



Zentrum für Innovative
AbWassertechnologien
an der TU Kaiserslautern



Siedlungswasser-
wirtschaft und
Wasserbau

**Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und
Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der
Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung
in Rheinland-Pfalz**



- ZEBRAS -

im Auftrag des
*Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten (MUEEF) des Landes
Rheinland-Pfalz*


Datenkatalog

Juli 2018

Projektpartner

	<p>Zentrum für innovative AbWassertechnologien an der Technischen Universität Kaiserslautern Paul-Ehrlich-Str. 14 67663 Kaiserslautern</p>	<p>Dr.-Ing. Henning Knerr Dipl.-Ing. Timo Dilly Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt</p>
	<p>Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Wasserbau Universität Luxembourg Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Kommunikation Campus Kirchberg L-1359 Luxembourg</p>	<p>Prof. Dr.-Ing. Joachim Hansen Dr.-Ing. Sebastian Hien</p>

Im Unterauftrag

	<p>Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH Segbachstr. 9 56743 Thür</p>	<p>Dr.-Ing. Klaus Siekmann Dipl.-Ing. Jürgen Jakob Dr.-Ing. Thomas Siekmann</p>
---	--	---

Zitiervorschlag

Schmitt, T. G.; Knerr, H.; Dilly, T. C.; Hansen, J.; Hien, S.; Siekmann, T.: „Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz, ZEBRAS“. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten (MUEEF) des Landes Rheinland-Pfalz. Deutschland. Datenkatalog 2018.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	IV
1 EW ₁₂₀ : Einwohnerwert bezogen auf die CSB-Fracht (A.1).....	1
2 $b_{TM,PS,d}$: Einwohnerspezifischer Primärschlammanfall (A.1)	2
3 t_{VK} : Aufenthaltszeit in der Vorklärung (A.1).....	3
4 C:N-Verhältnis im Zulauf zur Belebung (A.4).....	4
5 $B_{TM,PS,NEU}$: Primärschlammanfall (A.4)	6
6 $t_{TS,vorh.}$: Vorhandenes Schlammalter in der Belebung (B.1).....	7
7 $t_{TS,erf.}$: Erforderliches Schlammalter (B.2)	8
8 Überschlägige Ermittlung des benötigten Feststoffgehalts in der Belebung (B.2)	12
9 t_{FB} : Faulzeit (D.2/F.1)	14
10 Y_{FG} : spezifische Faulgasproduktion (D.1).....	16
11 η_{oTM} : Abbaugrad der organischen Feststoffe bei der Faulung (D.4)	17
12 Bestimmung des max. Inputs zur Ausnutzung der freien Kapazitäten (F.2)	18
13 Bestimmung der organischen Schlammbelastung durch leicht abbaubare Stoffe (F.3).....	19
14 Faulgasproduktion (G.1)	21
15 Max. täglicher Gasverbrauch der KWK-Anlage (G.2)	22
16 $\eta_{KWK,el}$, g_{CH4} und E_{Bedarf} (G.3)	23
17 Ermittlung des elektrischen Wirkungsgrads:.....	24
18 Literaturverzeichnis (siehe Schlussbericht).....	25

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius (Einheit)
µm	Mikrometer (Einheit)
a	Jahr (Einheit)
BB	Belebungsbecken
B _{d,BSB,Z}	BSB ₅ -Tagesfracht im Zulauf zur Kläranlage in kg /d
B _{d,BSB,ZB}	BSB ₅ -Tagesfracht im Zulauf der biologischen Stufe in kg/d
B _{d,TS,ZB}	Trockensubstanzfracht im Zulauf zur biologischen Stufe in kg/d
BHKW	Blockheizkraftwerk
B _{I.oTMN,FB}	Schlammbelastung in der Faulung durch leicht abbaubare organische Stoffe in kg oTM _{abb} /(kg oTM·d)
BOD	biochemical oxygen demand (entspricht BSB ₅)
B _{oTM,Fremd(ÜSS)}	organische Trockenmasse im Fremdschlamm (Satellitenanlage ohne Vorklärung) in kg oTM/d
B _{R.I.oTM,FB}	Raumbelastung in der Faulung durch leicht abbaubare organische Stoffe in kg oTM _{abb} /(m ³ ·d)
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
b _{TM,E,PS,d}	einwohnerspezifische Primärschlammanfall in g TM/(E·d)
b _{TM,E,ÜSS,d}	einwohnerspezifische Überschlammproduktion in g TM/(E·d)
B _{TM,PS,d}	tägliche Primärschlamm-Fracht angegeben als Trockenmasse in kg/d
B _{TM,ÜSS,d}	tägliche Überschussschlamm-Fracht angegeben als Trockenmasse in kg/d
C:N-Verhältnis	Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff
C _{CSB,24h,Z}	CSB-Konzentration aus durchflussproportionalen 24h-Mischproben im Zulauf der Kläranlage in mg/l
C _{CSB,ZB}	Konzentration des CSB in der homogenisierten Probe im Zulauf zur biologischen Stufe in mg/l
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
C _{P,ZB}	Konzentration des Phosphors in der homogenisierten Probe als Phosphor im Zulauf der biologischen Stufe in mg/l
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSB _{ZB}	Chemischer Sauerstoffbedarf im Zulauf zur Belegung in mg/l
C _{TKN,ZB}	Konzentration des Kjeldahlstickstoffs in der homogenisierten Probe
d	Tag (Einheit)
DESI	Desintegration
E	Einwohner (Einheit)
E _{Bedarf}	Gesamtstrombedarf der Kläranlage
E _{Bel}	Energieverbrauch der Belüftung
e _{Bel}	einwohnerspezifischer Energieverbrauch der Belüftung
e _{FG}	einwohnerspezifische Faulgasanfall
E _{ges}	Gesamtstromverbrauch der Kläranlage
e _{ges}	einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch
E-Klär	Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende
E _{KWK,el}	jährliche elektrische Stromproduktion der KWK-Anlage
E _{Prim}	Primärenergiegehalt
ESiTI	Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch
EV _{el}	Elektrischer Eigenversorgungsgrad
EW	Einwohnerwert in E

EW ₁₂₀	Einwohnerwerte bezogen auf 120 CSB g/(E·d)
g	Gramm (Einheit)
g _{CH4}	Volumenanteil des Methans am Biogasvolumen
GK	Größenklasse
GV	Glühverlust in %
GWh _{el}	Gigawattstunde elektrischer Strom (Einheit)
h	Stunde (Einheit)
Input _{Substrat}	Input zum Faulbehälter in m ³ (Primärschlamm + Überschussschlamm + Fremdschlamm + Co-Substrate)
KA	Kläranlage
kW _{el}	Kilowatt (Einheit)
kWh	Kilowattstunde (Einheit)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
l	Liter (Einheit)
m ³	Kubikmeter (Einheit)
mg	Milligramm (Einheit)
M _{TS, BB, erf.}	erforderliche Masse Feststoffe im Belebungsbecken in kg
MUEEF	Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz
MÜSE	Mechanische Überschussschlamm Entwässerung
MW	Megawatt (Einheit)
n	Anzahl
N ₂	Stickstoff
NAwaS	Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz
η _{elektrisch}	elektrischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage
N _{ges}	Gesamtstickstoff
NH ₄ ⁺	Ammonium
η _{KWK,el}	elektrischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage
NO ₂	Nitrit
NO ₃ ⁻	Nitrat
η _{thermisch}	thermischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage
η _{VK}	Abscheideleistung in der Vorklärung in %
N _{ZB}	Stickstoff im Zulauf der biologischen Stufe in mg/l
oTM	Organische Trockenmasse in kg/d
oTM _{abb}	Organische Trockenmasse (abbaubar) in kg/d
oTM _{zu}	Organische Trockenmasse im Zulauf zur Faulung in kg/d
oTR	Organischer Trockenrückstand in %
oTR _{zu}	Organische Trockenrückstand im Zulauf zur Faulung in %
OV _d	tägliche Sauerstoffbedarf in kg/d
P _{ges}	Gesamtphosphor
PS	Primärschlamm
Q _{d,z}	Zufluss im Zulauf der Kläranlage in m ³ /d
Q _{FG,a}	jährliche Faulgasanfall in m ³
Q _{FG,d}	täglicher Faulgasanfall in m ³
Q _{FS,d}	mittlere tägliche Fremdschlammmenge in m ³ /d
Q _{PS,d}	mittlere tägliche Primärschlammmenge in m ³ /d
Q _{RoS,d}	mittlere tägliche Rohschlammmenge in m ³ /d
Q _{T,d,aM}	täglicher Abwasserabfluss bei Trockenwetter im Jahresmittel in m ³ /d
Q _{ÜSS,d}	mittlere tägliche Überschussschlammmenge in m ³ /d
Q _{V,KWK,max.}	max. täglicher Gasverbrauch der KWK-Anlage in m ³ /d
rd.	rund

RLP	Rheinland-Pfalz
RoS	Rohschlamm
SBC	Semizentralen Schlammbehandlungszentren
$S_{BSB,ZB}$	Konzentration des gelösten BSB in der mit 0,45 μm filtrierten Probe im Zulauf zur biologischen Stufe in mg/l
$S_{CSB,ZB}$	Konzentration des gelösten CSB in der mit 0,45 μm filtrierten Probe im Zulauf zur biologischen Stufe in mg/l
$S_{NH_4,ZB}$	Konzentration des Ammoniumstickstoffs in der filtrierten Probe als Stickstoff im Zulauf der biologischen Stufe in mg/l
$S_{NO_3,ZB}$	Konzentration des Nitratstickstoffs in der filtrierten Probe als Stickstoff im Zulauf der biologischen Stufe in mg/l
t_{FB}	Faulzeit (hydraulische Aufenthaltszeit) in d
TKN	Kjedahl-Stickstoff
TM	Trockenmasse bzw. Trockenmasse in kg
t_N	Belüftungsdauer für die Nitrifikation bei einer intermittierenden Belüftung in h
TR	Trockenrückstand in %
TS	Trockensubstanz (Masse des Trockenrückstands, filtrierte Probe) in g
TS_{BB}	Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken in kg/m^3
TSS	total suspended solid (entspricht Trockensubstanz)
$t_{TS,(\text{gesamt})\text{vorh.}}$	Vorhandenes Gesamtschlammalter in d
$t_{TS,\text{aerob,erf.}}$	Erforderliches aerobes Schlammalter in d
$t_{TS,\text{Bem}}$	Bemessungsschlammalter in d
$t_{TS,\text{erf.}}$	erforderliches Schlammalter in d
$t_{TS,\text{vorh.}}$	vorhandenes Schlammalter in d
t_{VK}	Aufenthaltszeit in der Vorklärung in h
$\dot{U}_{S,C,BSB}$	spezifische Überschussschlammproduktion nach ATV-DVWK A 131 (2000)
ÜSS	Überschussschlamm
V_{BB}	Belebungsbeckenvolumen in m^3
$V_{BB,\text{erf.}}$	erforderliches Belebungsbeckenvolumen in m^3
$V_{FB,\text{ges}}$	Gesamtvolumen der Faulbehälter in m^3
V_{GS}	Volumen des Gasspeichers in m^3
V_{VK}	Volumen des Vorklärbeckens in m^3
$X_{TS,ZB}$	Konzentration der mit 0,45 μm Membranfilter abfiltrierbaren Stoffe nach Trocknung bei 105°C
Y_{FG}	spezifische Faulgasproduktion in $\text{NI}/\text{kg oTR}_{Zu}$
ZEBRA	Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz

1 **EW₁₂₀: Einwohnerwert bezogen auf die CSB-Fracht (A.1)**

Um die tatsächliche Anschlussbelastung zu ermitteln wird im Einklang mit dem Arbeitsblatt DWA-A 216 (DWA 2015d) der Einwohnerwert über die mittlere tägliche CSB-Schmutzfracht im Zulauf der Kläranlage und die einwohnerspezifische CSB-Fracht von 120 g/(E·d) bestimmt. Die maßgebende mittlere Fracht ist auf der Basis der erhobenen CSB-Konzentration aus durchflussproportionalen 24h-Mischproben zu ermitteln. Dafür liegen in der Regel bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 5.001 E bis 50.000 E mindestens 24 Messwerte und bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße größer 50.000 E mindestens 52 Messwerte für das Bezugsjahr vor.

(1.1)

$$\begin{aligned} \text{CSB-Fracht} &= (\text{CSB-Zulauf-Konzentration 1 [mg/l]} \cdot \text{Zulaufmenge 1 [m}^3\text{/d]} + \\ &\quad \text{CSB-Zulauf-Konzentration 2 [mg/l]} \cdot \text{Zulaufmenge 2 [m}^3\text{/d]} + \\ &\quad \text{CSB-Zulauf-Konzentration 3 [mg/l]} \cdot \text{Zulaufmenge 3 [m}^3\text{/d]} + \dots\dots\dots) / \text{Anzahl der Messwerte} \\ &= \underline{\hspace{10em}} \text{ [kg/d]} \end{aligned}$$

(1.2)

$$\begin{aligned} \text{EW}_{120} : \text{ Einwohnerwert bezogen auf die CSB-Fracht} &= \text{CSB-Fracht [kg/d]} / 0,12 \text{ [kg/(E·d)]} \\ &= \underline{\hspace{10em}} \text{ [E]} \end{aligned}$$

Hinweis:

Es ist zu beachten, dass keine direkte Vergleichbarkeit mit Datenquellen des DWA-Leistungsvergleichs möglich ist, da die mittleren CSB-Belastungen bei den Leistungsvergleichen aus den Jahresmittelwerten der CSB-Konzentration und der Jahresabwassermenge berechnet werden. Dadurch ergeben sich in der Regel höhere Einwohnerwerte. Aus der Schlammeindickung und Schlamm Trocknung kann über Prozesswässer eine erhebliche Menge an CSB in den Zulauf eintragen werden. Die Messstelle zur Bestimmung der CSB-Zulaufkonzentration sollte daher vor der Zugabe vom Prozesswasser liegen. Ist die CSB-Rückbelastung bei der CSB-Bestimmung im Zulauf enthalten, wird empfohlen diese vor der Bestimmung der Einwohnerwerte abzuziehen. Dabei kann die Rückbelastung mit ca. 10% der CSB-Zulauffracht abgeschätzt werden (Neis et al. 1994; Cornel 1997). Dies soll jedoch nur dann erfolgen, wenn das Prozesswasser bei den 24-h Mischproben der CSB-Zulaufkonzentration enthalten ist.

(1.3)

$$\begin{aligned} \text{Einwohnerwert (ohne Prozesswasser)} &= \text{Einwohnerwert bezogen auf die CSB-Fracht} / 1,1 \\ &= \underline{\hspace{10em}} \text{ [E]} \end{aligned}$$

2 $b_{TM,PS,d}$: Einwohnerspezifischer Primärschlammanfall (A.1)

Zur Berechnung der durchschnittlich täglichen Primärschlamm Trockenmasse soll der mittlere Trockenrückstand des Primärschlammes aus dem Bezugsjahr herangezogen werden. Es wird empfohlen die TR-Bestimmung im Primärschlamm regelmäßig durchzuführen und dabei auch unterschiedliche Wochentage abzudecken. Als Richtwert können die Mindesthäufigkeiten zur Durchführung der 24h-Mischproben bezogen Ausbaugröße entsprechend ATV-DVWK (2001) dienen. Demnach sollte zur Erstellung einer Massebilanz der Schlammbehandlung min. zweimal pro Monat die Trockenrückstand und der Glühverluste der Schlammströme ermittelt werden.

Die Dichte des Primärschlammes kann mit 1 kg/l angenommen werden. Die mittlere tägliche Primärschlammfracht ist daher über den Mittelwert des Trockrückstandes und der jährlichen Primärschlammmenge in m³ wie folgt zu ermitteln.

(2.1)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{b_{TM,PS,d} :} & & & = (\text{Jährlicher Primärschlammabzug [m}^3\text{/a]} \cdot 1000 / 365) \\
 \mathbf{Primärschlammfracht} & & & \cdot \text{Mittlerer Trockenrückstand des Primärschlammes [\%]} \\
 & & & = \underline{\hspace{10em}} \mathbf{[kg/d]}
 \end{aligned}$$

(2.2)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{b_{TM,E,PS,d} :} & & & = 1000 \cdot (\text{Primärschlammfracht [kg/d]} / \\
 \mathbf{Einwohnerspezifischer} & & & \text{Einwohnerwert bezogen auf die CSB- Fracht [E])} \\
 \mathbf{Primärschlammfall} & & & \\
 & & & = \underline{\hspace{10em}} \mathbf{[g/(E \cdot d)]}
 \end{aligned}$$

3 t_{VK} : Aufenthaltszeit in der Vorklärung (A.1)

Zur Berechnung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung wird der abgefragte mittlere Trockenwetterzufluss ($Q_{T,d,aM}$) und das aktivierte Volumen der Vorklärbecken (V_{VK}) herangezogen.

(3.1)

$$\begin{aligned} \underline{t_{VK}}: \text{Aufenthaltszeit in der} \\ \text{Vorklärung} &= \frac{\text{Aktiviertes Vorklärbeckenvolumen [m}^3\text{]}}{\text{Trockenwetterzufluss im Jahresmittel [m}^3\text{/d]}/24 \frac{\text{h}}{\text{d}}} \\ &= \underline{\hspace{10em}} \text{ [h]} \end{aligned}$$

4 C:N-Verhältnis im Zulauf zur Belebung (A.4)

Änderung des C/N-Verhältnisses in Folge einer Anpassung der mechanischen Abwasserreinigung:

Tabelle A gibt in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren die zu erwarteten Abscheideleistungen bzw. den Reduktionsgrad an. Mithilfe der Tabelle können somit die zu erwarteten Konzentrationen im Zulauf des Belebungsbeckens unter Verwendung der Konzentrationen im Zulauf zur Kläranlage berechnet werden.

Die C:N-Verhältnisse können demnach sowohl über die ermittelte BSB₅-oder CSB-Konzentrationen bestimmt werden.

Tabelle A: Abscheideleistungen in der Vorklärung in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit bezogen auf den mittleren Tagesdurchfluss bei Trockenwetter und Reduktionsgrade in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren in %

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)			Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 h – 1h	1,5 h – 2h	>2,5 h		
BSB ₅	25 ¹	35 ¹	40 ²	70 ⁴	75 ⁸
CSB	30 ³	35 ³	40 ³	60 ⁵	70 ⁶
TS	50 ³	60 ³	65 ³	80 ⁴	95 ⁶
N _{ges}	10 ³	10 ³	10 ³	38 ⁴	20 ⁷
P _{ges}	10 ³	10 ³	10 ³	80 ⁴	80 ⁷

¹ (ATV-DVWK 2000)

² (Abwassertechnische Vereinigung e.V. 1997)

³ (DWA 2016)

⁴ (Teleman et al. 2004; Poon und Chu 1999) Mittelwerte

⁵ (Pinnekamp 2017b)

⁶ (Horn et al. 2009)

⁷ (Remy et al. 2014) Mittelwert

⁸ Annahme

Änderung des C/N-Verhältnisses in Folge einer Klärschlammdeintegration:

Nach Cornel (1997) beträgt die Ammonium-Rückbelastung aus der Schlammbehandlung ca. 20% im Verhältnis zur Zulauffracht und von der DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 wird die Stickstoffrückbelastung mit 15 % bis 25 % bezogen auf den Gesamtstickstoff angegeben (ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.3 2000). Grundlage dafür sind die Auswertung von Grömping et al. (1998) zur Stickstoffrückbelastung bei 192 kommunalen Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung. Demnach beträgt die prozentuale Größenordnung für die mittlere Rückbelastung etwa 1,4 bis 1,5 g/(E·d).

Tabelle B: Erhöhung der Rückbelastung durch die Einführung einer Desintegration

	... bezogen auf die bekannte Rückbelastung	... bezogen auf die Zulauffracht bzw. Zulaufkonzentration	... bezogen auf den Einwohnerwert
Thermische Verfahren Thermisch-Chemische Verfahren	25 %	5%	ca. 0,4 g/(E·d)
Verfahren mit niedrigem Energieeintrag	10 %	1%	ca. 0,15 g/(E·d)

Änderung des C/N-Verhältnisses in Folge einer Fremdschlammzugabe:

Nach Grömping et al. (1998) beträgt die Stickstoffrückbelastung bei Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung etwa 1,5 g/(E·d).

Somit kann die zusätzliche Stickstofffracht über den Einwohnerwert der angeschlossenen Satellitenanlagen berechnet werden.

(4.1)

$$\text{Zusätzlich Stickstofffracht} = \text{Einwohnerwert der Satellitenanlagen} \cdot 1,5 \text{ g/(E·d)} =$$

$$= \underline{\hspace{10em}}$$

Wir der Schlamm einer Desintegration zugeführt, ist der Wert entsprechend Tabelle B Spalte 4 anzupassen.

5 $B_{TM,PS,NEU}$: Primärschlammanfall (A.4)

Bei der Abschätzung des zukünftigen Primärschlammanfalls sollte falls möglich die derzeitige Abscheideleistung berücksichtigt werden. Laut DWA (2014) ist bei in einer herkömmlichen Vorklärung folgender Schlammanfall zu erwarten:

	Einwohnerspezifischer Primärschlammanfall			TR in %
	$b_{TM,E,PS,d}$ in g/(E·d)			
Vorklärung	85-Perzentile (DWA 2014)	50-Perzentile (DWA 2014)	ZEBRAS- Mediane (Knerr et al. 2016)	(DWA 2014)
$t_{VK} = 0,5$ h	30	24	-	2-6
$t_{VK} = 1,0$ h	35	28	-	2-6
$t_{VK} = 2$ h	40	32	(50,8)	2-6
$t_{VK} = 2-3$ h	-	-	43	2-6
$t_{VK} = >3$ h	-	-	46	2-6

Bezogen auf die Einwohnerwerte, die aus den mittleren CSB-Fracht ermittelt wurde, muss die 85-Perzentile herangezogen werden um den Schlammanfall zu berechnen, da es sich bei dem Bezugswert von 120 g CSB/(E·d) ebenfalls um den 85-Perzentil nach ATV-DVWK (2000)

Für die Berechnung des zu erwarteten Primärschlammanfalls sollte falls möglich als Bezugsgröße der TS-Fracht im Zulauf berücksichtigt werden. Sind keine Messergebnisse bezüglich der TS-Fracht bekannt wird empfohlen mit einem TS von 70 g/(E·d) zu rechnen.

(5.1)

$$b_{TM,PS,neu} = 70 \text{ g/(E·d)} \cdot EW_{120} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(5.2)

$$Q_{PS,neu} = b_{TM,PS,neu} / TR = \underline{\hspace{2cm}}$$

6 $t_{TS,vorh.}$: Vorhandenes Schlammalter in der Belebung (B.1)

Faulungsanlagen sind anhand ihrer Anschlussbelastung in der Regel den Größenklassen 3 bis 5 zuzuordnen. Somit müssen sie Mindestanforderung bezüglich Ammoniumstickstoff einhalten und eine weitgehende Stickstoffoxidation durchführen. Bei Anlagen ab 10.000 muss zudem eine gezielte Denitrifikation erfolgen um die Nges-Grenzwerte einzuhalten. Man unterscheidet dabei folgende Bau- und Betriebsweisen, die Nitrifikation und Denitrifikation entweder räumlich oder zeitlich voneinander trennen:

- Vorgeschaltete Denitrifikation (räumliche Trennung)
- Kaskadendenitrifikation (räumliche Trennung)
- Simultane Denitrifikation (räumliche & zeitliche Trennung)
- Alternierende Denitrifikation (zeitliche Trennung)
- Intermittierende Denitrifikation (zeitliche Trennung)
- Nachgeschaltete Denitrifikation (räumliche Trennung)

Das aerobe Schlammalter errechnet sich unter Vernachlässigung der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf (Annahme: $AFS_{Ablauf,Nachklärung} = 0$) aus der Schlammmenge im Belüftungsbecken dividiert durch die tägliche Schlammabnahme.

Die benötigten Formeln zur Berechnung des vorhanden aeroben Schlammalter in der Belebung in d lautet daher wie folgt:

Bei räumlicher Trennung: (6.1)

$$\underline{t_{TS,(aerob)vorh.}} = \frac{V_N \cdot TS_{BB}}{Q_{\ddot{U}S,d} \cdot TR_{\ddot{U}S} \cdot Q_{AB} \cdot TS_{AB}}$$

= -----

$$= \text{-----} d$$

mit V_N = Volumen für die Nitrifikation
(Volumen des belüfteten Beckens)

Bei zeitlicher Trennung: (6.2)

$$\underline{t_{TS,(aerob)vorh.}} = \frac{f \cdot V_{BB} \cdot TS_{BB}}{Q_{\ddot{U}S,d} \cdot TR_{\ddot{U}S} \cdot Q_{AB} \cdot TS_{AB}}$$

= -----

$$= \text{-----} d$$

mit f = Faktor für anteilige Belüftungszeit
(Summe der Belüftungszeit dividiert durch 24 h/d)

$$(6.3) f = \frac{t_N}{24} = \text{-----}$$

Das gesamte Schlammalter ermittelt sich in beiden Fällen wie folgt:

(6.4)

$$\underline{t_{TS,(gesamt)vorh.}} = \frac{\text{Belebungsbeckenvolumen} \cdot \text{Trockensubstranzgehalt im Belebungsbecken}}{\text{Mittlerer täglicher Überschussschlammabzug} \cdot \text{Trockenrückstand des Überschussschlamm}} =$$

$$= \frac{V_{BB} \cdot TS_{BB}}{Q_{\ddot{U}S,d} \cdot TR_{\ddot{U}S}} = \text{-----} = \text{-----} d$$

7 $t_{TS,erf.}$: Erforderliches Schlammalter (B.2)

Das **erforderliche aerobe Schlammalter** ist von der Temperatur und dem Prozessfaktor abhängig.

Jahresmitteltemperatur = _____ °C

Nach Arbeitsblatt DWA-A 131 (DWA 2016) berücksichtigt der Prozessfaktor:

- Schwankungen der maximalen Wachstumsrate durch bestimmte Abwasserinhaltsstoffe
- Höhe des Überwachungswerts für den Parameter Ammoniumstickstoff
- Auswirkungen von Schwankungen der Stickstofffrachten

Hilfsweise kann für eine überschlägige Berechnung ein Prozessfaktor zwischen 1,5 und 2,1 gewählt werden. Dabei gilt nach Arbeitsblatt DWA-A 131 (DWA 2016):

(7.1)

$$t_{d,CSB,Z} \leq 2.400 \frac{kg}{d} (\leq 20.000 \text{ EW}): PF = 2,1$$

$$t_{d,CSB,Z} \geq 12.000 \frac{kg}{d} (\geq 100.000 \text{ EW}): PF = 1,5$$

Die Höhe des Prozessfaktors ist Abhängig von den Schwankungen der Stickstofffracht im Zulauf und Überwachungswerten des Ammoniums im Ablauf (DWA 2016):

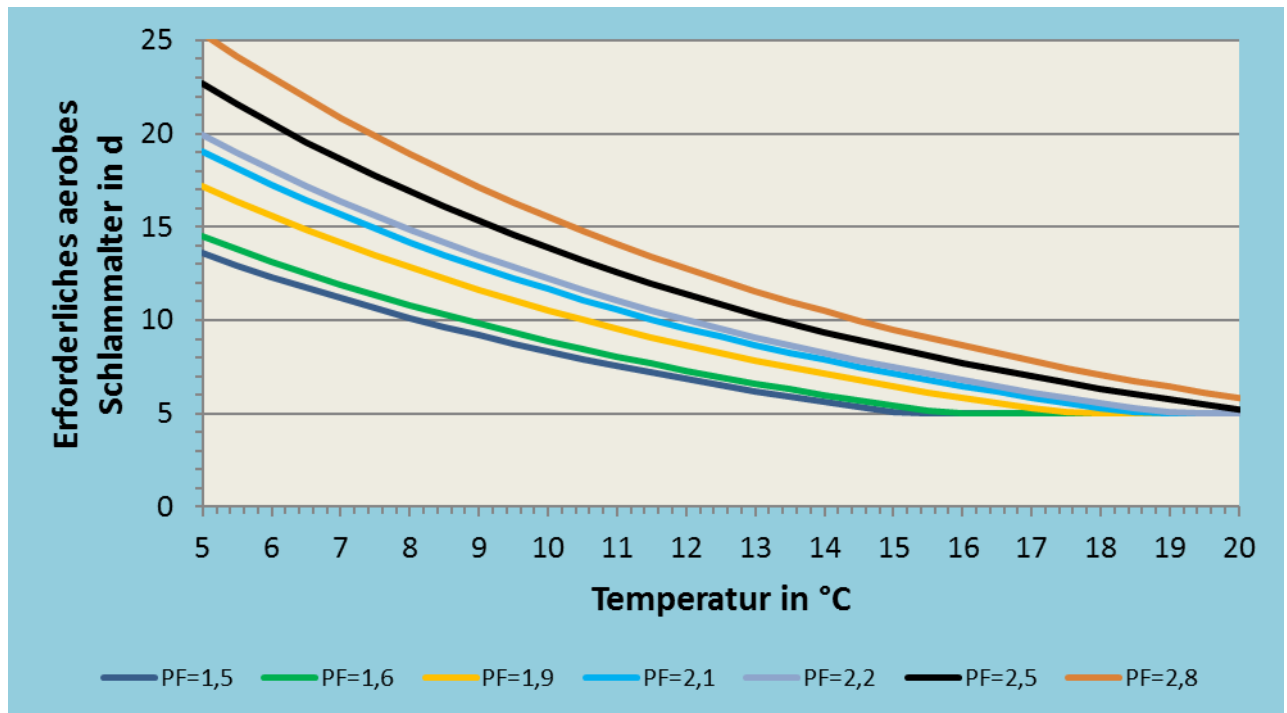
Tabelle C: Erforderlicher Prozessfaktor in Abhängigkeit des NH_4 -N-Überwachungswerts im Ablauf und der Schwankung der KN-Zulauffracht (DWA 2016)

$S_{NH_4,ÜW}$	$f_N = 1,4$	$f_N = 1,6$	$f_N = 1,8$	$f_N = 2,0$	$f_N = 2,2$	$f_N = 2,4$
5 mg/l NH_4 -N	1,5	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8
10 mg/l NH_4 -N	1,5	1,5	1,5	1,6	1,9	2,1

„Zwischenwerte können interpoliert werden. Die Schwankung der Stickstofffracht im Zulauf zur Belegung wird durch den Stoßfaktor f_N als die höchste täglich 2-h-KN-Fracht ($B_{2h,KN,ZB,max}$) bezogen auf die mittlere KN-Tagesfracht ($B_{2h,KN,ZB,dM}$) ausgedrückt. Der Stoßfaktor f_N ist bei bestehenden Anlagen immer messtechnisch zu ermitteln.“ (DWA 2016)

(7.2)

$$f_N = \frac{B_{2h,KN,ZB,max}}{B_{2h,KN,ZB,dM}} (-) = \underline{\hspace{2cm}}$$



Anhang Abbildung A: Erforderliches aerobes Schlammalter in d

Das **erforderliche Gesamtschlammalter** kann mithilfe des Verhältnisses von Nitrifikation und Denitrifikation ermittelt werden. Dabei gilt:

(7.3)

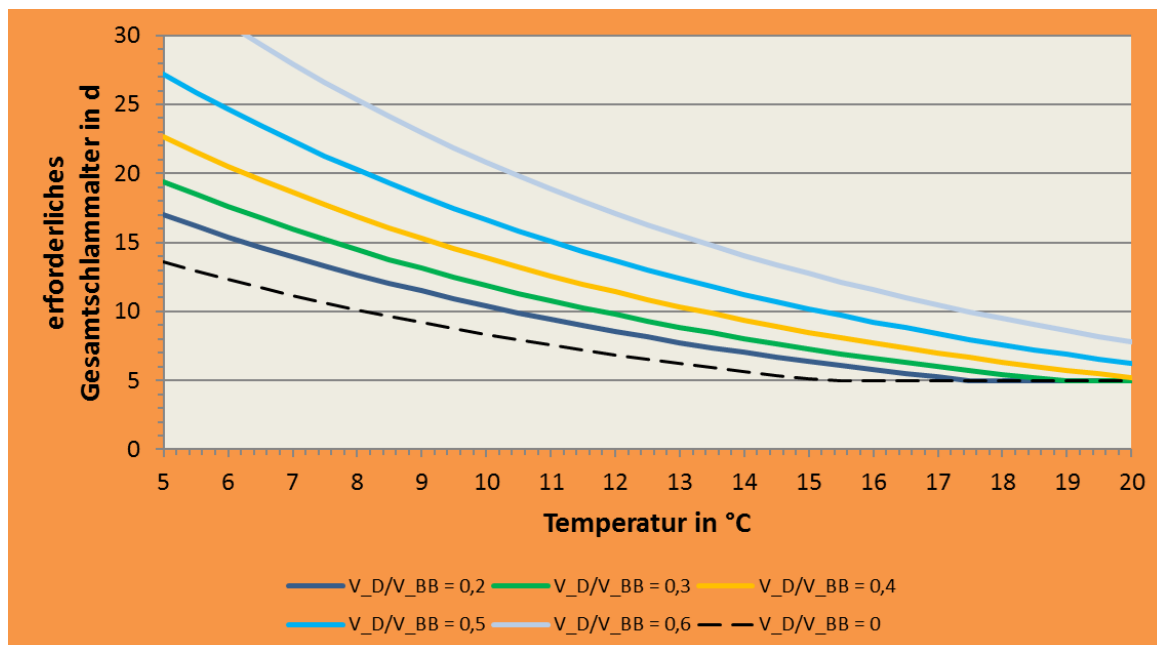
$$\frac{V_D}{V_{BB}} = t_D / (t_D + t_N) = \underline{\hspace{2cm}}$$

Das erforderliche Gesamtschlammalter kann im Jahresmittel dem Bemessungsschlammalter gleichgesetzt werden. Es berechnet sich wie folgt:

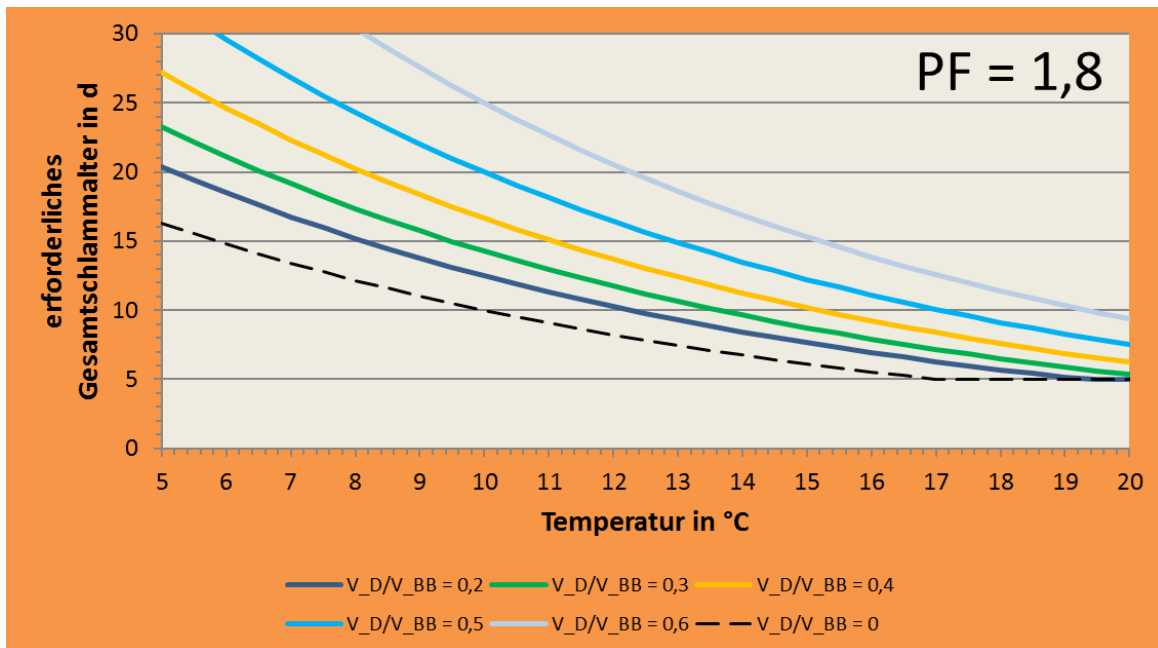
(7.4)

$$t_{TS,gesamt,erf.} = t_{aerob,erf.} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{V_D}{V_{BB}}\right)} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ d}$$

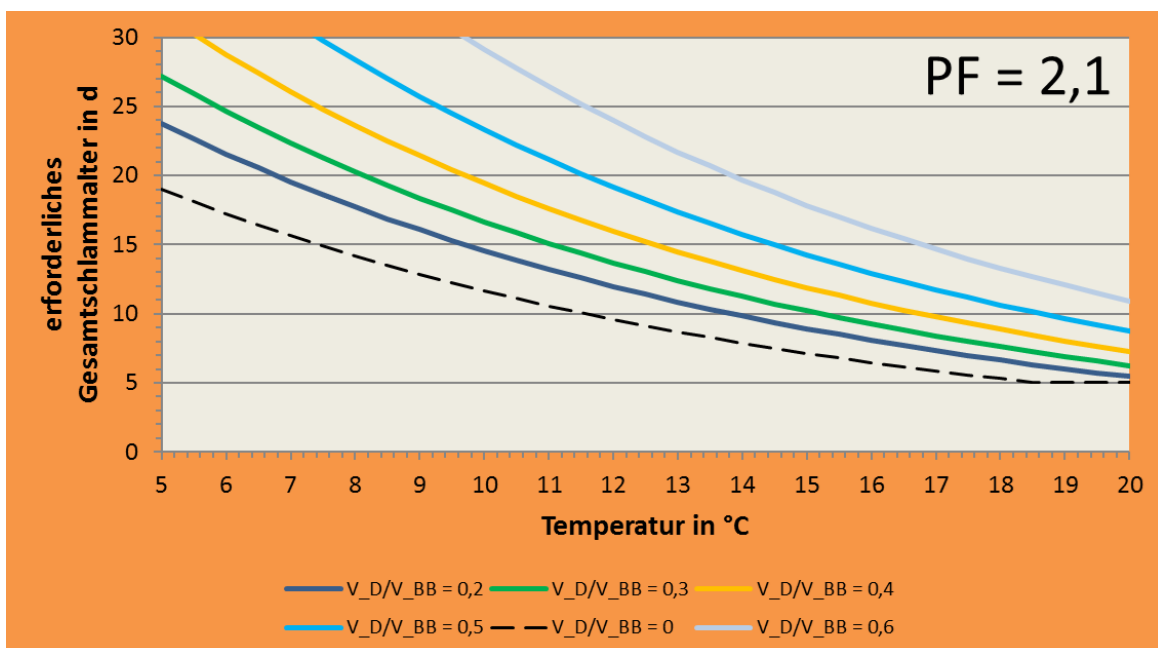
Alternativ können folgende Abbildungen verwendet werden:



Anhang Abbildung B: Erforderliches Gesamtschlammalter in d , PF = 1,5



Anhang Abbildung C: Erforderliches Gesamtschlammalter in d, PF = 1,8



Anhang Abbildung D: Erforderliches Gesamtschlammalter in d, PF = 2,1

8 Überschlägige Ermittlung des benötigten Feststoffgehalts in der Belebung (B.2)

Zur Ermittlung der BSB-Zulaufkraft können die Abscheideleistung (η_{VK}) aus Tabelle D herangezogen werden.

(8.1)

$$B_{d,BSB,ZB} = B_{d,BSB,ZU} \cdot (1 - \eta_{VK}) = \underline{\hspace{10cm}} \text{ kg/d}$$

Tabelle D: Abscheideleistungen (η_{VK}) in der Vorklärung für den BSB₅

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)			Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 h – 1h	1,5 h – 2h	>2,5 h		
BSB ₅	0,25 ¹	0,35 ¹	0,40 ²	0,70 ⁴	0,75 ⁸

Die Schlammmasse kann unter Berücksichtigung eines spezifischen Überschussschlammanfalls infolge des Kohlenstoffabbaus berechnet werden. Dabei wird vereinfacht die Schlammproduktion aus der Phosphorelimination vernachlässigt.

(8.2)

$$\frac{B_{d,TS,ZB}}{B_{d,BSB,ZB}} = \underline{\hspace{10cm}}$$

Spezifische Schlammproduktion $\ddot{U}_{C,BSB}$ [kg TS/kg BSB₅] bei 10 bis 12 °C

$X_{TS,ZB} / C_{BSB}$	Schlammalter in Tagen					
	4	8	10	15	20	25
0,4	0,79	0,69	0,65	0,59	0,56	0,53
0,6	0,91	0,81	0,77	0,71	0,68	0,65
0,8	1,03	0,93	0,89	0,83	0,8	0,77
1	1,15	1,05	1,01	0,95	0,92	0,89
1,2	1,27	1,17	1,13	1,07	1,04	1,01

(8.3)

$$\ddot{U}_{d,c} = B_{d,BSB} \cdot (0,75 + 0,6 \cdot \frac{X_{TS,ZB}}{C_{BSB,ZB}} - \frac{(1 - 0,2) \cdot 0,17 \cdot 0,75 \cdot t_{TS} \cdot F_T}{1 + 0,17 \cdot t_{TS} \cdot F_T} \text{ [kg } \frac{TS}{d} \text{]})$$

Der Temperaturfaktor (F_T) für die endogene Veratmung lautet:

$$F_T = 1,072^{(T-15)}$$

Quelle: ATV-DWA Arbeitsblatt 131 (ATV-DVWK 2000)

Überschlägige Berechnung der erforderlichen Schlammmasse: (8.4)

$$M_{TS,BB,erf.} = B_{d,BSB,ZU} \cdot t_{TS,gesamt,erf} \cdot \ddot{U}_{C,BSB} = \underline{\hspace{10cm}} \text{ kg TS}$$

Berechnung des erforderlichen TS-Gehalts im Belebungsbecken: (8.5)

$$TS_{BB} = \frac{M_{TS, BB, erf.}}{V_{BB}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ g/l}$$

9 t_{FB} : Faulzeit (D.2/F.1)

Die Faulzeit ist definiert als Verweilzeit der Feststoffe (Schlammaufenthaltszeit) im Reaktor. In der Regel werden die kommunalen Faulbehälter bei Kläranlagen als durchflossene und vollständig durchmischte biologische Reaktoren geplant und betrieben. Daher ist die Faulzeit der hydraulischen Aufenthaltszeit gleichzusetzen. Somit lässt sich die Faulzeit als mittlere Verweilzeit, also aus der Differenz zwischen Faulbehältervolumen in m^3 und zugeführter Rohschlammmenge in m^3/d , berechnen. Diese setzt sich aus der Primär-, Überschuss- und Fremdschlammmenge zusammen:

Mittlere tägliche
Rohschlammmenge =

Mittlere Primärschlammmenge
+ Mittlere Überschussschlammmenge
(nach der Eindickung)
+ Mittlere Fremdschlammmenge

(9.1)

$$Q_{RoS,d,ges} = Q_{PS,d,ges} + Q_{ÜSS,d,ges} + Q_{FS,d,ges} = \text{_____} m^3/d$$

Wird eine signifikante Menge Co-Substrate eingebracht, ist diese ebenfalls zu berücksichtigen.

Bei Faulbehältern, die in Reihe betrieben werden kann das Faulraumvolumen aufsummiert werden um die hydraulische Aufenthaltszeit zu berechnen (= Faulzeit).

(9.2)

$$V_{FB,ges} = V_1 + V_2 = \text{_____} m^3$$

Bei parallel betriebenen Faulbehältern ist die Faulzeit für jeden Behälter einzeln zu berechnen.

(9.3)

$$Faulzeit = t_{FB} = \frac{V_{FB,ges}}{Q_{RoS,d,ges}} = \text{_____} d$$

Anmerkung:

Bei Faulungen mit gezielter Biomasseanreicherung entspricht die Feststoffverweilzeit nicht der hydraulischen Aufenthaltszeit der Flüssigkeit. Die Reaktionszeit des Schlamm (=Faulzeit) berechnet sich in diesem Fall wie folgt:

(9.4)

$$t_{FB} = \frac{V_{FB} \cdot C_{TM,R}}{(Q_{ab} \cdot C_{TM,ab})} = \frac{\text{Faulbehältervolumen} \cdot \text{Trockenmasse im Faulbehälter}}{\text{Ausgetragener Faulschlamm} \cdot \text{Trockenmass des Faulschlamm}} =$$

$$= \text{-----} = \text{-----} \text{ d}$$

10 Y_{FG} : spezifische Faulgasproduktion (D.1)

Zur Berechnung der spezifischen Faulgasproduktion wird die jährlich erzeugte Faulgasmenge auf den jährlich der Faulung zugeführten Trockenmasse bezogen werden.

Jährlicher Faulgaserzeugung $Q_{FG,a} =$ _____

Jährlicher Rohschlammanfall $Q_{RoS,a} =$ _____

Trockenrückstand des Rohschlammes (Jahresmittelwert) $TR_{RoS} =$ _____%

Glühverlust des Rohschlammes (Jahresmittelwert) $GV_{RoS} =$ _____%

Jährliche organischer Trockenmasse im Rohschlamm:

(10.1)

$B_{oTM,RoS,a} = Q_{RoS,a} \cdot TR_{RoS} \cdot GV_{RoS} =$ _____

Alternativ kann die Berechnung über die Summe von Primär- und Überschussschlamm erfolgen.

(10.2)

$B_{oTM,RoS,a} = B_{TM,PS,a} + B_{TM,ÜSS,a} =$ _____

Spezifische Faulgasproduktion:

(10.3)

$Y_{FG} = Q_{FG,a} / B_{oTM,RoS,a} =$ _____

11 η_{oTM} : Abbaugrad der organischen Feststoffe bei der Faulung (D.4)

Zur Berechnung des Abbaugrades der organischen Feststoffe ist das Verhältnis zwischen organischer Trockenmasse in Zulauf zum Faulbehälter (Rohschlamm) und der organischen Trockenmasse im Ablauf des Faulbehälters (Faulschlamm) zu bestimmen.

(11.1)

$$B_{oTM,FS,a} = Q_{FS,a} \cdot TR_{FS} \cdot GV_{FS} = \underline{\hspace{4cm}}$$

(11.2)

$$B_{oTM,ROS,a} = Q_{ROS,a} \cdot TR_{ROS} \cdot GV_{ROS} = \underline{\hspace{4cm}}$$

(11.3)

$$\eta_{oTM} = 1 - \frac{B_{oTM,FS}}{B_{oTM,ROS}} = \underline{\hspace{4cm}}$$

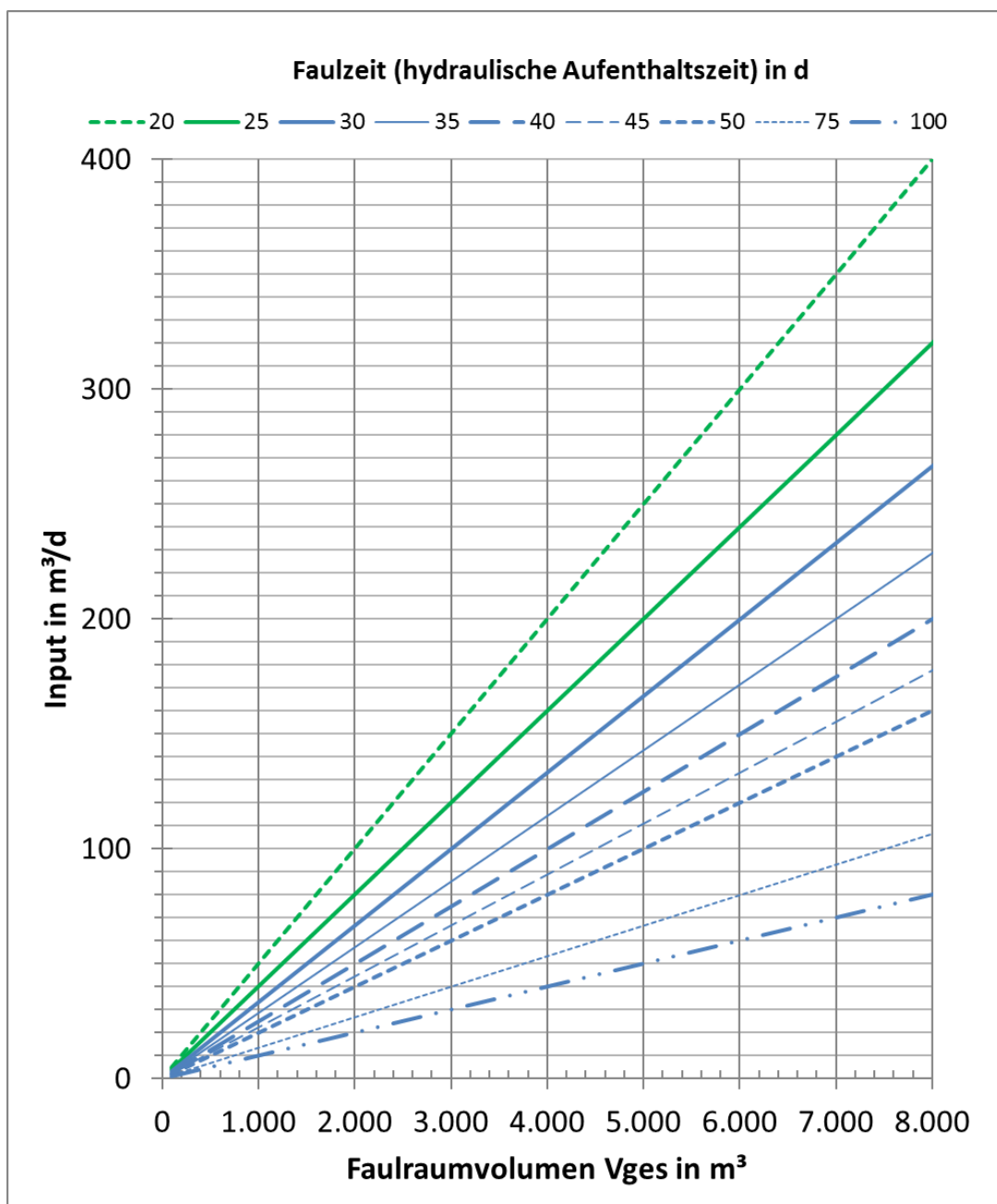
12 Bestimmung des max. Inputs zur Ausnutzung der freien Kapazitäten (F.2)

Der maximale Input zur Ausnutzung der freien Kapazitäten kann wie folgt bestimmt werden:

1. Eintragen des Faulbehältervolumens
2. Eintragen des derzeitigen Rohschlammmenge in m³/d ($Q_{RoS,d,ges}$) als Input I ermöglicht das Ablesen der derzeitigen Faulzeit
3. Festlegung der gewünschten Faulzeit (minimale Faulzeiten beachten!)
4. Ablesen des Inputs II bei der festgelegten Faulzeit II
5. Täglich zuführbare Substratmenge in m³ = Input II – Input I

(12.1)

$$Input_{Substrat} = \frac{V_{FB,ges}}{t_{gewählt}} - Q_{RoS,d,ges} = \underline{\hspace{2cm}}$$



13 Bestimmung der organischen Schlammbelastung durch leicht abbaubare Stoffe (F.3)

Die organische Trockenmasse des Klärschlamms kann in leicht und schwer abbaubaren Stoffen unterteilt werden. Leicht abbaubare Stoffe werden bei kommunalen Faulungsanlagen weitgehend abgebaut. Der Abbau von schwer abbaubaren Stoffen erfolgt sehr langsam und erst bei langen Verweilzeiten im Reaktor (DWA 2014). Die Bestimmung der leicht abbaubaren organischen Stoffe erfolgt nach VID-Richtlinie 4630 durch Gärversuche. Überschlägig kann nach DWA-Merkblatt M 368 (DWA 2014) ihr Anteil bezogen auf die organische Trockenmasse wie folgt abgeschätzt werden (DWA 2014):

- Primärschlamm 70% der oTM
- Überschussschlamm 45% der oTM
- Rohschlamm 57 % der oTM

Zur Bestimmung der Schlammbelastung durch leicht abbaubare Stoffe wird die täglich der Faulung zugeführte organische Trockenmasse des Primär- und Überschussschlamms mit der organischen Schlammmasse im Reaktor ins Verhältnis gesetzt. Bei zweistufigen Faulungen ist dabei lediglich das Volumen des ersten Faulbehälters heranzuziehen.

(13.1)

$$B_{L.oTM,FB} = \frac{0,7 \cdot Q_{PS,d} \cdot TR_{PS} \cdot GV_{PS} + 0,45 \cdot Q_{ÜSS,d} \cdot TR_{ÜSS} \cdot GV_{ÜSS}}{V_{FB} \cdot TR_{FS} \cdot GV_{FS}} = \underline{\hspace{10em}}$$

Falls keine Informationen zum Primär- und Überschussschlamm vorliegen kann die Schlammbelastung alternativ über die organischen Trockenmassen des Rohschlammes berechnet werden.

(13.2)

$$B_{L.oTM,FB} = \frac{0,57 \cdot Q_{RoS,d} \cdot TR_{RoS} \cdot GV_{RoS}}{V_{FB} \cdot TR_{FS} \cdot GV_{FS}} = \underline{\hspace{10em}}$$

Zur Bestimmung der Raumbelastung durch leicht abbaubare Stoffe wird die täglich der Faulung zugeführte organische Trockenmasse des Primär- und Überschussschlamms mit dem Reaktorvolumen ins Verhältnis gesetzt. Bei zweistufigen Faulungen ist dabei lediglich das Volumen des ersten Faulbehälters heranzuziehen.

(13.3)

$$B_{R,L.oTM,FB} = \frac{0,7 \cdot Q_{PS,d} \cdot TR_{PS} \cdot GV_{PS} + 0,45 \cdot Q_{ÜSS,d} \cdot TR_{ÜSS} \cdot GV_{ÜSS}}{V_{FB}} = \underline{\hspace{10em}}$$

Falls keine Informationen zum Primär- und Überschussschlamm vorliegen kann die Raumbelastung alternativ über die organischen Trockenmassen des Rohschlammes berechnet werden.

(13.4)

$$B_{R,LoTM,FB} = \frac{0,57 \cdot Q_{RoS,d} \cdot TR_{RoS} \cdot GV_{RoS}}{V_{FB}} = \underline{\hspace{10em}}$$

Tabelle E: Empfohlene Raum- und Schlammbelastung nach Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) in Abhängigkeit von der Anlagengröße

Anlagengröße (EW in E)			<50.000	50.000-100.000	>100.000
organische Schlammbelastung	kg oTM_abb/ (kg oTM·d)	einstufig	0,06	0,07	0,07
		zweistufig (erste Stufe)	0,14	0,15	0,16
durch leicht abbaubare Stoffe	kg CSB_abb/ (kg oTM·d)	einstufig	0,10	0,11	0,13
		zweistufig (erste Stufe)	0,24	0,26	0,16
organische Raumbelastung	kg oTM_abb/ (m ³ ·d)	einstufig	1,4	1,5	1,7
		zweistufig (erste Stufe)	3,9	4,2	4,5
durch leicht abbaubare Stoffe	kg CSB_abb/ (m ³ ·d)	einstufig	2,3	2,6	2,9
		zweistufig (erste Stufe)	6,6	7,1	7,7

14 Faulgasproduktion (G.1)

Berechnung über PS und ÜSS:

(14.1)

$$B_{oTM,PS} =$$

$$Q_{PS,d} \cdot TR_{PS} \cdot GV_{PS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(14.2)

$$B_{oTM,ÜSS} =$$

$$Q_{ÜSS,d} \cdot TR_{ÜSS} \cdot GV_{ÜSS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(14.3)

$$B_{oTM,RoS} =$$

$$B_{oTM,PS} + B_{oTM,ÜSS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(14.4)

$$Q_{FG,d} =$$

$$0,57 \cdot B_{oTM,PS} + 0,33 \cdot B_{oTM,ÜSS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Berechnung über RoS:

(14.5)

$$B_{oTM,RoS} =$$

$$Q_{RoS,d} \cdot TR_{RoS} \cdot GV_{RoS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(14.6)

$$Q_{FG,d} =$$

$$0,44 \cdot B_{oTM,RoS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Werden Fremdschlämme angenommen, müssen diese bei der Berechnung des Faulgasanfalls mit dem jeweiligen Trockenrückstand und Glühverlust berücksichtigt werden. Ist auf der Satellitenanlage eine Vorklärung vorhanden wird ein Gemisch aus Primärschlamm und Überschussschlamm angeliefert und $x = 0,44$ einzusetzen. Wird lediglich Überschussschlamm angeliefert, ist $x = 0,33$ einzusetzen.

(14.7)

$$Q_{FG,Fremdschlamm,d} = x \cdot Q_{Fremdschlamm,d} \cdot TR_{Fremdschlamm} \cdot GV_{Fremdschlamm} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Eine zusätzlich Faulgasproduktion durch Co-Substrate ($Q_{FG,Co}$) ist ebenfalls zu berücksichtigen.

(14.8)

$$Q_{FG,d} = Q_{FG,RoS,d} + Q_{FG,Fremdschlamm,d} + Q_{FG,Co,d} = \underline{\hspace{2cm}}$$

15 Max. täglicher Gasverbrauch der KWK-Anlage (G.2)

Der maximale tägliche Gasverbrauch des BHKW ist i.d.R. bekannt. Er kann näherungsweise wie folgt bestimmt werden:

(15.1)

$$Q_{V,KWK,max.} \approx \frac{\text{elektrische Nennleistung} + \text{thermische Nennleistung}}{\text{Gesamtwirkungsgrad}} \cdot \frac{1}{\text{Methangehalt} \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} \cdot 24 \text{ h/d} =$$

$$= \text{_____} \text{ m}^3$$

16 $\eta_{\text{KWK,el}}$, g_{CH4} und E_{Bedarf} (G.3)

$\eta_{\text{KWK,el}}$ = elektrischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage in % = _____ %

g_{CH4} = Methangehalt in % = _____ %

Brutto-Strom-Erzeugung: (16.1)

$E_{\text{KWK,el}} = \eta_{\text{KWK,el}} \cdot 10 \text{ kWh} \cdot g_{\text{CH4}} \cdot Q_{\text{FG,d}} = \text{_____ kWh}$

Zur Ermittlung des Energiebedarfs sind alle Verbraucher der KA zu berücksichtigen:

$E_{\text{Bedarf}} = \text{_____ kWh}$

17 Ermittlung des elektrischen Wirkungsgrads:

Zur Berechnung des mittleren elektrischen Wirkungsgrades der jeweiligen Anlage wird eine Berechnung über die jährliche Stromerzeugung und den jährlichen Faulgasverbrauch der Anlage unter Verwendung des gemessenen Methangehalts vorgeschlagen.

$E_{KWK,el}$ = Jährliche Stromerzeugung der KWK-Anlage = _____ kWh

$Q_{FG,a}$ = Jährlicher Faulgasverbrauch (Messwert) = _____ m³

g_{CH_4} = Methangehalt = _____ %

(17.1)

$E_{Prim} = Q_{FG,a} \cdot g_{CH_4} \cdot 10 \text{ kWh/m}^3 = \text{_____ kWh}$

(17.2)

$\eta_{el,KWK} = \frac{E_{KWK,el}}{E_{Prim}} = \text{_____} \%$

18 **Literaturverzeichnis** (siehe Schlussbericht)

Schmitt, T. G.; Knerr, H.; Dilly, T. C.; Hansen, J.; Hien, S.; Siekmann, T.: „Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz, ZEBRAS“. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten (MUEEF) des Landes Rheinland-Pfalz. Deutschland. Schlussbericht 2018.