Ü 48

a) Mit $n = 600/60 = 10\ s^{-1}$, $H = 420$ m, $\dot V_{1/1} = 18{,}45\ m^3/s$
$\dot V = 0{,}85 \cdot \dot V_{1/1} = 15{,}68\ m^3/s$ (Unterabschnitt 10.4.3.2), geschätzt $\eta_{RL} = 0{,}92$ sowie $c_{0W} \approx 0$, wird

$$Y_T = \eta_{RL} \cdot Y_{th} + c_{0W}^2/2 \approx \eta_{RL} \cdot g \cdot H$$

$$Y_T = 0{,}92 \cdot 9{,}81 \cdot 420\ [m/s^2 \cdot m] = 3790{,}6\ m^2/s^2$$

$$n_{y,M,1/1} = n \cdot \dot V_{1/1}^{1/2} \cdot Y_T^{-3/4} = 10 \cdot 18{,}45^{1/2} \cdot 3790{,}6^{-3/4}\ [s^{-1} \cdot (m^3/s)^{1/2} \cdot (m^2/s^2)^{-3/4}]$$

$$n_{y,M,1/1} = 0{,}089$$

$$n_{y,M} = n \cdot \dot V^{1/2} \cdot Y_T^{-3/4} = 10 \cdot 15{,}68^{1/2} \cdot 3790{,}6^{-3/4}$$

$$n_{y,M} = 0{,}082$$

Hierzu nach Tab. 11-1 FRANCIS-Langsamläufer notwendig.

b) $P_{e,max} = \varrho \cdot \dot V_{1/1} \cdot Y_T \cdot \eta_e$ mit geschätzt $\eta_e = 0{,}9$

$P_{e,max} = 10^3 \cdot 18{,}45 \cdot 3790{,}6 \cdot 0{,}9\ [kg/m^3 \cdot m^3/s \cdot m^2/s^2]$

$\underline{P_{e,max}} = 62{,}9 \cdot 10^6\ W = \underline{62{,}9\ MW}$

$P_e = \varrho \cdot \dot V \cdot Y_T \cdot \eta_e = 0{,}85 \cdot P_{e,max} = 53{,}5$ MW

$\eta_A = \eta_{RL} \cdot \eta_e \cdot \eta_G$ mit geschätzt $\eta_G = 0{,}96$

$\underline{\eta_A} = 0{,}92 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}96 = \underline{0{,}795}$

c) Aus Gl. (4-51) mit $\psi = 2 \ldots 3{,}5$ bei $r = 0{,}5 \ldots 0{,}8$ nach Unterabschnitt 4.3.3.2:

$u_2 = \sqrt{2 \cdot Y_T/\psi}$ Angenommen $\psi = 2{,}0$ bei $r = 0{,}5$

$u_2 = \sqrt{2 \cdot 3790{,}6/2}\ [\sqrt{m^2/s^2}] = 61{,}57$ m/s

$\underline{D_2} = u_2/(\pi \cdot n) = 61{,}57/(\pi \cdot 10) = \underline{1{,}96\ m}$

Da spezifisch langsamläufiges Radialrad und großer Durchmesser D_2, Druckkante achsparallel ausgeführt, also $D_{2,(a)} = D_{2,(m)} = D_{2,(i)} = D_2$.

d) Aus Durchfluß

$b_2 = \dot V_{La}/(D_2 \cdot \pi \cdot c_{3m})$ Mit

$\dot V_{La} = \dot V \cdot \lambda_L$ dabei geschätzt $\lambda_L = 0{,}96$ (Gl. 8-119)

$c_{3m} = c_{2m}/\tau_2$ geschätzt $\tau_2 = 1{,}08$

$c_{2m} = 0{,}9 \cdot c_0$ gesetzt nach Gl. (10-56)

$c_0 = c_{0m}$ da $\alpha_0 = 90°$ (drallfreie Abströmung)

$c_{0m} = \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot Y_T}$ gemäß Gl. (4-94)

$$\varepsilon = 1{,}64 \cdot (\delta_{r,(a)} \cdot \tan\beta_{0,(a)} \cdot \sqrt{\lambda_L/k_N} \cdot n_y)^{2/3} \quad \text{(Gl. 4-99)}$$

$\delta_{r,(a)} = 1$ da $\alpha_0 = 90°$

$\beta_{0,(a)} = 17°$ (Abschnitt 5.2.3)

$k_N = 0{,}7$ geschätzt

Mit den Werten ergibt sich

$$\underline{\varepsilon} = 1{,}64 \cdot (1 \cdot \tan 17° \cdot \sqrt{0{,}96/0{,}7} \cdot 0{,}082)^{2/3} = 0{,}155 \approx \underline{0{,}16}$$

$c_0 = c_{0m} = 0{,}16 \cdot \sqrt{2 \cdot 3790{,}6}\ [\sqrt{m^2/s^2}] = 13{,}93\ m/s$

$c_{2m} = 0{,}9 \cdot 13{,}06\ [m/s] = 12{,}54\ m/s$

$c_{3m} = 12{,}54/1{,}08\ [m/s] = 11{,}6\ m/s$

$\dot V_{La} = 15{,}68 \cdot 0{,}96\ [m^3/s] = 15{,}05\ m^3/s$

$$\underline{b_2} = \frac{15{,}05}{1{,}96 \cdot \pi \cdot 11{,}6} \left[\frac{m^3/s}{m \cdot m/s}\right] = 0{,}211\ m \approx \underline{210\ mm}$$

e) Aus Druckkanten-Geschwindigkeitsdreieck:

$\tan\beta_2 = c_{2m}/(u_2 - c_{2u})$ Mit

$c_{2u} = Y_{Sch\infty}/u_2$ da $\alpha_1 = 90°$

$Y_{Sch\infty} \approx Y_{Sch} = Y_T \cdot \eta_{Sch}$

$\eta_{Sch} = \eta_e + 0{,}05 = 0{,}9 + 0{,}05 = 0{,}95$

$c_{2u} = 0{,}95 \cdot 3790{,}6/61{,}57 = 58{,}49$ m/s

$\tan\beta_2 = 12{,}54/(61{,}57 - 58{,}49) = 4{,}07 \longrightarrow \underline{\beta_2 \approx 75°}$

f) Gl. (4-43) $r \approx 1 - c_{3u}/(2 \cdot u_2)$

Da $k_M \approx 1$, ist $c_{3u} \approx c_{2u} = 58{,}49$ m/s Damit

$r \approx 1 - 58{,}49/(2 \cdot 61{,}57) = \underline{0{,}53}$

g) $$D_{SM} = \sqrt{\frac{\dot V_{La}}{c_{SM} \cdot \pi/4} + D_N^2} \quad \text{Mit}$$

$D_N = 1{,}4 \cdot D_{We}$ nach Gl. (10-49)

$D_{We} \approx \sqrt[3]{5 \cdot T_e/\tau_t}$ lt. Gl. (10-46)

$\tau_t = 20\ N/mm^2$ (Gl. 10-48)

$T_{e,max} = P_{e,max}/(2 \cdot \pi \cdot n)$ lt. Gl. (10-47)

$= 62{,}9 \cdot 10^6/(2 \cdot \pi \cdot 10)\ [(Nm/s)/(1/s)]$

$= 1 \cdot 10^6\ Nm = 1 \cdot 10^9\ Nmm$

$D_{We} = \sqrt[3]{5 \cdot 1 \cdot 10^9/20}\ [\sqrt[3]{Nmm/(N/mm^2)}]$

$D_{We} = 0{,}63 \cdot 10^3\ mm = 630\ mm$

$D_N = 1{,}4 \cdot 630 = 880\ mm$

Gl. (10-50) $c_{SM} = c_0/1{,}15 = 13{,}94/1{,}15 = 12{,}1\ m/s$

$$D_{SM} = \sqrt{\frac{15{,}05}{12{,}1 \cdot \pi/4} + 0{,}88^2} \left[\sqrt{\frac{m^3/s}{m/s} + m^2}\right]$$

$\underline{D_{SM}} = 1{,}536\ m \approx \underline{1{,}54\ m}$

$k_N = 1 - (D_N/D_{SM})^2 = 1 - (0{,}88/1{,}54)^2 = 0{,}67 \approx 0{,}7$

(etwa wie in Frage d) angenommen!)

h) $$z_{La} \approx 8{,}5 \cdot \frac{\sin\beta_2}{1 - D_1/D_2}$$

Mit angen. $D_1 \equiv D_{1,(m)} \approx (D_{SM} + D_N)/2$
$= (1{,}54 + 0{,}88)/2 = 1{,}21\ m$

$$z_{La} = 8{,}5 \cdot \frac{\sin 75°}{1 - 1{,}21/1{,}96} = 21$$

Nach Tab. 6-4 für $n_y = 0{,}08$ beträgt $z_{La} = 18$

Ausgeführt: $\underline{z_{La} = 18}$

i) $\tau_2 = t_2/(t_2 - \sigma_2)$ mit

$t_2 = D_2 \pi / z_{La} = 1{,}96 \cdot \pi / 18\ [m] = 0{,}342\ m$

$\sigma_2 = s_2/\sin\beta_2 = 0{,}04/\sin 75^\circ\ [m] = 0{,}041\ m$

$\tau_2 = 0{,}342/(0{,}342 - 0{,}041) = 1{,}14$

Angenommen war $\tau_2 = 1{,}08$ (Frage d). Korrektur wäre somit notwendig (Abweichung zu groß). Unterbleibt aus Platzgründen.

j) Nach Gl. (5-9):

$$H_{S,max} \leq \frac{1}{g} \cdot \left[\frac{p_{UW}}{\varrho} + \frac{c_{UW}^2}{2} + Y_{V,SL} - \frac{p_{Da}}{\varrho} - Y_{H,M} \right]$$

$p_{UW} = p_b = (1 - 2{,}4 \cdot 10^{-5} \cdot z)^5 \cdot p_{b,0}$ [bar] (Gl. 5-3)

$p_{b,0} = 1{,}01325$ bar und $z = 1230$ m

$p_{UW} = (1 - 2{,}4 \cdot 10^{-5} \cdot 1230)^5 \cdot 1{,}01325 = 0{,}872$ bar

Nach Tafel 9 für Wasser von 20 °C

$p_{Da} = 0{,}024$ bar und $\varrho = 998{,}2\ kg/m^3$

Term $c_{UW}^2/2$ entfällt

Geschätzt $Y_{V,SL} \approx 10\ m^2/s^2$

Gl. (5-20): $Y_{H,M} = (n \cdot \sqrt{\dot V_{La}} / S_y)^{4/3}$

Nach Abschnitt 5.2.4 für FRANCIS-Turbinen

$S_y = 0{,}98 \ldots 0{,}86$ für $n_y = 0{,}09 \ldots 0{,}36$

Erwartet: $S_y = 0{,}98$, da $n_y = 0{,}082$

$$Y_{H,M} = \left(\frac{10 \cdot \sqrt{15{,}05}}{0{,}98} \right)^{4/3} \left[\left(\frac{1}{s} \cdot \sqrt{\frac{m^3}{s}} \right)^{4/3} \right] = 134{,}9\ \frac{m^2}{s^2} \approx 135\ \frac{m^2}{s^2}$$

Mit den Werten ergibt sich

$$H_{S,max} \leq \frac{1}{9{,}81} \cdot \left[\frac{0{,}872 \cdot 10^5}{0{,}998 \cdot 10^3} + 10 - \frac{0{,}024 \cdot 10^5}{0{,}998 \cdot 10^3} - 135 \right]$$

$$\left[\frac{1}{m/s^2} \cdot \left(\frac{N/m^2}{kg/m^3} \quad \frac{m^2}{s^2} \quad \frac{N/m^2}{kg/m^3} \quad \frac{m^2}{s^2} \right) \right]$$

$\underline{H_{S,max} \leq -3{,}59\ m \approx -3{,}6\ m}$

Das bedeutet Gegendruck (Zulaufhöhe) notwendig. Die Turbine muß mindestens 3,6 m unter dem Unterwasserspiegel angeordnet werden, z.B. in einem Maschinenhaus außerhalb der Staumauer des Unterwasser-Sees mit Saugleitung durch die Staumauer.

Zur Gestaltung des Laufrades wird auch auf die Richtwerte von Tab. 6-4 verwiesen.