zulauf der Beispielläranlage mit 3.000 EW bestehend aus Grundlast und Rückbelastung in Abhängigkeit der Entwässerungsdauer und Lagerung im Schlammstapelbehälter. Konzentrationen berechnet über die Fracht ( $B_{d,x,Zulauf} + B_{d,SW}$ ) und Abwassermengen ( $Q_{d,x,Zulauf} + Q_{d,SW}$ ).  $B_{d,SW}$  berechnet mit mittleren Schlammwasserkonzentrationen aus Tabelle 17 und Schlammwassermengen über 1,7 L/(E·d). Grundbelastung (0 d) der Beispielläranlage mit 3.000 EW in Tabelle 21. Sauerstoffbedarf für den Kohlenstoffabbau ( $OV_{d,C}$ ) und für die Nitrifikation ( $OV_{d,N}$ ) berechnet anhand CSB-Fraktionierung nach (DWA-A 131 2016). Mittlerer Sauerstoffbedarf ( $OV_{d,aM}$ ) als Summe von  $OV_{d,C}$  und  $OV_{d,N}$ . Fällmittelbedarf für die Phosphorelimination aufgrund der Phosphor-Zulaufkonzentrationen und eine Wirksubstanz von 12,3 %,  $\beta_{Fäll} = 1,2$ ,  $\rho = 1,52 \text{ kg/dm}^3$ .

Zulaufkonzentrationen (Grundlast und Rückbelastung)																
1 Monat				3 Monate				6 Monate				12 Monate				
$C_{CSB}$	$C_{TS}$	$C_{TKN}$	$C_P$	$C_{CSB}$	$C_{TS}$	$C_{TKN}$	$C_P$	$C_{CSB}$	$C_{TS}$	$C_{TKN}$	$C_P$	$C_{CSB}$	$C_{TS}$	$C_{TKN}$	$C_P$	
d																
mg/L																
0	800	210	73	12	800	210	73	12	800	210	73	12	800	210	73	12
3	827	460	91	14	867	451	118	18	906	442	144	21	952	431	174	25
7	812	464	81	13	848	467	97	15	859	453	113	17	897	444	138	20
14	806	465	77	13	818	463	85	13	833	459	96	15	859	453	113	17
30	803	466	75	12	809	465	79	13	817	463	84	13	832	459	94	15
Zulaufmengen und Sauerstoffbedarf (Grundlast und Rückbelastung)																
$Q_d$	$OV_{d,C}$	$OV_{d,N}$	$OV_{d,aM}$	$Q_d$	$OV_{d,C}$	$OV_{d,N}$	$OV_{d,aM}$	$Q_d$	$OV_{d,C}$	$OV_{d,N}$	$OV_{d,aM}$	$Q_d$	$OV_{d,C}$	$OV_{d,N}$	$OV_{d,aM}$	
d	m <sup>3</sup> /d	kg O <sub>2</sub> /d		m <sup>3</sup> /d	kg O <sub>2</sub> /d			m <sup>3</sup> /d	kg O <sub>2</sub> /d			m <sup>3</sup> /d	kg O <sub>2</sub> /d			
0	450	183	128	311	450	183	128	311	450	183	128	311	450	183	128	311
3	501	210	179	389	603	266	284	550	756	348	439	787	1.062	514	750	1.264
%	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>40</b>	<b>25</b>	<b>34</b>	<b>45</b>	<b>122</b>	<b>77</b>	<b>68</b>	<b>90</b>	<b>243</b>	<b>153</b>	<b>136</b>	<b>181</b>	<b>486</b>	<b>306</b>
7	472	195	149	344	507	218	194	412	581	254	262	516	712	324	395	719
%	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>16</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>19</b>	<b>52</b>	<b>32</b>	<b>29</b>	<b>39</b>	<b>105</b>	<b>66</b>	<b>58</b>	<b>77</b>	<b>209</b>	<b>131</b>
14	461	189	138	327	483	201	161	362	516	218	196	414	581	254	262	516
%	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>26</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>19</b>	<b>53</b>	<b>33</b>	<b>29</b>	<b>39</b>	<b>105</b>	<b>66</b>
30	455	186	132	318	465	191	143	334	481	200	158	358	511	216	189	405
%	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>23</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>18</b>	<b>48</b>	<b>30</b>
Fällmittelbedarf Phosphorelimination (Grundlast und Rückbelastung)																
$Q_d$	$Q_{d,FM}$	$Q_d$	$Q_{d,FM}$	$Q_d$	$Q_{d,FM}$	$Q_d$	$Q_{d,FM}$									
d	m <sup>3</sup> /d	L Fällmittel/d	m <sup>3</sup> /d	L Fällmittel/d	m <sup>3</sup> /d	L Fällmittel/d	m <sup>3</sup> /d	L Fällmittel/d								
0	450	36	450	36	450	36	450	36								
3	501	52	603	84	756	133	1.062	230								
%	<b>11</b>	<b>44</b>	<b>34</b>	<b>133</b>	<b>68</b>	<b>269</b>	<b>136</b>	<b>538</b>								
7	472	42	507	56	581	77	712	119								
%	<b>5</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>56</b>	<b>29</b>	<b>114</b>	<b>58</b>	<b>231</b>								
14	461	39	483	46	516	56	581	77								
%	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>28</b>	<b>15</b>	<b>56</b>	<b>29</b>	<b>114</b>								
30	455	37	465	40	481	45	511	55								
%	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>25</b>	<b>14</b>	<b>53</b>								

Anhand der mittleren Schlammwasserkonzentrationen aus Tabelle 17 sowie der theoretisch anfallenden Schlammwassermengen lässt sich der theoretische mittlere zusätzliche Sauerstoffbedarf  $OV_{d,am}$  in  $\text{kg O}_2/\text{d}$  in Abhängigkeit der Schlammwassermengen abschätzen (siehe Abbildung 49).

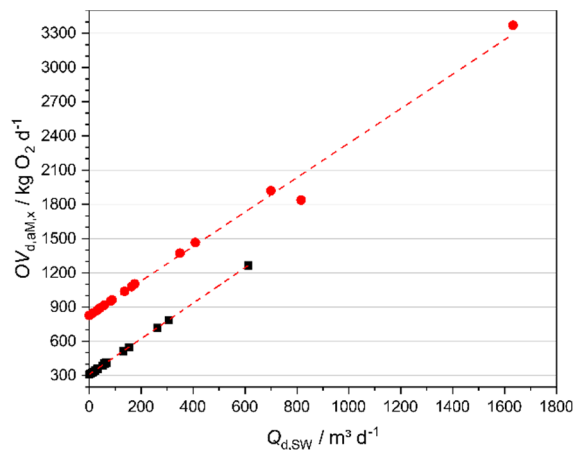


Abbildung 49: Theoretisch mittlerer benötigter Sauerstoffbedarf ( $OV_{d,am}$ ) zum Kohlenstoffabbau und zur Nitrifikation berechnet aus der CSB-Fraktionierung nach (DWA-A 131 2016) und den Konzentrationen im Zulauf nach Tabelle 28 in Abhängigkeit von der täglichen Schlammwassermengen aus der Entwässerung von Klärschlamm (Daten siehe Tabelle 28). ( $n = 17$ ). Beispielkläranlage mit 3.000 EW (schwarz) und 8.000 EW (rot).

Zur weiteren Bewertung des Betriebs bei der Rückführung der Schlammwassermengen wird analog zum Sauerstoffverbrauch die **Fällmittelmengen zur Phosphorelimination** betrachtet, vgl. (DWA-A 131 2016). Die tägliche Fällmittelmenge ( $B_{d,FM}$  in  $\text{kg FM}/\text{d}$ ) berechnet sich aus der zu fällenden Phosphorkonzentration  $X_{P,F\ddot{a}ll}$  (Phosphorkonzentrationen  $C_{P,Z}$ : Zulauf,  $C_{P,AN}$ : Ablauf ( $C_{P,AN} = 0,6 \cdot C_{P,\ddot{U}W}$  mit  $C_{P,\ddot{U}W} = 2 \text{ mg}/\text{L}$ ),  $X_{P,AM}$ : für Zellaufbau  $X_{P,AM} = 0,005 \cdot C_{CSB,Z}$ ,  $WS_{Fe}$ : Wirksubstanz  $123 \text{ g Fe}^{3+}/\text{kg}$  (12,3 %),  $M_x$ : Molare Masse von P: Phosphor und Fe: Eisen und  $\beta_{F\ddot{a}ll}$ : gewählte relative Fällmittelmenge  $\beta_{F\ddot{a}ll} = 1,2$ . Mit der Dichte einer Eisen-III-chloridsulfat-Lösung von  $\rho_{FM} = 1,52 \text{ g}/\text{cm}^3$  ergibt sich die tägliche Fällmittelmenge  $Q_{d,FM}$  in  $\text{L}/\text{d}$ . Der Fällmittelbedarf bei der Phosphorelimination für eine Beispielkläranlage mit 3.000 EW ist in Tabelle 28 aufgezeigt. Der Fällmittelbedarf steigt identisch zum Sauerstoffverbrauch mit zunehmender rückgeführter Schlammwassermenge (siehe Abbildung 50).

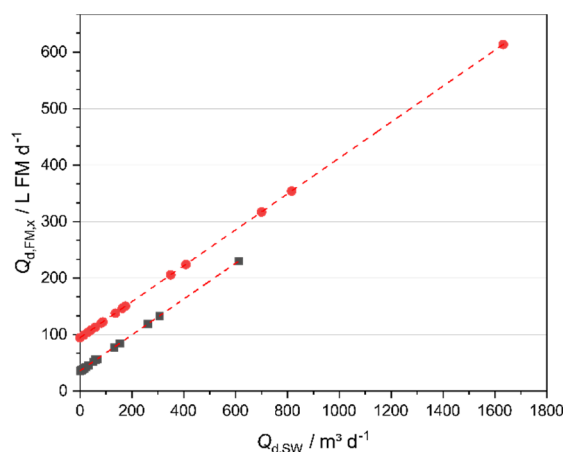


Abbildung 50: Theoretischer täglicher Fällmittelbedarf ( $Q_{d,FM}$ ) zur Phosphorelimination mit Eisen-III-Chloridsulfat berechnet aus den Zulaufkonzentrationen in Tabelle 28 in Abhängigkeit von der täglichen Schlammwassermengen aus der Entwässerung von Klärschlamm (Daten siehe Tabelle 28). ( $n = 17$ ). Beispielkläranlage mit 3.000 EW (schwarz) und 8.000 EW (rot).

Aus den Abschätzungen zum Sauerstoff- und Fällmittelverbrauch lassen sich Aussagen zum Personalaufwand (Überwachung), der Betriebssicherheit, dem Betriebsmittel- und Energieverbrauch sowie einer Beurteilung der Betriebskosten treffen.

## 5.4 Kostenvergleichsrechnung zur Klärschlammbehandlung und -entsorgung

### 5.4.1 Darstellung der untersuchten Umsetzungskonzepte

In Fortführung der dargestellten Variantenbetrachtung erfolgt eine Kostenvergleichsrechnung für verschiedene Umsetzungskonzepte.

**Hinweis:** Stand der überschlägigen Kostenvergleichsrechnung ist das Jahr 2021 mit relativ stabilen Preisen. Der Ukraine-Krieg sowie weitere Auswirkungen durch die Corona-Pandemie werden nicht mitberücksichtigt, da die Schwankungen zu hoch sind, um diese sinnvoll ökonomisch betrachten zu können.

Die Kostenvergleichsrechnung wird auf Grundlage der „Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)“ vom Juli 2012 durchgeführt (DWA KVR-Leitlinien 2012).

Es werden folgende drei Konzepte betrachtet

- Konzept 1: landwirtschaftliche Klärschlammverwertung (in Anlehnung an V1)
- Konzept 2: mobile Schlammentwässerung inkl. Entsorgung (in Anlehnung an V2B)
- Konzept 3: stationäre Schlammentwässerung inkl. Entsorgung (in Anlehnung an V3)

Bei allen drei Konzepten wird grundsätzlich eine Klärschlammbehandlung ab dem Klärschlammfall auf der Kläranlage betrachtet. Es wird von gleichen Rahmenbedingungen ausgegangen. Diese umfassen:

- ausschließlich kommunale Klärschlämme mit gleicher Charakteristik
- landwirtschaftliche Verwertung ist möglich (rechtliche Vorgaben in Bezug auf die Schlammqualität werden eingehalten)
- Rechen vorhanden (Störstoffentfernung)
- Strom- und Wasseranschluss vorhanden
- Zufahrtsmöglichkeiten gegeben
- geeigneter Standort für Entwässerungsaggregate (befestigte Fläche) vorhanden
- zum Zeitpunkt  $t = 0$  sind weder Speicher noch Entwässerungsmaschinen vorhanden
- einfache Entnahme der Schlämme möglich
- befestigter Baugrund vorhanden

Unter diesen Bedingungen kann von einer Nutzengleichheit und der damit verbundenen Eignung einer Kostenvergleichsrechnung ausgegangen werden.

#### 5.4.2 Gewählte Modellkläranlagen

Für alle drei Konzepte werden mehrere Modellkläranlagen der Größenklasse 1 bis 3 definiert und der jeweilige Schlammfall über den spezifischen Wert von 48,4 g TM/(E·d) gemäß (DWA-M 368 2014) ermittelt. Dadurch wird von üblichen kommunalen Kläranlagen ausgegangen. Der Trockensubstanzgehalt im Nassschlamm wird mit 25 kg TM/m<sup>3</sup> gewählt, womit eine gewisse Voreindickung angenommen wird. Bei den Konzepten 2 und 3 erfolgt eine Entwässerung auf 25 % TR.

Mit den getroffenen Annahmen ergibt sich die folgende, grundlegende Tabelle für die Modellkläranlagen und deren Schlammfall (siehe Tabelle 29).

Tabelle 29: Klärschlammfall in Abhängigkeit der Einwohnerwerte als Voraussetzung für die Kostenvergleichsrechnung der Modellkläranlagen.

Schlamm- anfall	100 EW	500 EW	1.000 EW	3.000 EW	4.000 EW	6.000 EW	8.000 EW	10.000 EW
kg TM/d	5	24	48	145	194	290	387	484
m <sup>3</sup> /d	0,2	1,0	1,9	5,8	7,7	11,6	15,5	19,4

#### 5.4.3 Grundlagen der Kostenschätzung

Die Kostenschätzung (Investitions- und Betriebskostenschätzung) basiert auf aufgerundeten Brutto-Werten aus Richtpreisangeboten, aus ähnlichen Projekten abgeschätzten Kosten sowie Erfahrungswerten von Anlagenbetreibern.

Es werden ein Untersuchungszeitraum von 30 Jahren und ein realer Zinssatz von 3 % gewählt. Die Abschreibungsdauer für die Maschinenteknik wird auf 15 Jahre und die Abschreibung der Bautechnik auf 30 Jahre festgelegt.

Damit ergibt sich ein Kapitalwiedergewinnungsfaktor von 0,083767 für die Maschinenteknik und von 0,051019 für die Bautechnik. Mit Hilfe dieser Faktoren können die Jahreskosten für Neuinvestitionen ermittelt werden. Die Summe der Jahreskosten der Investitionen zusätzlich der berechneten Betriebskosten pro Jahr ergeben die Gesamtjahreskosten für die einzelnen Konzepte und Modellkläranlagen, wobei bei der landwirtschaftlichen Verwertung (Konzept 1) ausschließlich Betriebskosten anfallen.

Bei den Investitionskosten werden Baunebenkosten in Höhe von 20 % der Herstellungskosten mit einberechnet.

#### **5.4.4 Investitionskostenschätzung der Neuinvestitionen**

##### *Konzept 1: landwirtschaftliche Verwertung*

Bei der landwirtschaftlichen Verwertung wird davon ausgegangen, dass keine Neuinvestitionen erforderlich werden, die örtlichen Rahmenbedingungen gegeben sind und eine einfache Entnahme des Schlammes möglich ist.

##### *Konzept 2: mobile Schlammmentwässerung*

Bei der mobilen Schlammmentwässerung werden Neuinvestitionen für einen Schlammstapel- und einen Schlammwasserbehälter mit Hilfe von Erfahrungswerten von ähnlichen Projekten grob abgeschätzt.

Die Dimensionierung des Schlammwasserspeichers erfolgt mit einem spezifischen Wert von 1,7 L/(E·d) (siehe Kapitel 5.3.3). Das erforderliche Volumen für den Schlammstapelbehälter wird über die anfallende Schlammmenge und die gewählten Entwässerungsintervalle berechnet.

##### *Konzept 3: stationäre Schlammmentwässerung*

Als Entwässerungsaggregat wird für alle Modellkläranlagen eine Zentrifuge mit einem Durchsatz von 2 bis 10 m<sup>3</sup>/h gewählt.

Die Kosten für Entwässerungsmaschine inkl. Polymerdosierstation, Rohrleitungen, Armaturen, Fördereinrichtungen, Bau- und EMSR-Technik sowie Straßen und Wege wurden anhand von Richtpreisangeboten sowie Erfahrungswerten von ähnlichen Projekten überschlägig ermittelt.

Die Entwässerungsmaschine wird mit unterschiedlichen Betriebszeiten betrieben. So wird beispielsweise bei der kleinsten Modellkläranlage (300 EW) die Maschine nur 2-mal im Monat für rd. 2 Stunden und die größte Modellkläranlage mit 10.000 EW wöchentlich für rd. 30 Stunden/Woche betrieben.

Die Dimensionierung des Schlammwasserspeichers erfolgt mit einem spezifischen Wert von 1,7 L/(E·d) (siehe Kapitel 5.3.3). Das erforderliche Volumen für den Schlammstapelbehälter wird über die anfallende Schlammmenge und die gewählten Entwässerungsintervalle berechnet.



Abhängig von der gewählten Betriebszeit der Entwässerungsmaschine wurden die Schlammstapelbehälter (bzw. Vorlagebehälter für die stationäre Klärschlammmentwässerung) auf die individuell benötigte Speicherkapazität dimensioniert.

Der erforderliche Schlamm lagerplatz für entwässerten Schlamm wurde mit Hilfe der zu entsorgenden Schlammmenge und einer für die Entsorgung sinnvollen, gewählten Lagerdauer für den entwässerten Schlamm abgeschätzt.

Die Investitionskosten für die Speicher wurden ebenfalls mit Hilfe von Erfahrungswerten aus ähnlichen Projekten grob abgeschätzt.

#### **5.4.5 Betriebskostenabschätzung**

##### *Konzept 1: landwirtschaftliche Verwertung*

Die Kosten für die landwirtschaftliche Verwertung schwanken erheblich zwischen 11 bis 30 €/m<sup>3</sup> (TransMIT GmbH 2021). Für die Kostenvergleichsrechnung wurde ein Wert von 28 €/m<sup>3</sup> gewählt, da dieser in Hinblick auf die aktuellen Erfahrungen mehrerer Kläranlagen als repräsentativ erachtet wird. Diese Kosten beinhalten die landwirtschaftliche Verwertung inkl. Entnahme, Verladung, Transport, Analysen und Einarbeitung in die Felder.

##### *Konzept 2: mobile Schlammmentwässerung*

Die Kosten für eine mobile Schlammmentwässerung wurden mit 24 €/m<sup>3</sup> festgelegt. Diese Kosten stammen aus (TransMIT GmbH 2021) und wurden mit aktuellen Angaben von Kläranlagen in Bayern überprüft. Die Kosten beinhalten die mobile Entwässerung inkl. Gstellung, Energie, Polymer, Personal, Analysen sowie den Transport und die Entsorgung des entwässerten Schlammes (Monoverbrennung).

##### *Konzept 3: stationäre Schlammmentwässerung*

Für die stationäre Entwässerung wurden folgende Betriebskosten grob abgeschätzt: Energie-, Polymerkosten, Kosten für die Entsorgung (Monoverbrennung) inkl. Transport, Personal- und Wartungskosten.

Die Energiekosten (Strom) werden mit 0,25 €/kWh festgelegt und der spezifische Stromverbrauch mit 1,9 kWh/m<sup>3</sup> angenommen. Der spezifische Polymerverbrauch wird mit 10 kg/t *TM* gewählt. Der Preis für Polymere wird mit 4 €/kg angesetzt (jeweils bezogen auf die Wirksubstanz pFM).

Für die Kosten der Monoverbrennung des entwässerten Schlammes inkl. Transport wurden 150 €/t Originalsubstanz gewählt, welcher auf einem Abgleich zwischen den Angaben aus (TransMIT GmbH 2021) und aktuellen Angaben von verschiedenen Kläranlagenbetreibern basiert.

Der Personalaufwand wird anhand der berechneten Betriebszeiten der Schlammmentwässerungen an den Modellkläranlagen abgeschätzt. Die Personalkosten werden mit 60 €/h gewählt.

Für die Entwässerungsmaschinen werden jährliche Wartungskosten von 1,5 % der Investitionskosten angenommen.

### 5.4.6 Ergebnis der Kostenvergleichsrechnung

Die Auswertung der überschlägigen Kostenvergleichsrechnung in Abbildung 51 verdeutlicht, dass die spezifischen Kosten gerade für kleine Kläranlagen sehr hoch sind.

Unter den beschriebenen Voraussetzungen und Annahmen zeigt sich, dass die landwirtschaftliche Verwertung für die GK 1 bis 3 Kläranlagen am wirtschaftlichsten ist. Aufgrund der in den letzten Jahren deutlich angestiegenen Entsorgungskosten (Monoverbrennung sowie auch Mitverbrennung) erscheint dieses Ergebnis als plausibel.

Bei Nichteinhaltung der Grenzwerte kann keine landwirtschaftliche Verwertung erfolgen. Jedoch können auch ökologische Aspekte und die abnehmende Akzeptanz der Grundstücksbesitzer bzw. -verpächter Gründe für keine landwirtschaftliche Verwertung sein.

Die stationäre wird im Vergleich zur mobilen Schlammentwässerung gemäß den vorgenommenen Annahmen und Schätzungen ab rd. 9.000 EW wirtschaftlich. Aufgrund der technisch sinnvollen Auslastung der kleinsten Entwässerungsaggregate bei gegebenen Klärschlammanfall erscheint dieses Ergebnis als plausibel.

*Es ist zu beachten, dass bei jeder Kläranlage andere Randbedingungen vorliegen, weshalb diese Ergebnisse lediglich als grobe Orientierung dienen. Für jeden individuellen Fall ist eine detaillierte Planung mit genauer Kostenermittlung, -vergleichsrechnung, eine Sensitivitätsanalyse sowie eine nicht monetäre Betrachtung erforderlich, um eine gute Basis für eine Entscheidung zu ermöglichen.*

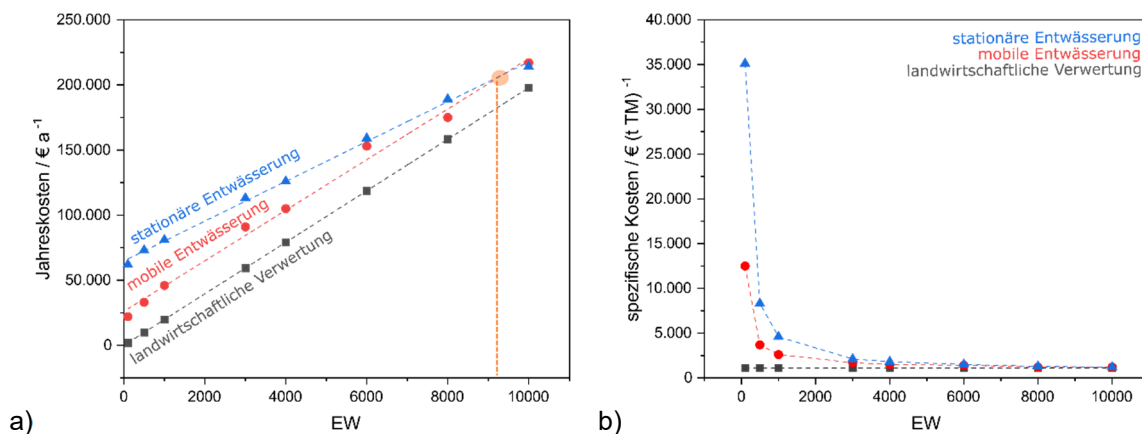


Abbildung 51: Kostenvergleichsrechnung für drei Konzepte (Konzept 1: landwirtschaftliche Verwertung; Konzept 2: mobile Entwässerung; Konzept 3: stationäre Entwässerung) mit Darstellung der a) Jahreskosten in €/a und b) spezifischen Kosten €/t  $TM^{-1}$  in Abhängigkeit der Einwohnerwerte.

## 5.5 Bewertungskriterien

Die Ermittlung der für den jeweiligen Standort optimalen Variante sollte nicht ausschließlich auf Basis von monetären Faktoren erfolgen. Insbesondere die folgenden fünf Hauptkriterien sollten beachtet werden:

- Gesetzliche Rahmenbedingungen
- Technik
- Betrieb
- Ökonomie
- Ökologie

Jedes Hauptkriterium kann durch Unterkriterien spezifiziert und damit konkretisiert werden.

Auf Basis der fünf Hauptkriterien, konkretisiert durch Unterkriterien, kann für einen Variantenvergleich eine Nutzwertanalyse erfolgen, vgl. (Schaum et al. 2010). Damit besteht die Möglichkeit, dass Kriterien nach der individuellen Relevanz gewichtet werden können.

Eine Bewertung kann z. B. über Rangfolgen erfolgen, d. h. die Festlegung einer Rangfolge für das jeweilige Kriterium von Rang 1 bis Rang  $i$  (Bewertung von  $i$  Varianten). Sind bei einem Kriterium zwei Varianten gleich zu bewerten, wird der Rang zweimal vergeben, wobei der nächste Rang ausgelassen wird. Beispiel: 2 Varianten bekommen den 1. Rang, die nächst folgende Variante bekommt den 3. Rang.

Bei einem Variantenvergleich mittels Nutzwertanalyse ist zu beachten, dass die Varianten miteinander vergleichbar sein müssen und kein Kriterium zu einem direkten Ausschluss führt (bspw. durch die Nichteinhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen).

### 5.5.1 Variantenentwicklung

Die individuelle Variantenentwicklung zur Klärschlammbehandlung und -entsorgung beginnt mit der Entscheidung, ob eine Klärschlammmentwässerung auf der eigenen Kläranlage erfolgt. Auf Grundlage dieser Auswahl werden die weiteren Schritte bis zur Entsorgung bestimmt (siehe Abbildung 52).

Bei der Entwässerung des anfallenden Klärschlammes wird abhängig vom Flächenbedarf und der Entwässerungshäufigkeit die Kapazität des Schlammstapelbehälters bestimmt. Anschließend folgt die Auswahl, ob die Entwässerung durch ein Lohnentwässerungsunternehmen (mobil) oder auf der eigenen Kläranlage (stationär) stattfinden soll. Durch die Entscheidung der Entwässerungsart und -häufigkeit wird die nötige Kapazität des Schlammwasserspeichers bestimmt. Abschließend erfolgt die Wahl, ob eine Trocknung des entwässerten Klärschlammes vorgesehen ist. Je nach Klärschlammbehandlung wird der jeweilige Entscheidungsweg beeinflusst, welche weitere Anforderungen und Abstimmungen benötigt (siehe Abbildung 52).

Bei Variante A (Anlieferung Nachbarkläranlage) wird der Nassschlamm zu einer größeren Kläranlage zur dortigen Behandlung verbracht. Eine mobile Entwässerung bei mehreren Kläranlagen kann dabei auch als ein gemeinsames Aggregat mit rotierendem Einsatz vorgesehen werden. Die Trocknung von entwässerten Klärschlamm kann vor Ort sowie aber auch extern auf einer größeren Kläranlage erfolgen.

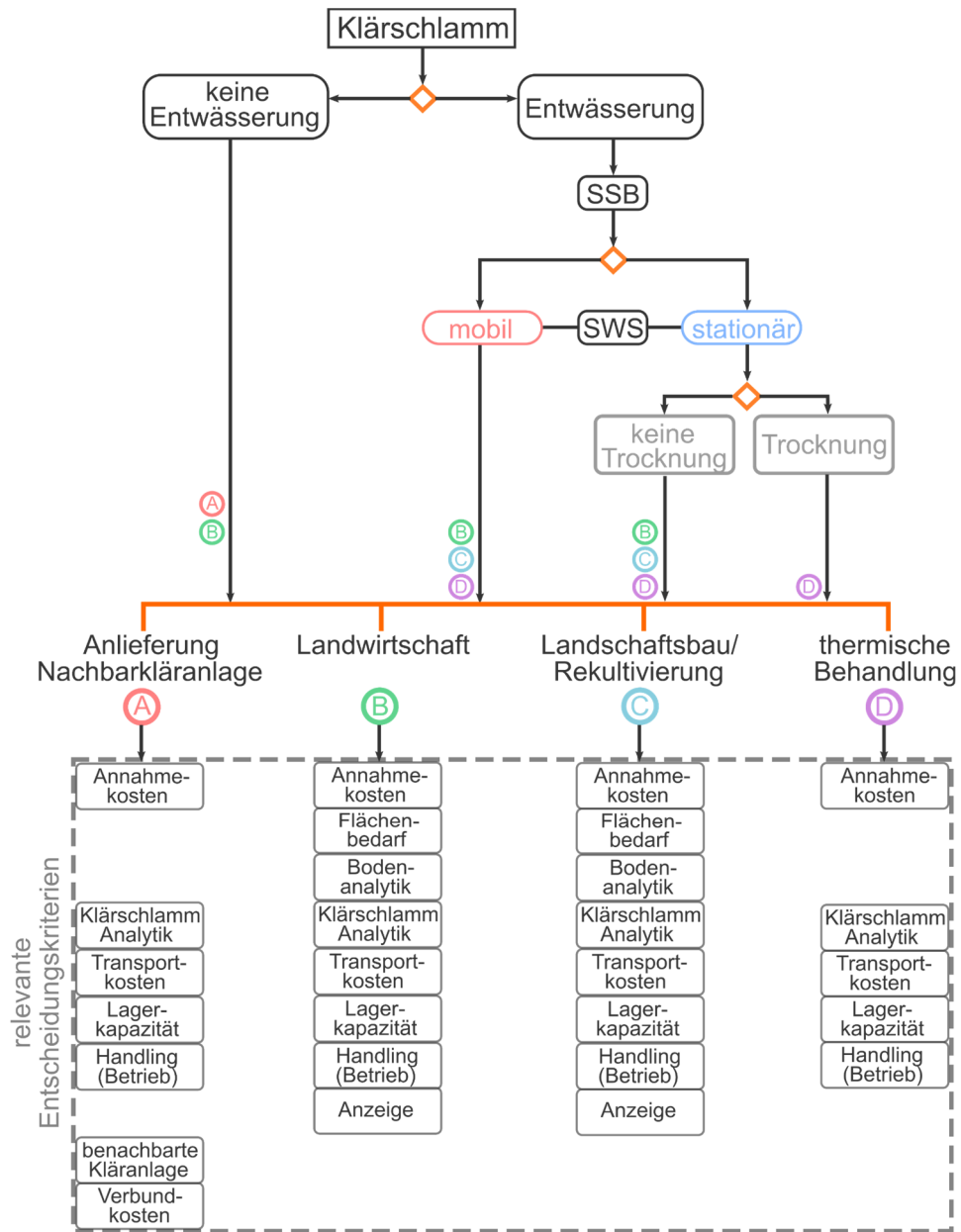


Abbildung 52: Ablaufschema zur systematischen Entwicklung von Varianten zur Klärschlammbehandlung für kleine und mittlere Kläranlagen.

## 5.5.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Durch die Novellierungen der Dünge-, Düngemittel- sowie Klärschlammverordnung haben sich verschiedene Restriktionen sowie Pflichten für die Klärschlamm Entsorgung ergeben, welche die landwirtschaftliche Nutzung von Klärschlamm v. a. für größere Kläranlagen zukünftig beschränken. Unter Voraussetzung der gesetzlichen Rahmenbedingungen, auch im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen (**Flexibilität für zukünftige Entwicklungen**) müssen diese wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, eingehalten werden. Auch im Hinblick auf die Stilllegung von Kohlekraftwerken (bedingt durch die Energiewende) und der Einschränkung der Mitverbrennung von Klärschlamm ohne vorherige Phosphorrückgewinnung werden zukünftig vermehrte interkommunale Zusammenarbeiten nötig, welche das **Vergaberecht** mit den Regelungen zur Zusammenarbeit von öffentlichen Auftraggebern oder die Ausgestaltung besonderer Vergabeverfahren beachten müssen (Siebold 2018).

Daneben existieren ggf. **Fördermöglichkeiten** (z. B. RZWas) für eine Modernisierung bzw. Auflassung von Teichkläranlagen, welche im Rahmen der zukünftigen Klärschlamm Entsorgung unter Berücksichtigung der gesetzlichen Rahmenbedingungen und dem Umfang der damit einhergehenden Genehmigungsverfahren in Betracht gezogen werden sollten (z. B. Kommunalrichtlinie des Bundes).

## 5.5.3 Technik

Zur individuellen Bewertung der eingesetzten Technik sollten insbesondere

- die Komplexität der Anlage
- die Anlagengröße bzw. Flächenbedarf (ohne vorhandene Lagerkapazitäten) und
- die Versorgung mit Strom und Wasser berücksichtigt werden.

Beispielsweise steigt bei einer stationären Entwässerung und der anschließenden Trocknung die **Komplexität der Anlage** für den Kläranlagenbetrieb, welche bei einer mobilen Entwässerung geringer ist. Damit unterscheiden sich auch die Personalanforderungen abhängig von der gewählten Entwässerungsart.

Für eine hohe Entsorgungs- und Betriebssicherheit werden grundsätzlich **Klärschlamm-Lagerkapazitäten (SSB)** von einem Jahr angesehen. Bei der landwirtschaftlichen Verwertung wird empfohlen, Lagerkapazitäten von 6 bis 12 Monaten vorzuhalten, um eine bedarfsgerechte Entsorgung sicherzustellen. Für die thermische Entsorgung werden 3 bis 6 Monate als sinnvoll erachtet, da es beim Anlagenbetrieb des Entsorgers selbst zu Ausfällen durch Havarien oder Revisionsarbeiten kommen kann. Aufgrund von Rückverflüssigung durch Niederschläge (und damit verbundene höhere Transport- und Entsorgungskosten) sowie Geruch können Überdachungen sinnvoll sein. Ohne geeignete Lagerflächen muss ein höherer logistischer Aufwand für Wechsel- und Auffangbehälter berücksichtigt werden, um Stillstandzeiten bei der Entwässerung zu vermeiden. Durch die Abhängigkeit können kurz- bis langfristige Unterbrechungen aufgrund der Transportlogistik sowie dem Ausfall des Entsorgers auftreten, was die Vorhaltung von mehr Speicherkapazitäten benötigt und damit die Kosten zur Entwässerung und Entsorgung erhöht.

Der **Entwässerungsgrad und die Klärschlammengen** bestimmen die möglichen Entsorgungswege. Beispielsweise wird bei der thermischen Entsorgung von entwässerten Klärschlämmen häufig die Pumpfähigkeit mit Dickstoffpumpen vorausgesetzt, was einen *TR* von 20 % bis 35 % erfordert (DWA Arbeitsgruppe AK-13.4 2010).

Für die **Klärschlamm-trocknung** entscheiden verschiedene Kategorien und die individuellen Randbedingungen, ob beispielsweise eine solare Trocknung für Betreiber kleiner oder mittlerer Kläranlagen interessant ist. Dabei können wie bei der Entwässerung verschiedene Bewertungskategorien herangezogen werden. Neben dem Klärschlamm-anfall /-qualität sollten die aktuellen und zukünftigen Verwertungsmöglichkeiten eingeordnet werden. Daneben liefern die bei der Entwässerungscheckliste (siehe Kapitel 6.1 zur Grundlagenermittlung) ermittelten Werte die Grundlage für das weitere Vorgehen. Beispielsweise entscheiden der nötige **Flächenbedarf** und die **Verfügbarkeit von Strom und Wasser** über das weitere Vorgehen zur Trocknung.

Zur Beurteilung der Solartrocknung müssen daneben die saisonalen und regionalen Gegebenheiten (jahreszeitliche Temperaturschwankungen, Strahlungsleistung, relative Luftfeuchtigkeit) ermittelt werden, um daraus eine Abschätzung zur potentiellen Verdunstungsleistung zu treffen. Falls externe Wärmequellen zur Verfügung stehen, können diese den nötigen Flächenbedarf reduzieren.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass insbesondere die thermische Behandlung von Klärschlamm mit entwässerten Klärschlamm möglich ist. Die Notwendigkeit einer Klärschlamm-trocknung ergibt sich nur für spezielle thermische Entsorgungswege, bspw. bei der Zement-industrie (Trocknung ggf. dann auch am jeweiligen Standort).

#### 5.5.4 Betrieb

Die Kategorie Betrieb dient im Rahmen der Nutzwertanalyse zum einen der Bewertung der Klärschlammbehandlung sowie zum anderen der Rückbelastung der Kläranlage und dem damit verbundenen Betriebs- und Personalaufwand. Durch die Festlegung der Entwässerungshäufigkeit werden mitunter die weiteren Handlungsschritte beeinflusst, welche

- den Personalaufwand (Überwachung, Wartung),
- die Betriebssicherheit (Rückbelastung, Maschinenteknik, saisonale Einflüsse etc.),
- den Betriebsmittelverbrauch,
- den Energieverbrauch,
- Rückkopplung auf die bestehende Abwasserbehandlung
- die Entsorgungssicherheit,
- die Entsorgungsmengen, /-häufigkeit und
- saisonale Einflüsse (Sommer-/ Winterbetrieb) beeinflussen.

Die Wahl der Entwässerungshäufigkeit (mobil oder stationär) beeinflusst den **Personalaufwand** zur Instandhaltung, Überwachung, Betrieb und Wartung der Anlagen. Im Vorhinein sollte geklärt werden, ob ausreichend Personal zum Betrieb von stationären Entwässerungsaggregaten zur Verfügung steht. Daneben müssen auch organisatorische Aufwendungen wie die Beschaffung von Polymeren oder die Koordination der Klärschlamm Entsorgung berücksichtigt werden. Bei der mobilen Entwässerung hingegen entfällt zwar der Personalaufwand zum Betrieb von Entwässerungsaggregaten, jedoch steigt der organisatorische Aufwand hinsichtlich Koordination mit (mobilen) Entwässerungsunternehmen.

Während bei der stationären Entwässerung die **Betriebssicherheit** durch einen geregelten Schlammumsatz und damit eine einstellbare Schlammwasserrückführung in den Hauptstrom steigt, muss bei der mobilen Entwässerung für ausreichend Schlammwasserkapazitäten gesorgt werden. Daneben entscheidet die Wahl der Entwässerungsart (mobil oder stationär) über den **Betriebsmittel- und Energieverbrauch**. Während bei der stationären Entwässerung beispielsweise der Polymerverbrauch an die Bedürfnisse des eigenen Klärschlammes angepasst werden kann, gibt es bei der mobilen Entwässerung i. d. R. nicht die zeitlichen Möglichkeiten diese entsprechend detailliert anzupassen. Weiterhin können durch eine stationäre Entwässerung die Entsorgungshäufigkeiten individuell festgelegt werden, was wiederum die **Entsorgungssicherheit** beeinflusst. Im Gegensatz dazu steigt die Abhängigkeit (beispielsweise Entsorgungs-, Transportkosten) bei einer mobilen Entwässerung.

Die **saisonalen Einflüsse** können ein entscheidender Faktor zur Entscheidungsfindung einer mobilen oder stationären Entwässerung darstellen, wenn aufgrund von örtlichen Begebenheiten sowie entsprechenden Witterungsbedingungen keine mobile Entwässerung auf der Kläranlage erfolgen kann. Neben der Entsorgungssicherheit entscheidet die Bewertung der saisonalen Einflüsse auch die ökonomischen Aspekte wie die Preisunabhängigkeit, wodurch die Komplexität der Anlage und ggf. der Personalaufwand steigt.

### 5.5.5 Ökonomie

Eine entscheidende Kategorie zur Entscheidungswahl von Varianten ist die **Kostenvergleichsrechnung**.

Beispielsweise müssen bei der stationären Entwässerung die Investitionskosten berücksichtigt werden, welche bei der mobilen Entwässerung nicht anfallen. Jedoch können sich die Investitionskosten nach einer Amortisationszeit rentieren, insbesondere im Hinblick auf steigende Entsorgungs- und Transportkosten bei der mobilen Entwässerung.

Durch die stationäre Entwässerung werden **Preisabhängigkeiten** reduziert, jedoch steigen die Betriebs- bzw. Personalkosten durch eine höhere Komplexität der Anlage. Die Art der Klärschlammbehandlung beeinflusst dabei deutlich die Transportkosten, welche im Rahmen der Bewertung betrachtet werden müssen (siehe Kapitel 5.2.3).



## 5.5.6 Ökologie (Methanemissionen)

### *Ökobilanz*

Neben den technischen und betrieblichen Bewertungskriterien sollten insbesondere die ökologischen Aspekte der Klärschlammbehandlung sowie die Wirkungsabschätzungen betrachtet werden. Darunter entscheiden neben dem „Treibhauseffekt“ auch die „Versäuerung“ und die „Eutrophierung“ sowie die „Humantoxizität“ über die Ökobilanz der Klärschlammbehandlung und -entsorgung. Als Indikatoren dienen hierzu beispielsweise die Indikatoren krebserzeugende Stoffe, Quecksilber und Feinstaub. Weiterhin stellen auch die Einträge von Schadstoffen sowie die Rückgewinnung von Phosphor entscheidende Faktoren dar, welche bei der Wahl der Entsorgungswege mit berücksichtigt werden sollten (Schaum et al. 2010; Fehrenbach 2006).

Dabei zeigen aktuelle Untersuchungen, dass selbst 34 Jahre nach der letzten Klärschlammausbringung auf landwirtschaftlichen Feldern Makro- und Mikroplastik nachgewiesen werden können (Weber et al. 2022). Auch im Hinblick auf die Vielfalt an Bakterien (einschließlich Pathogenen) muss die Entscheidung der möglichen Entsorgungswege eingeschätzt werden, da kleine Abwasserbehandlungsanlagen eine vergleichbare hohe Belastung wie größere Kläranlagen zeigen (Umweltbundesamt 2022).

### *Methanemissionen*

Die Erzeugung von Methan (Faulgas) zur Energieproduktion ist ein erwünschter Prozess in der Schlammfäulung. Jedoch können auf Kläranlagen unbeabsichtigte Methanemissionen entstehen. Gerade im Bezug zum Klimawandel hat Methan ein signifikantes globales Erwärmungspotenzial, wobei in einem Zeitraum von 100 Jahren Methan 34-mal effektiver die Wärme in der Atmosphäre bindet, als Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) (Noyola et al. 2018).

Methanemissionen können beispielsweise bei der Entwässerung, der vor- und nachgelagerten Lagerung des Schlammes sowie der weiteren Nutzung von Methan (z. B. Methanschlupf in BHKW) entstehen. Neben Methan können langkettige Kohlenwasserstoffverbindungen ausgasen (rd. 2 bis 8 Massen-% des Methanwerts) (Heindl und Dobslaw 2022). Auch bei der Abwasser- und Schlammbehandlung können Methanemissionen an unterschiedlichen Stellen austreten, beispielsweise durch das Ausgasen von gelöstem Methan (Parravicini et al. 2016; Noyola et al. 2018).

Im Verlauf der Abwasser- und Schlammbehandlung ist das Ausmaß der Emissionen abhängig von der Zusammensetzung der organischen Substanz, der Schlammtemperatur während der Lagerung (respektive Trocknung), mechanischen Belastung bei der Entwässerung, dem Stabilisierungsgrad des Schlammes sowie der Lager- und Transportdauer zwischen Entwässerung und Trocknung (Heindl und Dobslaw 2022).

Die Methanemissionen können nach Literaturangaben Werte zwischen 0,09 bis 307 g CH<sub>4</sub>/(E·a) (ohne Fäulung) annehmen, variieren jedoch stark je nach Herkunft und Behandlung (Schaum et al. 2016; Daelman et al. 2012; Heindl und Dobslaw 2022).

Für eine beispielhafte Kläranlage mit Schlammfäulung betrug die spezifischen Methanemission rd. 350 g CH<sub>4</sub>/(E·a), wobei als Hauptemittenten die Faulbehälterverluste (37,1 %), der Vorlagebehälter zur Entwässerung (17,1 %) sowie der BHKW-Schlupf (14,3 %) ermittelt



wurden. Auch der Stapelbehälter für den entwässerten Schlamm hatte noch einen Anteil von 8,6 % an CH<sub>4</sub>-Gesamtemissionen (Heindl und Dobslaw 2022). Nach Untersuchungen erstreckt sich der Bereich der Methanemissionen im Schlammstapelbehälter von entwässertem Schlamm nach der Klärschlammfäulung auf rd. 2 bis 15 %, abhängig von der Aufenthaltszeit im Faul- sowie Schlammstapelbehälter (Cunninham et al. 2015; Heindl und Dobslaw 2022; Müller et al. 2021).

Versuche mit aerob stabilisiertem Klärschlamm zeigten ebenfalls eine Gasproduktion nach 14 Tagen (25 °C). Im Mittel betrug die CH<sub>4</sub>-Spitzenproduktion 0,7 L CH<sub>4</sub>/(kg oTM·h), was bei einem TR-Gehalt von 30 % und 50 % GV und einer Tonne entwässertem Klärschlamm eine kurzzeitig zu erwartende maximale Methanproduktion von 105 L CH<sub>4</sub>/(h·t<sub>Schlamm</sub>) (zzgl. 20 % rd. 125 L CH<sub>4</sub>/(h·t<sub>Schlamm</sub>)) als Bemessungswert ergibt (Drescher und Kapp 1994). Als häufigste Werte wurden CH<sub>4</sub>-Spitzenproduktionen von rd. 0,14 bis 0,56 L CH<sub>4</sub>/(kg oTM·h) gemessen. Dabei waren die Methanemissionen praktisch unabhängig vom Organikgehalt und nahmen mit steigender Temperatur zu (abhängig von dem temperaturabhängigen Aktivitätsbereich der Methanbakterien). Die Spitzenwerte treten kurzzeitig auf, wenn die Schlammmasse in Bewegung gesetzt wird (beispielsweise beim Rühren, bei der Entwässerung von Klärschlamm). Nach neuesten Untersuchungen kann ein größeres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen zu einer gesteigerten Ausgasung führen, bezogen auf die Trockenmasse des Schlammes (Heindl und Dobslaw 2022).

Die CH<sub>4</sub>-Emissionen sind nach den IPCC-Leitlinien (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) bei simultan aerober Schlammstabilisierung vernachlässigbar gering, solange eine ausreichende Belüftung vorliegt und die Belebungsbecken nicht überlastet sind. Diese treten hauptsächlich bei langen Lagerungsbedingungen vom entwässerten Klärschlamm auf (IPCC 2006; Parravicini et al. 2016). Jedoch zeigen die Untersuchungen zum Schlammwasser aus Kapitel 4.2, dass sich schnell anaerobe Bedingungen im Schlammstapelbehälter einstellen und bei langen Lagerdauern sowie der anschließenden mechanischen Beanspruchung (beispielsweise durch Entwässerung und anschließenden Transport) zu Methanemissionen führen können.

Unter Annahme eines Emissionsfaktors für Belebtschlammverfahren (simultan aerobe Schlammstabilisierung) von 0,025 kg CH<sub>4</sub>/kg CSB<sub>Ablauf</sub> ergaben Modellbetrachtungen einen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von rd. 24 kg CO<sub>2,eq</sub>/(E·a) für eine Beispielkläranlage mit 50.000 EW. Darunter fallen rd. 60 % aus den Energieverbrauch (hauptsächlich die Belüftung) und 19 % auf die Schlammstapelung von entwässertem Klärschlamm (rd. 19 % mit rd. 4,6 kg CO<sub>2,eq</sub>/(E·a)). Weitere Emissionen ergeben sich beispielsweise durch das Ausgasen von N<sub>2</sub>O aus dem Belebtschlamm-Becken sowie dem Transport des Klärschlammes (Parravicini et al. 2016).



## **6 Handlungsempfehlungen für eine zukunftsfähige Klärschlammbehandlung und -entsorgung**

### **6.1 Grundlagenermittlung**

Vor der Entscheidung, ob eine mobile, stationäre oder keine Entwässerung stattfindet, sollten zunächst die Randbedingungen und Grundvoraussetzungen abgestimmt und definiert werden.

Anhand einer Checkliste mit fünf Unterpunkten sollte geklärt werden:

- welche Mengen an Klärschlamm jährlich und mit welcher Qualität anfallen,
- ob ausreichende Flächen zur Verfügung stehen,
- die Flächen einen befestigten Untergrund besitzen,
- ein Strom- und Wasseranschluss vorliegen und
- ob ggf. Lagerkapazitäten (Schlammstapel-, Schlammwasserbehälter, entwässerter Klärschlamm) zur Verfügung stehen.

Die Daten aus der Checkliste sollten schließlich mit vorhandenen Betriebstagebüchern sowie Einwohnerwerten aus dem Genehmigungsbescheid der Kläranlage auf Plausibilität geprüft werden.

Zur Bewertung der Entsorgungssicherheit sind zudem die Klärschlammqualität auf mögliche Schadstoffe sowie der Stabilisierungsgrad im Vorhinein zu klären. Verfahren zur Ermittlung des Stabilisierungsgrades können dem ATV-DVWK-Merkblatt M 368 „Biologische Stabilisierung von Klärschlamm“ entnommen werden und sollten regelmäßig überprüft werden (DWA Arbeitsgruppe AK-13.4 2010).

Vor der mobilen oder stationären Entwässerung ist zudem der Flächenbedarf für das Entwässerungsaggregat, der Bedarf und die Verfügbarkeit des Entwässerungsaggregats, Pufferkapazitäten, die Zufahrtsmöglichkeiten sowie die Beschaffenheit der benötigten Flächen zu überprüfen.

### **6.2 Unbelüftete Abwasserteichanlagen**

#### *Grundverfahren der unbelüfteten Abwasserteichanlagen*

Unbelüftete Abwasserteichanlagen werden vor allem für die Abwasserbehandlung bis rd. 1.000 EW eingesetzt. Meist bestehen diese ausschließlich aus einem oder mehreren entsprechend dimensionierten unbelüfteten Abwasserteichen. Aufgrund der Sedimentation müssen daher Abwasserteiche regelmäßig (rd. alle 5 bis 10 Jahre) geleert/ausgebaggert/abgepumpt werden.

#### *Mechanische Vorbehandlungsstufe (Rechen)*

Für die Gewährleistung einer optimalen Klärschlamm Entsorgung (sowohl bei Verbringung auf eine andere Kläranlage als auch für eine landwirtschaftliche Klärschlammverwertung)

empfiehlt sich mindestens die Integration einer Rechenanlage zur Entfernung von Grobstoffen; ggf. auch die Einbindung eines Sandfangs zur Abscheidung von Sand.

Es existieren zahlreiche Beispiele von Abwasserteichanlagen ohne eine entsprechende mechanische Vorbehandlung, die dadurch deutliche Probleme bei der Klärschlamm Entsorgung haben. Dies führt in aller Regel zu deutlich erhöhten Kosten für die Klärschlamm Entsorgung (ggf. bis hin zu einer mangelnden Entsorgungssicherheit).

#### *Infrastruktur*

Viele unbelüftete Abwasserteichanlagen verfügen nicht über eine ausreichende technische Infrastruktur (Strom, Trinkwasser, befestigter Stellplatz etc.) für eine Vorbehandlungsstufe oder mobilen Entwässerung, dies sollte ggf. zukünftig berücksichtigt werden.

#### *Klärschlamm Entsorgung - landwirtschaftliche Nassschlammverwertung*

Grundsätzlich empfiehlt es sich die Schlammstapelzeiten bzw. die Entschlammung der Teiche an die zeitlichen Bedürfnisse der Landwirte zu richten. Dabei muss für die landwirtschaftliche Verwertung eine ausreichende Klärschlammqualität vorliegen.

Kleine Kläranlagen (< 1.000 EW) müssen die klärschlammbezogenen Untersuchungen nach § 5 Abs. 1 AbfKlärV mindestens alle zwei Jahre durchführen lassen. Die zuständige Behörde kann die Abstände zwischen den Untersuchungen verkürzen oder verlängern (siehe Kapitel 3.3).

Bei Klärschlamm aus Abwasserbehandlungsanlagen, der nicht kontinuierlich entsorgt wird, z. B. bei Abwasserteichanlagen, sind die Untersuchungen zeitnah vor der Abgabe des Klärschlammes durchführen zu lassen. Kontinuierliche Untersuchungen (z. B. alle drei Monate) sind nicht erforderlich. Stichprobenartige Eigenkontrollen werden jedoch empfohlen. (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2020)

Bei der „großen“ Klärschlammuntersuchung kommen zusätzlich die Vorgaben nach § 5 Abs. 2 AbfKlärV hinzu, welche unabhängig von der Ausbaugröße und Menge an Trockenmasse mindestens alle zwei Jahre durchgeführt werden müssen. Für kleine Kläranlagen (< 1.000 EW) können wiederholende Untersuchungen nach Erstuntersuchung und Zustimmung der zuständigen Behörde im Einvernehmen mit der landwirtschaftlichen Fachbehörde entfallen (siehe Kapitel 3.3).

Eine Nassschlamm Entsorgung ist für eine ortsnahe Verwertung mit geringen Transportwegen geeignet. Trotz des Wegfalls der Entwässerungskosten ist der Transport- und Aufbringungsaufwand hoch, weshalb die Spannweite der Entsorgungskosten abhängig von den örtlichen Begebenheiten und Anforderungen rd. 11 bis 30 € pro m<sup>3</sup> Nassschlamm beträgt.

#### *Klärschlamm Entsorgung – Kläranlagenverbund (Nassschlamm)*

Sofern eine landwirtschaftliche Nassschlammverwertung nicht möglich ist, ist die Verbringung zu einer benachbarten Kläranlage meist die erste Alternative.

Neben der Entfernung (Transport) ist hierbei die Klärschlammqualität von hoher Relevanz. Bei der Verbringung des nicht vorgereinigten Klärschlammes (fehlender Rechen) auf größere Kläranlagen muss dieser abhängig von der Menge zunächst durch ein Annahmesystem zur Entfernung von Grobverunreinigungen geführt werden. Zudem ist die Zugabe in

den Zulauf der Kläranlage eine weitere Methode. Vorgereinigte Klärschlämme hingegen können direkt in den Primärschlamm-schacht oder in den Schlamm-speicherbehälter hinzu-gegeben werden (siehe Kapitel 6.4 Klärschlammbehandlung und -entsorgung im Verbund).

#### *Klärschlamm-entsorgung nach einer mobilen Klärschlamm-entwässerung*

Für die mobile Entwässerung von Abwasserteichanlagen empfiehlt sich eine Grobstoffentfernung durch einen vorgeschalteten Rechen, wofür ein Stromanschluss benötigt wird. Durch eine Grobstoffentfernung werden weitere Probleme bei der Entwässerung, Entschlammung und weiteren Entsorgung verhindert. Entwässerungsunternehmen verfügen zwar oft über Zerkleinerungsmaschinen für vorhandenes Rechengut, jedoch muss der Klärschlamm mit den enthaltenen Störstoffen pumpfähig sein. Das anfallende Rechengut muss schließlich getrennt entsorgt werden.

Die weitere Verwendung des anfallenden Schlammwassers im Rahmen des Kläranlagenbetriebs muss geklärt werden. Bei ausreichendem Platzbedarf empfiehlt sich ein Schlammwasserspeicher, um die Rückbelastung durch eine reduzierte Zugabe des Schlammwassers über längere Zeit gering zu halten. Bei unzureichenden Lagerflächenkapazitäten muss das Schlammwasser zur weiteren Behandlung in (nahegelegene) größere Kläranlagen transportiert werden, was wiederum zusätzliche Kosten und Abhängigkeiten verursacht.

Daneben muss für die mobile Entwässerung ein Wasseranschluss zur Verfügung stehen, um das Entwässerungsaggregat zu reinigen und für den Betrieb der Polymerdosierstation.

Als Grundvoraussetzung müssen ausreichende Zufahrtsmöglichkeiten bestehen, und im besten Falle befestigte Flächen für das Entwässerungsaggregat und für die Klärschlamm- sowie Schlammwasserzischenspeicherung.

Abhängig von der Klärschlammqualität kann sowohl eine landwirtschaftliche als auch thermische Klärschlamm-entsorgung möglich sein.

#### *Umbau oder Auflassung von Abwasserteichanlagen*

Parallel ist als Alternative die Auflassung von Abwasserteichanlagen zu prüfen, z. B. durch den erstmaligen Bau von Verbundkanälen (Anschluss an größere Kläranlage) oder die bauliche Sanierung/ Ertüchtigung/ Erweiterung der Abwasserteichanlagen (z. B. Umstellung auf Belebtschlammverfahren oder Festbettverfahren), ggf. mit der Nutzung von verfügbaren Fördermaßnahmen.

### **6.3 Belebtschlammverfahren**

#### *Grundverfahren des Belebtschlammverfahrens*

Beim Belebtschlammverfahren erfolgt die biologische Abwasserbehandlung durch aerobe Mikroorganismen unter Luftzufuhr. Der Großteil der kleinen und mittleren Kläranlagen besteht dabei aus einem Belebungsbecken und einem Nachklärbecken. Der anfallende Überschussschlamm wird dabei in einem Schlammstapelbehälter voreingedickt und dient gleichzeitig als Pufferbehälter für die anschließende Entwässerung. Die Entwässerung findet abhängig vom anfallenden Klärschlamm und den Entsorgungsmöglichkeiten meist alle 3 bis 12 Monate statt.

### *Schlammstapelbehälter*

Die Größe des Schlammstapelbehälters (sowie Redundanz) ist ein Faktor, welcher die Entsorgungs- und Betriebssicherheit sowie ökologische Aspekte beeinflusst.

Bei großen Schlammstapelbehältervolumen kann eine Nachstabilisierung des Klärschlammes durch Kaltfaulung erfolgen. Untersuchungen zeigen, dass lange Lagerzeiten zu anaeroben Milieubedingungen führen können, was zu potenziellen Methanemissionen bei der mechanischen Behandlung des Klärschlammes führen kann (beispielsweise durch Rühren, Entwässern, Transport). Dahingegen muss bei kleineren Schlammstapelbehälterkapazitäten eine häufigere Entwässerung stattfinden, wodurch Kläranlagen preisabhängiger von mobilen Entwässerungsunternehmen und dadurch eine geringere Entsorgungssicherheit haben. Um unabhängig von steigenden Preisen zu werden und sich mehrere Entsorgungsmöglichkeiten offen zu halten, könnte im Gegensatz zur mobilen eine stationäre Entwässerung in Betracht gezogen werden.

### *Klärschlamm entwässerung – stationäre versus mobile Entwässerung*

Die Entscheidung ob stationäre oder mobile Entwässerung hängt wiederum von den individuellen Randbedingungen ab, ob u. a. der nötige Flächenbedarf und das Personal zur Verfügung stehen. Bei häufigen mobilen Entwässerungen könnte sich eine stationäre Entwässerung aufgrund steigender Preise als wirtschaftlich rentabel erweisen. Zusätzlich würde die Entwässerung auf die Bedürfnisse des eigenen Klärschlammes angepasst und bietet somit Vorteile hinsichtlich besserer *TR*-Ergebnisse, was wiederum geringere Transport- und Entsorgungskosten zur Folge hat. Jedoch sind als Nachteile die Personalbindung und die hohen Investitionskosten zu nennen, die sich aber nach einer gewissen Amortisationsdauer rechnen können. Ein weiterer Vorteil bietet die stationäre Entwässerung durch die größere Unabhängigkeit, z. B. weil eine mobile Entwässerung aufgrund von örtlichen Gegebenheiten und Witterungsbedingungen nicht ganzjährig möglich ist.

Für kleine bis mittlere Kläranlagen eignen sich bei geringen Durchsätzen vorzugsweise stationäre Schnecken- und Bandfilterpressen, da diese einen geringeren spezifischen Stromverbrauch aufweisen. Der spezifische polymere Flockungsmittelverbrauch liegt dabei im Schnitt etwas geringer als bei Zentrifugen. Bei größeren Durchsätzen empfehlen sich Zentrifugen zur Klärschlamm entwässerung. Neben synthetisch hergestellten polymeren Flockungsmitteln gibt es eine Reihe an alternativen Produkten, welche auf natürlicher Rohstoffbasis beruhen (z. B. chemisch modifizierte Stärke, Kartoffelstärkeether, Chitosan, Guar Gum). Ein Nachteil dieser nativen Flockungshilfsmittel ist die geringe Scherstabilität der gebildeten Flocken und damit einhergehend die unzureichende Entwässerungsleistung. Jedoch können native Flockungshilfsmittel in Zeiten von Rohstoffmangel zu höherer Bedeutung gelangen (DWA-Arbeitsgruppe AK-2 2005).

### *Schlammwasserbehälter*

Generell empfiehlt es sich einen Schlammwasserbehälter mit ausreichend Kapazitäten vorzusehen, um hohe Rückbelastungen im Anlagenbetrieb durch ein intelligentes Schlammwassermanagement zu vermeiden. Daneben kann die Schlammwasserbehandlung im Hauptstrom durch eine Verbesserung der Stickstoffelimination (beispielsweise durch Zugabe externer Kohlenstoffquellen) erfolgen. Daneben existieren weitere Konzepte zur

Schlammwasserbehandlung im Nebenstrom (biologisch, chemisch-physikalisch), welche jedoch für kleine und mittlere Kläranlagen meist aufgrund der komplexen Verfahrenstechnik und dem zusätzlichen Bedarf an Energie sowie Personal nicht wirtschaftlich zu betreiben sind und sich für Kläranlagen erst ab einer  $GK \geq 4$  eignen (DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 2004; Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

### *Klärschlamm-trocknung*

Als weiteres Verfahren zur Erhöhung des *TR*-Gehaltes eignet sich die Klärschlamm-trocknung. Die Entscheidung, ob eine Klärschlamm-trocknung errichtet werden sollte, hängt dabei von den einzelnen Randbedingungen (Flächenbedarf, saisonale Einflüsse, vorhandene Abwärmenutzung etc.) und dem von der thermischen Behandlungsanlage vorgegebenen *TR*-Gehalt ab. Allgemein eignet sich die solare Klärschlamm-trocknung als Verfahren mit geringen spezifischen Energiekosten, jedoch müssen die dazu vorgesehenen Flächen vorhanden sein und bei reiner Solartrocknung lange Trocknungszeiten einbezogen werden. Zusätzlich müssen aufgrund von witterungsabhängigen Bedingungen schwankende *TR*-Ergebnisse berücksichtigt und damit die möglichen Entsorgungswege abgeklärt werden. Eine Möglichkeit zur weiteren Klärschlammbehandlung und -entsorgung bietet die Zusammenarbeit mehrerer Kommunen bzw. Unternehmen im Verbund (siehe Kapitel 6.4).

### *Klärschlamm-entsorgung*

Die abschließende Klärschlamm-entsorgung kann über mehrere Entsorgungswege erfolgen. Grundsätzlich existieren verschiedene Entsorgungsmöglichkeiten (thermisch, landwirtschaftlich, landschaftsbaulich). In Bayern wird der überwiegende Anteil des anfallenden Klärschlammes thermisch behandelt (siehe Kapitel 2.2.2). Neben den anfallenden Klärschlamm-mengen werden die möglichen Entsorgungswege durch die Qualität des Klärschlammes beeinflusst. Dabei sollten neben gesetzlichen sowie ökonomischen auch die ökologischen Aspekte berücksichtigt werden (siehe Kapitel 5.5).

## **6.4 Klärschlammbehandlung und -entsorgung im Verbund**

### **6.4.1 Konzept einer interkommunalen Zusammenarbeit**

Für kleine und mittlere Kläranlagen kann eine Klärschlammbehandlung und -entsorgung im Rahmen einer interkommunalen Zusammenarbeit von hoher Bedeutung sein, vgl. (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

Durch den Aufbau eines regionalen Entsorgungskonzepts mit einer gemeinsamen Klärschlammbehandlung und -verwertung, können Entwässerungs- und Betriebskosten gesenkt sowie die Betriebssicherheit durch den Wegfall der Schlammwasserrückbelastung gesteigert werden. Daneben müssten fehlende Strom- und Wasseranschlüsse auf Abwasserteichanlagen zur Grobstoffentfernung ggf. nicht nachgerüstet werden, falls eine Fremdschlammannahme mit Rechengut / Sand auf einer größeren Kläranlage möglich ist, unter Berücksichtigung der Entfernung der Kläranlagen.

Eine vereinfachte Darstellung eines möglichen Aufbaus eines solchen Entsorgungskonzeptes zeigt Abbildung 53. In dem vereinfachten Entsorgungskonzept bringen beispielsweise Abwasserteichanlagen ( $GK < 1$ ) den anfallenden Klärschlamm zur nächstgrößeren Kläranlage ( $GK > 2$ ), welche diesen entwässern und bei ausreichenden Kapazitäten das



Schlammwasser in die Abwasserbehandlung zurückführen kann. Daneben besteht die Möglichkeit den nassen Fremdschlamm über Annahmestationen aufzunehmen und bei vorhandenem Rechengut-/ Sandfang in den Zulauf der Kläranlage zu geben. Das kann zu einem zusätzlichen Vorteil bei der Energiegewinnung durch anaerobe Schlammstabilisierung führen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

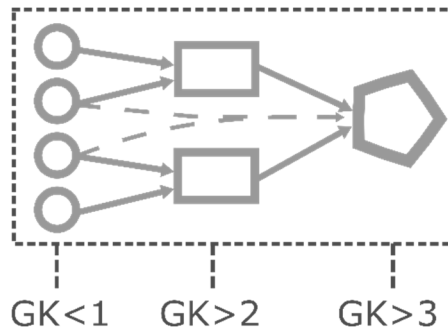


Abbildung 53: Vereinfachte Darstellung eines möglichen Aufbaus für ein gemeinsames Entsorgungskonzept zur Klärschlammbehandlung und -entsorgung.

Zur weiteren Schlammbehandlung (Trocknung und thermische Behandlung) kann der entwässerte Klärschlamm zu einer Kläranlage gebracht werden, welche eine thermische Behandlung betreibt. Bei lokal nahegelegenen größeren Kläranlagen könnten auch kleinere Kläranlagen den Nassschlamm direkt zur thermischen Behandlung inkl. Trocknung transportieren (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019). Bei diesen Entsorgungskonzepten ist der logistische Aufwand höher und daher müssen gemeinsame Grundvoraussetzungen für die Entsorgung und Annahme von Klärschlamm geschaffen werden.

#### 6.4.2 Verfahrenstechnische Aspekte für eine Fremdschlammannahme

Grundlegend ist im Vorhinein zu klären, welche Schlammengen mit welcher Qualität (beispielsweise mit oder ohne Rechengut/ Sand, Stabilisierungsgrad etc.) anfallen und ob die benötigten Zufahrtsmöglichkeiten zum Schlammtransport bestehen. Schließlich muss abgestimmt werden, ob die potenziellen Kläranlagen, welche den Klärschlamm annehmen, über die nötigen Kapazitäten zur Abwasser- und Schlammbehandlung verfügen (u.a. Schlammstapel-, Schlammwasser-, Entwässerungs-, Lagerkapazitäten). Gleiches ist bei der thermischen Behandlung zu berücksichtigen, wobei ebenfalls die Platzkapazitäten, Zufahrtsmöglichkeiten sowie die Betreiber der thermischen Behandlungsanlage (Kläranlage, Fremdunternehmen) zu klären sind (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

Weiterhin besteht die Möglichkeit einer gemeinsamen mobilen bzw. stationären Schlammmentwässerung durch einen beauftragten Verantwortlichen, welcher zu gegebenen Zeitpunkten die Entwässerung bei der jeweiligen Kläranlage durchführt. In diesem Fall müssen ebenfalls die Randbedingungen (Speicherkapazitäten, mögliche Rückbelastungen usw.) im Vorfeld abgeklärt werden.



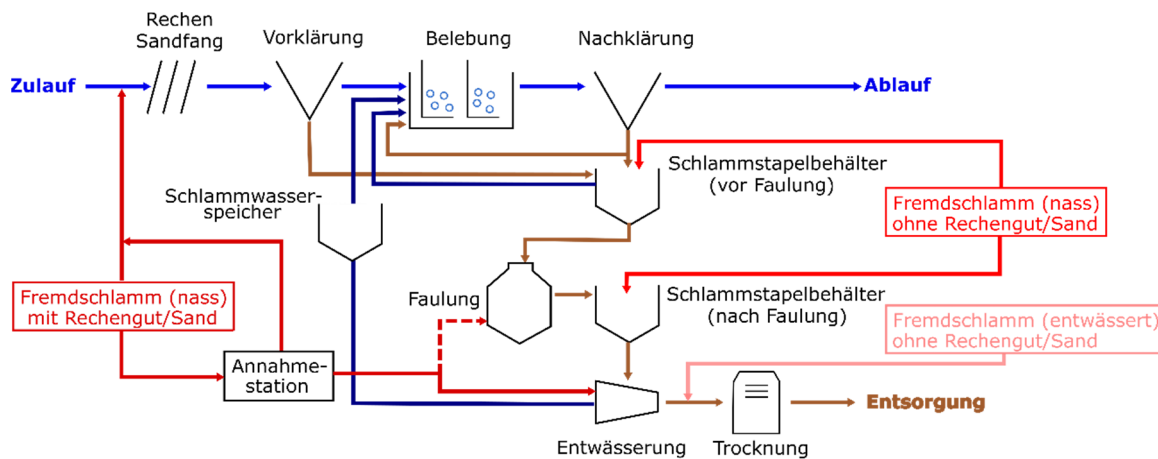


Abbildung 54: Annahmemöglichkeiten von Fremdschlämmen bei einer zentralen Entsorgung von Klärschlämmen in Abhängigkeit der Schlammqualität.

Bei einer Kläranlage mit anaerober Schlammstabilisierung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, Fremdschlämme mit unterschiedlichen Qualitäten anzunehmen (siehe Abbildung 54). Bei nassen Fremdschlämmen mit enthaltenem Rechengut und Sand (v. a. bei Abwasserteichanlagen) kann die annehmende Kläranlage diese direkt in den Zulauf oder durch eine Annahmestation führen. Bei der Annahmestation werden die Fremdschlämme von Rechengut befreit, wobei ein hoher mineralischer Anteil aufgrund der noch vorhandenen Sandfraktion im Klärschlamm verbleibt. Diese Schlämme können aus diesem Grund meist nicht direkt in die Faulung hinzugeführt werden.

Aufgrund des Sandanteils können zudem Ablagerungen im Faulbehälter entstehen, welche das Faulbehältervolumen reduzieren. Soweit Fremdschlämme nicht einer Faulung zugegeben werden können, kann bei vorhandenen Kapazitäten auch eine Zugabe in den Zulauf einer Kläranlage in Betracht gezogen werden. Generell kann die Zugabe von Fremdschlämmen in den Zulauf einer Kläranlage bei fehlenden Kapazitäten in einer Überlastung der Biologie münden, weshalb von einer Annahme von Fremdschlämmen bei kleinen bis mittleren Kläranlagen abzuraten ist. Als weitere Möglichkeiten bietet sich die nasse Fremdschlammannahme direkt in den Primärschlammstapel bzw. direkt in den Schlammstapelbehälter an. Bereits entwässerte Klärschlämme können direkt zur thermischen Behandlung oder ggf. einer Trocknung verbracht werden.

### 6.4.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Bei der gemeinsamen Behandlung von Klärschlämmen verschiedener Kläranlagen ist zwingend darauf zu achten, dass die Vermischung der Klärschlämme vor der Durchführung von Phosphorrückgewinnungsverfahren nur zulässig ist, sofern die zugeführten Fremdschlämme einen Phosphor-Gehalt von mehr als 20 g P/kg *TM* aufweisen (TransMIT GmbH 2021). Die Vermischung darf schließlich erst nach Abschluss eines Vertrags (mit Nennung des Verantwortlichen zur Phosphorrückgewinnung) zwischen den beteiligten Klärschlammherzeugern erfolgen. Eine Kopie des Vertrages muss der zuständigen Behörde auf Verlangen vorgelegt werden (§ 3a Abs. 2 AbfKlärV).

Zusätzlich ist eine Abgabe des Klärschlammes nur zulässig, wenn die Untersuchungen nach § 5 Abs. 1 und 2 AbfKlärV ergeben, dass die Grenzwerte nach Anlage 2 Tabelle 1.4 Spalte 4 der Düngemittelverordnung sowie zusätzliche Grenzwerte nach Anlage 1 AbfKlärV nicht überschritten werden (siehe Darstellungen und Tabellen in Kapitel 3) (§ 8 Abs. 1 und 2 AbfKlärV). Das Vermischungsverbot nach § 15 Abs. 3 AbfKlärV bezieht sich dabei ausschließlich auf die Abgabe von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost mit dem Zweck der nachfolgenden Verwertung auf und in Böden (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019). Das Vermischungsverbot besagt, dass die Abgabe und das Auf- oder Einbringen eines Klärschlammes, der mit Klärschlämmen aus Abwasserbehandlungsanlagen mit einer Genehmigungsgröße ab 1.000 EW vermischt wurde nur zulässig ist, wenn es sich um Klärschlämme aus Abwasserbehandlungsanlagen desselben Klärschlammherzeugers handelt und die Klärschlämme die Anforderungen der klärschlammbezogenen Grenzwerte (§ 8 Abs. 1 und 2 Satz 1 AbfKlärV) sowie der Anforderungen an die Seuchen- und die Phytohygiene (§ 11 AbfKlärV) vor der Vermischung erfüllen (§ 15 AbfKlärV).

### 6.4.4 Wege einer interkommunalen Zusammenarbeit

Bei der Entscheidung zur interkommunalen Zusammenarbeit müssen die fachlichen Interessen mit gesetzlichen, ökonomischen und ökologischen Aspekten abgeglichen und die Möglichkeiten einer staatlichen Förderung abgeschätzt werden. Daneben stellen sich die Fragen, welche vertragliche Grundlage besteht (beispielsweise Zweckverband, -vereinbarung), welche Rechtsform geeignet ist und ob private Dritte beteiligt werden sollen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

Zunächst müssen die Aufgaben im Verbund den jeweiligen Verantwortlichen zugewiesen und die Kostenaufteilung abgestimmt werden. Dazu gehören u. a. die Bereitstellung sowie die Vorhaltung mobiler Entwässerungsaggregate, die Klärung der Transportwege der beteiligten Gemeinden zur thermischen Klärschlammbehandlung und welche Unternehmen dafür verantwortlich sind, Errichtung, Betrieb und Unterhaltung einer Klärschlamm-trocknungsanlage sowie die Klärung der Entsorgungswege, ggf. durch Überlassung an abfallrechtlich entsorgungspflichtige Körperschaften. Daneben muss an der zentralen Kläranlage ein Konzept zur Phosphorrückgewinnung vorhanden sein. Dabei sind haushaltsrechtliche Gebote der Sparsamkeit und Wirtschaftlichkeit zu beachten (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

Für eine interkommunale Zusammenarbeit stehen verschiedene Wege offen, welche im Rahmen einer vertraglichen Vereinbarung der Gemeinden, der Gründung von Zweckverbänden, gemeinsam gemeindlichen Unternehmen oder der Erweiterung des Aufgabenbereichs bestehender Zweckverbände stattfinden. Bei einer Zweckvereinbarung werden einzelne oder alle mit einem bestimmten Zweck zusammenhängenden Aufgaben übertragen. Dabei können auch gemeinschaftliche Einrichtungen geschaffen und betrieben werden, unter Beteiligung von Gemeinden, Zweckverbänden und Kommunalunternehmen. Bei einem Zweckverband (Körperschaft des öffentlichen Rechts) können Gemeinden, andere Zweckverbände oder (gemeinsame) Kommunalunternehmen sowie unter bestimmten Voraussetzungen auch private Personen Mitglieder sein. Im Zweckverband können einzelne oder alle mit einem bestimmten Zweck zusammenhängenden Aufgaben mit den zugehörigen Hoheitsrechten zur eigenverantwortlichen Wahrnehmung übertragen werden. Eine weitere Rechtsform bildet das gemeinsame Kommunalunternehmen (Anstalt des öffentlichen Rechts mit eigener Rechtspersönlichkeit) mit dem Vorteil, dass die Steuerung des Unternehmens nach ihren Bedürfnissen flexibel in der Unternehmenssatzung geregelt werden kann. Neben den genannten Rechtsformen existieren mehrere Privatrechtsformen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Abwasserbehandlung anfallender Klärschlamm stellt eine Nähr- und Schadstoffsenke für verschiedenste Stoffe dar. Nicht zuletzt haben sich die Verwertungswege aufgrund der novellierten Klärschlammverordnung (AbfKlärV) von der landwirtschaftlichen Verwertung hin zur thermischen Behandlung geändert. Kleine und mittlere Kläranlagen der GK 1 bis 3 besitzen trotz der aufgetretenen Veränderungen jedoch die Option der landwirtschaftlichen Verwertung, unter Vorgabe von entsprechenden Untersuchungspflichten und -häufigkeiten. Gerade die bayerische Kläranlagenstruktur, welche durch eine Vielzahl von kleinen ländlichen Kläranlagen geprägt ist (GK 1; rd. 45 % aller bayerischen Kläranlagen), kann die anfallenden Klärschlämme unter gewissen Vorgaben weiterhin landwirtschaftlich verwerten.

Dieser Abschlussbericht soll insbesondere Kläranlagenbetreibern, Planern und Kommunen Informationen und Kriterien zur Unterstützung des Betriebs und zur Erstellung von Konzepten einer nachhaltigen und gesicherten Klärschlammentsorgung liefern. Dabei dient dieser Abschlussbericht als Grundlage für den Leitfaden „*Klärschlammbehandlung auf kleinen und mittleren Kläranlagen*“.

Vor der Klärschlammentsorgung erfolgt auf den Kläranlagen meist eine Vorbehandlung der Schlämme in Form einer Entwässerung, um das anhaftende Schlammwasser vom Feststoff weitestgehend abzutrennen. Daraus ergeben sich zwei Erzeugnisse (Schlammwasser und entwässerter Klärschlamm), welche eine separate Betrachtung benötigen.

Das **Schlammwasser** wird i. d. R. der Kläranlage im Hauptstrom wieder zugeführt, welche aufgrund der enthaltenen Konzentrationen zu einer Rückbelastung auf der Kläranlage führt. Um die bei der Entwässerung im Schlammwasser enthaltenen Konzentrationen zu ermitteln, wurden im Zeitraum von Oktober 2021 bis Mai 2022 an 15 bayerischen Kläranlagen zwei Messprogramme durchgeführt. Die untersuchten Kläranlagen entwässern die Schlämme überwiegend mit mobilen Zentrifugen, wobei auch Kammerfilterpressen und Schneckenpressen zum Einsatz kommen. Die Ergebnisse zeigen bei allen Kläranlagen eine Leitfähigkeit von  $> 2,0$  mS/cm im Schlammwasser. Bei schlechten Entwässerungsergebnissen wurden hohe AFS-Konzentrationen im Schlammwasser analysiert, welche zu steigenden  $CSB_{ges}$ -Konzentrationen führen. Die Stickstoffbelastung besteht überwiegend aus Ammonium-Stickstoff (rd. 93 bis 99 % vom TKN). Bei allen untersuchten Kläranlagen wurde eine Konzentration  $c > 100$  mg/L  $NH_4$ -N analysiert. Die Konzentrationen von  $NO_3$ -N und  $NO_2$ -N ist vernachlässigbar gering. Schlechte Entwässerungsergebnisse führen aufgrund des erheblichen Stickstoffanteils in der Schlammflocke zu steigenden  $NH_4$ -N-Konzentrationen. Gleiche Abhängigkeiten können beim Phosphor beobachtet werden. Daneben begünstigen lange Lagerzeiten im Schlammstapelbehälter die Hydrolyse von Schlamm, welche ebenfalls zu steigenden  $NH_4$ -N-Konzentrationen im Schlammwasser führt. Bezogen auf die spezifische Stickstofffracht im Zulauf der Kläranlage kann die Stickstoffrückbelastung rd. 2 bis 9 % betragen (bei einer kontinuierlichen Rückführung).

Der zu entsorgende **Klärschlamm** muss bei einer bodenbezogenen Verwertung abhängig von den Vorgaben der AbfKlärV in regelmäßigen Abständen untersucht werden. Die Unterscheidung der klärschlammbezogenen Untersuchungspflichten erfolgt in der AbfKlärV nach der Ausbaugröße und der jährlich bodenbezogen verwerteten Klärschlamm-Trockenmasse. Während bei der „kleinen“ Untersuchung Parameter wie z. B. Schwermetalle, pH-Wert und Phosphor analysiert werden, bezieht sich die „große“ Untersuchung auf organische Schadstoffe. Die Analysekosten belaufen sich auf rd. 1.050 € bis 1.350 € inkl. empfohlener Parameter aus der Düngemittelverordnung (DüMV), welche beim Inverkehrbringen von Klärschlamm berücksichtigt werden müssen. Die Analysekosten für die thermische Behandlung können mit rd. 880 € bis 1.740 € abgeschätzt werden, wobei die Betreiber der Klärschlammverbrennung die zu untersuchenden Analyseparameter individuell bestimmen.

Für die Klärschlamm Entsorgung stehen grundsätzlich vier geeignete Möglichkeiten zur Verfügung (landwirtschaftlich, landschaftsbaulich/Rekultivierung, thermisch oder durch interkommunale Zusammenarbeit), welche abhängig von den gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie technischen, betrieblichen, ökonomischen und ökologischen Aspekten eingeordnet werden müssen. Anhand von fünf Varianten zur Abwasserbehandlung wurden die Abhängigkeiten bspw. der benötigte Schlammstapel-/ Schlammwasserkapazitäten, Entwässerungsparameter und Einflüsse auf den Betrieb aufgezeigt und diskutiert. Grundsätzlich wird empfohlen ein intelligentes Schlammwassermanagement zu betreiben, um eine Rückbelastung zu minimieren. Gerade bei mobilen diskontinuierlichen Entwässerungen fallen anhand der großen Schlammstapelbehälter größere Mengen an Schlammwasser an. Geeignete Behälter für Schlammwasser benötigen bei der mobilen Entwässerung entsprechenden Platz. Im Gegensatz dazu werden bei der stationären Entwässerung und einem kontinuierlichen Betrieb kleinere Schlammstapel- und Schlammwasserbehälter benötigt. Dadurch steigt die Unabhängigkeit für die Klärschlamm Entsorgung auf der Kläranlage, jedoch unter Berücksichtigung eines steigenden Personalaufwandes.

Auf Grundlage einer Kostenvergleichsrechnung (Bezugsjahr: 2021) wurden drei Varianten (landwirtschaftliche Verwertung, mobile Schlamm entwässerung inkl. Entsorgung und stationäre Schlamm entwässerung inkl. Entsorgung) in Abhängigkeit des Schlamm anfalles verglichen und anhand von Investitions- und Betriebskostenabschätzungen bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine landwirtschaftliche Verwertung bei den vorgegebenen örtlichen Rahmenbedingungen und einer einfachen Entnahme des Schlammes die wirtschaftlichste Variante ist. Eine stationäre wird im Vergleich zur mobilen Schlamm entwässerung nach den vorgenommenen Annahmen und Schätzungen ab rd. 9.000 EW wirtschaftlich. Jedoch ist zu beachten, dass diese Grenze nur als grobe Orientierung dienen und, abhängig von den individuellen Randbedingungen und Planungen, im Einzelfall anders ausfallen kann.

Auf Grundlage der dargestellten Abhängigkeiten und möglichen Varianten empfiehlt sich eine Grundlagenermittlung anhand einer **Checkliste** durchzuführen. Durch diese Checkliste sollen fünf Unterpunkte geklärt werden, mit welchen jährlichen Klärschlamm mängen und -qualitäten gerechnet wird, ob ausreichender Flächenbedarf zur Verfügung steht mit welcher Untergrundbeschaffenheit, ob ein Strom- und Wasseranschluss vorliegt sowie ggf. bereits Lagerkapazitäten zur Verfügung stehen. Das Ziel dieser Checkliste ist es die Grundvoraussetzungen für das weitere Vorgehen der Klärschlammbehandlung und -entsorgung zu treffen.

Bei **unbelüfteten Abwasserteichanlagen** wird empfohlen, Rechenanlagen zur Entfernung von Grobstoffen und ggf. die Einbindung eines Sandfanges zur Abscheidung von Sand zu integrieren. Dadurch können Klärschlamm Entsorgungskosten minimiert und die Entsorgungssicherheit gesteigert werden. Grundvoraussetzung hierfür sind verfügbare technische Infrastrukturen wie Strom, Wasser und ggf. ein befestigter Stellplatz. Die Schlammstapelzeiten sollten dabei nach den zeitlichen Erfordernissen der Landwirte gerichtet werden. Für ortsnahe Anwendungen eignet sich die Nassschlammverwertung bei vorheriger Entfernung von nicht verrotteten Bestandteilen und Grobstoffen. Dennoch ist die Spannweite bei den Entsorgungskosten aufgrund des Transport- und Aufbringungsaufwandes hoch. Als eine weitere Möglichkeit eignet sich (soweit vorhanden) die gemeindeinterne Abgabe an eine größere Kläranlage. Als dritte sinnvolle Option bietet sich die Abgabe des Klärschlammes im Rahmen einer interkommunalen Zusammenarbeit mit mehreren Kläranlagenbetreibern an, jedoch ergeben sich die Möglichkeiten der Klärschlammannahme auch nach der Menge und Qualität der Schlämme.

Stehen bei Abwasserteichanlagen größere bauliche Maßnahmen an ist ggf. zu prüfen, ob eine Auflassung von Abwasserteichanlagen mit der Nutzung von bestehenden Fördermaßnahmen (RZWas) relevant sein kann, z. B. durch den erstmaligen Bau von Verbundkanälen (Anschluss an größere Kläranlage).

Bei **Belebtschlammverfahren** ist die Speicherkapazität des Schlammstapelbehälters ein entscheidender Faktor für die Entsorgungs- und Betriebssicherheit und beeinflusst die ökologische Bewertung. Lange Lagerzeiten aufgrund von großen Schlammstapelbehältern begünstigen anaerobe Milieubedingungen und können zu potenziellen Methanemissionen bei der mechanischen Klärschlammbehandlung (Rühren, Entwässerung, Transport etc.) führen. Im Gegensatz dazu steigt bei kleinen Schlammstapelbehältern die Abhängigkeit bezüglich des Preises und der Entsorgungssicherheit. Im Hinblick auf die Entsorgungssicherheit können im Gegensatz zur mobilen eine stationäre Schlammmentwässerung als sinnvoll erachtet werden, diese wiederum von individuellen Randbedingungen (Flächenbedarf, Personal etc.) abhängt. Durch eine stationäre Schlammmentwässerung können Lagerkapazitäten (sowohl für den Schlammstapelbehälter als auch den Schlammwasserbehälter) deutlich reduziert werden, wodurch sich Vorteile hinsichtlich der Investitionen sowie der vergleichsweise geringeren Rückbelastung durch den kontinuierlichen Betrieb ergeben können. Maßgeblich entscheidet die Speicherkapazität eines Schlammwasserbehälters über die Betriebsstabilität der Abwasserbehandlung, welcher aufgrund eines intelligenten Schlammwassermanagements generell zu empfehlen ist.

Die Möglichkeit einer Klärschlamm Trocknung am eigenen Standort hängt von den individuellen Randbedingungen (Flächenbedarf, saisonale Einflüsse, vorhandene Abwärme etc.) ab, wobei die solare Klärschlamm Trocknung aufgrund der geringen spezifischen Energiekosten im Vergleich zu anderen thermischen Trocknungsverfahren zu empfehlen ist.

Die thermische Behandlung von Klärschlamm ist mit entwässertem Klärschlamm möglich. Die Notwendigkeit einer Klärschlamm Trocknung ergibt sich ggf. nur für spezielle thermische Entsorgungswege. Inwieweit sich der zusätzliche Aufwand einer Klärschlamm Trocknung wirtschaftlich rechnet ist daher im Einzelfall kritisch zu prüfen.

Daneben bietet sich die Möglichkeit an, durch interkommunales Zusammenarbeiten eine weitergehende Klärschlammbehandlung durchzuführen.



## Literaturverzeichnis

DIN EN 1085:2007-05, 2007: Abwasserbehandlung - Wörterbuch; Dreisprachige Fassung EN 1085:2007.

Agrolab Group (2019): Informationen zur Klärschlammverordnung (AbfKlärV), Düngerverordnung (DüV) und Düngemittelverordnung (DüMV). Online verfügbar unter <https://www.agrolab.com/de/service/download/dokumente-suche/141-de-information-neue-abfklerv2017/file.html>, zuletzt geprüft am 18.01.2022.

ATV-DVWK-A 198 (2003): ATV-DVWK-Regelwerk. Hennef: Ges. zur Förderung d. Abwassertechnik.

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (2021): Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, LfL-Information. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising-Weihenstephan.

Bayerische Staatsregierung (2014): Verordnung über den Abfallwirtschaftsplan Bayern. AbfPV. Fundstelle: <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayAbfPV>true>.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2019): Klärschlamm Entsorgung in Bayern. Planungshilfe für Kommunen ; [Abfall]. Unter Mitarbeit von Dieter Tronecker, Andreas Happach, Juliane Thimet, Andreas Gaß und Arnold Rupprich. Stand: Mai 2019. Augsburg: LfU.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021): Sonderauswertung zur Abfallbilanz 2020. Klärschlamm. Hg. v. LfU. LfU.

Boller, R.; Strunkheide, J.; Witte, H. (Hg.) (2002): Betrieb und Wartung von Kleinkläranlagen. Ein Praxis-Handbuch für Betreiber, Wartungsbetriebe und Behörden. Gemeinnütziges Institut Wasser und Boden. München: Hirthammer.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2020): Vollzugshinweise zur Umsetzung der Klärschlammverordnung. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; Bundesministerium der Finanzen (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Düngerverordnung (DüV), vom 26.05.2017. Online verfügbar unter [https://www.gesetze-im-internet.de/d\\_v\\_2017/](https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/), zuletzt geprüft am 31.01.2022.

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Düngemittelverordnung (DüMV), vom 05.12.2012. Online verfügbar unter [https://www.gesetze-im-internet.de/d\\_mv\\_2012/D%C3%BCMV.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/D%C3%BCMV.pdf), zuletzt geprüft am 31.01.2022.

Bundesregierung (1997): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer. Abwasserverordnung (AbwV), vom 21.03.1997. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/abwv/>, zuletzt geprüft am 31.01.2022.

- Bundesregierung (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. BBodSchV.
- Bundesregierung (2017): Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost. Klärschlammverordnung - AbfKlärV, vom 27.09.2017. Online verfügbar unter [https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl\\_rv\\_2017/BJNR346510017.html](https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/BJNR346510017.html), zuletzt geprüft am 31.01.2022.
- Bux, Markus; Baumann, Rainer; Pinnekamp, Johannes; Quadt, Stephan; Mühlbauer, Werner (2002): Solare Trocknung von Flüssigschlamm in kleinen Kläranlagen. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 49 (3), S. 341–344.
- DIN EN 12879:2001-02, 2001: Charakterisierung von Schlämmen - Bestimmung des Glühverlustes der Trockenmasse; Deutsche Fassung EN 12879:2000.
- DIN EN 12880:2001-02, 2001: Charakterisierung von Schlämmen - Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts; Deutsche Fassung EN 12880:2000.
- Cunninham, Michael; Fink, Andrin; Baier, Urs (2015): Methanemissionen auf Kläranlagen. In: *Aqua & Gas* (3), S. 60–62.
- Daelman, Matthijs R. J.; van Voorthuizen, Ellen M.; van Dongen, Udo G. J. M.; Volcke, Eveline I. P.; van Loosdrecht, Mark C. M. (2012): Methane emission during municipal wastewater treatment. In: *Water Research* 46 (11), S. 3657–3670. DOI: 10.1016/j.watres.2012.04.024.
- DIN 38409-2:1987-03, 1987: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe und des Glührückstandes (H 2).
- DIN 19682-2 (2014): Bestimmung der Bodenart. Deutsches Institut für Normung. Berlin (Deutsche Norm, DIN 19682-2).
- Drescher, D.; Kapp, H. (1994): Restgasentwicklung von Klärschlämmen. In: *Korrespondenz Abwasser* 41 (8), S. 1282–1289.
- DWA Arbeitsgruppe AK-13.4 (2010): Leitfaden zur Klärschlammentsorgung. Hg. v. DWA. DWA.
- DWA KVR-Leitlinien (2012): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). Hennef: DWA.
- DWA-A 131 (2016): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Juni 2016. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Arbeitsblatt, A 131).
- DWA-A 201 (2005): DWA-Regelwerk. Hennef: DWA.
- DWA-A 226 (2009): Arbeitsblatt DWA-A 226, Grundsätze für die Abwasserbehandlung in Belebungsanlagen mit gemeinsamer aerober Schlammstabilisierung ab 1.000 Einwohnerwerte. Entwurf. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk. Arbeitsblatt).
- DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 (2000): Rückbelastung aus der Schlammbehandlung. Menge und Beschaffenheit der Rückläufe. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 47 (8), S. 1181–1187.

- DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 (2004): Rückbelastung aus der Schlammbehandlung. Verfahren zur Schlammwasserbehandlung, S. 1–23.
- DWA-Arbeitsgruppe AK-2 (2005): Einsatz von polymeren Flockungshilfsmitteln in der Klärschlammbehandlung vor dem Hintergrund der neuen Düngemittelverordnung vom 26. November 2003. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 52 (1), S. 68–73.
- DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5 (2018): Auswirkungen der neuen Klärschlammverordnung auf die Klärschlamm Entsorgung. Erster Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 65 (8), S. 703–709.
- DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5 (2019): Technische Hinweise zu bewährten Behandlungsverfahren für Klärschlamm. Dritter Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 66 (3), S. 210–218.
- DWA-M 366 (2013): Maschinelle Schlammmentwässerung. Februar 2013. Hennef (Sieg): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Merkblatt, M 366).
- DWA-M 368 (2014): Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Juni 2014. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, M 368).
- DWA-M 379 (2021): Klärschlamm Trocknung. 1. Auflage. Hennef, Deutschland: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V (DWA-Regelwerk, M 379).
- DWA-M 383 (2019): Kennwerte der Klärschlammmentwässerung. 1. Auflage. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, M 383).
- DWA-M 384 GD (2021): Bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen - Rechtliche Rahmenbedingungen und ihre Umsetzung in der Praxis (Entwurf). Entwurf August 2021, 1. Auflage. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, M 384).
- Fehrenbach, H. (2006): Ökologische Bewertung der Klärschlamm Entsorgung. Aktualisierung und Erweiterung bisheriger Studien. Symposium zur Klärschlamm Entsorgung. Aachen, 2006.
- Heindl, Albert; Dobslaw, Daniel (2022): Methan bei der Lagerung und Trocknung von entwässertem Klärschlamm. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 69 (5), S. 415–425.
- Hilliges, R.; Kinshofer, J. (2016): Anforderungen an die Schlammstabilisierung auf Kläranlagen. Online verfügbar unter <https://www.hs-augsburg.de/Binaries/Binary15262/LfU-Schlamm-Schlussbericht-Langfassung-.pdf>, zuletzt geprüft am 08.02.2022.
- Hilmer, Ralf (2019): Aktuelle Herausforderungen für die Betreiber von Abwasseranlagen in Schleswig - Holstein. Nachhaltige Wasserwirtschaft in Schleswig-Holstein. DWA. DWA. Neumünster, 11.09.2019.
- IPCC (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In: *IGES* (5).
- LfU (Hg.) (2021): Umsetzung der EG-Kommunalabwasserrichtlinie in Bayern. Lagebericht. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Gewässerschutz).

- LfU Sachsen-Anhalt (2006): Abwasserteichanlagen zur kommunalen Abwasserreinigung. Hinweise zu Planung, Bau, Betrieb und Optimierung. Hg. v. Landesamt für Umwelt Sachsen-Anhalt. LfU Sachsen-Anhalt (2/2006).
- Loy, Simone; Seyler, Friedrich (2011): Abwasserbehandlung bei Einzelanwesen. Hinweise zur Planung und zum Bau, zum Betrieb und zur Überwachung von Kleinkläranlagen. Stand: November 2011. Augsburg: LfU (UmweltThema).
- Merkel, Wolfgang (Hg.) (2010): Siedlungswasserwirtschaft im ländlichen Raum. Skript. Weiterbildender Studiengang Wasser und Umwelt; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. 2. Aufl., März 2010. Weimar: Univ.-Verl.
- Müller, E. A.; Bauhammer, C.; Etter, H.; Ambühl, S.; Levy, G. A. (2021): Methanschluß-Reduktion. In: *Aqua & Gas* (6), S. 80–84.
- Noyola, A.; Paredes, M. G.; Güereca, L. P.; Molina, L. T.; Zavala, M. (2018): Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review. In: *The Science of the total environment* 639, S. 84–91. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.111.
- Otte-Witte, Rolf (2019): Transportlogistik. Zwischenspeicherung, Verladung, Transport, Annahme. DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5. DWA. Würzburg, 21.05.2019.
- Parravicini, Vanessa; Svardal, Karl; Krampe, Jörg (2016): Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants. In: *Energy Procedia* 97, S. 246–253. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.067.
- Reuß, Manfred; Hainzmeier, Franz (1998): Solare Trocknung von Nassschlamm. 22–23 Seiten / LANDTECHNIK, Bd. 53 Nr. 1 (1998). DOI: 10.15150/LT.1998.2453.
- Roskosch, Andrea; Heidecke, Patric (2018): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. vollständig überarbeitete Auflage, Stand: Oktober 2018. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Für Mensch und Umwelt).
- Schaum, C.; Fundneider, T.; Cornel, P. (2016): Analysis of methane emissions from digested sludge. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 73 (7), S. 1599–1607. DOI: 10.2166/wst.2015.644.
- Schaum, Christian; Schröder, Lutz; Fehrenbach, Horst; Reinhard, Joachim; Cornel, Peter; Kristeller, Werner et al. (2010): Klärschlammfäulung und -verbrennung: das Behandlungskonzept der Zukunft? Ergebnisse einer Grundsatzstudie zum Stand der Klärschlammbehandlung. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 57 (3), S. 252–258.
- Schaum, Christian A.; Hubert, Christian; Steiniger, Bettina; Steinle, Eberhard; Athanasiadis, Konstantinos (2020): Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung. Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU). Unter Mitarbeit von Karla Mix-Spagl und Stefan Bleisteiner. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München Institut für Wasserwesen (Mitteilungen / Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, Nr. 130 (2020)). Online verfügbar unter <https://edocs.tib.eu/files/e01fn21/176409347X.pdf>.

Schaum, Christian A.; Lux, Josef (Hg.) (2011): Entwässerung und Trocknung von Klärschlamm. 2. Aufl. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Waste Management, Recycling, Composting, Fermentation, Mechanical-Biological Treatment, Energy Recovery from Waste, Sewage Sludge Treatment).

Siebold, Daniel (Hg.) (2018): Rechtliche Rahmenbedingungen der Klärschlamm Entsorgung. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. Online verfügbar unter [https://www.vivis.de/wp-content/uploads/VvK/2018\\_VvK\\_031-044\\_Siebold](https://www.vivis.de/wp-content/uploads/VvK/2018_VvK_031-044_Siebold).

Statistisches Bundesamt (2020): Klärschlamm Entsorgung nach Bundesländern. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klarschlammverwertungsart.html>, zuletzt aktualisiert am 10.12.2021, zuletzt geprüft am 15.12.2021.

TransMIT GmbH (2021): Machbarkeitsstudie Klärschlammverwertung und Phosphorrecycling für die Region Nord-Ost-Hessen (RePhoNOH). Unter Mitarbeit von TransMIT GmbH. Hg. v. Kassel Wasser.

Umweltbundesamt (Hg.) (2022): Erarbeitung anspruchsvoller Standards für die mittelfristige Fortführung der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlämmen aus Abwasserbehandlungsanlagen mit kleiner Ausbaugröße. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Umwelt & Gesundheit, 03).

DIN ISO 15705:2003-01, 2003: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfs (ST-CSB) - Küvettentest (ISO 15705:2002).

DIN EN ISO 13395:1996-12, 1996: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Nitritstickstoff, Nitratstickstoff und der Summe von beiden mit der Fließanalytik (CFA und FIA) und spektrometrischer Detektion (ISO 13395:1996); Deutsche Fassung EN ISO 13395:1996.

DIN EN ISO 15681-2:2019-05, 2019: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Orthophosphat und Gesamtposphor mittels Fließanalytik (FIA und CFA) - Teil 2: Verfahren mittels kontinuierlicher Durchflussanalyse (CFA) (ISO 15681-2:2018); Deutsche Fassung EN ISO 15681-2:2018.

DIN EN 25663:1993-11, 1993: Wasserbeschaffenheit; Bestimmung des Kjeldahl-Stickstoffs; Verfahren nach Aufschluß mit Selen (ISO 5663:1984); Deutsche Fassung EN 25663:1993.

ISO 5664:1984-05, 1984: Wasserbeschaffenheit; Bestimmung von Ammonium: Destillations- und Titrationsverfahren.

Weber, Collin J.; Santowski, Alexander; Chiffard, Peter (2022): Investigating the dispersal of macro- and microplastics on agricultural fields 30 years after sewage sludge application. In: *Sci Rep* 12 (1), S. 6401. DOI: 10.1038/s41598-022-10294-w.



## Mitteilungen / Institut für Wasserwesen

- |         |   |                   |
|---------|---|-------------------|
| Heft 1  | Darstellung des Instituts für Wasserwesen an der Hochschule der Bundeswehr München, 1978  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 2  | Ansprachen und Vorträge anlässlich der Inbetriebnahme der Laboratorien des Instituts für Wasserwesen an der Hochschule der Bundeswehr München, 1979                 | <i>vergriffen</i> |
| Heft 3  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1980  |                   |
| Heft 4  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1980  |                   |
| Heft 5  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1981  |                   |
| Heft 6  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1982  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 7  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1982  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 8  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1983  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 9  | Koch, K.<br>Physikalisch-chemische Messung von Geruchsemissionen auf kommunalen Kläranlagen, 1983   | <i>vergriffen</i> |
| Heft 10 | Vogel, G.<br>Instationäre Strömung von Wasser-Feststoff-Gemischen in Druckrohrleitungen, 1983   |                   |
| Heft 11 | Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen, 1983   |                   |
| Heft 12 | Schrimpf, W. und Steinle, E.<br>Untersuchung an horizontal durchströmten Sandfängen zur Verbesserung der Sandabscheidung und Vorreinigung kommunaler Abwässer, 1984 | <i>vergriffen</i> |
| Heft 13 | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1984  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 14 | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1985  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 15 | Koplitz-Weißgerber, G.<br>Bewirtschaftung von Bewässerungssystemen in semiariden Regionen, 1985   |                   |
| Heft 16 | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1986  |                   |
| Heft 17 | Keser, G.<br>Der Einfluss der hydrologischen Unsicherheit auf die Versorgung durch Wasserkraftspeicher, 1986  |                   |
| Heft 18 | Färber, K.<br>Stochastische Modelle zur Simulation des Transportes nicht kohäsiver Sedimente in offenen Gerinnen, 1987  |                   |
| Heft 19 | Vetter, M.<br>Der Transport suspendierter Feststoffe in offenen Gerinnen, 1987  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 20 | Schrimpf, W.<br>Ein Beitrag zur Berechnung der Sedimentation von Feststoffen in horizontal durchströmten Sandfängen, 1987   |                   |

- Heft 21 Färber, K.  
Stochastische Modelle der Bewegung suspendierter Partikel in turbulenter Strömung, 1987
- Heft 22 Steinle, E.  
Untersuchungen zur Energiebilanz konventioneller beheizter Faulbehälter - Konsequenzen für die Bemessung von Faulgasspeichern sowie Faulraumheizungen, 1987
- Heft 23 Hoffmann, H.  
Die Leistungsfähigkeit von Belebungsverfahren in Kaskadenschaltung, 1987
- Heft 24 Kaiser, K. und Teichmann, H. *vergriffen*  
Vergleichende Geruchsmessungen auf Abwasserreinigungsanlagen, 1987
- Heft 25 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1987
- Heft 26 Vetter, M.  
Gesamttransport von Sedimenten in offenen Gerinnen, 1988
- Heft 27 Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen, 1988
- Heft 28 Grußadressen und Vorträge anlässlich der 10-Jahres-Feier des Instituts für Wasserwesen (1978 - 1989), 1988
- Heft 29 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1989
- Heft 30 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1989
- Heft 31 Montaña Vargas, J. L.  
Prognose von Niederschlagsfeldern, 1989
- Heft 32 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1989
- Heft 33 Bever, J. G.  
Die Monodeponie als eine Möglichkeit zur Entsorgung von kommunalem Klärschlamm, 1989
- Heft 34 Niekamp, O.  
Der Betrieb von Speichersystemen mit Überleitung unter Berücksichtigung von Nutzungsänderungen, 1989
- Heft 35 Øverland, H.  
Einfluss der Landnutzung auf Hochwasserabfluss und Schwebstofftransport, 1990
- Heft 36 Patt, H. *vergriffen*  
Hydromechanische Untersuchungen an einem belüfteten Sandfang, 1990
- Heft 37 Stein, A.  
Ein Beitrag zur Bemessung belüfteter Sandfänge kommunaler Kläranlagen, 1990
- Hefte 38 Beiträge der 5. Wissenschaftlichen Tagung „Hydrologie und Wasserwirtschaft“: 38a/38b Folgen anthropogener Einflüsse auf den Wasserhaushalt und die Wasserbewirtschaftung, 1990
- Heft 39 Zottmann, W. L. M. *vergriffen*  
Zur Entstehung von Riffeln und Dünen, 1991
- Heft 40 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1992



- Heft 41 Norgauer, U.  
Untersuchung der Abhängigkeit des Wirkungsgrades der  
Schlammfäulung von der Durchmischung im Faulbehälter, 1992
- Heft 42 Vetter, M.  
Ein Beitrag zur Berechnung des Feststofftransports in offenen Gerinnen, 1992
- Heft 43 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1992
- Heft 44 Hagen, N.  
Steuerung von Speichern unter dem Aspekt der Wassergüte, 1992
- Heft 45 Kleeberg, H.-B. und Øverland, H.  
Möglichkeiten der Abflußmodellierung unter Nutzung von  
Geoinformationssystemen, 1993
- Heft 46 Urbaniak, S.  
Phosphorelimination durch Vor-, Simultan- und Nachfällung mit  
Kalk bei Abwasser mit geringer Säurekapazität, 1993
- Heft 47 Hagen, N. und Kleeberg, H.-B. *vergriffen*  
Möglichkeiten der Modellierung des großräumigen Stofftransportes  
auf Landflächen Güte- Simulationsmodelle für stehende Gewässer  
- Eine Literaturanalyse, 1993
- Heft 48 Bechteler, W., Broich, K., Hartmann, S., Kulisch, H., Nuji, M., Otto, A. J.  
Simulationsmodelle zur Berechnung von Damnbrüchen  
und 1- bzw. 2-dimensionaler Ausbreitung der Flutwelle im Gelände, 1993
- Heft 49 Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen 1988 - 1993, 1993
- Heft 50 Sattel, H. *vergriffen*  
Wandschubspannung an umströmten Körpern, 1994
- Heft 51 Geitz, M.  
Einfluss der räumlichen Niederschlagsvariabilität auf Ergebnisse  
von Niederschlag-Abfluss- Berechnungen, 1994
- Heft 52 Patt, H.  
Der naturnahe Gewässerausbau - Grundlagen und Anwendungen, 1995
- Heft 53 Mayer, O. *vergriffen*  
Auslegung und Simulation photovoltaischer  
Wechselstrompumpensysteme, 1995
- Heft 54 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1995
- Heft 55 Kleeberg, H.-B. und Niekamp, O.  
Vorstudie zur Formulierung von Forschungen zur  
Verfügbarkeit von Wasser, 1995
- Heft 56 Tagungsband Klimaänderung und Wasserwirtschaft  
- Internationales Symposium 27./28. November 1995  
im Europäischen Patentamt München, 1996
- Heft 57 Baier, V.  
Bestimmung und Beschreibung der Form von Schwebstoffpartikeln  
mittels Unterwasservideomikroskop und digitaler Bildverarbeitung, 1996
- Heft 58 Bechteler, W., Vollmers, H.-J., Wieprecht, S.  
DFG - Rundgespräch Geschiebe am 7./8. 12. 1995 in Würzburg, 1996

- Heft 59 Tasdemir, A.  
Experimentelle und numerische Ermittlung der freien Wasseroberfläche, 1997
- Heft 60 Hartmann, S.  
Entwicklung einer Strategie zur in situ-Ermittlung der kritischen Erosionsgeschwindigkeit, 1997
- Heft 61 Broich, K.  
Computergestützte Analyse des Dammerosionsbruchs, 1998
- Heft 62 Nujic, M.  
Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen, 1998
- Heft 63 Shen, Z.  
Veränderung des Geschiebetransports durch naturnahe Sohleneinbauten, 1998
- Heft 64 Urbaniak, S.  
Belastungsschwankungen und ihre Auswirkungen auf die Leistung von Abwasserreinigungsanlagen, 1998
- Heft 65 Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen 1993 -1998, 1998
- Heft 66 Festveranstaltung 20 Jahre Institut für Wasserwesen  
Ehrendoktorwürde Prof. Dr.-Ing. Habil. J. Giesecke, 1999
- Heft 67 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1999
- Heft 68 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1999
- Heft 69 Günthert, F. W. und Osswald, M.  
Minimierung des Schlammmanfalls auf Kläranlagen durch Desintegration - Bestandsaufnahme auf großtechnischen Anlagen, 1999
- Heft 70 Kleeberg, H.-B. und Mayer, U.  
Hydrologische Extreme - Gefährdungspotentiale in Fließgewässern durch Trockenperioden, 1999
- Heft 71<sup>1</sup> Hügel, T.  
Abflussberechnung mit Hilfe Neuronaler Netze, 2000  
ISBN 3-486-26499-0
- Heft 72<sup>1</sup> Schmid, A.  
Das Phänomen der „biologischen Resonanz“:  
Basis zur Optimierung biologischer Reinigungsstufen, 2000  
ISBN 3-486-26444-3
- Heft 73<sup>1</sup> Mück, R.  
Räumliche und zeitliche Verteilung von Starkregen und deren Wahrscheinlichkeiten, 2000  
ISBN 3-486-26500-8
- Heft 74<sup>1</sup> Bechteler, W. und Günthert, F. W.  
Zerstörungsfreie Dichtheitsprüfung von Grundstücksentwässerungsleitungen, 2001  
ISBN 3-486-26517-2
- Heft 75<sup>1</sup> Wieprecht, S.  
Entstehung und Verhalten von Transportkörpern bei groben Sohlenmaterial, 2001  
ISBN 3-486-26518-0

- Heft 76<sup>1</sup> Günthert, F. W., Eder, B., Krause, S., Herb, S., Hagemeyer, G.  
Einsatz von Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung von trübstoffhaltigem  
und mikrobiologisch belastetem Karst-, Grund- und Quellwässern, 2001  
ISBN 3-486-26519-9
- Heft 77<sup>1</sup> Günthert, F. W., Narr, N., Reicherter, E.  
Beiträge zum Bau von Abwasserleitungen: Zeitaufwand,  
Kosten und Verlegeverfahren, 2001  
ISBN 3-486-26520-2
- Heft 78<sup>1</sup> Günthert, F. W. et al.  
Feststoffabtrennung auf Kläranlagen: Theorie und Praxis, 2001  
ISBN 3-486-26525-3
- Heft 79<sup>1</sup> Kulisch, H.  
Ausbreitung von Dammbuchwellen im physikalischen Modell, 2002  
ISBN 3-486-26
- Heft 80<sup>1</sup> Krause, S.  
Huminstoffe im Sickerwasser von Klärschlamm-Monodeponien, 2002  
ISBN 3-486-26538-5
- Heft 81<sup>1</sup> Farshi Haghro, D.  
Two-Dimensional Simulation of Sediment Transport on Unstructured Mesh,  
2003  
ISBN 3-486-26557-1
- Heft 82<sup>1</sup> Dick, T.  
Variabilität hydrologischer Regressionsmodelle, 2003  
ISBN 3-486-26540-7
- Heft 83<sup>1</sup> Maurer, M.  
Zuverlässigkeit von Berechnungen des Feststofftransports, 2003  
ISBN 3-486-26558-X
- Heft 84<sup>1</sup> Reicherter, E.  
Untersuchungen zu Kennzahlen als Grundlage für Kostenbetrachtungen  
in der Abwasserentsorgung, 2003  
ISBN 3-486-26553-9
- Heft 85 Festveranstaltung zur Verabschiedung *vergriffen*  
von Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Bechteler  
und Prof. Dr.-Ing. Hans-B. Kleeberg
- Heft 86<sup>1</sup> Vestner, R.  
Leistung und CBS-Bemessung der vorgeschalteten Denitrifikation  
unter erhöhter Sauerstofflimitierung für Tropfkörper-Anlagen, 2003  
ISBN 3-486-26554-7
- Heft 87<sup>1</sup> Walther, G.  
In-situ-Versuche zu Planung und Bau von Ver- und Entsorgungsleitungen  
mit dem Pflugverfahren, 2003  
ISBN 3-486-26562-8
- Heft 88<sup>1</sup> Vogel, S.  
Ansätze zur Bemessung rauer Rampen in aufgelöster Bauweise, 2003  
ISBN 3-486-26563-6

- Heft 89 Bofinger, A. *vergriffen*  
 Das stationäre Transportgleichgewicht natürlicher geschiebeführender  
 Fließgewässer - Empfindlichkeit hydromechanischer Parameter in  
 eindimensionalen Modellen, 2003
- Heft 90 Günthert, F. W.  
 Einführung und Umsetzung der getrennten Abwassergebühr, 2004
- Heft 91<sup>1</sup> Komaei, S.  
 A Robust Implicit Shallow Water Equations Solver on Unstructured Grid, 2004  
 ISBN 3-486-63072-5
- Heft 92<sup>1</sup> Eder, B  
 Untersuchungen zur Verbesserung des Stoffstrommanagements auf  
 Kläranlagen - Auslegungsansätze von Ultraschallanlagen zur  
 Klärschlammbehandlung, 2004  
 ISBN 3-486-63071-7
- Heft 93<sup>1</sup> Günthert, F. W. und Krause, S.  
 Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung, 2004  
 ISBN 3-486-63067-9
- Heft 94<sup>1</sup> Khedr, A. M.  
 Socio-Economic Assessment of Water Supply in Rural Egypt, 2006  
 ISBN 3-8356-3121-7, ISBN 978-3-8356-3121-2
- Heft 95 Wolf, M. *vergriffen*  
 Untersuchung zu Sanierungsstrategien von Abwasserkanalnetzen  
 und deren Auswirkungen auf Wertentwicklung und Abwassergebühren, 2006
- Heft 96<sup>1</sup> Goebel, H.  
 Entwicklung einer Benchmarking - Methode für die Verbesserung  
 der Gewässerstrukturen von Fließgewässern, 2006  
 ISBN 3-8356-3111-X, ISBN 978-3-8356-3111-3
- Heft 97<sup>1</sup> Rapp-Fiegle, S.  
 Ermittlung von Leitkennzahlen als Grundlage zur Optimierung  
 siedlungswasserwirtschaftlicher Prozesse, 2006  
 ISBN 3-8356-3110-1, ISBN 978-3-8356-3110-6
- Heft 98<sup>1</sup> Günthert, F. W.  
 Tagungsband zu den Seminaren Wirtschaftliches Handeln in  
 Bayerischen Kommunen und Mikrobiologische Probleme  
 bei Schlammseparation und Schlammbehandlung, 2007  
 ISBN 978-3-8356-3136-6
- Heft 99<sup>2</sup> Yörük, A.  
 Unsicherheiten bei der hydrodynamischen Modellierung von  
 Überschwemmungsgebieten, 2009  
 ISBN 978-3-8322-8723-8
- Heft 100<sup>1</sup> Disse, M., Kalk, M., Rieger, W.  
 Tagungsband zum Seminar Wasserrückhalt in der Fläche  
 - Möglichkeiten und Grenzen des dezentralen Hochwasserschutzes, 2008  
 ISBN 978-3-8356-3173-1

- Heft 101<sup>2</sup> Schönherr, F.  
Halbtechnische Untersuchungen zum Einfluss des pH-Wertes auf die Nitrifikation beim Belebungsverfahren in Abhängigkeit des Kohlendäuresystems, 2009  
ISBN 978-3-8322-8888-4
- Heft 102<sup>2</sup> Günthert, F. W. und Obermayer, A.  
Tagungsband zum Kanalseminar: Grundstücksentwässerungsanlagen, Fremdwasser und Überflutung, 2009  
ISBN 978-3-8322-8628-6
- Heft 103<sup>2</sup> Cvaci, D.  
Zustandserfassung und Bewertung von Grundstücksentwässerungsanlagen unter Einbeziehung einer optimierten organisatorischen Vorgehensweise, 2009  
ISBN 978-3-8322-8658-3
- Heft 104<sup>2</sup> Hirschbeck (geb. Schwarz), C.  
Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von belüfteten Sandfängen auf Kläranlagen, 2010  
ISBN 978-3-8322-9093-1
- Heft 105<sup>2</sup> Günthert, F. W., Obermayer, A., Krause, S.  
Charakterisierung von Rohwässern bezüglich ihrer Eignung für die Aufbereitung mit Membranverfahren, 2010  
ISBN 978-3-8322-9243-0
- Heft 106<sup>2</sup> Schütter, J.  
Wissensmanagement in der Wasserwirtschaft - am Beispiel der Planung und Umsetzung des integrierten Hochwasserschutzkonzeptes Obere Iller, 2010  
ISBN 978-3-8322-9249-2
- Heft 107<sup>2</sup> Heinisch, T.  
Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Anpassung an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft, 2010  
ISBN 978-3-8322-9519-6
- Heft 108<sup>2</sup> Putzar, B., Marques, W., Fernandes, E., Malcherek, A.  
An Integrated Modeling System for the Patos Lagoon in Brazil - Final Project Report, 2010  
ISBN 978-3-8322-9244-7
- Heft 109 Günthert, F. W., Disse, M., Malcherek, A.  
Tagungsband zum Institutsseminar, Oktober 2010  
Risiko und Sicherheit in der Wasserwirtschaft, 2010
- Heft 110<sup>2</sup> Günthert, F. W., Krause, S., Obermayer, A.  
Tagungsband zum Seminar Wasserversorgung, 2010  
ISBN 978-3-8322-9563-9
- Heft 111<sup>2</sup> Malcherek, A. und Cha, H.  
Zur Rheologie von Flüssigschlickern: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Ansätze - Projektbericht, 2011  
ISBN 978-3-8440-0136-5
- Heft 112<sup>2</sup> Günthert, F. W., Krause, S., Platschek, C.  
Tagungsband zum 3. Seminar Wasserversorgung, 2011  
ISBN 978-3-8440-0387-1

- Heft 113<sup>2</sup> Pakosch, S.  
Development of a fuzzy rule based expert system for flood forecasts  
within the meso-scale Upper Main basin, 2011  
ISBN 978-3- 8440-0611-7
- Heft 114<sup>2</sup> Schardt, V.  
Vergleich hydrologischer und hydrodynamischer Modelle und  
Konsequenzen für die praktische Anwendung, 2012  
ISBN 978-3- 8440-1208-8
- Heft 115<sup>2</sup> Wehr, D.  
An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics, 2012  
ISBN 978-3- 8440-0860-9
- Heft 116<sup>2</sup> Rieger, W.  
Prozessorientierte Modellierung dezentraler  
Hochwasserschutzmaßnahmen, 2012  
ISBN 978-3- 8440-1209-5
- Heft 117<sup>2</sup> Günthert, F. W., Krause, S., Platschek, C.  
Tagungsband zum 4. Seminar Wasserversorgung, 2012  
ISBN 978-3- 8440-1294-1
- Heft 118<sup>2</sup> Winter, F.  
Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung und -konzentration  
auf verschlammungsgefährdeten landwirtschaftlichen Nutzflächen, 2013  
ISBN 978-3- 8440-2242-1
- Heft 119 Günthert, F. W. und Schlederer, S.  
Tagungsband zum 1. Abfallwirtschaftlichen Seminar: Kommunale  
biogene Reststoffe als regionale Energieträger, 2013
- Heft 120<sup>2</sup> Günthert, F. W. und Krause, S.  
Tagungsband zum 5. Seminar Wasserversorgung, 2013  
ISBN 978-3-8440-2179-0
- Heft 121<sup>2</sup> Walter, W. K.  
Recommendations for Small Water Supply Systems in Newly Industrialized  
Countries on the Example of Assessment in the State of Minas Gerais,  
Brazil, 2013  
ISBN 978-3-8440-2238-4
- Heft 122<sup>2</sup> Günthert, F. W., Krause, S., Platschek, C.  
Tagungsband zum 6. Seminar Wasserversorgung, 2014  
ISBN 978-3-8440-2986-4
- Heft 123<sup>2</sup> Krause, S.  
Tagungsband zum 7. Seminar Wasserversorgung, 2015  
ISBN: 978-3-8440-3806-4
- Heft 124<sup>2</sup> Platschek, C.  
Technische und organisatorische Strukturuntersuchung von kleinen  
Wasserversorgungsunternehmen zur Ableitung von unterstützenden  
Handlungsempfehlungen, 2015  
ISBN 978-3-8440-4021-0

- Heft 125<sup>2</sup> Baselt, I.  
Die Steffturbine - Experimentelle und theoretische Untersuchungen  
zu einer Kleinwasserkraftanlage mit Bindegliedfunktion zwischen  
ober- und unterschlächtiger Wirkungsweise, 2016  
ISBN 978-3-8440-4387-7
- Heft 126<sup>2</sup> Krause, S.  
Tagungsband zum 8. Seminar Wasserversorgung, 2016  
ISBN 978-3-8440-4719-6
- Heft 127<sup>2</sup> Krause, S. und Schaum, C.  
Tagungsband zum 9. Seminar Wasserversorgung, 2017  
ISBN 978-3-8440-5468-2
- Heft 128<sup>2</sup> Krause, S. und Schaum, C.  
Tagungsband zum 10. Seminar Wasserversorgung, 2018  
ISBN 978-3-8440-5468-2
- Heft 129<sup>2</sup> Putzar, B.  
Simulating Large-Scale Morphodynamics of a Tidally Dominated Mixed Energy  
Coast Fundamentals - Applications - Limits  
ISBN: 978-3- 8440-6240-3
- Heft 130<sup>3</sup> Schaum, C. et al.  
Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung  
Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU)  
ISBN: 978-3-943207-45-3
- Heft 131<sup>2</sup> Chmiel, O.  
Zur Interaktion der Turbulenz und der Schwebstoffkonzentration in Oberflä-  
chengewässern  
ISBN: 978-3-8440-7471-0
- Heft 132<sup>3</sup> Parra, S.  
Verfahren zur Bewertung von Trinkwassernetzen als Grundlage  
der Anpassungsplanung  
ISBN 978-3-943207-46-0
- Heft 133<sup>3</sup> Broß, Lisa  
Wasserversorgung in Notsituationen  
ISBN 978-3-943297-51-4
- Heft 134<sup>3</sup> Lösungsstrategien zur Verminderung von Einträgen von urbanem Plastik in  
limnische Systeme – Synthesebericht  
ISBN 978-3-943207-52-1
- Heft 135<sup>3</sup> Anforderungen an Nottrinkwasser und Maßnahmen zur Verwendung für  
sensible technische Systeme in Einrichtungen des Gesundheitswesens,  
Abschlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz  
und Katastrophenhilfe  
ISBN 978-3-943207-66-8
- Heft 136<sup>3</sup> Untersuchungen zur Entwässerung, Trocknung und Entsorgung von  
Klärschlamm kleiner und mittlerer Kläranlagen  
Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt  
ISBN 978-3-943207-74-3

- <sup>1</sup> Oldenbourg Industrieverlag GmbH  
Rosenheimer Straße 145  
81671 München
- <sup>2</sup> Shaker Verlag GmbH  
Am Langen Graben 15a  
52353 Düren
- <sup>3</sup> Universität der Bundeswehr München, AtheneForschung Open-Access-Publikation





[www.unibw.de/wasserwesen](http://www.unibw.de/wasserwesen)

**ISBN 978-3-943207-74-3**