

1 Daten:

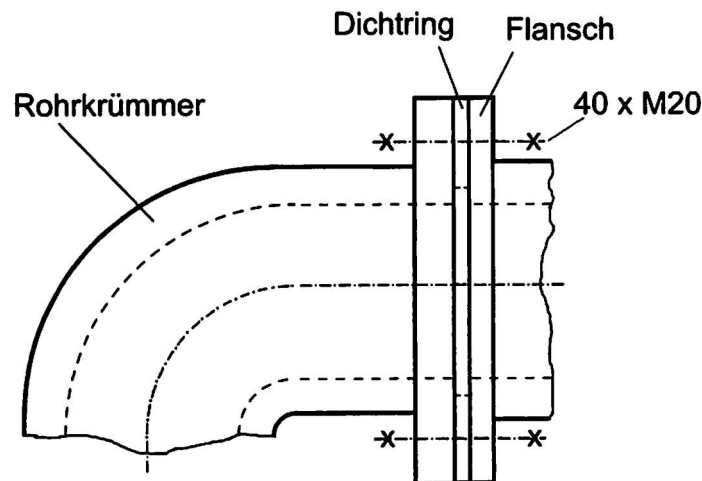
Nutzbares Volumen des Oberbeckens	$V_0 = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Mittlere Fallhöhe	$h_f = 380 \text{ m}$
Verlust im Fallrohr	7%
Wirkungsgrad der Turbine	$\eta_T = 0,95$
Wirkungsgrad des Generators	$\eta_G = 0,97$

- 1.1 Erläutern Sie kurz den Einsatz von Pumpspeicherkraftwerken und erklären Sie, welchen Lastbereich der Energieversorgung sie abdecken können. 2,0
- 1.2 Berechnen Sie die potenzielle Energie des Wassers im Oberbecken in MWh. 3,0
- 1.3 Berechnen Sie die elektrische Energie in MWh, die hieraus erzeugt werden kann. 2,0
- 1.4 Berechnen Sie die Zeit, die es dauert, bis das nutzbare Wasservolumen abgelassen ist, wenn das Pumpspeicherkraftwerk eine konstante elektrische Leistung von 900 MW abgibt. 2,0
- 1.5 Ermitteln Sie die Menge an Steinkohle, die in einem konventionellen Steinkohlekraftwerk verbrannt werden muss, um dieselbe elektrische Energie zu erzeugen. Der Wirkungsgrad des Steinkohlekraftwerks beträgt 0,38. Nehmen Sie als elektrische Energie 4500 MWh an. 3,0



- 2 Das Fallrohr wird mit Hilfe eines Rohrkrümmers mit 40 Sechskantschrauben ISO 4014 - M20 x 200 - 10.9 an das Oberbecken angeflanscht.

5,0

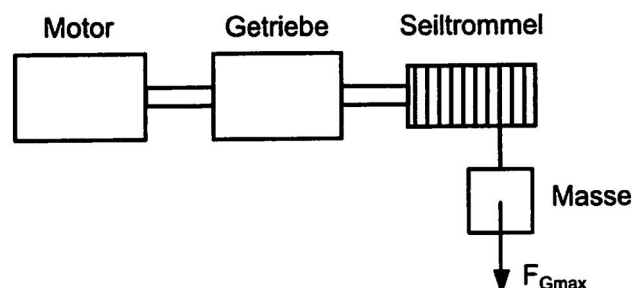


Zum Abdichten ist ein Dichtring notwendig, von dem folgende Daten bekannt sind:

Außendurchmesser	$d_a = 1850 \text{ mm}$
Innendurchmesser	$d_i = 1650 \text{ mm}$
Zulässige Flächenpressung	$p_{zul} = 15 \text{ N/mm}^2$

Überprüfen Sie, ob die zulässige Flächenpressung des Dichtringes mit den verwendeten Schrauben eingehalten wird, wenn für die Schraube eine 1,2-fache Sicherheit gegen plastische Verformung gilt.

- 3 Für Wartungsarbeiten muss das Turbinengehäuse mit Hilfe einer Hubvorrichtung angehoben werden.



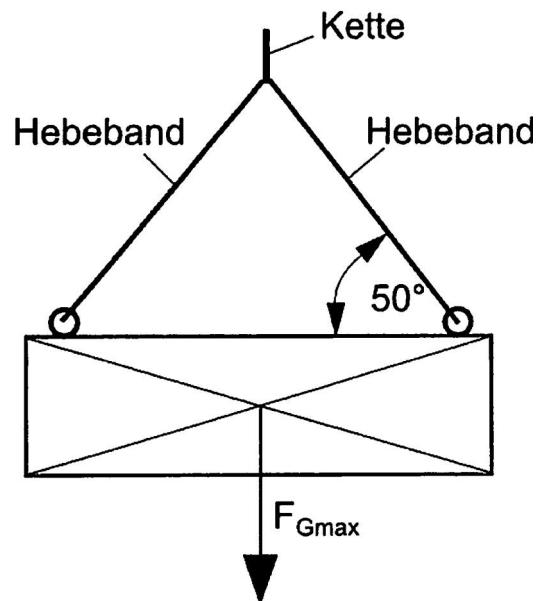
Daten:

Maximale Last:	$F_{Gmax} = 15 \text{ kN}$
Maximale Hebegeschwindigkeit:	$v_{max} = 0,2 \text{ m/s}$
Getriebewirkungsgrad:	$\eta_G = 0,7$
Seiltrommelwirkungsgrad:	$\eta_{ST} = 0,8$
Trommeldurchmesser:	$d_{Tr} = 400 \text{ mm}$
Motordrehzahl:	$n_M = 1450 \text{ min}^{-1}$
Motorleistung:	$P_M = 5,5 \text{ kW}$

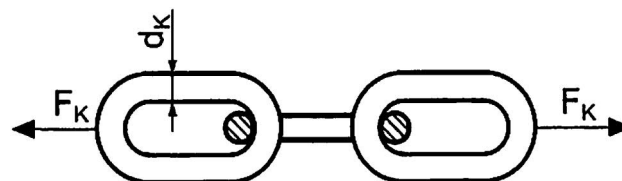
- 3.1 Beurteilen Sie, ob die Leistung des Elektromotors ausreicht, um die Last mit der geforderten maximalen Geschwindigkeit  $v_{max}$  anzuheben. 3,0
- 3.2 Bestimmen Sie das erforderliche Übersetzungsverhältnis des Getriebes. 2,0
- 3.3 Nennen Sie eine Getriebebauform, mit der die notwendige Übersetzung erreicht werden kann. 1,0



- 4 Das Turbinengehäuse wird mittels einer Kette und zweier Hebebänder gemäß folgender Skizze an der Hubvorrichtung befestigt.



- 4.1 Berechnen Sie die Kraft in einem Hebeband  $F_H$  sowie in der Kette  $F_K$ . 3,0
- 4.2 Es wurde eine Rundstahlkette aus S275JR mit einem Durchmesser von  $d_K = 12 \text{ mm}$  gemäß folgender Skizze verwendet: 4,0



Weisen Sie nach, ob eine Sicherheit von 4 gegen plastische Verformung eingehalten wurde, und begründen Sie, warum in diesem Fall eine hohe Sicherheit erforderlich ist.

30,0



## Lösungsvorschläge

### 1 Pumpspeicherkraftwerk

1.1 Pumpspeicherkraftwerke haben die Funktion eines großen Akkumulators. Wenn elektrische Energie im Überangebot vorhanden ist bzw. die Strompreise niedrig sind, wird Wasser vom Unterbecken ins Oberbecken gepumpt. Im Bedarfsfall bzw. wenn die Strompreise hoch sind, wird das Wasser abgelassen, um elektrische Energie zu gewinnen und Spitzenlasten abzudecken.

1.2 (Mittlere) potentielle Energie im Oberbecken

$$m = V \cdot \rho_{\text{Wasser}} = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \cdot 1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \cdot 1 \frac{\text{kg}}{(0,1 \text{ m})^3} = 5 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h_f = 5 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 380 \text{ m} = 19 \cdot 10^{12} \text{ J} = 19 \cdot 10^6 \text{ MJ}$$

$$W_{\text{pot}} = 19 \cdot 10^6 \text{ MWS} \cdot \frac{h}{3600 \text{ s}} = 5,28 \text{ MWh}$$

1.3 Elektrische Energie im Oberbecken

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{Fallrohr}} \cdot \eta_T \cdot \eta_G = (1 - 7\%) \cdot 0,95 \cdot 0,97 = (1 - 0,07) \cdot 0,95 \cdot 0,97 = 0,857$$

$$W_{\text{el}} = W_{\text{pot}} \cdot \eta_{\text{ges}} = 19 \cdot 10^6 \text{ MJ} \cdot 0,857 = 16,3 \cdot 10^6 \text{ MJ} = 4,52 \cdot 10^3 \text{ MWh}$$

1.4 Ablaufzeit

$$P = \frac{W}{t} \Rightarrow t = \frac{W_{\text{el}}}{P_{\text{el}}} = \frac{4,52 \cdot 10^3 \text{ MWh}}{900 \text{ MW}} = 5 \text{ h}$$

1.5 Steinkohlebedarf

$$\eta = \frac{W_{\text{el}}}{W_{\text{Sk}}} \Rightarrow W_{\text{Sk}} = \frac{W_{\text{el}}}{\eta} = \frac{16,3 \cdot 10^6 \text{ MJ}}{0,38} = 42,9 \cdot 10^6 \text{ MJ}$$

$$H_u = \frac{W}{m} \Rightarrow m_{\text{Sk}} = \frac{W_{\text{Sk}}}{H_{u\text{Sk}}} = \frac{42,9 \cdot 10^6 \text{ MJ}}{32 \text{ MJ/kg}} = 1,34 \cdot 10^6 \text{ kg} = 1,34 \cdot 10^3 \text{ t}$$

### 2 Lösungsvorschlag für die Aufgabenstellung

Schraubenkraft aus der Schraubenfestigkeit 10.9 und der Sicherheit berechnet.

$$R_{m\text{Schraubenwerkstoff}} = 10 \cdot 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{e\text{Schraubenwerkstoff}} = 0,9 \cdot R_m = 0,9 \cdot 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ oder } \rightarrow \text{TabB „Festigkeitsklasse“}$$

Zulässige Kraft pro Schraube. Spannungsquerschnitt S  $\rightarrow$  TabB „Gewinde“ M20

$$\frac{R_e}{\nu} = \sigma_{\text{zul}} = \frac{900 \text{ N/mm}^2}{1,2} = 750 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{F_{\text{zul}}}{S} \Rightarrow F_{\text{zul}} = \sigma_{\text{zul}} \cdot S = 750 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 245 \text{ mm}^2 = 183,75 \text{ kN}$$

Gesamtkraft bei 40 Schrauben

$$F_{\text{ges}} = F_{\text{zul}} \cdot n = 183,75 \text{ kN} \cdot 40 = 7350 \text{ kN}$$

Fläche des Flansches,  $d_h \rightarrow$  TabB „Durchgangsbohrung“ M20, Toleranz mittel. Die Fläche der Durchgangsbohrung kann man vernachlässigen, aber woher soll ein Schüler das in einer Prüfungssituation wissen?



$$A_{Flansch} = \frac{\pi \cdot d_a^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} - 40 \cdot \frac{\pi \cdot d_h^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_a^2 - d_i^2 - 40 \cdot d_h^2)$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot [(1,85 \text{ m})^2 - (1,65 \text{ m})^2 - 40 \cdot (0,022 \text{ m})^2] = 0,535 \text{ m}^2$$

Flächenpressung der Dichtung

$$p = \frac{F_{ges}}{A_{Dichtung}} = \frac{7350 \text{ kN}}{0,535 \text{ m}^2} = \frac{7350 \text{ kN}}{0,535 \cdot (1000 \text{ mm})^2} = 13,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \rightarrow \text{kleiner } p_{zul}, \text{ also ausreichend}$$

Hinweis 1: Die Schraubenkräfte, die in Aufg. 2 angenommen werden, sehen sehr groß aus, aber tatsächlich wäre die einzelne Flanschverbindung deutlich unterdimensioniert. Das Problem ist der rechteckige Rohrkrümmer, in dem der Wasserstrom waagrecht vollständig abgebremst und senkrecht sozusagen von 0 auf 100 beschleunigt wird. In beiden Fällen muss der Krümmer die notwendigen Kräfte  $F_x$  und  $F_y$  auffangen und an die Schrauben weitergeben.

Aus Volumen und Ablaufdauer ( $\rightarrow$  Aufg. 1.4) ergeben sich Volumen- und Massenstrom:

$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{5 \cdot 10^6 \text{ m}^3}{5 \text{ h}} = \frac{5 \cdot 10^6 \text{ m}^3}{5 \cdot 3600 \text{ s}} \approx 2800 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho_{Wasser} \approx 2800 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 2800 \frac{\text{t}}{\text{s}}$$

Mit Rohr-Innen $\emptyset \approx d_i$  kann man die Strömungsgeschwindigkeit abschätzen:

$$A_{Rohr} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1,65 \text{ m})^2}{4} = 2,14 \text{ m}^2$$

$$\dot{V} = A \cdot v \Rightarrow v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{2800 \text{ m}^3/\text{s}}{2,14 \text{ m}^2} \approx 1300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Wie groß ist doch noch gleich die Schallgeschwindigkeit in Wasser?

Aus dem Impuls des Wassers kann man die nötige Kraft (betragsmäßig für eine Richtung) abschätzen (unter Vernachlässigung von Überschall, Viskosität usw.):

$$F_{x/y} = \frac{d p}{d t} = \frac{d m \cdot v}{d t} = \dot{m} \cdot v = 2800000 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1300 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3600000000 \text{ N} = 3600000 \text{ kN} \gg 7350 \text{ kN}$$

Das entspricht 360 000 Tonnen, und zwar sowohl in waagerechter als auch zusätzlich in senkrechter Richtung. Diese Last muss von den Schrauben axial aufgenommen werden und dann muss noch genügend Klemmkraft vorhanden sein, um die senkrechte Last durch Reibung zu halten ..

Schon diese Überschlagsrechnung zeigt, warum Richtungsänderungen in Fallrohren vermieden werden und der Wasserstrom auf mehrere kleinere und parallel verlaufende Fallrohre verteilt wird.



## 3 Hubeinrichtung

### 3.1 Leistung

$$P_{Last} = F_{Gmax} \cdot v_{max} = 15 \text{ kN} \cdot 0,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3 \text{ kW}$$

$$\eta_{ges} = \eta_G \cdot \eta_{ST} = 0,7 \cdot 0,8 = 0,56$$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \Rightarrow P_{ab} = P_M \cdot \eta_{ges} = 5,5 \text{ kW} \cdot 0,56 = 3,08 \text{ kW} > 3 \text{ kW} \Rightarrow \text{reicht !}$$

Es sind andere Berechnungswege möglich.

### 3.2 Übersetzungsverhältnis

Nach Drehmoment / Hublast

$$M_{Last} = F_{Gmax} \cdot \frac{d_{Tr}}{2} = 15 \text{ kN} \cdot \frac{400 \text{ mm}}{2} = 3 \text{ kNm}$$

$$P = 2\pi \cdot M \cdot n \Rightarrow M_M = \frac{P_M}{2\pi \cdot n_M} = \frac{5,5 \text{ kW}}{2\pi \cdot 1450 \text{ min}^{-1}} = 36,2 \text{ Nm}$$

$$i_{ges} \cdot \eta_{ges} = \frac{M_{ab}}{M_{zu}} \Rightarrow i = \frac{M_{ab}}{M_M \cdot \eta_{ges}} = \frac{3 \text{ kNm}}{36,2 \text{ Nm} \cdot 0,56} = 147,9 \quad \text{oder größer}$$

Nach Drehzahl / Hubgeschwindigkeit

$$v = \pi \cdot n \cdot d \Rightarrow n_{ST} = \frac{v_{max}}{\pi \cdot d_{Tr}} = \frac{0,2 \text{ m/s}}{\pi \cdot 400 \text{ mm}} = 0,159 \text{ s}^{-1} = 9,55 \text{ min}^{-1}$$

$$i = \frac{n_{zu}}{n_{ab}} = \frac{1450 \text{ min}^{-1}}{9,55 \text{ min}^{-1}} = 151,9 \quad \text{oder größer (!)}$$

Die Übersetzung muss größer als 147,9 sein, damit  $F_{Gmax}$  gehoben werden kann, und größer als 151,9 sein, damit  $v_{max}$  nicht überschritten wird  $\rightarrow$  also größer 151,9.

### 3.3 Getriebebauform

Mehrstufige Getriebe

Schneckengetriebe

Riemen- oder Kettentriebe mit großer Übersetzung

## 4 Hebezeug

### 4.1 Kräfte

$$F_K = F_{Gmax} = 15 \text{ kN}$$

$$F_K = 2 \cdot F_H \cdot \sin 50^\circ \Rightarrow F_H = \frac{F_K}{2 \cdot \sin 50^\circ} = \frac{15 \text{ kN}}{2 \cdot \sin 50^\circ} = 9,8 \text{ kN}$$

### 4.2 Rundstahlkette

$$S = \frac{\pi \cdot d_K^2}{4} = \frac{\pi \cdot (12 \text{ mm})^2}{4} = 113 \text{ mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{zlim}}{v} = \sigma_{zzul} > \sigma_z = \frac{F}{n \cdot S} \Rightarrow$$

$$\sigma_z = \frac{F_K}{n \cdot S} = \frac{15 \text{ kN}}{2 \cdot 113 \text{ mm}^2} = 66,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$v = \frac{R_e}{\sigma_z} = \frac{275 \text{ N/mm}^2}{66,3 \text{ N/mm}^2} = 4,1 \quad \text{ist ausreichend}$$