

## 8 Stau- und Wasserkraftanlagen

### 8.1 Allgemeines

#### 8.1.1 Begriffe

Stau- und Wasserkraftanlagen umfassen eine Vielzahl von baulichen Anlagen und erfüllen eine Vielzahl von Aufgaben.

Allgemein gilt nach DIN 19700, Teil 10, die Definition „Stauanlagen sind Absperrbauwerke mit ihren zugehörigen Staubecken“. Zu den Stauanlagen zählen somit Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken, Staustufen, Pumpspeicherbecken, Sedimentationsbecken, Stauteiche und Geschiebesperren.

Die Aufgaben, die Stauanlagen erfüllen, umfassen dabei etwa folgende Aspekte:

- Energiegewinnung
- Hochwasserschutz
- Schiffbarmachung von Gewässern
- Geschieberückhaltung
- Trinkwasserspeicherung
- Landwirtschaftliche Bewässerung
- Fischzucht

In der Regel erfüllen Stauanlagen dabei verschiedene Aufgaben gleichzeitig, so dass sie den Charakter von Mehrzweckprojekten haben. Werden Stauanlagen primär zur Energiegewinnung eingesetzt, so werden sie als Wasserkraftanlagen bezeichnet.

*Verschiedene Aufgaben*

### 8.2 Grundlagen der Wasserkraftnutzung

#### 8.2.1 Allgemeines und Historisches

Bei der Errichtung von Stauanlagen stellt die Wasserkraftnutzung und damit die Energiegewinnung zumeist ein vordergründiges oder zumindest wesentliches Ziel dar.

*Bernoulli-Gleichung* Das Wasser tritt in verschiedener Weise als Träger von Energie auf. Nach BERNOULLI kann diese Energie des Wassers in den Meeren, Bächen, Flüssen, Seen etc. in drei Komponenten aufgeteilt werden und zwar in potentielle Energie, in Druckenergie und in kinetische Energie. Für die Gesamtenergie – angegeben als Energiehöhe – gilt:

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (8.1)$$

mit  $H$  Energiehöhe in m,  
 $z$  Höhe über Bezugshorizont in m,  
 $p$  Flüssigkeitsdruck in  $\text{kN/m}^2$ ,  
 $\gamma$  Wichte des Wassers in  $\text{kN/m}^3$ ,  
 $g$  Fallbeschleunigung in  $\text{m/s}^2$  und  
 $v$  Fließgeschwindigkeit in  $\text{m/s}$ .

*Historisch: Wasserräder* Die einfachste und älteste Form der Wasserkraftnutzung ist das Wasserrad. Zu Beginn der Entwicklung, die am Hoangho in China auf etwa 4.000 v. Chr. datiert wird, ist die Fließgeschwindigkeit des Wassers und damit die kinetische Energie genutzt worden. Hierbei tauchen sog. unterschlächtige Wasserräder in ein Fließgewässer ein und werden durch die Bewegungsenergie in Rotation versetzt, so dass etwa Wasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung auf ein höheres Niveau gehoben oder eine Maschine angetrieben werden kann.

*Nutzung potentieller Energie* Erst später wurde das Wasser - durch Umleitung in eine Triebwasserleitung - auf einem geodätisch höheren Niveau gehalten und damit das Wasserrad überschlänglich betrieben, wobei die potentielle Energie des Wassers genutzt wurde.

Die Wasserkraftgewinnung konzentriert sich in heutiger Zeit nahezu ausschließlich auf die Nutzung einer vorhandenen Fallhöhendifferenz und/oder den Ausbau einer künstlichen Niveaudifferenz (Aufstau) in einem natürlichen oder künstlich erstellten Bett einer ruhenden oder strömenden Wassermasse.

*Wasserbauliche Energieanlagen* Nach Anlagenbauart und Nutzungsform werden folgende wasserbauliche Energieanlagen unterschieden:

- Staukraftwerke
- Umleitungskraftwerke

- Gezeitenkraftwerke
- Wellenkraftwerke
- Pumpspeicherkraftwerke
- Depressionskraftwerke

Gemäß dem Titel dieses Kapitels werden nachfolgend die Staukraftanlagen näher betrachtet, die sowohl eine Stau- als auch eine Wasserkraftanlage beinhalten. Grundsätzlich sei jedoch angemerkt, dass Stau- und Wasserkraftanlagen auch unabhängig voneinander angeordnet werden können.

### 8.2.2 Ausbauleitung und Energieermittlung

Die Energieausbeute einer Wasserkraftanlage hängt im Wesentlichen vom Zufluss  $Q$ , also dem Wasservolumen pro Zeit, und der Nettofallhöhe  $H_N$  ab. Die zur Verfügung stehende Energie des Wasserstromes  $\rho \cdot Q$ , wobei  $\rho$  die Dichte des Wassers ist, mit dem Potential  $g \cdot H_N$  wird an einer Turbine in Drehleistung und am Generator in elektrische Energie umgewandelt.

Die Leistung einer Turbine  $P$  bestimmt sich damit unter Berücksichtigung eines Wirkungsgrades  $\eta$  zu:

*Turbinenleistung*

$$P = \eta \cdot \gamma \cdot Q \cdot H_N \tag{8.2}$$

- mit
- $P$  Leistung in kW,
  - $\eta$  Wirkungsgrad der Wasserkraftanlage in 1,
  - $Q$  Zufluss in  $\text{m}^3/\text{s}$  und
  - $H_N$  Nettofallhöhe in m.

Der Unterschied zwischen der geodätisch vorhandenen Rohfallhöhe und der zur Energiegewinnung nutzbaren Fallhöhe  $H_N$  berücksichtigt die Reibungs- und Krümmungsverluste in den Triebwasserleitungen sowie die Einlaufverluste an der Triebwasserfassung. Bei modernen Anlagen liegt der Anlagenwirkungsgrad, der Verluste zwischen Turbineneinlauf und –auslauf einschließt, zwischen 0,80 und 0,85. Damit ergibt sich für eine Abschätzung der erzielbaren Leistung  $P$  die nicht dimensionsreine Beziehung

*Verluste, Wirkungsgrad*

$$P = 8 \cdot Q \cdot H_N, \tag{8.3}$$

wobei die oben genannten Einheiten für die Größen  $P$ ,  $Q$  und  $H_N$  beizubehalten sind

Die derzeit größte Wasserkraftanlage der Erde (Itaipu in Brasilien/Paraguay) hat eine Ausbauleistung von über 12.600 MW. Das entspricht der Leistung von etwa zwölf Reaktorblöcken moderner Kernkraftwerke. Mit Fertigstellung des derzeit in Bau befindlichen Drei-Schluchten (*Three Gorges*)-Kraftwerkes in China wird dann ein Kraftwerk mit einer Ausbauleistung von 18.200 MW ans Netz gehen (Tab. 8.1)

Name	Fluss	Land	Leistung in MW	Fertigstellung
Three Gorges	Yangtse	China	18.200	im Bau
Itaipu	Parana	Brasilien/Paraguay	12.600	1983
Guri	Caroni	Venezuela	10.300	1986
Isayano-Shushensk	Yenisei	Russland	6.400	1989
Grand Coulee	Columbia	USA	6.180	1942
Krasnoyarsk	Yenisei	Russland	6.000	1968
Church Falls	Churchill	Kanada	5.428	1971
La Grande 2	La Grande	Kanada	5.328	1979
Bratsk	Angara	Russland	4.500	1961
Ust-Ilim	Angara	Russland	4.320	1977

**Tab. 8.1** Weltweit größte Wasserkraftanlagen nach Leistung

*Ausbauleistung*

Die Ausbauleistung ist die maximale elektrische Leistung eines Kraftwerkes und wird nur beim Abarbeiten des Ausbauzuflusses  $Q_A$  erreicht. Wegen naturbedingter Ablaufschwankungen steht dieser Zufluss allerdings nicht kontinuierlich zur Verfügung. Moderne Wasserkraftanlagen an mitteleuropäischen Flüssen sind auf einen Ausbauzufluss ausgelegt, der nur an etwa 30 bis 60 Tagen im Jahr überschritten wird.

*Leistungsdauerlinie*

Zur Beurteilung der mittleren jährlichen Energieausbeute muss die mittlere Unter- oder Überschreitungsdauerlinie des Zuflusses bekannt sein. Die Daten werden in Deutschland etwa den Wasserwirtschaftlichen Jahrbüchern zu entnehmen, die die Abflussdaten und Pegelstände an allen deutschen Pegel umfassen. Aus dieser und weiteren Kennkurven kann die Leistungsdauerlinie über ein Jahr aufgestellt werden (Abb. 8.1). Das Integral der Leistungsdauerlinie über ein Jahr gibt das Jahresarbeitsvermögen der Wasserkraftanlage wieder.

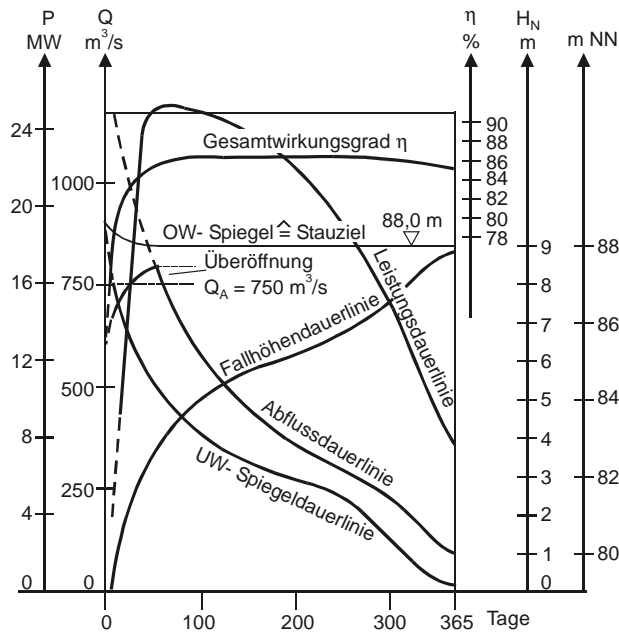


Abb. 8.1 Leistungsdauerlinie über ein Wasserwirtschaftsjahr

### 8.3 Stauanlagen

Stauanlagen werden grundlegend in ►Fluss- und ►Talsperren unterschieden, da daraus unmittelbar spezifische Bauformen und Aufgabenstellungen abzuleiten sind.

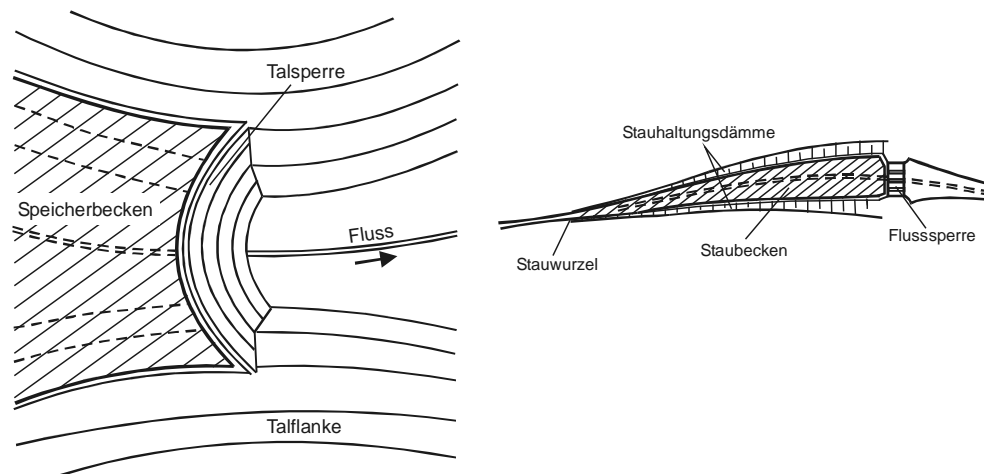
**Flusssperren** werden in den Niederungen der Flüsse, etwa im Bereich der norddeutschen Tiefebene an der Elbe oder Weser, angeordnet und bestehen häufig aus einer Wehr- und einer Wasserkraftanlage. Der Stauraum besteht hier aus dem aufgestauten Flussabschnitt und wird begrenzt durch die beidseitigen Stauhaltungsdämme. Die vordergründige Aufgabenstellung ist häufig die ganzjährige Schiffbarmachung des Flusses für Schiffe mit vergleichsweise großem Tiefgang. Die Wasserspeicherung ist bei Flusssperren von untergeordneter Bedeutung oder mit Rücksicht auf die Schifffahrt unzulässig. Das Einzugsgebiet der Abflusses ist vergleichsweise groß (etwa 5.300 km<sup>2</sup> am Leinekraftwerk in Herrenhausen), so dass die Abflussmenge entsprechend groß (mittlerer Abfluss der Leine am Pegel Herrenhausen etwa 50 m<sup>3</sup>/s), jedoch die Fallhöhe gering (etwa 2 m) ist. Aus diesen Betriebsparametern (Q groß, H gering, keine Speichermöglichkeit) leitet sich die besondere Ausbildungsform der Laufwasserkraftwerke ab.

*Wasserstrom groß,  
 Fallhöhe gering*

*Wasserstrom gering, Fallhöhe groß*

**Talsperren** riegeln einen Talquerschnitt im Oberlauf eines Flusses oder Baches, etwa im Bereich der Mittel- (Harz, Sauerland) oder Hochgebirge (Alpen), ab, so dass der Fluss oder Bach zu den Talflanken hin aufgestaut wird. Die Anlagen bestehen häufig aus einer Mauer oder einem Damm als Staubauwerk und einer Wasserkraftanlage.

Die grundsätzlichen Unterschiede von Tal- und Flussperre sowie ihre generelle Anordnung in Orientierung zum Flusslauf ist den Abbildungen 8.2 und 8.3 zu entnehmen.



**Abb. 8.2** Grundprinzip von Tal- (links) und Flussperre (rechts)

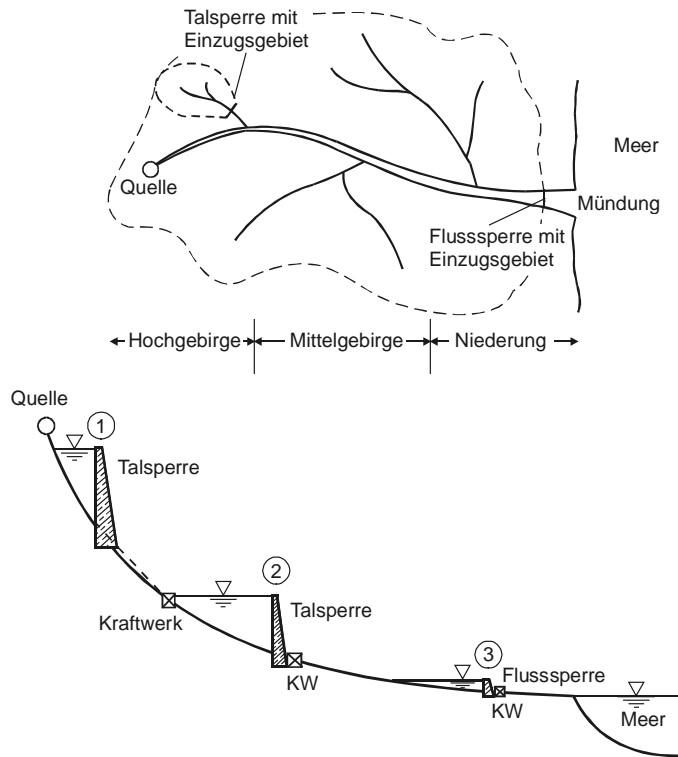


Abb. 8.3 Anordnung von Tal- und Flusssperren in Bezug zum Flusslauf

### 8.3.2 Flusssperren

Flusssperren sind durch ein Wehr als Staubauwerk gekennzeichnet, neben dem weiteren Anlagen, wie etwa Schleuse, Wasserkraftanlage, Stauhaltungsdämme etc. angeordnet werden (Abb. 8.4).

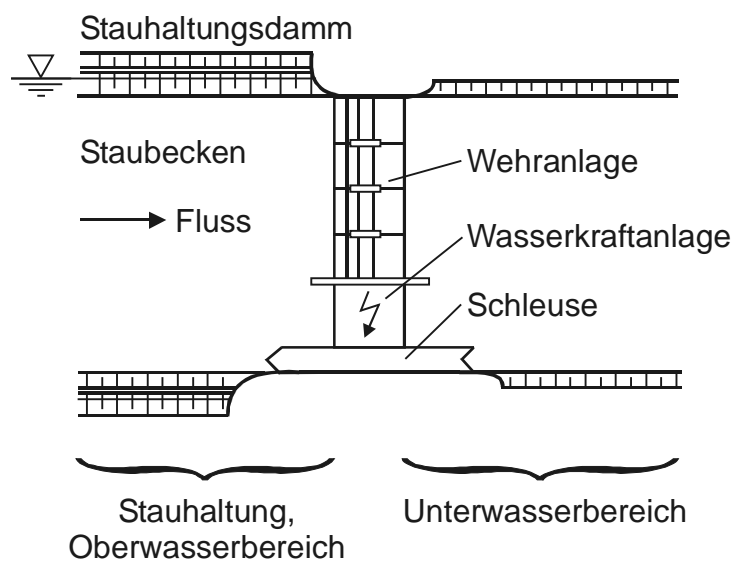


Abb. 8.4 Anordnung und Konstruktionselemente einer Flusssperre

Moderne Wehre bestehen aus einem massiven Wehrkörper aus Stahlbeton und einem beweglichen Verschlussorgan aus Stahl. Die wesentliche Aufgabe ist die Gewährleistung eines konstanten Stauziels im Oberwasser der Anlage, unabhängig von tages- oder jahreszeitlich wechselnden Abflussmengen

*Aufgaben Fluss-  
sperrern*

Im Wesentlichen können Flusssperrern folgende Aufgaben erfüllen:

- Erhöhung der Fahrwassertiefe für die Schifffahrt
- Erzeugung von Fallhöhe zur Energiegewinnung
- Verringerung der Fließgeschwindigkeit zur Sohlstabilisierung (Verringerung von Geschiebetransport und Sohlrosionen) und Energiegewinnung (Verringerung von Strömungsverlusten)
- Anheben des Grundwasserstandes
- Bereitstellung von Naherholungsräumen

*Mehrzweckanlagen*

In der Regel erfüllen Flusssperrern mehrere dieser Aufgaben gleichzeitig, so dass sie Mehrzweckanlagen sind.

*Einflüsse auf Um-  
gebung*

Der Bau einer Flusssperrern stellt einen weitreichenden Eingriff in das Flussregime und den Wasserhaushalt dar. Im einzelnen sind dabei folgende Einflüsse zu berücksichtigen:

- Rückhaltung der Geschiebefracht im Speicherbecken (dort oftmals Verlandungsproblem) und Entzug von Geschiebe im Unterwasser (Eintiefungstendenzen).
- Sedimentation von Schwebstoffen im Speicherbecken
- Anheben des Grundwasserspiegels im Oberlauf und Absenken im Unterlauf
- Ggf. Veränderung der Wasserqualität durch verringerte Fließgeschwindigkeit
- Eingriff in die standorttypische Lebensgemeinschaft (etwa Wechsel vom Fließgewässer zum Brachgewässer im Stauraum)
- Ver- oder Behinderung der ökologischen Durchgängigkeit des Fließgewässers

Grundsätzlich gilt, dass die Veränderungen im Flusslauf umso geringer ausfallen, je niedriger der Aufstau ist.

Die Wehranlage stellt das Hauptbauwerk einer Flusssperrern dar. Das Wehr staut den Fluss auf und gibt den Fließquerschnitt bei Hochwasser wieder



frei. Zu unterscheiden sind Wehre mit massiven Stauwänden ohne bewegliche Teile (► Feste Wehre) und Wehre mit beweglichen Verschlussorganen (► Bewegliche Wehre) und Kombinationen aus beiden Formen (► Kombinierte Wehre).

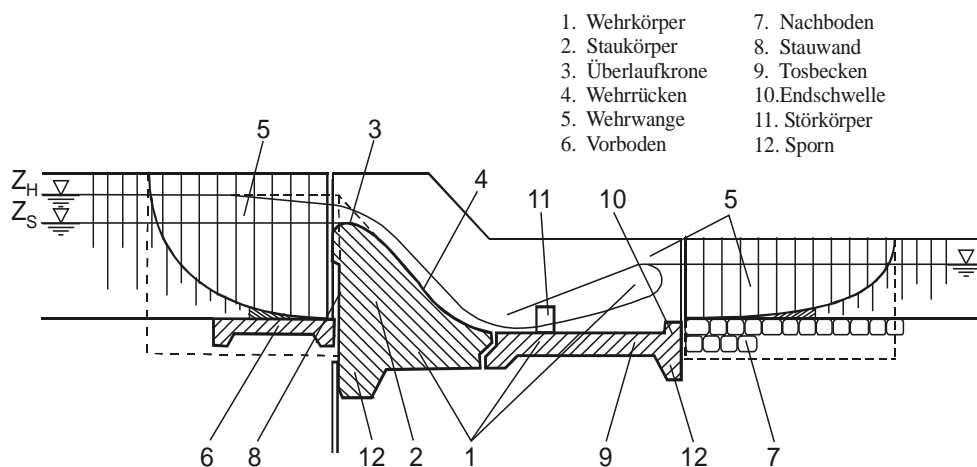
### 8.3.2.2 Feste Wehre

Feste Wehre stellen die einfachste Konstruktionsform dar, einen Fluss aufzustauen. Da sie keine beweglichen Verschlussorgane aufweisen, erlauben sie keine Abflussregulierung, d.h. die Abflussparameter  $Q$  und  $H$  können nicht gesteuert werden. Somit stellt sich der Wasserstand nur auf Grund des Abflusses ein.

*Keine Abflussregulierung*

Feste Wehre werden bevorzugt zur Sohlstabilisierung und bei HW-Entlastungsanlagen von Talsperren verwendet.

Die Bestandteile eines festen Wehres sind in Abb. 8.5 dargestellt. Der massive Staukörper setzt sich aus dem Wehrkörper, dem Wehrrücken und dem Tosbecken zusammen. Bestandteile der Energiedissipation im Tosbecken sind Störkörper und Zahnschwellen.



**Abb. 8.5** : Konstruktionselemente eines festen Wehres nach DIN 4048, T.1

Zur Verringerung von Sickerwasserumläufigkeiten unter der Stauanlage werden Sickerwegverlängerungen in Form von (vertikalen) Dichtwänden (Spundwände, Schmalwände etc.) und (horizontalem) Vorboden (Asphaltbeton, Wasserbausteine etc.) angeordnet.

*Sickerwegverlängerungen*

Im statischen Sinne leitet der massive Wehrkörper den horizontalen Wasserdruck als Schwergewichtswand in der Aufstandfläche in den Baugrund ein. Daraus ergibt sich ein einfaches Grundkonzept für die konstruktive Gestaltung des Wehrkörpers (Abb. 8.5).

*Schwergewichtswand*

*Grunddreieck*

Die äußeren Umrisse des Wehres im Querschnitt entsprechen etwa einem Dreieck, dessen Spitze in Höhe des höchsten Stauziels liegt. In dieses sogenannte Grunddreieck wird ein hydrodynamisch günstig geformtes Überlaufprofil eingepasst. Handelt es sich um eine Betonkonstruktion, muss die Neigung des Grunddreiecks und damit des Wehrrückens etwa bei  $0,75 < b/h < 0,85$  liegen, damit die angreifenden Momente aus Wasserdruck und Sohlenwasserdruck von der Gewichtskraft des Stützkörpers im Kern aufgenommen werden können. Eine konstruktive Fuge zwischen Wehrkörper anschließendem Tosbecken bildet den fiktiven Drehpunkt beim Nachweis der Kippsicherheit des Bauwerks.

*Wehrformel*

Die über ein Überfallwehr abführbare Abflussmenge  $Q$  wird durch die Form des Überlaufkrone bestimmt und ergibt sich zu:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left( h_{\bar{u}} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \right)^{3/2} \quad (8.4)$$

mit  $\mu$  Überfallbeiwert in 1,  
 $B$  Wehrbreite in m und  
 $h_{\bar{u}}$  Überfallhöhe in m.

Die Ableitung dieser empirischen Wehrformel ist z.B. dem strömungsmechanischen Lehrbuch PRESS u. SCHRÖDER (1966) zu entnehmen.

In der Regel ist die Fließgeschwindigkeit im Oberwasser vergleichsweise gering (kleiner 1 m/s), so dass die Geschwindigkeitshöhe  $v^2/2g$  vernachlässigt werden kann.

Der dimensionslose Überfallbeiwert  $\mu$  ist beispielsweise PRESS u. SCHRÖDER (1966) zu entnehmen und erreicht bei strömungsgünstiger Ausbildung des Wehrrückens Werte im Bereich von 0,65 bis 0,75.

### 8.3.2.3 Sonderformen

*Heberwehre*

Heberwehre stellen eine Sonderbauform der festen Wehre dar, da sie keine beweglichen Verschlusssteile aufweisen, jedoch selbsttätig eine gewisse Regulierung des Abflusses vornehmen können.

*Hydraulisches Prinzip*

Das hydraulische Prinzip des Heberwehres ist in Abb. 8.6 dargestellt.

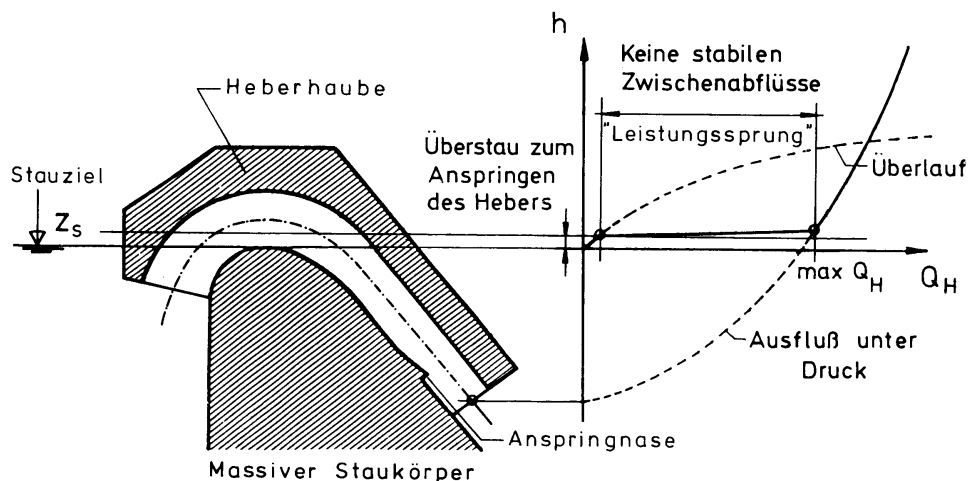


Abb. 8.6 Schnitt durch ein Heberwehr

Bei Erreichen eines Wasserstandes knapp über der innen liegenden Weherschwelle springt der Heber an. Die Anspringnase lenkt den Wasserstrahl an die Heberhaube, so dass der Raum zwischen Wehrkörper und Heberhaube schnell evakuiert wird. Hierdurch kommt es zu einem raschen Übergang vom Freispiegel- zum Druckabfluss, und der Heber erreicht sehr schnell eine hohe Abflussleistung. Dieser Abfluss nimmt auch bei weiter steigendem Wasserstand kaum zu, da die Gesetze des Druckabflusses gelten. Nimmt der Zufluss in die Stauhaltung wieder ab und erreicht der Wasserstand die Einlaufkante der Heberhaube, reißt der Wasserstrom infolge der eingesaugten Luft abrupt ab.

*Freispiegel-  
/Druckabfluss*

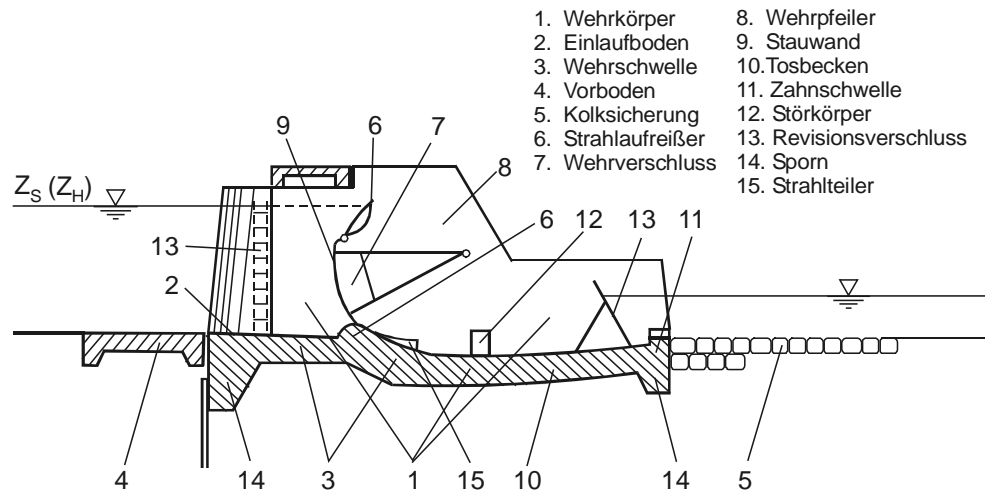
Aufgrund der geschilderten Abflusscharakteristik ist das Heberwehr nur eingeschränkt steuerbar und auch nicht überlastbar. Es bietet damit keine Reserven für extreme Hochwasserereignisse

*Eingeschränkt steu-  
erbar*

### 8.3.2.4 Bewegliche Wehre

Bewegliche Wehre sind Stauvorrichtungen, bei denen ein Teil des Aufstaus durch bewegliche Verschlussorgane bewirkt wird, um damit den Oberwasserstand **oder** die Durchflussmenge zu steuern und den Stauraum ggf. zu bewirtschaften. In der Regel wird in Flussregimen ein konstantes Stauziel vorgegeben (Schifffahrtsanforderungen), so dass mittels der Verschlüsse die zeitlich veränderliche Abflussmenge gesteuert wird.

Die Bestandteile eines beweglichen Wehres sind in Abb. 8.7 dargestellt.



**Abb. 8.7** Konstruktionselemente eines beweglichen Wehres nach DIN 4048, T.1

Die Bewegung der Verschlüsse kann mechanisch, hydraulisch, elektrisch oder selbsttätig durch das Wasser erfolgen. Die Randbedingungen, wie Bemessungshochwasserabfluss, Eis, Geschiebe, Untergrundverhältnisse und optische Erscheinung, bestimmen die Art der Verschlüsse, die Anzahl der Wehrfelder und deren lichte Weite sowie die Stauhöhe.

*(n-1)-Regel*

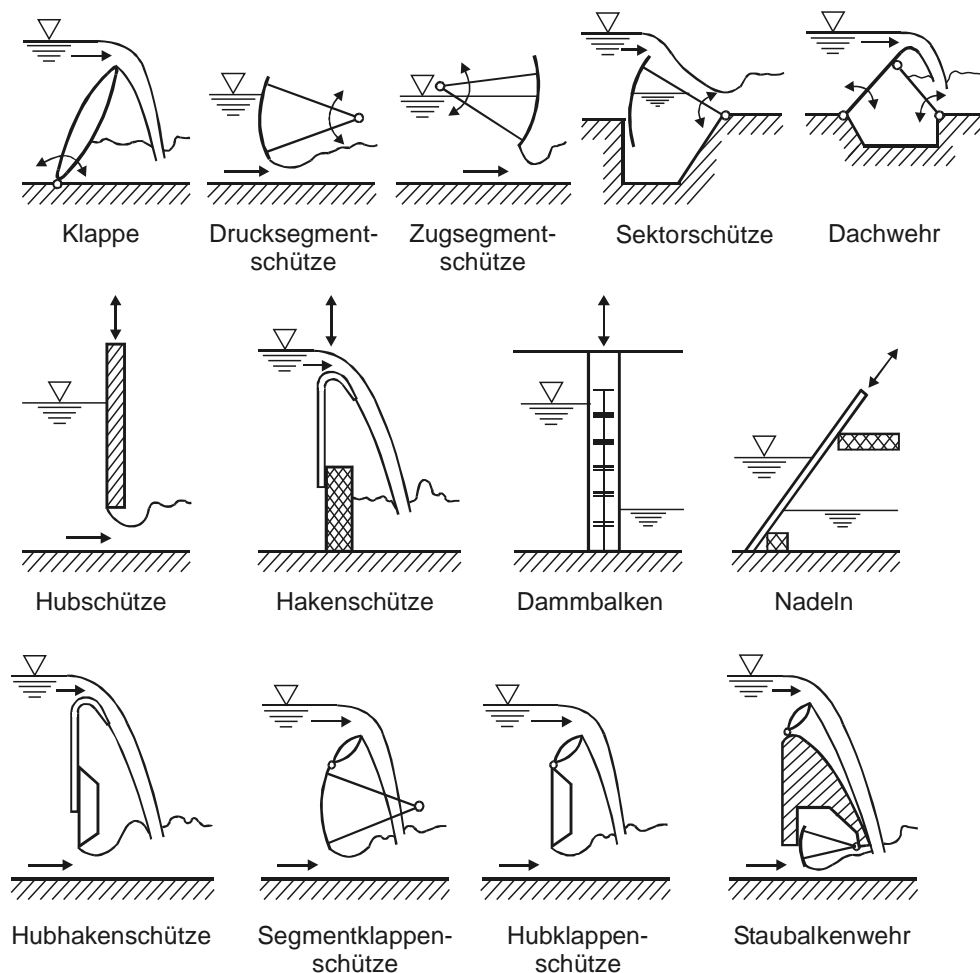
Bei Hochwasser muss die Stauwirkung des Wehres eingeschränkt oder ggf. aufgehoben werden. Die Verschlüsse müssen sicher geöffnet und der ursprüngliche Flussquerschnitt muss freigegeben werden können. Die DIN 19700, Teil 13, schreibt hierzu die Einhaltung der sog. (n-1)-Regel vor. Danach sind Wehre mit beweglichen Verschlüssen so zu dimensionieren, dass das Bemessungshochwasser auch bei Ausfall eines Wehrfeldes durch Defekt, Revision etc. schadlos und unter Einhaltung des höchsten Stauziels abgeführt werden kann. Bei unterschiedlichen Wehrfeldern muss jenes mit der größten Abflussleistung als nicht zu öffnen unterstellt werden. Bei Wehrfeldern mit mehreren Verschlüssen übereinander genügt es, die leistungsfähigste Öffnung als geschlossen anzusetzen, wenn im Revisions- oder Reparaturfall auch tatsächlich nur ein Verschluss und nicht ein ganzes Wehrfeld abgeschlossen 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.

## Einteilung der beweglichen Wehre

Am zweckmäßigsten sind die beweglichen Wehre anhand ihrer Verschlüsse zu unterteilen. Grundsätzlich unterscheiden sich diese durch die Bewegung beim Öffnen und Schließen und die Art des Antriebes. Verschlüsse werden entweder durch Heben oder Senken oder über eine Drehbewegung des Verschlussorgans verstellt und dadurch über- oder unterströmt. Die Kombinationen von unterschiedlichen Verschlussystemen ermöglicht die gleichzeitige Über- und Unterströmung. Bei der Wahl der Verschlüsse ist besonders auf eine gute Abfuhr von Eis, Geschiebe und Geschwemmsel zu achten.

Die Einteilung der verschiedenen Verschlusskonstruktionsarten nach den o.g. Merkmalen lässt eine Vielzahl verschiedener Typen erkennen. Abb. 8.8 zeigt eine Auswahl üblicher Verschlüsse.



**Abb. 8.8** Typen beweglicher Verschlüsse mit Bewegungsrichtung

Im Einzelnen sind folgende Typen zu unterscheiden:

- **Hubverschlüsse**  
Dambalken, Stautafeln, Nadelverschluss, Gleitschütze,  
Rollenschütze, Hubsenkschütze, Doppelschütze,  
Walzenverschlüsse
- **Drehverschlüsse**  
Segmentverschluss mit unter- und oberwasserseitigem Drehlagern,  
Sektorverschluss, Stauklappe (auch aufgesetzt)

*Kombination  
fest/beweglich*

Bei größeren Stauhöhen ist es vorteilhaft, bewegliche Verschlüsse derart zu kombinieren, dass sie sowohl über- als auch unterströmt werden können. Typisch sind etwa Segmentverschlüsse mit aufgesetzten Klappen. Bei vergleichsweise geringem Abfluss regulieren allein die aufgesetzten linien-gelagerten Klappen das Stauziel und werden dabei überströmt. Dies gestattet eine bessere Energieumwandlung und ermöglicht eine bessere Feinregulierung. Erst bei Hochwasser und entsprechend größeren Abflüssen werden die in den Wehrwangen punktgelagerten (und damit schwingungs-anfälligen) Segmentverschlüsse betätigt und vom Hochwasserabfluss unterströmt.

### 8.3.2.5 Kombinierte Wehre

Mit zunehmender Stauhöhe werden die beweglichen Wehrverschlüsse schwerer und teurer und bedingen einen steigenden Aufwand für die Antriebseinrichtungen. Bei den kombinierten Wehren werden daher feste Wehrschwelle oder Staubalken mit beweglichen Verschlüssen derart kombiniert und dimensioniert, dass letztere lediglich den zur Regulierung des Abflusses notwendigen Wehrquerschnitt freigeben.

Abb. 8.9 zeigt ein Dambalkenwehr mit aufgesetzter Klappe und Drucksegmentverschluss.

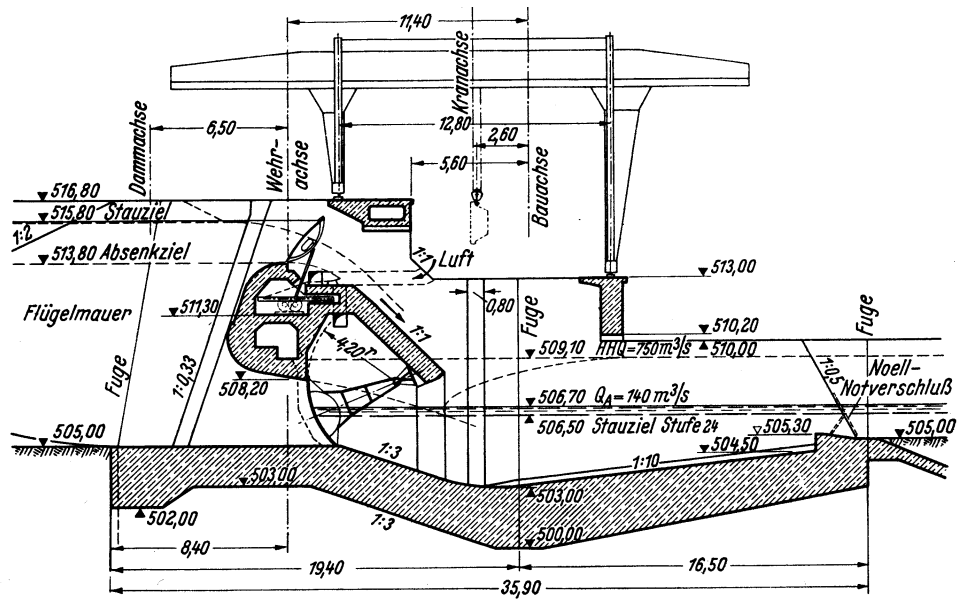


Abb. 8.9 Dammbalkenwehr (PRESS 1959)

Feste Betonteile, die nicht höher sind als etwa 15 % der Oberwassertiefe, nennt man Höcker, und die Anlage wird 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. In Verbindung mit festen Staukörpern lassen sich sowohl Klappen als auch Zug- und Drucksegmente sinnvoll einsetzen.

Der feste Staukörper wird in seiner Größe und Form analog zu den festen Wehren mit Hilfe eines Grunddreiecks konstruiert.

### 8.3.2.6 Tosbecken

An ein Wehr schließt immer ein Tosbecken an. Hier findet die Energieumwandlung (Energiedissipation) in Form eines sog. Wechselsprungs statt. Dabei wird die potentielle und kinetische Energie des Abflusswassers durch Wirbelbildungen und Turbulenzen in Wärme- und Schallenergie umgewandelt.

*Energiedissipation*

Gründet das Tosbecken auf Lockergesteinen (Alluvionen) wird der Wehrkörper in der Regel durch eine speziell ausgebildete Fuge vom Tosbecken getrennt, die verhindert, dass der massive und schwere Staukörper aufgrund seiner tendenziell stärkeren Setzungen tiefer zu liegen kommt als die Tosbeckenplatte und dadurch hydrodynamische Kräfte in der Fuge und unter der Tosbeckenplatte wirken.

Der Übergang vom Wehrrücken zur Tosbeckenplatte sollte ausgerundet und die Fuge außerhalb der Ausrundung angeordnet sein.

**Tosbeckenbemessung**

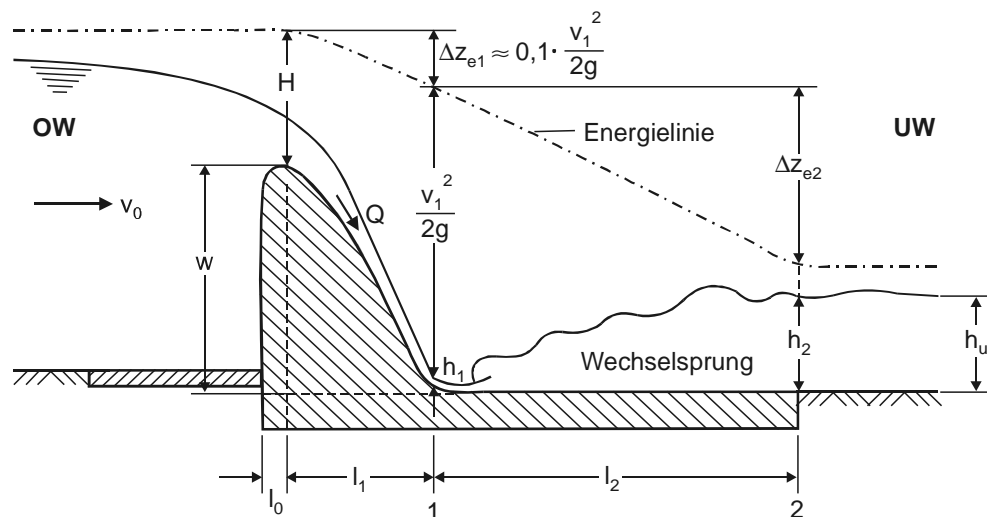
Die Bemessung eines Tosbeckens und damit die Festlegung der geometrischen Abmessungen und seiner hydraulischen Wirksamkeit gelingt nur für einfachste Systeme analytisch. In der Vielzahl der praktischen Fälle ist auf die Ergebnisse empirischer Untersuchungen und Modellstudien zurückzugreifen.

*Wechselsprung*

Dabei ist die Dimensionierung der Tosbeckenlänge und –eintiefung sowie die Anordnung der Störelemente bzw. Rauigkeitskörper entscheidend für eine ausreichende Energieumwandlung im Tosbecken und eine Vermeidung von Kolkbildungen im Unterwasser. Im Grundsatz wird das strömende Wasser im Bereich des Wehrrückens in einen schießenden Abfluss überführt, der im Tosbecken unter Bildung eines Wechselsprunges wieder in eine strömende Abflussform überführt wird.

*Konjugierende Tiefen*

Grundlage der Bemessung ist die Ermittlung der Wassertiefe  $h_1$  des Eingangsschussstrahles bei Eintritt in das Tosbecken und die sog. konjugierte Wassertiefe  $h_2$  am Ausgang des Tosbeckens bzw. Wechselsprunges (Abb. 8.10).



**Abb. 8.10** Konjugierende Wassertiefen an einem festen Wehr

*Eingangswassertiefe*  
*Froudezahl*

Die Eingangswassertiefe des Schussstrahls ergibt sich aus einem Vergleich der Energiehöhen vor dem Wehr und im Tosbecken. Aus dieser Tie-



fe lässt sich die Eingangs-Froudezahl berechnen, die als dimensionslose Größe die Güte des Energiedissipation kennzeichnet.

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot h_1}} \quad (8.5)$$

Mit  $v_1$  Geschwindigkeit des Eingangsschusstrahls in m/s

Nach empirischen Ergebnissen findet eine gute Energieumsetzung bei einer Froudezahl im Bereich von 4,5 bis 9 statt. Hierbei bildet sich ein stabiler, stationärer Wechselsprung aus.

Damit der Wechselsprung ausschließlich im Tosbecken stattfindet und nicht nach unterstrom in das dafür unbefestigte Flussbett abwandert (Kolkbildung), ist eine ausreichende Stütz(Impuls-)kraft vom Unterwasser her erforderlich. Die Betrachtung des hydrodynamischen Gleichgewichtes ergibt eine zum Eingangsschusstrahl konjugierende Wassertiefe von

*Stützkraft*

$$h_2 = -\frac{h_1}{2} + \sqrt{\frac{h_1^2}{4} + \frac{2 \cdot v_1^2 \cdot h_1}{g}} \quad (8.6)$$

Aus dem Vergleich der rechnerisch erforderlichen Unterwassertiefe  $h_2$  mit der tatsächlich vorhandenen Tiefe  $h_u$  erhält man den sog. Einstaugrad

*Einstaugrad*

$$\varepsilon = \frac{h_u}{h_2} \quad (8.7)$$

Im Allgemeinen sollte der Einstaugrad einen Wert von etwa 1,05 aufweisen, d.h. es wird ein gewisser Rückstau des Wechselsprunges vom Unterwasser in Kauf genommen, verbunden mit einer etwas ungünstigeren Energieumwandlung, jedoch größerer Sicherheit gegenüber einem Abwandern ins Unterwasser. In vielen Fällen wird daher die Vertiefung des Tosbeckens und Anordnung einer positiven Stufe erforderlich, um eine entsprechend größere Stützkraft zu mobilisieren.

Die Tosbeckenlänge  $L_T$  sollte nach empirischen Erkenntnissen etwa

*Tosbeckenlänge*

$$L_T = 5 \cdot (h_2 - h_1) \quad (8.8)$$

betragen.

Zu beachten ist bei der o.a. Berechnung, dass diese zunächst nur für einen einzelnen Abflusszustand Gültigkeit hat, so dass die Energieumwandlung für alle anderen Abflüsse nicht optimal ist. Zudem geht die Berechnung von stark vereinfachten Annahmen aus. So ist der Wechselsprung tatsächlich

eine luftdurchmischte turbulente Wasserwalze, die sich einer analytischen Berechnung entzieht.

*Einbauten*

In der Praxis werden daher i.d.R. bereits im Betrieb bewährte Tosbeckentypen ausgeführt und zusätzlich mit Einbauten, wie etwa Zahnschwellen und Prallkörpern, versehen.

### **Kolkschutz**

*Erosion*

Der Abfluss hinter dem Tosbecken ist gekennzeichnet durch starke Turbulenzen, verbunden mit großen Sohlschubspannungen, welche die Flusssohle angreifen, erodieren und Kolke verursachen. Aus Stabilitätsgründen ist es daher erforderlich, den unmittelbaren Bereich hinter dem Tosbecken vor Erosionen durch Wasserbausteine zu schützen. Wie weit der Kolk-schutz nach unterstrom aufgebracht werden muss, hängt von der Beschaffenheit bzw. Stabilität der natürlichen Sohle ab. Für Vorentwürfe kann von einer Länge ausgehen, die in etwa der Tosbeckenlänge entspricht.

*Filterfester Untergrund*

Großformatige Wasserbausteine sind möglichst unter Beachtung der Regel gemäß Gl 8.9 auf einem filterfest ausgebildeten Untergrund zu verlegen, um ein Ausspülen von Feinmaterial infolge Sickerströmung unter dem Wehr zu verhindern. Gegebenenfalls kann ein Geotextil angeordnet werden. Das unterstromige Ende des Kolkschutzes wird gegen Verrutschen und Abwandern gesichert, indem Steine im Flussbett fixiert werden.

### **8.3.3 Talsperren**

Eine Talsperre schließt ein Tal in seiner ganzen Breite ab und schafft damit einen Stauraum zur Wasserspeicherung. Sie besteht aus einem Absperrbauwerk und den dazugehörigen Betriebsanlagen. Im Bereich der Stauwurzel sind fallweise Vorsperren vorhanden, die dann zur Talsperre gehören. Eine Vorsperre soll bei der Absenkung des Wasserspiegels in der Hauptsperre diesen im Stauwurzelbereich konstant halten, um den Belangen des Landschaftsbildes und der Naherholung Rechnung zu tragen.

#### **8.3.3.1 Wahl des Absperrbauwerks**

Das Absperrbauwerk einer Talsperre ist eine Staumauer oder ein Staudamm. Staumauern werden heute aus Beton und neuerdings auch aus Walzbeton in RCC-Bauweise (Roller Compacted Concrete) hergestellt. Der

Wasserdruck auf das Bauwerk wird entweder durch sein Eigengewicht (Gewichtsmauer) oder durch Pfeiler (Pfeilerstaumauer) auf die Talsohle übertragen oder durch Bogenwirkung in die Talflanken (Bogenstaumauer) eingeleitet.

Staudämme werden als Erd- oder Steinschüttdämme ausgeführt. Sie übertragen die aus dem Wasserdruck resultierenden Kräfte über Reibung in die Dammaufstandsfläche.

Die Art des gewählten Absperrbauwerkes hängt im Wesentlichen von der Topographie und Geologie des Sperrstandortes ab. So müssen Staumauern stets auf Fels gegründet werden, während Staudämme grundsätzlich auf nahezu jedem Untergrund gebaut werden können. Ein weiterer Gesichtspunkt bei der Wahl des Bauwerkstyps kann die Verfügbarkeit geeigneten Dammbaumaterials sein sowie das Vorhandensein brauchbarer Dichtungsstoffe bzw. Betonzuschlagstoffe. Im Grundsatz gilt, dass im Hinblick auf die benötigten sehr großen Materialmengen für den Stützkörper eines Dammes bereits Transportwege von wenigen Kilometer den Bau eines Dammes insgesamt unwirtschaftlich machen und den Bau einer Staumauer nahe legen.

Sowohl bei Mauern als auch bei Dämmen sind Sperrhöhen bis etwa 300 m erreicht worden (vgl. Tab. 8.2).

Name	Fluss	Land	Typ	Höhe in m	Fertigstellung
Rogun	Vakhsh	Tadschikistan	E/S	335	im Bau
Nurek	Vakhsh	Tadschikistan	E	300	1980
Grand Dixence	Dixence	Schweiz	G	285	1961
Inguri	Inguri	Georgien	B	272	1980
Vajont	Vajont	Italien	B	262	1960
Manuel M. Torres	Grijalva	Mexico	E	261	1980
Tehri	Bhagirathi	Indien	E	261	im Bau
Alvaro Obregon	Tenasco	Mexico	S	260	1946
Mauvoisin	Drance de B.	Schweiz	B	250	1957
Alberto Lleras C.	Guavio	Kolumbien	S	243	1989

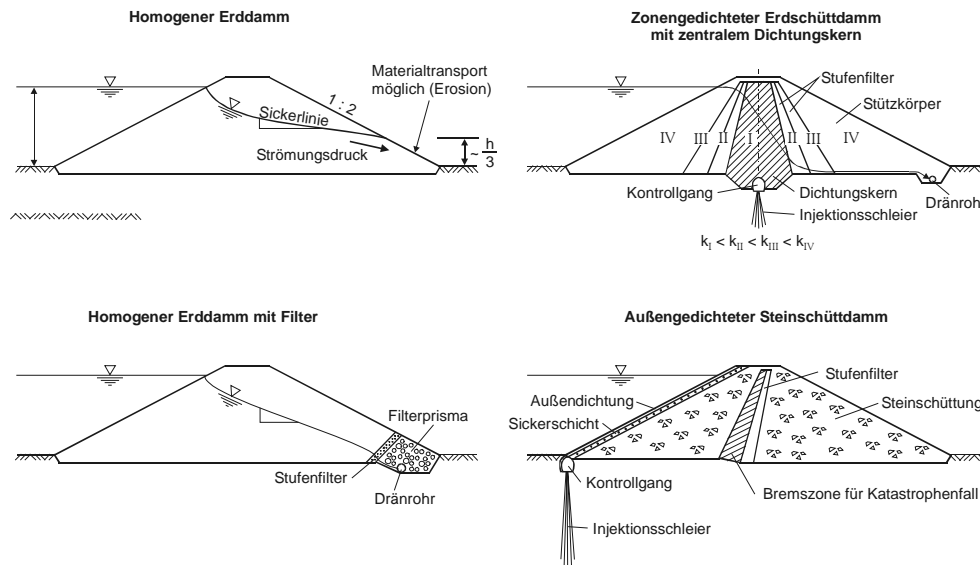
**Tab. 8.2** Übersicht der weltweit höchsten Talsperren (E-Erddamm, S-Steinschüttdamm, S-Schwergewichtsmauer, B-Bogenmauer, G-Schwergewichtsmauer)

### 8.3.3.2 Staudämme

#### Einteilung der Dämme und Konstruktionsprinzip

Ein Staudamm wird weitestgehend aus dem nahe (Entfernung von der Gewinnungs- zur Einbaustelle nur wenige Kilometer) der Sperrenstelle anstehenden Bodenmaterial gebaut. Im Hinblick auf den Transport des Dammbaumaterials zur Einbaustelle werden geschüttete oder gespülte Dämme unterschieden. Bei geschütteten Dämmen wird das Bodenmaterial an der Gewinnungsstelle gelöst, mittels LKW oder schienengebundener Systeme transportiert und nach erdbautechnischen Gesichtspunkten in Lagen an der Sperrenstelle eingebaut und verdichtet. Die vollständig gespülte Bauweise beinhaltet das Lösen des Materials mittels Druckwasserstrahl, den hydraulischen Transport in Rohrleitungen und den Einbau im Absetzverfahren. Aufgrund der heutigen Anforderungen an die Qualitätssicherung des Erdbaus und der Einbaukontrolle werden bei Neubauten ausschließlich geschüttete Dämme hergestellt.

Geschüttete Staudämme (Abb. 8.11) lassen sich im weitesten Sinn unterscheiden nach Erd- oder Steinschüttdämmen. Diese werden als sog. Zonendämme konstruiert, d.h. innerhalb des Querschnitts sind Erdstoffe in Zonen mit unterschiedlichen geotechnischen Eigenschaften (Dichtigkeit, Tragverhalten) angeordnet. Dem gegenüber können kleinere Staudämme (etwa See- und Flussdeiche) auch als homogene Dämme aus einem Bodenmaterial geschüttet werden. Das übliche Konstruktionsprinzip besteht jedoch aus einem innenliegenden Dichtungskern mit beidseitig außenliegenden Stützkörpern.



**Abb. 8.11** Einteilung der Dämme nach den Konstruktionsprinzip

Als Erdschüttdamm bezeichnet man ein Absperrbauwerk, wenn der verdichtete Boden mehr als die Hälfte des Gesamtvolumens bildet.

Ein Steinschüttdamm enthält ein Dichtungselement aus natürlichem Erdstoffen oder künstlichen Materialien (Asphalt, Beton, Geotextil). Mindestens 50% des restlichen Dammquerschnitts bestehen aus Kies und/oder Steinen zwischen 2 mm und 600 mm Korndurchmesser.

Die Vorteile eines Staudammes gegenüber einer Staumauer sind vielfältig und nachfolgend angegeben. Weltweit wurden daher etwa 80 % der Talsperren als Staudämme und zwar i.d.R. als Steinschüttdämme gebaut.

Die wichtigsten Eigenschaften können wie folgt zusammengefasst werden:

*Eigenschaften  
 Staudämme*

- Staudämme können unabhängig von der Talform (eng, weit, steil) gebaut werden.
- Staudämme lassen sich auf fast allen geologischen Formationen gründen.
- Durch Verwendung von weitgehend natürlichen Baustoffen ist der Bedarf an Hilfsbaustoffen (Zement, Asphalt etc.) vergleichsweise gering und der Transport zu den häufig entlegenen Baustellen unproblematisch.
- Der Entwurf kann sich den örtlichen Gegebenheiten (Topographie, Materialverfügbarkeit etc.) sehr gut anpassen und somit technisch wie preislich optimiert werden.

- Die Herstellung eines Staudamms ist mit einem hohen Mechanisierungsgrad möglich und auch in Entwicklungsländern sicher beherrschbar.
- Die Einheitspreise bei Erd- und Steinschüttdämmen haben sich in der Vergangenheit viel weniger erhöht als bei Massenbeton.
- Dämme sind gegenüber strategischen Einflüssen (Sabotage, Kriegseinwirkungen) vergleichsweise widerstandsfähig.

*Zonendämme/  
homogene Dämme*

Dämme mit einer Unterscheidung in Stützkörper und Dichtungsbereich sind den Zonendämmen zuzuordnen. Bei Dämmen, die durch ein dauerhaft eingestauten Speicherbecken charakterisiert sind, sind sie die Regel. Bei Deichen, die lediglich saisonal und kurzzeitig eingestaut werden, Hochwasser-rückhaltebecken oder auch bei Dämmen geringer Höhe ( $< 15$  m) ist es gelegentlich wirtschaftlich, einen homogenen Querschnitt zu schütten. Hier besteht der ganze Damm aus einheitlichem, wenig durchlässigem Schüttmaterial (Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k \approx 10^{-6}$  m/s). Da diese Dämme während des Einstaus durchströmt werden, muss der Fußbereich an der luftseitigen Böschung besonders geschützt werden.

*Erosion*

Anderenfalls tritt das Sickerwasser direkt aus der Böschung aus, so dass im Austrittsbereich die Gefahr von Bodenverlagerungen und Erosionen gegeben ist, was den Dammkörper progressiv schädigen kann.

In Abb. 8.11 sind die wichtigsten Teile eines Regelquerschnitts einer Dammkonstruktion angegeben. Übergangszonen zwischen dem feinkörnigen Material des Dichtungskerns und dem grobkörnigen des Stützkörper sind erforderlich, wenn sich die Durchlässigkeit der verschiedenen Zonen etwa um den Faktor 100 bis 1.000 unterscheidet. Dann kann infolge der Sickerströmung feinkörniges Material mobilisiert und in den Porenraum des grobkörnigeren Material verlagert werden, so dass eine sog. Suffosion einsetzt, wobei unerwünschte Hohlräume und damit bevorzugte Wasserwegigkeiten entstehen.

*Filterregel nach  
TERZAGHI*

Zur überschlägigen Abschätzung kann angenommen werden, dass bindige Erdstoffe (Dichtungskern) bis zu einem hydraulischen Gradienten von  $I \leq 5$  suffosionsstabil sind. Ein genauere Nachweis der mechanischen Filterfestigkeit bei Durchströmung erfolgt beispielsweise mit der Filterregel nach TERZAGHI.

Demnach ist ein feinkörniger Boden gegenüber einem grobkörnigem Boden bzw. Filter mechanisch filterfest, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4 \text{ bis } 5 \quad (8.9)$$

mit  $D_{15}$  Korn-Ø des grobkörnigen Bodens bei 15 % Siebdurchgang

$d_{85}$  Korn-Ø des feinkörnigen Bodens bei 85 % Siebdurchgang

Darüber hinaus soll insbesondere bei Drainageprismen und -schichten der grobkörnige Boden gegenüber dem feinkörnigen wasserdurchlässiger sein. Diese Forderung wird durch das Kriterium der hydraulischen Wirksamkeit nachgewiesen:

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 4 \text{ bis } 5 \quad (8.10)$$

mit  $d_{15}$  Korn-Ø des feinkörnigen Bodens bei 15 % Siebdurchgang

Daneben haben Übergangszonen die Aufgabe, große Steifigkeitsunterschiede zwischen dem Kern (z.B.  $E_s \approx 15 \text{ kN/m}^2$ ) und den Stützkörpern (z.B.  $E_s \approx 100 \text{ kN/m}^2$ ) auszugleichen.

## Dichtung und Sickerströmung im Damm

Unabhängig von der gewählten Dichtungsart und der Bauform ist bei Dämmen mit einer Sickerströmung im Querschnitt und im Untergrund bei Einstau zu rechnen. Die vorrangige Aufgabe der Dammdichtung ist daher die Reduktion der Sickerwassermengen auf ein tolerables Maß und die Kontrolle der Sickerlinie bzw. Reduktion der Druckhöhen. Dabei wird eine vollkommene technische Abdichtung in aller Regel nicht beabsichtigt und ist mit vertretbarem Aufwand auch nicht realisierbar, so dass hier von einer praktischen Abdichtung zu sprechen ist, mit einer gewissen Restdurchlässigkeit.

*Restdurchlässigkeit*

Um die praktische Dichtigkeit des gesamten hydraulischen Systems zu erreichen, ist einerseits der Dammkörper selbst zu dichten. Hierbei werden Dichtungselemente angeordnet, die nach ihrer Lage im Querschnitt in außenliegende Oberflächendichtungen und innenliegende Kerndichtungen unterschieden werden (Abb. 8.11). Andererseits ist in aller Regel auch der Dammuntergrund unterhalb der Aufstandsfläche abzudichten.

## Gründung der Dämme

Grundsätzlich können Dämme auf Lockergestein gegründet werden, nach Möglichkeit sollten jedoch stark setzungsempfindliche Schichten mit geringer Scherfestigkeit oder Wasserlöslichkeit ausgetauscht werden. Üblicherweise besteht das Flussbett aus Ablagerungen von sandigen und kiesigen Sedimenten, die von Schlufflinsen durchzogen sein können und eine insgesamt vergleichsweise geringe Lagerungsdichte aufweisen. Diese sog. Alluvionen können Mächtigkeiten in einer Größenordnung von einigen Dekametern besitzen, wobei ein vollständiger Austausch nur bis etwa 15 m bis 20 m Tiefe wirtschaftlich bzw. technisch machbar ist. Gegebenfalls sind Maßnahmen der Bodenverbesserung (Injektionen, Dynamische Intensivverdichtung etc.) vorzusehen.

### *Kontrollgang*

Der Dammbereich mit der Dichtung soll – wenn möglich – auf Fels gegründet werden. Ist dies realisierbar, empfiehlt es sich, als Übergangskonstruktion zwischen Felsoberkante und Dichtungselement des Dammkörpers einen Kontrollgang anzuordnen. Diese Betonbauwerk ist begehrbar mit einer lichten Innenhöhe von etwa 2,5 m bis 3 m und verläuft vom tiefsten Punkt der Aufstandsfläche über die Talflanken bis zur Dammkrone.

Im Wesentlichen hat der Kontrollgang drei Aufgaben:

- Tiefliegender Ausgangspunkt für (baubegleitende) Injektionen bzw. Nachinjektionen des Untergrundes
- Fassung des Sicker- /Dränagewassers
- Aufnahme der Messleitungen

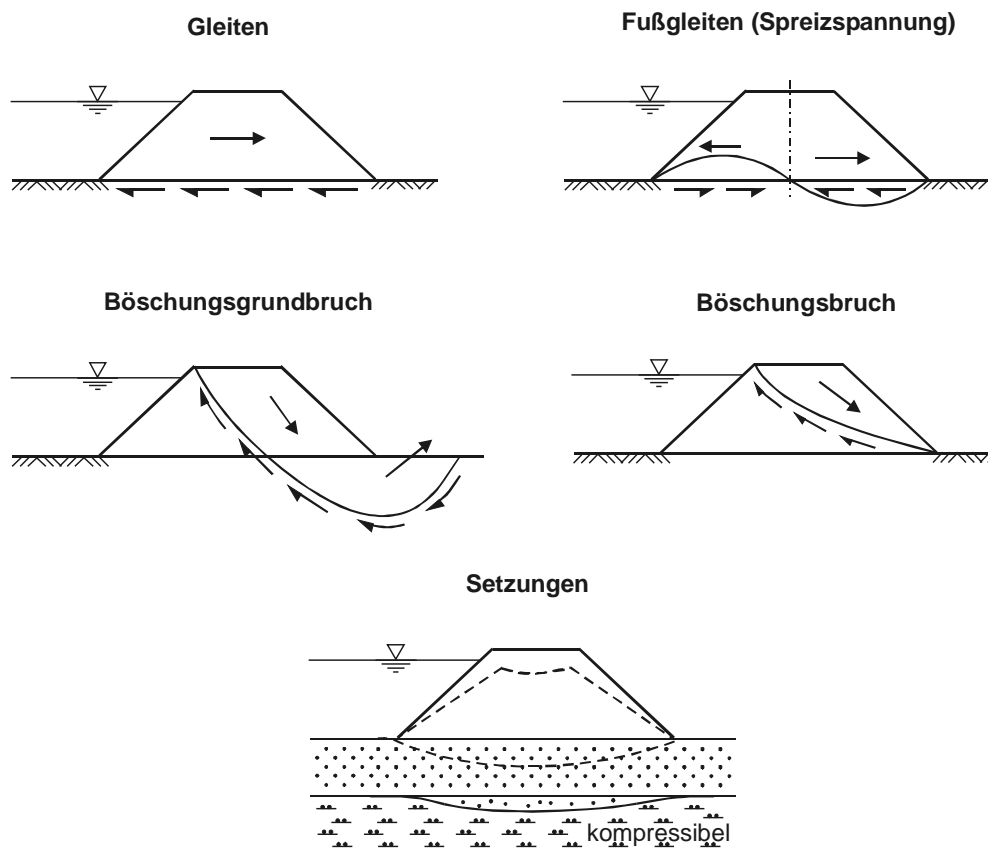
Der Kontrollgang stellt den Übergang von der Damm- zur Untergrunddichtung dar. Ein wesentlicher Vorteil der Anordnung eines Kontrollganges ist die Möglichkeit - nach einer Mindestüberschüttung - die Injektionen des Untergrundes begleitet zum Aufschütten des Dammes auszuführen. Anderenfalls sind diese vorab mit erheblicher Verlängerung der Bauzeit oder im Nachhinein mit erheblich mehr Bohrmeter, da der Damm selbst durchfahren werden muss, herzustellen.

Ist die Mächtigkeit der (durchlässigen) Alluvionen zu groß, ist es häufig zweckmäßig, den Bereich zwischen Dammaufstandsfläche und Felshorizont mit einer Schlitzdichtwand abzudichten. Ist der Fels fräsbar, so können die Alluvionen und Fels in einem Arbeitsgang mit einer Schlitzwandfräse (bis etwa 200 m Tiefe) abgedichtet werden.



## Standsicherheitsnachweise

Um die dauerhafte Stabilität eines Dammes zu gewährleisten, ist eine Reihe von statischen und hydraulischen Standsicherheitsnachweisen zu führen. Abb. 8.12 gibt einen Überblick über die wesentlichen Versagensmechanismen bzw. Verformungsnachweise.



**Abb. 8.12** Versagensmechanismen und Verformungsnachweise bei Dämmen im Schema

Beim Entwurf eines Staudammes sollten auch die möglichen Verformungen der unterschiedlichen Konstruktionsteile (Erdstoffe, Beton, Asphaltbeton, Geokunststoffe etc.) abgeschätzt werden. Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente (FEM) sind hier v.a. zur Abschätzung des Einflusses variierender Bodenkennwerte hilfreich. Hierdurch können Schwachstellen rechtzeitig erkannt werden.

### 8.3.3.3 Staumauern

Ist eine Gründung auf Fels möglich, sind Staumauern eine Alternative zu Dammbauwerken.

Staumauern haben folgende Vorteile:

- Bei extremen Hochwasserereignissen können sie bei entsprechender Ausbildung der Krone ohne Gefahr für die Talsperre überströmt werden.
- Möglicherweise entfallen Kosten für eine separate HW-Entlastungsanlage, wenn die Entlastung über die Mauerkrone erfolgen kann.
- Entnahmeleitungen können einfach durch die Mauer geführt werden.
- Insbesondere Gewichtsstaumauern widerstehen Erdbeben ohne Schäden, die zum sofortigen Verlust der Standfestigkeit führen.

Im Wesentlichen unterscheidet man zwischen:

- Gewichtsstaumauern
- Bogenstaumauern
- Pfeilerstaumauern

### Wahl des Mauertyps

Staumauern wurden traditionell aus Bruchsteinen oder Ziegeln hergestellt. Heute verwendet man wegen der hohen Ansprüche an die Festigkeit, Dichtigkeit und schnellen Baufortschritt fast ausschließlich (Stahl-) Beton. Entscheidend für die Wahl des Mauertyps ist neben der Geologie insbesondere die Topographie (Talform). Bei tief eingeschnittenen engen Tälern (V-Form) bevorzugt man wegen der geringen Betonkubatur Bogenstaumauern. Voraussetzung ist allerdings, dass die Talflanken in der Lage sind, die Druckkräfte aus Bogenwirkung aufzunehmen. Bei breiten Tälern ist eine Einleitung der Kräfte in die Talflanken nicht möglich. Hier werden Gewichtsstaumauern und Pfeilerstaumauern geplant. Kombinationen aus verschiedenen Mauertypen sind gelegentlich bei sehr breiten Tälern mit einheitlichem Querschnitt gebaut worden.

## **Gewichtsstaumauern**

Wie im Fall der festen Wehre tragen Gewichtsstaumauern die Kräfte aus Wasserdruck durch ihr Gewicht in den Untergrund ab. Die äußere Form entspricht auch hier einem Grunddreieck, das bis zum höchsten Stauziel reicht.

*Keine  
Zugspannungen*

Ein Bemessungskriterium ist, dass bei einer Gewichtsstaumauer im Bereich der Gründung keine Zugspannungen auftreten sollen. Das bedeutet, dass auch bei Volleinstau und ggf. zu berücksichtigendem Sohlwasserdruck am wasserseitigen Mauerfuß noch Druckspannungen wirken müssen. Diese Forderung ergibt sich aus dem Sachverhalt, dass die auf der Wasserseite vorgenommene Abdichtung zwischen Mauer und Fels nicht aufreißen darf.

Als Konsequenz aus dieser Forderung ergeben sich die zulässigen luftseitigen Neigungen  $b/h = 0,85$  bei vollem Sohlwasserdruck und  $b/h = 0,67$  bei Ansatz eines Injektionsschleiers und einer Abminderung des Sohlwasserdrucks auf 20 % des Staudrucks.

Bei Gewichtsstaumauern werden Standsicherheitsnachweise mit dem sog. Kragträgermodell oder mit einem kontinuumsmechanischen Modell durchgeführt. Zwar wird bei dem vereinfachten Nachweis mit dem Kragträgermodell die Beteiligung des Untergrundes am Tragverhalten nur ungenau erfasst, jedoch sind auch die nach der FEM ermittelten Spannungen und Verformungen von der Qualität der Eingabewerte zur Erfassung des Materialverhaltens abhängig und daher mit Unsicherheiten behaftet. Eine ausführliche Zusammenstellung der Einwirkung (Lasten) und Lastfälle, der Widerlagerzustände und der Bemessungsfälle ist in DIN 19700 enthalten.

## **Bogenstaumauern**

Anders als Gewichtsstaumauern, die statisch wie vertikale Scheiben die Kräfte in den Untergrund übertragen, wirken Bogenstaumauern wie horizontale Scheiben bzw. Ringabschnitte, welche die Druckkräfte in die Talflanken ableiten. Zu den ursprünglichen Formen zählen die Zylindermauern und die Gleichwinkelmauern. Sie werden bei einfachen, annähernd symmetrischen Talformen realisiert. Mit Hilfe moderner Rechenverfahren lassen sich heute auch komplexe Mauerformen statisch berechnen bzw. die Form in statischer und wirtschaftlicher Hinsicht optimieren. Dadurch

wird eine optimale Anpassung an die jeweilige Topographie sowie an das Tragverhalten des Untergrundes und der Talflanken erreicht. Das Ergebnis sind Bogenstaumauern, die nicht nur in der Horizontalen, sondern auch in der Vertikalen gekrümmt sind und die zudem über die Höhe veränderliche Krümmungen aufweisen.

*Zylindermauer*

Kennzeichnendes Merkmal der Zylindermauern ist der gleichbleibende Radius über die Höhe, bezogen auf die Wasserseite der Mauer. Daraus ergibt sich wasserseitig eine lotrechte Wand. Wegen des nach unten zunehmenden Wasserdrucks vergrößert sich die Wanddicke linear mit der Wassertiefe.

*Ringformel*

Bei Ansatz der Ringformel für die Tragwirkung ergibt sich bei Minimierung der Querschnittsfläche ein optimaler Öffnungswinkel der Zylindermauer rechnerisch zu  $133^\circ$ . Leichte Abweichungen von diesem Optimalwert sind dabei ohne nennenswerten Einfluss (bei  $120^\circ$  erhöht sich der Massenbedarf um 1 %), so dass Winkel zwischen  $120^\circ$  und  $140^\circ$  in Betracht kommen. Dies gibt eine gewisse Freiheit bei der Anpassung an die topographischen Gegebenheiten des Tales.

*Gleichwinkelmauer*

Bei der Gleichwinkelmauer bleibt der Winkel, unter dem die Druckkraft in die Talflanken eingetragen wird, annähernd konstant. Dies ist für die Tragwirkung der Mauer besonders günstig. Als Ergebnis der Konstruktion ergibt sich allerdings eine Mauer, die auch in der Vertikalen gekrümmt ist und daher einen hohen Schalungsaufwand erfordert. Günstige Öffnungswinkel liegen zwischen  $100^\circ$  und  $130^\circ$ .

## **Pfeilerstaumauer**

Bezüglich der Lastabtragung entsprechen Pfeilerstaumauern den Gewichtsstaumauern. Eine wasserseitige Stauwand stützt sich auf Mauerpfeiler ab, welche die Kräfte in den Untergrund abtragen. Der besondere Vorteil dieser Konstruktion gegenüber den Gewichtsstaumauern liegt im reduzierten Betonbedarf. Gleichzeitig erhöht sich jedoch der Schalungsaufwand erheblich. Zusätzlich muss die Stauwand sorgfältig abgedichtet werden, was bei unterschiedlichen Verformungen bzw. Verschiebungen der einzelnen Pfeiler Probleme bereiten kann.

Wegen der reduzierten Masse einer Pfeilerstaumauer im Vergleich zu einer massiv ausgeführten Gewichtsstaumauer wird die Stauwand zur Wasser-

seite hin geneigt ausgebildet. Dadurch kann die nun vertikal auf die Mauer nach unten wirkende Komponente der Wasserdruckkraft einen Teil des fehlenden Eigengewichtes der Mauer ersetzen. Hinzu kommt, dass der Sohlwasserdruck unter der Mauer erheblich reduziert ist, weil er sich unmittelbar hinter der Stauwand entspannen kann. An die Dichtigkeit und Erosionsbeständigkeit des Felsuntergrundes müssen jedoch erhöhte Anforderungen gestellt werden.

### 8.3.3.4 Untergrundabdichtung

Der Untergrund von Talsperren besteht aus Festgestein oder Lockergestein/Alluvionen, die bei Einstau eine gewisse Wasserwegigkeit aufweisen und eine Sickerströmung unterhalb der Dammaufstandsfläche zulassen. Während sich bei Lockergesteinen eine Strömung im Porenraum (Porenströmung) ausbildet, ist bei Felsuntergrund insbesondere der oberflächennahe Bereich verwittert und zerklüftet, so dass sich die Sickerströmung an den vorhandenen Klüften und Spalten orientiert (Kluftströmung), während das Festgestein an sich demgegenüber i.d.R. als weitgehend wasserdicht anzusehen ist.

*Sickerströmung*

Insgesamt kann diese Sickerströmung zu folgenden Problemen führen:

*Probleme infolge Sickerströmung*

- für die globale Standsicherheit: Sohlwasserdruck reduziert die aufnehmbare Reibung in der Sohlfuge
- für die lokale Standsicherheit: hydraulischer Grundbruch im luftseitigen Austrittsbereich der Strömung sowie Erosions- und Suffosionsprobleme
- Verlust an Speicherwasser (von besonderer Bedeutung bei Trinkwassertalsperren)

Talsperrenuntergründe sind demnach nahezu ausnahmslos bis auf eine tolerable Restwasserwegigkeit abzudichten. Während Lockergesteine über die gesamte Schichtdicke abzudichten sind, wird die erforderliche Tiefe der Abdichtung bei Festgesteinen anhand der (tiefenabhängigen) Wasserdurchlässigkeit festgelegt. Meist reichen hier Dichtungsschirme bis in eine Tiefe, die der jeweiligen Kronenhöhe über der Gründungssohle entspricht.

Der Abdichtungsumfang wird anhand der Ergebnisse eines sog. Wasserdurchlässigkeitstest (WD-Test) festgelegt. Dabei werden Kernbohrungen in

*WD-Test*

den Fels abgeteuft ( $\varnothing > 56$  mm), ein Testabschnitt von etwa 5 m Länge gegenüber der übrigen Bohrstrecke durch hydraulische Packer abgedichtet und Wasser über die Bohrungswandungen bei etwa 1 MPa Druck abgepresst.

*LUGEON-Kriterium*

Die Wasseraufnahmefähigkeit des anstehenden Fels ist dabei ein Maß für seine Klüftigkeit bzw. Wasserwegigkeit und wird in der Einheit *UL* (*Unit Lugeon*) angegeben. Dabei ist ein Lugeon definiert als:

$$1 \text{ UL} = \frac{1 \text{ ltr Wasser}}{1 \text{ min Testzeit} \cdot 1 \text{ m Teststrecke}} \quad (8.11)$$

Die Festlegung eines zulässigen *Lugeon*-Wertes folgt projektspezifischen Randbedingungen, jedoch lassen sich in Abhängigkeit der Stauhöhe und damit des Gefährdungspotenzials der Anlage folgende Anhaltswerte angeben:

H < 30 m: Dichtung erforderlich bei Wasseraufnahme > 3 UL

H > 30 m: Dichtung erforderlich bei Wasseraufnahme > 1 UL

*Kernbohrverfahren*

Daneben bietet das stets zu wählende Kernbohrverfahren die Möglichkeit, die gewonnenen Kernproben in Augenschein zu nehmen und das Bohrloch mit optischen Methoden (Kamera) zu befahren, um die Beschaffenheit festzustellen.

Die Abdichtungsmaßnahme selbst kann im Lockergestein mit Schlitz-, Spund-, Schmalwänden oder Poreninjektionen und im Festgestein mit Kluffinjektionen durchgeführt werden. Im Allgemeinen wird die Injektionstechnologie mit Zementsuspensionen und/oder chemischen Lösungen auf Wasserglasbasis als Verpressmittel eingesetzt. Dabei werden die Aufschlussbohrungen für die WD-Tests zugleich als Injektionspunkte herangezogen.

Bei geringer Festigkeit des Festgesteins ( $q_u \leq 100 \text{ MN/m}^2$ ) und bei Lockergestein werden auch gelegentlich auch Schlitzwände im Fräsverfahren eingesetzt.

### 8.3.3.5 Mess- und Kontrolleinrichtungen an Talsperren

Eine Talsperre muss so geplant werden, gebaut und überwacht werden, dass ein Versagen nach menschlichem Ermessen auszuschließen ist. Der Überwachung einer Talsperre (*Monitoring*) kommt daher eine zentrale Bedeutung zu. Für die Beurteilung der Messergebnisse ist es insbesondere

bei Dämmen, aber auch bei Mauern, vorteilhaft, den zeitlichen Verlauf der Bewegungen in vier Abschnitte zu unterteilen:

- Bauzeit, die bei Dämmen die gesamte Schüttung und Verdichtung und bei Mauern den vollständigen Betoneinbau umfasst
- Schonzeit zwischen Damm- bzw. Mauerfertigstellung erstem Einstau
- Stauzeit für den ersten vollständigen Einstau (Speicherbeckenfüllung)
- Betriebszeit, während des eigentlichen Beckenbetriebes

Zur Regelausstattung einer Talsperre gehören zahlreiche Messinstrumente, wie sie beispielhaft für einen kerngedichteten Erddamm in der Tabelle 8.3 angegeben sind:

Messgröße	Messinstrument	Messintervall
Erddruckspannungen	Erddruckaufnehmer	Kontinuierlich
Verformungen	Verschiebungspegel, Geodätische Messungen	Jährlich, kontinuierlich in der Bau- und Stauzeit
Porenwasserdruckspannungen im Damm und Untergrund	Piezometrische Porenwasserdruckaufnehmer	Wöchentlich
Gebirgswasserdruckspannungen	Pegel	Wöchentlich
Stauhöhe	Pegel	Kontinuierlich
Niederschlag	Regenmesser	Täglich

**Tab. 8.3** Mess- und Kontrolleinrichtungen für kerngedichtete Erddämme (s. auch DVWK 1991)

### 8.3.3.6 Betriebseinrichtungen und Nebenanlagen

Zu einer Talsperre gehören neben der Sperre als Hauptbauwerk eine Reihe von Betriebseinrichtungen und Nebenanlagen, die der Nutzung und der Sicherheit der Anlage dienen. Entnahmeanlagen erlauben die gezielte Abgabe des gespeicherten Wassers und bei Bedarf die Entleerung des Betriebsraumes. Entlastungsanlagen führen den nicht speicherbaren Zufluss

bei Hochwasser schadlos ab. Bei Erddämmen sollten die Betriebseinrichtungen grundsätzlich in den Talflanken (Fels) geführt und nicht direkt durch den Dammkörper geführt werden, um der Gefahr von Erosion zu begegnen.

### **Entnahmeanlagen**

Mit Hilfe von Betriebsauslässen wird das Wasser aus dem Speicherbecken für die jeweilige Nutzung (Energiegewinnung, Trinkwasser) entnommen. Die Entnahmebauwerke bestehen aus verschließbaren Einlaufkonstruktionen, die das Wasser in Druckstollen oder –leitungen einströmen lassen. Bei instabilen Hängen oder bei schwebstoffhaltigen Speicherzuflüssen mit Verlandungsgefahr haben sich besonders bei Trinkwassertalsperren Einlauffürme bewährt. Über den Rohwasserabzug aus unterschiedlichen Tiefen lässt sich die Qualität des späteren Trinkwassers maßgeblich beeinflussen. In den anderen Fällen wird der Betriebsauslass etwa in Höhe von 1/3 bis 1/2 der Einstauhöhe angeordnet, um späteren Verlandungsproblemen zu begegnen.

Mit dem Grundablass kann das Speicherbecken bis auf den sog. Totraum entleert werden. Unter Beachtung der (n-1)-Regel lässt sich der Grundablass auch zur Ableitung von Hochwasser nutzen. In der Bauzeit wird der spätere Grundablass häufig als Umleitungsstollen genutzt, um eine trockene Baugrube erstellen zu können. In diesem Fall wird der Grundablass knapp über dem ursprünglichen Flussniveau angeordnet.

### **Entlastungsanlagen**

Der nicht speicherbare Teil eines Hochwasserzuflusses muss schadlos abgeführt werden. Für Staudämme gilt der Grundsatz, dass sie ohne einen besonderen Schutz der Dammkrone (Kronensicherungsbauwerk) und der luftseitigen Böschung nicht überströmt werden dürfen, da der Damm sonst zerstört werden könnte. Bei Dämmen bedient man sich überwiegend besonderer Überlaufkonstruktionen, die an der Talflanke angeordnet sind, also i.d.R. eines Hangkanals mit anschließender Schusrinne und Tosbecken. Diese Anlagen verfügen über große Abflussreserven, da die Leistung eines Überfalls bei zunehmendem Wasserstand überproportional steigt. Eine Alternative sind Turmbauwerke im Stausee mit einem Einlauffrichter. Der Abfluss mündet bei diesen Entlastungsanlagen in einen Freispiegelstollen, der bei Überlastung als Druckstollen wirkt und somit



stollen, der bei Überlastung als Druckstollen wirkt und somit kaum Abflussreserven hat. Aufgrund dieser Gegebenheit werden HW-Entlastungstürme nur bei Talsperren mit relativ kleinen und genau berechenbaren Hochwasserzuflüssen vorgesehen.

Bei RCC-Bauweisen (s. Abschnitt 8.3.3.1) ist die Abführung von Hochwasser auch direkt über die Dammkrone in entsprechend großzügig bemessenen Betongerinnen und bei kleineren Erddämmen mit Stauhöhen bis 15 m in erosionsstabil ausgebildeten Rauhgerinnen (Landschaftsgestaltung) zulässig.

Bei Staumauern sind grundsätzlich die gleichen Konstruktionen wie bei Dämmen möglich. Allerdings bietet sich hier wegen der entfallenen Erosionsprobleme die Möglichkeit, das Hochwasser direkt über die Mauer zu leiten (Überfall) oder durch Öffnungen in der Mauer abzuführen (Druckabfluss). Die Energiedissipation kann entweder durch ein Tosbecken oder über eine Sprungschanze erfolgen, bei der das Wasser versprüht und der Tröpfchenwiderstand in der Luft genutzt wird.

## 8.4 Wasserkraftanlagen

### 8.4.1 Unterteilung nach der Anlagenform

Wasserkraftanlagen bestehen in der Regel aus einem Staubaauwerk (vgl. Abschnitt 8.1), einem Kraftwerk sowie weiteren baulichen Anlagen und können nach konstruktiven, technischen, betrieblichen oder statischen Aspekten unterteilt werden.

In konstruktiver Sicht sind ► Staukraftwerke und ► Umleitungskraftwerke zu unterscheiden:

#### 8.4.1.1 Staukraftwerke

Sind das Staubaauwerk und das Kraftwerk an der gleichen Stelle angeordnet, so wird die Anlage als Staukraftwerk bezeichnet. Abb. 8.13 zeigt ein Flusstaukraftwerk, Abb. 8.14 ein Talsperrenstaukraftwerk.

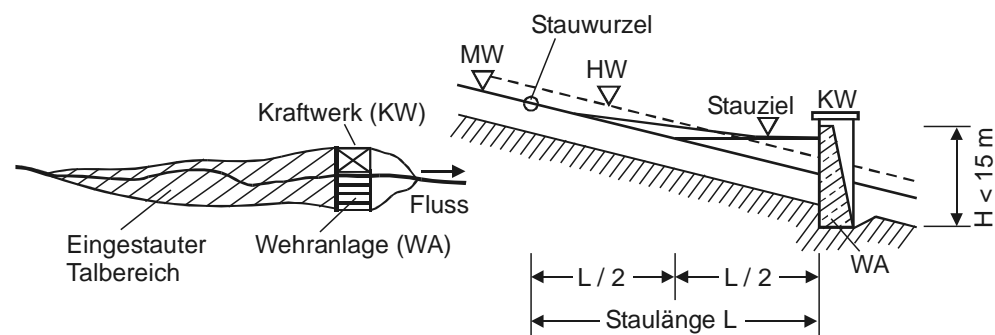


Abb. 8.13 Flusstaukraftwerk im schematischen Schnitt

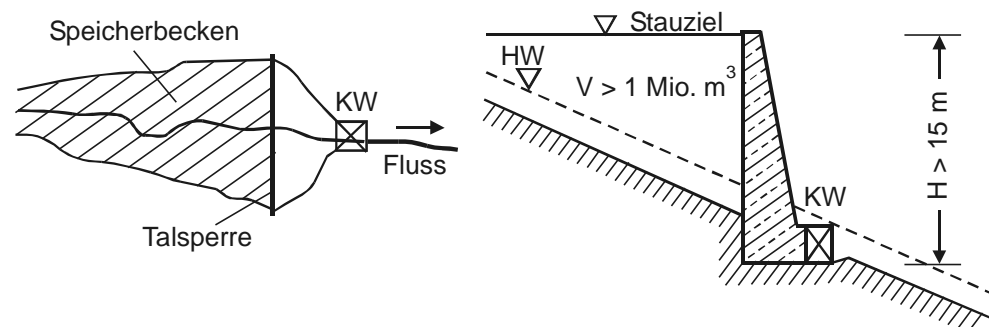


Abb. 8.14 Talsperrenstaukraftwerk im schematischen Schnitt

Folgende Bauformen sind bei Staukraftwerken üblich:

#### Blockkraftwerk

Stauwerk und Kraftwerk bilden einen Baublock und werden als zusammenhängendes Kraftwerk bezeichnet. Diese Anordnung kommt jedoch nur bei günstigen Verhältnissen mit der gesamten ursprünglichen Flussbreite aus. Hochwasser-, Geschiebe- und Eisgangverhältnisse erfordern meist eine entsprechende Aufweitung des Flussbetts, um die ursprüngliche Verengung des Durchflussquerschnitts durch die Einbauten auszugleichen. Das ursprüngliche Flussbett wird daher durch eine Bucht aufgeweitet.

#### Buchtenkraftwerk

Bei nicht ausreichender Flussbreite wird das Flussbett an der Kraftwerksstelle aufgeweitet. In der Bucht liegt entweder das Kraftwerk oder das Staubauwerk, häufig sind besondere bauliche Maßnahmen zur Gewährleistung günstiger Anströmverhältnisse erforderlich.

#### Zweiteiliges Kraftwerk

Das Staubauwerk befindet sich in Staumitte und wird von zwei Kraftwerksblöcken seitlich eingerahmt.

#### Pfeilerkraftwerk

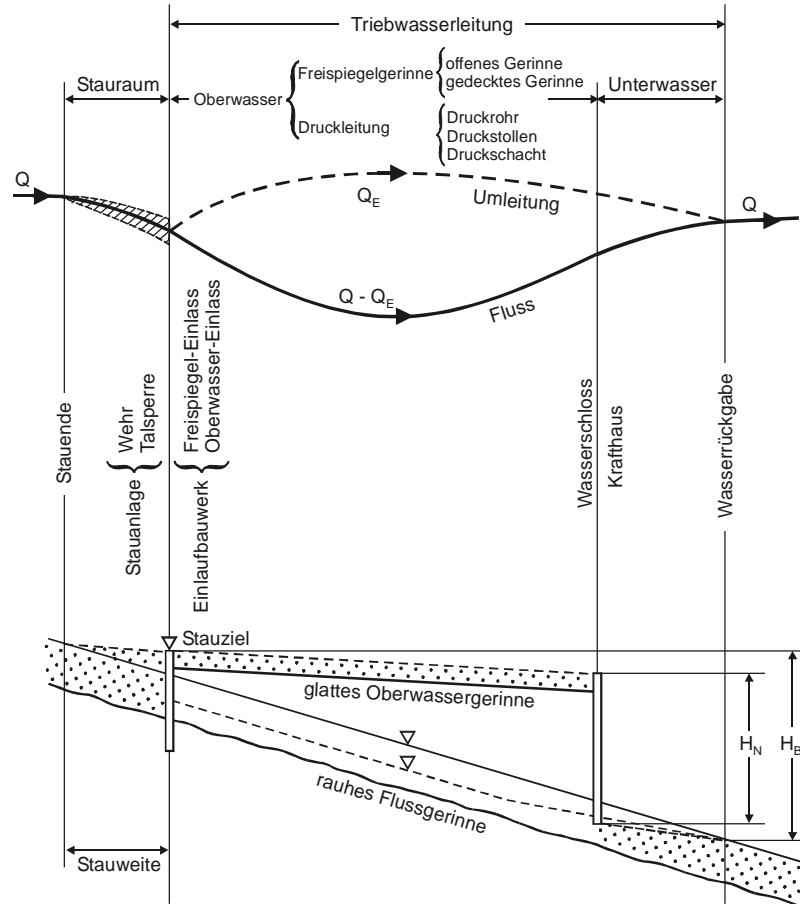
Das Kraftwerk wird in einzelne Turbinen aufgelöst, die in den verbreiterten Wehrpfeilern untergebracht sind, hierbei ergeben sich besonders günstige Anströmverhältnisse bei geringer Bauwerksbreite.

#### Unterströmtes Kraftwerk

Hierbei handelt es sich um eine besonders am Fluss Lech entwickelte Bauform, bei der das Kraftwerk unter dem Staubauwerk angeordnet ist.

### **8.4.1.2 Umleitungskraftwerke**

Bei Umleitungskraftwerken liegt das Kraftwerk immer unterhalb des Staubauwerks. Das Triebwasser wird oberhalb des Staubauwerks gefasst (etwa durch eine Überlaufrinne, Einlauftrumpete, Einlauffurm etc.) und in einer Triebwasserleitung (Werkkanal, Oberwasserkanal) zum unterstrom liegenden Kraftwerk geleitet (Abb. 8.15).



**Abb. 8.15** Schema eines Umleitungskraftwerkes im Grundriss (oben) und im Schnitt (unten)

Gegenüber Staukraftwerken wird bei Umleitungskraftwerken zusätzlich zum Aufstau an der Sperrenstelle Fallhöhe durch die Umleitung gewonnen. Umleitungskraftwerke kommen als Fluss- und vor allem als Talsperrenkraftwerke vor.

Die Umleitungsstrecke kann je nach Topographie als Freispiegelgerinne oder als Druckstollen ausgebildet werden. Bei besonders günstigen topographischen Verhältnissen ist die Umleitungsstrecke wesentlich kürzer als der ursprüngliche Flusslauf.

Die (zusätzliche) Gewinnung von Fallhöhe durch die Umleitung kann sich durch folgende Maßnahmen ergeben:

- Verkürzung des Flusslaufes, begradigte Umleitungsstrecke
- Reduzierung der Reibungsverluste durch künstliche und damit vergleichsweise glatte Auskleidungen der Triebwasserleitungen und -gerinne aus Asphalt, Beton, Stahl etc.

- Herabsetzung der Neigung der Umleitungsstrecke

### 8.4.1.3 Weitere Unterteilungen von Wasserkraftwerken

- Unterteilung nach der Fallhöhe

In der Literatur wird häufig folgende Unterteilung nach der Fallhöhe von Wasserkraftwerken vorgenommen (z.B. MOSONYI 1966):

**Niederdruckanlagen** Fallhöhe  $H < 15$  m

**Mitteldruckanlagen** Fallhöhe  $15 \text{ m} < H < 50$  m

**Hochdruckanlagen** Fallhöhe  $H > 50$  m

- Einteilung nach energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten

**Einzelkraftwerke** versorgen einen bestimmten Verbraucherkreis selbstständig.

**Verbundkraftwerke** speisen das Verbrauchernetz im Zusammenwirken mit anderen Kraftwerken.

**Grundlastkraftwerke** erzeugen Strom, der zeitlich kaum „bewirtschaftet“ werden kann.

**Spitzenlastkraftwerke** erlauben zeitlich eine gute Bewirtschaftung der Stromerzeugung.

- Unterteilung nach der Betriebsart

**Laufkraftwerke** sind Kraftwerke ohne Bewirtschaftung des Triebwassers durch Speicherung. Das Wasser wird nach Angebot abgearbeitet.

*Ohne Bewirtschaftung*

**Speicherkraftwerke** ermöglichen die Bewirtschaftung des Triebwassers. Nach Umfang der Speicherung werden Tages-, Wochen-, Saison- und Überjahresspeicher unterschieden. Speicherkraftwerke haben kein festes Stauziel.

*Mit Bewirtschaftung, ohne festes Stauziel*

## 8.4.2 Wasserkraftmaschinen

### 8.4.2.1 Allgemeines

Wasserkraftmaschinen setzen (mittelbar) potentielle bzw. (unmittelbar) kinetische Strömungsenergie in mechanische Arbeit um. Bezüglich der Wir-

*Wasserräder/  
Wasserturbinen*

kungsweise werden Wasserturbinen (Strömungsmaschinen) und Wasserräder (Schwerkraftmaschinen) unterschieden. Für die gewerbliche Energieerzeugung sind heute ausschließlich Wasserturbinen üblich.

Bei der Wasserturbine bewirkt die im Wasserstrom vorhandene und vorwiegend als Druckenergie verfügbare Strömungsenergie (s. Gl. 8.1) die Rotation eines Laufrades. Diese mechanische Energie wird zum Antrieb eines Generators und somit zur Erzeugung elektrischer Energie genutzt. Durch die strömungsgünstige Gestaltung der Triebwasserzu- sowie -abführungsleitungen und der Schaufelradgitter des Laufrades kann die Energieumwandlung mit einem hohen Wirkungsgrad erreicht werden.

Wasserturbinen unterschiedlicher Bauart werden seit etwa 150 Jahren gebaut. Mit der Möglichkeit, elektrische Energie durch Fernleitungen zu übertragen, wurden überwiegend die automatisch regelbaren Francis- und Pelton-turbinen weiterentwickelt. Ab 1920 kam die Kaplan-turbine hinzu. Neben diesen Grundbauarten bestehen einige weitere Entwicklungen, etwa die Ossberger-Turbine, die im Zuge des Baus von Klein- und Kleinstwasserkraftwerken (1 KW bis 1.000 KW) verwendet wird.

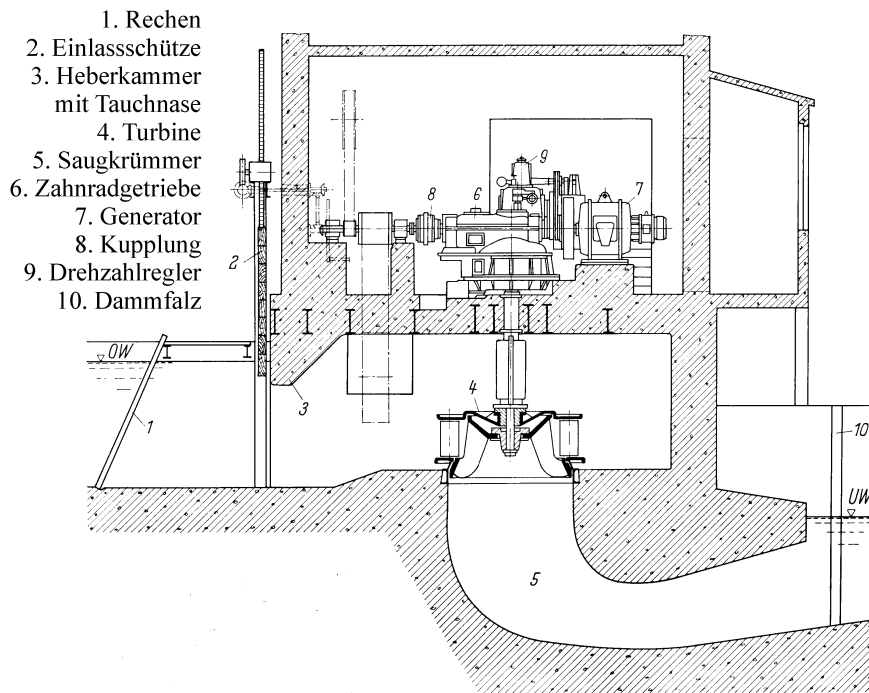
### 8.4.2.2 Einteilung der Turbinen

Kennzeichnend für die Wirkungsweise, Einteilung und Bauart der Turbinen sind das Druckgefälle, die Durchflussrichtung des Wasserstroms im Laufrad sowie die Beaufschlagung des Laufrades durch den Wasserstrom. Demnach werden Überdruck- und Gleichdruckturbinen sowie Sonderbauformen, etwa die Durchströmturbinen, unterschieden.

#### Überdruckturbinen

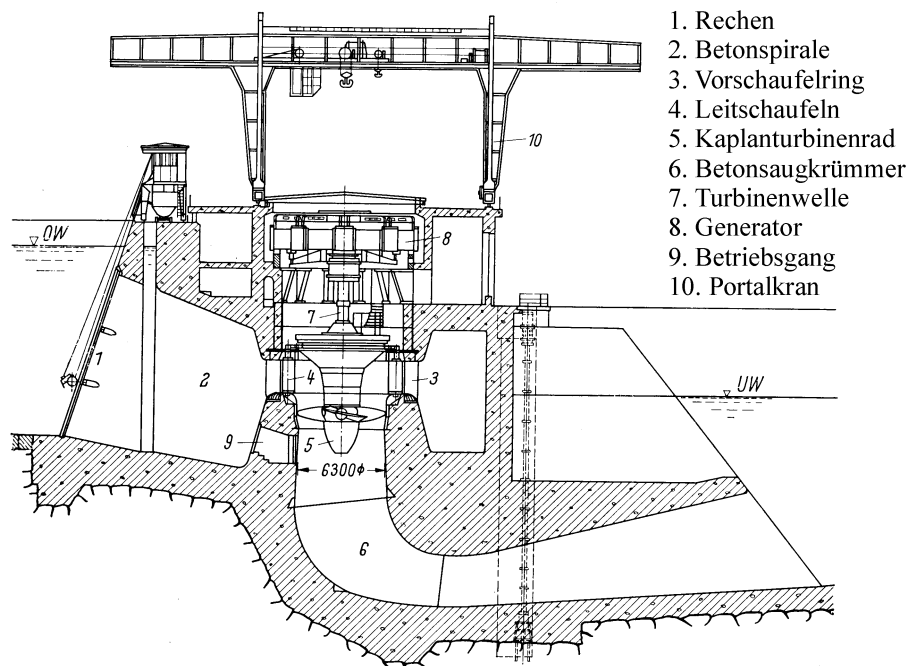
*Geschlossenes System*

Bei Kaplan- und Francis-Turbinen handelt es sich um geschlossene Systeme, die sich vollständig im Wasser befinden. Der Druckunterschied zwischen Turbinenoberseite und -unterseite versetzt das Laufrad in eine Drehbewegung. Die Energieumwandlung in Überdruckturbinen erfordert außer dem Laufrad ein Leitrad vor und einen Saugschlauch hinter dem Laufrad. Die grundsätzliche Bauweise von Francisturbinen ist in Abb. 8.16 beispielhaft dargestellt. Das Francis-Laufrad besteht aus einer Vielzahl von durch Schaufelwände getrennten Kanälen, die zusammen ein relativ enges, radial-axial durchströmtes Schaufelradgitter bilden.



**Abb. 8.16** Schnitt durch ein Krafthaus mit einer Francisturbine (QUANTZ u. MEERWART 1963)

Bei der Kaplan turbine (Abb. 8.17) besitzt das Laufrad vier bis acht tragflügelartige, verstellbare Schaufeln und wird axial durchströmt. Bauweisen mit nicht verstellbaren Laufradschaufeln heißen Propellerturbinen.



**Abb. 8.17** Schnitt durch ein Krafthaus mit einer Kaplan turbine (QUANTZ u. MEERWARTH 1963)

*Saugrohr/  
Saugkrümmer*

Das Saugrohr bzw. der Saugschlauch soll den Wasserstrom mit möglichst geringem Drall zum Unterwasser leiten, wobei ein großer Teil der im Laufrad nicht direkt umsetzbaren Geschwindigkeitsenergie indirekt in die Energieumwandlung einbezogen wird.

Bei Rohrturbinen fließt das Wasser der Turbine in einer Rohrleitung zu. Rohrturbinen sind im maschinentechnischen Teil aufwendiger konstruiert als Turbinen mit Einlaufspirale und Saugkrümmer. Wegen der geradlinigen Wasserführung entfallen aber die bei den anderen Turbinen aufwendigeren Baukörper zur Zu- und Abfuhr des Wassers mit gekrümmten und bezüglich der Querschnittsfläche stetig veränderlichen Leitungen. Damit kann auch die Gründungstiefe des Bauwerks reduziert werden.

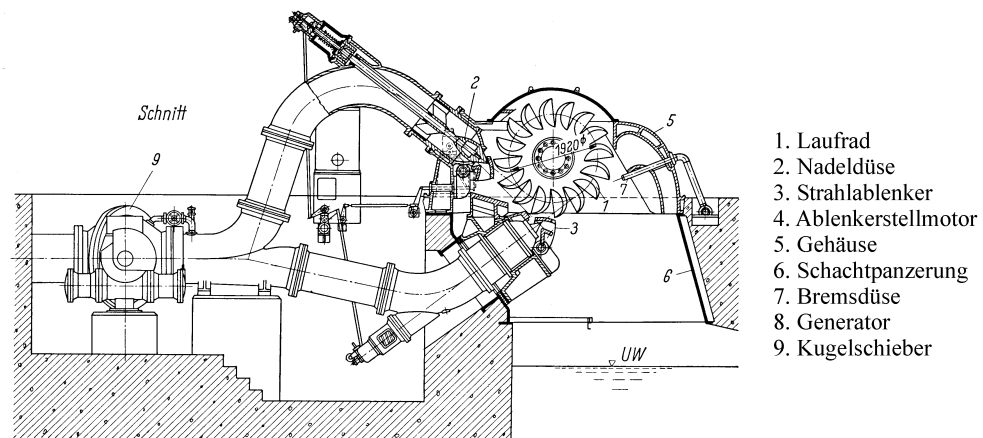
*Kavitation*

Besonders zu beachten bei Überdruckturbinen ist die Höhenlage der Turbinenschaufeln. Bei zu hoher Anordnung in bezug zum Unterwasser besteht die Gefahr der Kavitation, d.h. der Dampfblasenbildung und im weiteren dann -implosion, verbunden mit einem erodierenden Angriff auf die Materialoberflächen der Turbinenschaufeln und sonstiger Einbauteile.

Gleichdruck- bzw. Freistrahlturbinen

*Atmosphärischer  
Druck*

Kennzeichnend für Gleichdruck- bzw. Freistrahlturbinen ist, dass das Triebwasser unter sehr hoher Geschwindigkeit die Zuleitung über eine oder mehrere Düsen verlässt und unter atmosphärischen Druck auf die Turbinenschaufeln trifft, wodurch das Laufrad in Rotation versetzt wird. Energetisch wird somit der Impuls des mit großer Geschwindigkeit aus den Düsen austretenden Wassers genutzt (Abb. 8.18)



**Abb. 8.18** Schnitt durch eine Pelton-turbine mit liegender Welle und zwei Düsen (QUANTZ u. MEERWARTH 1963)



Es wird bei diesem Prinzip also die Druckhöhe des Wassers und somit seine potentielle Energie in Form kinetischer Energie genutzt. (s. GL. 8.1). Freistrahlturbinen arbeiten besonders effizient bei sehr großer Energiehöhe  $H$  und daraus resultierender großer Austrittsgeschwindigkeit  $v$  des Wasserstrahls in der Größenordnung von 100 m/s.

*Kinetische Energie*

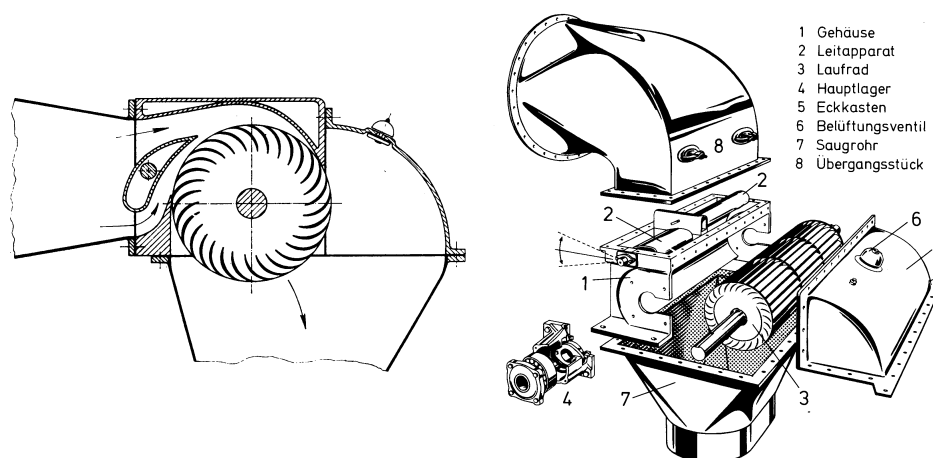
Grundsätzlich werden Tangentialturbinen und Durchströmturbinen unterschieden. Im Bereich größerer Fallhöhen herrscht heute die um 1880 von PELTON entwickelte Tangentialturbine (Peltonturbine) vor. Der aus einer durch Düsenadel und Strahlabweiser regulierbaren Düse am Ende der Druckrohrleitung austretende Düsenstrahl beaufschlagt das Laufrad tangential im Bereich der aus Halbellipsoidschalen zusammengesetzten Schaufeln. Die Turbine muss so hoch über dem Unterwasser angeordnet sein, dass das Laufrad auf keinen Fall eintaucht (Freihang). Das Laufrad kann mit stehender oder liegender Welle angeordnet werden und wird bei liegender Welle mit ein oder zwei Düsen beaufschlagt. Bei stehender Welle können bis zu sechs Düsen angeordnet werden.

*Tangential-  
/Durchströmturbinen*

### Durchströmturbinen

Insbesondere bei Kleinwasserkraftwerken im Nieder- und Mitteldruckbereich hat sich die Durchströmturbine (Ossberger-Turbine) nach Abb. 8.19 bewährt. Das walzenförmige Laufrad ähnelt einem Wasserrad. Es ist in mehrere Zellen aufgeteilt, die je nach Wasserdargebot beaufschlagt werden können. Damit erreicht die Durchströmturbine auch bei Teilbeaufschlagung ein guten Wirkungsgrad. Das Laufrad hat etwa 30 gekrümmte Schaufeln, denen Wasser über einen Leitapparat radial zugeführt wird.

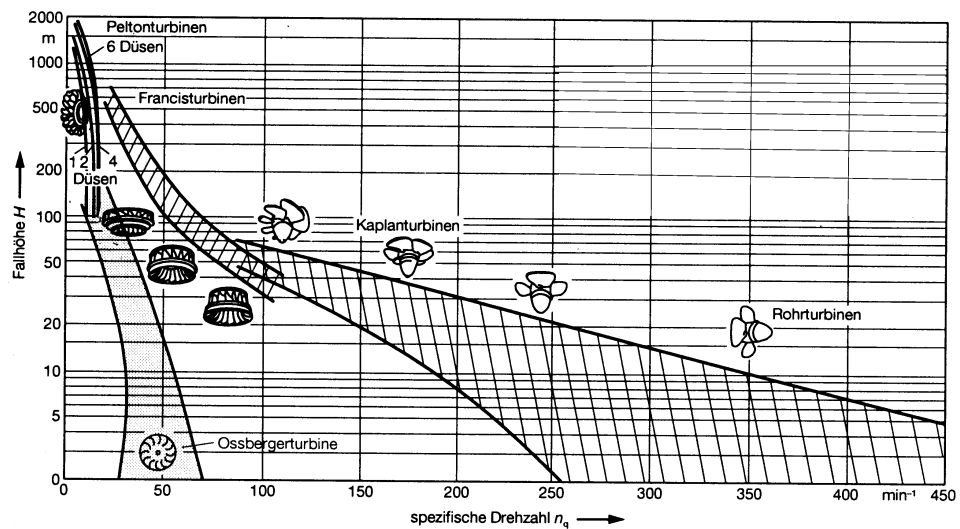
*Ossberger-Turbine*



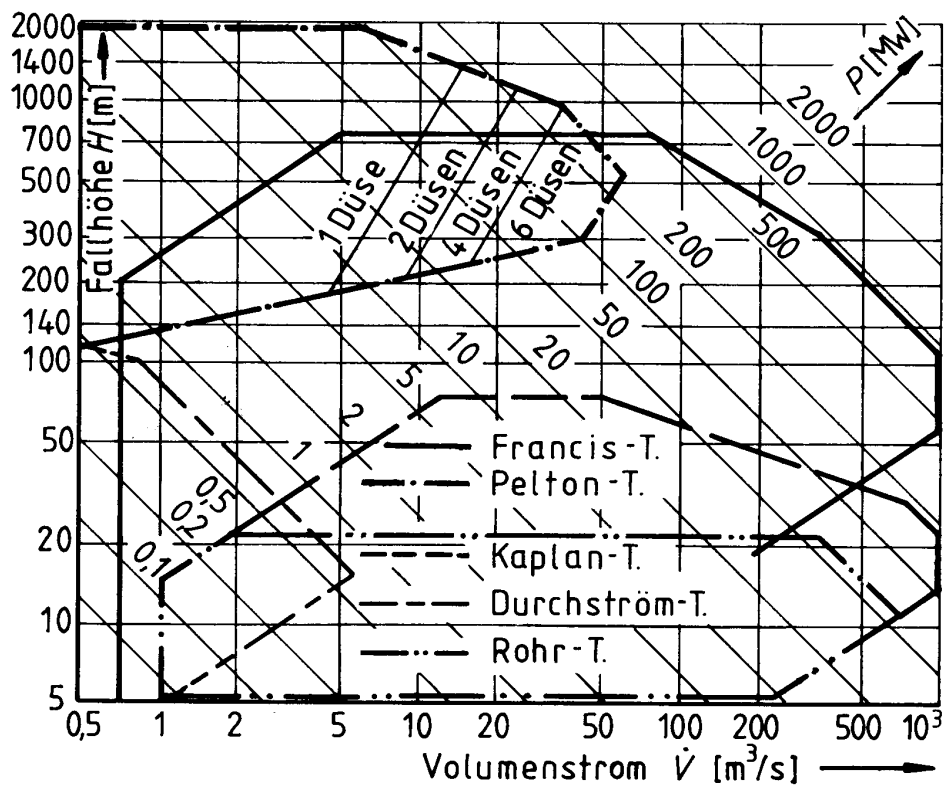
**Abb. 8.19** Aufbau der Ossberger-Turbine

Die Anströmung ist sowohl horizontal als auch vertikal möglich. Der Einsatzbereich der Turbine liegt im Bereich von wenigen Litern pro Sekunde bis etwa  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bei einem Fallhöhenbereich zwischen 1 m und 200 m sind Leistungen bis etwa 1.500 kW erzielbar.

Die Abb. 8.20 und 8.21 zeigen die Einordnung der Ossberger-Turbine im Vergleich mit den anderen hier behandelten Turbinenbauformen mit den Betriebsparametern Fallhöhe sowie spezifische Drehzahl und Wasserstrom.



**Abb. 8.20** Einsatzbereiche der verschiedenen Turbinentypen in Abhängigkeit der Fallhöhe und der spezifischen Drehzahl (nach Fa. Escher-Wyss)



**Abb. 8.21** Einsatzbereiche der verschiedenen Turbinentypen in Abhängigkeit der Fallhöhe und des Volumenstroms/Zuflusses

Systembedingt tritt bei den Durchströmturbinen keine Kavitation auf. Auch ist sie relativ unempfindlich gegen Verunreinigungen und Treibgut im Triebwasser. Die Robustheit der Durchströmturbine, verbunden mit geringem Wartungsbedarf, haben für eine rasche Verbreitung, auch in Entwicklungsländern gesorgt.

## 8.5 Literatur

DIN 4048 (01.1987), Teil1: Wasserbau, Begriffe, Stauanlagen

DIN 19700: Stauanlagen, insbesondere folgende Teile:

Teil 10 (01.1986): Gemeinsame Festlegungen

Teil 11 (08.2001): Talsperren

Teil 13 (09.2001): Staustufen

DIN 19702 (10.1992): Standsicherheit von Massivbauwerken  
im Wasserbau

DVWK (1991): Mess- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der  
Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen.

Merkblätter zur Wasserwirtschaft, H. 222

DVWK (1992): Asphalt dichtungen für Talsperren und Speicherbecken.

Merkblätter zur Wasserwirtschaft, H. 223

ICOLD (1974): Lessons from Dam Incidents.

ICOLD, Paris

KUTZNER (1996): Erd- und Steinschüttdämme für Stauanlagen.

Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1. Aufl.

LUDIN (1938): Wasserkraftanlagen.

Verlag Julius Springer, Berlin, 1. Aufl.

MOSONYI (1966): Wasserkraftwerke, Teil 1 und 2.

VDI-Verlag Düsseldorf, 2. Aufl.

PRESS (1959): Stauanlagen und Wasserkraftwerke, Teil I bis III.

Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, 2. Aufl.

PRESS u. SCHRÖDER (1966): Hydromechanik im Wasserbau.

Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, 1. Aufl.

QUANTZ u. MEERWARTH (1963) ; Wasserkraftmaschinen.

Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1. Aufl.

USBR (1960): Design of small dams.

United States Bureau of Reclamation, 1. Aufl.

ZIELKE (1990): Strömungsmechanik für Bauingenieure, Teil I und II

Institut für Strömungsmechanik der Universität Hannover

ZILCH et al. (2002): Handbuch für Bauingenieure, Kap. 5.3

Springer-Verlag

Über die oben genannten Literaturstellen hinaus wird auf die Publikationen folgender Institutionen zu allen Belangen der Stau- und Wasserkraftanlagen besonders hingewiesen:

BAW: Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

DVWK: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.,  
Bonn

ICOLD: International Commission on Large Dams

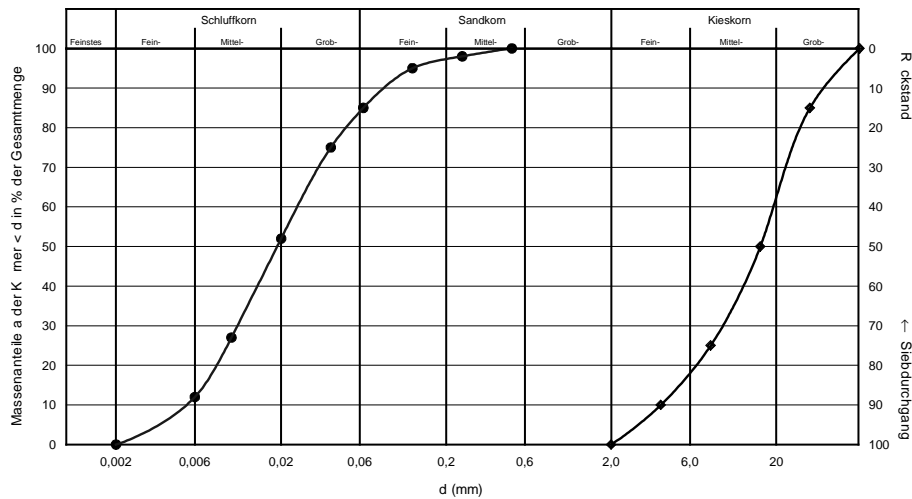
## Einsendaufgaben zur Studieneinheit

### Fragen zu Kapitel 8

1. Ein Fluss weist in einem Abschnitt folgende Parameter auf:
  - Sohlenhöhe: NN +2.200 m
  - Flussspiegel: NN + 2.205 m
  - Mittlere Fließgeschwindigkeit: 2,5 m/s
  - Abflussstrom:  $15 \text{ m}^3/\text{s}$
  - a) Berechnen Sie nach BERNOULLI die gesamte Energiehöhe eines Wasservolumens an der Sohle gegenüber einem Bezugsniveau von NN +2.200 m.
  - b) Berechnen Sie die potentielle Energiehöhe bei dem Bau einer Talsperre und Aufstau des Flusses um 200 m relativ zum Bezugsniveau nach a).
  - c) Berechnen Sie die potentielle Energiehöhe bei einem im Anschluss an das Staubaufwerk zusätzlich zur Talsperre nach b) angeordneten geraden Umleitungsstollen von 10.000 m Länge und einem Gefälle von 3 %, relativ zum Auslass der Umleitungsstrecke.

Hinweis für a) bis c): Energieverluste sind nicht zu berücksichtigen.
2. Berechnen Sie überschlägig die Ausbauleistung eines Kraftwerkes nach 1c) bei einem Wirkungsgrad der gesamten Anlage von 75 %.
3. Berechnen Sie die konjugierenden Wassertiefen eines Tosbeckens mit der Breite  $B = 20 \text{ m}$  und der Eintiefung  $e = 0,5 \text{ m}$  für den Hochwasserabfluss  $Q_{\text{HW}} = 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  sowie den Einstaugrad und die Tosbeckenlänge.

4. Im nachfolgenden Diagramm ist die Korngrößenverteilung (KGV) für zwei Dammbaustoffe angegeben. Sind die Materialien untereinander mechanisch filterfest? Geben Sie ggf. die KGV von hydraulisch wirksamen und mechanisch filterfesten Übergangsböden nach der TERZAGHI-Formel an.



5. Nennen Sie Verfahren und Materialien, um einen Erddamm und den Untergrund in Abhängigkeit der jeweiligen Eigenschaften abzudichten.