

1. Tosbeckendimensionierung - Energieumwandlung im Auslassbauwerk

1.1 Zusammenfassung

Das offene Auslassbauwerk wird als kombiniertes Bauwerk ökohydraulisch gestaltet und erfüllt die Funktionen Grundablass mit ökologischer Durchlässigkeit, Betriebsauslass und Hochwasserentlastung. Das Tosbecken ist im linken Feld im Bereich des Betriebsauslasses angeordnet. Es wird auf mögliche Regelabgaben und den HWBF 1 bemessen. Die Bemessung erfolgt sowohl für den Endausbauzustand als auch für die Zwischenzustände (siehe Erl. Bericht Kap. 4.2).

Die Ergebnisse der Tosbeckenbemessung sind nachfolgend dargestellt. Die Tosbeckenbemessung erfolgte hierbei für den Abfluss über das Betriebsauslassschütz.

Für das Tosbecken des Auslassbauwerks werden folgende Abmessungen gewählt:

- Tosbeckenlänge $L_T = \text{rd. } 9,0 \text{ m}$
- Tosbeckenbreite $B = 5,25 \text{ m}$
- Sohlhöhe Tosbecken $Z_{T0} = 381,20 \text{ mÜNNH}$
- Tosbeckeneintiefung $e = 0,6 \text{ m}$
- Sohlhöhe im Unterwasser am Tosbeckenende $Z_{su} = 381,80 \text{ mÜNNH}$

1.2 Berechnungsgrundlagen

Als Berechnungsgrundlage sind folgende Randparameter anzugeben:

Z_{T0}	Sohlhöhe im Tosbecken in mÜNNH
e	Eintiefung des Tosbeckens hinter dem Betriebsauslassschütz in m
H_0	Wasserstand im Staubereich (Oberwasser) in mÜNN
Q	Durchfluss am Betriebsauslassschütz in m^3/s
h_u	Wasserstand im Flussabschnitt hinter dem Tosbecken (Unterwasser) in m
b	Schützbreite in m
B	Tosbeckenbreite bzw. bei Einsatz einer Überfallschwelle Breite der Überfallschwelle in m

Für die weitere Berechnung werden folgende Grundparameter anhand der Eingabewerte bestimmt:

q	Abfluss pro Breitereinheit in $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$
Δh	Energiehöhendifferenz zwischen Einstaubereich und Tosbecken in m
h_{gr}	Grenzwassertiefe in m

h_1	Wassertiefe im Tosbecken vor dem Wechselsprung in m
v_1	mittlere Fließgeschwindigkeit im Tosbecken vor dem Wechselsprung in m/s
Fr_1	Froude-Zahl im Tosbecken vor dem Wechselsprung
ω	Seitenverhältnis im Tosbecken $\omega = \frac{h_1}{B}$

Folgende Ausgabewerte sind in allen Berechnungsvarianten zu finden:

h_2	Wassertiefe im Tosbecken hinter dem Wechselsprung (konjugierte Wassertiefe) in m
ε	Einstaugrad $\varepsilon = \frac{h_u}{(h_2 - e)}$
e_{erf}	theoretisch erforderliche Eintiefung für einen guten Einstaugrad ($\varepsilon = 1,05$) in m
η	Wirkungsgrad des Wechselsprunges bezogen auf die Energiehöhe in Prozent
v_2	mittlere Fließgeschwindigkeit im Tosbecken hinter dem Wechselsprung in m/s
L_r	Länge der Deckwalze des Wechselsprunges in m
L_T	Empfohlene Tosbeckenlänge nach Noack $L_T = 4,5 (h_2 - h_1)$ in m

Zur Bestimmung des Einstaugrades ε wurde folgende Formel verwendet:

$$\varepsilon = \frac{h_u}{(h_2 - e)}$$

Der optimale Bereich für den Einstaugrad liegt zwischen 1,05 und 1,10.

Berechnung des klassischen Wechselsprungs [Hager, 1992]:

$$Y^* = \frac{h_2^*}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right)$$

Anhand der Eingangs-Froude-Zahl (Fr_1) wird ein Verhältnis der konjugierten Wassertiefen berechnet (Abbildung 1). Über die Eingangswassertiefe h_1 erhält man h_2^* und im Vergleich mit e den entsprechenden Einstauggrad.

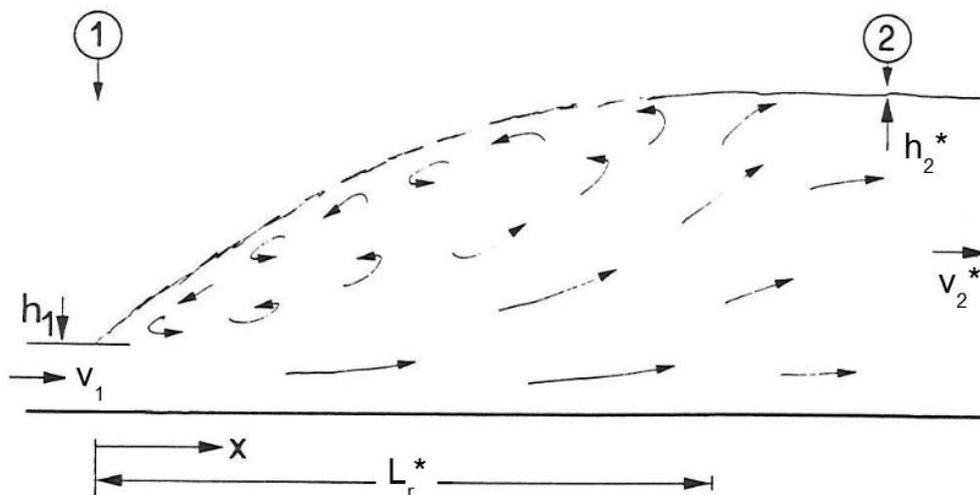


Abbildung 1: Der klassische Wechselsprung mit zugehörigen Parametern

Sohlrauhheit

Eine Berücksichtigung der Sohlrauheit reduziert h_2^* und entsprechend auch die benötigte Eintiefung. Diese Berechnung ist genauer als die des klassischen Wechselsprunges.

Als zusätzlicher Parameter muss die äquivalente Sandrauheit der Sohle angegeben werden:

k_s äquivalente Sandrauheit in m

Angaben zu verschiedenen Rauheiten sind unter [Schröder, Ralph C.M., 1990] nachzulesen. Nach [Carollo, Ferro, Pampalone, 2007] wird die Sohlrauheit wie folgt erfasst:

$$Y = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + 8 \left[1 - \frac{2}{\pi} \arctan \left(0,8 \frac{k_s}{h_1} \right)^{0,75} \right] Fr_1^2} - 1 \right\}$$

Eine raue Sohle wirkt sich vor allem auch verkürzend auf die Wechselsprunglänge aus.

1.3 Berechnungsergebnisse

1.3.1 Endausbauzustand

In Tabelle 1 sind die Eingangsparameter für die Tosbeckenbemessung des Betriebsauslasses dargestellt. Es wurden die Regelabgaben Q_{R1} , Q_{R2} und Q_{R3} bei Vollstau $Z_V = 290,05$ müNHN untersucht.

Für den HWBF 1 mit $BHQ_1 = 21,8$ m³/s wird durch den Betriebsauslass die Regelabgabe $Q_{R3} = 3,9$ m³/s angesetzt. Zusätzlich müssen 17,9 m³/s (= 21,8 m³/s – 3,9 m³/s) über die gelegte Stauklappe abgeführt werden.

Für den HWBF 2 mit $BHQ_2 = 35,8$ m³/s (im Endausbauzustand) wird der maximal mögliche Abfluss von 21,9 m³/s über die Stauklappe angesetzt. Über den Betriebsauslass müssen in diesem Fall noch 13,9 m³/s (= 35,8 m³/s – 21,9 m³/s) abgeführt werden.

Tabelle 1: Eingangsparameter Endausbau

	Eingangsparameter für unterströmtes Schütz													
	H_o [müNHN]	Q [m ³ /s]	H_u [müNHN]	h_u [m]	b [m]	B [m]	q [m ² /s]	Δh [m]	h_{gr} [m]	h_{1it} [m]	h_1 [m]	v_1 [m/s]	Fr_1 [-]	ω [-]
Q_{R1}	284,00	2,10	282,20	0,40	1,60	5,25	0,40	2,80	0,254	0,055	0,055	7,34	10,04	0,01
Q_{R2}	287,50	3,20	282,30	0,50	1,60	5,25	0,61	6,30	0,336	0,055	0,055	11,07	15,06	0,01
Q_{R3}	290,05	3,90	282,40	0,60	1,60	5,25	0,74	8,85	0,383	0,057	0,057	13,13	17,63	0,01
HWBF ₁	290,05	3,90	283,05	1,25	1,60	5,25	0,74	8,85	0,383	0,057	0,057	13,13	17,63	0,01
HWBF ₂	290,05	13,90	283,70	1,90	1,60	5,25	2,65	8,85	0,894	0,203	0,203	13,02	9,22	0,04

In Tabelle 2 sind die Berechnungsergebnisse für die Tosbeckendimensionierung im Endausbau dargestellt.

Tabelle 2: Berechnungsergebnisse Endausbau

	Tosbeckenlänge mit dem Ansatz eines klassischen Wechselsprungs						Berücksichtigung der rauen Sohle mit $k_s = 0,2$ m					
	Y^* [-]	h_2^* [m]	ϵ [-]	η [%]	L_r^* [m]	L_T [m]	Y [-]	h_2 [m]	ϵ [-]	η [%]	L_r [m]	L_T [m]
Q_{R1}	13,7	0,75	2,72	73	3,4	3,1	10,6	0,58	$h_2 < h_u$	79	2,4	2,3
Q_{R2}	20,8	1,15	0,92	82	5,0	4,9	16,9	0,93	1,51	85	4,0	3,9
Q_{R3}	24,4	1,38	0,77	84	5,7	6,0	20,3	1,15	1,10	87	5,0	4,9
HWBF ₁	24,4	1,38	1,60	84	5,7	6,0	20,3	1,15	2,28	87	5,0	4,9
HWBF ₂	12,6	2,55	0,97	71	11,6	10,6	11,4	2,31	1,11	73	9,7	9,5

Für den erforderlichen Einstaugrad ϵ (> 1,05) ist damit der Abfluss Q_{R3} maßgebend. Dieser ist bei einer gewählten Eintiefung von 0,6 m und Berücksichtigung der rauen Sohle eingehalten. Die gewählte Eintiefung ist für die Hochwasserbemessungsfälle 1 und 2 ausreichend.

Dem HWBF 2 liegen Ereignisse zugrunde, die statistisch gesehen alle 5.000 Jahre auftreten. Er dient dem Nachweis der Stauanlagensicherheit bei Extremhochwasser. Diese Sicherheit ist auch gegeben, wenn es infolge sehr hoher Abflüsse zu Schäden am Tosbecken kommt. Auf eine Auslegung auf den HWBF 2 wird daher zur Reduzierung der Tosbeckenlänge verzichtet. Für die erforderliche Mindestlänge des Tosbeckens sind damit der Abfluss Q_{R3} und der HWBF 1 maßgebend. Es ergibt sich entsprechend dem Ansatz eines klassischen Wechselsprungs eine Tosbeckenlänge von mindestens $L_{T,min} = 6,0$ m. Speziell im Hinblick auf die großen Bemessungsabflüsse des HRB Eberdingen ist die Tosbeckenbemessung mit Unsicherheiten behaftet. Es empfiehlt sich daher die Durchführung eines Modellversuchs zur Überprüfung der gewählten Ansätze. Ggf. kann durch Optimierungen (z.B. Einbauten) die Tosbeckenlänge und -tiefe reduziert werden. Auf der sicheren Seite liegend wird eine Tosbeckenlänge von $L_T = 6,0$ m zuzüglich einer 3 m langen Anrampung am Tosbeckenende gewählt.

1.3.2 Zwischenzustand 1

Im Zwischenzustand 1 wird davon ausgegangen, dass das HRB Eberdingen als einzige HWS-Maßnahme umgesetzt wurde. Dies bedeutet zum einen, dass die ankommenden Zuflüsse nicht durch ein HRB oberstrom (HRB Weissach) reduziert werden und zum anderen, dass unterstrom des HRB Eberdingen noch keine weiteren HRB und örtlichen HWS-Maßnahmen existieren. Die Regelabgabe aus dem HRB Eberdingen wird so verringert, dass die Leistungsfähigkeit in der Ortslage erst bei Ereignissen $> HQ_{10}$ überschritten wird.

In Tabelle 3 sind die Eingangsparameter für die Tosbeckenbemessung des Betriebsauslasses im die Zwischenzustand 1 dargestellt. Es wurden die reduzierten Regelabgaben Q_{R1} , Q_{R2} und Q_{R3} bei Vollstau $Z_V = 290,05$ mÜNNH untersucht.

Für den HWBF 1 wird durch den Betriebsauslass die maximale Regelabgabe $Q_{R3} = 2,4$ m³/s angesetzt. Zusätzlich müssen 22,0 m³/s (= 24,4 m³/s – 2,4 m³/s) über die gelegte Stauklappe abgeführt werden.

Für den HWBF 2 mit $BHQ_2 = 41,2$ m³/s wird der maximal mögliche Abfluss von 23,3 m³/s bei $Z_{H2} = 290,10$ mÜNNH über die Stauklappe angesetzt. Über den Betriebsauslass müssen in diesem Fall noch 17,9 m³/s (= 41,2 m³/s – 23,3 m³/s) abgeführt werden.

Tabelle 3: Eingangparameter Zwischenzustand 1

	Eingangparameter für unterströmtes Schütz													
	H ₀ [müNHN]	Q [m ³ /s]	H _u [müNHN]	h _u [m]	b [m]	B [m]	q [m ² /s]	Δh [m]	h _{gr} [m]	h _{1 it} [m]	h ₁ [m]	v ₁ [m/s]	Fr ₁ [-]	ω [-]
Q _{R1}	284,00	1,20	282,10	0,30	1,60	5,25	0,23	2,80	0,175	0,031	0,031	7,37	13,36	0,01
Q _{R2}	287,50	1,70	282,15	0,35	1,60	5,25	0,32	6,30	0,220	0,029	0,029	11,09	20,73	0,01
Q _{R3}	290,05	2,40	282,25	0,45	1,60	5,25	0,46	8,85	0,277	0,035	0,035	13,15	22,52	0,01
HWBF ₁	290,10	2,40	283,10	1,30	1,60	5,25	0,46	8,90	0,277	0,035	0,035	13,19	22,62	0,01
HWBF ₂	290,10	17,90	283,95	2,15	1,60	5,25	3,41	8,90	1,058	0,262	0,262	13,02	8,12	0,05

In Tabelle 2 sind die Berechnungsergebnisse für die Tosbeckendimensionierung im Zwischenzustand 1 dargestellt.

Tabelle 4: Berechnungsergebnisse Zwischenzustand 1

	Tosbeckenlänge mit dem Ansatz eines klassischen Wechselsprungs						Berücksichtigung der rauen Sohle mit k _s = 0,2 m					
	Y* [-]	h ₂ * [m]	ε [-]	η [%]	L _r * [m]	L _T [m]	Y [-]	h ₂ [m]	ε [-]	η [%]	L _r [m]	L _T [m]
Q _{R1}	18,4	0,57	h ₂ <h _u	79	2,5	2,4	13,1	0,41	h ₂ <h _u	85	1,7	1,7
Q _{R2}	28,8	0,84	1,45	87	3,3	3,7	21,7	0,63	10,06	90	2,8	2,7
Q _{R3}	31,4	1,09	0,92	88	4,1	4,7	24,7	0,86	1,73	90	3,8	3,7
HWBF ₁	31,5	1,09	2,65	88	4,1	4,8	24,8	0,86	4,98	90	3,8	3,7
HWBF ₂	11,0	2,88	0,94	67	13,0	11,8	10,1	2,64	1,05	69	11,0	10,7

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die gewählten Parameter für den Endausbauzustand auch für den Zwischenzustand 1 ausreichend sind. Auf eine Auslegung auf den HWBMF^o2 wird aus den in Kapitel 1.3.1 genannten Gründen verzichtet.

1.3.3 Zwischenzustand 2

Im Zwischenzustand 2 wird davon ausgegangen, dass das HRB Eberdingen sowie die geplanten HWS-Maßnahmen unterstrom umgesetzt wurden. Die Regelabgabe entspricht daher dem Endausbauzustand. Das oberstrom geplante HRB Weissach ist im Zwischenzustand 2 noch nicht vorhanden.

In Tabelle 5 sind die Eingangparameter für die Tosbeckenbemessung des Betriebsauslasses im die Zwischenzustand 2 dargestellt. Es wurden die vollen Regelabgaben Q_{R1}, Q_{R2} und Q_{R3} bei Vollstau Z_V = 290,05 müNHN untersucht.

Für den HWBF 1 wird durch den Betriebsauslass die maximale Regelabgabe Q_{R3} = 3,9 m³/s angesetzt. Zusätzlich müssen 17,9 m³/s (= 21,8 m³/s – 3,9 m³/s) über die gelegte Stauklappe abgeführt werden. Die Bemessung für die Regelabgaben und den HWBF 1 sind somit für den Endausbau und den Zwischenzustand 2 identisch.

Für den HWBF 2 mit $BHQ_2 = 41,1 \text{ m}^3/\text{s}$ wird der maximal mögliche Abfluss von $23,3 \text{ m}^3/\text{s}$ bei $Z_{H2} = 290,10 \text{ müNHN}$ über die Stauklappe angesetzt. Über den Betriebsauslass müssen in diesem Fall noch $17,8 \text{ m}^3/\text{s}$ ($= 41,1 \text{ m}^3/\text{s} - 23,3 \text{ m}^3/\text{s}$) abgeführt werden.

Tabelle 5: Eingangsparameter Zwischenzustand 2

	Eingangsparameter für unterströmtes Schütz													
	H_o [müNHN]	Q [m ³ /s]	H_u [müNHN]	h_u [m]	b [m]	B [m]	q [m ² /s]	Δh [m]	h_{gr} [m]	h_{1it} [m]	h_1 [m]	v_1 [m/s]	Fr_1 [-]	ω [-]
Q_{R1}	284,00	2,10	282,20	0,40	1,60	5,25	0,40	2,80	0,254	0,055	0,055	7,34	10,04	0,01
Q_{R2}	287,50	3,20	282,30	0,50	1,60	5,25	0,61	6,30	0,336	0,055	0,055	11,07	15,06	0,01
Q_{R3}	290,05	3,90	282,40	0,60	1,60	5,25	0,74	8,85	0,383	0,057	0,057	13,13	17,63	0,01
HWBF ₁	290,05	3,90	283,05	1,25	1,60	5,25	0,74	8,85	0,383	0,057	0,057	13,13	17,63	0,01
HWBF ₂	290,10	13,90	283,70	1,90	1,60	5,25	2,65	8,90	1,054	0,260	0,260	13,02	8,15	0,05

In Tabelle 6 sind die Berechnungsergebnisse für die Tosbeckendimensionierung im Zwischenzustand 2 dargestellt. Unterschiede zum Endausbauzustand ergeben sich dabei nur für den HWBF 2.

Tabelle 6: Berechnungsergebnisse Zwischenzustand 2

	Tosbeckenlänge mit dem Ansatz eines klassischen Wechselsprungs						Berücksichtigung der rauen Sohle mit $k_s = 0,2 \text{ m}$					
	Y^* [-]	h_2^* [m]	ϵ [-]	η [%]	L_r^* [m]	L_T [m]	Y [-]	h_2 [m]	ϵ [-]	η [%]	L_r [m]	L_T [m]
Q_{R1}	13,7	0,75	2,72	73	3,4	3,1	10,6	0,58	$h_2 < h_u$	79	2,4	2,3
Q_{R2}	20,8	1,15	0,92	82	5,0	4,9	16,9	0,93	1,51	85	4,0	3,9
Q_{R3}	24,4	1,38	0,77	84	5,7	6,0	20,3	1,15	1,10	87	5,0	4,9
HWBF ₁	24,4	1,38	1,60	84	5,7	6,0	20,3	1,15	2,28	87	5,0	4,9
HWBF ₂	11,0	2,87	0,92	67	13,0	11,8	10,1	2,64	1,03	69	11,0	10,7

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die gewählten Parameter für den Endausbauzustand auch für den Zwischenzustand 2 ausreichend sind. Auf eine Auslegung auf den HWBMF^o2 wird aus den in Kapitel 1.3.1 genannten Gründen verzichtet.

1.4 Literatur

Die verwendeten Kurzbezeichnungen stehen für folgende Fachliteratur:

- | | |
|----------------------------------|--|
| [Hager, 1992] | Hager, Willi H. (1992). Energy Dissipators and Hydraulic Jump. Dordrecht, Niederlande: Kluwer Academic Publishers. |
| [Schröder, Ralph C. M., 1990] | Schröder, Ralph C. M. (1990). Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten (Bd. 92, DVWK Schriften) Hamburg: Verlag Paul Parey. |
| [Carollo, Ferro, Pampalone 2007] | Carollo, Francesco G. - Ferro, Vito - Pampalone, Vincenzo (September 2007). Hydraulic Jumps on rough Beds. Journal of Hydraulic Engineering, 133. Jg., H. 9, S. 989-999. |