

Aufgabe 5-4 (Längsbecken)

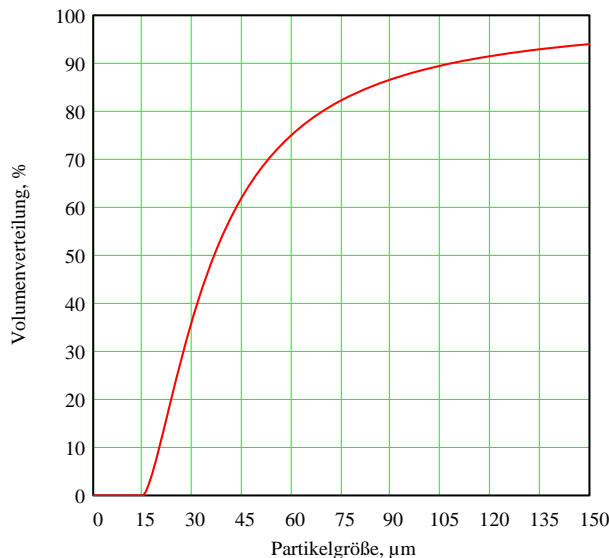
Ein industrielles Abwassers ($7.2 \text{ m}^3/\text{h}$, $30 \text{ kg FS}/\text{m}^3$, $\rho_S = 1400 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\rho_L = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\eta_L = 0.001 \text{ Pas}$) soll nach Vorreinigung und Belebtschlammbecken einer Nachklärung unterzogen werden, um die in den Vorfluter eingeleiteten Feststoffmenge auf $1 \text{ kg}/\text{d}$ zu begrenzen. Zu diesem Zweck wird geprüft, ob eine verfügbare Freifläche ($8 \text{ m} \times 23 \text{ m}$) ausreicht um ein Längsbecken zu errichten, das die erforderliche Trennleistung vollbringt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde die Partikelgrößenverteilung des Feststoffes (s. Abbildung) und der Feststoffgehalt des Sedimentes (40 Vol.-%) bestimmt.

Berechnen Sie:

- den erforderlichen Gesamtabscheidegrad,
- die Trennteilchengröße bei idealer Trennung,
- die Feststoffmassenkonzentration und das stündlich anfallende Volumen des Dickschlammes sowie den Volumenstrom des Überlaufes,
- die Mindestbreite des Beckens, damit eine laminare Horizontalströmung gewährleistet ist ($Re_{kr}=2000$, die Beckenbreite sei dreimal größer als die effektive Höhe),
- die zu d) und b) gehörige Mindestlänge des Beckens!

Bewerten Sie,

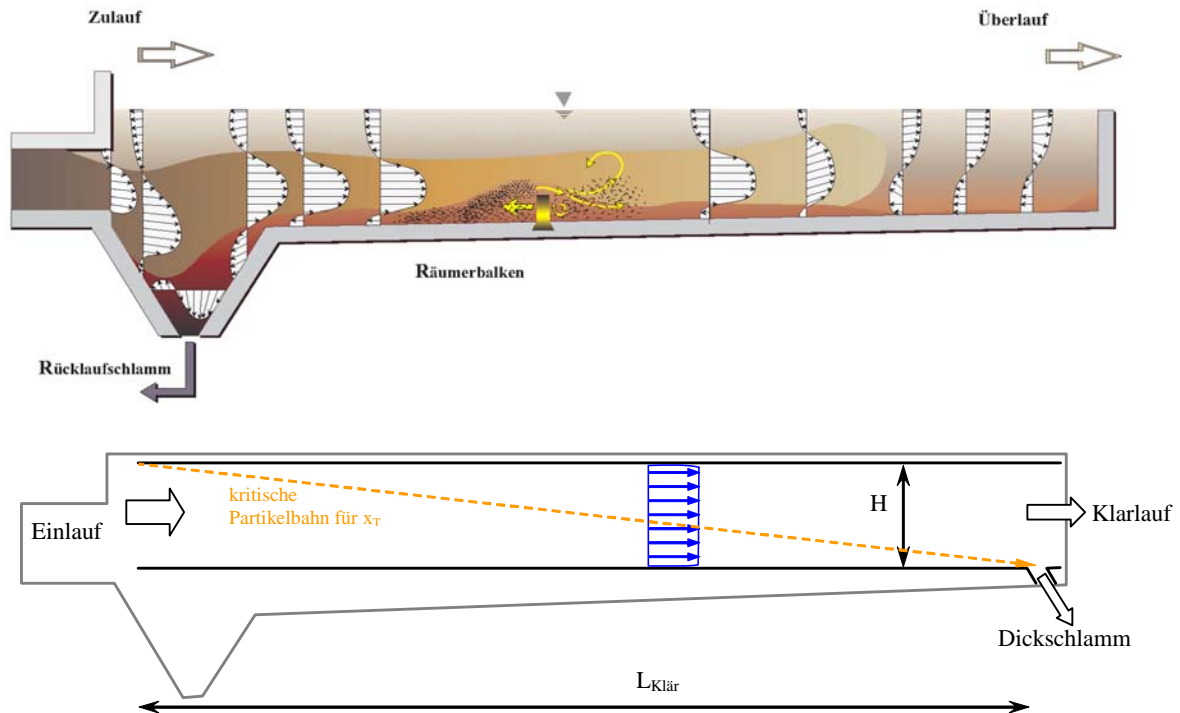
- ob die Freifläche zur Errichtung des Längsbeckens ausreicht; beachten Sie neben einem Sicherheitszuschlag (20%), dass sie tatsächliche Beckenlänge (Baulänge) ca. 20% größer ist als die zur Klärung genutzte Beckenlänge,
- ob das in e) berechnete Becken (inkl. Sicherheitszuschlag) auch im Überlastbetrieb (Volumenstrom $+10\%$, Feststoffkonzentration $+20\%$) die geordnete Trennleistung erbringt!



Aufgabe 5-4 (Längsbecken)

Definition: $\mu\text{m} := 10^{-6} \text{ m}$

Längsbecken:



Vorgegebene Werte:

Abwasser:	$VS_{\text{ein}} := 7.2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	$c_{\text{m.ein}} := 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Klarlauf:	$m_{\text{s.klar}} := 1 \frac{\text{kg}}{\text{Tag}}$	
Dickschlamm:	$\phi_{\text{trüb}} := 0.4$	
flüssige Phase:	$\rho_{\text{L}} := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\eta_{\text{L}} := 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
disperse Phase:	$\rho_{\text{S}} := 1400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
Partikelgrößenverteilung:	$x_{\text{min}} := 15 \mu\text{m}$	
Becken:	$B_{\text{max}} := 8 \text{ m}$	$L_{\text{max}} := 23 \text{ m}$
Höhe-Breite-Relation:	$q := \frac{1}{3}$	

Lösung:

1. Gesamtabscheidegrad

Definition:
$$\eta_{\text{ges}} = \frac{m_{\text{s.trüb}}}{m_{\text{s.ges}}} = 1 - \frac{m_{\text{s.klar}}}{m_{\text{s.ges}}}$$

Gesamtabscheidegrad:
$$\eta_{\text{ges}} := 1 - \frac{m_{\text{s.klar}}}{c_{\text{m.ein}} \cdot VS_{\text{ein}}} \quad \eta_{\text{ges}} = 0.9998$$

Das heißt, der Feststoff muss möglichst vollständig abgetrennt werden.

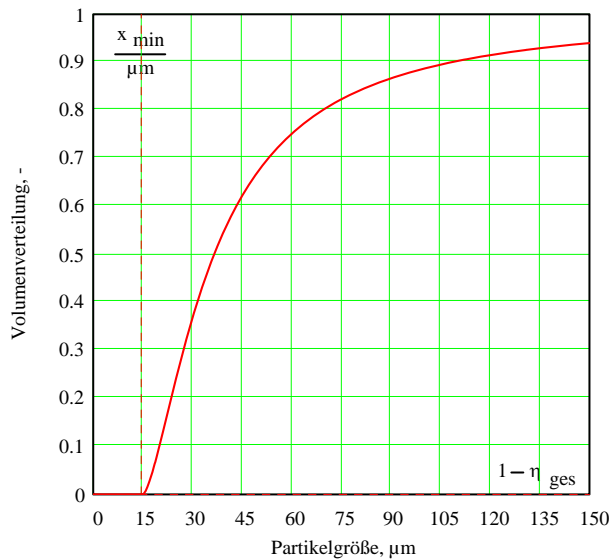
$$\eta_{\text{ges}} := 1$$

2. Trennteilchengröße

für ideale Trennung gilt:
$$Q(x_T) = 1 - \eta_{\text{ges}}$$

daraus folgt für $\eta_{\text{ges}} = 1$:
$$x_T := x_{\text{min}}$$

$$x_T = 15 \mu\text{m}$$



3. Bilanzierung der Stoffströme

Massenkonzentration des DS:
$$c_{\text{m.trüb}} = \frac{m_{\text{s.trüb}}}{V_{\text{trüb}}} = \frac{V_{\text{s.trüb}} \cdot \rho_{\text{s}}}{V_{\text{trüb}}} = \phi_{\text{trüb}} \cdot \rho_{\text{s}}$$

$$c_{\text{m.trüb}} := \phi_{\text{trüb}} \cdot \rho_{\text{s}}$$

$$c_{\text{m.trüb}} = 560 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Feststoffmassen ($\eta_{\text{ges}} = 1$):
$$c_{\text{m.ein}} \cdot VS_{\text{ein}} = c_{\text{m.klar}} \cdot VS_{\text{klar}} + c_{\text{m.trüb}} \cdot VS_{\text{trüb}} = c_{\text{m.trüb}} \cdot VS_{\text{trüb}}$$

bzw.
$$\eta_{\text{ges}} = \frac{c_{\text{m.trüb}} \cdot VS_{\text{trüb}}}{c_{\text{m.ein}} \cdot VS_{\text{ein}}} = 1$$

Dickschlammvolumen: $VS_{\text{trüb}} := \frac{c_{\text{m.ein}}}{c_{\text{m.trüb}}} \cdot VS_{\text{ein}}$ $VS_{\text{trüb}} = 0.39 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

Bilanz der Volumenströme: $VS_{\text{ein}} = VS_{\text{klar}} + VS_{\text{trüb}}$

Klarlaufvolumenstrom: $VS_{\text{klar}} := VS_{\text{ein}} - VS_{\text{trüb}}$ $VS_{\text{klar}} = 6.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

alternative Einheiten: $VS_{\text{trüb}} = 385.714 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ $VS_{\text{klar}} = 6814 \frac{\text{L}}{\text{h}}$

4. Mindestbaugröße für laminare Durchströmung

laminare Strömung: $Re < Re_{\text{kr}}$ $Re_{\text{kr}} := 2000$ (für Rohrströmung unter 2300)

Reynoldszahl von Kanälen: $Re = \frac{\rho \cdot L \cdot v_{\text{hor}} \cdot d_h}{\eta_L}$

horizontale Geschwindigkeit: $v_{\text{hor}} = \frac{VS_{\text{ein}}}{H \cdot B}$

hydraulischer Durchmesser: $d_h = 4 \cdot \frac{\text{durchströmtes Volumen}}{\text{umströmte Oberfläche}} = 4 \cdot \frac{\text{durchströmter Querschnitt}}{\text{umströmter Umfang}}$

offener Kanal: $d_h = 4 \cdot \frac{B \cdot H}{B + 2 \cdot H} = 4 \cdot \frac{q \cdot B^2}{B + 2 \cdot q \cdot B} = \frac{4 \cdot q}{1 + 2 \cdot q} \cdot B$

kritische Reynoldszahl: $Re_{\text{kr}} = \frac{\rho \cdot L}{\eta_L} \cdot \frac{VS_{\text{ein}}}{q \cdot B_{\text{min}}^2} \cdot \frac{4 \cdot q}{1 + 2 \cdot q} \cdot B_{\text{min}} \stackrel{\text{min}}{=} \frac{\rho \cdot L}{\eta_L} \cdot \frac{4}{1 + 2 \cdot q} \cdot \frac{VS_{\text{ein}}}{B_{\text{min}}}$

Mindestbreite: $B_{\text{min}} := \frac{\rho \cdot L}{\eta_L} \cdot \frac{4}{1 + 2 \cdot q} \cdot \frac{VS_{\text{ein}}}{Re_{\text{kr}}}$ $B_{\text{min}} = 2.4 \cdot \text{m}$

5. Mindestlänge

für Trennteilchengröße gilt: $t_{\text{vert}}(h_{\text{klar}}) = t_{\text{hor}}(L) \Rightarrow \frac{H}{v_{\text{S.T}}} = \frac{L}{v_{\text{hor}}}$

Kanalgeschwindigkeit (konstantes Strömungsprofil): $v_{\text{hor}} = \frac{VS_{\text{ein}}}{B \cdot H}$

Mindestlänge des Beckens: $\frac{H}{v_{\text{S.T}}} = \frac{L \cdot B \cdot H}{VS_{\text{ein}}}$

$$L = \frac{VS_{\text{ein}}}{B \cdot v_{\text{S.T}}} = \frac{VS_{\text{ein}}}{B \cdot v_{\text{S.T}}} \quad L = \frac{VS_{\text{ein}}}{B \cdot v_{\text{S.T}}} = \frac{\eta_L}{\rho \cdot L \cdot v_{\text{S.T}}} \cdot \frac{Re_{\text{kr}}}{4} \cdot (1 + 2 \cdot q)$$

Sinkgeschwindigkeit:

$$\Delta\rho := \rho_S - \rho_L \quad \Delta\rho = 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Ar := \frac{g \cdot \Delta\rho \cdot \rho_L \cdot x_T^3}{\eta_L^2} \quad Ar = 0.013$$

$$A := \begin{cases} 1 & \text{if } Ar \leq 10 \\ 0.8 & \text{if } 10 < Ar \leq 325 \\ 0.6 & \text{if } 325 < Ar \leq 1.067 \cdot 10^4 \\ 0.4 & \text{if } 1.067 \cdot 10^4 < Ar \leq 2.23 \cdot 10^5 \\ 0 & \text{if } 2.23 \cdot 10^5 < Ar \leq 3 \cdot 10^9 \end{cases} \quad B := \begin{cases} 24 & \text{if } Ar \leq 10 \\ 27 & \text{if } 10 < Ar \leq 325 \\ 17 & \text{if } 325 < Ar \leq 1.067 \cdot 10^4 \\ 6.5 & \text{if } 1.067 \cdot 10^4 < Ar \leq 2.23 \cdot 10^5 \\ 0.4 & \text{if } 2.23 \cdot 10^5 < Ar \leq 3 \cdot 10^9 \end{cases}$$

$$v_{S.T} := \frac{\eta_L}{\rho_L \cdot x_T} \cdot \left(\frac{4 \cdot Ar}{3 \cdot B} \right)^{\frac{1}{2-A}} \quad v_{S.T} = 0.049 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

alternativ, da Stokes-Bereich
($Ar < 10$):

$$v_{S.T} := \frac{g \cdot \Delta\rho}{18 \cdot \eta_L} \cdot x_T^2 \quad v_{S.T} = 0.049 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

min. Klärlänge des Beckens:

$$L_{\min} := \frac{v_{S.T}}{B_{\min} \cdot v_{S.T}} \quad L_{\min} = 17.00 \cdot \text{m}$$

6. Flächenbedarf

Klärlänge mit 20% Sicherheit: $L_{\text{Klär}} := 1.2 \cdot L_{\min} \quad L_{\text{Klär}} = 20.39 \cdot \text{m}$

Baulänge des Beckens: $L_{\text{Bau}} := 1.2 \cdot L_{\text{Klär}} \quad L_{\text{Bau}} = 24.47 \cdot \text{m}$

1. Das berechnete Klärbecken (2.4 m x 24.5 m) kann so nicht auf dem zur Verfügung stehendem Gelände (8 m x 23 m) gebaut werden.
2. Allerdings ist die benötigte Klärfläche $B \cdot L_{\text{Bau}} = 59 \text{ m}^2$ viel kleiner als die verfügbare Fläche (184 m²). Das heißt, dass bei anderer Beckengeometrie die Trennaufgabe sicher erfüllt werden kann.
3. Würde z.B. mit einer Beckenbreite von 3 m gearbeitet, reduzierte sich die Mindestklärlänge um 1/5 von 17.0 m auf 13.6 m und die Baulänge von 24.5 m auf 19.6 m. Da gleichzeitig der Beckenquerschnitt erhöht, die Reynoldszahl der Horizontalströmung also reduziert wird, bleibt die Forderung nach turbulenzfreier Strömung erfüllt.

Fazit: Die verfügbare Freifläche ist groß genug, um ein Längsbecken zu errichten, mit dem der Feststoff vollständig aus dem Abwasser abgetrennt werden kann.

7. Betrieb bei Überlast

Eine Erhöhung des Volumenstroms führt zu einer schnelleren Horizontalströmung und somit zu einer Verkürzung der kritischen Sinkzeit bzw. zu einer Erhöhung der Trennteilchengröße. Der Gesamtabscheidungsgrad wird verringert.

Ein Erhöhung des Feststoffgehaltes im Einlass führt zu einer proportionalen Erhöhung des Feststoffgehaltes im Klarlauf (vorausgesetzt dass kein Einfluss auf die Sinkgeschwindigkeit besteht).

Veränderung des Gesamtabscheidegrades durch ΔVS :

$$\text{Sinkgeschwindigkeit der Trennteilchengröße: } \frac{v_{S.Tneu}}{v_{S.Talt}} = \frac{VS_{ein.neu}}{VS_{ein.alt}}$$

Achtung! Durch den Sicherheitszuschlag von 20% ist die kritische Sinkgeschwindigkeit gegenüber dem in Punkt 5 berechneten Wert entsprechend reduziert.

$$\text{krit. } v_S \text{ für } L_{\text{Klär}}: \quad v_{S.Talt} := v_{S.T} \cdot \frac{L_{\text{min}}}{L_{\text{Klär}}} \quad v_{S.Talt} = 0.041 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$\text{Sinkgeschwindigkeit der Trennteilchengröße: } \quad v_{S.Tneu} := v_{S.Talt} \cdot 1.1 \quad v_{S.Tneu} = 0.045 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$\text{neue Trennteilchengröße (Annahme: Stokes-Regime): } \quad x_{T.neu} := \sqrt{\frac{18 \cdot \eta_L}{g \cdot \Delta \rho}} \cdot v_{S.Tneu} \quad x_{T.neu} = 14.4 \mu\text{m}$$

alternative Berechnung:

$$\text{neue Trennteilchengröße: } \quad \Omega := \frac{\rho_L \cdot v_{S.Tneu}^3}{g \cdot \Delta \rho \cdot \eta_L} \quad \Omega = 2.315 \cdot 10^{-8}$$

$$A := \begin{cases} 1 & \text{if } \Omega < 0.017 \\ 0.8 & \text{if } 0.017 \leq \Omega < 3.18 \\ 0.6 & \text{if } 3.18 \leq \Omega < 172 \\ 0.4 & \text{if } 172 \leq \Omega < 2542 \\ 0 & \text{if } 2542 \leq \Omega < 3.3 \cdot 10^5 \end{cases} \quad B := \begin{cases} 24 & \text{if } \Omega < 0.017 \\ 27 & \text{if } 0.017 \leq \Omega < 3.18 \\ 17 & \text{if } 3.18 \leq \Omega < 172 \\ 6.5 & \text{if } 172 \leq \Omega < 2542 \\ 0.44 & \text{if } 2542 \leq \Omega < 3.3 \cdot 10^5 \end{cases}$$

$$x_{T.neu} := \frac{\eta_L}{\rho_L \cdot v_{S.Tneu}} \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot B \cdot \Omega \right)^{\frac{1}{1+A}} \quad x_{T.neu} = 14.4 \mu\text{m}$$

$$\text{neuer Abscheidegrad: } \quad \eta_{\text{ges.neu}} := 1 \quad \text{weil } x_{T.neu} < x_{\text{min}}$$

Da der Abscheidegrad unabhängig von der Partikelkonzentration ist und weil auch bei maximalem Volumenstrom der Feststoff vollständig abgeschieden wird, bleibt der Klarlauf auch bei einer Überlast in der Feststoffkonzentration feststofffrei.

Fazit: Das berechnete Klärbecken wird auch im Überlastbetrieb die geforderte Trennleistung erfüllen.