

Schlauchwehr mit Konturmembrane

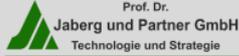
Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

Dipl. Ing. Dr. techn. **Rudolf Fritsch**

ZT-Fritsch GmbH / Steyr – Zivilingenieurbüro (Geschäftsführung)

Hydro-Construct GesmbH / Steyr – Anlagenbau (Geschäftsführung)

1

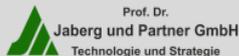


ZT-Fritsch GmbH – DI Dr. Rudolf Fritsch, 14.09.2021

Inhaltsübersicht

- Schlauchwehr mit Konturmembrane
 - Einsatzbereiche
 - Grundlagen – Formgebung Statik
 - Regulierwehr / Kiesschleuse mit Fischabstiegstauglichkeit
 - Ejektorschleuse mit Fischabstiegstauglichkeit
 - Surfwehle mit flexiblem Wehr
 - Gezeitenwehr – Schlauchwehr mit beidseitiger Einstaumöglichkeit
- Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch
 - Ausgangssituation
 - System – Gekrümmtes Saugrohr
 - Beispiel KW Gaissulz
 - WKA Kienberg – Projektstudie

2



ZT-Fritsch GmbH – DI Dr. Rudolf Fritsch, 14.09.2021

A. Schlauchwehr mit Konturmembrane

Zweck ist die gezielte Umlenkung des Überfallstrahls zur energetischen Nutzung des, über das Schlauchwehr abgeführten Wassers, womit bewusst eine Energieumwandlung an der horizontalen Wehrplatte vermieden werden soll.

Das klassische Schlauchwehr wird dazu mit einer zusätzlichen Membrane überspannt, welche von der oberwasserseitigen Klemmung bis zur gewünschten Position an der Unterwasserseite reicht.

A. Schlauchwehr mit Konturmembrane

Einsatzbereiche, welche derzeit in Entwicklung sind

1. Regulierwehr / Kiesschleuse mit Fischabstiegstauglichkeit
2. Ejektorschleuse mit Fischabstiegstauglichkeit
3. Surfwehle mit flexiblem Wehr
4. Gezeitenwehr – Schlauchwehr mit beidseitiger Einstaumöglichkeit

A. Schlauchwehr mit Konturmembrane

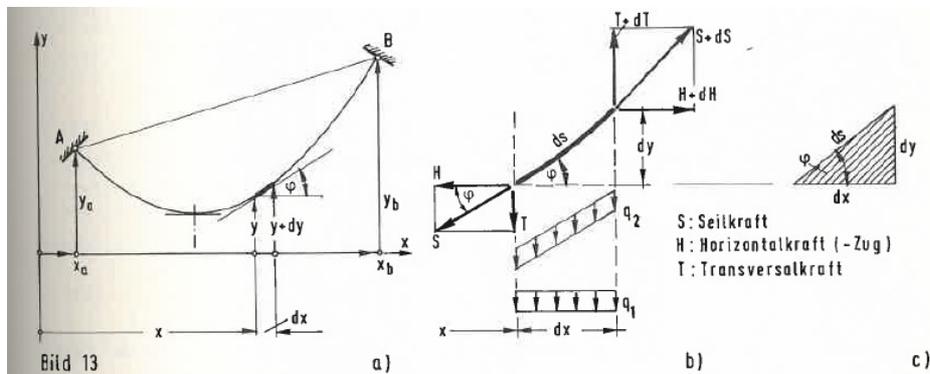
Statische Grundlage für Membranberechnung – Analyse zur Seilkurve (Galilei, Bernoulli, Leibnitz, Huigens)

Die Membrane verformt sich auf Grund der Wasserauflast entsprechend einer „Seilkurve“ bei gleichmäßiger Belastung, wobei der Durchhang über die Spannkraft eingestellt wird.

Diese kann einerseits durch Höhenänderung der Schlauchwehrkrone, andererseits durch eine Veränderung der Festhaltekraft an einer beweglichen Lagerung an der Unterwasserseite erfolgen.

A. Schlauchwehr mit Konturmembrane

Herleitung der Seilgleichung für ebenes biegeschlaffes Seil mit Spannvorrichtung am Ende des Seils mit über das ganze Seil konstantem Horizontalkraftverlauf



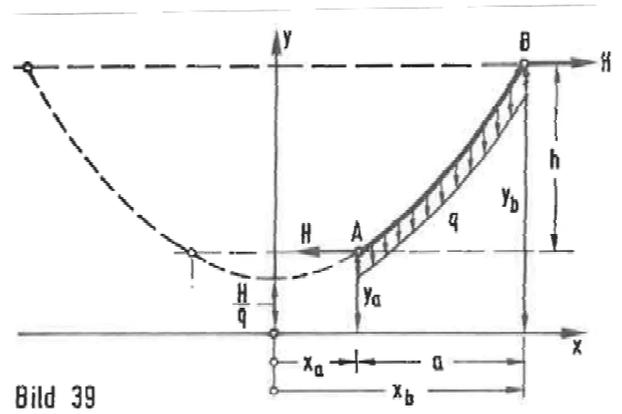
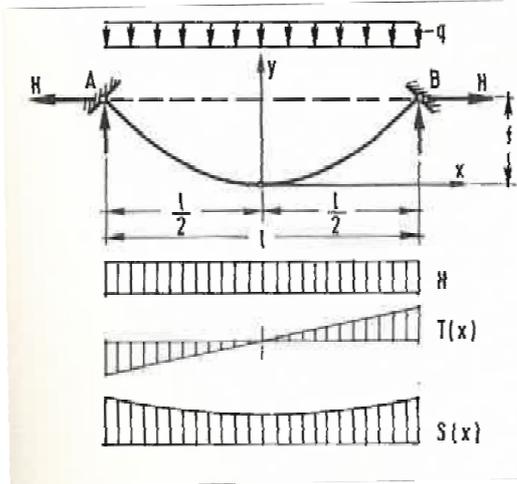
Auszug aus Literatur – Kap. 16.3 Stahlbau – Petersen, 1988

Prof. Ing. Christian Petersen, Universität der Bundeswehr München

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

$$Hy'' = q_1(x) \quad q_1(x) = q = \text{konst} \quad \longrightarrow \quad Hy'' = q = \text{konst} \quad \text{Sonderfall}$$

$$y = \frac{1}{H} \iint q(x) \, dx \, dx + C_1x + C_2 = \frac{q}{2H}x^2 + C_1x + C_2 \quad y = 0 \text{ und } y' = 0 \quad C_1 \text{ und } C_2 \text{ zu Null}$$



A. Schlauchwehr mit Konturmembra

Allgemeine Seilgleichung $y = \frac{q}{2H}x^2$

1. Ableitung $y' = \frac{q}{H}x = \tan \varphi \quad \varphi \dots \text{lokaler Neigungswinkel des Seiles}$

Horizontalkomponente $x = \frac{1}{2} : y = f = \frac{q}{2H} \left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{ql^2}{8H} \quad \dots \text{konstant über gesamte Seilkurve}$

Vertikalkomponente $T(x) = q(x) \cdot x$

Seilkraft $S(x) = q \sqrt{\frac{l^4}{64f^2} + x^2}$

$$\max S = S\left(x = \frac{l}{2}\right) = q \frac{l}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{16} \left(\frac{l}{f}\right)^2} \quad \min S = S(x = 0) = \frac{ql^2}{8f}$$

A. Schlauchwehr mit Konturmembrane

Substitution von H $H = \frac{ql^2}{8f} \rightarrow y = 4 \frac{f}{l^2} x^2$

$\rightarrow y_x$ berechnet als Funktion von f $y = 4 \frac{f}{l^2} x^2$

$\rightarrow L$ berechnet als Funktion von f $L = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{ql}{2H}\right)^2} + \frac{H}{q} \operatorname{arc\,sinh}\left(\frac{ql}{2H}\right)$

$\rightarrow l$ berechnet als Funktion von f $l/f \dots$ Eingabewert

Durch Festlegung des Verhältnisses l / f können die Berechnungsformeln auf die Eingabe der Vertikalbelastung reduziert werden

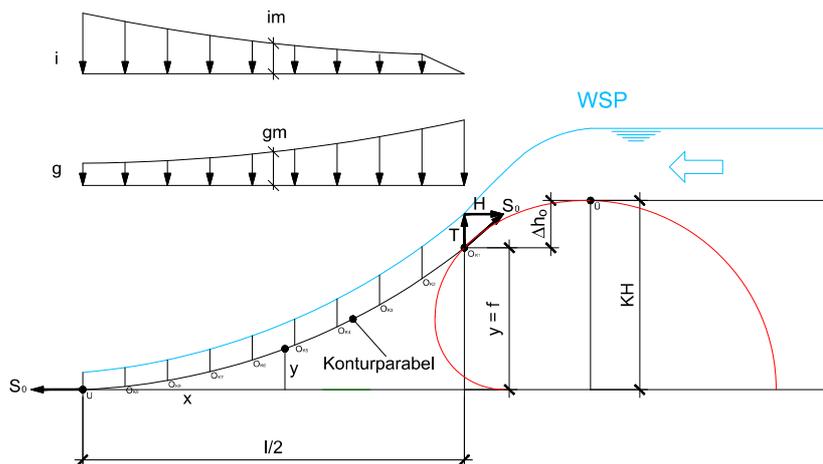
Das Verhältnis l / f bestimmt den Tangentenwinkel am Ansatz zum Schlauchwehrkörper

A. Schlauchwehr mit Konturmembrane

$\rightarrow q_{v,x}$ berechnet als Summe von g_v und i_v

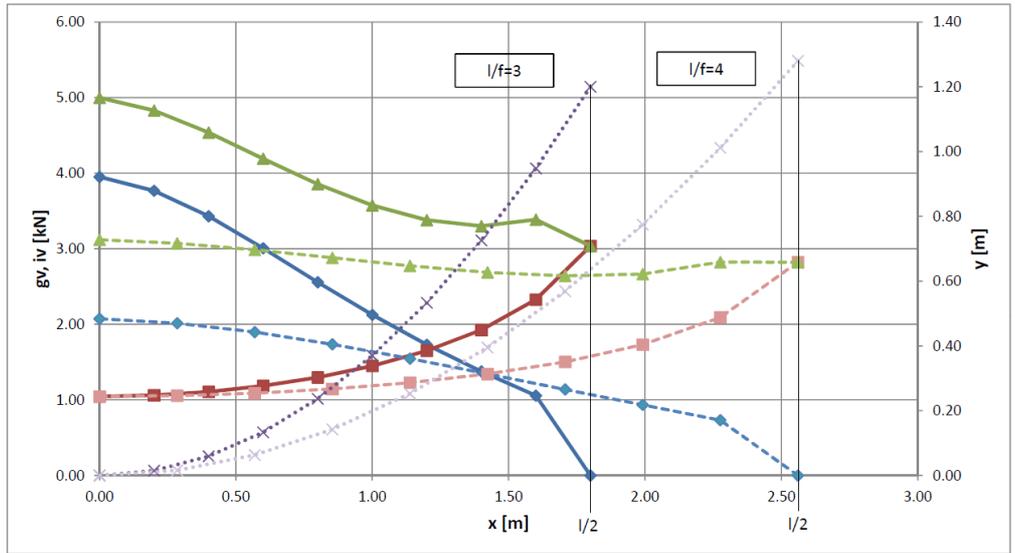
$$\left. \begin{aligned} g_{2,x} &= g_{1,x} / \cos \varphi_x \\ i_{v,x} &= q \cdot v_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_x / \cos \varphi_x \end{aligned} \right\} q_{v,x} = g_{2,x} + i_{v,x}$$

Für die Festlegung des q_m , maßgebend für die Spannkraftberechnung, wird i_{vi} und q_{vi} gemittelt



A. Schlauchwehr mit Konturmembra

Überlagerung der Vertikalkomponenten aus Gewichtbelastung und Impulsbelastung

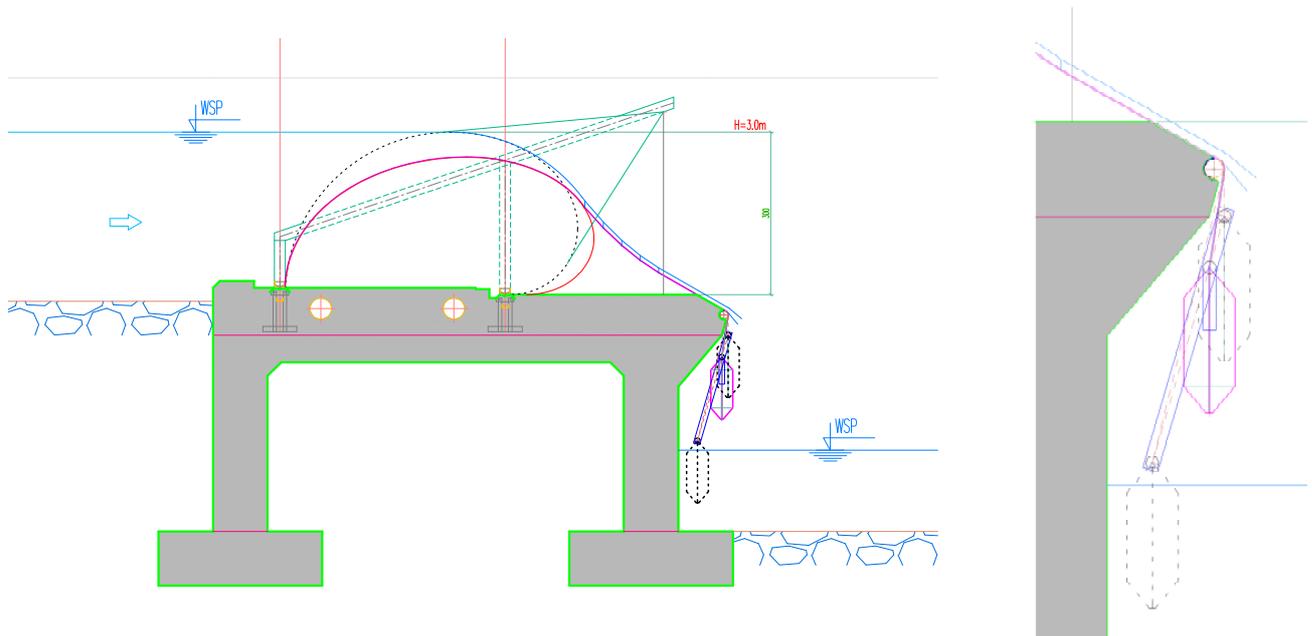


entsprechend dem Verhältnis l zu f, verändert sich die Lastverteilung

→ Nächster Schritt – CFD Analyse

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

Einsatzbereich 1 – Regulierwehr / Kiesschleuse mit Fischabstiegsgauglichkeit



Spannkraft wird über Gewicht oder Feder aufgebracht

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

Einsatzbereich 1 – Regulierwehr / Kiesschleuse mit Fischabstiegtauglichkeit

KHO	3.000		
Faktor I/f	3		
arctan	53.130		
sin	0.600		
f0	2.400		
l0	7.200		
p	0		
Winkel-Rampe			
β	0		
TANβ	0.000		
xβ	0.000		
yβ	0.000		
μ	0.8		
q1	1.5		
hü	0.739		
WSP	3.000		
KH	2.261		
f	1.809		
l	5.427		
vü	2.030	n	9
		int.	0.302

Beim Regulierwehr wird die Kronenhöhe flexibel dem Abfluss entsprechend automatisch eingestellt, d. h. der Oberwasserspiegel bleibt konstant.

Excel-Programmierung der Formeln für die Seilkurve und die Lastverteilung, sowie für die Seilkräfte

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

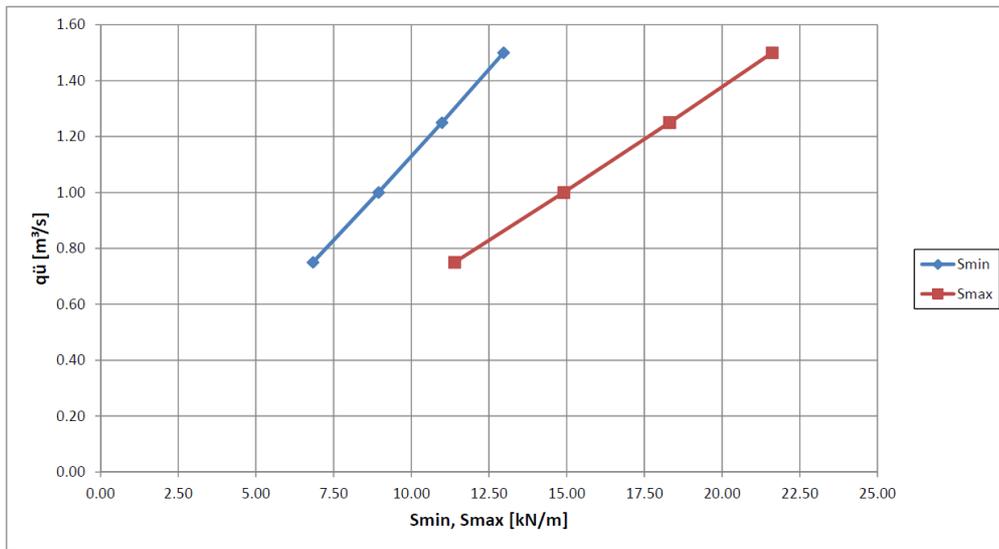
Einsatzbereich 1 – Regulierwehr / Kiesschleuse mit Fischabstiegtauglichkeit

	OK1	OK2	OK3	OK4	OK5	OK6	OK7	OK8	OK9	U	xβ-yβ
x	2.714	2.412	2.111	1.809	1.508	1.206	0.905	0.603	0.302	0.000	0.000
y	1.809	1.429	1.094	0.804	0.558	0.357	0.201	0.089	0.022	0.000	0.000
y'	1.333	1.185	1.037	0.889	0.741	0.593	0.444	0.296	0.148	0.000	0.000
φ	53.130	49.844	46.042	41.634	36.529	30.651	23.962	16.504	8.427	0.000	0.000
Δφ	0.000	3.286	3.802	4.408	5.105	5.878	6.688	7.458	8.077	8.427	
TanΔφ	0.000	0.057	0.066	0.077	0.089	0.103	0.117	0.131	0.142	0.148	
i	7.514	9.106	10.223	11.066	11.716	12.213	12.582	12.838	12.987	13.037	
iv	0.000	0.524	0.681	0.856	1.051	1.264	1.486	1.695	1.862	1.952	
iv pro Meter	0.000	1.737	2.258	2.838	3.485	4.193	4.927	5.621	6.175	6.476	
ivm pro Meter	3.771	3.771	3.771	3.771	3.771	3.771	3.771	3.771	3.771	3.771	
Δv	2.979	4.040	4.785	5.347	5.780	6.112	6.358	6.528	6.628	6.661	6.661
v	5.009	6.071	6.815	7.378	7.811	8.142	8.388	8.558	8.658	8.691	8.691
Δh	0.299	0.247	0.220	0.203	0.192	0.184	0.179	0.175	0.173	0.173	0.173
g	4.896	3.759	3.110	2.669	2.345	2.101	1.920	1.793	1.718	1.693	1.693
gm	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	1.693
g+i	4.896	5.496	5.369	5.506	5.830	6.293	6.847	7.415	7.893	8.169	
gm+im	6.371	6.371	6.371	6.371	6.371	6.371	6.371	6.371	6.371	6.371	2.730
h0	0.452	0.832	1.167	1.457	1.703	1.904	2.060	2.172	2.239	2.261	2.261
Δv	2.979	4.040	4.785	5.347	5.780	6.112	6.358	6.528	6.628	6.661	6.661
v0	5.009	6.071	6.815	7.378	7.811	8.142	8.388	8.558	8.658	8.691	8.691
S(x)	21.611	20.107	18.680	17.349	16.136	15.072	14.189	13.524	13.108	12.967	5.556
S(x) min	12.967	12.967	12.967	12.967	12.967	12.967	12.967	12.967	12.967	12.967	12.967
S(x=l/2)	21.611	21.611	21.611	21.611	21.611	21.611	21.611	21.611	21.611	21.611	21.611
T(x)	17.289	15.368	13.447	11.526	9.605	7.684	5.763	3.842	1.921	0.000	0.000
L	6.381										
arctan	53.130										
cos	0.8										
Mp0x	4.8										
Mp0y	1.5										
Mpx	3.618										
Mpy	1.131										

Auswertung in der gewählten Teilung n = 9

A. Schlauchwehr mit Konturmembrane

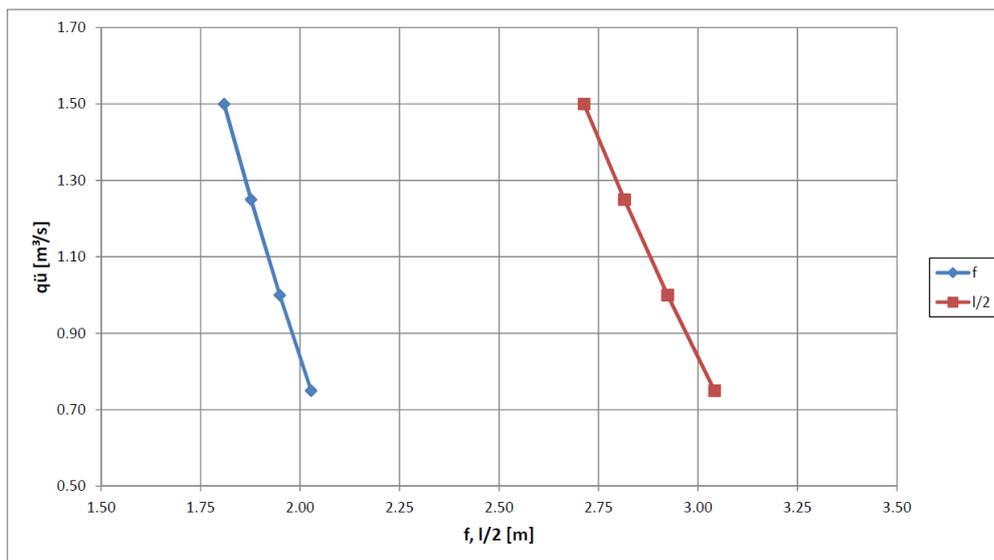
Einsatzbereich 1 – Regulierwehr / Kiesschleuse mit Fischabstiegstauglichkeit



Die Spannkraft in Abhängigkeit von Belastung aus dem Überfall und der Membrangeometrie l zu f

A. Schlauchwehr mit Konturmembrane

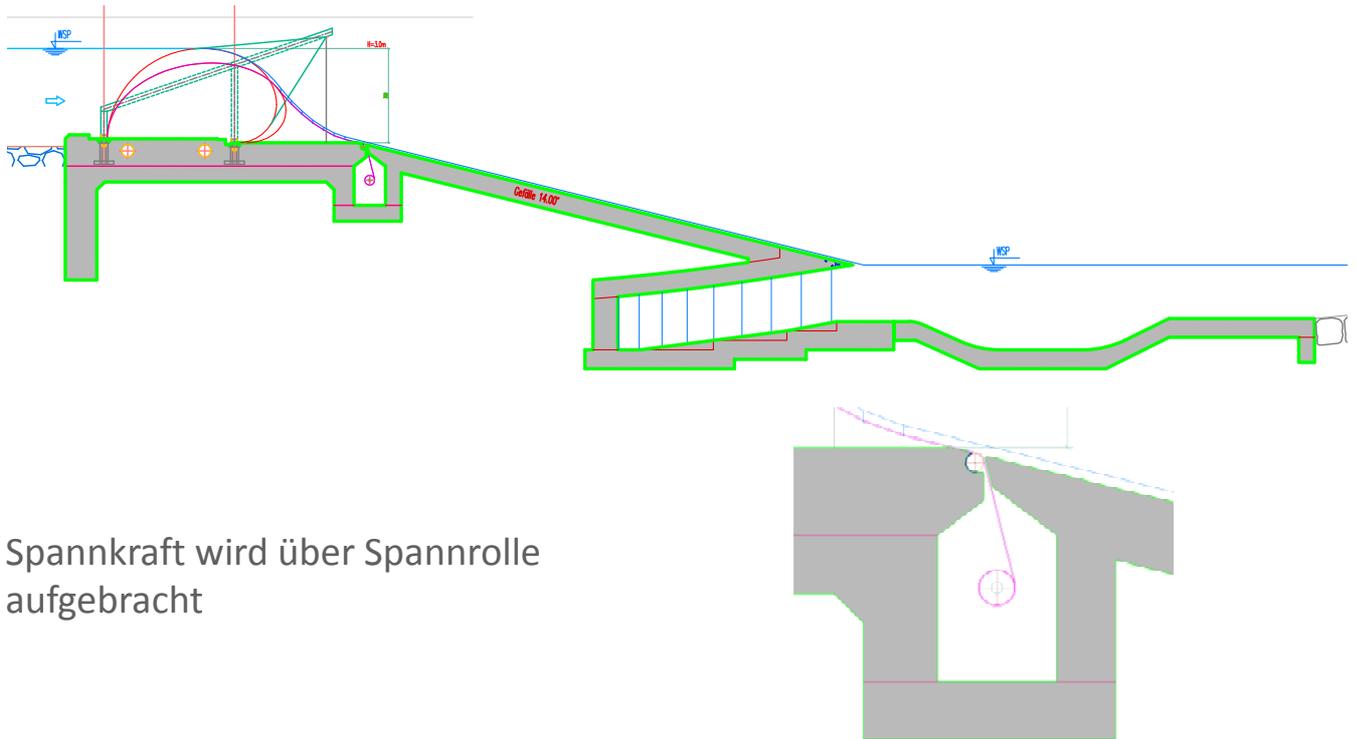
Einsatzbereich 1 – Regulierwehr / Kiesschleuse mit Fischabstiegstauglichkeit



Zusammenhänge f (maximaler Durchhang) zu $l/2$ (halbe Stützweite der Seilparabel)

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

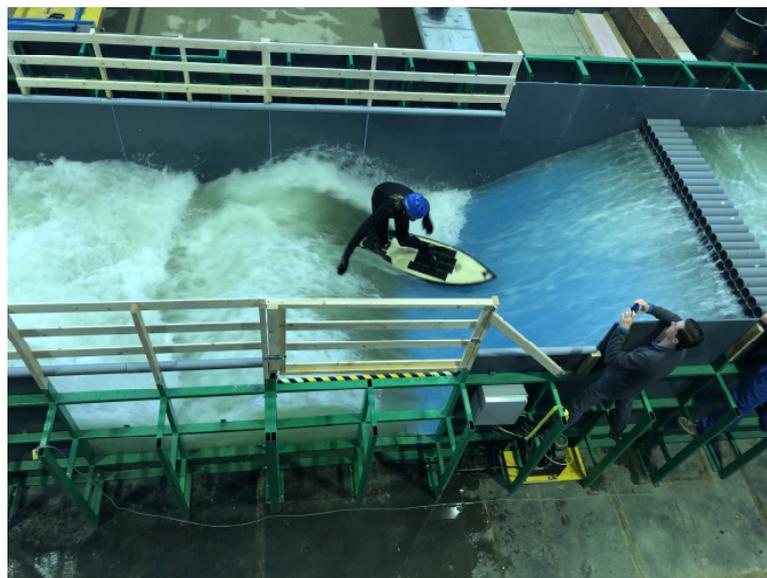
Einsatzbereich 2 – Ejektorschleuse mit Fischabstiegstauglichkeit



Spannkraft wird über Spannrolle aufgebracht

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

Einsatzbereich 3 – Surfwelle mit flexiblem Wehr

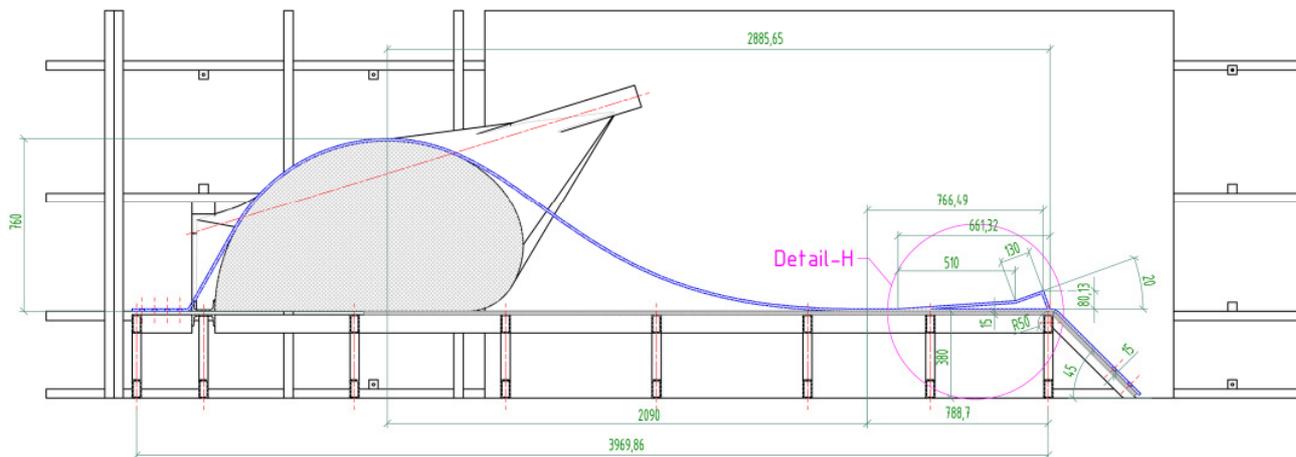


Testlauf am 1:2 Modell für die Surfwelle UpSurfDown GmbH

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

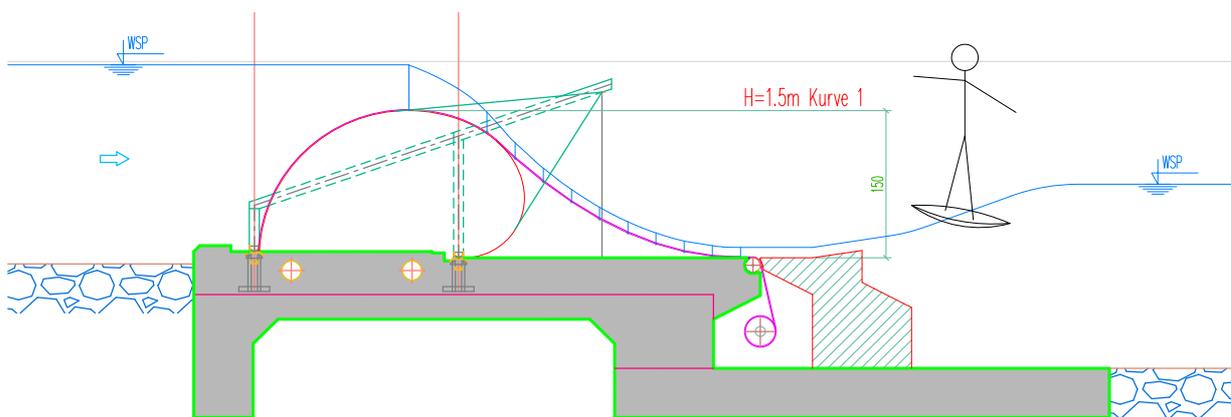
Einsatzbereich 3 – Surfswelle mit flexiblem Wehr

A-A (1 : 20)

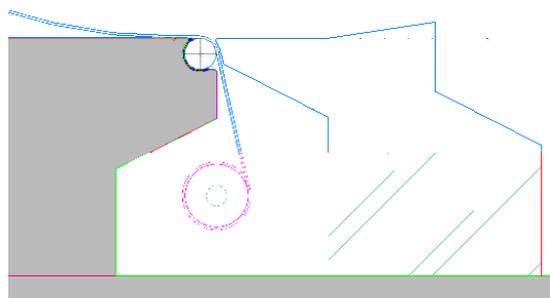


A. Schlauchwehr mit Konturmembra

Einsatzbereich 3 – Surfswelle mit flexiblem Wehr



Spannkraft wird über Spannrolle aufgebracht



A. Schlauchwehr mit Konturmembrane

Einsatzbereich 3 – Surfwelle mit flexiblem Wehr

KH	1.500
Faktor l/f	3
arctan	53.130
sin	0.600
f	1.200
l	3.600
p	0
Winkel-Rampe	
β	0
TANβ	0.000
xβ	0.000
yβ	0.000
μ	0.8
q1	0.75
hü	0.465
WSP	1.965

Beim Surfwellen-Wehr wird die Kronenhöhe voreingestellt fixiert und dann mit verschiedenen Abflüssen beaufschlagt, d. h. der Oberwasserspiegel ist veränderlich.

Excel-Programmierung der Formeln für die Seilkurve und die Lastverteilung, sowie für die Seilkräfte

vü	1.612	n	int.
		9	0.200

A. Schlauchwehr mit Konturmembrane

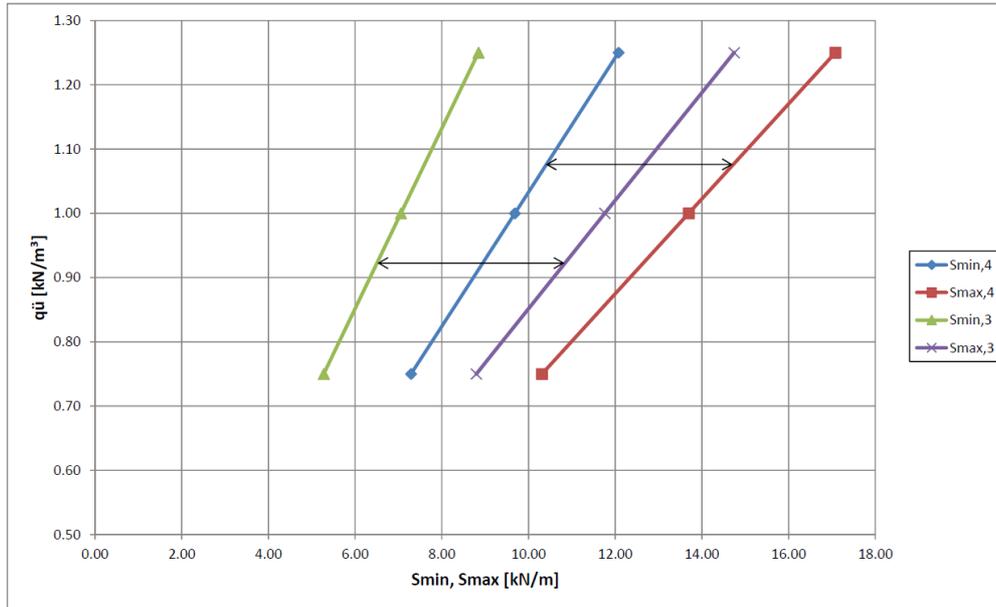
Einsatzbereich 3 – Surfwelle mit flexiblem Wehr

	OK1	OK2	OK3	OK4	OK5	OK6	OK7	OK8	OK9	U	xβ-yβ
x	1.800	1.600	1.400	1.200	1.000	0.800	0.600	0.400	0.200	0.000	0.000
y	1.200	0.948	0.726	0.533	0.370	0.237	0.133	0.059	0.015	0.000	0.000
y'	1.333	1.185	1.037	0.889	0.741	0.593	0.444	0.296	0.148	0.000	0.000
φ	53.130	49.844	46.042	41.634	36.529	30.651	23.962	16.504	8.427	0.000	0.000
Δφ	0.000	3.286	3.802	4.408	5.105	5.878	6.688	7.458	8.077	8.427	
TanΔφ	0.000	0.057	0.066	0.077	0.089	0.103	0.117	0.131	0.142	0.148	
i	3.028	3.677	4.132	4.475	4.740	4.942	5.092	5.196	5.257	5.277	
iv	0.000	0.211	0.275	0.346	0.425	0.512	0.601	0.686	0.754	0.790	
iv pro Meter	0.000	1.057	1.376	1.730	2.125	2.558	3.006	3.430	3.768	3.952	
ivm pro Meter	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300	
Δv	2.426	3.290	3.897	4.355	4.708	4.978	5.178	5.317	5.398	5.425	5.425
v	4.038	4.902	5.509	5.967	6.319	6.589	6.790	6.928	7.010	7.037	7.037
Δh	0.186	0.153	0.136	0.126	0.119	0.114	0.110	0.108	0.107	0.107	0.107
g	3.037	2.327	1.924	1.650	1.449	1.298	1.186	1.108	1.061	1.046	1.046
gm	1.609	1.609	1.609	1.609	1.609	1.609	1.609	1.609	1.609	1.609	1.046
g+i	3.037	3.385	3.300	3.380	3.574	3.855	4.192	4.538	4.829	4.997	
gm+im	3.909	3.909	3.909	3.909	3.909	3.909	3.909	3.909	3.909	3.909	2.730
hO	0.300	0.552	0.774	0.967	1.130	1.263	1.367	1.441	1.485	1.500	1.500
Δv	2.426	3.290	3.897	4.355	4.708	4.978	5.178	5.317	5.398	5.425	5.425
vO	4.038	4.902	5.509	5.967	6.319	6.589	6.790	6.928	7.010	7.037	7.037
S(x)	8.795	8.183	7.602	7.060	6.567	6.134	5.774	5.504	5.334	5.277	3.686
S(x) min	5.277	5.277	5.277	5.277	5.277	5.277	5.277	5.277	5.277	5.277	5.277
S(x=l/2)	8.795	8.795	8.795	8.795	8.795	8.795	8.795	8.795	8.795	8.795	8.795
T(x)	7.036	6.254	5.472	4.690	3.909	3.127	2.345	1.563	0.782	0.000	0.000
L	4.233										

Auswertung in der gewählten Teilung n = 9

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

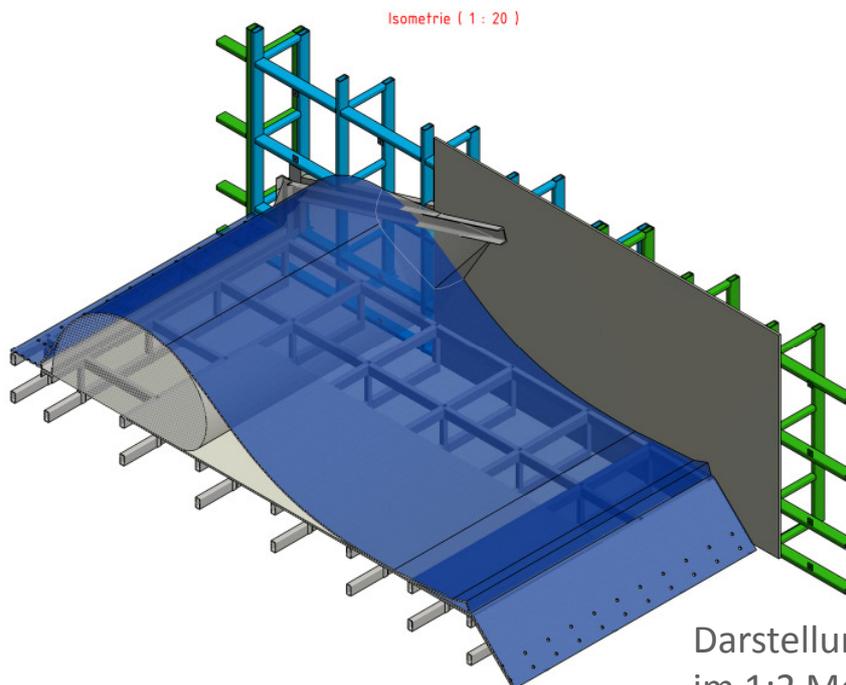
Einsatzbereich 3 – Surfswelle mit flexiblem Wehr



Für unterschiedliche l/f Verhältnisse ergeben sich unterschiedliche Membranspannungen

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

Einsatzbereich 3 – Surfswelle mit flexiblem Wehr



Darstellung aus der Versuchsplanung im 1:2 Modell

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

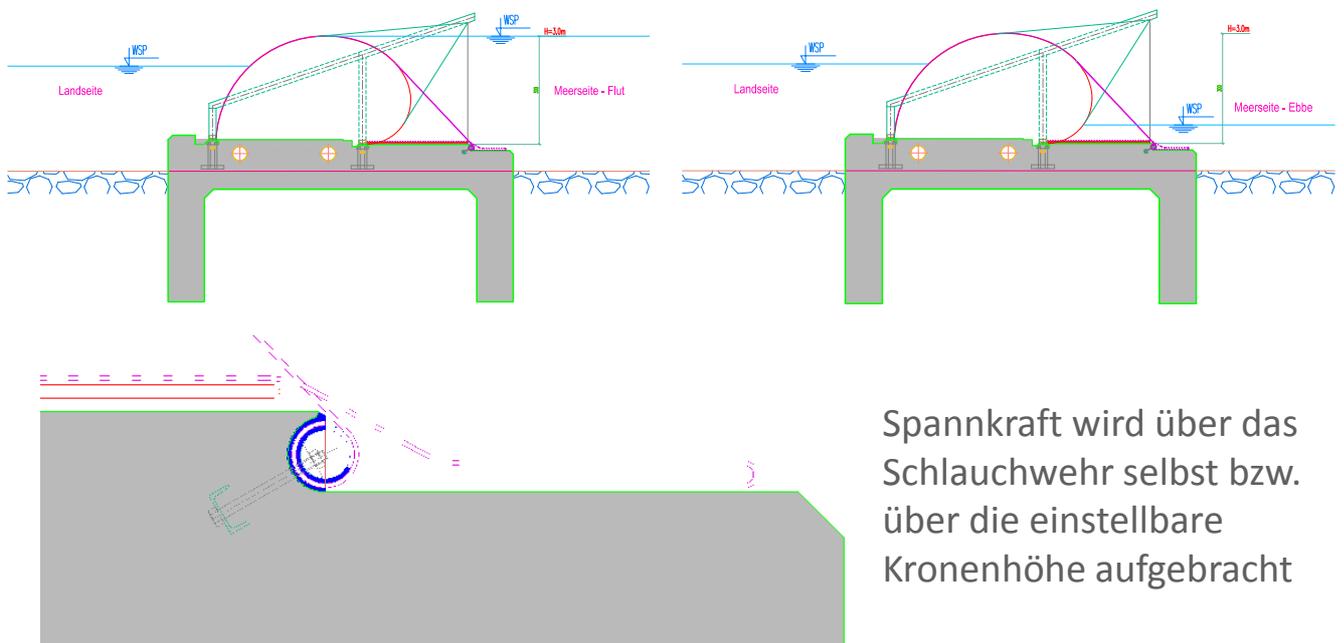
Einsatzbereich 3 – Surfswelle mit flexiblem Wehr



Gestaltungsentwurf für Surfswelle Linz

A. Schlauchwehr mit Konturmembra

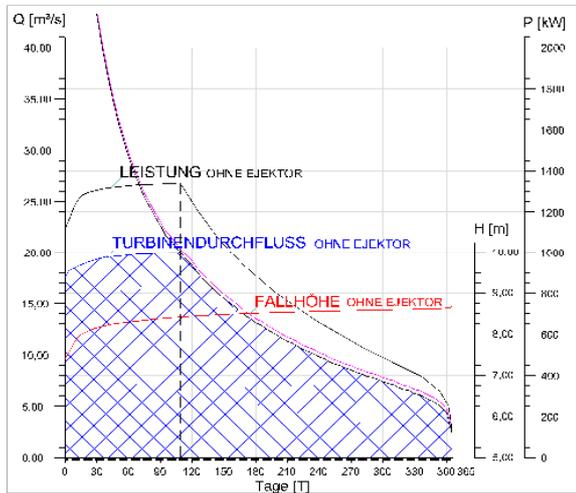
Einsatzbereich 4 – Gezeitenwehr – Schlauchwehr mit beidseitiger Einstaumöglichkeit



Spannkraft wird über das Schlauchwehr selbst bzw. über die einstellbare Kronenhöhe aufgebracht

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

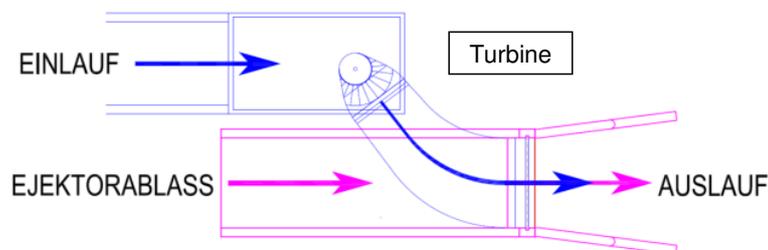
Beispielhafte Darstellung an Hand einer Dauerlinie der typischen Zusammenhänge zwischen Abfluss, Turbinendurchfluss, Fallhöhe (als Differenz des UW-Spiegels zu OW-Spiegel) und Leistung für ein Laufkraftwerk an der Ybbs



Abflussdauerlinie / Fallhöhen-Leistungsdigramm beispielhaft mit einer Auslegung $Q_{T,max} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ bei 8,4 m Fallhöhe

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

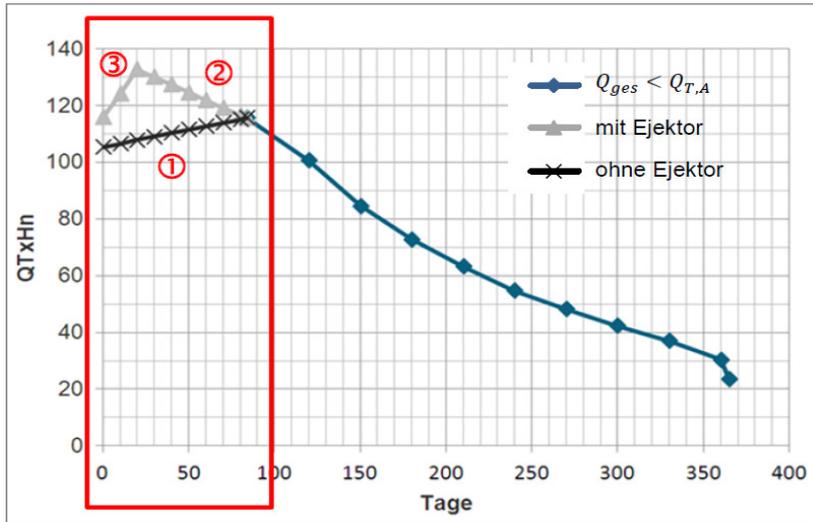
Die gezielte Zusammenführung des bereits in der Turbine energetisch genutzten Triebwassers mit der Energie des konzentriert abgeführten Überwassers wird durch eine im Grundriss gekrümmte Saugrohrführung möglich.



Prinzipieller Grundriss eines Ejektorkraftwerkes mit gekrümmtem Saugrohr

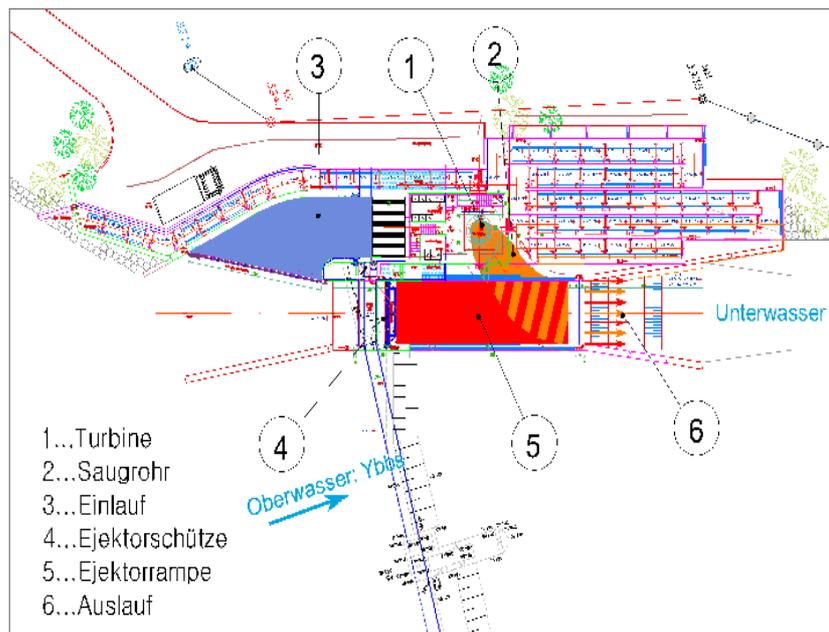
B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

Wirkbereich des Ejektors



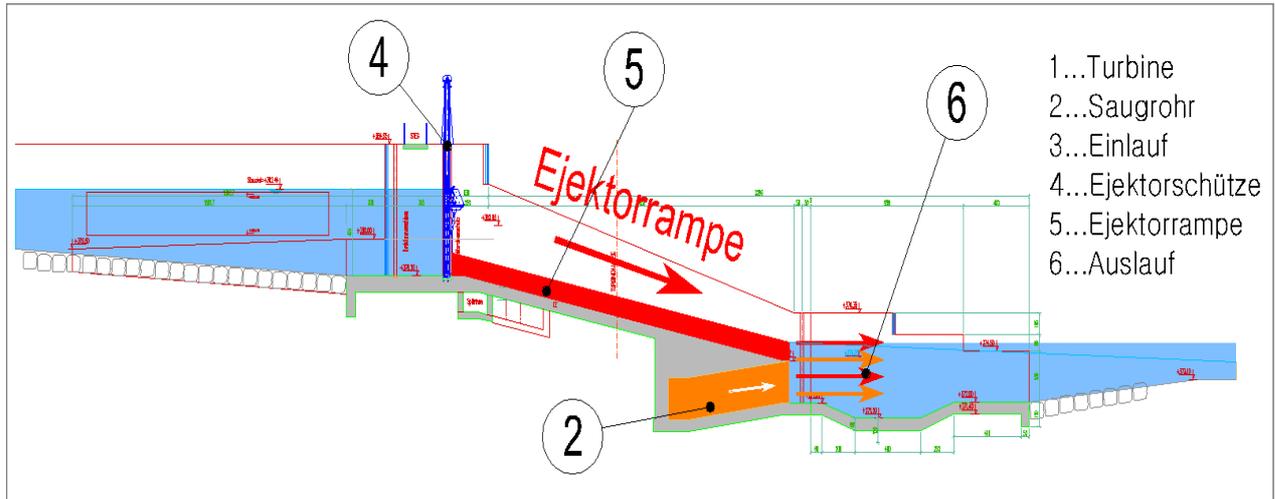
Beispielhafte Darstellung des Energiegewinnes durch Ejektornutzung
Hydraulisches Leistungsdarbot ($Q_T \times H_n$) in Funktion der
Überschreitungsdauer (Tage pro Jahr)

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch



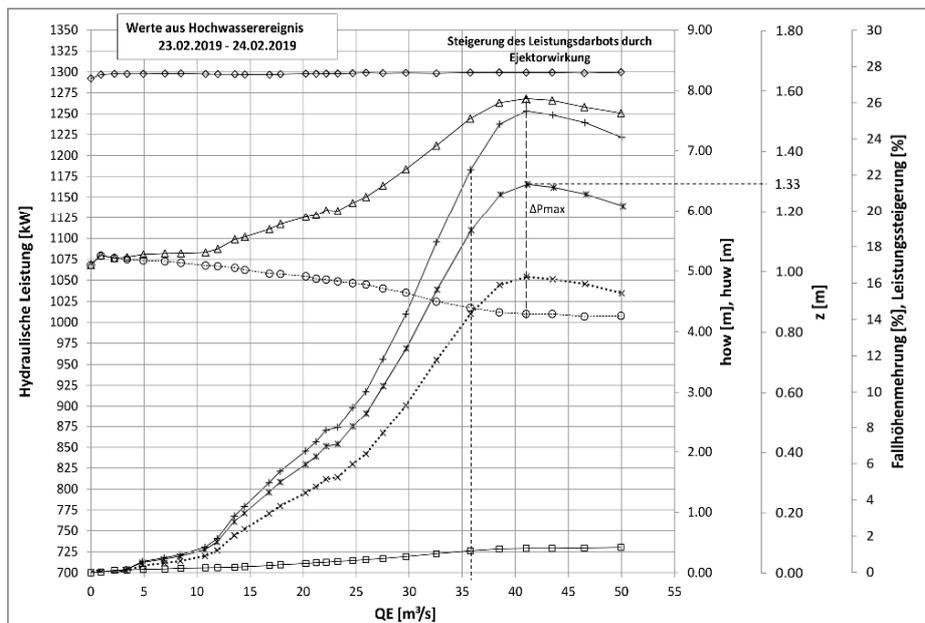
Grundriss der Ejektorkraftwerksanlage Gaissulz mit
wesentlichen Anlagenteilen

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch



Schnitt durch die Ejektorrampe mit Vereinigungsbereich Saugrohr / Ejektorrampe

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch



Werte aus Hochwasserereignis 23.02.2019 – 24.02.2019

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch



Sichtbare Eintiefung des Wasserspiegels ($z_0 = 2,5$ m) unmittelbar nach der Rampe im Turbinenauslaufbereich

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch



Luftbild des KW Gaissulz / Ybbs, neues Ejektorkraftwerk links

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

WKA Kienberg an der Erlauf – Fa. Worthington



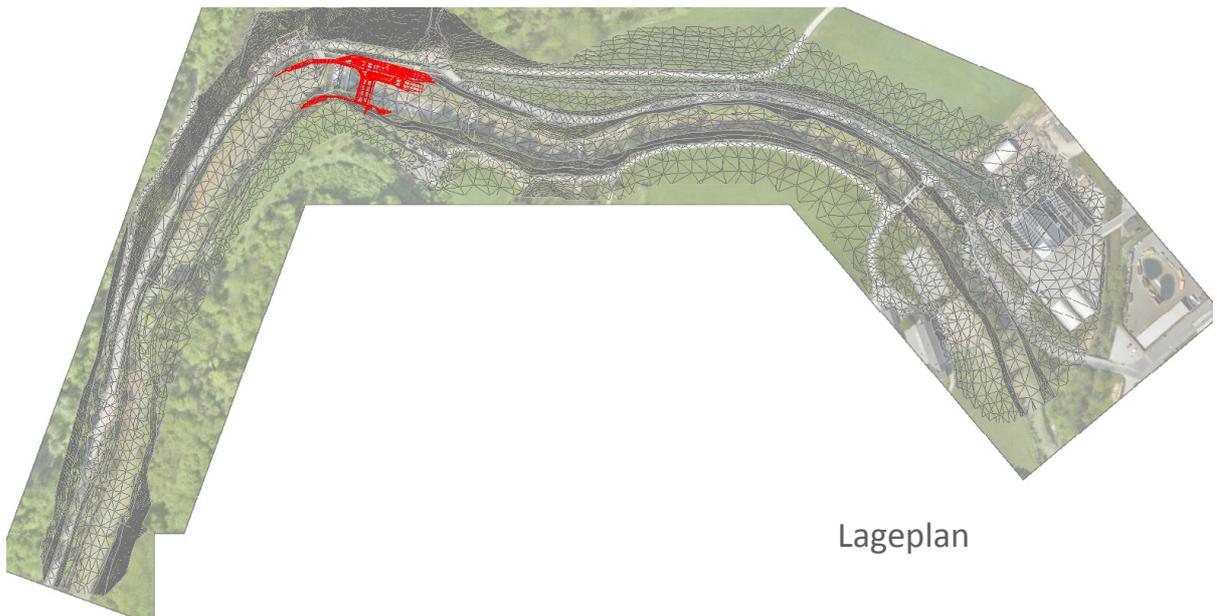
Bestehendes Holzwehr mit Oberwasserkanal



Bestehendes Holzwehr

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

WKA Kienberg an der Erlauf – Fa. Worthington



Lageplan

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

WKA Kienberg an der Erlauf – Fa. Worthington

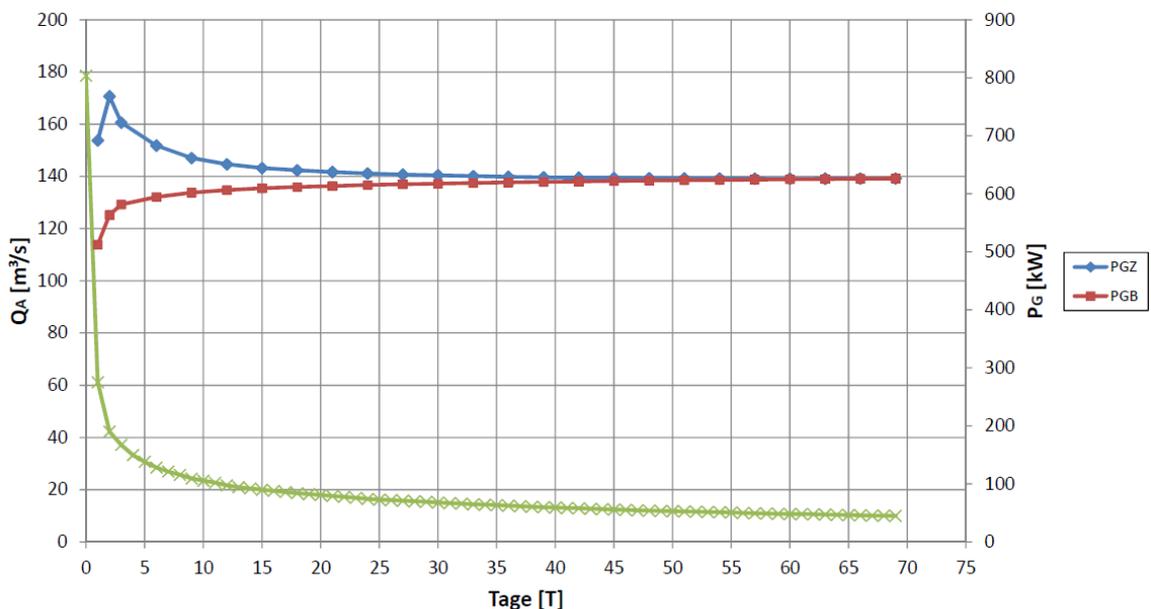
Vorzugsvariante – Neubau der WKA

- beweglicher Wehrverschluss zur Verbesserung der Hochwasserbedingungen → Schlauchwehr
- Verbesserung der HW-Situation und bessere Geschiebedurchgängigkeit → Stauzielerhöhung
- durch UW-Eintiefung und den Einsatz einer vertikalen Kaplan-Vertical-Turbine mit ca. 10 m³/s kann eine optimale Nutzung des vorhandenen Wasserdarbotes erreicht werden
- Stauzielerhöhung mit einer Fallhöhe von ca. 7,50 m am Wehr
- durch die Nutzung eines Schlauchwehres besteht die Möglichkeit, im Überwasserfall, ein dynamisches Stauziel zu nutzen

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

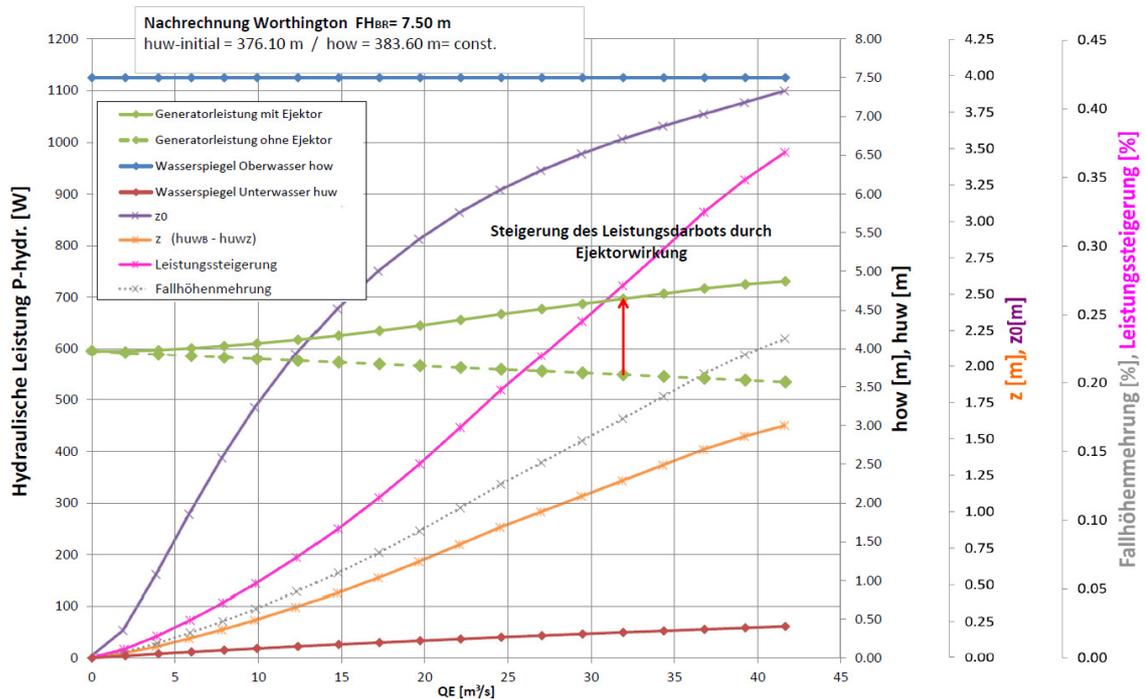
WKA Kienberg an der Erlauf – Fa. Worthington

Überschreitungsdauerlinie



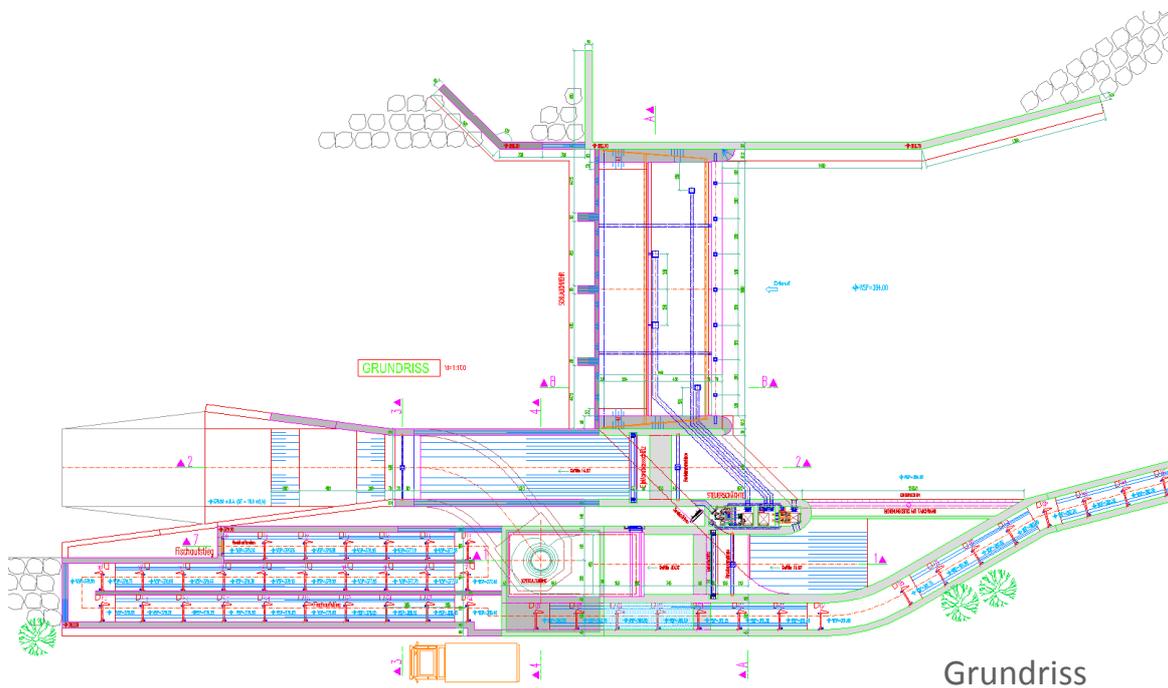
B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

WKA Kienberg an der Erlauf – Fa. Worthington



B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

WKA Kienberg an der Erlauf – Fa. Worthington



B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

WKA Kienberg an der Erlauf – Fa. Worthington

Maschinelle Auslegung

Laufraddurchmesser von ca. 1,40 m.

Auslegungsparameter bei $Q_T = Q_A = 10,0 \text{ m}^3/\text{s}$ → Bruttofallhöhe von 7,40 m

Verwendung eines synchronen Generators → Getriebe entfällt

OW = 384,00 m ü. A.

UW = 376,60 m ü. A.

$Q_T = 10,0 \text{ m}^3/\text{s}$

$H_{BR} = 7,40 \text{ m}$

$h_v = 0,10 \text{ m}$

$H_N = 7,30 \text{ m}$

Wirkungsgrade (lt. Werten von vergleichbaren Anlagen):

$$\left. \begin{array}{l} \eta_T = 0,924 \\ \eta_{GEN} = 0,948 \end{array} \right\} \eta = 0,876$$

$$P_{T1}^{16,0 P} = g \times \eta \times H_N \times Q = 9,81 \times 0,924 \times 7,38 \times 10,0 = \mathbf{661,7 \text{ KW}}$$

$$P_{G1}^{16,0} = g \times \eta \times H_N \times Q = 9,81 \times 0,876 \times 7,30 \times 10,0 = \mathbf{627,3 \text{ KW}}$$

B. Entwicklungen zum Ejektorkraftwerk – System ZT-Fritsch

WKA Kienberg an der Erlauf – Fa. Worthington

Auslegungsparameter bei voller Ejektorwirkung für Turbine aus prognostizierter Fallhöhenmehrung von ca. 0,7 m zur Ausgangsfallhöhe bei $Q_{A,E} = \text{ca. } 40 \text{ m}^3/\text{s}$ und der für die Kaplan turbine möglichen Durchflusssteigerung errechnet sich

$$Q_{T,E} = f \times Q_{T,A} = 1,05 \times 10,0 = 10,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$H_{BR} = 8,08 \text{ m}$

$h_v = 0,12 \text{ m}$

$H_N = 7,96 \text{ m}$

Wirkungsgrade:

$$\left. \begin{array}{l} \eta_T = 0,924 \\ \eta_{GEN} = 0,948 \end{array} \right\} \eta = 0,876$$

$$P_T^E = g \times \eta \times H_N \times Q = 9,81 \times 0,924 \times 7,96 \times 10,5 = \mathbf{757,6 \text{ KW}}$$

$$P_G^E = g \times \eta \times H_N \times Q = 9,81 \times 0,876 \times 7,96 \times 10,5 = \mathbf{718,2 \text{ KW}}$$

Grundlage für die Höhe einer Investitionsförderung und maßgebend für die Dimensionierung des Generators

Wasserkraftanlage Casale Monferrato – Piemont (4,4 MW; Wehrdimension B / H = 200 / 4,30 m)



Ich bedanke mich herzlich für Ihre Aufmerksamkeit !