

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1. Zielsetzung der Energieumwandlungsanlage .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Funktionsweise des Tosbecken .....</b>	<b>1</b>
<b>3. Wahl des Bemessungsabfluss .....</b>	<b>1</b>
<b>4. Ergebnisse der Tosbeckenberechnung.....</b>	<b>2</b>

## **Anlagen**

<b>Anlage 1</b>	<b>Detaillierte Tosbeckenberechnung</b>
-----------------	---

## **Abkürzungen**

FWT	Fichtner Water & Transportation GmbH
LfU	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (inzwischen LUBW)
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
TLW	Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine

## **Quellenverzeichnis**

- [1] DIN 19700-10, Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen, Juli 2004
- [2] DIN 19700-11, Stauanlagen – Teil 11: Talsperren, Juli 2004
- [3] DIN 19700-12, Stauanlagen – Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken
- [4] Arbeitshilfe zur DIN 19700 für Hochwasserrückhaltebecken, LUB, Oktober 2007
- [5] „Wasserbau Aktuelle Grundlagen – Neue Entwicklungen“, Strobel, Zunic, Springer 2006

## 1. ZIELSETZUNG DER ENERGIEUMWANDLUNGSANLAGE

Das Durchlassbauwerk als Kontrollbauwerk erzwingt schießende Fließverhältnisse. Der Abfluss im ungestörten Gewässer (Schwell) erfolgt hingehend strömend. Demnach muss der schießende Abfluss des unterströmten Schützes oder des Wehrüberfalls in Form eines Wechselsprungs in strömenden Abfluss übergehen.

Aufgabe des Tosbeckens ist es die kinetische Energie des Wassers auf ein Maß zu dissipieren, dass der Abfluss schadlos abgeführt werden muss.

## 2. FUNKTIONSWEISE DES TOSBECKEN

Eine kontrollierte Energiedissipation wird am besten durch einen Wechselsprung erreicht, der die kinetische Energie durch die Ausbildung einer Deckwalze mit großer Turbulenz auf kurzer Strecke umwandelt. Die Ausbildung des Wechselsprungs (z.B.: „stetiger Wechselsprung“) kann dabei aus der Eingangs-Froudezahl abgeleitet werden. Das Tosbecken wird soweit eingetieft, dass durch den stützenden Unterwasserstand der Wechselsprung im Tosbecken gehalten wird. Die Gefahr des „Ausblasens“ des Wechselsprungs ins Unterwasser mit hohen Belastungen für die Gewässersohle wird so vermieden. Die Länge Tosbeckens richtet sich nach der Länge des Wechselsprungs. Für die Berechnung der Länge des Wechselsprungs existiert in der Fachliteratur eine Vielzahl von empirischen Formeln. Verwendung findet hier die gebräuchliche Näherungsformel:

$$L_T = 5 \cdot (h_2 - h_1)$$

Wenn das Tosbecken mit der Breite B deutlich breiter als der Schussstrahl b (= Breite des Schützes) ist, können Randwalzen entstehen, die zur Energieumwandlung beitragen. Aufgrund dessen, kann die berechnete Höhe des Wechselsprung  $h_2$  (konjungierte Wassertiefe) um den Faktor:

$$\sqrt{\frac{b}{B}}$$

abgemindert werden. Bei Bedarf können auch zusätzliche Einbauten im Tosbecken (z.B. Zahnschwellen) zur besseren Energieumwandlung beitragen.

## 3. WAHL DES BEMESSUNGSABFLUSS

Das Tosbecken ist so zu bemessen, dass in allen Betriebszuständen (auch n-1 Fall) die Energieumwandlung innerhalb des Tosbeckens erfolgt.

Die Tosbeckenbemessung erfolgt nach den klassischen Ansätzen (u.a. [4]) über die Eingangs-Froude Zahl  $Fr_1$ , dem Einstaugrad  $\epsilon$  und dem Verhältnis von vorhandener Unterwassertiefe  $h_u$  und konjugierter Wassertiefe nach dem Wechselsprung  $h_2$ . Von einer guten Energieumwandlung kann unter folgenden Bedingungen ausgegangen werden:

$$4 \leq Fr_1 \leq 8$$

$$1,05 \leq \epsilon \leq 1,25$$

Ziel bei der Dimensionierung ist es nunmehr diese Kriterien für ein breites Abflussspektrum einzuhalten. Dabei erfolgt die Dimensionierung zunächst für nur einen Bemessungsfall. Nur für genau diesen Bemessungsabfluss ist die Auslegung des Tosbeckens optimale. Für alle anderen Bemessungsfälle (Abflüsse) wird die Wirkung des Tosbeckens und die Erfüllung der Kriterien geprüft und bewertet.

#### 4. ERGEBNISSE DER TOSBECKENBERECHNUNG

Die Bemessung ergab die Auslegung auf einen optimierten Bemessungsabfluss von:

$$Q_{\text{Betriebsauslass}} = 5,54 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{HQ1})$$

$$\text{Beckenwasserstand} = \text{Stauziel } Z_A = 661,40$$

Für den Fall des Drosselabflusses von  $2,00 \text{ m}^3/\text{s}$  bei Vollstau wurde ein Einstaugrad von rd. 1,25 berechnet. Trotz der sehr hohen Froudzahlen kann aufgrund des recht hohen Einstaugrades eine nicht optimale Energieumwandlung erwartet werden. Jedoch ist die Gesamtenergie des Drosselabflusses von  $2,00 \text{ m}^3/\text{s}$  gering, so dass durch Anordnung des räumlichen Tosbeckens von einer ausreichenden Energiedissipation und damit Funktionserfüllung des Tosbeckens ausgegangen werden kann. Zur Verbesserung der Energieumwandlung könnten je nach Betriebserfahrung auch Störkörper auf der Tosbeckensohle nachgerüstet werden.

Für den erhöhten Drosselabfluss von  $4,50 \text{ m}^3/\text{s}$  liegen die Kriterien Einstaugrad und Eingangsfroudzahl in der Nähe des Bemessungsfalls von  $5,54 \text{ m}^3/\text{s}$  und lassen eine gute Energiedissipation erwarten.

Für die Überstaulastfälle BHQ1 und BHQ2 liegen Einstaugrad und Eingangsfroudzahl in noch akzeptablen Bereichen. Da planmäßig die Hochwasserentlastung über die schwimmergesteuerten Klappen und nicht durch die Schütze erfolgt, tritt dieser Lastfall planmäßig nur beim BHQ2 und damit einem sehr seltenen Ereignis ein. Wenngleich die Hochwasserentlastung über die Klappenwehre erfolgt, liefert die Berechnung vergleichbare (auf der sicheren Seite liegende) Ergebnisse und zeigt, dass auch im Fall von BHQ2 Einstaugrad wie Wechselsprungtyp eine gute Energieumwandlung erwarten lassen. Die Energiedissipation des fast senkrecht auftreffenden Überfallstrahls wirkt

zudem positiv. Von Schäden im Unterwasser wird nicht ausgegangen. Die Anlagensicherheit wird in Bezug auf die HWEA nicht gefährdet.

Die optimale Tosbeckeneintiefung  $e$  wurde zu 1,30 m berechnet.

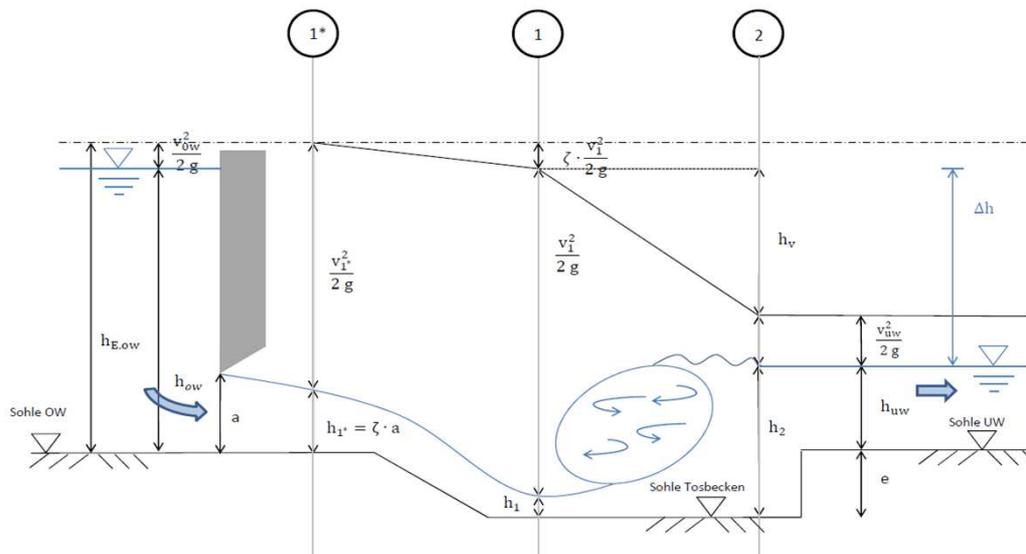
Die Tosbeckenlänge  $L_T$  wurde zu 10,00 m berechnet.

# Anlage 1

---

**Detaillierte Tosbeckenberechnung**

# Tosbeckenbemessung



Bernoulligleichung: 
$$e + h_1^* + \frac{v_1^{*2}}{2g} = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \zeta \cdot \frac{v_1^2}{2g}$$

Abb1: Schema eines Überfalls mit Wechselsprung

## 1. Eingangsgrößen

### 1.1. Eingangsgrößen Hydrologie

Bemessungsabfluss BHQ = 5,54 m³/s

### 1.2. Eingangsgrößen Wasserbau

#### Wasserspiegellagen:

Wasserspiegellage Oberwasser WSPL<sub>OW</sub> = 661,40 m+NN

Wasserspiegellage Unterwasser für BHQ WSPL<sub>U</sub>(BHQ) = 654,96 m+NN

#### Sohlhöhen:

Sohlhöhe am Schütz Sohle<sub>OW</sub> = 654,50 m+NN

Sohlhöhe Unterwasser Sohle<sub>UW</sub> = 653,84 m+NN

Betriebsauslass

#### Wassertiefen:

Wasserstand Unterwasser für BHQ h<sub>U</sub>(BHQ) = 1,12 m

Wasserstand Oberwasser für BHQ h<sub>O</sub>(BHQ) = 6,90 m

Fallhöhe Δh = 6,44 m

#### Kenngrößen Schütz:

Breite des Schützes b<sub>Schütz</sub> = 3,00 m

Länge des Schussrückens L = 4,00 m

Unterwasserstand zu BHQ eintragen

## 2. Kenngrößenberechnung

### 2.1. Berechnung des freien Ausflusses unter dem Schütz

Öffnungshöhe a = 0,26 m  
Zulaufgeschwindigkeit v<sub>o</sub> = 0,5 m/s  
Einschnürungsbeiwert ψ<sub>90</sub> = 0,610  
Ausflussbeiwert μ = 0,60

$$\psi_{90} = \frac{1}{1 + 0,64 \cdot \sqrt{1 - (a/h_o)^2}}$$

$$\mu = \frac{\psi}{\sqrt{1 + \frac{\psi \cdot a}{h_o}}}$$

Ausfluss unter Schütz Q<sub>Schütz</sub> = 5,54 m³/s  
Fließtiefe Ausflusstahl h1\* = 0,160 m  
Fließgeschwindigkeit Ausflusstahl v1\* = 11,51 m/s

$$Q_{Schütz} = \mu \cdot a \cdot b_{Schütz} \cdot \sqrt{2g \cdot \left( h_o + \frac{v_o^2}{2g} \right)}$$

### 2.2 Überprüfung, ob rückgestauter Abfluss vorliegt

Ist die konjugierte Wassertiefe h2\* des Ausflusstahle h1\* kleiner als der Unterwasserstand liegt rückgestauter Abfluss vor

Froudezahl 1*	Fr1* =	9,2
konjugierte Wassertiefe	h2* =	2,00 m
Wasserspiegellage 1*	WSP1* =	656,50 m+NN
Vergleich		frei

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

### 3. Berechnung des Tosbeckens

#### 3.1 Berechnung des Verlustbeiwertes $\zeta$

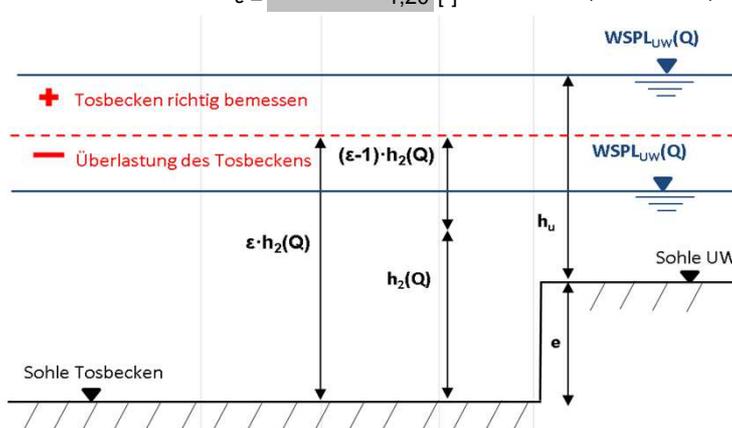
Der Verlustbeiwert  $\zeta$  ist nicht bekannt und kann exakt nur durch Modellversuche bestimmt werden, folgende Annahme wird getroffen

Grenztiefe für Recheckquerschnitt	$h_{gr} =$	0,70 m	$h_{Grenz} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot b^2}}$	$H_{E,min} = 1,5 \cdot h_{gr}$
Minimale Energiehöhe	$H_{E,min} =$	1,05 m		
Verlustbeiwert	$\zeta =$	0,1 -	Bei $L \geq 5 \cdot H_{E,min} = 0,2$	Bei $L < 5 \cdot H_{E,min} = 0,1$
spezifischer Abfluss	$q =$	1,8 m <sup>3</sup> /(s*m)		

#### 3.2 Wahl des Einstaugrades:

Der Einstaugrad sollte zwischen  $1,05 < \epsilon < 1,25$  liegen. Da bei  $\epsilon > 1,25$  selbst bei optimalen Froudezahlen keine ausreichende Energieumwandlung mehr stattfindet. Es werden dann Tosbeckeneinbauten erforderlich

Gewählter Einstaugrad  $\epsilon =$  1,20 [-]  $1,05 < \epsilon < 1,25$



#### 3.3. Iteration von Kenngrößen bei Bemessungsabfluss:

Fließtiefe im Tosbecken	$h_1 = \sqrt{\frac{q^2 \cdot (1 + \zeta)}{2g \cdot (H_{E1}^* - h_1)}}$	Froudzahl	$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot h_1}}$
Fließgeschwindigkeit Ausflusstrahl im Tosbecken	$v_1 = \frac{q}{h_1}$	Tosbeckeneintiefung	$e = \epsilon \cdot h_2 - h_U$
konjugierte Wassertiefe (h2) zu h1	$h_2 = \frac{h_1}{2} \cdot \left( \sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right)$	Einstaugrad	$\epsilon = \frac{(h_U + e)}{h_2}$
Energiehöhe im Schnitt 1*	$H_{E1}^* = e + h_1^* + \frac{v_1^{*2}}{2g}$		

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Größe
Unterwassertiefe	$h_u$	m	1,12
Einstaugrad	$\epsilon$		1,20
Tosbeckeneintiefung	$e$	m	1,34
Fließtiefe Ausflusstrahl	$h_1^*$	m	0,160
Fließgeschwindigkeit Ausflusstrahl	$v_1$	m/s	11,51
spezifischer Abfluss	$q$	m <sup>3</sup> /(sm)	1,8
Verlustbeiwert	$\zeta$		0,1
Energiehöhe im Schnitt 1*	$H_{E1}^*$	m	8,26

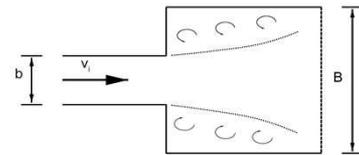
konjugierte Wassertiefe geschätzt	$h_2$		2,03
Fließtiefe im Tosbecken	$h_{1,i}$		0,153578
Fließtiefe im Tosbecken	$h_{1,i+1}$	m/s	0,154
Fließgeschwindigkeit	$v_1$	m/s	12,02
Froudzahl	$Fr_1$		9,8
konjugierte Wassertiefe	$h_2$	m	2,05
konjugierte Wassertiefe abgemindert	$h_2'$	m	1,78
Tosbeckeneintiefung ungemindert	$e_{\text{erf}}$	m	1,34

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{b}{B}} \cdot (\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1)$$

### 3.4 Berechnung der Tosbeckeneintiefung bei räumlichen Tosbecken

Wenn das Tosbecken breiter als der Schussstrahl ist, entstehen Randwalzen die zur Energieumwandlung beitragen.

Breite des Ausflusstrahle	$b = b_{\text{Schütz}}$	3,00 m
Tosbeckengesamtbreite	$B$	4 m
Abminderungsfaktor		0,87
wirksame Breite in der Aufweitung	$B =$	5,00 m
	$Abminderung = \sqrt{\frac{b}{B}}$	
Tosbeckeneintiefung räumlich	$e_{\text{räumlich}}$	1,01 m



### 3.5 Überprüfung Grenzkriterium für eine gute Energieumwandlung durch die Froudezahl:

Wechselsprung gemäß Froudezahl: **Starker Sprung**

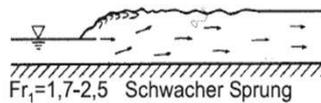
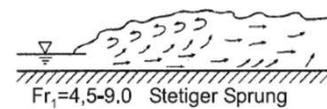
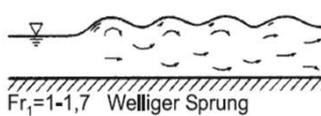


Abb3: Arten des Wechselsprungs (Jirka: Einführung in die Gerinnehydraulik, 2009)

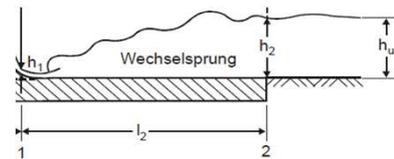


Abb4: Längsschnitt eines Tosbeckens

## 4. Tosbeckenlänge

### 4.1. Länge Tosbeckens $\epsilon = 1,20$ : (U.S.B.R Typ 1, nach Peterka, 1978):

Tosbeckenlänge ( $\epsilon = 1,20$ )	$k =$	6,13 m
	$L_2 =$	10,89 m

$$L_2 = k \cdot h_2$$

### 4.2. Länge Tosbeckens $\epsilon = 1,20$ : [Näherungsformel u.a. Strobel "Wasserbau" 2006]

Tosbeckenlänge ( $\epsilon = 1,20$ )	$k =$	5,00 m
(ohne räumliche Wirkung)	$L_2 =$	9,49 m

$$L_2 = 5 \cdot (h_2 - h_1)$$

## 5. Länge Kolkchutz:

### 5.1. Länge Kolkchutz $\epsilon = 1,05$ :

	$b =$	3,00 m
Höhe des Kolkschutzes	$h_k =$	0,6 m
Kolkschutzlänge	$L_k =$	4,65 m

$b =$  Breite des Überfalls

$$L_K = \left( 1,05 \cdot \left( \frac{BHQ}{b} \right)^{0,5} - 1 \right) \cdot L_2$$

**Tosbeckenbemessung - Lastfälle**

			Lastfälle						
			BHQ 3 Drosselabfluss 2 Vollstau	BHQ 3 Drosselabfluss 2 reduz. Beckenstand	BHQ 3 erh. Drosselabfluss 4,5 Vollstau	BHQ 1 > HQ 100 5,54 Vollstau	BHQ 1 > HQ 100 10 Vollstau	BHQ1 HQ 1.000 23,15 Vollstau	BHQ 2 HQ 10.000 28,85 Vollstau
Entlastungsabfluss									
Beckenwasserstand									
<b>Abflüsse, hydrologische Daten</b>									
Abfluss	Q	m³/s	2,00	2,00	4,50	5,54	10,00	23,15	28,85
Betriebsauslass	Q <sub>BA</sub>	m³/s	2,00	2,00	4,50	5,54	10,22	23,15	14,42
Grundausslass	Q <sub>GA</sub>	m³/s							14,42
<b>Wasserspiegellagen</b>									
Stauziel	Z <sub>V</sub>	m+NN	661,4	657,78	661,40	661,40	661,40	661,40	661,40
Wasserspiegel UW			654,33	654,33	654,86	654,96	655,45	655,81	655,83
Sohle im Unterwasser	Sohle <sub>UW</sub>	m+NN	654,00	654,00	654,00	654,00	654,00	654,00	654,00
Wassertiefe im Unterwasser	h <sub>u</sub>	m	0,33	0,33	0,86	0,96	1,45	1,81	1,83
			1,63	1,63	2,16	2,26	2,75	3,11	3,13
<b>Bauwerksgeometrie</b>									
Sohle BA	Sohle <sub>BA</sub>	m+NN	654,50	654,50	654,50	654,50	654,50	654,50	654,50
Sohle GA	Sohle <sub>GA</sub>	m+NN							654,00
<b>Tosbeckeneintiefung</b>	<b>e</b>	<b>m</b>	<b>1,30</b>	<b>1,30</b>	<b>1,30</b>	<b>1,30</b>	<b>1,30</b>	<b>1,30</b>	<b>1,30</b>
Tosbeckeneintiefung (räumlich)	e <sub>räumlich</sub>	m	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Einstaugrad (Bemessungsfall)	ε		1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Breite des Schützes	b <sub>anz</sub>	m	3	3	3	3	3	3	3
Tosbeckengesamtbreite	B	m	4	4	4	4	4	4	4
Breite Tosbeckenendschwelle	B <sub>End</sub>	m	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4
<b>Berechnung unterströmtes Schütz</b>									
Zulaufgeschwindigkeit	v <sub>0</sub>	m/s	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Wasserstand im Becken	h <sub>0</sub>	m	6,90	3,28	6,90	6,90	6,90	6,90	7,40
Schützbreite	b	m	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Öffnungshöhe	a	m	0,09	0,14	0,21	0,26	0,49	1,13	0,70
Einschnürungsbeiwert	ψ <sub>90</sub>		0,6098	0,6100	0,6099	0,6099	0,6104	0,6130	0,6110
Ausflussbeiwert	μ		0,6073	0,6023	0,6042	0,6030	0,5976	0,5843	0,5930
Fließtiefe Ausflusstrahl	h <sub>1</sub> *	m	0,06	0,08	0,13	0,16	0,30	0,70	0,43
Fließgeschwindigkeit Ausflusstrahl	v <sub>1</sub> *	m/s	11,60	7,94	11,54	11,51	11,40	11,10	11,30
Rückstau einfluss									
Froudezahl 1*	Fr <sub>1</sub> *		15,44	8,74	10,22	9,18	6,66	4,25	5,53
konjugierte Wassertiefe	h <sub>2</sub> *	m	1,23	1,00	1,81	2,00	2,67	3,85	3,12
Wasserspiegellage 1*	WSP1*	m+NN	655,73	655,50	656,31	656,50	657,17	658,35	657,62
Vergleich			frei	frei	frei	frei	frei	frei	frei
<b>Berechnung Tosbeckeneingangswerte</b>									
spezifischer Abfluss	q <sub>1</sub>	m³/(sm)	0,67	0,67	1,50	1,85	3,41	7,72	4,81
Verlustbeiwert	ζ =		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Energiehöhe im Schnitt 1*	H <sub>E1</sub> *	m	8,21	4,59	8,21	8,22	8,22	8,28	8,24
Fließtiefe im Tosbecken	h <sub>1</sub>	m/s	0,06	0,07	0,12	0,15	0,29	0,66	0,41
Fließgeschwindigkeit	v <sub>1</sub>	m/s	12,06	8,98	12,01	11,99	11,90	11,66	11,82
Froudzahl	Fr <sub>1</sub>		16,38	10,52	10,85	9,76	7,10	4,57	5,92
konjugierte Wassertiefe	h <sub>2</sub>	m	1,25	1,07	1,86	2,05	2,73	3,96	3,21
<b>Bewertung Wirkung des Tosbeckens</b>									
Tosbeckeneintiefung	e <sub>erf</sub>	m	1,17	0,95	1,37	1,50	1,83	2,95	2,02
Abminderung durch räumliche Wirkung			0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
konjugierte Wassertiefe abgemindert	h <sub>2</sub> '		1,09	0,93	1,61	1,77	2,37	3,43	2,78
Tosbeckeneintiefung erforderlich abgemindert	e <sub>erf</sub> '	m	0,97	0,78	1,07	1,17	1,39	2,31	1,50
Grenzwassertiefe über Endschwelle	h <sub>gr</sub>	m	0,17	0,17	0,29	0,33	0,49	0,85	0,99
Einstaugrad	ε		1,24	1,45	1,17	1,11	1,04	0,82	1,02
Wechselsprung Typ			Starker Sprung	Starker Sprung	Starker Sprung	Starker Sprung	Stetiger Sprung	Stetiger Sprung	Stetiger Sprung
Tosbeckenlänge	L <sub>erf</sub>	m	6,51	5,55	9,64	10,65	14,21	20,60	16,66
Tosbeckenlänge (Näherungsformel)	L <sub>erf</sub>	m	5,99	4,97	8,65	9,48	12,24	16,51	14,00
<b>Bewertung verbal</b>									
			Der Einstaugrad liegt an der Grenze des empfohlenen Bereichs, jedoch ist die Gesamtenergie des "geringen" Abflusses von 2,00 m³/s gering und von einer hohen Energieabstraktion ausgeht.	wie bei Vollstau	nahe des Bemessungszustand mit optimiertem Einstaugrad	Bemessungszustand mit optimiertem Einstaugrad	Einstaugrad und Eingangsfröudezahl im geforderten Bereich	Einstaugrad und Eingangsfröudezahl noch im zulässigen Bereich, jedoch ist die HWE über die Klappen wie zusätzlich positiv auf die Energieumwandlung	Wenn die Hochwasserentlastung über die Klappenweite erfolgt, liefert die Berechnung vergleichbare (auf der sicheren Seite liegende) Ergebnisse und zeigt, dass auch im Fall von BHQ2 Einstaugrad wie Wechselsprünge eine gute. Die Energieumwandlung erwarten lassen. Die Energieumwandlung wird durch den Wechselsprung positiv. Von Schützen im Unterwasser wird nicht ausgegangen. Die Anlagensicherheit wird in Bezug auf die HWEA nicht gefährdet.

