Kläranlagen
Beratung
Kopp

Probenahme am 04.02.2026

Kennwert TR(A)$_{KBKopp}$

KA Koblenz



Ziel:	Bestimmung der maximalen Entwässerbarkeit mit Kennwert TR(A)$_{KBKopp}$ und des Polymerbedarfs
Proben:	Faulschlamm, Austrag, Zentrat, Polymerprodukt
Bericht vom:	01.03.2026

Hintere Str. 10
D-38268 Lengede

Tel. +49-5174-929 043
Mobil +49-171-4964 066
Fax +49-5174-929 045
Email: jk@kbkopp.de
WWW: www.kbkopp.de

Bankverbindung:
Commerzbank
IBAN: DE3827080060
0253188400
SWIFT-BIC: DRESDEFF

Steuernummer
Finanzamt Peine
38-123-02634

Gerichtsstand:
Braunschweig
Germany

1. Veranlassung und Vorgehensweise

Die Unterzeichnerin wurde beauftragt, die Polymerausschreibung für die maschinelle Klärschlammentwässerung auf dem Klärwerk Koblenz zu begleiten. Dazu wird das Entwässerungs- und Konditionierungsverhalten des Faulschlammes (FS) der Kläranlage Koblenz untersucht.

Für die Beurteilung des Entwässerungsverhaltens werden die Wasseranteile des Klärschlammes ermittelt. Die Methode der thermogravimetrischen Messung zur Aufnahme einer Trocknungskurve wird in Kapitel 6 beschrieben. Mit Hilfe der Trocknungskurve kann abgeleitet werden, wie hoch nach dem derzeitigen Stand des Wissens der maximal erreichbare Trockenrückstand $TR(A)_{KBKopp}$ bei der maschinellen Entwässerung ist, d.h. welcher Trockenrückstand erreicht werden kann, wenn alles freie Wasser aus der Schlammsuspension abgetrennt wird.

Die eingesetzte Messtechnik ist prädestiniert zur Festlegung des zu erreichenden Garantiewertes. Die Messung und deren Aussagekraft zur Prognose des erreichbaren Entwässerungsergebnisses wurde 2000 in das DWA-Merkblatt M-366 „Maschinelle Schlammentwässerung“ und 2008 in das DWA Merkblatt M-383 „Kennwerte der Klärschlammentwässerung“ des DWA-Fachausschusses 3.2 aufgenommen. 2019 wurde in der 2. Auflage des M-383 die Prognosegenauigkeit angehoben. Dabei hat sich nicht die Messung des Kennwertes TR(A) geändert, sondern der Vergleich mit den großtechnischen Entwässerungsergebnissen im optimalen Betriebsbereich aktualisiert (siehe Abbildung B.3).

Das Konditionierungsverhalten wird untersucht, indem der erforderliche Polymerbedarf bestimmt wird. Hierfür wurde eine Strömungspotentialmessung durchgeführt. Untersucht wurde das mitgelieferte Emulsionspolymer (unkenntlich) mit einem angenommenen Wirksubstanzgehalt von 50% WS. Für die Aufbereitung der Polymerlösung wurde das Ansatzwasser der Kläranlage verwendet.



2. Versuchsergebnisse

In der folgenden Tabelle 2.1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Faulschlamm der KA Koblenz vom 04.02.2026 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Kennwerte zum Entwässerungs- und Konditionierungsverhalten, FS KA Koblenz, Proben vom 04.02.2026

	Faulschlamm Koblenz Probe vom 04.02.2026
TR [%]	**2,25**
GV [%]	**58,4**
$TR(A)_{KBKopp}$ [%]	**29,6**
TR(A)-0,5 [%]	29,1
$TR(A)_{mind}$ -1,5 [%]	28,1
$TR_{entw.}$ [%]	**28,4**
AFS-Filtrat [mg/l]	65
Abscheidegrad	99,7
pH [-]	**7,81**
el. LF [mS/cm]	8,77
Polymer	Polymer: Emulsion unbek. WS-Anteil: 50% WS angenommen Ansatzwasser: KA
Bedarf pFM [kgWS/MgTM]	**18,3**
PO_4P [mg/l]	**2,78**
NH_4N [mg/l]	929
Calcium [mg/l]	15,3
Magnesium [mg/l]	5,98
Kationen-Index KI [-]	52,6
Sandanteil* [% v. GR]	19
Wasser [kg/m³]	977,5
oTM [kg/m³]	13,1
aTM [kg/m³]	9,4
davon Sand [kg/m³]	1,78
Abscheidegrad für AFS max	98,00
AFS-Max [mg/l]	486
Konz. PO_4-P und Kationen gemessen im Zentratwasser nach 1000 g x 30 min ohne Polymer und Filtration (0,45 µm)	
*als salzsäureunlöslicher Rückstand vom Glührückstand gem. DWA M-383	
n.b. nicht bestimmt	

3. Diagramme zur Darstellung der Entwässerbarkeit und des optimalen Polymerbedarfs

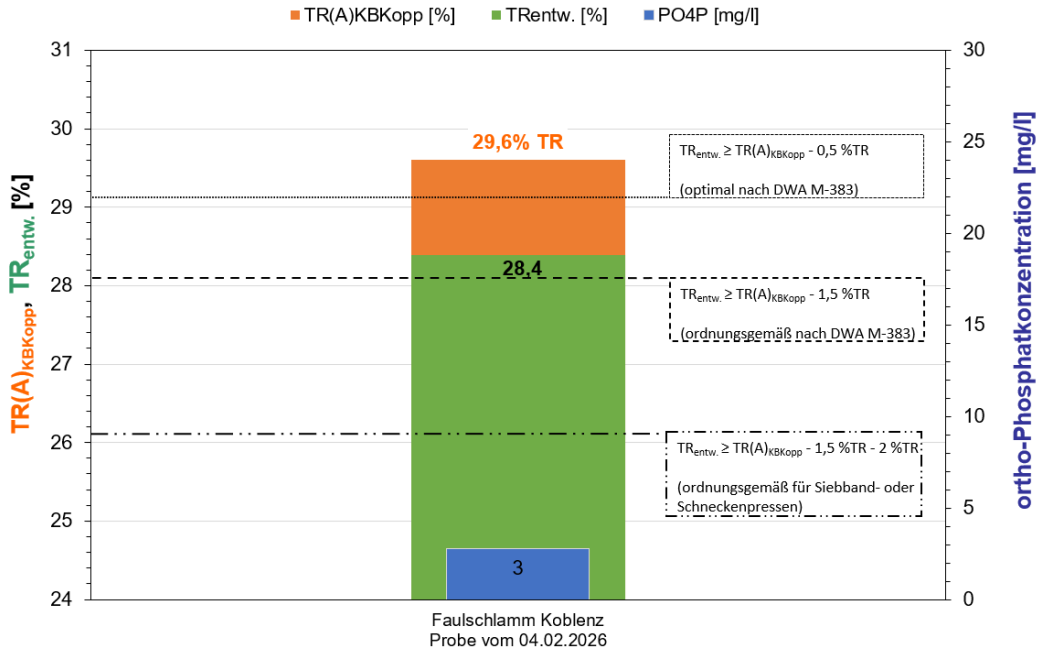


Abbildung 3.1: Kennwert TR(A), $TR_{entw.}$ und ortho-Phosphat des FS, KA Koblenz, Proben vom 04.02.2026

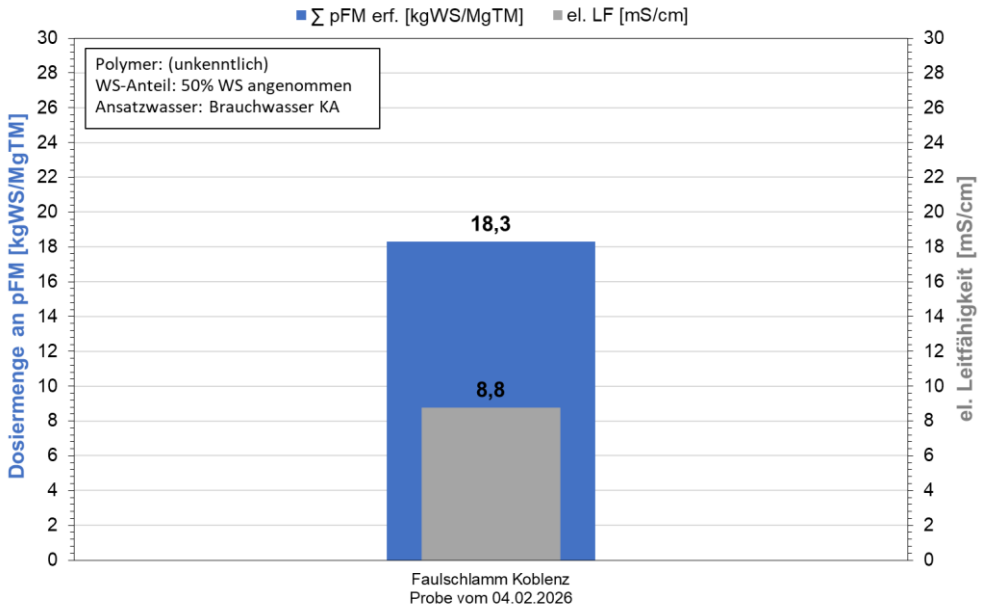


Abbildung 3.2: Polymerbedarf und elektrische Leitfähigkeit des FS, KA Koblenz, Proben vom 04.02.2026

4. Bewertung

4.1 Maximale Entwässerbarkeit und erreichtes Entwässerungsergebnis

Die Bewertung erfolgt gemäß Stand der Technik nach dem DWA-M 383, welches für kommunale Klärschlämme ausgerichtet ist. Demnach werden Entwässerungsergebnisse von $TR(A)_{KBKopp}$ +/- 0,5% TR-Punkte als optimal und Entwässerungsergebnisse im Bereich zwischen $TR(A)_{KBKopp}$ – 0,5% TR-Punkte und $TR(A)_{KBKopp}$ – 1,5% TR-Punkte als ordnungsgemäß entwässert bei der Entwässerung mit Dekantern und Kammerfilterpressen eingestuft. In Abbildung 4.1 werden die Einteilungen für die Bewertung der erreichten Entwässerungsergebnisse bei der Entwässerung mittels Dekanter oder Kammerfilterpressen aufgeführt.

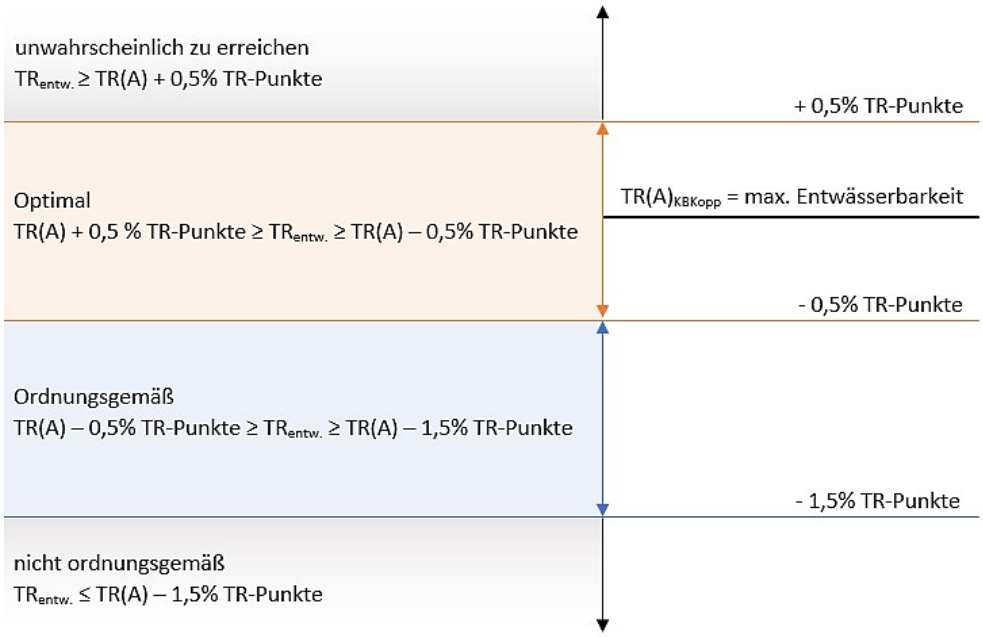


Abbildung 4.1: Einteilungen zur Bewertung des Entwässerungsergebnisses im Zusammenhang des Kennwertes $TR(A)_{KBKopp}$ bei der Entwässerung mit Dekantern oder Kammerfilterpressen

Aufgrund des geringen Energieeintrags von Schnecken- und Siebbandpressen bei der Entwässerung werden Entwässerungsergebnisse erreicht, die ca. 2% TR-Punkte unter dem TR(A)-Wert liegen. Aus dem Grund werden Entwässerungsergebnisse, die über einem TR-Wert von TR(A) – 1,5% TR – 2,0% TR liegen, als ordnungsgemäß eingestuft, wenn mittels Schnecken- oder Siebbandpresse entwässert wird.

Die Trocknungskurve zu der thermogravimetrischen Vermessung der Faulschlammprobe der KA Koblenz wird in Abbildung 4.2 dargestellt. Für die Probe vom 04.02.2026 wurde eine maximale Entwässerbarkeit $TR(A)_{KBKopp}$ von 29,6% TR bestimmt.

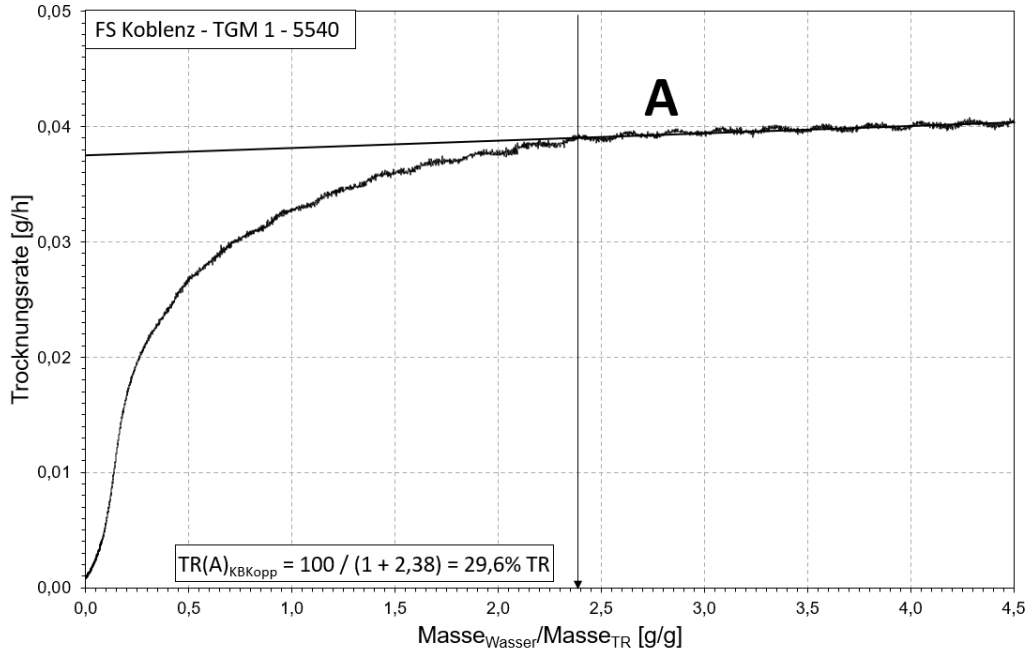


Abbildung 4.2: Trocknungskurve, Faulschlammprobe, Probe vom 04.02.2026, KA Koblenz

Für die Schlammentwässerung mit einer Zentrifuge ergibt sich folgende Einteilung zur Bewertung der Entwässerungsergebnisse für den Faulschlamm der KA Koblenz:

- optimale Entwässerungsergebnisse: 29,1% TR – 29,6% TR
- ordnungsgemäße Entwässerungsergebnisse: 28,1% TR – 29,1% TR
- nicht ordnungsgemäße Entwässerungsergebnisse: < 28,1% TR

Bei der Entwässerung mittels Zentrifugen sind ordnungsgemäße und optimale Entwässerungsergebnisse abhängig von der Befrachtung der Maschinen (siehe dazu auch Abbildung B.4) erwartbar.

Abbildung 3.1 stellt den Trockenrückstand der Austragsprobe und den Kennwert $TR(A)_{KBKopp}$ gegenüber. In der mitgelieferten Austragsprobe wurde ein Trockenrückstand von 28,4% TR ermittelt. Damit lag zum Zeitpunkt der Probenahme ein Entwässerungsergebnis vor, welches als ordnungsgemäß für die Entwässerung mit Zentrifuge einzustufen ist.

Der TR(A)-Wert ist unabhängig von der Konditionierung und beschreibt, welcher Wasseranteil nicht mechanisch abgetrennt werden kann. Durch die Zugabe von Polymer wird die Abgabe des freien Wassers nur beschleunigt.

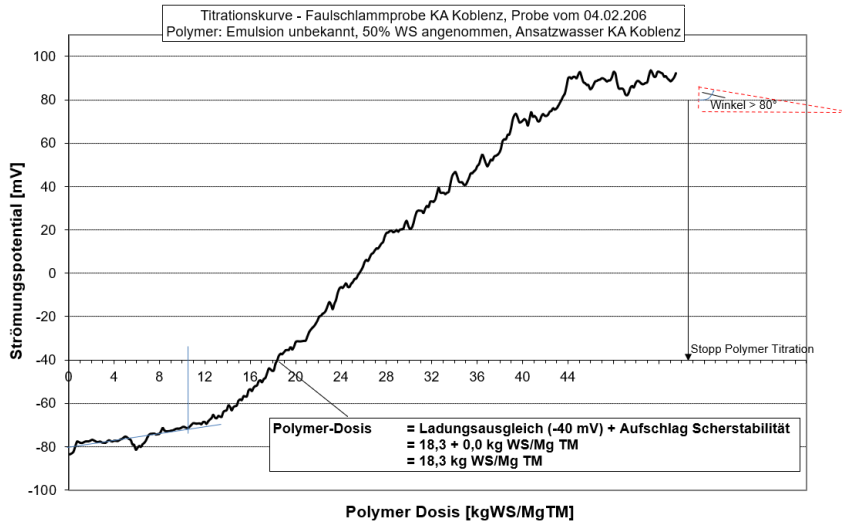
4.2 Phosphatkonzentration

Die gemessene Phosphatkonzentration von 2,78 mg/l ist als „sehr niedrig“ zu bewerten. Mit MAP-Ausfällungen ist nicht zu rechnen.

4.3 Optimaler Polymerbedarf

Anhand einer Strömungspotenzialmessung (gem. DWA M-383) wurde für die Faulschlammprobe der KA Koblenz vom 04.02.2026 ein spezifischer Polymerbedarf von 18,3 kg WS/Mg TM für das mitgelieferte Emulsionspolymer zur Schlammentwässerung ermittelt (siehe Abbildung 4.4). Der pFM-Bedarf wird als hoch eingestuft. Der Anteil gelöster Ladung ist mit 10,5 kgWS/MgTM ebenfalls hoch. Eine Zugabe von ca. 1,0-1,5 kg WS/MgTM hochkationischen niedermolekularen Polymeren zur Reduzierung der gelösten Ladung, könnte als Optimierungsversuch getestet werden.

Die Dosiermenge von 18,3 kgWS/MgTM ist die Meneg an Polymer, um die anionische Oberflächenladung der organischen Schlammpartikeln vollständig zu kompensieren. 10,8 kg WS/Mg TM müssen eingesetzt werden, bevor eine Flockenbildung einsetzt. Dies ist die minimal erforderliche Polymermenge, bei der untersuchten Probe.





18 kgWS/MgTM 19 kgWS/MgTM 20 kgWS/MgTM

Abbildung 4.4: Ergebnisse der Strömungspotenzialmessung, FS KA Koblenz vom 04.02.2026

4.4 Abscheidegrad

Der erreichte Abscheidegrad der untersuchten Zentratprobe lag bei 99,7% ($c_{TS,Zentrat/Filtrat}$ = 65 mg/l). Die Abscheideleistung ist für den Einsatz von sowohl einer Zentrifuge als auch einer Siebband- oder Schneckenpresse als noch ausreichend zu bewerten. Abscheideleistungen von ≥ 98% sind bei der Entwässerung mit Zentrifugen empfohlen, um die Rückbelastung der Kläranlage durch das anfallende Schlammwasser möglichst gering zu halten. (AG = 98% wird bei den TR-Werten vom Zulauf & Austrag bei 486 mg/l erreicht).

Für den Bestimmung des Abscheidegrades wurden gemäß DWA M-383 und DWA M-366 Schwarzband-Papierfilter eingesetzt. 0,45µm Membranfilter sind feiner und halten mehr Feststoffe zurück. Bei Verwendung dieser Membranfilter werden geringer Abscheidegrade ermittelt. Es wird empfohlen mit beiden Filtern mehrere Proben vergleichend zu vermessen und für die Bestimmung des Abscheidegrades zukünftig Schwarzbandfilter einzusetzen.

4.5 Sandanteil

Es wurde für den Faulschlamm der KA Koblenz ein Sandanteil von 9,4% als salzsäure-unlöslicher Rückstand vom Glührückstand ermittelt. Dies ist ein geringer Wert für einen kommunalen Faulschlamm (siehe Tab. B.4)

D.h. in 1 m³ Schlamm sind: 977,5 kg Wasser,
13,1 kg oTM,
9,4 kg aTM (davon 1,78 kg Sand)

enthalten.

Gerne steht Ihnen die Unterzeichnerin für weitere Untersuchungen und Optimierungsmaßnahmen bei der Schlammentwässerung, Schlammkonditionierung oder Betriebsdatenanalyse zur Verfügung.

Lengede, den 01.03.2026

(Dr.-Ing. J. Kopp)

Weitere Messungen & ANHANG:

A. Mikroskopische Aufnahmen FS

Die Flockenstruktur des Klärschlamms wurde im Dunkelfeld bei ca. 100facher Vergrößerung mikroskopiert. Der Klärschlamm der KA Koblenz besteht aus kleinen und mittelgroßen, unregelmäßig geformten kompakten Flocken. Sand und ein hoher Anteil an Suspensa sind zu erkennen. Das Flockenbild ist typisch für einen kommunalen Faulschlamm.

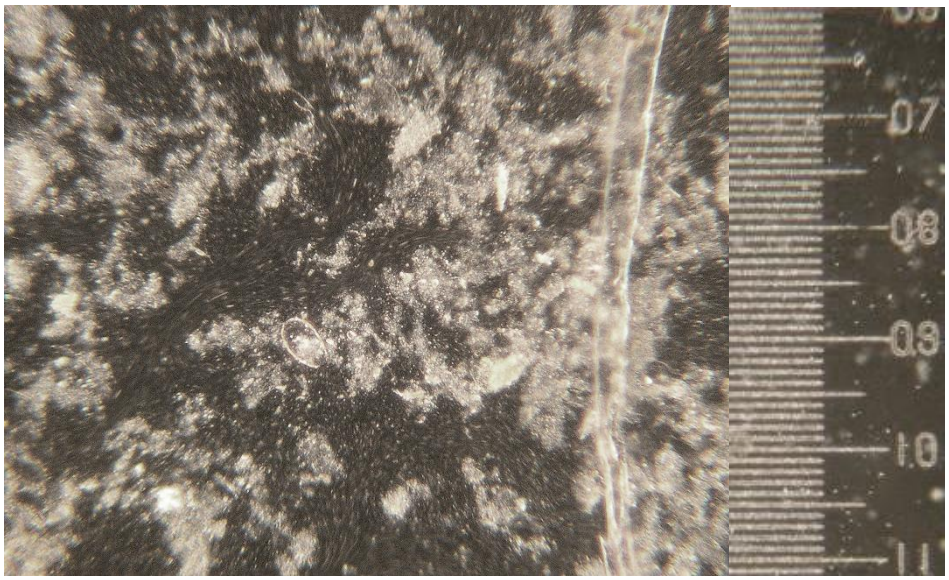


Abbildung A.1: Flockenstruktur, 100fache Vergrößerung im Dunkelfeld, FS KA Koblenz vom 04.02.2026

B Erläuterungen zu den Messmethoden

In Tabelle B.1 sind die eingesetzten Methoden und Entwässerungskennwerte aufgeführt. Die Bestimmung der Wasseranteile und des Bedarfes an polymeren Flockungsmitteln wird zudem ausführlicher im folgenden Teil des Gutachtens beschrieben.

Tabelle B.1: Übersicht zu den angewandten Messverfahren

Kennwert	Einheit	Beschreibung	Quelle
TR	%	Trockenrückstand nach DIN EN 12880	DWA M-383
GV	%	Glühverlust nach DIN EN 12879	DWA M-383
pH, el. LF	-; mS/cm	pH-Wert (DIN 38414), el. Leitfähigkeit (DIN EN ISO 27888) Sondenmessung	DWA M-383
$TR(A)_{KBKopp}$	%	Entwässerungskennwert, Feststoff abgeleitet aus dem freien, ungebundenen Wasseranteil	DWA M-383, Kopp
Ortho-Phosphat-Phosphor.Konz.	mg/l	gelöste PO_4-P Konzentration im Schlammwasser	DIN 38414
Abscheidegrad	%	Verhältnis der abgetrennten zur zugeführten Feststofffracht	DWA M-383
Ca/Mg	[mg/l]	Küvettentest Hach Lange LCK 327	
Konz. PO_4-P und Kationen gemessen im Filtratwasser nach 1000 g x 30 min ohne Polymer und Filtration (0,45 µm)			

Bestimmung der Wasseranteile

In einer Klärschlammsuspension können vier verschiedene Wasseranteile gemäß ihrer physikalischen Bindung an die Schlammpartikeln unterschieden werden (siehe Abbildung B.1). Diese sind:

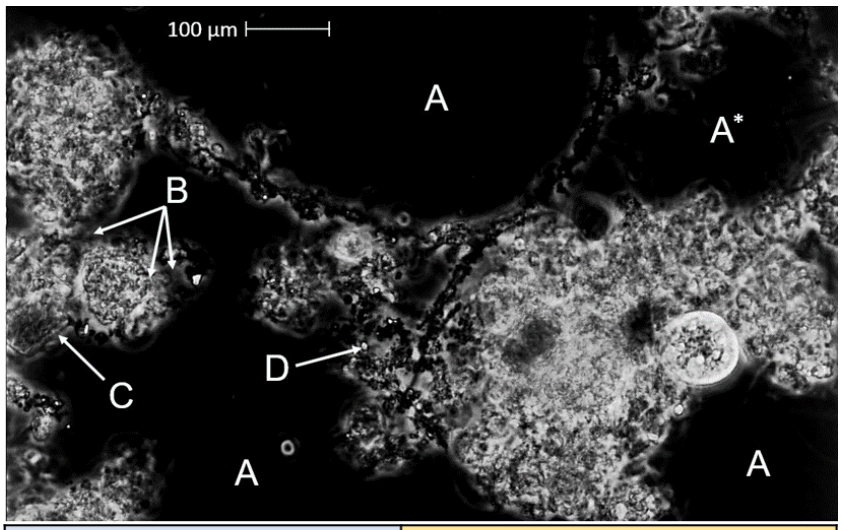
(A) das freie Wasser, das keine Bindung an die Schlammpartikeln besitzt,

(B) das Zwischenraumwasser, das durch Kapillar-Kräfte zwischen den Klärschlammpartikeln in Poren bis zu 10 µm in der Flocke gehalten wird,

(C) das Oberflächenwasser, das durch Adhäsionskräfte gebunden ist, und

(D) das Zellinnenwasser.

Das Zwischenraumwasser, Oberflächenwasser und Zellinnenwasser lassen sich zu dem gebundenen Wasseranteil zusammenfassen. Mit Hilfe von thermogravimetrischen Versuchen können die Wasseranteile messtechnisch erfasst werden. An der TU Braunschweig wurden die Methoden von der Unterzeichnerin soweit angepasst und kalibriert, dass eine direkte Aussage über das maximal erreichbare Entwässerungsergebnis bei einer maschinellen Entwässerung in Hochleistungsdekantern und Filterpressen möglich ist. [1], [13]



A freies – ungebundenes Wasser	B-D gebundenes Wasser
keine physikalische Bindung zu den Partikeln – bei der maschinellen Entwässerung abtrennbar – Freisetzung wird durch polymere Flockungsmittel beschleunigt – Menge = ges. Wasser – gebundenes Wasser	**physikalische und chemische Bindung zu den Partikeln** – nicht mechanisch abtrennbar – nicht durch eine Polymerkonditionierung beeinflussbar – Menge wird durch die Flockenstruktur bestimmt
Unterkategorien	
A: Überstandwasser bei der statischen Eindickung **A*: gefangenes Wasser** in großen Flockenverbänden	**B: Zwischenraumwasser** Wasser, welches physikalisch im Inneren der Flocken durch Kapillarkräfte gebunden ist (Porengröße bis ca. 10 µm) **C: Oberflächenwasser** Wasser, welches chemisch oder physikalisch durch Adhäsionskräfte gebunden ist **D: chemisch gebundenes Wasser** stark gebundenes Wasser, chemisch in Gelen und EPS, Zellinnenwasser und Hydratwasser

Abbildung B.1: Definition der Wasseranteile in einer Klärschlammsuspension [13]

Bei den thermogravimetrischen Messungen wird die Schlammprobe bei konstanten Randbedingungen (Luftaustausch, Temperatur) getrocknet. Aus dem Kurvenverlauf der Trocknungsrate in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes der Probe können die Wasseranteile abgeleitet werden. Um entsprechende Wassermengen differenzieren zu können, wird die Probe vor der Trocknung in einer Becherglaszentrifuge bei 1000 x g für 30 min eingedickt. Die Trocknung muss sehr langsam erfolgen, da ansonsten infolge zu hohen Energieeintrages eine Trennung der Wasseranteile anhand des Trocknungsverlaufes nicht mehr möglich ist. [1]

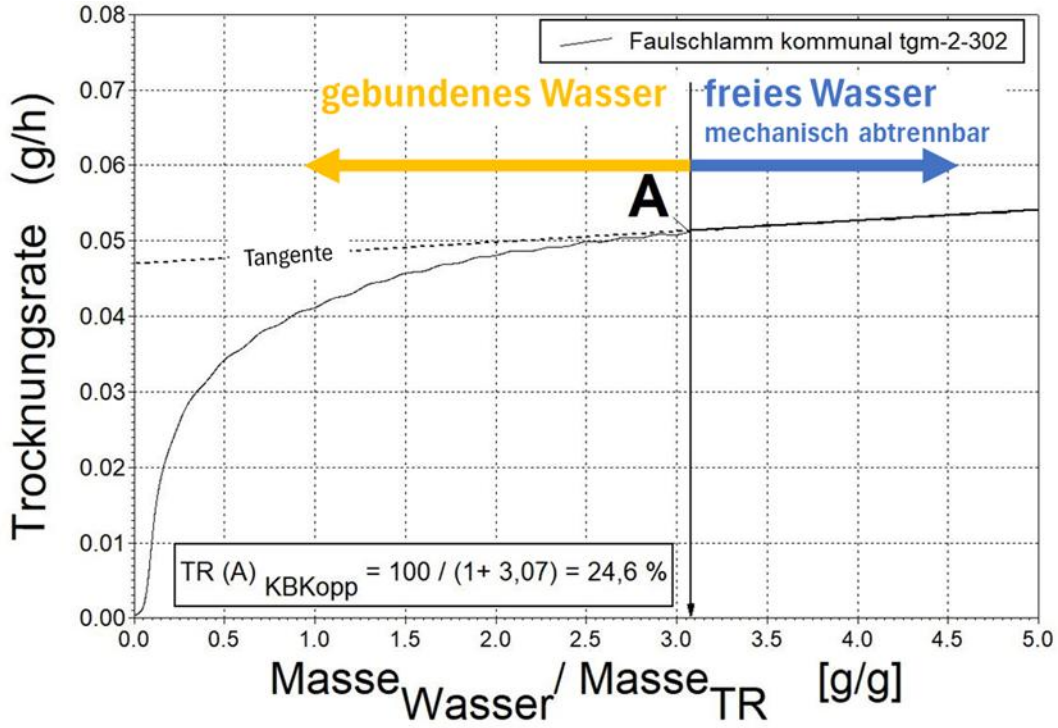


Abbildung B.2: Trocknungskurve bei der thermogravimetrischen Beurteilung der Wasserbindung ($TR(A)_{KBKopp}$ abgeleitet aus der Messung freien Wasseranteils) [1]

Von besonderem Interesse für die Entwässerung ist die exakte Bestimmung des freien Wasseranteils, d.h. Punkt A der Trocknungskurve (siehe z.B. Abbildung B.2). Solange freies Wasser in der Klärschlammprobe vorhanden ist, verläuft die Trocknungsrate linear. Als Trocknungsrate wird hierbei die Gewichtsabnahme des Schlammes pro Zeiteinheit bezeichnet. An Punkt A vermindert sich die Trocknungsrate aufgrund der stärkeren Bindungskräfte des kapillar gehaltenen Zwischenraumwassers an den Schlammpartikeln und die rechnerisch angelegte Tangente beschreibt den Kurvenverlauf nicht mehr. Aus dem Feuchtegehalt der Probe lässt sich auf den Feststoffgehalt des Schlammes $TR(A)_{KBKopp}$ schließen. Nach dem derzeitigen Stand des Wissens kennzeichnet das Ende des freien Wassers (Punkt A) den ersten Trocknungsabschnitt und die Grenze der maschinellen Entwässerung. [1]

Die Prognosegenauigkeit liegt laut DWA Merkblatt M-383 (2019) bei ± 0,5% TR (Abbildung B.3). [10] In Tabelle B.2 sind die Zielwerte für eine Entwässerung nach Stand der Technik für Dekanter und Kammerfilterpressen, Bandfilter- und Schneckenpressen, sowie Schlauchfilterpressen vergleichend zusammengefasst. [5] Ein Beispiel für den Einfluss der Durchsatzmenge bzw. der entwässerten Feststofffracht auf das Entwässerungsergebnis für eine Dekanterzentrifuge ist in Abbildung B.4 zu sehen. Sinnvoll ist es daher, die erreichte Entwässerungsleistung der Aggregate den unterschiedlichen Durchsatzmengen gegenüberzustellen. Eine

Optimierung der Schlammentwässerung und damit verbunden ein eventuell höherer Trockenrückstand im Austrag ist besonders vor dem Hintergrund steigender Entsorgungskosten wichtig [9], [12]. Die Durchsatzleistung zu reduzieren und entsprechend längere Laufzeiten in Kauf zu nehmen, stellt somit einen sinnvollen Optimierungsschritt dar. [11]

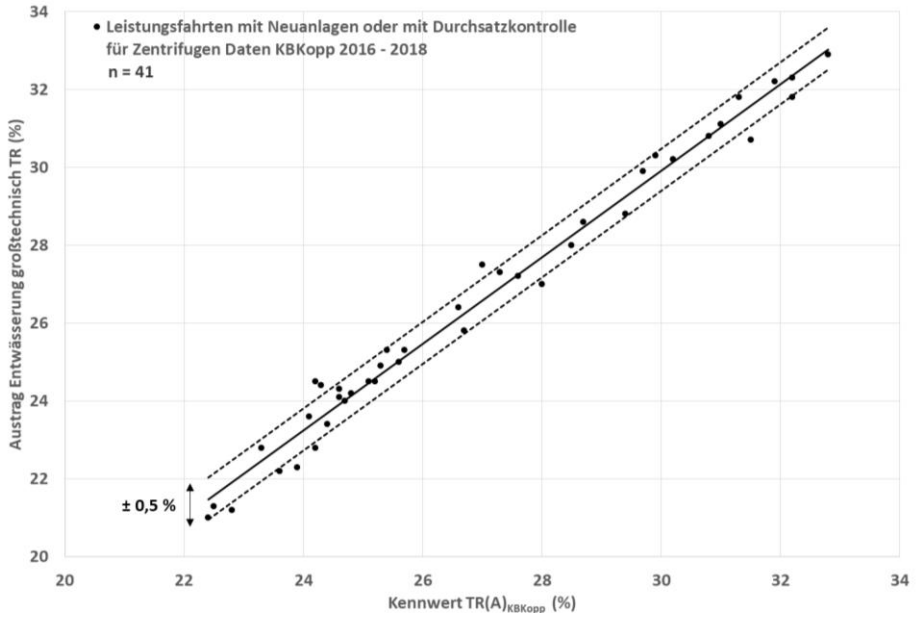


Abbildung B.3: Vergleich Kennwert TR(A) mit großtechnisch optimalen Entwässerungsergebnissen bei Zentrifugen [10]

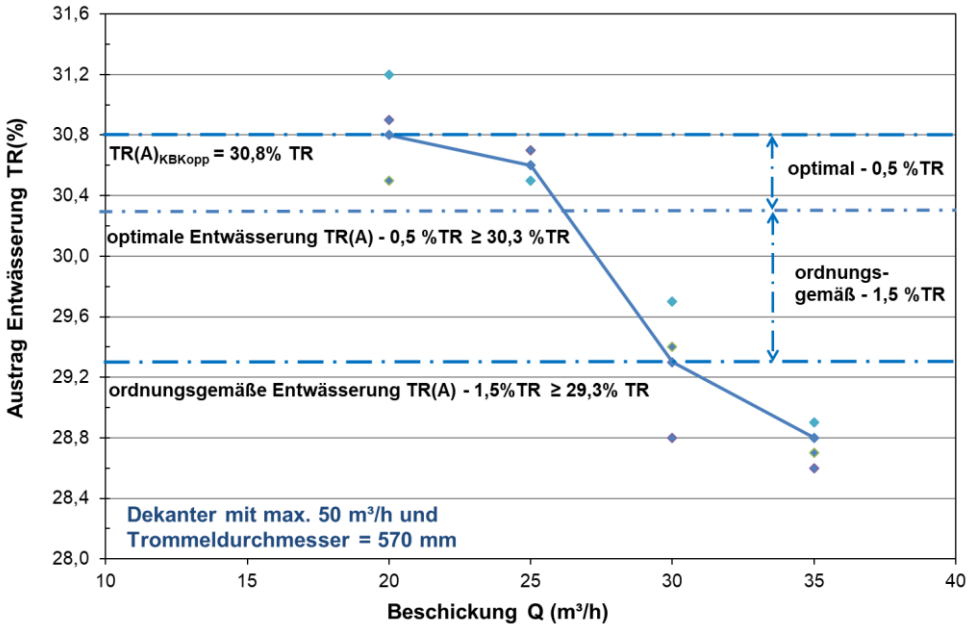


Abbildung B.4: Beispiel: Abhängigkeit des Feststoffgehaltes im Austrag zur Beschickungsmenge (Versuche KA Peine, 2017)

Tabelle B.2: Darstellung der Leistungsindikatoren bei der Klärschlammentwässerung [5]

Input	Prozessschritt	Output	Kennzahl und Dimension	Zielwert für den „Stand der Technik“
Faulschlamm	Beschickung des Aggregates	TR-Fracht	[kgTR/h]	kontinuierliche Frachtbeschickung
	Polymer Aufbereitung	Stammlösung	Reifezeit [min] Lösungsviskosität	45 min nach Befüllen Verbrauch binnen 1-4 h 2-Kammer-Batchanlage und Kontrolle der Lösungsviskosität
	Schlammkonditionierung	Polymerprodukt Dosis	Labor-& Betriebsversuche [kgWS/tTR]	Flockenstruktur scherstabil / druckstabil bei effizienter Dosierung
	Entwässerung	Energieverbrauch	[kWh/tTR]; [kWh/m³]	0,6-2,2 [kWh/m³] ** siehe Tabelle 3
	Entwässerung mit: **Dekanter**	entw. Schlamm	[% TR]	Abtrennung des freien Wassers; Erreichen TR(A)* AG > 95 % für stabilen Betrieb erforderlich
	Entwässerung mit: **Bandfilterpresse**	entw. Schlamm	[% TR]	Abtrennung des freien Wassers; TR(A)* – 2 % TR AG > 95 % für stabilen Betrieb erforderlich
	Entwässerung mit: **Schneckenpresse**	entw. Schlamm	[% TR]	Abtrennung des freien Wassers; TR(A)* – 2 % TR AG > 95 % für stabilen Betrieb erforderlich
	Entwässerung mit: **Schlauchfilterpresse**	entw. Schlamm	[% TR]	Abtrennung des freien Wassers; TR(A) + 1 % TR*** AG > 95 % für stabilen Betrieb erforderlich

* = oder anderer Prognosekennwerte (DWA M-383)
** = Energieverbrauch abhängig vom Aggregat siehe Tabelle 3
*** = aufgrund der hohen Scherkräfte bei der Entwässerung in der Schlauchfilterpresse ist der Bedarf an polymeren Flockungsmitteln erhöht

Einflussfaktoren auf die Wasserbindung eines Klärschlammes

Anteil der organischen Bestandteile

Die Abbildung B.5 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Glühverlust und dem Entwässerungskennwert $TR(A)_{KBKopp}$ für kommunale Faulschlämme. Je höher der Glühverlust in einer Schlammsuspension ist, desto geringer ist das erreichbare Entwässerungsergebnis. Die Messwerte streuen jedoch so sehr, dass eine Prognose des erreichbaren Entwässerungsergebnisses über den Glühverlust nicht möglich ist. [10] Dieser Zusammenhang ist übertragbar auf andere Schlämme, wie z.B. auch Überschussschlämme.

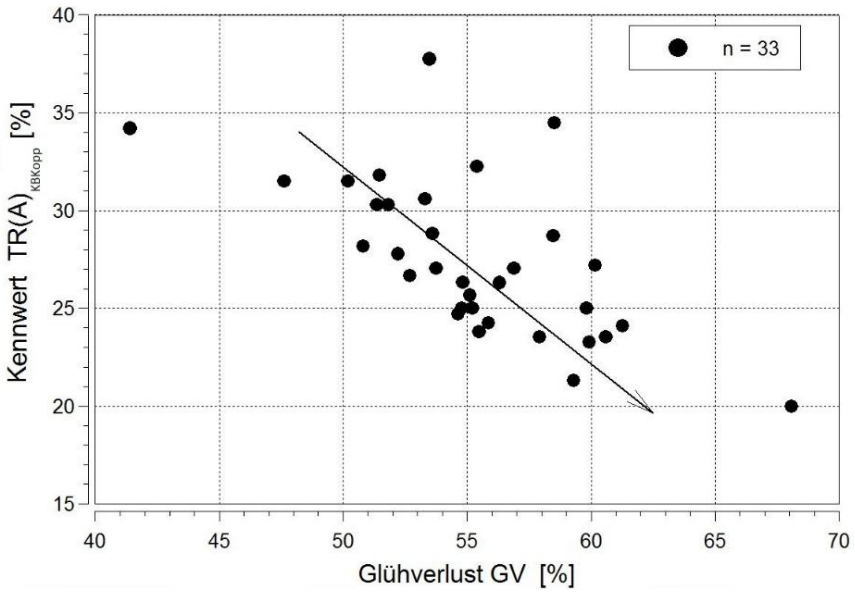


Abbildung B.5: Abhängigkeit des Kennwertes $TR(A)_{KBKopp}$ vom Glühverlust bei kommunalen Faulschlämmen [1]

Schlammart

Primärschlämme enthalten überwiegend Strukturstoffe, die gut entwässerbar sind. Überschussschlämme enthalten durch die Biomasse Proteine und EPS, welche hohe Wasserbindevermögen aufweisen. Insbesondere Exopolysaccharide (EPS) sind sehr voluminös und binden aufgrund ihrer starken Polarität viel Wasser. [10]

In der Tabelle B.3 werden statistische Daten in Abhängigkeit der Schlammart angegeben. Es handelt sich um Messdaten der Kläranlagenberatung Kopp, die im Zeitraum zwischen 2013 – 2019 aufgenommen wurden. Dabei wird deutlich, dass aerob stabilisierte Überschussschlämme eine geringere maximale Entwässerbarkeit aufweisen als Faulschlämme, die eine Mischung aus gefaultem Überschussschlamm und Primärschlamm enthalten. [13]

Tabelle B.3: Kenndaten kommunaler Klärschlämme, statistische Datenauswertung von Messwerten der Jahre 2013 – 2019, [13]

Schlammart	GV Ø (%)	(von-bis)	$TR(A)_{KBKopp}$ Ø (%)	(von-bis)	Wasserbindung Ø (g/g)	mw/goTM (von-bis)	Phosphat Ø (mg/l)	gel. (0,45µm) (von-bis)	Polymerbedarf Ø(KgWS/MgTM)	(von-bis)	Anzahl (n)
Faulschlamm	**61**	49-74	**26**	20-35	4,8	3,7-3,5	50	2-342	12	5- 21	298
ÜS sim.aerob stab.	**71**	60-79	**23**	17-26	4,7	3,8-6,5	**36**	2-138	6	3-10	48
									Abbaugrad oTR Ø (%)	(von-bis)	
ÜS vor Faulung	**73**	61-84	**-**	-	-	-	-	-			55
ÜS nach Faulung	61	53-74	**20**	15-23	6,46	5,0-8,9	**154**	16-490	35	24-54	36
PS vor Faulung	**82**	72-90	**-**	-	-	-	-	-			50
PS nach Faulung	59	50-69	**35**	32-40	3,09	2,4-3,6	**27**	2-55	62	45-76	34

Ortho-Phosphatkonzentration (PO_4P)

Die Wasserbindung im Klärschlamm wird ebenfalls durch die Phosphatkonzentration beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen großtechnisch erreichten Entwässerungsergebnissen sowie dem Kennwert $TR(A)_{KBKopp}$ und der PO_4P-Konzentration am Beispiel für Faulschlämme wird in Abbildung B.6 dargestellt.

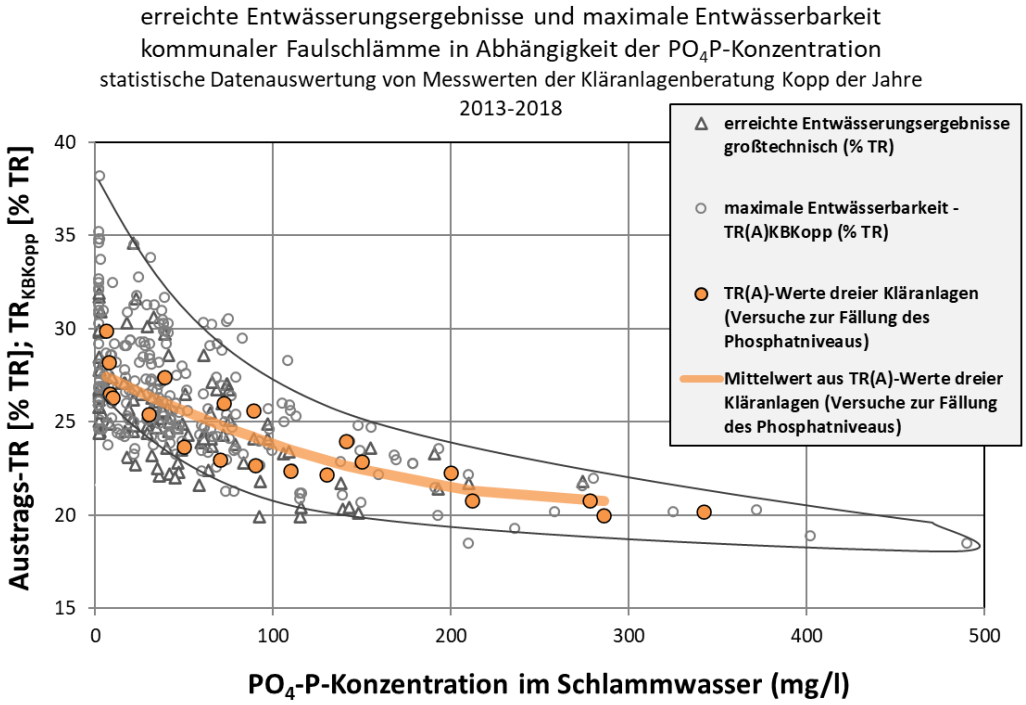


Abbildung B.6: Einfluss der Phosphatkonzentration auf das Entwässerungsergebnis [13]

Die Streuungsbreite ist hoch, da es sich um Klärschlämme verschiedener Kläranlagen, die unterschiedliche Glühverluste und Überschussschlammanteile aufweisen, handelt. Die Datenreihe mit den orangenen Punkten zeigt den TR(A)-Wert von Faulschlämmen dreier Kläranlagen, welche im Zusammenhang mit Versuchen zur Fällung des Phosphatniveau aufgenommen wurden. Dadurch ist der Einfluss durch den Glühverlust und den Überschussschlammanteil des Faulschlammes so weit minimiert, dass hauptsächlich der Einfluss der Phosphatkonzentration auf die maximale Entwässerbarkeit deutlich wird, hier dargestellt als orangene Kurve. [10], [13]

Folgende Aussage trifft ebenfalls für Überschussschlämme zu: Phosphate weisen eine hohe Wasserbindung auf, sodass Schlämme mit hoher Phosphatkonzentration eine geringere Entwässerbarkeit aufweisen.

Sandanteil

Ein hoher Sandanteil erhöht die mittlere Partikeldichte und dadurch das Entwässerungsergebnis. Entscheidend dabei ist die Teilchengrößenverteilung der Sandanteile. [10]

Handtuchtest zur Kontrolle des Entwässerungsergebnisses

Ein einfacher Schnelltest zur Bewertung des Feuchteanteils des Kuchens veranschaulicht, wie viel freies Wasser sich noch im Austrag befindet. Für den Schnelltest wird „eine Handvoll“ der Austragsprobe in einer dreilagigen Papierseite ausgedrückt. Je nachdem, wie viel freies Wasser noch enthalten ist, ist die dritte Lage trocken, nass oder weist nur einige nasse Stellen auf. Diese Methode dient der Veranschaulichung und ist nicht wissenschaftlich, Kann aber einfach vom Betriebspersonal zur Kontrolle der Entwässerungsleistung durchgeführt werden.

Polymerkonditionierung - Hintergrundinformationen

Ein optimales Entwässerungsergebnis wird technisch nur dann erreicht, wenn durch die Konditionierung die elektrostatischen Abstoßungskräfte der Schlammpartikeln kompensiert werden. Wenn keine Abstoßungskräfte mehr vorliegen, befindet sich die Suspension am isoelektrischen Punkt und das Strömungs- bzw. Zetapotential des Schlammwassers beträgt im Idealfall ±0 mV. Sowohl eine Unter- als auch vor allem eine Überflockung wirken sich negativ auf das Entwässerungsergebnis aus. Der Bedarf an polymeren Flockungsmitteln eines Schlammes entspricht der Menge, die zum Erreichen eines Ladungsausgleiches der anionischen Oberflächenladung der Klärschlammpartikeln benötigt wird. Betrieblich ist auf die Verwendung eines scherstabilen Produktes zu achten. [3]

Zur Bestimmung des Bedarfes an polymeren Flockungsmitteln wird das Strömungspotenzial gemessen. Die Messung erfolgt nach dem Prinzip des „streaming current detection“, der Methode des strömungsinduzierten Potenzials. Wird ein geladenes Teilchen einer Flüssigkeitsströmung ausgesetzt und am Mitfließen im wässrigen Medium gehindert, so wird die bewegliche äußere Gegenionenwolke ab einer Scherebene relativ zum Partikel selbst verschoben. [3] Diese Ladungsverschiebung oder Polarisierung wird Strömungspotenzial genannt. Es Kann über dem Strömungsbereich mit Hilfe von Elektroden abgegriffen werden. Die Eignung der Messgrößen des Strömungs- bzw. Zetapotenzials zur Ermittlung des Bedarfs an polymeren Flockungsmitteln ist gleichwertig (Abbildung B.7).

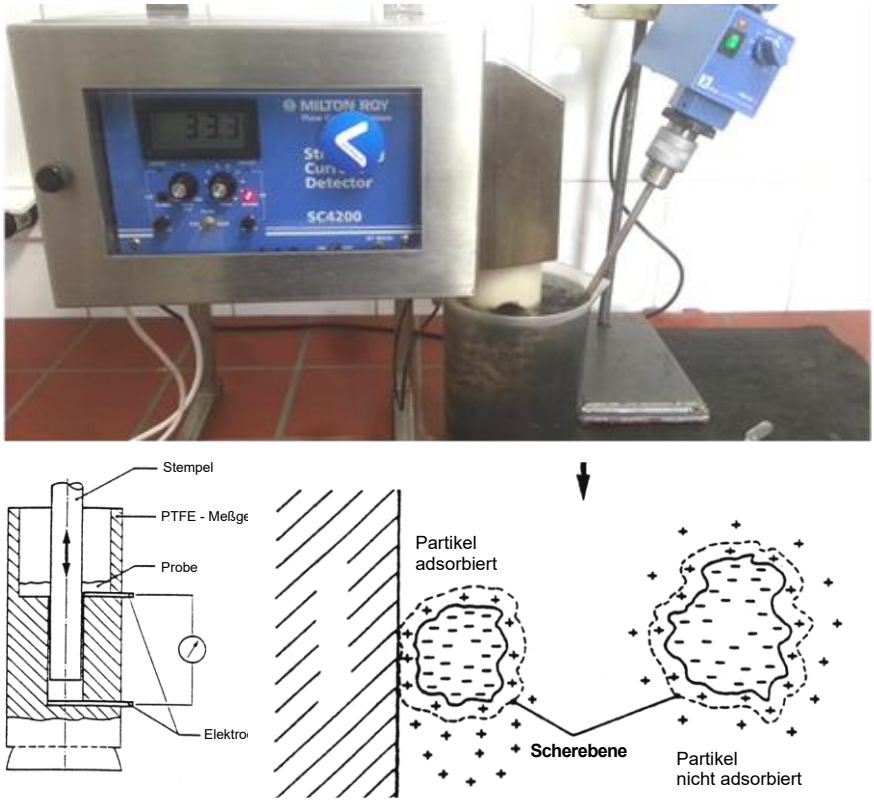


Abbildung B.7: Strömungspotentialmessgerät und Messzelle

Anhand des Kurvenverlaufes der Strömungspotentialmessung kann nicht nur die optimale Dosiermenge bestimmt werden. Der Verlauf der Titrationskurve ist abhängig von den Schlammeigenschaften, sowie von den chakteristischen Eigenschaften der verwendeten polymeren Flockungsmittel. Der Kurvenverlauf ab dem Zeitpunkt der Beendigung der Polymerzugabe erlaubt eine qualitative Einschätzung der Scherstabilität der gebildeten Schlammflocken. Die einwirkenden Scherkräfte werden dabei von dem im Messbecher befindlichen Rührgerät erzeugt.

Ist die Scherstabilität gegenüber den Scherkräften des Rührens gering, werden die gebildeten Flocken wieder zerrissen und die zuvor neutralisierten negativen Ladungen an der Oberfläche der Schlammpartikeln freigesetzt. Dies hat zur Folge, dass das gemessene Strömungspotential abfällt und die Messkurve eine negative Steigung annimmt [3] (vgl. Abbildung B.8).

Zum Ausgleich der Polymerdosis bei zu geringer Scherstabilität wurde in Abhängigkeit des Kurvenverlaufes ab Erreichen des höchsten Strömungspotentialmesswertes der Winkel für den Abfall der Titrationslinie errechnet. Als Vergleichszeitraum wurde für alle Kurven 400 Sekunden Scherphase ab dem o.g. Zeitpunkt gewählt. In Abhängigkeit des Winkels werden die Aufschläge wie folgt festgelegt.

Kriterium Scherstabilität:

Winkel	< 40 °	nicht empfohlen für den Einsatz mit Dekanter
Winkel	< 45° > 40°	Aufschlag 4,0 kgWS/tTR
Winkel	< 50° > 45°	Aufschlag 3,5 kgWS/tTR
Winkel	< 55° > 50°	Aufschlag 3,0 kgWS/tTR
Winkel	< 60° > 55°	Aufschlag 2,5 kgWS/tTR
Winkel	< 65° > 60°	Aufschlag 2,0 kgWS/tTR
Winkel	< 70° > 65°	Aufschlag 1,5 kgWS/tTR
Winkel	< 75° > 70°	Aufschlag 1,0 kgWS/tTR
Winkel	< 80° > 75°	Aufschlag 0,5 kgWS/tTR
Winkel	>80°	Aufschlag 0,0 kgWS/tTR

Da die Konditionierung eine Oberflächenreaktion ist, spielen die Partikelgröße und der Ladungsschlüssel des polymeren Flockungsmittels [4] eine Rolle. Neben den räumlichen Gegebenheiten ist der Ladungszustand des Schlammes zu betrachten.

Die anionische Ladung eines Schlammes setzt sich aus gelösten Ladungsträgern (Proteine) und der Ladung der Schlammpartikeln zusammen. Die Ladung ist abhängig vom organischen Anteil (GV) und vor allem vom Gehalt an EPS und Proteinen. Dieser wird im Wesentlichen durch den ÜS-Anteil und ggf. durch Co-Substrate bestimmt.

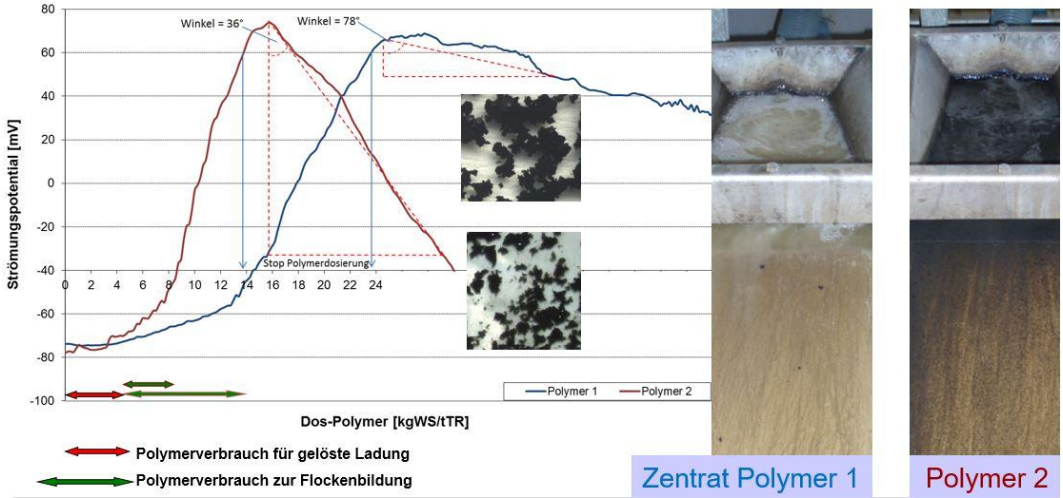


Abbildung B.8: Bsp.: Ladungstitrationskurven eines Faulschlammes mit einem scherstabilen und einem nicht scherstabilen Polymerprodukt

Das maximal erreichbare Entwässerungsergebnis $TR(A)_{KBKopp}$ ist jedoch letztlich unabhängig von der Polymermenge und dem Polymerprodukt (siehe Abbildung B.9), da durch die Konditionierung nur die Wasserabgabegeschwindigkeit jedoch

nicht die freie Wassermenge beeinflusst wird. [1] Grundvoraussetzung für eine optimale Schlammkonditionierung ist die sachgerechte Polymeraufbereitung. [4], [10]

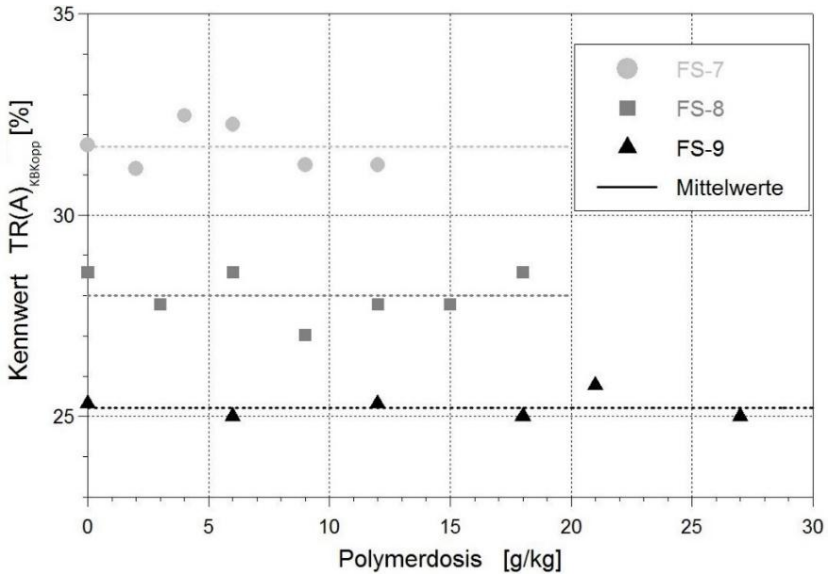


Abbildung B.9: Kennwert $TR(A)_{KBKopp}$ in Abhängigkeit der Polymerdosis [1]

Abscheidegrad

Beschreibung des Abscheidegrades als Zitat aus DWA-M 383 Kapitel 4.2.14 [10]. „Der Abscheidegrad ist das Verhältnis der ausgetragenen zu der zugeführten Feststofffracht. Der Abscheidegrad ist ein Maß für den Erfolg der Fest-Flüssig-Trennung. Der Feststoffkonzentration im abgetrennten Schlammwasser (Filtrat oder Zentrat) wird als Trockensubstanzkonzentration C_{TS} (g/l) nach DIN 38414-10 Beiblatt 1: 2005 von der über Papierfilter („schnell filtrierend, ca. 9 s bis 12 s Filtriergeschwindigkeit, früherer Fachbegriff „Schwarzbandfilter“) abfiltrierten Probe bestimmt. Bei filtrierenden Entwässerungsmaschinen (z.B. Kammerfilterpresse oder Bandfilterpresse) werden Abscheidegrade von nahezu 100 % erreicht. Zentrifugen können unter günstigen Umständen Abscheidegerade von über 98 % erreichen. Abscheidegrade bei Dekantern von unter 95 % führen zu einer erheblichen Rückbelastung der Kläranlage mit feinsten Partikeln. Da die Abscheidegrade innerhalb kurzer Zeit stark schwanken können, sollte die Probenahme des Schlammwassers als Mischprobe über einen längeren Zeitraum erfolgen.“

Es werden Rundfilter des Typ MN 640 w für die Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe verwendet. Diese sind schnell filtrierend, haben eine Filtrationszeit nach DIN 53137 von 9 s und weisen einen Rückhaltebereich von > 8 µm auf.

Der Abscheidegrad wird mit der nachfolgenden Gleichung berechnet:

$$AG = \frac{(TM_{Zu} - TM_{Ze}) * TM_{Aus}}{(TM_{Aus} - TM_{Ze}) * TM_{Zu}} * 100\ [\%]$$

AG	[%]	Feststoff-Abscheidegrad
TM_{Zu}	[g/l]	Zulauf Trockenmasse
TM_{Ze}	[g/l]	Zentrat / Filtrat Trockenmasse
TM_{Aus}	[g/l]	Austrag Trockenmasse (~ 10 x %TR)

Der Abscheidegrad hat auch einen nennenswerten einen Einfluss auf den erreichbaren TR im Austrag. Abbildung B.10 zeigt Untersuchungen des TR(A)-Wertes bei unterschiedlichen Abscheidegraden. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, den Abscheidegrad aus 20-30 min Sammelproben zu bestimmen, so dass Verzerrungen der Ergebnisse durch kurzfristige Schwankungen des Abscheidegrades z.B. bei Leistungsfahrten vermieden werden.

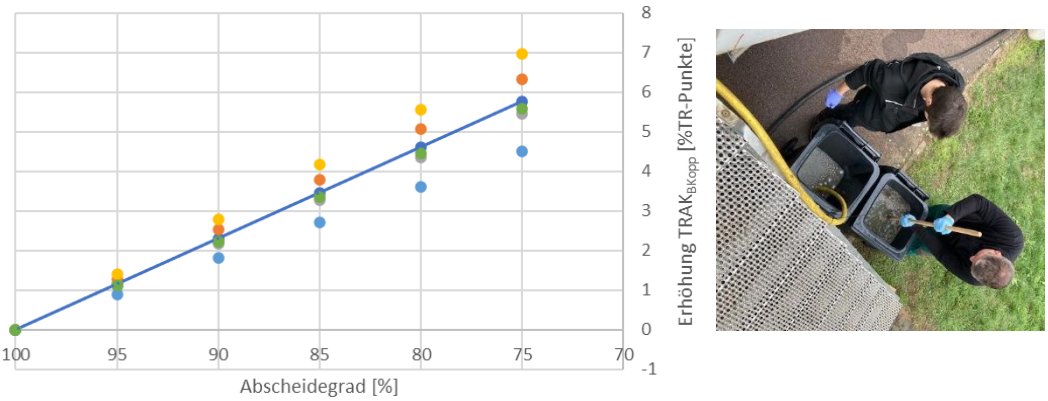


Abbildung B.10: Erhöhung der max. Entwässerbarkeit TR(A)$_{KBKopp}$ in Abhängigkeit des Abscheidegrades

Bestimmung des Sandanteils gemäß DWA-M 383

Zur quantitativen Beurteilung des Sandanteils in einem Klärschlamm werden zunächst die Feststoffkonzentration und anschließend der Glührückstand als Maß für den mineralischen Anteil im Muffelofen nach DIN/EN ermittelt. Mit der Asche des Glührückstands wird dann eine spezielle Untersuchung des salzsäureunlöslichen Anteils als Maß für den Sandanteil durchgeführt. Hierzu wird die Asche mit einer technischen Salzsäure über einem Schwarzbandfilter bis zur Farbkonstanz mehrmals ausgewaschen und anschließend im Muffelofen bei 550 °C geglüht. Es wird davon ausgegangen, dass es sich bei dem anfallenden Rückstand um den Sandanteil handelt. Der salzsäureunlösliche Anteil wird bei der Auswertung auf den

Glührückstand (% salzsäureunlöslicher Anteil von GR) oder auf die Feststoffkonzentration (% salzsäureunlöslicher Anteil von TR) bezogen. [10]

Tabelle B.4: Kennwerte von Faulschlamm
(Quelle: Datenmaterial Ingenieurbüro Dr. Denkert) DWA M383

Kennwert	Einheit	Anzahl	Min	Max	Mittelwert	Median	15%-Perzentil	85%-Perzentil
Feststoffkonzentration C_{TS}	g/l	828	11,2	93,0	29,6	27,3	20,3	37,5
Glühverlust *GV*	%	697	40,1	70,2	54,6	55,1	48,9	60,5
Sandanteil (salzsäureunlöslicher Anteil)	% v. *GR*	580	2,1	72,9	32,7	31,6	19,7	45,4
Organische Säuren (Essigsäureäquivalent $HA_{c\text{-}äq}$)	mg/l	546	3,7	3.815,0	207,4	161,4	48,9	312,2
Säurekapazität $K_{S4,3}$	mmol/l	565	6,4	163,3	76,7	75,9	53,1	104,4
Basenkapazität $K_{B8,2}$	mmol/l	258	0,3	14,0	5,1	4,6	2,6	7,5
pH-Wert	-	795	6,1	8,3	7,4	7,4	7,2	7,6
Elektrische Leitfähigkeit	mS/cm	790	1,1	15,2	7,2	7,1	5,1	9,5
Laborschleuder-Austrag *LSA* IV	g/l	3.185	34,2	284,2	98,5	93,4	76,3	117,4
Spez. *CST*-Wert	s/kg oTM	757	1,0	50,2	9,8	8,4	3,8	15,3
Spez. lipophile Stoffe	g/kg oTM	279	2,4	338,6	24,2	20,5	9,3	35,3
Spez. Protein/ Eiweiß-Anteil	g/kg oTM	192	0,6	556,5	82,6	66,5	27,0	114,5
Chlorid-Konzentration	mg/l	207	9,1	993,0	247,2	171,0	101,9	438,9

5. Literatur

[1] Kopp, J., Dissertation, Wasseranteile in Schlammsuspensionen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der TU-Braunschweig, Schriftreihe, Band 66, 2001

[2] Merkblatt DWA-M 383 (2008) „Kennwerte der Klärschlammentwässerung"; DWA Verlag Hennef, ISBN 978-3-941089-29-7

[3] DWA-M 366 (2013) «Maschinelle Schlammentwässerung» DWA Hennef, Germany ISBN: 978-3-942964-05-0

[4] DWA-M 350 (2014) „Aufbereitung und Einsatz von polymeren Flockungsmitteln zur Klärschlammkonditionierung", DWA Hennef, Germany ISBN 978-3-942964-79-1

[5] Kuhn, Rensch, Haueter, Kopp (2013) Stand der Technik für die (mechanische) Entwässerung von Klärschlamm Ermittlung und Beschreibung, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft; http://www.awel.zh.ch > Betriebe und Anlagen > Abfallanlagen > Stand der Technik> Stand der Technik für die mechanische Entwässerung von Klärschlamm, 2013

[6] Dittmann, M. et. Al, European Biosolids and Organic Resources Conference 13 – 14th November 2018, Leeds, REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND IMPROVING SLUDGE DEWATERABILITY WITH VACUUM DEGASSING OF DIGESTED SLUDGE

[7] EWERT, W., (2006): Betriebliche Probleme durch Inkrustationen nehmen zu – Gründe und Abhilfemöglichkeiten. In: 39. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft 2006, GWA Nr. 202, S. 61/1–61/14

[8] KOPP, J. (2017): Düngemittelverordnung und Polymereinsatz – Hinweise zum optimalen Einsatz und zur Aufbereitung. DWA-Klärschlammtage, 20.-29.06.2017 in Würzburg

[9] PFI, 2018: Beispielhafte Verteilung der Jahreskosten der maschinellen Entwässerung für eine Zentrifugenanlage, PFI Planungsgemeinschaft GmbH & Co. KG, 2018, Prof. Dr. J. Müller-Schaper (im Vortag Kopp, Vortag vorher Bremen 2016)

[10] Merkblatt DWA-M 383 (2019) „Kennwerte der Klärschlammentwässerung"; DWA Verlag Hennef, ISBN 978-3-941089-29-7

[11] Kopp, J. (2018) Arbeitsbericht KEK 1.5 3 Verfahrenstechnik – Schlammanfall Stabilisierung - Entwässerung - Trocknung - Rückbelastung, PERSPEKTIVEN DER KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG, 04. - 05. SEPTEMBER 2018

[12] Otte-Witte, R. (2018) Transportlogistik - Zwischenspeicherung, Verladung, Transport, Annahme - PERSPEKTIVEN DER KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG, 04. - 05. SEPTEMBER 2018

[13] Kopp, J., „Wie tickt Schlamm": Einflüsse auf die Entwässerbarkeit von kommunalen Klärschlämmen - Ein quantifizierender Modellansatz, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall – 2019 (66) – Nr.8, S. 634 – 642

Weitere Berichte der DWA-Arbeitsgruppe KEK 1.5 „Übergreifende Fragestellungen der Klärschlammbehandlung und -verwertung auf Kläranlagen kleiner bis mittlerer Größe" sind in den Ausgaben der Korrespondenz Abwasser ab KA-12/2018 zu finden.