

Basiswissen  
Gerinneströmung

## Inhalt

Passend zu vielen Lehrbüchern vermitteln die GUNT-Versuchsrinnen die Grundlagen der Gerinneströmung am Beispiel einer Versuchsrinne mit Rechteckquerschnitt.

Wir stellen im vorderen Teil dieses Kapitels die Grundlagen der Gerinneströmung dar. Parallel dazu zeigen wir, wie sich bestimmte Fragestellungen und Phänomene experimentell umsetzen lassen. Prinzipiell gelten diese Darstellungen für alle GUNT-Versuchsrinnen und ihre Zubehöre.

<b>Grundlagen der Gerinneströmung</b> hydraulischer Radius benetzter Umfang typische Gerinneprofile	072
<b>Gleichförmiger Abfluss in einem Rechteckgerinne</b> Fließformeln	074
<b>Stationärer Abfluss</b> Kontinuitätsgleichung Bernoulli-Gleichung spezifische Energiehöhe	075
<b>Ungleichförmiger Abfluss in einem Rechteckgerinne</b> Fließwechsel Energiehöhendigramm Stützkraftdiagramm	076
<b>Bestimmung des Energiehöhenverlusts beim Wechselsprung</b>	078
<b>Froudezahl und kritischer Abfluss</b> momentane und permanente Störung Wechselsprung bei unterschiedlichen Froudezahlen	079 081
<b>Schwall und Sunk im offenen Gerinne</b>	082
<b>Energiedissipation</b> Tosbecken	084
<b>Kontrollbauwerke</b> <b>Strömung über Wehre</b> ■ Überfallbedingung am Wehr ■ Strömung über feste Wehre ■ Überfallarten ■ Abflussberechnung nach Poleni rundkronige Wehre scharfkantige Wehre breitkronige Wehre Heberwehr Schütze	086 086 087 088 088 089 090 091 092 093
<b>Durchlass</b>	094
<b>Örtliche Verluste in Gerinnen</b> Pfeiler	095
<b>Verfahren zur Abflussmessung</b> Messgerinne Messwehre	096
<b>Instationäre Strömung: strömungsinduzierte Schwingungen</b> schwingende Pfähle	098
<b>Sedimenttransport</b> Geschiebetransport	099
<b>Instationäre Strömung: Wellen</b>	100



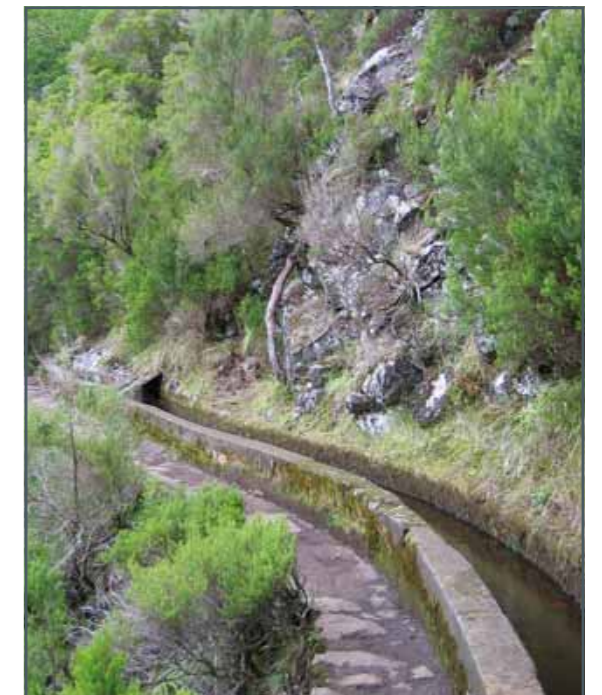
Fließgewässer in der Natur stellen „Strömungen in offenen Gerinnen“ dar. Seit Jahrhunderten werden dabei bauliche Eingriffe vorgenommen: Bewässerungssysteme, Hochwasserschutz und Nutzbarmachung von Flüssen für Schifffahrt und Energiegewinnung.



Berühmte Beispiele sind antike Wasserleitungssysteme (Aquädukte) oder landwirtschaftliche Bewässerungskanäle, die über sehr große Entfernungen reichen: die „Levadas“ in Portugal (unten).

## häufig verwendete Formelzeichen

<b>E</b>	spezifische Energiehöhe
<b><math>\Delta E</math></b>	Energiehöhenverlust
<b>h</b>	Abflusstiefe
<b><math>h_c</math></b>	Grenztiefe
<b><math>h_d</math></b>	Abflusstiefe Unterwasser („downstream“)
<b><math>h_o</math></b>	Überfallhöhe („weir head“)
<b><math>h_u</math></b>	Abflusstiefe Oberwasser („upstream“)
<b>J</b>	Energieliniengefälle
<b>Q</b>	Abfluss (Ausfluss beim Schütz)
<b>v</b>	Fließgeschwindigkeit
<b>W</b>	Wehrhöhe



## Basiswissen

## Gerinneströmung

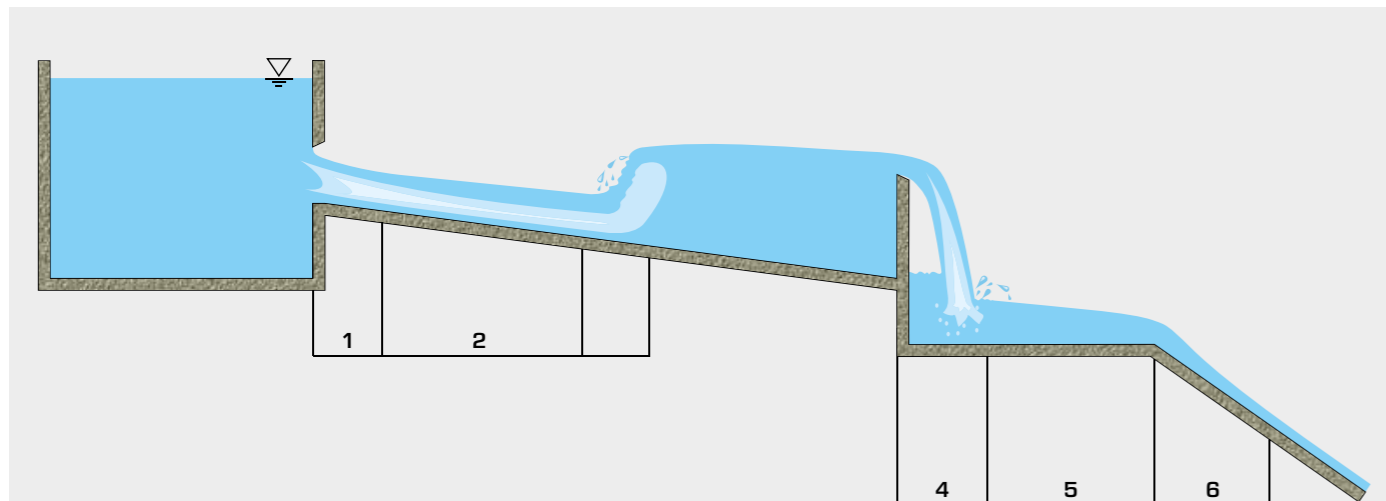
## Grundlagen der Gerinneströmung

Gerinneströmungen sind weit verbreitet. Typische Beispiele sind Flüsse bzw. Kanäle, Entwässerungsgräben, Rinnsteine, Wasserbahnen in Vergnügungsparks oder die Kanalisation. Die treibende Kraft dieser normalerweise turbulenten Strömungen ist die Gravitation. Charakteristisch für Gerinneströmungen ist ihre freie Oberfläche. Im Vergleich zu Rohrströmungen haben Gerinneströmungen durch die freie Oberfläche einen Freiheitsgrad mehr.

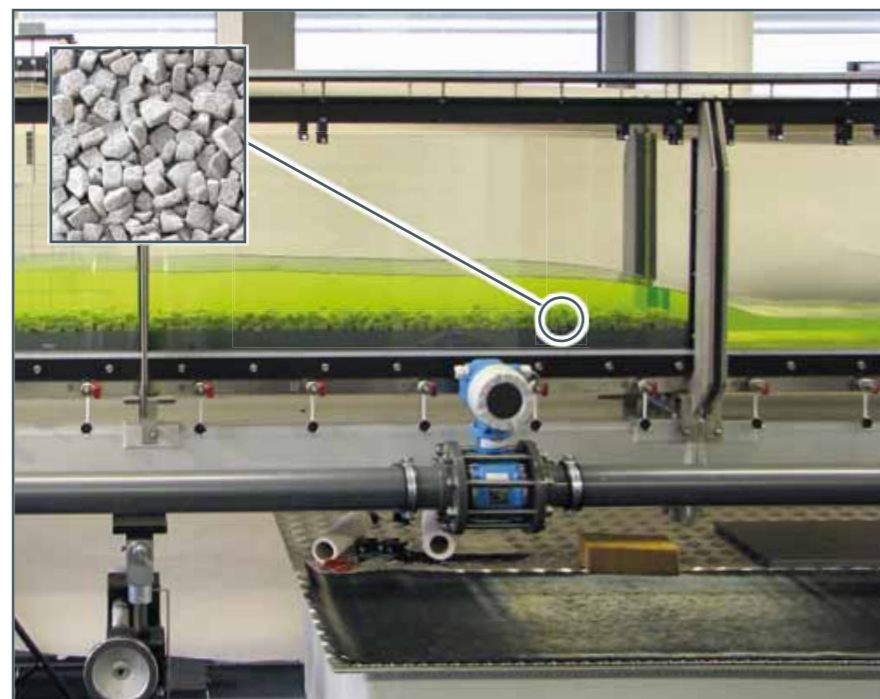
Es gibt im Wesentlichen zwei Arten der Gerinneströmung:

- gleichförmige Strömung (die Abflusstiefe (Wassertiefe) bleibt gleich; Beschleunigung = Verzögerung)
- ungleichförmige Strömung (die Abflusstiefe ändert sich durch Beschleunigung oder Verzögerung)

Der Abfluss kann jeweils **unterkritisch** (auch „strömend“ genannt), **kritisch** oder **überkritisch** (auch „schießend“ genannt) erfolgen.



1 stark ungleichförmiger Ausfluss unter einem Schütz, 2 schwach ungleichförmiger Abfluss, 3 Wechselsprung (stark ungleichförmig), 4 Wehrüberfall (stark ungleichförmig), 5 schwach ungleichförmiger Abfluss, 6 ungleichförmiger Abfluss an einem Gefällewechsel



HM 162.77  
Gerinnesohle Kies

## Typische Gerinneprofile

In den meisten Fällen lässt sich der jeweilige Querschnitt einer Gerinneströmung mit wenigen geometrischen Profilen ungefähr abbilden. Kreis bzw. Halbkreis, Rechteck, Trapez und auch Kombinationen der Profile sind sehr gut geeignet, um das Gerinne mathematisch besser berechenbar und ggf. modellierbar zu machen. Oft ist es wichtig, den Abfluss  $Q$  und die Abflusstiefe  $h$  an definierten Stellen zu bestimmen. Typische Größen für Berechnungen sind die durchströmte Fläche  $A$  (auch Fließfläche genannt), der benetzte Umfang  $P$  und der hydraulische Radius  $R$ .

Im Fall eines **Rechteckquerschnitts** sind diese Größen wie folgt definiert:

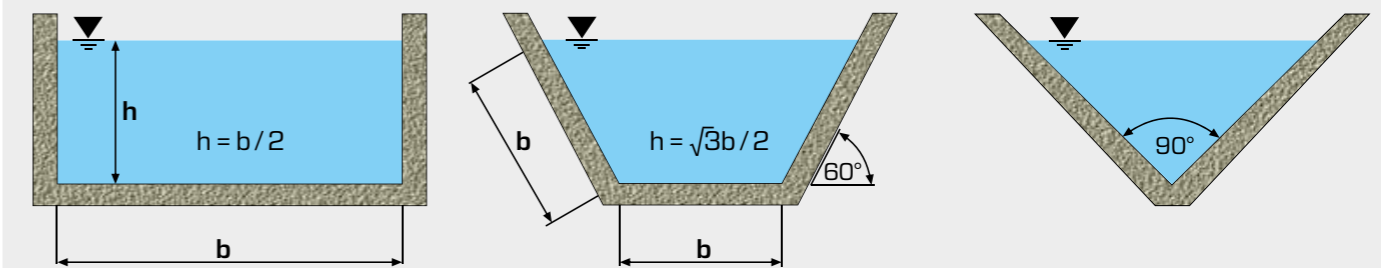
- Fließfläche  $A = bh$
- benetzter Umfang  $P = b + 2h$
- hydraulischer Radius  $R = A / P = bh / (b + 2h)$   
Bei breiten, flachen Gerinnen entspricht der hydraulische Radius  $R$  also der Abflusstiefe  $h$ .

Im Fall von künstlichen Gerinnen, z.B. Kanälen, ist auch das sogenannte hydraulisch günstige Profil eine wichtige Größe – bei optimaler Auslegung des Profils spart man Material und Kosten:

- Abfluss  $Q$  + Energieliniengefälle  $J$  gegeben:  
minimale Fließfläche  $A$  bestimmen
- Abfluss  $Q$  + Fließfläche  $A$  gegeben:  
minimales Energieliniengefälle  $J$  bestimmen.

## Optimale hydraulische Gerinnequerschnitte

Im Fall des kleinsten benetzten Umfangs, bezogen auf die gegebene Fläche, spricht man vom optimalen hydraulischen Querschnitt.



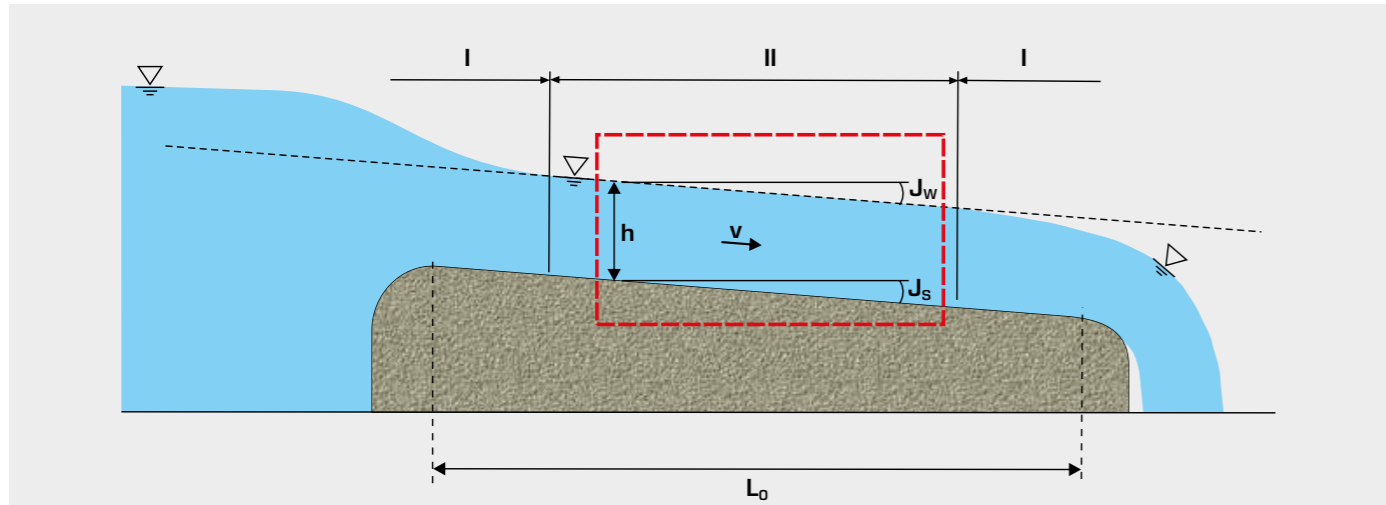
Rechteck, Trapez mit 60° Winkeln, Dreieck;  $h$  Abflusstiefe,  $b$  Gerinnebreite

GUNT-Versuchsrinnen haben einen Rechteckquerschnitt. Sie bieten – neben dem Einbau von unterschiedlichen Modellen – die Möglichkeit, das Gefälle zu verändern und an der Gerinnesohle die Oberfläche und damit die Rauheit zu beeinflussen. Eine

Vielzahl von Versuchen zu gleichförmiger und ungleichförmiger Gerinneströmung inklusive Instrumentierung zur Erfassung der Fließgeschwindigkeit  $v$  und der Abflusstiefe  $h$  ist möglich.

# Basiswissen Gerinneströmung

## Gleichförmiger Abfluss in einem Rechteckgerinne

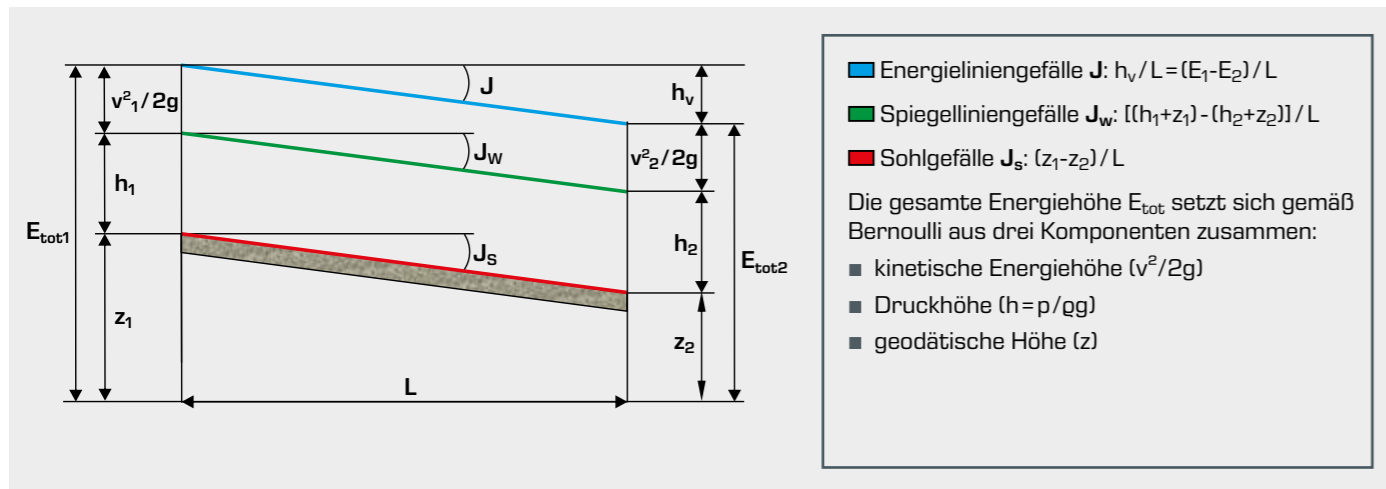


I ungleichförmiger Abfluss, II gleichförmiger Abfluss;  
h Abflusstiefe, J<sub>s</sub> gleichmäßiges Sohlgefälle, J<sub>w</sub> Spiegelliniengefälle, L<sub>0</sub> Länge des Gerinnes mit Sohlgefälle  
J<sub>s</sub> und konstanter Breite, v Fließgeschwindigkeit, roter Rahmen Kontrollvolumen

Bei gleichförmiger Gerinneströmung gilt, dass die Abflusstiefe **h** gleich, also parallel zur Sohle, bleibt. Das bedeutet auch, dass die Fließgeschwindigkeit **v** konstant bleibt.

Die Abflusstiefe **h** lässt sich auch als Druckhöhe (eine Komponente der spezifischen Energiehöhe) beschreiben. Diese Energiehöhen werden oft in Form von sogenannten Liniengefällen aufgetragen. Im Energieliniengefälle **J** ist in vielen Fällen die

Abflusstiefe **h** die maßgebliche Komponente. Bei gleichförmiger Gerinneströmung ist das Energieliniengefälle **J** gleich dem Sohlgefälle **J<sub>s</sub>** und damit die Abflusstiefe **h** gleich. Der sog. **Normalabfluss** herrscht bei gleichförmiger Gerinneströmung, d.h. dass das Sohlgefälle **J<sub>s</sub>** die Reibungsverluste im Abfluss **Q** ausgleicht. Energieliniengefälle, Spiegelliniengefälle und Sohlgefälle sind parallel.



### Fließformeln

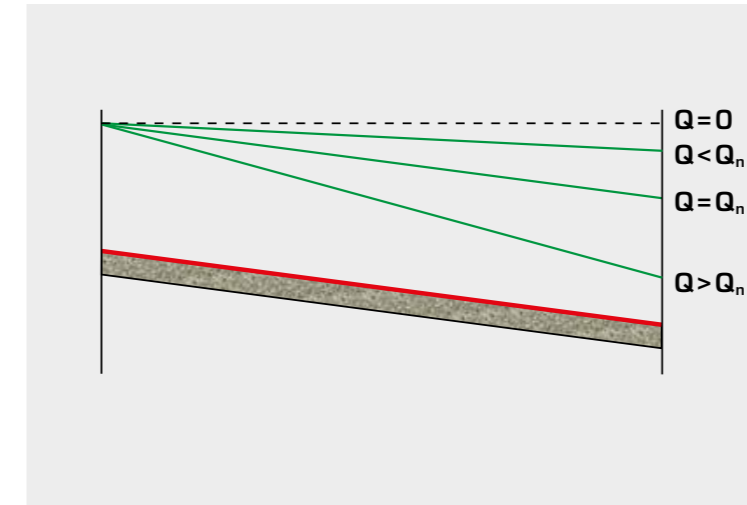
Fließformeln beschreiben die Beziehung zwischen dem Abfluss **Q** und der Abflusstiefe **h** bei gegebener Querschnittsform und Rauheitscharakteristik. Die Querschnittsform wird im hydraulischen Radius berücksichtigt, die Abflusstiefe **h** geht über das Energieliniengefälle **J** ein.

Häufig verwendete Fließformeln für allgemeine Gerinne sind Fließformeln nach

- Darcy-Weisbach
- Manning-Strickler (auch Gauckler-Manning-Strickler).

Fließformeln basieren auf empirischen Werten.

## Stationärer Abfluss



Verlauf der Spiegellinie im Kontrollvolumen für unterschiedliche stationäre Abflüsse:

- Q = 0**: kein Abfluss
- Q < Q<sub>n</sub>**: verzögerter Abfluss
- Q = Q<sub>n</sub>**: gleichförmiger Abfluss, auch Normalabfluss genannt
- Q > Q<sub>n</sub>**: beschleunigter Abfluss

Bei Energiehöhenbetrachtungen am Kontrollvolumen werden die **Bernoulli-Gleichung** und die **Kontinuitätsgleichung** verwendet.

Kontinuitätsgleichung:

$$Q = \text{const} = AV = bhv \quad \text{oder} \quad bh_1v_1 = bh_2v_2$$

Bernoulli-Gleichung (allgemeine Energieerhaltung):

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{const}$$

Mit Energiehöhen ausgedrückt ergibt sich:

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + z_2 + h_v \quad \text{mit Reibungsverlust } h_v$$

Mit  $v = \frac{Q}{bh}$  aus der Kontinuitätsgleichung ergibt sich:

$$\frac{1}{2} \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} + h_1 + (z_1 - z_2) = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{gb^2h_2^3} + h_2 + h_v$$

Für **Normalabfluss** gilt:

$$h_1 = h_2, \quad \text{also ist } h_v = z_1 - z_2$$

Die **spezifische Energiehöhe** ist definiert als

$$E = h + \frac{v^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{2gh^2}$$

Sie setzt sich aus der kinetischen Energiehöhe und der Druckhöhe zusammen.

Eine andere Schreibweise ist:

$$h^3 - Eh^2 + \frac{Q^2}{2g} = 0$$

Als Ergebnis erhält man also eine Gleichung 3. Ordnung für die Abflusstiefe **h**. Die Abflusstiefe **h** hängt von der spezifischen Energiehöhe **E** und dem Abfluss **Q** bzw. vom Gefälle und der Rauheit ab.

Basiswissen  
**Gerinneströmung**

**Ungleichförmiger Abfluss in einem Rechteckgerinne**

In vielen Fällen ist der Abfluss **Q** in einem Gerinne nicht gleichförmig. Man unterscheidet zwischen **schwach** und **stark ungleichförmigen** Abfluss.

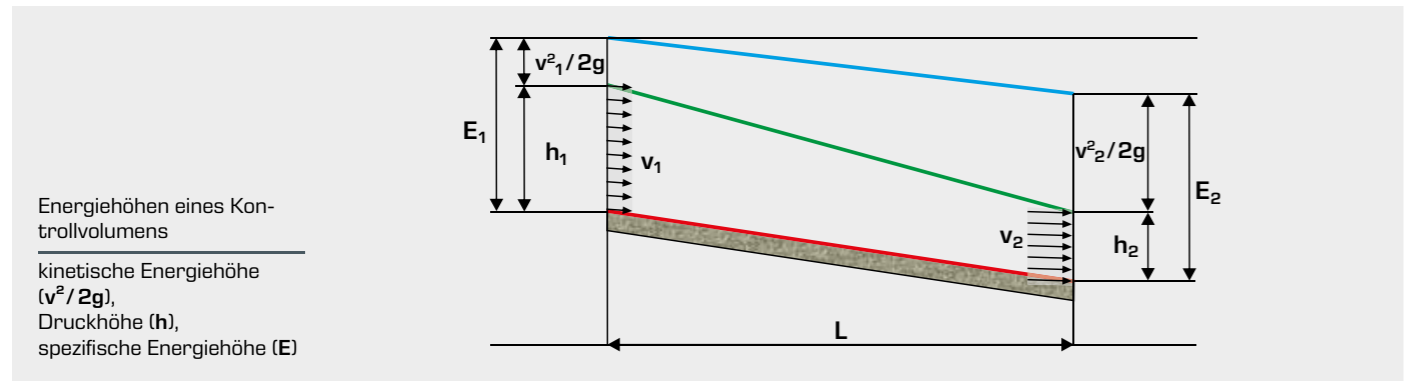
- schwach ungleichförmiger Abfluss: die Abflusstiefe **h** ändert sich, der Abfluss **Q** bzw. Fließzustand selbst ist (zunächst) **unterkritisch**. Schwach ungleichförmiger Abfluss tritt z.B. bei einem Gerinne mit wenig Gefälle und großer Rauheit auf.
- stark ungleichförmiger Abfluss tritt z.B. beim Überströmen von Wehren auf. In vielen Fällen ist der Abfluss **überkritisch**.

Unterkritischer Abfluss hat eine große Abflusstiefe **h** bei kleiner Fließgeschwindigkeit **v**. Bei überkritischem Abfluss ist es umgekehrt: kleine Abflusstiefe **h** und große Fließgeschwindigkeit **v**.

Der **Fließwechsel** von unterkritischem zu überkritischem Abfluss erfolgt mit einer kontinuierlichen Veränderung von Abflusstiefe **h**, Fließgeschwindigkeit **v** und spezifischer Energiehöhe **E**, z.B. bei einer Vergrößerung des Gefälles.

Der Fließwechsel von überkritischem zu unterkritischem Abfluss dagegen erfolgt immer mit einer sprunghaften Änderung der Abflusstiefe **h** und einem Energiehöhenverlust  $\Delta E$ , z.B. im **Wechselsprung**.

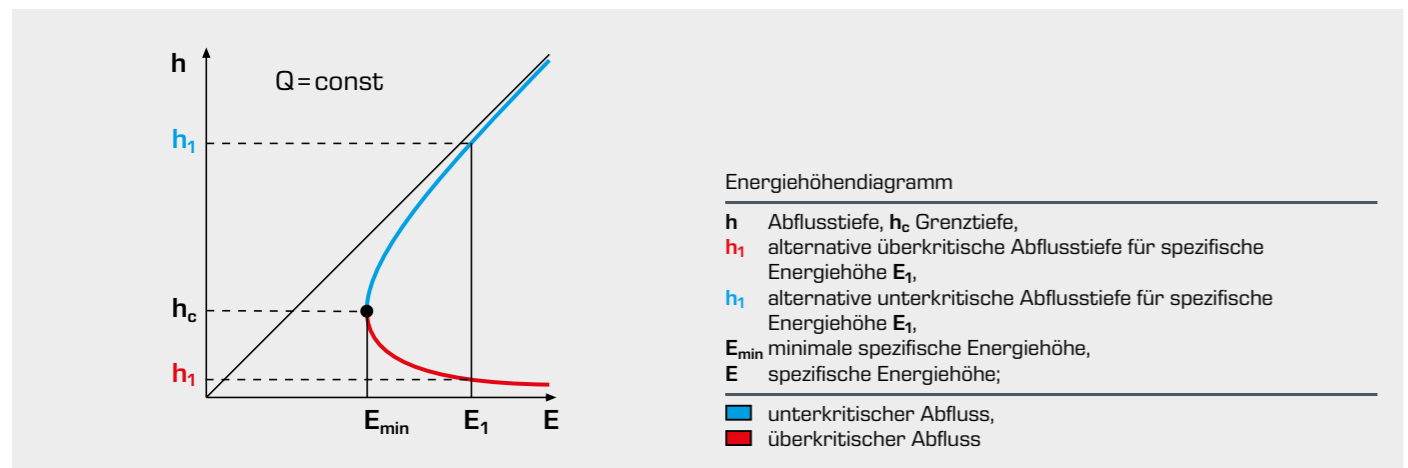
**Zusammenhang zwischen Abfluss Q, spezifischer Energiehöhe E und Abflusstiefe h**



Energiehöhenbetrachtungen am Kontrollvolumen führen zu einer Gleichung 3. Ordnung für die Abflusstiefe **h**. Die Abflusstiefe **h** hängt von der spezifischen Energiehöhe **E** und dem Abfluss **Q** ab. Im sogenannten **Energiehöhendendiagramm** wird die Abflusstiefe **h** grafisch als Funktion der spezifischen Energiehöhe **E** bei konstantem Abfluss **Q** dargestellt. Die minimale spezifische Energiehöhe  $E_{min}$  hat nur eine mögliche Abflusstiefe, die sogenannte **Grenztiefe  $h_c$** . Bei Grenztiefe  $h_c$  herrscht kritischer

Abfluss. Für alle anderen spezifischen Energiehöhen gibt es zwei sogenannte **alternative Abflusstiefen**, die physikalisch sinnvoll sind (siehe Diagramm mit Wechselsprung). Welche der beiden Abflusstiefen die richtige ist, muss jeweils berechnet werden (herrscht unter- oder überkritischer Abfluss?).

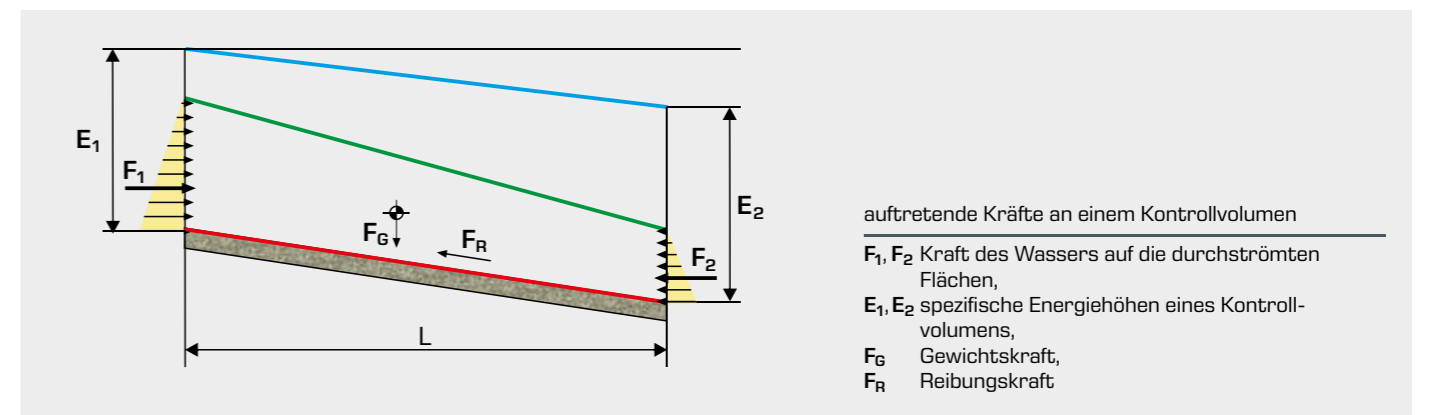
Der maximale Abfluss **Q** bei gegebener spezifischer Energiehöhe **E** kann ebenso bestimmt werden.



**Zusammenhang zwischen Impulssatz, Stützkraft F und Abflusstiefe h**

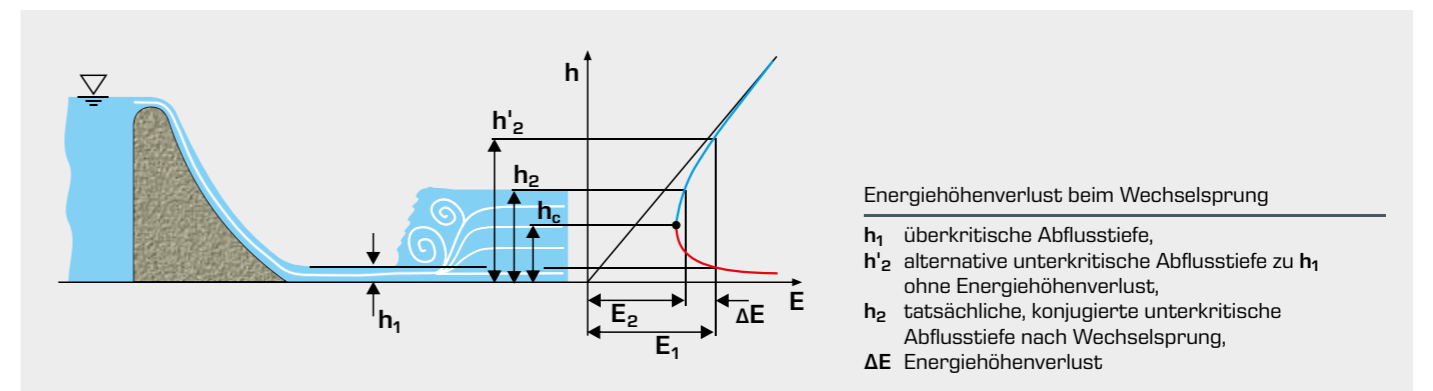
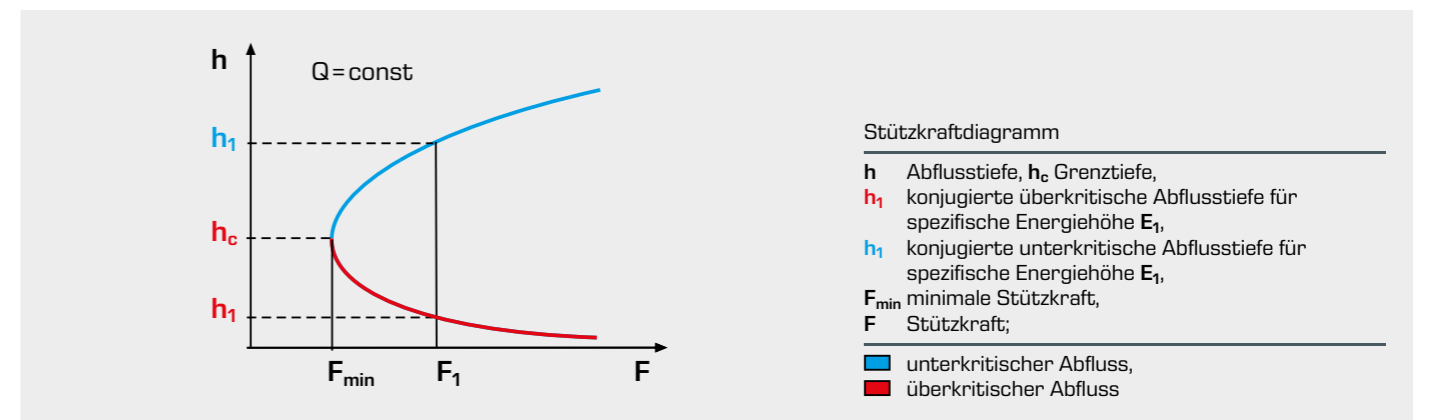
Die 3. wichtige Gleichung neben **Bernoulli** und **Massenerhaltung** ist der **Impulssatz**. Am Kontrollvolumen wird das Kräftegleichgewicht aufgestellt. In vielen Fällen können der Einfluss der Gewichtskraft und der Reibungskraft vernachlässigt werden. Es spielen also nur noch die Kräfte eine Rolle, die an den

durchströmten Flächen angreifen: die statische Druckkraft und die dynamische Impulskraft. Die sogenannte **Stützkraft F** ist die Summe dieser beiden Kräfte und wird über den Impulssatz bestimmt.



Auch die Stützkraft lässt sich in einem Diagramm darstellen. Im **Stützkraftdiagramm** ist die Abflusstiefe **h** über Stützkraft **F** bei konstantem Abfluss **Q** aufgetragen. Ähnlich wie im Energie-

höhendendiagramm gibt es die minimale Stützkraft  $F_{min}$  bei Grenztiefe  $h_c$ . Für alle anderen Stützkraften gibt es zwei konjugierte Abflusstiefen.



Basiswissen  
**Gerinneströmung**

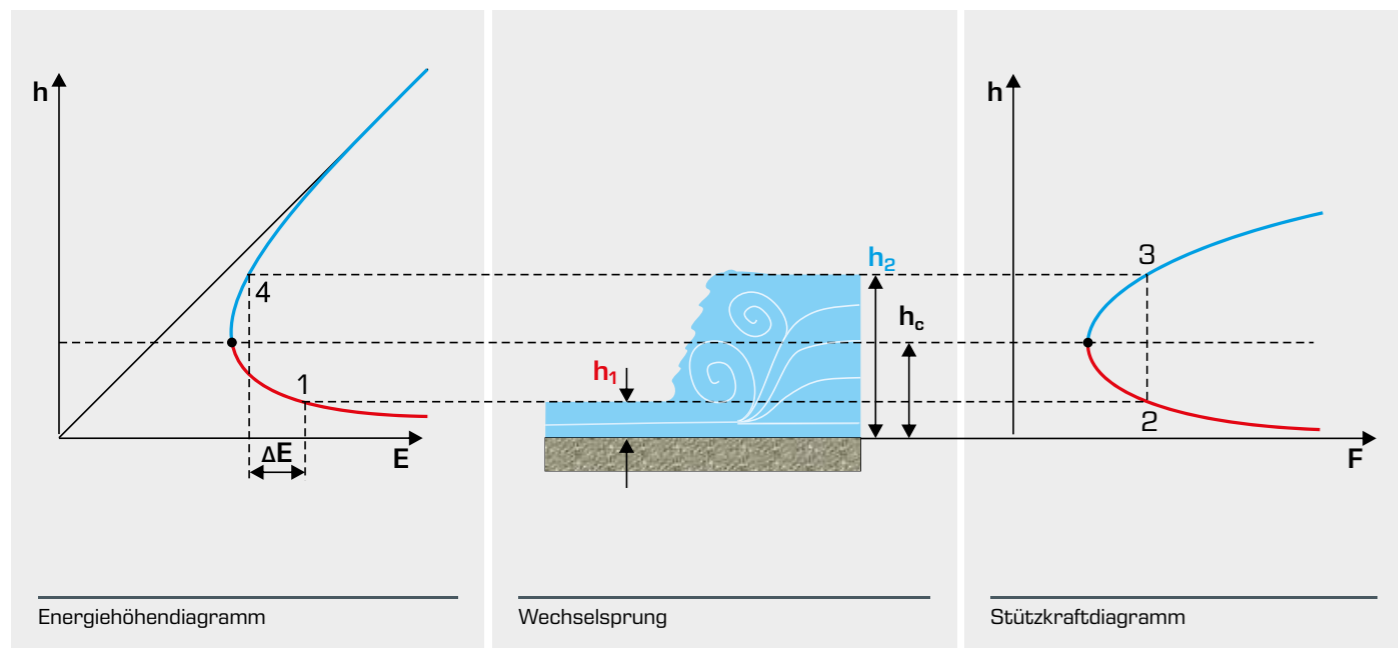
**Bestimmung des Energiehöhenverlusts beim Wechselsprung**

Beim Wechselsprung wird ein überkritischer Abfluss  $Q$  wieder unterkritisch. Die Abflusstiefe  $h$  ändert sich sprunghaft und ist nach dem Wechselsprung größer. Beim Wechselsprung wird durch entstehende Turbulenzen Energie dissipiert. Der Impuls

bleibt allerdings erhalten, d.h., dass für die gleiche Stützkraft  $F$  zwei konjugierte Abflusstiefen  $h$  existieren. Das Verhältnis der konjugierten Abflusstiefen  $h_1$  und  $h_2$  wird mit folgender Formel beschrieben:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{8Fr_1^2 + 1} - 1 \right) \quad \text{oder} \quad h_2 = \frac{-h_1}{2} + \sqrt{\frac{h_1^2}{4} + 4h_1 \frac{v_1^2}{2g}}$$

Mit Hilfe des gegebenen Energiehöhendidiagramms und eines analogen Stützkraftdiagramms lässt sich der auftretende Energiehöhenverlust  $\Delta E$  einfach grafisch bestimmen:



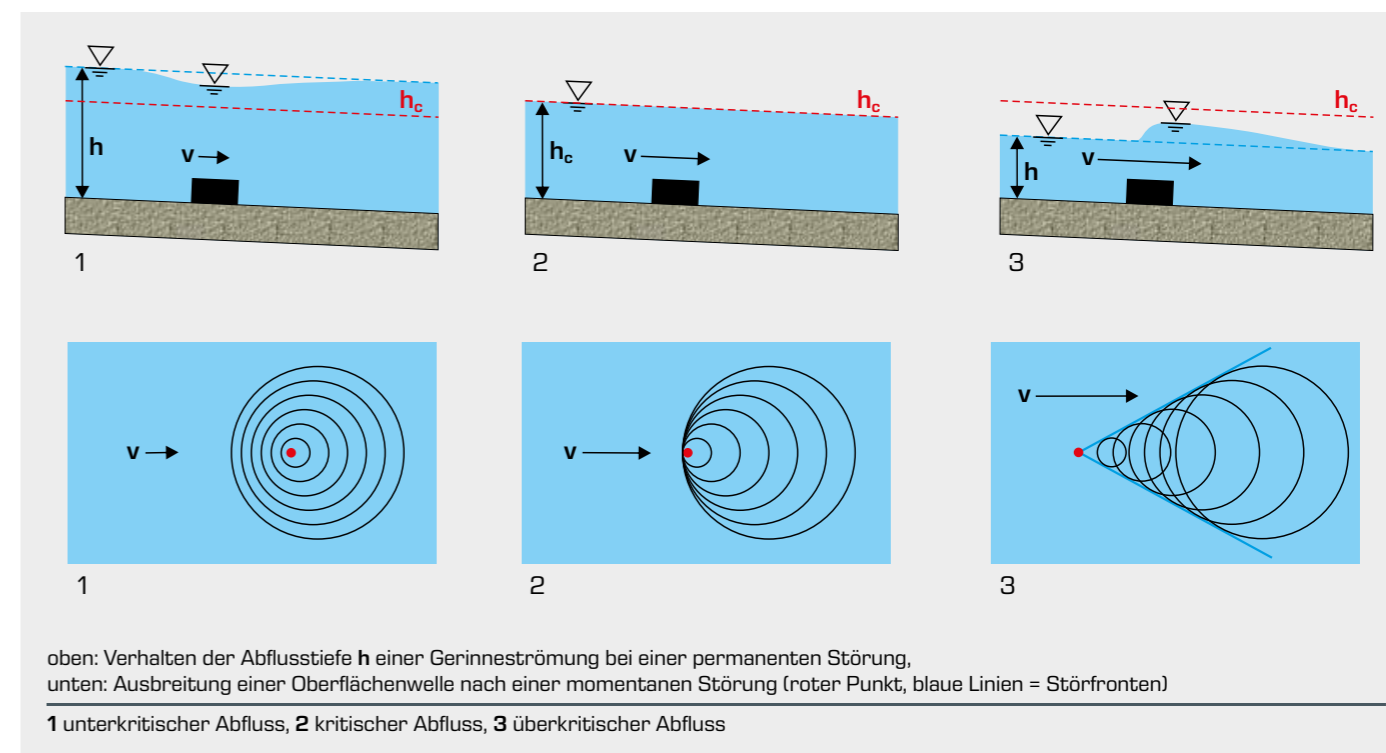
Im Energiehöhendidiagramm und im Stützkraftdiagramm wird die Abflusstiefe  $h_1$  eingetragen (Punkte 1 und 2). Um die Abflusstiefe  $h_2$  nach dem Wechselsprung zu ermitteln, wird im Stützkraftdiagramm die konjugierte Abflusstiefe zu  $h_1$  grafisch bestimmt (Punkt 3). Die Stützkraften  $F_1$  in Punkt 2 und  $F_2$

in Punkt 3 sind gleich (Impulserhaltung). Anschließend wird die Abflusstiefe  $h_2$  im Energiehöhendidiagramm eingetragen (Punkt 4). Die spezifischen Energiehöhen  $E_1$  und  $E_2$  werden im Diagramm abgelesen. Der Energiehöhenverlust  $\Delta E$ , der im Wechselsprung auftritt, entspricht der Differenz der spezifischen Energiehöhen.

Der auftretende Energiehöhenverlust  $\Delta E$  kann auch über die folgende Formel berechnet werden:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left( h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

**Froudezahl und kritischer Abfluss**



oben: Verhalten der Abflusstiefe  $h$  einer Gerinneströmung bei einer permanenten Störung, unten: Ausbreitung einer Oberflächenwelle nach einer momentanen Störung (roter Punkt, blaue Linien = Störfronten)  
1 unterkritischer Abfluss, 2 kritischer Abfluss, 3 überkritischer Abfluss

**Unterkritischer Abfluss**

Störungen im Abflussgeschehen sind stromaufwärts bemerkbar. Die Fließgeschwindigkeit  $v$  ist kleiner als die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  einer Oberflächenwelle. Unterkritischer Abfluss hat üblicherweise eine große Abflusstiefe  $h$  bei kleiner Fließgeschwindigkeit  $v$ .

**Kritischer Abfluss**

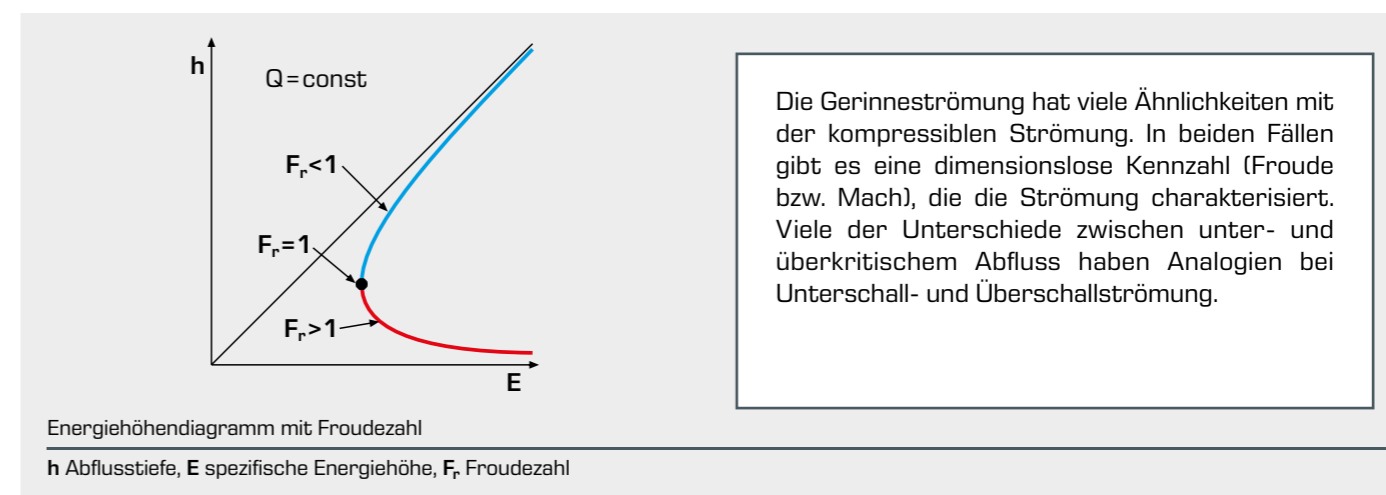
Störungen im Abflussgeschehen sind stromaufwärts nicht bemerkbar. Die Fließgeschwindigkeit  $v$  ist gleich der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  einer Oberflächenwelle.

**Überkritischer Abfluss**

Störungen im Abflussgeschehen sind stromaufwärts nicht bemerkbar. Die Fließgeschwindigkeit  $v$  ist größer als die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  einer Oberflächenwelle.

Die **Froudezahl** beschreibt das Verhältnis von Fließgeschwindigkeit  $v$  zu Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  einer Oberflächenwelle und dient deshalb als Maß für unter- oder überkritischen Abfluss. Die gleiche Froudezahl bedeutet eine dynamisch ähnliche Gerinneströmung.

- Fr < 1: unterkritisch
- Fr = 1: kritisch
- Fr > 1: überkritisch

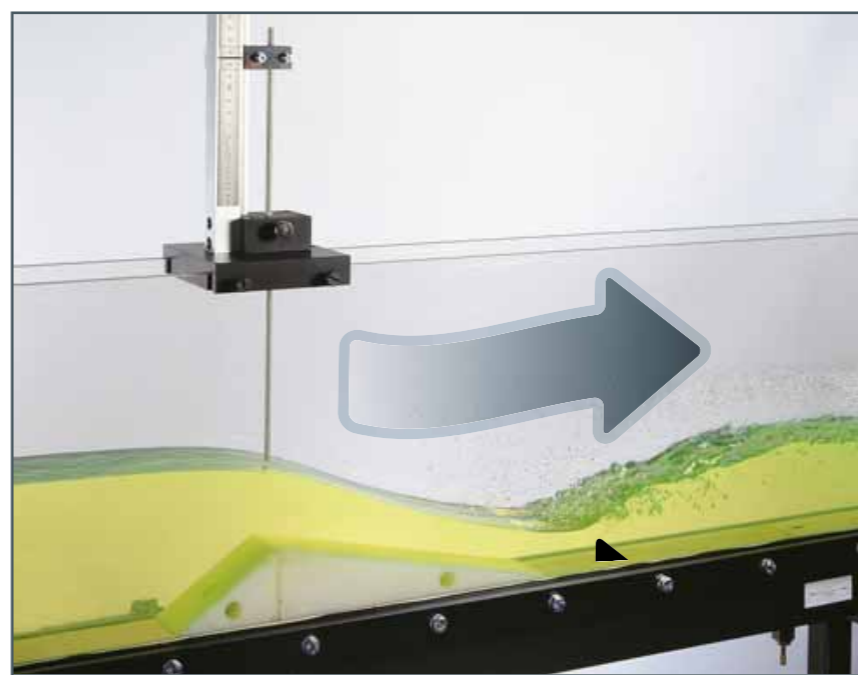
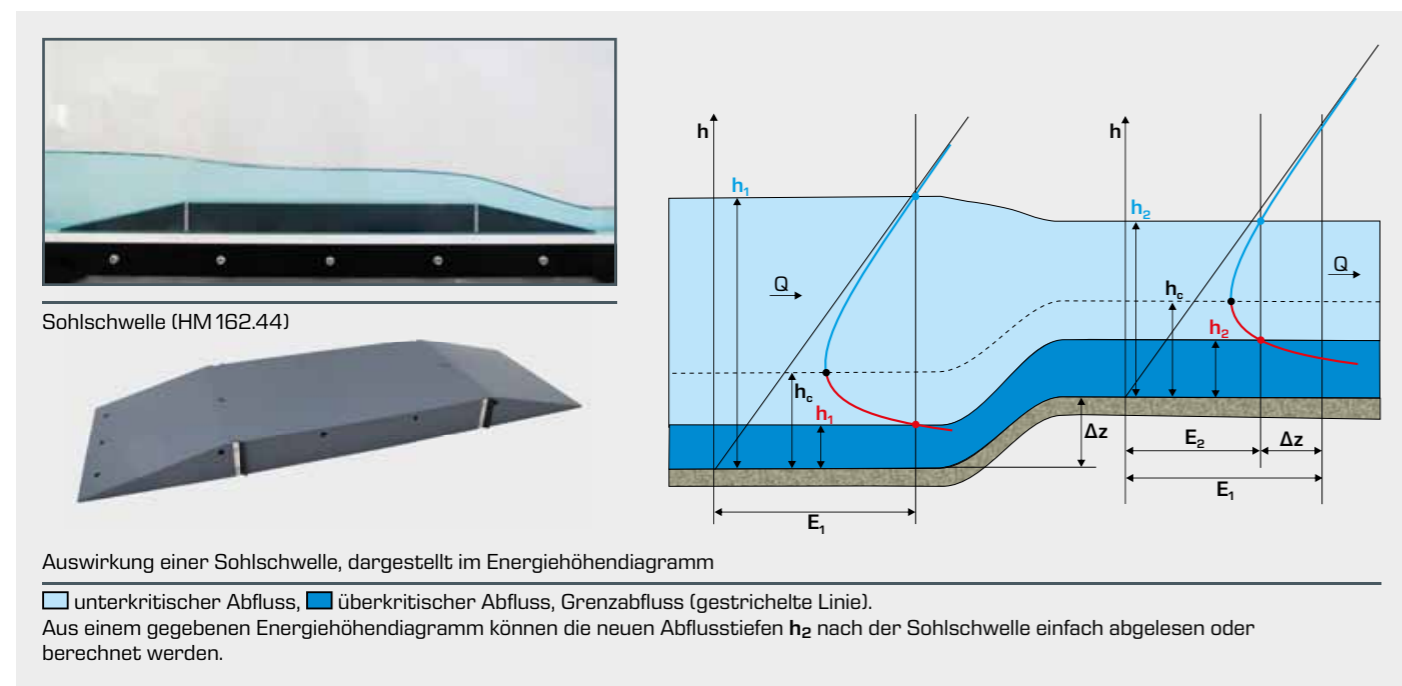


Die Gerinneströmung hat viele Ähnlichkeiten mit der kompressiblen Strömung. In beiden Fällen gibt es eine dimensionslose Kennzahl (Froude bzw. Mach), die die Strömung charakterisiert. Viele der Unterschiede zwischen unter- und überkritischem Abfluss haben Analogien bei Unterschall- und Überschallströmung.

Energiehöhendidiagramm mit Froudezahl  
h Abflusstiefe, E spezifische Energiehöhe, Fr Froudezahl

Basiswissen  
**Gerinneströmung**

**Froudezahl und kritischer Abfluss**



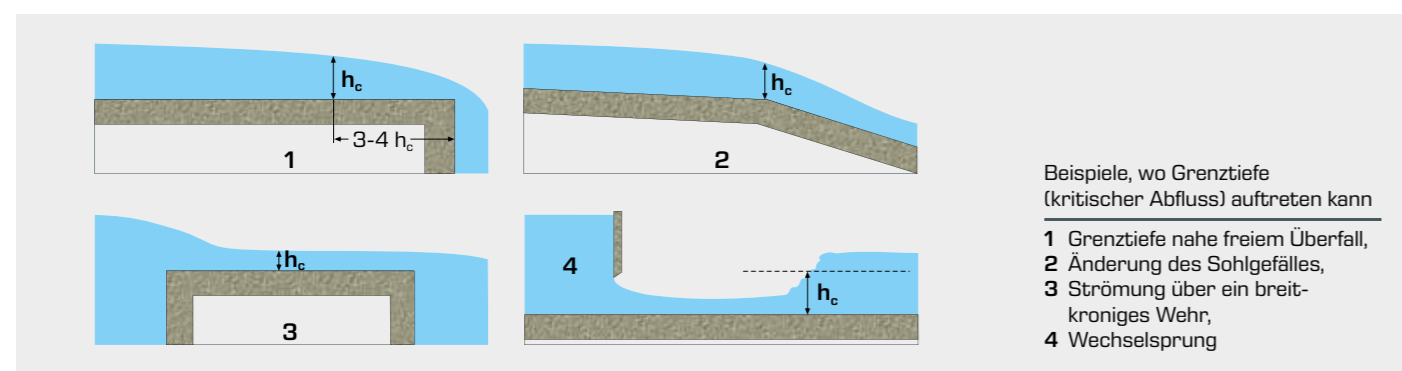
Wechselsprung an einem Wehr



Wechselsprung im Waschbecken

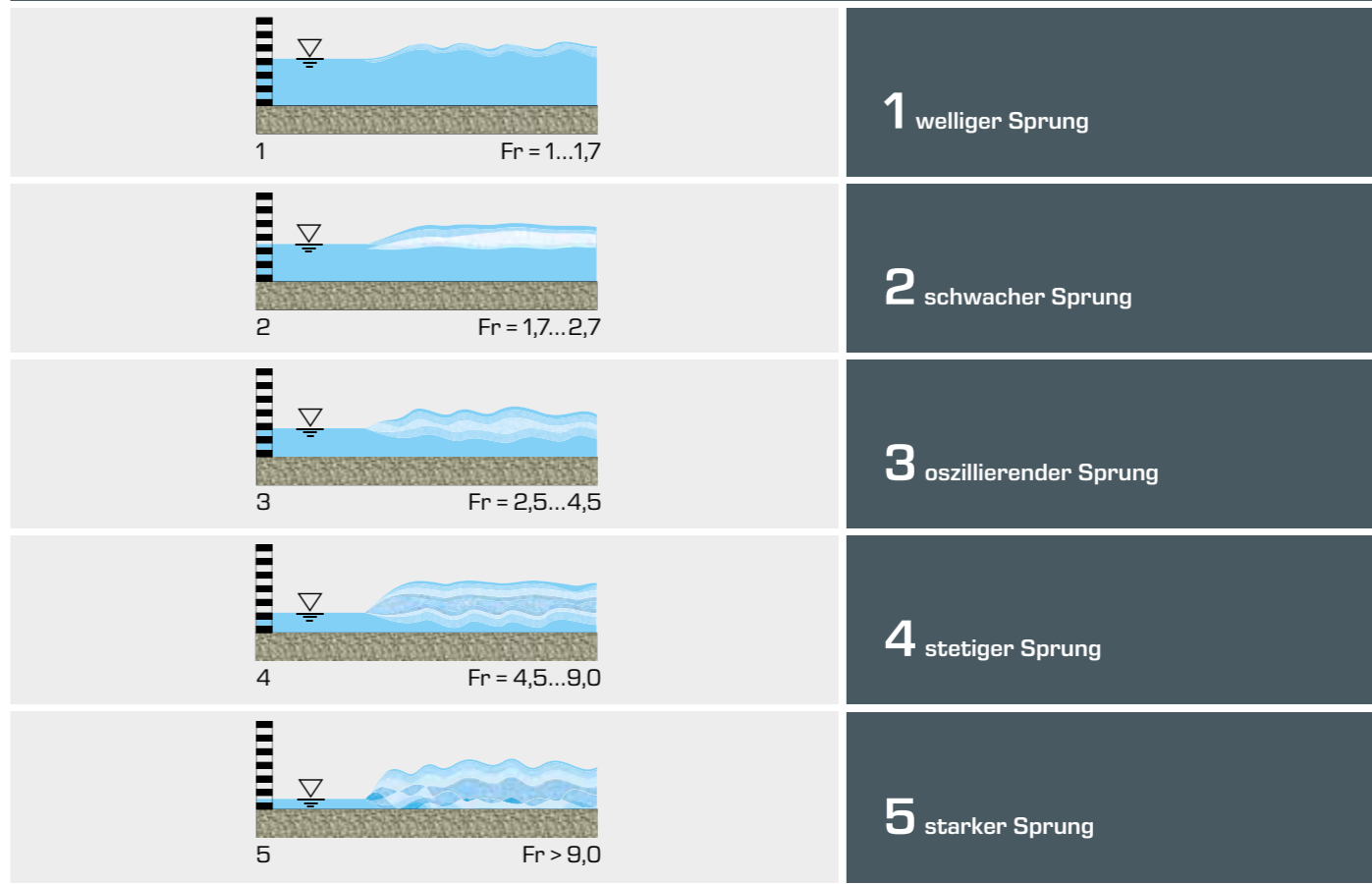
**Kritischer Abfluss (Froudezahl = 1)**

An der minimalen spezifischen Energiehöhe  $E_{min}$  entspricht die Abflusstiefe  $h$  der Grenztiefe  $h_c$ . An diesem Punkt ist die Froudezahl  $Fr=1$ , es herrscht kritischer Abfluss und die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  ist gleich der Fließgeschwindigkeit  $v$ . An diesem Punkt ist auch die Stützkraft  $F$  im Gerinne minimal.



Fließzustand	Abflusstiefe	Fließgeschwindigkeit	Gefälle	Froudezahl
unterkritischer Abfluss	$h > h_c$	$v < v_c$	$J < J_{KRIT}$	$Fr < 1$
kritischer Abfluss	$h = h_c$	$v = v_c$	$J = J_{KRIT}$	$Fr = 1$
überkritischer Abfluss	$h < h_c$	$v > v_c$	$J > J_{KRIT}$	$Fr > 1$
für Rechteckgerinne	$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}}$	$v_c = \sqrt{gh_c}$		$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$

**Ausbildung des Wechselsprungs bei unterschiedlichen Froudezahlen**



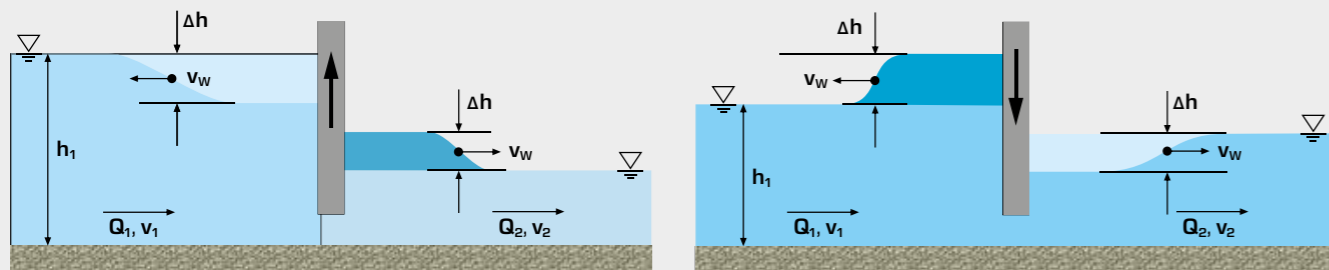
## Basiswissen

## Gerinneströmung

## Schwall und Sunk im offenen Gerinne

Die Erscheinungen „Schwall“ und „Sunk“ im offenen Gerinne beschreiben Wellen, die durch plötzliche Änderung des Abflusses entstehen. In Rohrleitungen gibt es das ähnliche Phänomen der Druckstöße. Die plötzliche Änderung des Abflusses kann z.B. beim Öffnen und Schließen eines Schützes oder beim Ausschalten von Turbinen auftreten. Die Schwallwelle bildet sich steil aus (Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle wächst mit zunehmender Wassertiefe), die Sunkwelle dagegen eher flach.

In erster Näherung sind Schwall- und Sunkhöhe gleich groß und können mit der Kontinuitätsgleichung berechnet werden. Beim plötzlichen Öffnen (linke Abbildung) spricht man von Entnahmesunk und Füllschwall, beim Schließen (rechte Abbildung) von Stauschwall und Absperrersunk.



Schwall- und Sunkwellen beim plötzlichen Betätigen eines Schützes

**links** Öffnen des Schützes, **rechts** Schließen des Schützes;  
**Q** Abfluss, **h** Abflusstiefe, **Δh** Schwall- oder Sunkhöhe, **v** Fließgeschwindigkeit,  
**v<sub>w</sub>** Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle;  
**Index 1** Größen vor der Störung, **Index 2** Größen nach der Störung,  
■ Schwallwelle, □ Sunkwelle



Schwallwelle

Gerinneströmung  
im VersuchAalto University  
FinnlandBundeanstalt für Wasserbau  
DeutschlandUniversity of Southampton  
Vereinigtes Königreich

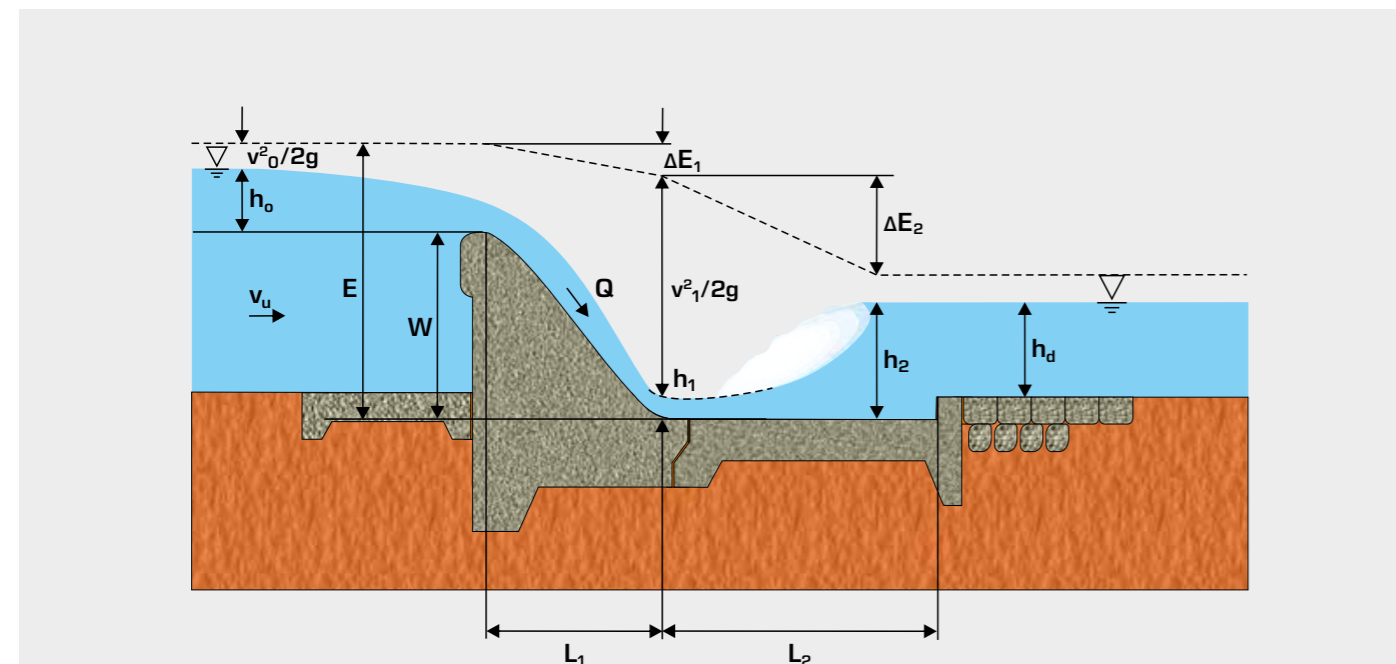
Basiswissen  
**Gerinneströmung**

**Energiedissipation**

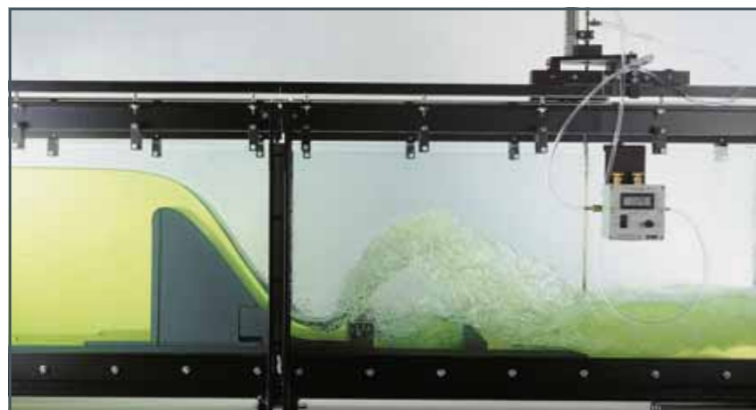
Gerade überkritischer Abfluss hat oft eine hohe Strömungsenergie, die sich aus der notwendigen kinetischen Energie fürs Weiterfließen und überschüssiger Energie zusammensetzt. Die überschüssige Energie kann u.a. zu Sohlenerosion führen. Deshalb ist es wichtig, diese überschüssige Energie zu dissipieren. Das kann in dem bereits genannten Wechselsprung (frei entstehend oder beabsichtigt in Tosbecken) oder in speziell gestalteten Überfällen (treppenförmig, schanzenförmig) realisiert werden. An einem Überfallrückfen mit sprungschanzenförmigen Einbau

entsteht ein Freistrah, der in die Luft sprüht und nach Aufprall an der Sohle seine Energie dissipiert hat (siehe Foto unten links). Überschüssige Energie lässt sich an folgenden Orten lokalisieren:

- an Querschnittseinschnürungen, z.B. Wehre, Schütze
- in Schussrinnen / steilen Gefällen
- bei Veränderung der Abflusstiefe durch Einbauten



überkritischer Abfluss am Überfallwehr mit anschließender Energiedissipation im Tosbecken  
 $h_0$  Überfallhöhe,  $v_u$  Fließgeschwindigkeit Oberwasser,  $W$  Wehrhöhe,  $E$  spezifische Energiehöhe,  $Q$  Abfluss,  $h_1$  kleinste Abflusstiefe,  $h_2$  Abflusstiefe nach Wechselsprung,  $h_d$  Abflusstiefe Unterwasser,  $L_1$  Länge Wehrkörper,  $L_2$  Länge Tosbecken,  $\Delta E$  dissipierte Energie (Energiehöhenverlust); gestrichelte Linie Energielinie



HM 162 mit rundkronigem Wehr HM 162.32 und Schwellen aus HM 162.35



rundkroniges Wehr HM 162.32

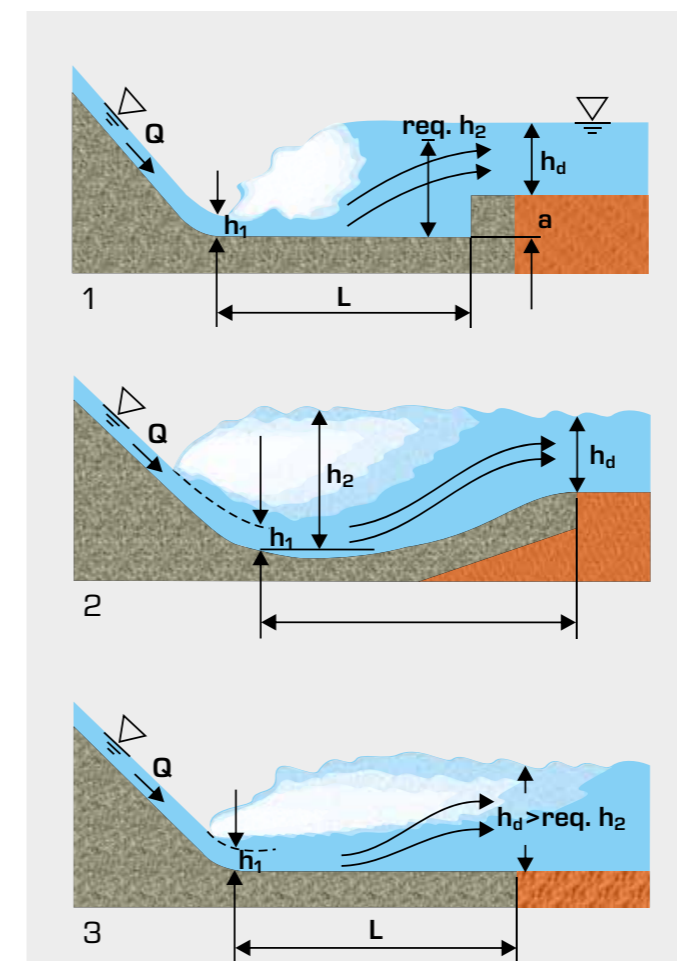
**Tosbecken haben folgende Funktionen:**

- Stabilisierung des Wechselsprungs an einem definierten Ort (je nach Abflusstiefe  $h$  bzw. Rückstaubedingungen im Unterwasser kann die Position des Wechselsprungs sonst variieren)
- zusätzlich zum Wechselsprung weitere Energiedissipation durch Bauelemente, z.B. Prallblöcke, Schwellen
- Schutz der Gerinnesohle gegen Erosion und Kolkbildung (trichter- oder kesselförmige Vertiefung in der Gerinnesohle)
- Umwandlung überschüssiger Energie des Wassers (kinetisch und potentiell) in Wärme- und Schallenergie; eine gute Energieumwandlung findet bei Froudezahlen zwischen 4 und 8 statt.

Wichtig ist, dass der Wechselsprung nicht aus dem Tosbecken ins Unterwasser wandert und dort ggf. Kolk verursacht. Dazu wird ein leichter Rückstau empfohlen. Ein Maß für den Rückstau des Tosbeckens ist der sogenannte **Einstaugrad**. Der Einstaugrad ist das Verhältnis aus tatsächlich vorhandener Abflusstiefe  $h$  zu theoretisch erforderlicher Abflusstiefe **req. h** („required“).

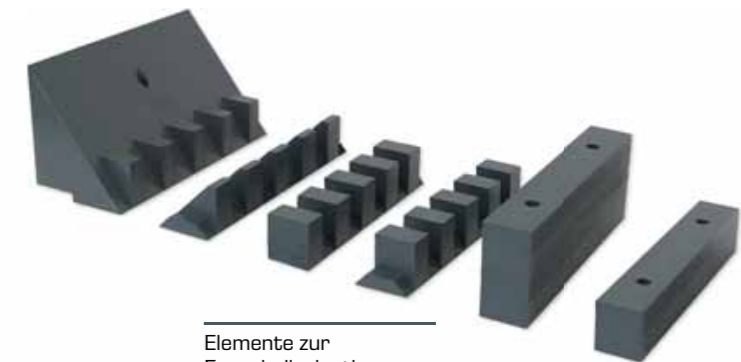
Das Tosbecken kann durch verschiedene Maßnahmen effizienter gestaltet werden. Es ist möglich, den Fließquerschnitt zu erweitern oder sogenannte Strahlteiler einzusetzen.

In GUNT-Versuchsrinnen können Strahlteiler und Schwellen am Boden des Tosbeckens eingebaut werden. Diese Elemente zur Energiedissipation unterstützen die Energieumwandlung und dissipieren so die überschüssige Energie schneller.



**Bauformen von Tosbecken**

- 1 vertieft, 2 muldenförmig vertieft, 3 ohne Vertiefung;
- a positive Stufe,  $Q$  Abfluss,  $L$  Länge des Tosbeckens,
- $h_1$  Abflusstiefe zu Beginn des Tosbeckens,
- $h_2$  konjugierte Tiefe im Wechselsprung,
- $h_d$  Abflusstiefe im Unterwasser,
- req.  $h_2$**  theoretisch erforderliche Abflusstiefe



Elemente zur Energiedissipation HM 162.35



## Basiswissen

## Gerinneströmung

## Kontrollbauwerke

Kontrollbauwerke sind übliche Elemente in Gerinnen und haben folgende Aufgaben:

- Anhebung des Wasserspiegels, z.B. für eine ausreichende Fahrwassertiefe für Schiffe, Wasserkraftnutzung, Erosionsschutz durch kleinere Fließgeschwindigkeit
- Regelung des Abflusses
- Messung des Abflusses

Typische Kontrollbauwerke sind **Wehre** oder **Schütze**. Sie unterscheiden sich dadurch, ob sie überströmt (**Wehr**) oder unterströmt (**Schütz**) werden. Es gibt **fest**e oder **bewegliche** Kontrollbauwerke. **Schütze** sind meistens beweglich, sie können den Wasserspiegel und Abfluss regeln. Mögliche Bewegungen sind: hebbar, versenkbar, drehbar, umlegbar, rollend oder Kombinationen der genannten Bewegungen. **Wehre** können als festes Wehr oder als bewegliches Wehr ausgeführt sein. Feste Wehre können den Wasserspiegel nicht regeln, bieten dafür als Vorteil, dass sie keine störanfälligen und wartungsintensiven beweglichen Teile enthalten. Eine Sonderform des festen Wehrs ist das Heberwehr (siehe S. 92).

Im Bereich des Kontrollbauwerks tritt ein Fließwechsel von unterkritischem zu überkritischem Abfluss auf.

Reale Kontrollbauwerke bestehen aus folgenden Komponenten:

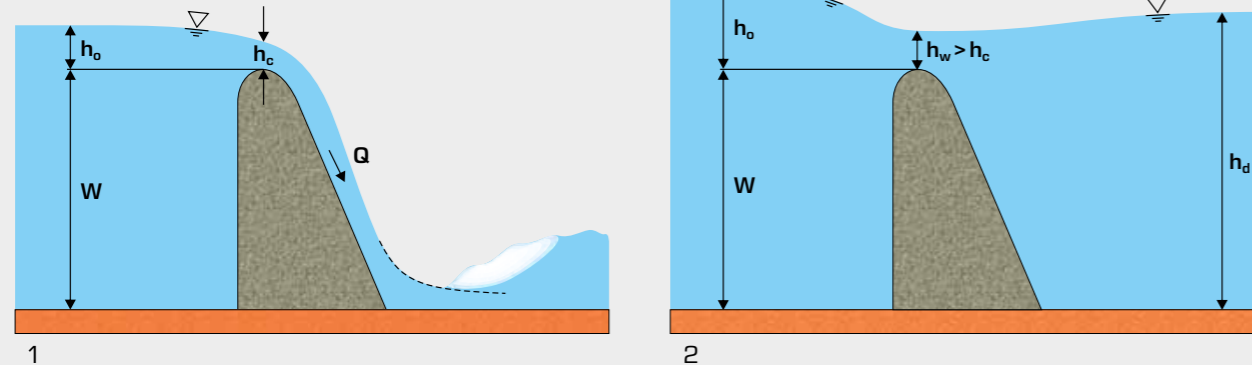
- Staukörper (erzeugt Anhebung des Wasserspiegels); kann fest, beweglich oder eine Kombination aus beiden sein
- Tosbecken: Energiedissipation des Abflusses
- Sohlenbefestigung in Ober- und Unterwasser, Anschlussbauwerke (Wehrwangen)
- Bauten für die ökologische Durchgängigkeit

## Überfallbedingungen am Wehr

Am Wehr können zwei **Überfallbedingungen** vorliegen. Im Fall des **vollkommenen Überfalls** bleibt das Oberwasser unbeeinflusst vom Unterwasser. An der Wehrkrone herrscht Grenzabfluss. Die Wehrkrone ist oberhalb des Unterwasserspiegels. Das Wehr wird als **Überfallwehr** bezeichnet.

Beim **unvollkommenen Überfall** wird das Oberwasser vom Unterwasser beeinflusst. Das Wehr wirkt wie ein sogenanntes **Grundwehr** und ist in vielen Fällen vollständig unter Wasser.

Wehre entkoppeln bei **vollkommenem Überfall** den Wasserspiegel im Oberwasser vom Wasserspiegel im Unterwasser. Sobald das Unterwasser die Wehrkrone so weit einstaut, dass über ihr die Grenztiefe überschritten wird, liegt **unvollkommener Überfall** vor.



1 vollkommener Überfall, 2 unvollkommener Überfall;  
W Wehrhöhe,  $h_o$  Überfallhöhe,  $h_c$  Grenztiefe, Q Abfluss,  $h_d$  Abflusstiefe Unterwasser,  $h_w$  Abflusstiefe auf Wehrkrone

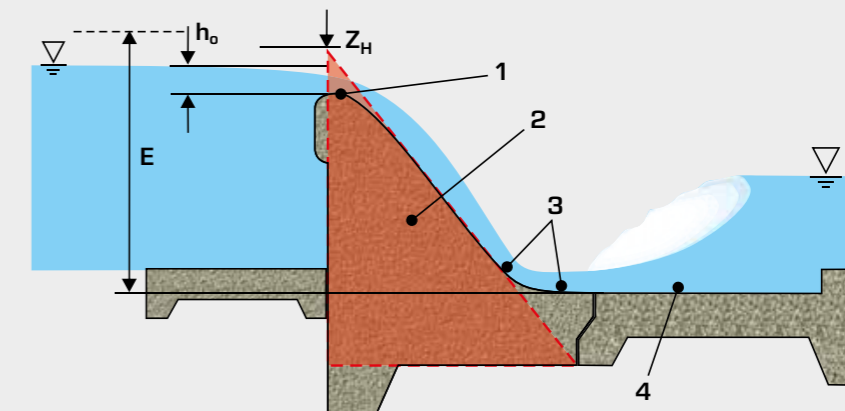
Man kann im Wesentlichen drei **Wehrtypen** unterscheiden:

- **scharfkantig**
- **rundkronig** / ausgerundet (Überfallwehr)
- **breitkronig**

Scharfkantige Wehre werden bevorzugt als Messwehr eingesetzt, rundkronige Wehre findet man oft als Stauwehr und Hochwasserüberfall und breitkronige Wehre dienen oft als Sohlschwelle und überströmtes Bauwerk.

In den GUNT-Versuchsrinnen werden diese drei Wehrtypen behandelt.

## Kontrollbauwerke: Strömung über feste Wehre



vereinfachtes Kontrollbauwerk:  
rundkroniges Wehr mit Tosbecken

1 Wehrkrone, 2 Wehrkörper, 3 Ausrundung, 4 Tosbecken;  $Z_H$  höchstes Stauziel,  $h_o$  Überfallhöhe, E spezifische Energiehöhe;  
■ Grunddreieck des Wehrs als Hilfsmittel zur Auslegung

Feste Wehre werden oft zum Aufstauen eines Flusses eingesetzt. Das Wehr selbst besteht aus einem massiven Staukörper. Das angreifende Moment des Wasserdrucks wird von der Gewichtskraft der Staumauer kompensiert. Aus diesem Grund werden Wehre normalerweise so konstruiert, dass die äußeren Umrisse ungefähr einem Dreieck entsprechen. Der Wehrrücken kann strömungsgünstig gestaltet werden, um einen möglichst großen Abfluss Q zu erreichen. Ein hydraulisch günstiges Abflussprofil ist das sogenannte **WES-Profil**, das an der **Waterways Experimental Station** in Vicksburg, MS, USA, von der US Army

entwickelt wurde. Bei der Gestaltung des WES-Profiles wird nicht vom sogenannten Bemessungsabfluss ausgegangen. In der Regel werden kleinere Abflüsse als der Bemessungsabfluss über das Wehr abgeführt. Das Wehr wird also für einen etwas kleineren Abfluss optimiert. Für Abflüsse, die kleiner oder gleich dem „Entwurfsabfluss“ sind, bleibt das Abflussprofil stabil, Strahlablösungen werden verhindert. Im Falle des Bemessungsabflusses entstehen am Wehrrücken geringe Unterdrücke, die noch keine Gefahr für das Wehr bedeuten.

## Basiswissen

## Gerinneströmung

## Kontrollbauwerke: Überfallarten am Wehr

Es gibt zwei Arten des Überfalls: der sogenannte **scharfkantige Überfall** und der **hydrodynamische Überfall**. Bei beiden Arten des Überfalls kann die Überfallbedingung vollkommen oder unvollkommen vorliegen.

Beim **scharfkantigen Überfall** ist es wichtig, dass der Überfallstrahl belüftet wird, damit er frei fällt. Ohne Belüftung kann es zu Störungen und dadurch zu vermindertem Abfluss kommen.

Beim **hydrodynamischen Überfall** am festen Wehr ist es wichtig, dass Strahlablösungen (verminderter Abfluss) und zu große Unterdrücke (Gefahr von Kavitation) vermieden werden.



scharfkantiger Überfall am Messwehr

## Kontrollbauwerke: Abflussberechnung am Wehr

Die Abflussberechnung spielt bei der Strömung über Kontrollbauwerke eine große Rolle. Zur Abflussberechnung wird die **Poleni-Gleichung** verwendet. Für ein Wehr mit vollkommenem Überfall gilt:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b h_o \sqrt{2gh_o}$$

$\mu$  ist ein Faktor, der die Wehrgeometrie berücksichtigt (siehe Tabelle),  $b$  ist die überstrichene Breite des Wehrs,  $h_o$  die sogenannte Überfallhöhe.

Im Fall des unvollkommenen Überfalls wird die Gleichung mit einem Abminderungsfaktor ergänzt, der geeigneten Diagrammen entnommen wird.

Aus der Bernoulli-Gleichung ergibt sich, dass man die spezifische Energiehöhe  $E$  aus der kinetischen Energie (Anströmgeschwindigkeit  $v_u$ ) und der Abflusstiefe  $h_u$  im Oberwasser berechnen kann. In vielen Fällen ist  $v_u$  relativ klein und wird vernachlässigt.

In den GUNT-Versuchsrinnen werden Modelle untersucht, die normal, also senkrecht zur Strömungsrichtung, angeströmt werden. Die betrachteten Wehre gehören alle zur Gruppe der festen Wehre.

In der Praxis gibt es auch sogenannte Streichwehre, die zur Hochwasserentlastung eingesetzt werden. Streichwehre werden parallel zur Strömungsrichtung eingebaut. Auch Streichwehre sind feste Wehre.

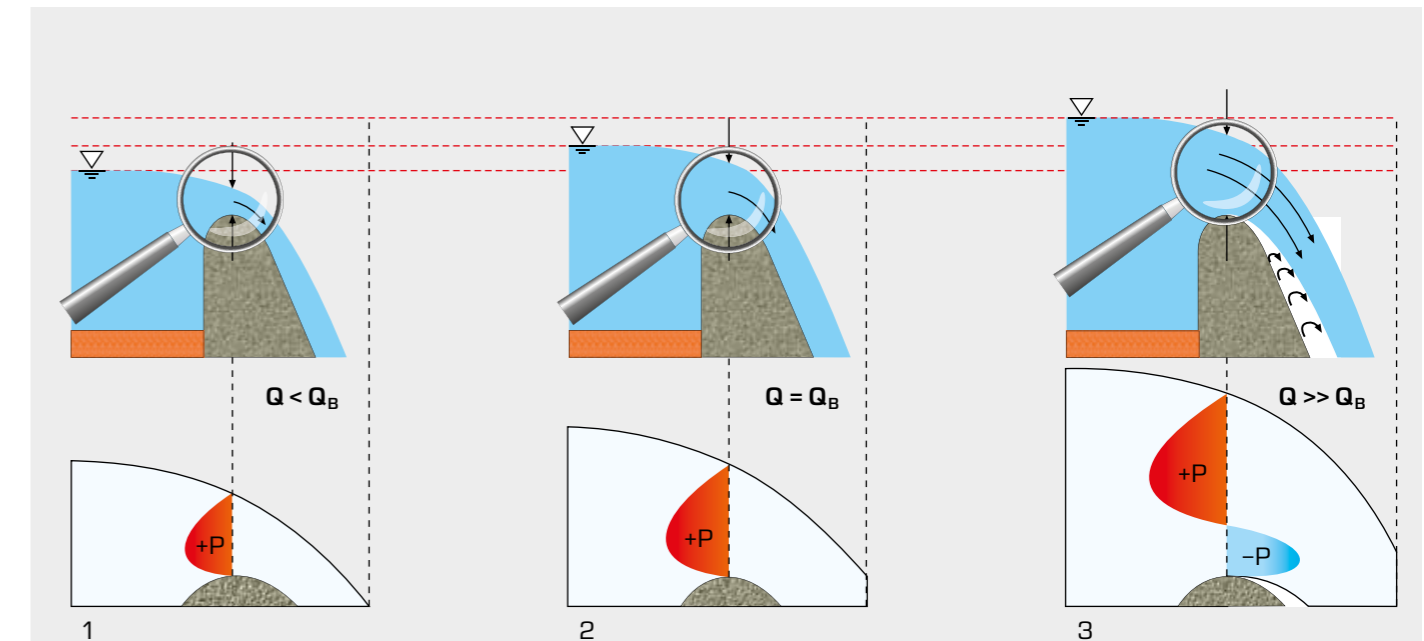
Überfallbeiwerte  $\mu$  für Wehre mit unterschiedlich geformten Kronen

Ausbildung der Wehrkrone	$\mu$
breit, scharfkantig, waagrecht	0,49...0,51
breit, gut abgerundete Kanten, waagrecht	0,50...0,55
breit, vollständig abgerundete Wehrkrone, erreicht durch umgelegte Stauklappe	0,65...0,73
scharfkantig, Überfallstrahl belüftet	$\approx 0,64$
rundkronig, lotrechte Oberwasser- und geneigte Unterwasserseite	0,73...0,75
dachförmig, abgerundete Wehrkrone	0,75...0,79

## Kontrollbauwerke: rundkronige Wehre

Die festen rundkronigen Wehre (engl. „Ogee weir“) werden bevorzugt als Stauwehr und Hochwasserüberfall verwendet. Normalerweise haben sie einen strömungsgünstigen Wehrrücken, z.B. mit dem WES-Profil.

Am rundkronigen Wehr HM162.34 von GUNT wird die Druckverteilung entlang des Wehrrückens gemessen und direkt auf einem 8-Rohrmanometer angezeigt.



hydrodynamischer Überfall am rundkronigen Wehr, Druckverteilung an der Wehrkrone bei unterschiedlichem Abfluss

1 Überfallstrahl liegt auf, 2 Wehrrücken entspricht ungefähr der Kontur des freien Überfallstrahls, 3 Überfallstrahl hebt gegebenenfalls ab;  $Q$  Abfluss,  $Q_B$  Bemessungsabfluss



Druckverteilung am rundkronigen Wehr HM162.34

Basiswissen  
Gerinneströmung

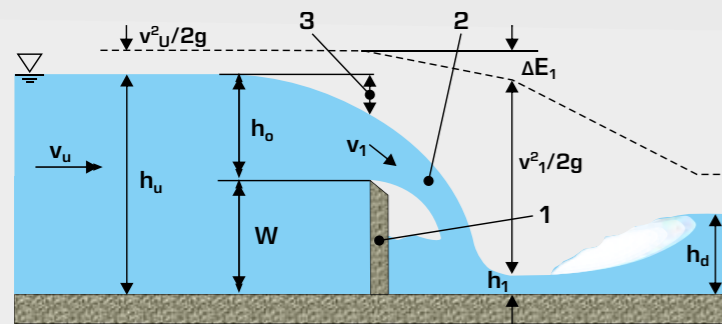
Kontrollbauwerke: scharfkantige Wehre

Auch beim scharfkantigen Wehr gibt es den vollkommenen und den unvollkommenen Überfall. Für den optimalen Abfluss am scharfkantigen Wehr ist es wichtig, dass der Überfallstrahl belüftet wird. Auf Ober- und Unterseite des belüfteten Überfallstrahls herrscht Umgebungsdruck.

Typische Größen sind die Wehrhöhe  $W$ , die Überfallhöhe  $h_o$  über der Wehrkrone im Oberwasser und die Abflusstiefe  $h_d$  im Unterwasser. Zusammen mit der Wehrbreite  $b$  gehen diese Größen in die Poleni-Gleichung (S. 88) zur Abflussberechnung ein. Einige Größen sind indirekt in Beiwerten bzw. Abminderungsfaktoren enthalten.

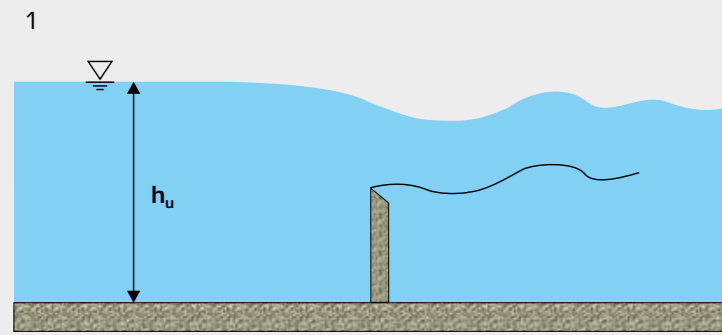
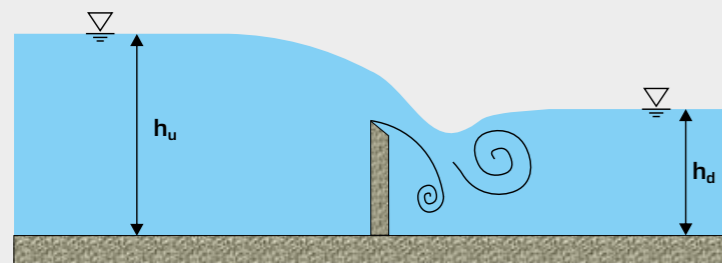


HM 162.30  
Satz Plattenwehre,  
vier Typen



vollkommener belüfteter Überfall am scharfkantigen Wehr

- 1 Wehr, 2 Überfallstrahl, 3 Absenkung;
- $v_u$  Geschwindigkeit im Oberwasser,
- $v_1$  Geschwindigkeit im Überfallstrahl,
- $h_d$  Abflusstiefe Unterwasser,
- $h_o$  Überfallhöhe,
- $h_u$  Abflusstiefe Oberwasser,
- $W$  Wehrhöhe



unvollkommener Überfall

- 1 am teilweise eingetauchten scharfkantigen Wehr,
- 2 am vollständig eingetauchten scharfkantigen Wehr (gewellter Abfluss)

Kontrollbauwerke: breitkronige Wehre

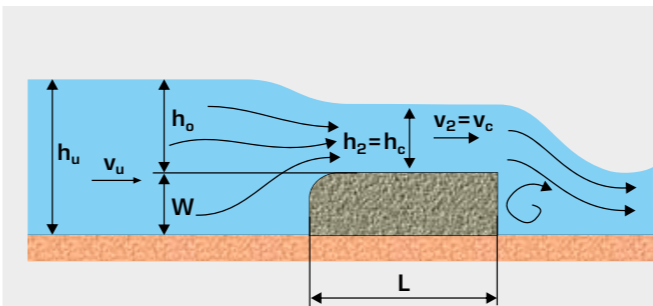
Breitkronige Wehre sind überströmte Bauwerke, die in Fließgewässern eingesetzt werden, in denen der Abfluss wenig schwankt und nur ein eher kleines Stauziel erwünscht ist. Außerdem können sie der Unterbau für ein bewegliches Kontrollbauwerk sein.

Breitkronige Wehre sind dadurch gekennzeichnet, dass auf der Wehrkrone ein kurzer Abschnitt von nahezu gleichförmigem Abfluss mit Grenztiefe auftritt (siehe Abbildung). In diesem Abschnitt liegt eine hydrostatische Druckverteilung vor, die Stromlinien verlaufen nahezu horizontal. Diese Bedingungen gelten, solange das Verhältnis der Überfallhöhe zur Wehrlänge  $h_o/L$  zwischen 0,08 und 0,5 liegt. Breitkronige Wehre mit diesen Abmessungen können auch als **Messwehr** genutzt werden.

Sobald  $h_o/L < 0,08$  gilt, können Reibungsverluste nicht mehr vernachlässigt werden, der Wehrkörper ist zu lang, um als Messwehr zu dienen. Bei  $h_o/L > 0,5$ , also bei kurzen Wehrkörpern, verlaufen die Stromlinien nicht horizontal, die Druckverteilung ist nicht hydrostatisch, so dass man nicht die in dieser Druckschrift vorgestellten Berechnungsansätze verwenden kann.

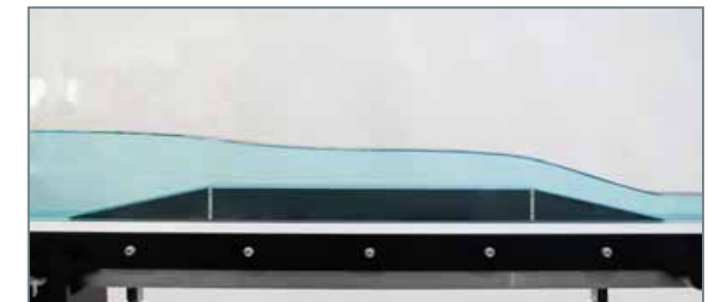
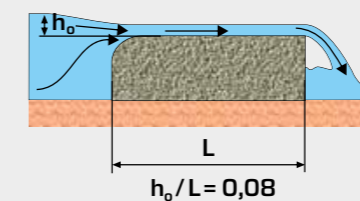
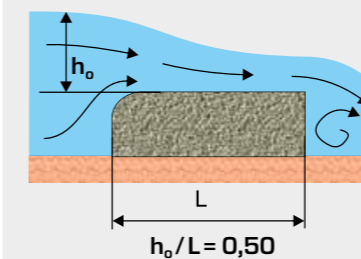
Aus ökologischen Gründen wird heute selten ein breitkroniges Wehr als Sohlschwelle in Flüssen eingesetzt. Stattdessen wird eine Sohlrampe gebaut, damit Fische und andere aquatische Lebewesen stromaufwärts schwimmen können.

GUNT-Versuchsrinnen ermöglichen die Untersuchung verschiedener breitkroniger Wehre und der jeweiligen Abflüsse  $Q$ .



breitkroniges Wehr

- $v_u$  Fließgeschwindigkeit Oberwasser,
- $h_u$  Abflusstiefe Oberwasser,
- $W$  Wehrhöhe,
- $h_c$  Grenztiefe,
- $L$  Wehrlänge;
- Pfeile zeigen Stromlinien



Sohlschwelle HM 162.44



keilförmiges Wehr HM 162.33



breitkroniges Wehr HM 162.31

Basiswissen  
Gerinneströmung



Kontrollbauwerke: Heberwehr

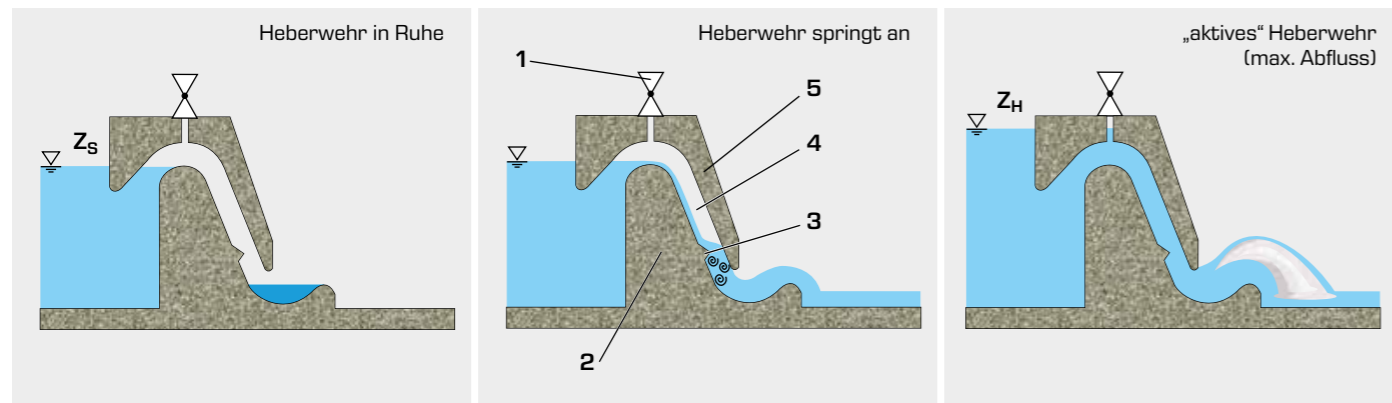
Das Heberwehr zählt zu den festen Wehren. In den Abbildungen ist das hydraulische Prinzip des Hebers dargestellt, wie er z.B. als Hochwasserüberfall verwendet wird.

Sobald der Wasserspiegel des Stausees knapp über die Wehrkrone des Staukörpers steigt, springt der Heber an, es kommt kurzzeitig zum freien Überfall. Bei leicht steigendem Wasserspiegel, also leicht steigendem Abfluss, wird der Wasserstrahl von der Anspringnase an die Heberdecke gelenkt. Dies führt zu einer Evakuierung im Heberschlauch, so dass es zum Druckabfluss im voll durchströmten Rohr kommt. Dieser Druckabfluss hat eine hohe Abflussleistung, die auch bei weiter steigendem Wasserspiegel kaum noch zunimmt.

Wenn der Wasserspiegel des Stausees wieder so weit fällt, dass er die Kante der Einlauflippe unterschreitet, wird Luft in den Heber gesaugt und der Heber belüftet. Dadurch reißt der Wasserstrom abrupt ab.

Durch eine zusätzliche Vorrichtung zur Belüftung kann der Abfluss jederzeit unterbrochen werden. GUNT-Heberwehre haben eine Belüftung, so dass die Funktion bzw. Abflussleistung des Heberwehrs mit und ohne Belüftung verglichen werden kann.

Heberwehre sind nur eingeschränkt einstellbar und können nicht überlastet werden. Sie wurden wegen ihrer hohen spezifischen Abflussleistung früher oft als Hochwasserentlastung bei Talsperren eingebaut.

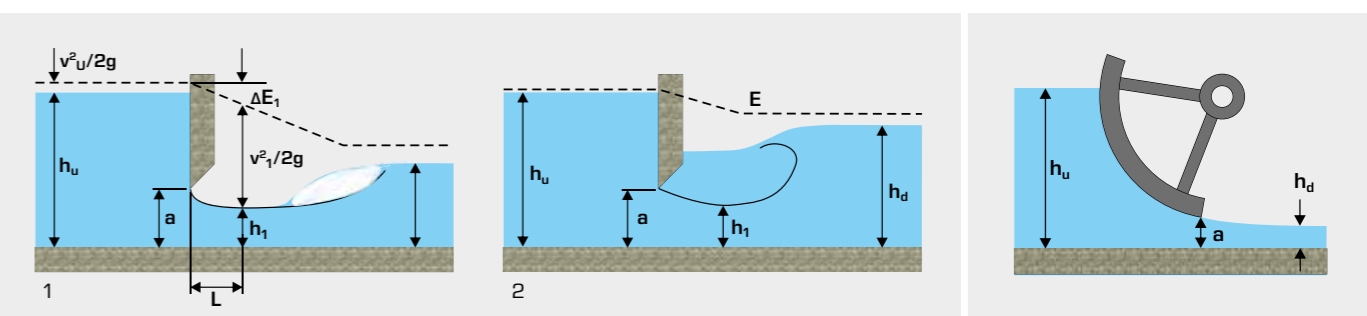


Prinzip eines Heberwehrs

1 bedienbare Belüftung, 2 Wehrkörper, 3 Anspringnase, 4 Heberschlauch, 5 Heberdecke;  $Z_s$  Stauziel,  $Z_H$  höchstes Stauziel



Kontrollbauwerke: Strömung unter Schützen



Ausfluss unter einem Planschütz

1 vollkommener Ausfluss, 2 unvollkommener Ausfluss;  $h_u$  Abflusstiefe Oberwasser,  $a$  Schützöffnung,  $h_d$  Abflusstiefe Unterwasser,  $h_1$  minimale Abflusstiefe,  $L$  Position der minimalen Abflusstiefe,  $E$  spezifische Energiehöhe,  $\Delta E$  Energiehöhenverlust

Ausfluss unter Segmentschütz, als Druckschütz ausgeführt

$h_u$  Abflusstiefe Oberwasser,  $a$  Schützöffnung,  $h_d$  Abflusstiefe Unterwasser

Für Schütze gibt es, analog zu überströmten Wehren, **vollkommenen** und **unvollkommenen Ausfluss**. Beim Ausfluss kommt es zur Strahlkontraktion, die „Vena Contracta“ genannt wird (minimale Abflusstiefe  $h_1$ ). **Vollkommener Ausfluss** herrscht, solange der Ausfluss ungestört unter dem Schütz strömt und kein Rückstau des Unterwassers am Schütz auftritt. Bei vollkommenem Ausfluss herrscht direkt nach dem Schütz überkritischer Ausfluss.

In Analogie zur Strömung über Wehre berechnet sich der vollkommene Ausfluss  $Q$  aus der Bernoulli-Gleichung, Impulssatz und Kontinuitätsgleichung zu

$$Q = \mu b a \sqrt{2gh_u}$$

mit  $\mu$  = Ausflusskoeffizient,  $b$  = Schützbreite,  $a$  = Schützöffnung.

Schütze sind bewegliche Kontrollbauwerke, d.h., die Schützöffnung  $a$  und damit der Ausfluss  $Q$  wird verändert und dem tatsächlichen Bedarf angepasst. In der Praxis gibt es deshalb Kennfelder, aus denen der Ausfluss  $Q$  abgelesen wird (Abflusstiefen Oberwasser und Unterwasser  $h_u$  und  $h_d$  und Schützöffnung  $a$  sind gegeben).

Ein in der Praxis sehr häufig verwendetes Schütz ist das kreisförmige Segmentschütz zur Abflusskontrolle. Es kann als Druck- oder Zugschütz ausgeführt sein und ist um einen Lagerpunkt drehbar. Das Segmentschütz wird oft auf der Wehrkrone eines Kontrollbauwerks aufgesetzt. Gerade das Segmentschütz wird nicht nur unterströmt, sondern kann auch überströmt in ein Gerinne eingebaut werden (Radialwehr).

GUNT-Versuchsrinnen ermöglichen den Einbau und die Untersuchung von einem ebenen Planschütz und einem Segmentschütz.



Planschütz HM 162.29



Segmentschütz HM 162.40

# Basiswissen Gerinneströmung

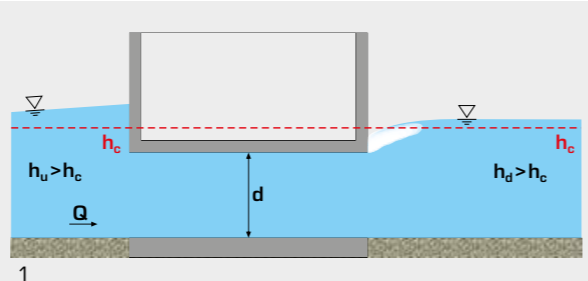
## Durchlass

Durchlässe gehören zu den Kreuzungsbauwerken in Fließgewässern und ermöglichen den Durchtritt von Wasser. Dabei kann es sich um ein Rohr handeln, das unter einer Straße durchführt und so dem Gerinne die Querung ermöglicht.

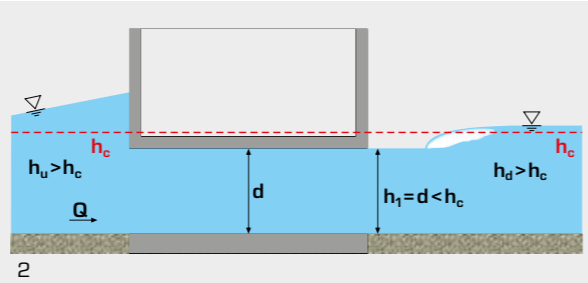
Der Durchlass kann, je nach auftretendem Abfluss, teilgefüllt oder voll durchströmt sein. Der teilgefüllte Durchlass mit freier Oberfläche wird wie ein Gerinne behandelt. Der voll durchströmte Durchlass und der Durchlass, bei dem der Einlass vollständig unter Wasser ist, zählen dagegen zu den Kontrollbauwerken. Hier kommt es zur Begrenzung des Abflusses. Es kann auch zur Kombination beider Zustände kommen, so dass der Durchlass teilweise voll durchströmt und teilweise teilgefüllt wird.

Aus verschiedenen Gründen sind Durchlässe hydraulisch nicht günstig: sie verursachen Fließverluste, sind anfällig für „Verstopfungen“ (Müll, Sediment), können Kolk an Ein- und Auslass verursachen und sind im Fall von Hochwasser oft zu klein dimensioniert. Außerdem sind sie ggf. für aquatische Lebewesen schlecht zu überwinden. Brücken sind aus hydraulischer Sicht die bessere Alternative, die allerdings viel teurer ist.

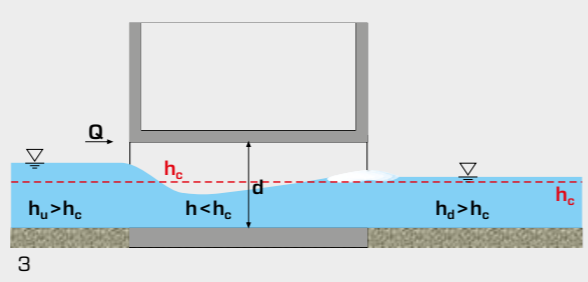
**Abflussart 1**  
voll durchströmter Durchlass, vor und hinter Durchlass  $Fr < 1$ ;  
 $h_u$  Abflusstiefe Oberwasser,  
 $h_c$  Grenztiefe,  
 $Q$  Abfluss,  
 $d$  Durchmesser Durchlass,  
 $h_d$  Abflusstiefe Unterwasser



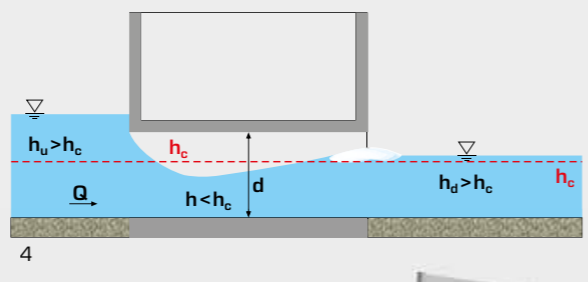
**Abflussart 2**  
voll durchströmter Durchlass, vor Durchlass  $Fr < 1$ , unmittelbar hinter Durchlass  $Fr > 1$



**Abflussart 3**  
teilgefüllter Durchlass, hier mit Fließwechsel im Eintritt und nach Durchlass; auch möglich: durchgehender Abfluss mit  $Fr < 1$  oder  $Fr > 1$



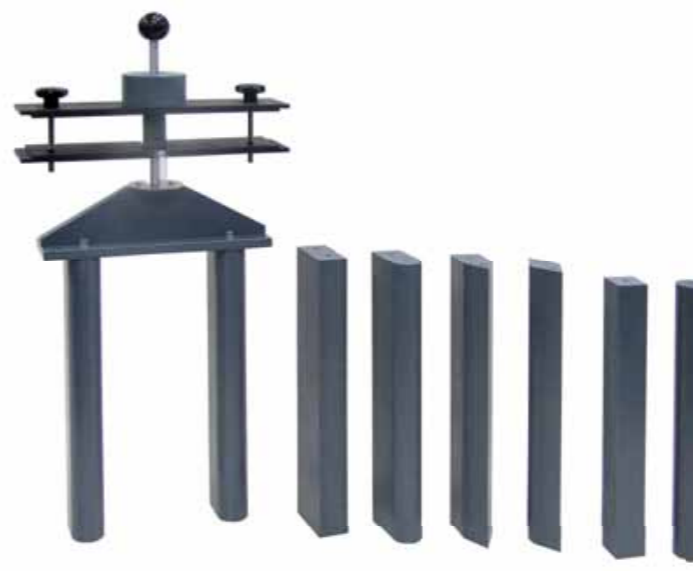
**Abflussart 4**  
eingestauter Durchlass mit Abflusskontrolle; Fließwechsel auch im Durchlass möglich, so dass Durchlass teilweise voll läuft



Durchlass  
HM162.45

## Örtliche Verluste in Gerinnen

Örtliche Verluste entstehen bei Querschnittsänderungen (Einingung, Sohlschwellen, Messgerinnen), Richtungsänderungen und Einbauten. Einbauten in Gerinne sind z.B. Pfeiler für Brücken bzw. Wehre. Die Pfeiler engen den Fließquerschnitt ein. Dadurch kann es zum Aufstau kommen.



Satz Pfeiler HM162.46

Hydraulisch gesehen gibt es vier Grundfälle für Pfeiler, bei denen zur Einstufung das Abflussverhalten ohne Einbauten, also Normalabfluss, betrachtet wird. Die vier Grundfälle sind:

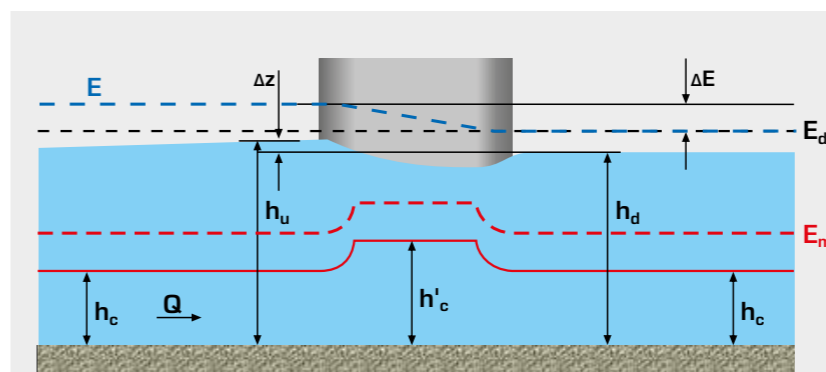
- unterkritischer Abfluss mit geringer oder erheblicher Querschnittseiningung
- überkritischer Abfluss mit geringer oder erheblicher Querschnittseiningung.

Ein nicht vernachlässigbarer Aufstau und möglicherweise ein Fließwechsel vor dem Pfeiler entsteht, wenn die spezifische Energiehöhe  $E$  des ungestörten Abflusses  $Q$  kleiner als die mindestens erforderliche spezifische Energiehöhe  $E_{min}$  ist, die den vollständigen Abfluss  $Q$  gewährleistet. Bei geringer werdender Durchflussbreite  $b_{rest}$  des Gerinnes durch die Einbauten steigt  $E_{min}$  (siehe Abbildungen).

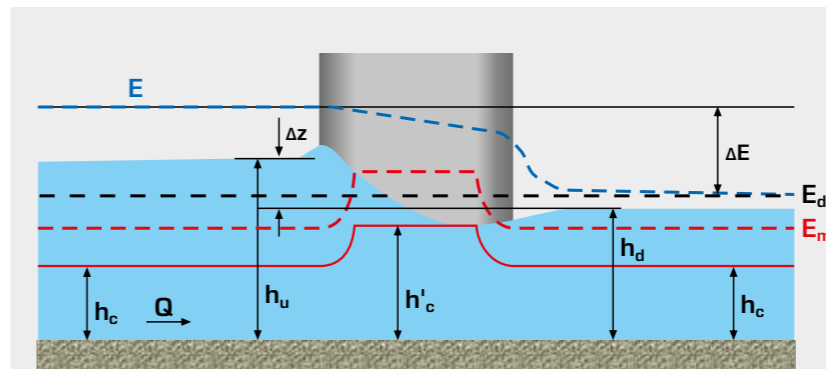
Für Rechteckgerinne mit breitem Querschnitt gilt

$$E_{min} = 1,5^3 \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2_{rest}}}$$

Pfeiler mit rechteckigem Profil, mit abgerundetem Profil und spitz zulaufendem Profil werden in GUNT-Versuchsrinnen untersucht.



Abfluss am abgerundeten Pfeiler ohne Fließwechsel  
 $E$  spezifische Energiehöhe mit Pfeiler,  
 $Q$  Abfluss,  
 $E_d$  ungestörte spezifische Energiehöhe,  
 $E_{min}$  minimal erforderliche spezifische Energiehöhe,  
 $h_d$  Abflusstiefe Unterwasser (Normalabfluss),  
 $h_u$  Abflusstiefe Oberwasser mit Pfeiler,  
 $h_c$  ungestörte Grenztiefe,  
 $h'_c$  Grenztiefe mit Pfeiler,  
 $\Delta z$  Pfeilerstau,  
 $\Delta E$  Energiehöhenverlust



Abfluss am abgerundeten Pfeiler mit Fließwechsel

# Basiswissen Gerinneströmung

## Verfahren zur Abflussmessung

Die beiden häufigsten Verfahren, den Abfluss eines offenen Gerinnes zu bestimmen, sind **Messgerinne** und **Messwehre**. Bei beiden Verfahren gibt es eine feste Abhängigkeit zwischen Abflusstiefe  $h$  und Abfluss  $Q$ .

### Messgerinne

**Venturikanäle** als Messgerinne sind speziell geformte Kanäle mit definierter seitlicher Verengung, zum Teil auch mit profiliertem Boden. Die Verengung staut den Abfluss  $Q$ . Die Stauung stellt sicher, dass in den Kanal unterkritischer Abfluss eintritt. In der Verengung erfolgt die Beschleunigung inkl. Fließwechsel vom unterkritischen zum überkritischen Abfluss. Am engsten Querschnitt herrscht kritischer Abfluss. In der Erweiterung des Venturikanals kommt es zum Wechselsprung. Der Abfluss  $Q$  wird aus der Abflusstiefe  $h_u$  im Oberwasser berechnet.

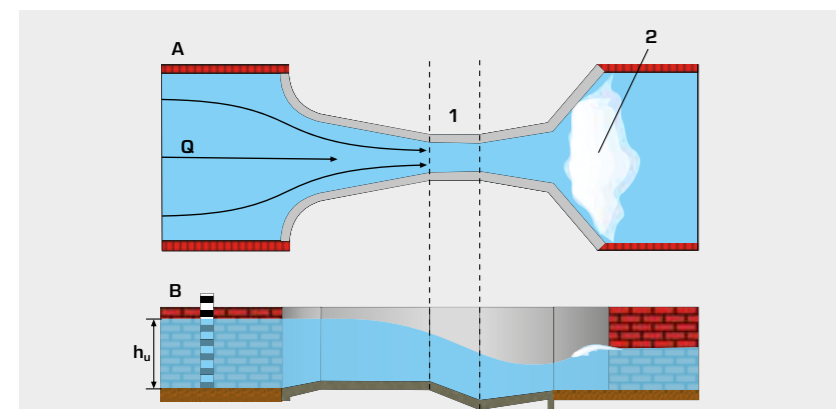
Die GUNT-Venturikanäle haben einen ebenen Boden.

Damit die Messung im Venturikanal nicht verfälscht wird, muss vollkommener Abfluss herrschen, die Abflusstiefe  $h_u$  im Oberwasser darf nicht durch das Unterwasser beeinflusst werden.



Parshallkanal  
HM 162.55

**Parshallkanäle** sind Venturikanäle mit einem profilierten Boden. Die Verhältnisse von Verengung und Erweiterung sind definiert. Parshallkanäle sind als komplettes Bauteil inklusive einer Abflusskurve (Abfluss  $Q$  in Abhängigkeit der Abflusstiefe  $h_u$  im Oberwasser) im Handel erhältlich. In Nordamerika sind sie weit verbreitet.



A Draufsicht auf Venturi- oder Parshallkanal, B Seitenansicht Parshallkanal;  
1 engster Querschnitt, 2 Wechselsprung;  
 $h_u$  Abflusstiefe Oberwasser,  $Q$  Abfluss



Venturikanal  
HM 162.51



trapezoider Kanal HM 162.63

**Trapezoide Kanäle** zählen auch zu den Messgerinnen. Der Fließquerschnitt ist dreieckig oder trapezförmig mit glatten Wänden. Im Vergleich zu Parshallkanälen haben sie oft einen kleineren Druckhöhenverlust bei gleichem Abfluss und sind besser geeignet für kleine Abflüsse.

Messgerinne werden hauptsächlich in Kläranlagen eingesetzt, da sie gut geeignet für verschmutztes Wasser sind. Sie können problemlos gewartet werden.

### Messwehre

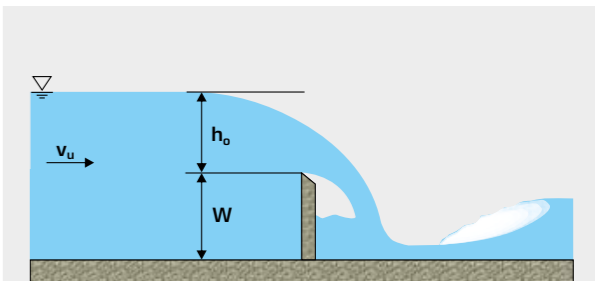
Messwehre sind normalerweise scharfkantige Wehre. Sie sind einfach aufgebaut, haben wenig Platzbedarf und erfordern geringen baulichen Aufwand.

Messwehre werden eingesetzt, um den Abfluss  $Q$  zu bestimmen. Die Mengenmessung erfolgt über die Erfassung der Überfallhöhe  $h_o$  vor dem Wehr. Zwischen Messpunkt und Wehr muss ein Mindestabstand von  $3h_o$  sein. Für die Umrechnung der Überfallhöhe  $h_o$  in den Abfluss  $Q$  gibt es Näherungsformeln, die die Geometrie des Messwehrs und den Überfallbeiwert nach Poleni berücksichtigen.

An Messwehren herrscht immer vollkommener Überfall.

Scharfkantige Wehre in Form von Plattenwehren gibt es mit unterschiedlichen Geometrien, z. B.:

- **Rechteckwehr nach Rehbock**  
Einsatz bei relativ gleichmäßigen Abflüssen über  $50\text{m}^3/\text{h}$ , allerdings eingeschränkte Genauigkeit im unteren Teil des Messbereichs. Beim Rechteckwehr muss die Belüftung sichergestellt sein.
- **Dreieckwehr nach Thomson**  
Einsatz bei schwankenden Abflüssen ( $0,75\text{...}240\text{m}^3/\text{h}$ ); gute Messgenauigkeit für kleinere Durchflüsse
- **Trapezwehr nach Cipoletti**  
Einsatz bei relativ gleichmäßigen Abflüssen über  $125\text{m}^3/\text{h}$



vollkommener belüfteter Überfall am scharfkantigen Wehr

$v_u$  Geschwindigkeit im Oberwasser,  
 $h_o$  Überfallhöhe,  
 $W$  Wehrhöhe



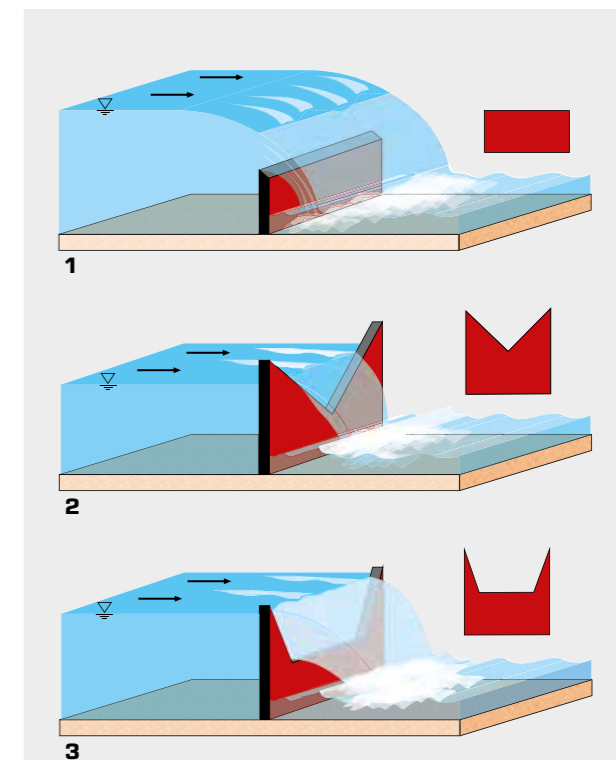
Dreieck-  
wehr nach  
Thomson

Rechteckwehr  
mit Kontraktion  
nach Rehbock

Trapezwehr  
nach Cipoletti

Rechteck-  
wehr

Satz Plattenwehre HM 162.30



Überströmung von typischen Messwehren in Seitenansicht

- 1 Rechteckwehr ohne Kontraktion,
- 2 Dreieckwehr nach Thomson,
- 3 Trapezwehr nach Cipoletti

## Basiswissen

## Gerinneströmung

## Instationäre Strömung: strömungsinduzierte Schwingungen

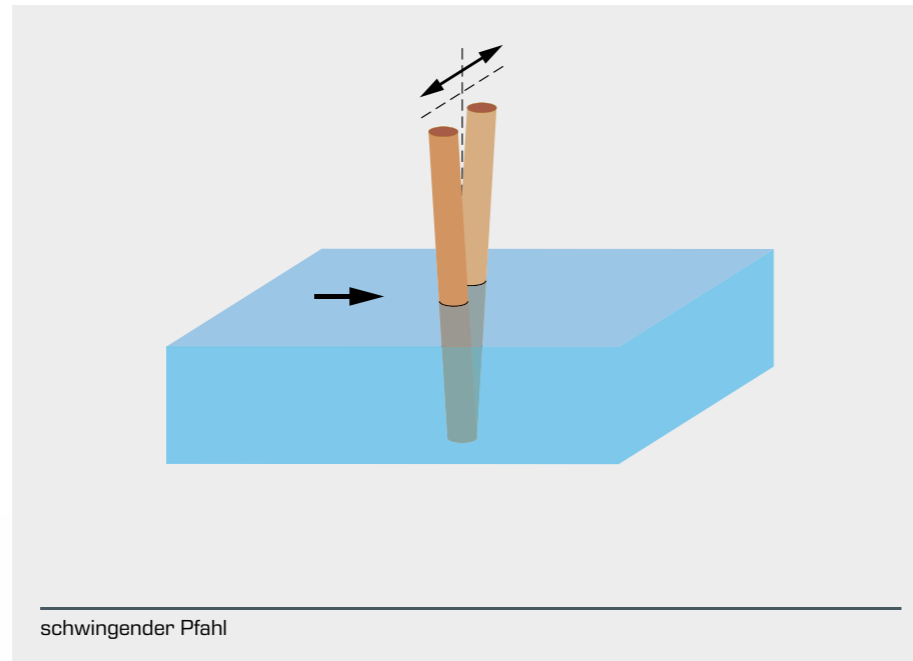
Steg- oder Bohrplattformen stehen in der Regel auf Pfählen im Wasser. Strömendes Wasser übt Kräfte auf den Teil der Pfähle aus, der sich unter Wasser befindet, und kann Schwingungen auslösen. Man unterscheidet dabei **wirbelinduzierte** und **strömungsinduzierte Schwingungen**. Es ist wichtig, sich mit diesen Kräften und den von ihnen verursachten Belastungen zu beschäftigen, da sie zum Bauteilversagen führen können.

Die Schwingungen entstehen durch die Interaktion zwischen bewegtem Fluid und Pfahl. Beispielsweise kann sich bei der Umströmung des Pfahls eine Karman'sche Wirbelstraße bilden. Die Ablösung dieser Wirbel verursacht eine Änderung der Strömungsrichtung. Im ungünstigsten Fall entspricht die Wirbelablösefrequenz der Eigenfrequenz des Pfahls.

Das GUNT-Modell „schwingende Pfähle“ HM162.61 ermöglicht die Beobachtung eines einzelnen schwingenden Pfahls. Außerdem gibt es zwei parallele Pfähle, die quer zur Strömungsrichtung stehen und durch die Strömung in Schwingung versetzt werden. Der Abstand der Pfähle kann variiert werden. Wenn der Abstand zu klein ist, kommt es zu Koppelschwingungen zwischen beiden Pfählen.



schwingende Pfähle HM162.61



schwingender Pfahl



## Sedimenttransport

In fast allen offenen Gerinnen gibt es zusätzlich zum strömenden Wasser auch **Sedimenttransport**, der das Fließverhalten beeinflusst. Sedimenttransport besteht aus **Schwebstofftransport** und **Geschiebetransport**. Schwebstoffe sind Feststoffe, die im Wasser suspendiert sind und keinen Kontakt zur Sohle haben. Geschiebe dagegen sind Feststoffe, die an der Sohle entlang bewegt werden. Für das

Abflussverhalten in offenen Gerinnen ist der Geschiebetransport die maßgebliche Komponente. Sediment, das sich abgelagert („Verlandung“) oder abtransportiert wird (Erosion bzw. Kolkbildung), kann z.B. den Fließquerschnitt oder die Spiegellinien verändern. Sedimenttransport führt auch zu einer veränderten Sohlenstruktur (Bildung von Rippeln oder Dünen, Änderung der Rauheit).

Im Fall von Normalabfluss kommt zu den bereits bekannten Gleichungen noch die Berücksichtigung des Transportgleichgewichts am Kontrollvolumen dazu – wird die gleiche Menge Sediment, die das Kontrollvolumen verlässt, auch wieder zugeführt?

In den GUNT-Versuchsrinnen wird der Sedimenttransport mit Sand demonstriert. Neben dem Sedimentfeeder am Eintritt der Versuchsrinne wird am Ende der Versuchsrinne eine Sedimentfalle eingebaut. Je nach Fließgeschwindigkeit können Rippel entstehen oder eine wandernde Düne beobachtet werden. Zusammen mit weiteren Modellen ist es möglich, die Verlandung vor einem Wehr oder die Kolkbildung am Tosbecken zu beobachten.

Grundsätzlich wird das Thema Sedimenttransport allerdings in mehreren eigenständigen Versuchsständen vertieft untersucht, z.B. mit HM140 oder HM168.



Sedimentfeeder HM162.73

Sedimentfalle HM162.72  
am Ablauf von HM162

Sedimentablagerung an Flussbuhnen

Verlandungen  
im Rhein

Basiswissen

# Gerinneströmung

## Instationäre Strömung: Wellen

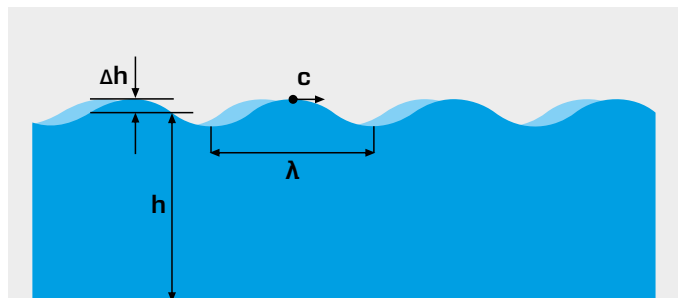
Die freie Oberfläche des Wassers wird durch Wind „verformt“ (Wellen). Es gibt eine Vielzahl von Wellen in der Natur (lange oder kurze Wellenlänge, brechend oder glatt etc.). Natürliche Wellen sind unregelmäßig, z.B. folgt eine flache auf eine hohe Welle (Amplitude). Abgesehen von winderzeugten Wellen gibt es Oberflächenwellen aufgrund einer Störung, Schwall- und Sunkwellen und Tsunamiwellen, die durch ein Anheben des Wassers, z.B. bei einem Erdbeben, entstehen.

Wellen transportieren Energie, aber keine Masse. Wenn eine Welle in flaches Wasser kommt, z.B. in Strandnähe, wird sie gebremst. Das Wellental wird stärker als der Wellenberg gebremst. Deshalb überholt der Wellenberg das Wellental, die Welle bricht.

Die Untersuchung der Entstehung und Wirkung von Wellen spielt in der Schifffahrt, im Küstenschutz und bei der Gestaltung von Offshore-Anlagen (Windparks, Bohrplattformen) eine große Rolle. Gerade im Küstenschutz geht es darum, die zerstörende Kraft von Wellen zu mindern und das Wegspülen von Sediment zu verringern.

Der GUNT-Wellenerzeuger erzeugt periodische, harmonische Wellen in den GUNT-Versuchsrinnen. Man kann z.B. die Wellenreflexion am Rinnenende beobachten. Zusammen mit den verschiedenen Strandsimulationen ist es möglich, das Verhalten gleicher Wellen auf unterschiedlichen Böden zu beobachten und zu vergleichen.

Der Auflauf an Pfeilern, die z.B. im Hafenbecken stehen oder zu einer Offshore-Anlage gehören, kann mit dem Zubehör Pfeiler HM162.46 beobachtet werden.



periodische Welle

$\Delta h$  Amplitude,  $h$  mittlere Tiefe,  
 $c$  Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle,  $\lambda$  Wellenlänge

Wellenperiode:  $T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{c}$

	Flachwasser	Tiefwasser
Wellenlänge	$\lambda/h > 20$	$\lambda/h < 2$
Wellengeschwindigkeit	$c = \sqrt{gh}$	$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$
Partikelpfad	linear	kreisförmig



Wellenerzeuger  
HM 162.41



Satz Strände HM 162.80 (glatter Strand,  
durchlässiger Strand und rauher Strand)