

# Wasserbau

Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen

Bearbeitet von  
Theodor Strobl, Franz Zunic

1. Auflage 2006. Buch. xvi, 604 S. Hardcover  
ISBN 978 3 540 22300 9  
Format (B x L): 15,5 x 23,5 cm  
Gewicht: 2300 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Bauingenieurwesen > Wasserbau](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

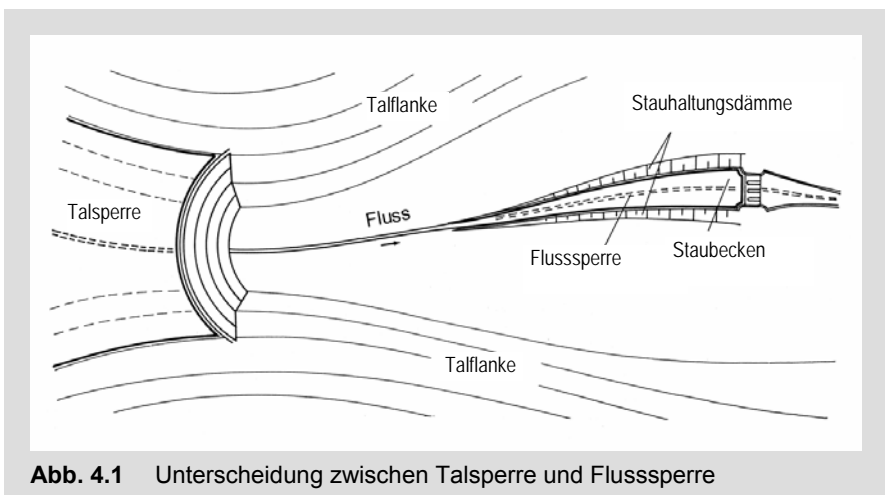
  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

## 4 Wehre

Wehre sind wasserbauliche Stauanlagen. Daher soll zunächst dieser Begriff erklärt werden. Stauanlagen sind Wasserbauwerke, mit deren Hilfe Bäche und Flüsse aufgestaut werden. Man unterscheidet zwischen Talsperren und Flusssperrern. Eine Talsperre riegelt den gesamten Talquerschnitt ab und der Fluss oder Bach wird bis zu den Talflanken hin aufgestaut. Die Flusssperrre dagegen erfasst nur den Bereich des Gewässers; parallel zum Fluss verlaufende künstliche Stauhaltungsdämme begrenzen den Aufstau seitlich im Tal und die Talflanken sind demnach nicht eingestaut (Abb. 4.1). Während Talsperren in der Regel über ein großes Beckenvolumen verfügen und damit in der Lage sind, einen hohen Anteil des Abflusses über einen langen Zeitraum zu speichern und nach Bedarf abzugeben, spielt bei Flusssperrern die Wasserspeicherung eine eher untergeordnete Rolle. Nur bei Anlagen mit größerem Stauvolumen kann durch Zwischenspeicherung der Abfluss zeitweise zurückgehalten werden, um das Wasser in Zeiten höheren Strombedarfs – z. B. in den Morgen- und Abendstunden – durch die Turbinen zu leiten (Schwellbetrieb).

In diesem Kapitel wird ausschließlich auf Flusssperrern und deren Regelungs-  
bauwerke, die Wehre, eingegangen. Talsperren (Staumauern und Staudämme)  
werden in Kapitel 5 „Talsperren“ ausführlich behandelt.



**Abb. 4.1** Unterscheidung zwischen Talsperre und Flusssperrre

Sonderformen von Stauanlagen sind Hochwasserrückhaltebecken zum Auffangen bzw. zur Dämpfung von Hochwasserabflüssen, Pumpspeicherbecken zur Speicherung von elektrischer Arbeit, Sedimentationsbecken zum Rückhalt absetzbarer Schwebstoffe und Geschiebesperren zum Rückhalt von Geschiebefrachten.

Die wichtigste Talsperren-Norm ist DIN 19700 „Stauanlagen“ (Juli 2004) mit den Teilen

- Teil 10 Gemeinsame Festlegungen
- Teil 11 Talsperren
- Teil 12 Hochwasserrückhaltebecken
- Teil 13 Staustufen
- Teil 14 Pumpspeicherbecken
- Teil 15 Sedimentationsbecken

Weitere wichtige Normen im Wasserbau sind:

- DIN 1054 Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau
- DIN 4048-1 Wasserbau – Begriffe – Stauanlagen
- DIN 19702 Standsicherheit von Massivbauwerken im Wasserbau
- DIN 19704-1 Stahlwasserbauten – Teil 1: Berechnungsgrundlagen
- DIN 19704-2 Stahlwasserbauten – Teil 2: Bauliche Durchbildung und Herstellung
- DIN 19702 Standsicherheit von Massivbauwerken im Wasserbau
- DIN 19712 Flussdeiche
- DIN 4084 Baugrund- und Geländebruchberechnungen
- DIN 18309 Einpressarbeiten

Zu beachten sind weiterhin die Veröffentlichungen und Regelwerke der nationalen und internationalen Verbände, z. B. der „Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.“ (DWA) und des „Deutschen Nationalen Komitees für Große Talsperren“ (DNK), welches Deutschland im „International Commission on Large Dams“ (ICOLD) vertritt. Hier sind fast alle im Talsperrenbau tätigen Länder der Welt zusammengeschlossen.

## 4.1 Flusssperren (Staustufen)

An einer Flusssperre wird der gewünschte Aufstau durch Wehrbauwerke bewirkt. Es entsteht eine Staustufe, die einen Stausee erzeugt. Dient die Staustufe auch der Erzeugung elektrischer Energie, wird neben dem Wehr eine Wasserkraftanlage errichtet. Als weitere Bauwerke kommen bei schiffbaren Flüssen Schleusen hinzu. Wehr, Wasserkraftwerk und Schleusen bilden das Absperrbauwerk und zusammen mit den Stauhaltungsdämmen die Flusssperre (Abb. 4.2).

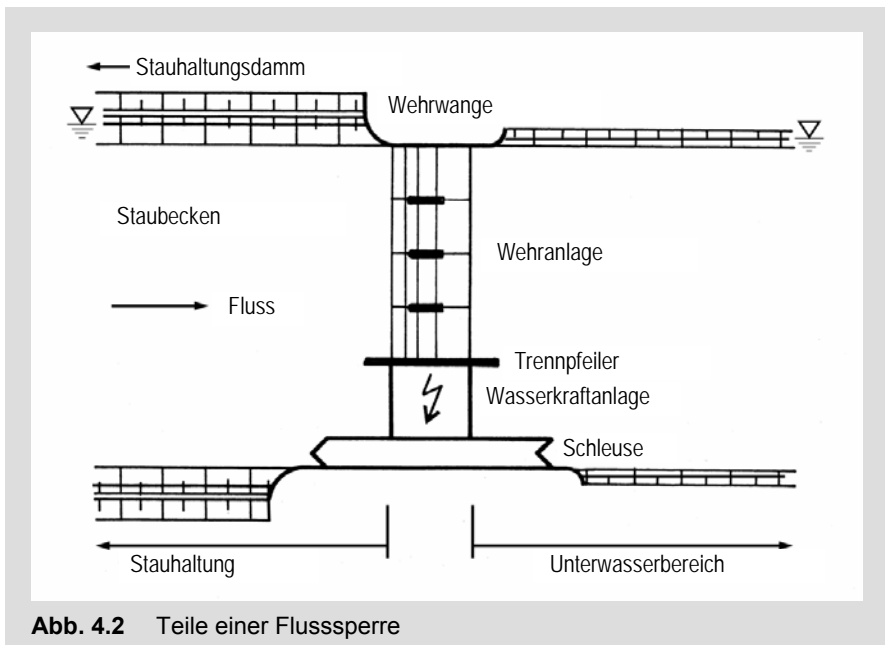


Abb. 4.2 Teile einer Flusssperre

### 4.1.1 Aufgaben von Flusssperren

Flusssperren erfüllen im Wesentlichen folgende Aufgaben:

- Aufstau nach Oberstrom für Ausleitungen (Bewässerung, Trinkwasserversorgung, Energieerzeugung und Schifffahrt),
- Erhöhung der Fahrwassertiefe für die Schifffahrt,
- Sohlstabilisierung durch Verringerung des Energieliniengefälles und damit der Schleppekraft der Strömung (Schutz des Flussbettes vor Eintiefung),

- Anhebung des Grundwasserstandes,
- Gewinnung von Fallhöhe zur Erzeugung elektrischer Energie,
- Vergleichmäßigung der Abflüsse bei Schwellbetrieb.

Die meisten Flusssperren erfüllen gleichzeitig mehrere dieser Aufgaben und sind daher sogenannte Mehrzweckanlagen.

### **Mögliche Auswirkungen eines Aufstaus**

Da eine wasserbauliche Maßnahme weitreichende Auswirkungen auf das Flusssystem hat, ist ein Gesamtkonzept für den jeweiligen Flussausbau notwendig. Hierbei sind insbesondere die nachfolgenden Einflüsse zu berücksichtigen:

- Veränderung der Geschiebefracht, d. h. Rückhalt im Staubecken und Eintiefungstendenzen im Unterwasser,
- Sedimentation von Schwebstoffen vor dem Wehr,
- Anhebung des Grundwasserspiegels im oberstromigen und Absenken im unterstromigen Bereich,
- Änderung der Wasserqualität wegen geringerer Fließgeschwindigkeit,
- Auswirkungen auf die standorttypische Lebensgemeinschaft des Gewässers.

Grundsätzlich gilt, dass die Veränderungen im Flusslauf um so geringer ausfallen, je niedriger der Aufstau ist. Wird die Fließgeschwindigkeit im Stauraum von  $u = 0,3$  m/s nicht unterschritten, geht man heute von einem ökologisch vertretbaren Aufstau aus.

### **4.1.2 Klassifizierung von Staustufen**

Abhängig von der Fallhöhe bei Mittelwasserabfluss (MQ) wird eine Staustufe in die Klassen I bis III eingeteilt (Tabelle 4.1). Unabhängig von der Fallhöhe wird Staustufen die Klasse I zugewiesen, wenn es sich um schiffbare Flüsse handelt oder wenn eine Gefährdung von Siedlungen im Falle eines Versagens der Staustufe besteht.

Entsprechend der Klassifizierung der Staustufen werden unterschiedliche Bemessungshochwasserzuflüsse festgelegt, nach denen Staustufen zu bemessen sind. In Tabelle 4.2 sind die jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeiten für den Hochwasserbemessungsfall 1 (BHQ<sub>1</sub>) und den Hochwasserbemessungsfall 2 (BHQ<sub>2</sub>) angegeben. Diese Fälle sind im Hinblick auf die Sicherheit

einer Stauanlage bei Hochwasser zu unterscheiden (vgl. DIN 19700 Teil 10 „Stauanlagen – Gemeinsame Festlegungen“). Hierbei dient der

- Hochwasserbemessungsfall 1 für die Bemessung der Hochwasserentlastungsanlage. Die Tragsicherheit, die Gebrauchstauglichkeit sowie die Dauerhaftigkeit der Stauanlage sind bis zum Bemessungshochwasserzufluss  $BHQ_1$  ohne Einschränkung sicherzustellen (n-1-Fall);
- Hochwasserbemessungsfall 2 dient dem Nachweis der Stauanlagensicherheit bei Extremhochwasser. Der Bemessungshochwasserzufluss  $BHQ_2$  ist deutlich größer als  $BHQ_1$ , besitzt jedoch eine geringere Auftretenswahrscheinlichkeit. Diesem Hochwasser muss die Stauanlage ohne globales Versagen standhalten. Die Tragsicherheit des Absperrbauwerkes (Wehr und Stauhaltungsdämme) darf auch bei diesem Zufluss nicht gefährdet sein. Im Gegensatz zu  $BHQ_1$  dürfen hier jedoch gegebenenfalls neben der Hochwasserentlastungsanlage auch Notentlastungen berücksichtigt werden (z. B. Kraftwerksdurchfluss, Schiffsschleusen, n-Fall).

**Tabelle 4.1** Klassifizierung von Staustufen (nach DIN 19700 Teil 13)

Klasse der Staustufe	Fallhöhe bei MQ
I	> 5,00 m
II	> 3,00 m bis ≤ 5,00 m
III	≤ 3,00 m

**Tabelle 4.2** Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeiten für  $BHQ_1$  und  $BHQ_2$  (nach DIN 19700 Teil 13)

Klasse der Staustufe	Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit	
	$BHQ_1$	$BHQ_2$
I	$10^{-2}$ (T = 100 a)	$10^{-3}$ (T = 1.000 a)
II	$2 \cdot 10^{-2}$ (T = 50 a)	$10^{-2}$ (T = 100 a)
III	$5 \cdot 10^{-2}$ (T = 20 a)	$2 \cdot 10^{-2}$ (T = 50 a)

### 4.1.3 Gestaltung und hydraulische Durchbildung

Die Gestaltung einer Wehranlage richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten (Topographie und Untergrund) und nach den Aufgaben, welche das Wehr zu erfüllen hat. Baubetriebliche Aspekte und Fragen der statischen und dynamischen Beanspruchung sind ebenfalls zu berücksichtigen. Bei schwierigen Anströmungsverhältnissen empfiehlt sich eine numerische zweidimensionale (2d-) Berechnung zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit bei Hochwasser. In Kombination mit der Optimierung der Energieumwandlung kann auch ein physikalischer Modellversuch wertvolle Hinweise für die Konstruktion geben. Der Modellversuch ermöglicht es, die Leistungsfähigkeit einzelner Wehrfelder bei unterschiedlichen Abflusssituationen zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können Eingang in die Betriebsvorschriften finden (siehe hierzu Kapitel 11 „Hydraulische Modelle“).

#### Gemeinsame Anforderungen an alle Wehrtypen

Wehre werden in drei Kategorien eingeteilt:

- feste Wehre (Abschnitt 4.2),
- bewegliche Wehre (Abschnitt 4.3),
- kombinierte Wehre (Abschnitt 4.4).

Bei allen Bauformen dürfen an den Massivbauteilen keine unzulässigen Verformungen und Rissbildungen auftreten. Setzungen dürfen nur an vorgesehenen Fugen auftreten. Bei beweglichen Wehren könnte eine unzulässige Verformung den Einbau der Stahlverschlüsse erschweren oder gar verhindern. Teure Ersatzkonstruktionen wären die Folge.

Die Wehröffnungen, Zwischenpfeiler und Trennpfeiler (zum Kraftwerk) sind strömungsgünstig auszubilden. Hierbei ist eine Behinderung der Strömung durch die Verschlüsse zu berücksichtigen. Bei Feststofftransport sind Wehrkrone, Tosbeckeneinbauten und die Endschwelle gegebenenfalls durch abriebsfesten Beton oder durch Stahlpanzerung zu schützen.

#### Umläufigkeit und Unterläufigkeit

Die Standsicherheit einer Wehranlage wird maßgeblich davon beeinflusst, ob die Staustufe dicht ist. Umläufigkeiten sind durch Dichtungsvorkehrungen an den Stauhaltungsdämmen zu reduzieren. Um Unterläufigkeit zu vermeiden und damit die Tragsicherheit zu erhöhen, werden Wehranlagen – wenn technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar – an den dichten Untergrund angeschlossen. Ist dieser zu weit entfernt, wird man einen Kompromiss wählen müssen zwischen Abdichtungswirkung und Wirtschaftlichkeit. Meist genügt eine Abdichtung bis in eine Tiefe, die etwa der Stauhöhe entspricht. Die Si-

cherheit gegen hydraulischen Grundbruch am Ende des Tosbeckens und die Auftriebssicherheit der Bauwerke muss gegeben sein.

Die Anschlüsse der Massivbauwerke an die Dämme und Dichtungen sind sorgfältig zu planen und auszuführen, um Erosion und Suffosion zu vermeiden.

#### 4.1.4 Anordnung der Bauwerke im Fluss

Kraftwerk, Wehr und Schleuse werden in der Regel nebeneinander quer zur Flussachse angeordnet. Bei der Lage der einzelnen Bauwerke ist ihre jeweilige Zweckbestimmung zu berücksichtigen. Das Wehrbauwerk dient neben der Regulierung des Wasserstandes im Staubecken vornehmlich der Hochwasserabfuhr. Es ist daher zwingend notwendig, das Wehr so zu positionieren, dass die Hochwasser möglichst ungestört – d. h. ohne größere Strömungsumlenkung – die geöffneten Wehrfelder passieren können (Abb. 4.3). Dies hat zur Folge, dass die Wehranlage im Bereich der Hauptströmung liegen soll. Ist der Fluss breit genug, so ist auch eine seitliche Anordnung möglich; allerdings liegt das Wehr auch dann im ursprünglichen Flussbett. Besteht eine Flusssperre aus Wehr und Kraftwerk, und ist die erforderliche Breite der Gesamtanlage größer als der ursprüngliche Fluss, so muss das Kraftwerk in einer neu geschaffenen Bucht untergebracht werden. Das Wehr verbleibt im Hauptstrom (Buchtenkraftwerk). Bei sehr breiten Flüssen kann ein Teil des Flussbettes mit Hilfe einer künstlichen Insel abgesperrt werden (Abb. 4.4). Die Möglichkeit der Absehung (Abb. 4.5) ist heute aus ökologischen Gründen unerwünscht (Frage des Restwassers in der Ausleitungsstrecke).

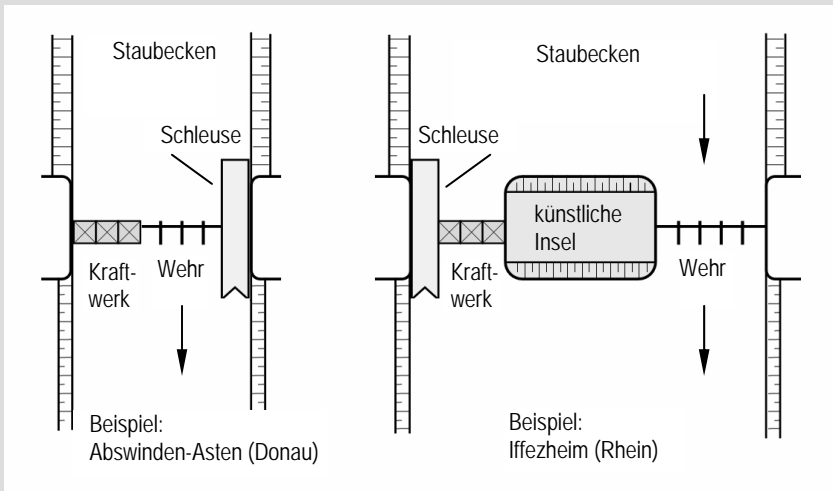
Die Wehranlage stellt das Hauptbauwerk einer Flusssperre dar. Das Wehr staut den Fluss auf und gibt den Fließquerschnitt bei Hochwasser wieder frei. Besteht das Sperrenbauwerk aus einem massiven Staukörper ohne bewegliche Teile, spricht man von einem festen Wehr. Wird der Aufstau überwiegend durch bewegliche Verschlussorgane erzeugt, handelt es sich um ein bewegliches Wehr. Eine Kombination aus einem festen Bauteil und beweglichen Verschlussteilen nennt man kombiniertes Wehr.

Ein Absturz ist eine Sonderform des Wehres. Bei diesem Bauwerk ragt die Wehrkrone nur geringfügig – bis zu 15 % der Wassertiefe – über die Flusssohle. Abstürze erzeugen daher keinen Aufstau, sondern stützen lediglich die Flusssohle.

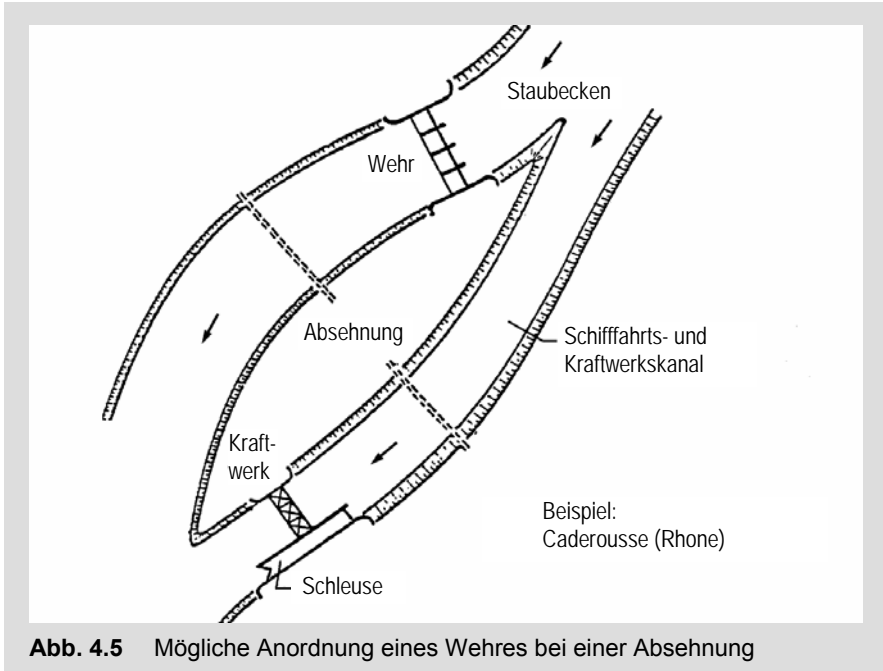




**Abb. 4.3** Staustufe Jochenstein / Donau in Österreich. Links im Bild das geschlossene Wehr, daneben das Kraftwerk und eine Doppelschleuse



**Abb. 4.4** Beispiele für mögliche Anordnungen von Wehren an Staustufen



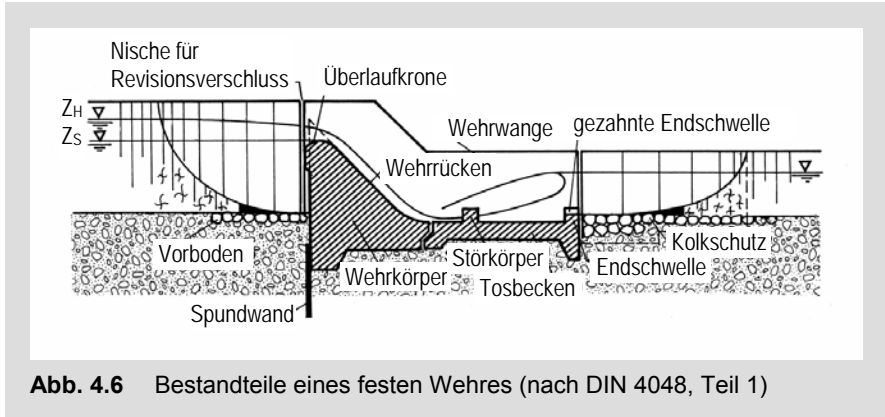
**Abb. 4.5** Mögliche Anordnung eines Wehres bei einer Absehnung

## 4.2 Feste Wehre

Feste Wehre sind die einfachste Möglichkeit, einen Fluss aufzustauen. Allerdings erlauben sie keine Abflussregelung; der Wasserstand kann nicht vorgegeben werden sondern stellt sich einzig aufgrund des jeweiligen Abflusses ein. Feste Wehre werden vorwiegend als Stützwehre zur Sohlstabilisierung und bei Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren verwendet.

### 4.2.1 Bestandteile eines festen Wehres

Die Bestandteile eines festen Wehres sind in Abb. 4.6 dargestellt. Oberhalb des massiven Staukörpers schützt der Vorboden aus großen Wasserbausteinen oder einer Betonplatte die Sohle vor Erosion.

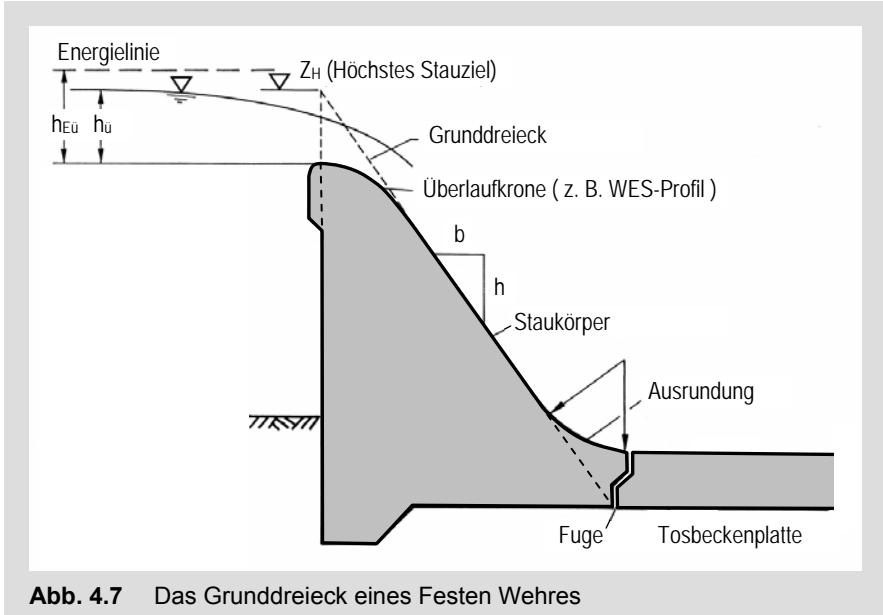


**Abb. 4.6** Bestandteile eines festen Wehres (nach DIN 4048, Teil 1)

### **Grunddreieck**

Das Wehr selbst besteht aus einem massiven Staukörper, der allein durch sein Gewicht die Kräfte aus dem Wasserdruck in den Untergrund ableitet. Daraus ergibt sich ein einfaches Grundkonzept für die konstruktive Gestaltung des Wehrkörpers (s. Abb. 4.7). Die äußeren Umrisse des Wehres entsprechen größtenteils einem Grunddreieck, dessen Spitze in Höhe des Höchsten Stauziels  $Z_H$  liegt. In dieses Grunddreieck wird ein hydrodynamisch günstig geformtes Überlaufprofil eingepasst. Handelt es sich um eine Betonkonstruktion, muss die Neigung des Grunddreiecks und damit des Wehrrückens in Abhängigkeit des Sohlenwasserdrucks etwa zwischen  $0,75 < b : h < 0,85$  liegen, damit die angreifenden Momente aus Wasserdruck und Sohlenwasserdruck durch die Gewichtskraft des Stützkörpers aufgenommen werden können. Eine konstruktive Fuge zwischen Wehrkörper und anschließendem Tosbecken bildet den fiktiven Drehpunkt beim Nachweis der Kippsicherheit des Bauwerks.

Bei Geschiebe führenden Flüssen empfiehlt es sich, Wehrrücken und Tosbecken mit einer mindestens 15 cm dicken Schicht aus verschleißfestem Beton nach DIN 1045 zu versehen. Störkörper sollten in diesem Fall mit einem Stahlmantel vor Erosion, Abrasion und Kavitation geschützt werden.



**Abb. 4.7** Das Grunddreieck eines Festen Wehres

### Überlaufprofil

Ein besonderes Augenmerk verdient das Überlaufprofil. Es ist so zu gestalten, dass Strahlablösungen (Minderung der Abflussleistung) und zu große Unterdrücke (Kavitationsgefahr) vermieden werden. Je strömungsgünstiger dieses Profil ausgebildet wird, umso leistungsfähiger ist das Wehr. Die Abflussleistung  $Q$  eines Wehres mit der Breite  $b$  bestimmt sich ohne Rückstaeinfluss zu

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot \left( h_{ü} + \frac{u^2}{2g} \right)^{3/2} \quad (4.1)$$

Wenn die Fließgeschwindigkeit  $u$  im Oberwasser kleiner als etwa 1 m/s beträgt, kann die Geschwindigkeitshöhe  $u^2/2g$  ( $\approx 5$  cm) in der Regel vernachlässigt werden (Poleni-Formel). Der dimensionslose Überfallbeiwert  $\mu$  ist von der Form der Überlaufkronen abhängig. Strömungsgünstig ausgerundete Profile erreichen  $\mu$ -Beiwerte zwischen etwa 0,65 und 0,75 (z. B. WES-Profil, siehe unten).

Nach dem Wehrrücken folgt das Tosbecken. Hier findet die Energieumwandlung des Abflusses statt. Um die Flusssohle hinter dem Tosbecken vor Erosion zu schützen bedarf es in der Regel einer Sohlbefestigung in Form eines Kolk-schutzes (siehe Abschnitt 4.5.2).

### WES-Profil

Der Formbeiwert  $\mu$  in Gleichung 4.1 hängt hauptsächlich von der Kronenform ab und in geringem Maße auch von der Überfallhöhe. Grundsätzlich können Überlaufkronen von Wehren Formbeiwerte zwischen etwa  $\mu = 0,5$  (bei breitkronigen Wehren) und  $\mu = 0,80$  (bei dachförmigen Wehren) aufweisen. Empfehlenswert sind höhere Beiwerte zwischen 0,70 und 0,75. Dadurch lässt sich die erforderliche Wehrbreite deutlich reduzieren. Bei höheren Beiwerten entstehen infolge der gekrümmten Strombahnen auf dem Wehrrücken Unterdrücke und Ablösungen, die eine Materialzerstörung hervorrufen können.

Ein hydraulisch günstiges Abflussprofil wurde vom *American Corps of Engineers* an der *Waterways Experiment Station* in Vicksburg, USA, entwickelt. Es trägt daher die Kurzbezeichnung WES-Profil. Die grundsätzliche Überlegung beim Entwurf des WES-Profiles war die Tatsache, dass der Bemessungsabfluss nur selten auftritt, kleinere Abflüsse aber sehr häufig über das Wehr abgeführt werden. Das WES-Profil lässt daher beim Bemessungsabfluss geringe Unterdrücke zu und wird stattdessen für einen etwas geringeren Abfluss optimiert, mit einer Überströmungshöhe  $h_d$  ( $d$  für *design*). Für diese Entwurfsüberströmungshöhe – und damit auch für kleinere Abflüsse – bleibt das Überlaufprofil somit stabil und der Abfluss löst sich nicht vom Profil [4.10].

Für  $h_d$  empfiehlt Häusler [4.11] Werte von größer gleich 80 % der maximalen Überströmungshöhe  $h_{ii}$  (s. Abb. 4.8):

$$h_d = (0,8 \text{ bis } 1,0) \cdot h_{ii} \quad (4.2)$$

Das WES-Profil folgt der mathematischen Beziehung

$$x^{1,85} = 2 \cdot h_d^{0,85} \cdot y \quad (4.3)$$

### Konstruktionshinweise

Zunächst wird das Grunddreieck gemäß Abb. 4.8 gezeichnet, wobei die Neigung nach statischen Gesichtspunkten gewählt wird. In diesem Beispiel ist  $\alpha = 60^\circ$ . Die WES-Kurve nach Gleichung 4.3 hat einen tangentialen Übergang zum Grunddreieck im Abstand  $y_T$  von der Überlaufkrone. Damit lässt sich der Tangentenpunkt  $T$  konstruieren. Der Scheitelpunkt der Überlaufkrone liegt  $x_T$  vom Tangentenpunkt entfernt. Daraus ergibt sich die Lage der  $y$ -Achse und des Kronenscheitels  $K$ . Für  $x_T$  und  $y_T$  gelten folgende Beziehungen:

$$x_T = h_d \cdot 1,0961 \cdot (\tan \alpha)^{1,1765} \quad (4.4)$$

$$y_T = h_d \cdot 0,5925 \cdot (\tan \alpha)^{2,1765} \quad (4.5)$$

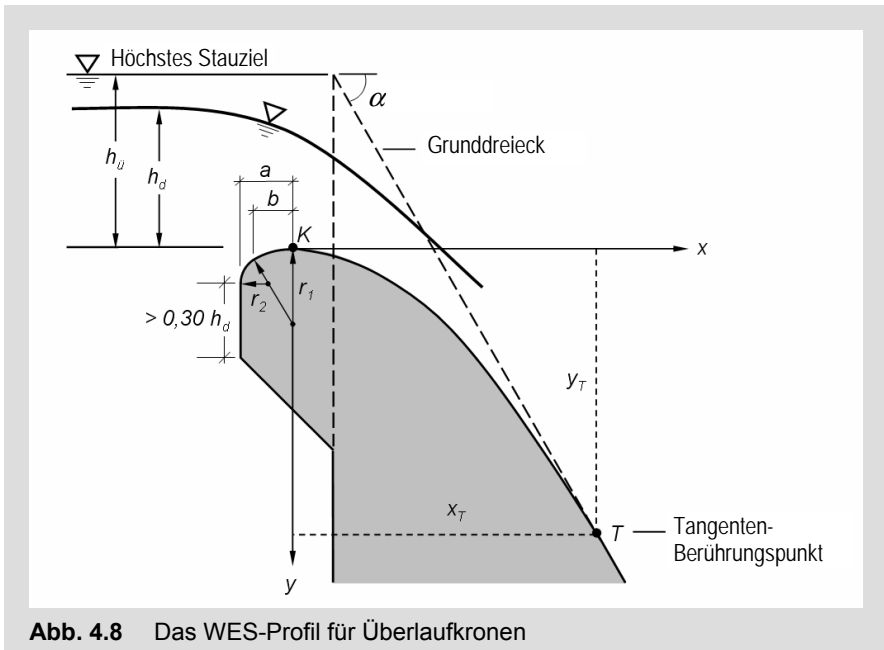
Zwischen  $K$  und  $T$  lässt sich nun das WES-Profil mit Hilfe von Gleichung 4.3 im soeben konstruierten  $x$ - $y$ -Koordinatensystem einpassen.

Die Formgebung wasserseitig vom Kronenscheitel wird von zwei Kreissegmenten gebildet. Für die Radien und die Positionen der Mittelpunkte gelten folgende Formeln:

$$r_1 = 0,5 \cdot h_d \quad \text{und} \quad r_2 = 0,2 \cdot h_d \quad (4.6)$$

$$a = 0,282 \cdot h_d \quad \text{und} \quad b = 0,175 \cdot h_d \quad (4.7)$$

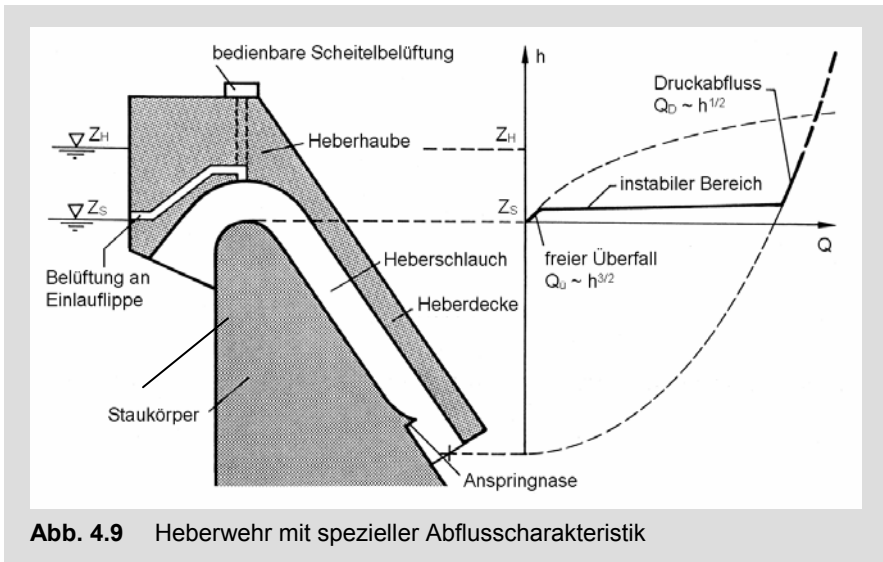
Mit diesen Angaben lässt sich das WES-Profil vollständig konstruieren. Es sei darauf hingewiesen, dass je nach Wahl von  $h_d$  und der Neigung des Grunddreiecks sich wasserseitig sehr unterschiedliche, teils unbefriedigende Formen ergeben können. Hierbei ist zu beachten, dass brauchbare Profile nur dann vorliegen, wenn sie über das Grunddreieck hinaus zur Wasserseite hin ausragen, wie in Abb. 4.8. Weitere Hinweise finden sich in [4.11].



#### 4.2.2 Sonderformen der festen Wehre

Heberwehre haben keine beweglichen Verschlusssteile und zählen deshalb zu den festen Wehren. Das hydraulische Prinzip eines Heberwehres ist in Abb. 4.9 dargestellt. Bei Erreichen eines Wasserstandes knapp über der innen lie-

genden Wehrschwelle des Staukörpers (in der Regel bei Übersteigen des Stauzieles  $Z_S$ ), springt der Heber an. Nur kurzzeitig herrscht jetzt freier Überfall. Schon bei leicht steigendem Abfluss lenkt die Anspringnase den Wasserstrahl an die Heberdecke, wodurch der Heberschlauch schnell evakuiert wird. Hierdurch kommt es zu einem raschen Übergang vom Freispiegel- zum Druckabfluss und der Heber erreicht unmittelbar eine hohe Abflussleistung. Der Abfluss nimmt auch bei weiter steigendem Wasserstand kaum zu, da jetzt die Gesetze des Druckabflusses zugrunde liegen. Nimmt der Zufluss in die Stauhaltung wieder ab und fällt der Wasserstand unter die Einlaufkante der Heberhaube an der Einlaufkante, reißt der Wasserstrom infolge der eingesaugten Luft abrupt ab. Sonderkonstruktionen mit bedienbaren Belüftungsvorrichtungen erlauben eine frühere Unterbrechung des Abflusses, indem manuell Luft in den Heberschlauch gelassen wird und dadurch der Abfluss abrupt abreißt.



**Abb. 4.9** Heberwehr mit spezieller Abflusscharakteristik

Aufgrund der geschilderten Abflusscharakteristik ist das Heberwehr nur eingeschränkt steuerbar und auch nicht überlastbar. Es bietet damit keine Reserven für extreme Hochwasserereignisse. Dennoch wurden Heberwehre früher vielfach als Hochwasserentlastungsanlagen bei Talsperren verwendet, weil sie eine hohe spezifische Abflussleistung aufweisen.

## 4.3 Bewegliche Wehre

Bewegliche Wehre sind Stauvorrichtungen, bei denen der Aufstau nicht durch einen festen Baukörper (wie bei den festen Wehren, Abschnitt 4.2), sondern durch bewegliche Verschlüsse bewirkt wird. Der Oberwasserspiegel ist auf diese Weise sehr genau durch die jeweilige Stellung dieser Wehrverschlüsse zu steuern. Die Randbedingungen Bemessungshochwasserabfluss, Eis und Geschiebe, Untergrundverhältnisse und optische Erscheinung bestimmen die Art der Verschlüsse, die Anzahl der Wehrfelder und deren lichte Weite sowie die Stauhöhe. Daneben spielen Aspekte der Betriebssicherheit und der Wirtschaftlichkeit eine ebenso wichtige Rolle. Wenn möglich, wird man Wehrverschlüsse wählen, die sich mit geringer Antriebskraft oder allein durch Wasserdruck bewegen lassen.

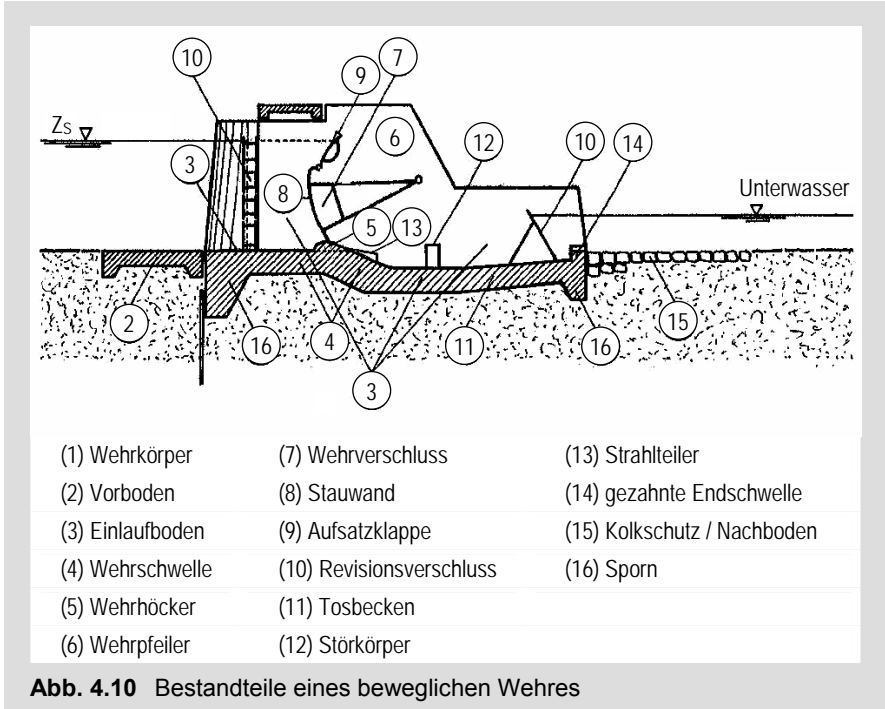
Bei der Formgebung ist zu beachten, dass keine gefährlichen Schwingungen und Unterdrücke an den Verschlüssen und am Bauwerk entstehen. Ebenso ist Kavitation zu verhindern, welche die Lebensdauer der Anlage verkürzen würde. In der Regel können diese störenden Einflüsse auf den praktischen Betrieb mit Hilfe eines wasserbaulichen Modellversuchs vermieden werden.

Die Bewegung der Verschlüsse kann mechanisch, hydraulisch, elektrisch oder selbsttätig durch das Wasser erfolgen. Bei Ausfall der primären Antriebsquelle müssen die Wehrverschlüsse weiterhin bedienbar bleiben (Öffnen und Schließen). Daher ist eine zweite Energiequelle (Notaggregat) vorzuhalten oder muss in ausreichend kurzer Zeit verfügbar sein. In der Praxis besitzen elektromechanische und ölhydraulische Antriebe zusätzlich einen Handantrieb. Bei großen Wehrverschlüssen sollte dieser Handantrieb durch einen unabhängigen Hilfsmotor bedient werden können.

Die Berechnung und die bauliche Durchbildung der Wehrverschlüsse und deren Antriebe erfolgt nach DIN 19704 - 1 und - 2 sowie nach DVWK-Merkblatt 249 „Betrieb von Verschlüssen im Stahlwasserbau“ [4.7].

Häufig findet man bei beweglichen Wehren einen kleinen Wehrhöcker (siehe Abb. 4.10), auf dem die Verschlüsselemente aufsitzen. Sind diese Betonteile kleiner als etwa 15 % der Oberwassertiefe, wird die Anlage noch den beweglichen Wehren zugeordnet. Erst bei einem höheren Anteil am Aufstau handelt es sich um einen festen Staukörper und man ordnet die Anlage den kombinierten Wehren zu (siehe Abschnitt 4.3.5).





### 4.3.1 Steuerung der beweglichen Wehre

Im Gegensatz zu festen Wehren, bei denen sich der Oberwasserspiegel abhängig vom Zufluss variabel einstellt, kann bei einem beweglichen Wehr ein konstantes Stauziel im Oberwasser gehalten werden. Die Verschlüsse des Wehres sind so zu steuern, dass alle Wehrfelder gleichmäßig beaufschlagt werden. Dadurch werden die günstigsten Strömungsbedingungen erreicht. Insbesondere bei Stauhaltungen an schiffbaren Flüssen dürfen keine gefährlichen Schwallwellen (Brückendurchfahrten!) und Sunkerscheinungen (minimale Flottwassertiefe) auftreten. Wird ein vorhandenes Wasserkraftwerk vom Netz genommen, muss der Turbinendurchfluss durch das Wehr geleitet werden. Hierbei zwangsläufig in kurzer Zeit entstehende Schwall- und Sunkwellen sind in den Stauräumen schadlos auszugleichen.



**Abb. 4.11** Klappenwehr Vilsbiburg / Vils mit seitlichem Schleifblech und Strahlaufreißern oben

### ***(n-1)-Bedingung***

Bei Hochwasser müssen die Verschlüsse sicher geöffnet und der ursprüngliche Flussquerschnitt freigegeben werden können. DIN 19700 Teil 13 schreibt hier die Einhaltung der sogenannten (n-1)-Bedingung vor. Diese Vorschrift verlangt, dass Wehre mit beweglichen Verschlüssen so zu dimensionieren sind, dass der Bemessungshochwasserzufluss  $BHQ_1$  auch bei Ausfall eines Wehrfeldes schadlos und ohne Überschreitung des für diesen Fall festgesetzten Wasserspiegels abgeführt werden kann. Bei unterschiedlichen Wehrfeldern muss jenes mit der größten Abflussleistung als nicht zu öffnen unterstellt werden.

Bei Wehrfeldern mit mehreren Verschlüssen übereinander (z. B. Staubalkenwehre, siehe Abschnitt 4.4.1) genügt es, die leistungsfähigste Öffnung als geschlossen anzusetzen, jedoch nur, wenn im Revisions- oder Reparaturfall

betrieblich auch tatsächlich nur eine Öffnung und nicht ein ganzes Wehrfeld abgesperrt werden kann.

Die (n-1)-Bedingung muss somit sowohl die Möglichkeit des Ausfalls eines Verschlusses durch Reparatur- und Wartungsarbeiten als auch das unvorhergesehene Blockieren des Verschlusses oder Versagen der Antriebsaggregate abdecken.

Zusätzlich ist noch folgendes zu beachten:

- Revisionsarbeiten sollten nach Möglichkeit nur in Niedrig- oder Mittelwasserzeiten durchgeführt werden;
- Durch Wahl bewährter Verschlussysteme wie Klappe, Segmentverschluss oder Schütz ist das Öffnungsrisiko zu minimieren;
- Wehrverschlüsse, die sich alleine aus dem Wasserdruck (z. B. Stauklappen) oder mit nur geringer Antriebskraft (z. B. Sektoren und Segmentverschlüsse) öffnen lassen, sind zu bevorzugen;
- Erfolgt ein Teil der Hochwasserabfuhr über seitliche Umläufe, die als feste Wehre konzipiert sind (Streichwehre), ist die (n-1)-Bedingung nur auf den verbleibenden Abfluss anzuwenden;
- Der Turbinendurchfluss einer Wasserkraftanlage darf bei der (n-1)-Bedingung nicht angesetzt werden;
- Schiffsschleusen dürfen berücksichtigt werden, wenn die Schleusentore für diesen Betriebsfall eingerichtet und bemessen werden.

Bei schwierigen Randbedingungen wie z. B. Schräganströmung oder Einstau vom Unterwasser verändert sich die Leistungsfähigkeit der einzelnen Wehrfelder, auch wenn diese gleiche Breite aufweisen. Dies ist bei der (n-1)-Betrachtung zu berücksichtigen und zu bewerten.

Das Tosbecken ist so zu bemessen, dass auch im (n-1)-Fall in allen Betriebsfällen die Energieumwandlung im Tosbecken stattfindet. Meist sind hierfür Einbauten im Tosbecken notwendig, z. B. Strahlteiler oder Störkörper.

Ausführliche Betrachtungen zur (n-1)-Regel sind im DVWK-Merkblatt 216 „Betrachtungen zur (n-1)-Bedingung an Wehren“ enthalten [4.6]. Darin sind auch Vorgehensweisen genannt, wenn bei bestehenden Wehranlagen ein Nachweis nach (n-1) nicht geführt werden kann (n-a-Bedingung).

### **Ausnahmen von der (n-1)-Bedingung**

Bei kleinen, einfeldrigen Wehranlagen darf auf die Einhaltung der (n-1)-Bedingung u. U. verzichtet werden. Voraussetzung hierfür ist, dass bei einem blockierten Verschluss der Anstieg des Oberwasserspiegels und die daraus resultierenden Auswirkungen hingenommen werden können. Die Tragsicherheit

des Bauwerks darf auch bei diesem erhöhten Wasserstand nicht gefährdet sein. Durch eine Redundanz der Antriebe, durch verstärkte Wartung und durch Rufbereitschaft von schwerem Hebegerät kann das Risiko der Überströmung der Wehranlage weiter reduziert werden.

Für den Bemessungshochwasserzufluss  $BHQ_2$  ist die (n-1)-Bedingung nicht anzuwenden. Hier dürfen alle Wehrfelder zur Abfuhr des Hochwassers berücksichtigt werden. Es darf auch der Durchfluss durch ein vorhandenes Kraftwerk und eine Schiffsschleuse als abflusswirksam angesetzt werden.

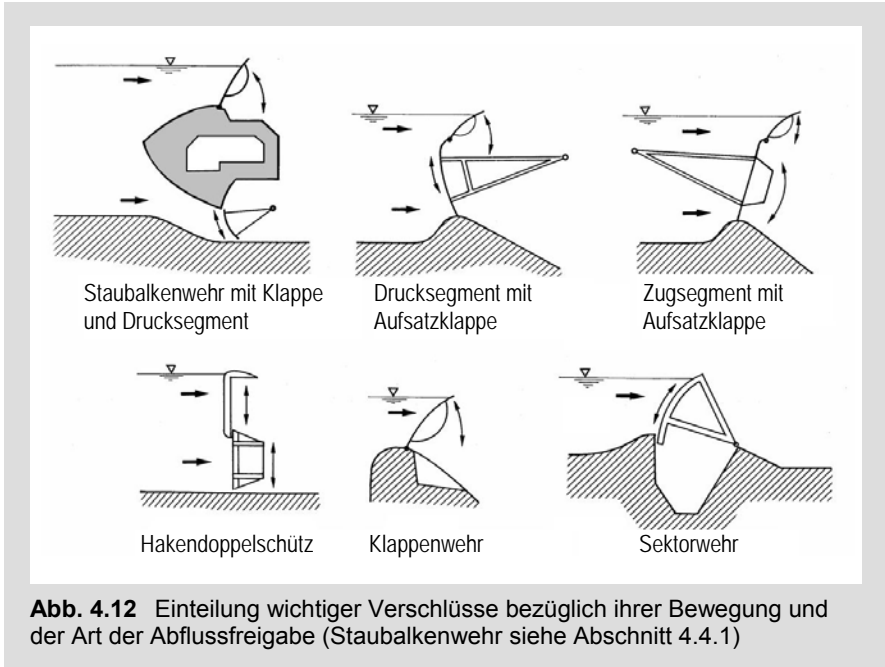
### 4.3.2 Einteilung der beweglichen Wehre

Am zweckmäßigsten unterteilt man bewegliche Wehre anhand ihrer Verschlüsse. Grundsätzlich unterscheiden sich diese durch die Bewegung beim Öffnen und Schließen und durch die Art, wie der Abfluss freigegeben wird. Verschlüsse werden entweder durch Heben und Senken oder durch eine Drehbewegung des Verschlussorgans verstellt und dadurch über- oder unterströmt. Durch Kombinationen von unterschiedlichen Verschlussstypen ist gleichzeitig eine Über- und Unterströmung möglich.

Bei der Wahl der Verschlüsse ist besonders auf eine gute Abfuhr von Eis, Geschiebe, Treibholz und Geschwemmsel\* zu achten. Eine Einteilung verschiedener Verschlussstypen aus Stahl zeigt Abb. 4.12. Daneben setzen sich zunehmend preisgünstige Gummigewebeschläuche mit Luft- oder Wasserfüllung durch (Schlauchwehre, siehe Abschnitt 4.3.5).

---

\* Geschwemmsel, auch Schwemmgut genannt, ist natürliches Treibgut aus Pflanzenresten (vorwiegend Holz und Laub) und ggf. Verunreinigungen (Plastiktüten etc.) im Wasser. Der jährliche Eintrag in ein von Laubwald begleitetes Gewässer hängt stark von der Gewässerbreite und der Pflanzenstruktur ab. Hohe Einträge finden insbesondere während der anlaufenden Welle eines Hochwassers statt. Geschwemmsel kann in Fließgewässern umfangreiche Barrieren bilden. Geschwemmsel, das in den Rechen von Wasser entnehmenden Betrieben (z. B. Kraftwerken) anfällt muss laut Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vom Betrieb sortiert und wie Abfall entsorgt werden.



### 4.3.3 Hubverschlüsse

Im einfachsten Fall werden Verschlüsse vertikal angehoben, um ein Wehrfeld für den Abfluss freizugeben. Mit Hilfe von Ketten oder Hydraulikzylindern können die Stahlteile gehoben und wieder abgesenkt werden. In der Regel werden die Verschlüsse in Pfeilernischen geführt, wo sie die Wasserdruckkräfte in die Pfeiler abgeben.

#### **Dambalkenwehr**

Das Dambalkenwehr besteht aus einzelnen Balken, welche horizontal übereinander in seitlich in den Pfeilern eingelassene Dambalkennuten eingeführt werden. Sie geben dort die Wasserdruckkräfte an die Pfeiler ab. Die Abdichtung zwischen den Balken wird mittels längs der Berührungsflächen eingelassener oder aufgeschraubter Gummileisten gewährleistet. Da das Bedienen dieses Verschlusses sehr umständlich und zeitraubend ist, wird er heute nur noch bei kleinen Wehranlagen an Bächen und als temporärer Revisionsverschluss verwendet. Häufig werden hierzu größere Dammtafeln eingesetzt. Mit Hilfe eines Portal- oder Autokranes lassen sich die Elemente oberwasser- und unterwasserseitig eines Wehrverschlusses einführen und ermöglichen so die Inspektion des Wehrkörpers und der Wehrverschlüsse.