



UNIVERSITY
OF ARCHITECTURE
CIVIL ENGINEERING
AND GEODESY

UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY SOFIA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT -WIEN

Diplomarbeit

Master Thesis

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

eines Diplom-Ingenieurs

Die Gestaltung von Flusskraftwerken

Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Reinhard Prenner

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

Svetoslav Georgiev

Matrikelnummer 1129548

Zh.k. Druzha-1 68, 1592 Sofia, Bulgarien

Wien, am

eigenhändige Unterschrift

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei jenen bedanken, die mich in meiner Studienzeit unterstützt haben und mir den Abschluss des Studiums damit ermöglicht haben.

Ganz herzlich möchte ich mich bei Herrn Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Reinhard Prenner bedanken. Durch seine ausgezeichnete Betreuung und wertvollen Anregungen hat er das rasche Vorankommen erst ermöglicht. Stets hat er sich für die Lösung allfälliger Probleme und Unklarheiten Zeit genommen.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Freunden und Studienkollegen, die mich in meiner Studienzeit begleitet haben. Es sind im Laufe meiner Zeit in Wien viele Freundschaften entstanden, die ich auch in Zukunft nicht missen möchte.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die durch ihre moralische und finanzielle Unterstützung das Studium erst ermöglicht haben. Stets haben sie an mich geglaubt und mich in schwierigen Zeiten aufgebaut.

Kurzfassung

Der Mensch ist auf der Suche nach Möglichkeiten, nicht nur Energie zu sparen, sondern sie auch möglichst umwelt- und klimafreundlich zu erzeugen. Deswegen wird vermehrt Augenmerk auf den erneuerbaren Energiequellen gelegt. Heutzutage spielt nur die Wasserkraft eine bedeutende Rolle bei der umweltfreundlichen Energieerzeugung.

In Rahmen vorliegender Diplomarbeit wird insbesondere die bauliche und konstruktive Gestaltung von Flusskraftwerke erläutert. Flusskraftwerke gehören zu den Niederdruckanlagen und werden direkt in den Flusslauf gebaut.

Wasserkraftanlagen teilen sich gemäß der Fallhöhe in drei Haupttypen – Nieder-, Mittel- und Hochdruckanlagen. Im allgemeinen Teil werden die zwei Arten von Niederdruckanlagen kurz beschrieben - nämlich die Flusskraftwerke und ihre Sonderform – die Ausleitungskraftwerke.

Der Hauptteil der Diplomarbeit beschäftigt sich mit den wichtigsten Bauteilen einer Niederdruckanlage. Wehr und Krafthaus bilden zusammen ein komplettes Flusskraftwerk. Es werden im Detail alle Haupt- und Nebenbauwerke diskutiert, noch ihre Bemessung und die Rolle, die sie für die richtige Arbeit eines Kraftwerkes spielen.

Die Anordnung eines Kraftwerks in einem Fluss unterscheidet sich in Bezug auf seine Lage zum Wehr. Einen spezifischen Aufbau wird gemäß den Eigenschaften und der Lage des Flusses gewählt. Noch werden die Besonderheiten jeder Art und die Voraussetzungen seiner Verwendung beschrieben.

Abstract

Man is looking for ways not only to save energy, but also to generate it environmentally and climate-friendly as much as possible. This is why increasing attention is paid to renewable energy sources. Nowadays only hydropower plays an important role in environmentally friendly energy generation.

Within the framework of the present master thesis, the structural design of river power plants will be explained. River power plants are part of the low-pressure systems and are built directly into the river.

Hydropower plants divide according to the fall height to three main types - low, medium and high pressure systems. In the general section the two types of low-pressure systems are briefly described - namely, the river power plants and their special form - the discharge power plants.

The main part of the thesis deals with the most important components of a low-pressure system. Weir and powerhouse together form a complete river power plant. All main and secondary structures, their assessment and the role they play for the correct work of a power plant are discussed in detail.

The arrangement of a power station in a river differs in relation to its position to the weir. A specific structure is chosen according to the characteristics and position of the river. The peculiarities of each type and the conditions for their use are described.

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung	1
1.1. Gegenstand der Untersuchung	1
1.2. Typen von Wasserkraftwerke	2
1.2.1. Niederdruck-Wasserkraftanlage.....	2
1.2.2. Mitteldruck-Wasserkraftanlage.....	3
1.2.3. Hochdruck-Wasserkraftanlage.....	3
2. Typen von Niederdruckanlagen	5
2.1. Flusskraftwerke	5
2.2. Ausleitungskraftwerke	7
3. Allgemeines über Flusskraftwerke	11
3.1. Hauptbauwerke.....	11
3.1.1. Krafthaus.....	12
3.1.1.1. Bernoulli-Gleichung.....	13
3.1.1.2. Ausbauleitung und Energieermittlung.....	13
3.1.2. Rechen und Rechenreinigungsanlage	16
3.1.3. Wehranlage.....	19
3.1.3.1. Aufgaben von Flusssperrern.....	20
3.1.3.2. Arten von Flusssperrern	21
3.1.3.2.1. Feste Wehre	21
3.1.3.2.2. Bewegliche Wehre.....	24
3.1.3.2.3. Kombinierte Wehre	28
3.1.4. Tosbecken	29
3.1.5. Schiffschleuse.....	31
3.1.5.1. Schleusung.....	32
3.1.5.2. Füll- und Entleerung	34

3.1.5.3. Schleusentore.....	35
3.2. Nebenbauwerke	37
3.2.1. Grundablass und Kiesschleuse.....	37
3.2.2. Fischpassagen	37
3.2.2.1. Fischaufstiegshilfen	37
3.2.2.2. Fischabstiegshilfen	38
4. Entwurf von Flusskraftwerke	39
4.1. Blockbauweise bzw. Buchtenkraftwerke	39
4.1.1. Verbreiterung des Flussbettes	39
4.1.2. Entnahmebauwerk	44
4.1.3. Trennpfeiler.....	45
4.2. Zwillings- und Inselkraftwerke.....	46
4.2.1. Warum Zwillingskraftwerk	46
4.2.2. Anordnung am Fluss	48
4.2.3. Nachteile	48
4.2.4. Inselkraftwerke	49
4.3. Pfeilerkraftwerke.....	49
4.3.1. Anordnung am Fluss.....	49
4.3.2. Pfeiler- und Wehrausbildung.....	50
4.4. Überströmbare Flusskraftwerke.....	52
4.4.1. Anordnung am Fluss	52
4.4.2. Krafthaus.....	53
4.4.3. Vorteile und Nachteile	54
4.5. HYDROMATRIX®	56
4.5.1. Konzept.....	56
4.5.2. Warum HYDROMATRIX®	58
4.5.3. Anwendungskriterien.....	61

4.5.4.	Anwendungstypen	62
4.5.4.1.	Schifffahrtsanlagen.....	62
4.5.4.2.	Bewässerungsanlagen	63
4.5.4.3.	Einlaufbauwerke	63
4.5.4.4.	Wehre und ungenutzte Schleusen.....	64
4.6.	StrafloMatrixTM	65
4.7.	Bewegliches Kraftwerk mit Roth-Turbinen – drehbare Rohrturbinen.....	67
4.7.1.	Probleme von Niederdruckanlagen	68
4.7.2.	Idee und Ziele	69
4.7.3.	Rentabilität	70
4.7.4.	Umströmung – mehr Leistung.....	70
5.	Zusammenfassung	73
6.	Literatur	75

1. Einleitung

Der Begriff Wasserbau bezeichnet Maßnahmen, technische Eingriffe und Bauten im Bereich des Grundwassers, der Oberflächengewässer und der Meeresküsten. Heute wird für dieses Fachgebiet auch manchmal die Bezeichnung Hydrotechnik benutzt. Resultat des Wasserbaus sind die Wasserbauwerke, fachlich auch wasserwirtschaftliche Anlagen genannt, sowohl als technische Anlage wie als Veränderung des Terrains.

Die einzelnen Wasserbau-Elemente einer Wasserkraftanlage wie Wehr, Geschiebefang, Einlaufbauwerk, Fischpass und Auslaufbauwerk sollen im engen Zusammenhang mit der Anlage, dem Gewässer und dem Standort abgestimmt werden.

Erst, wenn Wasser in die Tiefe fällt, kann seine Kraft genutzt werden – dieses genau nennt die Physik Lageenergie und bezeichnet dadurch die im Wasser steckende Kraft. Je mehr Wasser je tiefer fällt, desto ist der Nutzen höher. In Fließrichtung betrachtet, beinhaltet der prinzipielle Aufbau einer Wasserkraftanlage die folgenden Bestandteile:

- Krafthaus
- Wehr
- Schiffschleuse

1.1. Gegenstand der Untersuchung

Die Erzeugung von billiger und umweltfreundlicher elektrischer Energie zur Erhöhung des Lebensstandards der Menschheit ist ein Gebot der Stunde und sollte den Zielen des Klimaschutzes genügen. Der von Wasserkraftwerken erzeugte Strom trägt auch bestens zur Nachhaltigkeit bei.

Um bei der Planung eines Wasserkraftwerks die beste Wahl zu treffen, muss man zunächst die Grundmerkmale der verschiedenen Kraftwerkstypen kennen.

Anhand vorliegender Literatur wird in dieser Arbeit ein Überblick über die Möglichkeiten der Gestaltung eines Flusskraftwerks diskutiert. Erläutert werden die grundlegenden Prinzipien und Regeln für die Planung von Wasserkraftwerken. Es

wird ein Vergleich zwischen den verschiedenen Typen und ihren Vorteilen und Nachteilen in bestimmten Situationen gemacht.

Natürlich, um vorwärts zu kommen, sollte man immer die neuesten und besten Technologien verwenden. Diese neuen Entwicklungen werden vorgestellt. Ihre Umsetzung auf bereits existierende Strukturen sowie auf neue Projekte.

1.2. Typen von Wasserkraftwerke

Gemäß der Fallhöhe werden die unterschiedlichen Wasserkraftanlagen in Nieder-, Mittel- und Hochdruckanlagen unterteilt.

1.2.1. Niederdruck-Wasserkraftanlage

Wasserkraftanlagen mit Fallhöhen bis ca. 15 m werden als Niederdruckanlagen bezeichnet. Wegen der geringeren, energietechnisch nutzbaren Höhenunterschiede ist dieses meist bei größeren Durchflüssen verwendbar. Auch noch werden vor allem Bauweisen mit geringen hydraulischen Fließhöhenverlusten bevorzugt.

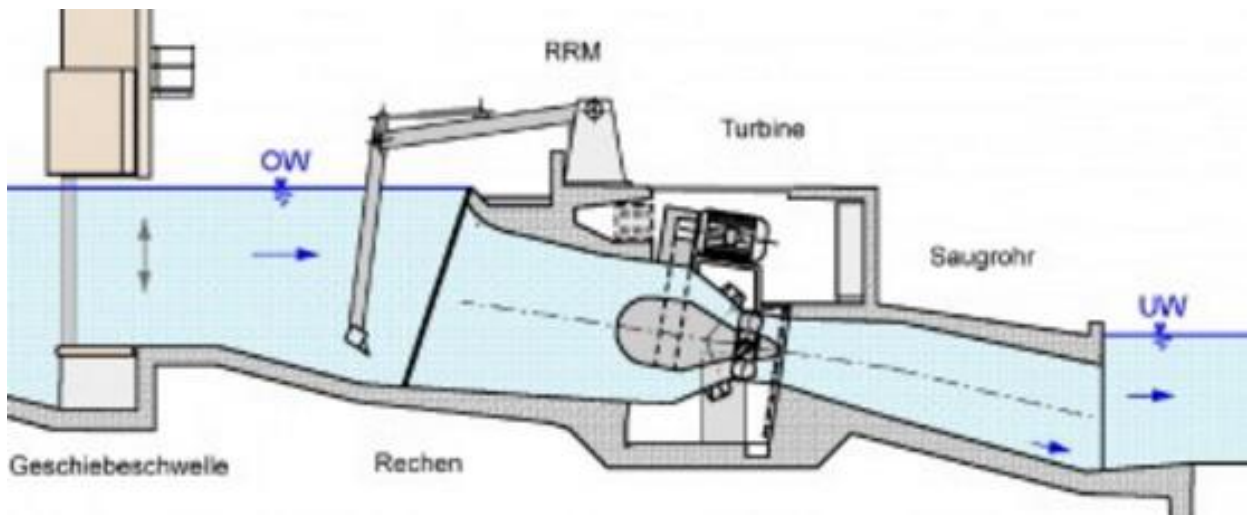


Abb. 1.1 Längsschnitt durch eine Niederdruck-Wasserkraftanlage [5]

1.2.2. Mitteldruck-Wasserkraftanlage

Als Mitteldruckanlagen gelten die Wasserkraftanlagen mit Fallhöhen von ca. 15 m bis ca. 50m. Oft erfolgt die Wasserentnahme zum Schutze der Turbine(n) im mittleren Stauhöhenbereich und einem Feinrechen.

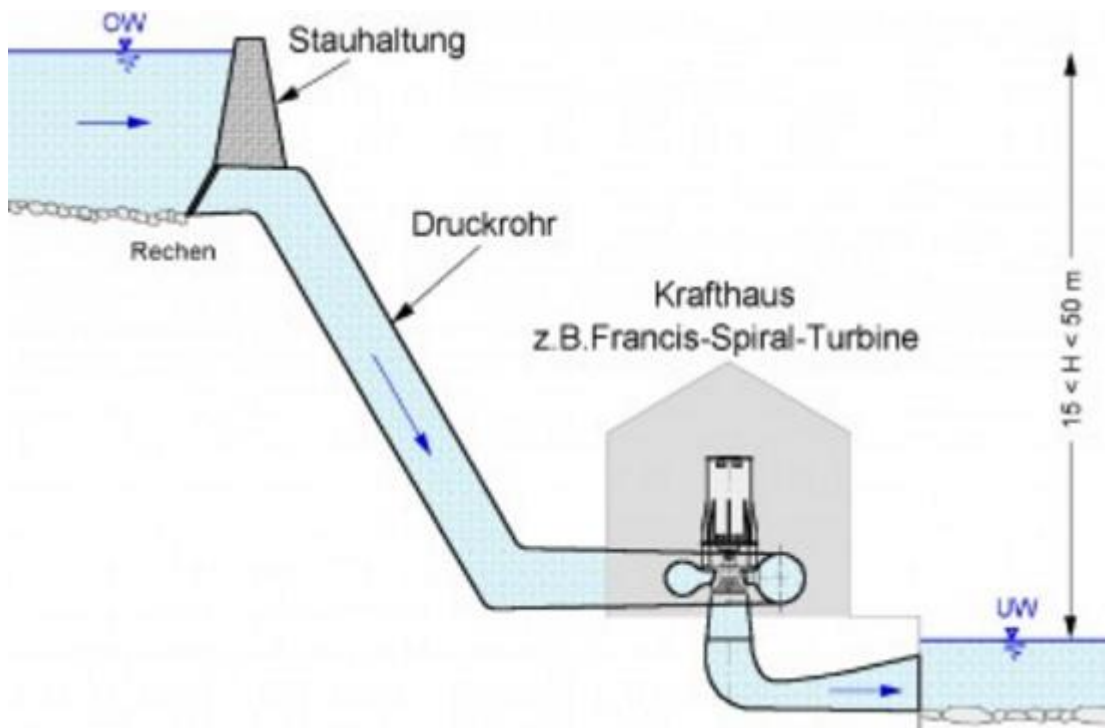


Abb. 1.2 Längsschnitt durch eine Mitteldruck-Wasserkraftanlage [5]

1.2.3. Hochdruck-Wasserkraftanlage

Wasserkraftanlagen mit Fallhöhen von über 50 m bezeichnet man als Hochdruckanlagen. Genügend für eine sinnvolle Energiegewinnung sind bereits geringe Wassermengen. Bei der Wasserentnahme soll der Zugang größerer Mengen zum Geschwemmsel und vor allem zur Feingeschiebe zu der Turbine vermieden werden. Falls nicht unterliegen diese, wegen der großen Drücke und hohen Fließgeschwindigkeiten in den Turbinen, einem übermäßigen Verschleiß.

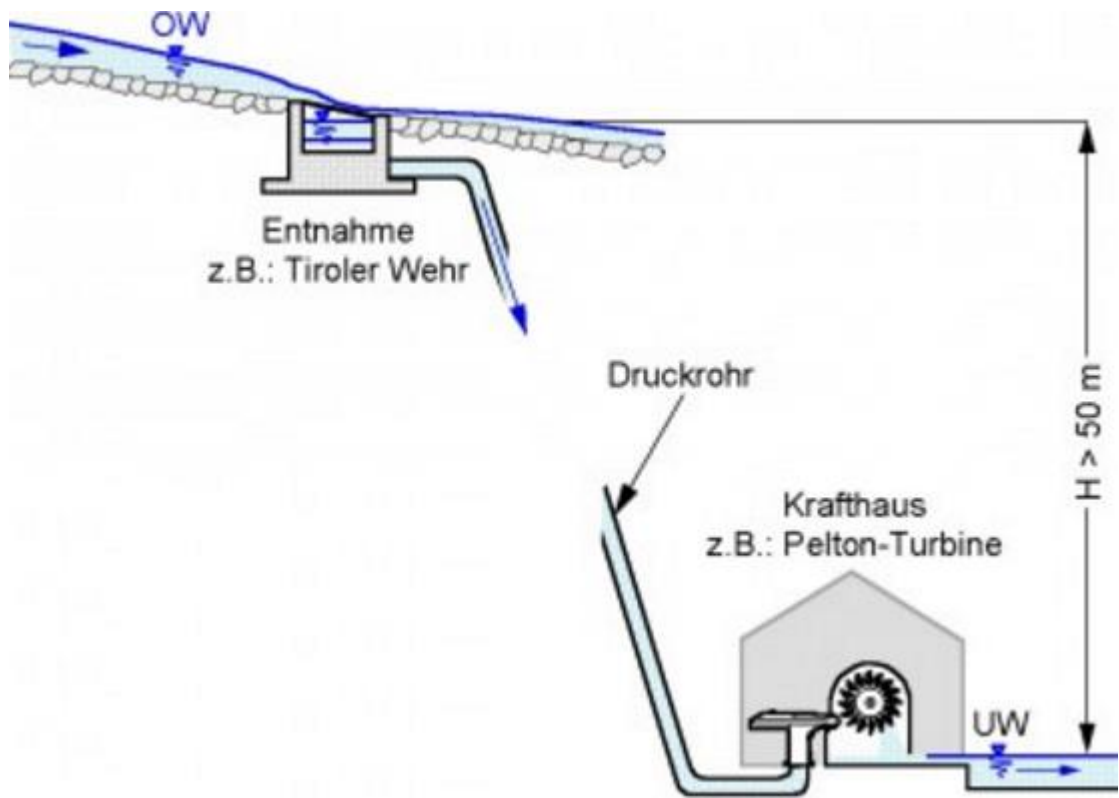


Abb. 1.3 Längsschnitt durch eine Hochdruck-Wasserkraftanlage [5]

2. Typen von Niederdruckanlagen

Die Fallhöhe bei Niederdruckkraftwerke charakterisiert sich im Bereich bis etwa 15m. Niederdruckkraftwerke sind auch als Laufwasserkraftwerke konzipiert und besitzen keine nennenswerten Speichermöglichkeiten.

Als typische Maschinen kommen vor allem Kaplan- bzw. Rohrturbinen, seltener Francisturbinen zum Einsatz. Bei kleineren Anlagen findet man auch Propeller-, Straflo- und Durchströmmaschinen. Die Anzahl der Maschinensätze hängt hauptsächlich von dem Durchfluss, jährlicher Abflusscharakteristik, Einzelbetrieb oder Durchlaufspeicherung innerhalb einer Kraftwerkskette und eines Stromnetzes.

2.1. Flusskraftwerke

Flusskraftwerke werden direkt in den Flusslauf gebaut. Besonders geeignet für den Bau von Flusskraftwerken sind wasserreiche Flüsse mit einem Gefälle kleiner 2‰. Wenn der Fluss schiffbar ist, kommt auch eine Schiffschleuse dazu. Das Krafthaus dient zur Energieerzeugung, das Wehr zur Stauhaltung und zur sicheren Hochwasserabfuhr.

Wenn in einem Flusslauf die verfügbare Fallhöhe aus baulichen und ökologischen Gründen in mehrere Ausbaustufen unterteilt ist, erzielt man eine hohe Energieausbaute. Eine solche Anordnung von Kraftwerksstufen nennt man Kraftwerkskette. Es werden drei Typen von Kraftwerksketten in Bezug auf der Wasserspiegellinien in den jeweiligen Stauhaltungen in Fließrichtung:

- a. aussetzend
- b. aneinandergereiht
- c. übergreifend

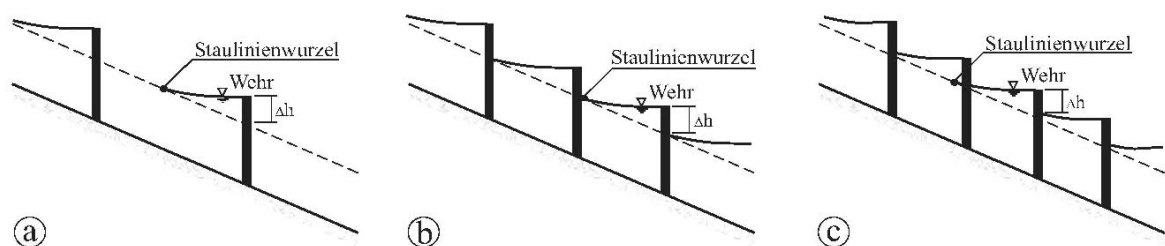


Abb. 2.1 Stafflungsarten bei Kraftwerksketten [2]

Anordnung eines Kraftwerks in einem Fluss in Bezug auf seine Lage zum Wehr. (Abb. 2.2)

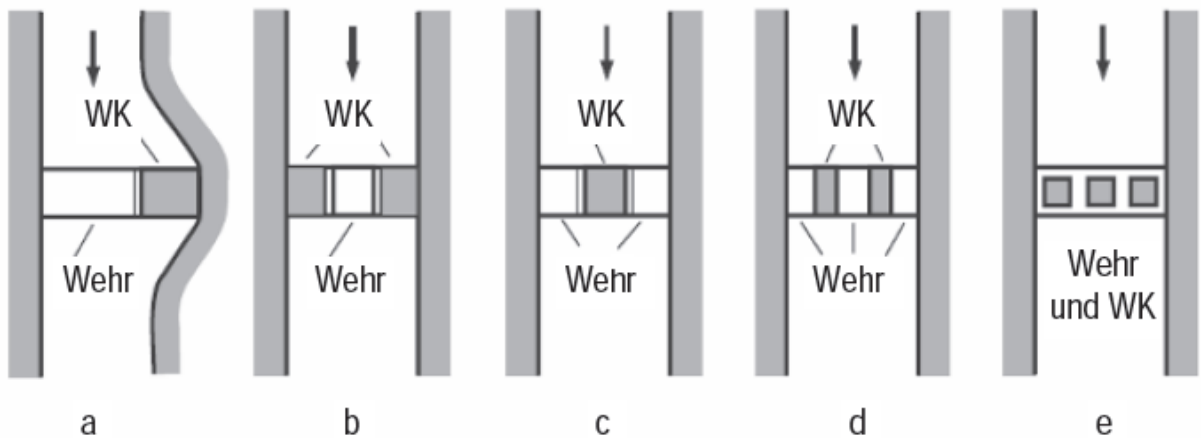


Abbildung 2.2: Anordnung von Wasserkraftanlagen im Fluss [2]

- 1) Bei der Blockbauweise (a) werden Kraftwerk und Wehr nebeneinander in getrennten Baukörpern angeordnet. Zwischen Wehr und Kraftwerk sorgt der Wehrpfeiler für eine hydraulisch günstige Anströmung des Kraftwerkes. Ist die erforderliche Breite des Absperrbauwerks (Kraftwerk und Wehr) größer als die Flussbreite, wird das Kraftwerk in einer Bucht des ausgeweiteten Flusses angeordnet. Bei ausreichend langer Vorziehung stört dies die Kraftwerksanströmung kaum, ermöglicht aber bei Hochwasser einen ungestörten Abfluss über das Wehr;
- 2) Zweiseitige Kraftwerke (b) wurden gelegentlich an Grenzflüssen zwischen zwei Ländern gebaut. Jeder Betreiber hat seine Kraftanlage am eigenen Ufer. Das Wehr ist ein bilaterales Projekt;
- 3) Seltener sind Inselkraftwerke (c), weil die Zugänglichkeit zum Kraftwerk erschwert wird. Findet man in Ausnahmefällen in Flussmitte besonders günstige geologische Verhältnisse für die Gründung des im Vergleich zum Wehr massiveren Kraftwerkblocks, mag diese Lösung wirtschaftlicher sein als die Blockbauweise;
- 4) Eine besonders interessante Bauform stellen Pfeilerkraftwerke (d) dar. Hier sind die Wehrpfeiler zu einzelnen breiten Kraftwerksblöcken aus-

gebaut, in denen je ein Maschinensatz (Turbine und Generator) untergebracht ist;

- 5) Bei überströmbaren Kraftwerken (e) fehlen Aufbauten. Sie können daher sehr gut in die Flusslandschaft eingegliedert werden. Im Hochwasserfall ist die gesamte Anlage überströmt.

Bei Anordnung eines Kraftwerkes in einer Flusskrümmung ist darauf zu achten, dass der Einlauf zu den Turbinen von Geschiebe freigehalten wird. Auf Grund der Spiralströmung wird Geschiebe zur Innenkrümmung des Flusses transportiert. Daher kommt das Kraftwerk in der Regel in der Außenkrümmung eines Flusses zu liegen. (Abb. 2.3)

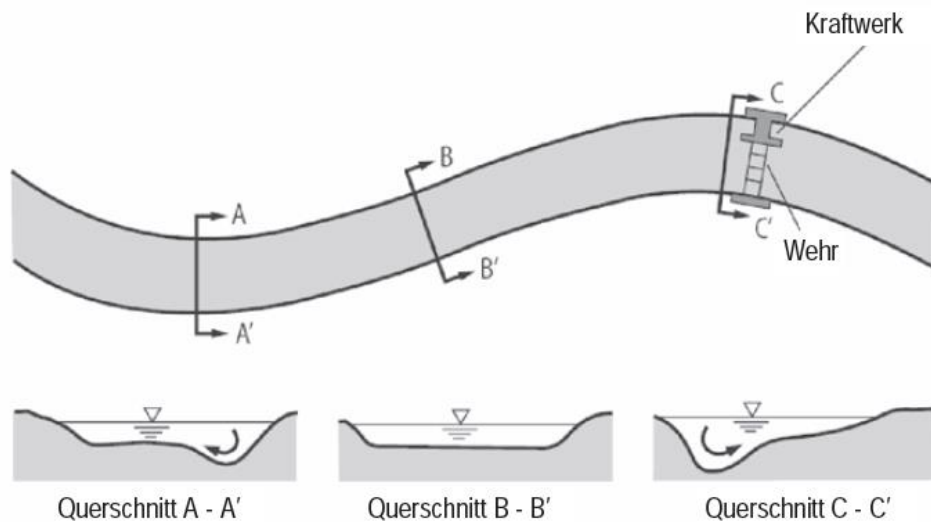


Abbildung 2.3: Anordnung des Kraftwerkes in Außenkrümmung eines Flusses [2]

2.2. Ausleitungskraftwerke

Das Ausleitungskraftwerk ist eine Sonderform des Flusskraftwerkes.

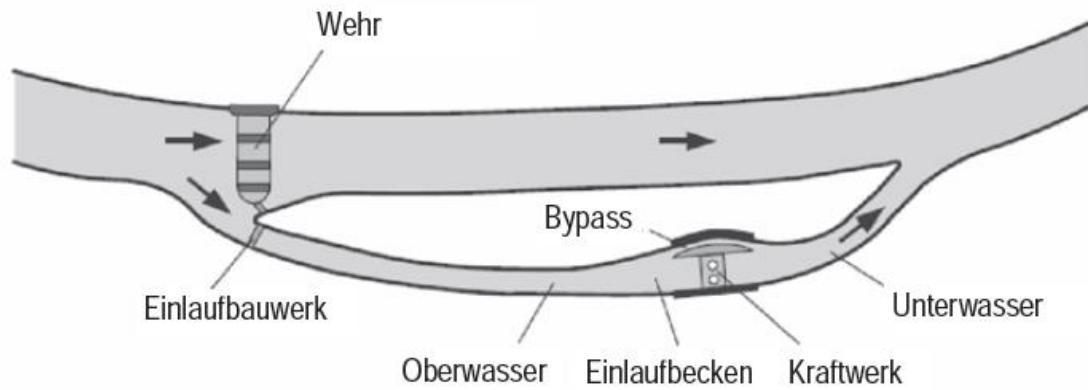


Abbildung 2.4: Ausleitungs- / Umleitungskraftwerk [2]

Mit der Hilfe einer Treibwasserleitung (Kanal oder Stollen) können eine oder mehrere Flusskrümmungen abgeschnitten werden und die Laufverkürzung ergibt einen Fallhöhengewinn.

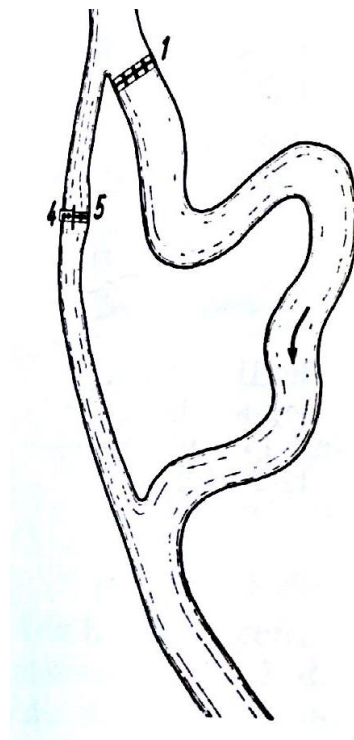


Abb. 2.5 Umleitungskanalordnung [3]

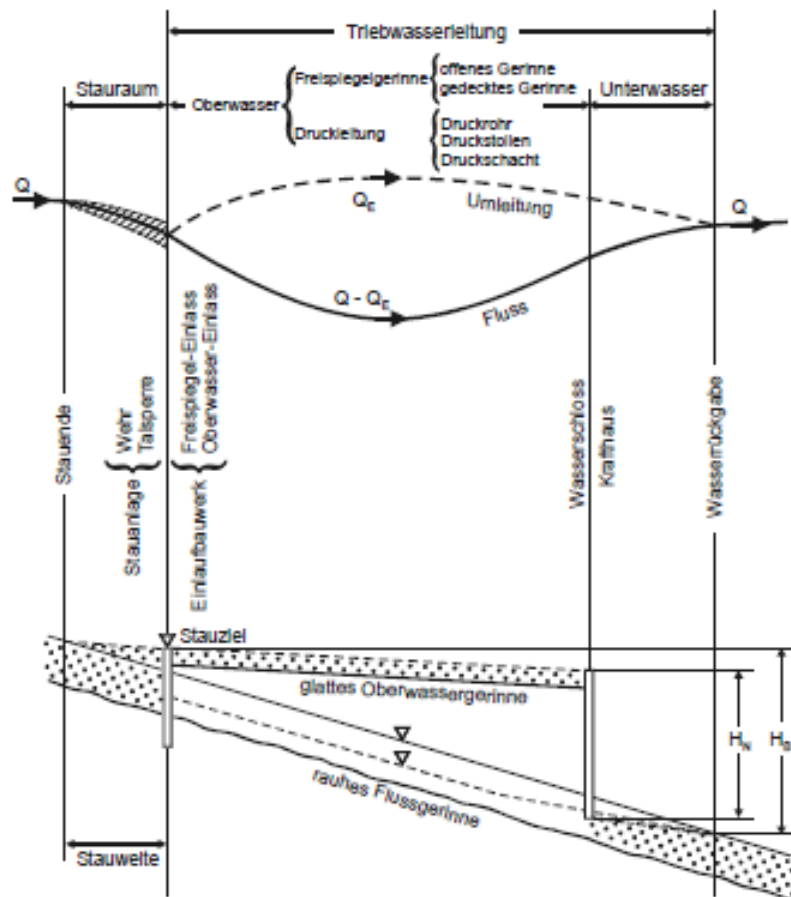


Abb. 2.6 Schema eines Umleitungskraftwerkes im Grundriss (Oben) und im Schnitt (Unten) [4]

Bei besonders günstigen topographischen Verhältnissen ist die Umleitungsstrecke wesentlich kürzer als der ursprüngliche Flusslauf.

Die Fallhöhegewinn bezieht sich auf:

- Verkürzung des Flusslaufes, begradigte Umleitungsstrecke
- Reduzierung der Reibungsverluste durch künstliche und damit vergleichsweise glatte Auskleidung der Treibwasserleitungen und Treibwassergerinne aus Asphalt, Beton oder Stahl.

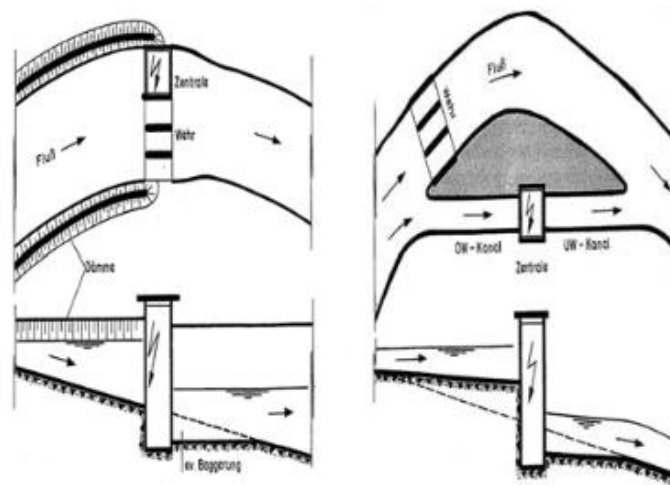
In der abgeschnittenen Flusskrümmung verbleibt nur eine Restwassermenge. Im Hochwasserfall herrschen in dieser Restwasserstrecke weitgehendste natürliche Abflussverhältnisse, da der nicht ausleitbare Hochwasserzufluss über das Wehr abgegeben wird. Die in der Restwasserstrecke verbliebende Restwassermenge dar weit-

erst eine Mindestwasserführung nicht unterschreiten, um die nähere Flusslandschaft nicht zu beeinträchtigen. Nicht nur die Restwasserstrecke, sondern auch der Treibwasserweg hat ökologischen und landschaftsgestalterischen Anforderungen gerecht zu werden.

3. Allgemeines über Flusskraftwerke

Als Niederdruckanlagen gelten alle Laufkraftwerke mit einer Fallhöhe von bis zu 15m. Sie werden meist im Mittellauf von wasserreichen Flüssen angelegt. Dabei wird der Fluss durch eine Sperre angestaut. Diese besteht aus einem Wehr und einer neben angeordneten Zentrale (Krafthaus, Maschinenhaus, Turbinenhaus). Wegen des Anhebens des Wasserspiegels im Oberwasser sind Dämme notwendig. Wenn es um ein Ausleitungskraftwerk geht, sind Wehr und Zentrale getrennt positioniert (Abb. 3.1).

Überwiegend werden heutzutage Kaplan-turbinen gebraucht. Welche Kaplan-turbinen in den Zentralen eingebaut werden, hängt von der Fallhöhe ab: ab einer Fallhöhe von 15m werden vertikalachsige, bei geringerer Fallhöhe horizontalachsige oder leicht geneigte Kaplan-turbinen verwendet. (Abbildung 3.2). Bei Kleinkraftwerken werden Francisturbinen oder Durchströmturbinen eingesetzt.



a) Flusskraftwerk

b) Ausleitungskraftwerk

Abbildung 3.1: Typen von Niederdruckanlagen im Grundriss und Längsschnitt [1]

3.1. Hauptbauwerke

Jedes Kraftwerk hat eine Reihe von Bestandteilen, die es komplett machen. Diese Bestandteile nennt man auch die Hauptbauwerke eines Kraftwerks.

3.1.1. Krafthaus

Ein Niederdruckkrafthaus besteht aus die folgende Bauteile:

- 1) Wasserfassung
 - Die Einlaufschwelle
 - Der Rechen (Grob- oder Feinrechen, eventuell beide)
 - Die Einlaufschütze (Turbinenschütze)
- 2) Einlaufspiralen mit den Turbinen oder Turbinenkammern
- 3) Saugschläuche oder Saugrohre
- 4) Maschinenhaus - Bauten mit den Stromerzeugern und den sonstigen maschinellen und elektrotechnischen Einrichtungen.

Die in diesen vier Gruppen zusammengefassten Bauteile bilden zusammen das Krafthaus, den Mittelpunkt der Wasserkraftanlage, in welchem die mechanische Nutzung der verfügbaren Fallhöhe und Wassermenge sowie zumeist auch ihre Umsetzung in elektrische Energie vor sich geht.

Heutzutage werden die Turbinen bei Niederdruckanlagen meist mit liegender Welle eingebaut.

Im Krafthaus sind unten den Turbinen und darüber der Maschinenraum angeordnet. Was wichtig für die Abmessungen ist, sind der Anzahl der Turbinen, der Turbinenlast sowie der Form des Ein- und Auslaufes.

Abbildung 3.2 zeigt die Allgemeinanordnung des Krafthauses.

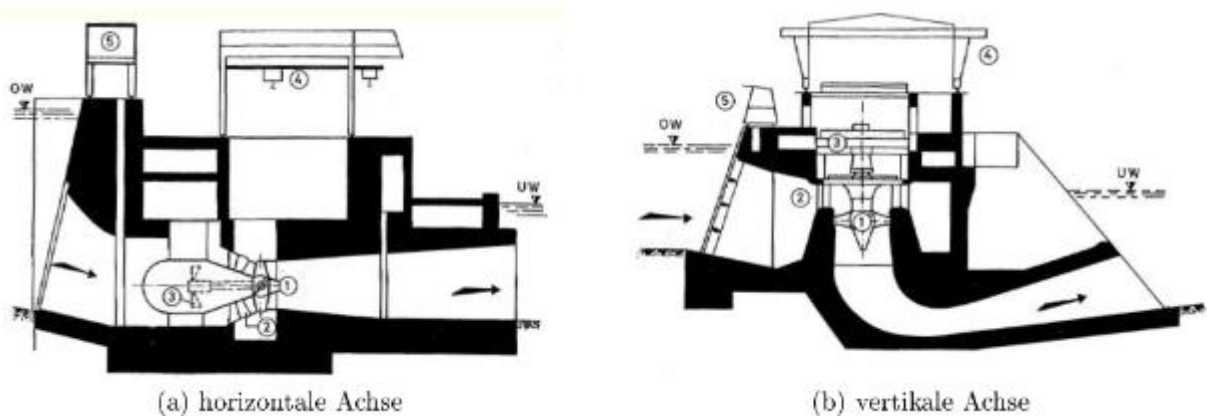


Abbildung 3.2: Arten von Kaplan turbinen [2]

- Kaplanlaufrad
- Leitapparat
- Generator
- Kran
- Rechenreinigungsmaschine

3.1.1.1. Bernoulli-Gleichung

Das Wasser ist ein Träger von Energie. Nach Bernoulli kann diese Energie des Wassers in drei Komponenten aufgeteilt werden:

- potentielle Energie
- Druckenergie
- kinetische Energie

$$H = z + \frac{\rho}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.1)$$

Wo:

- H – Energiehöhe [m]
- z – Höhe über Bezugshorizont [m]
- ρ – Flüssigkeitsdruck [kN/m²]
- γ – Wichte des Wassers [kN/m³]
- g – Fallbeschleunigung [m/s²]
- v – Fließgeschwindigkeit [m/s]

3.1.1.2. Ausbauleitung und Energieermittlung

Nettofallhöhe, Zufluss und Wasservolumen pro Zeit sind die wichtigste Parameter der Energieausbaute einer Wasserkraftanlage. Die zur Verfügung stehende

Energie des Wasserstromes $\rho \cdot Q$ mit dem Potential $g \cdot H_N$ wird an einer Turbine in Drehleistung und am Generator in elektrische Energie umgewandelt.

1) Bruttofallhöhe, Verluste und Nettofallhöhe

Konstruktionsfallhöhe nennt man die ursprüngliche Höhendifferenz, für die eine Turbine konstruiert worden ist. Dies ist die kleinste Fallhöhe, die der der Ausbaudurchfluss gerade noch verarbeitet werden kann. Die verschiedenen Turbinen werden für verschiedene Schluckvermögen und Fallhöhen geeignet.

Mit Rohfallhöhe oder Bruttofallhöhe wird der Höhendifferenz zwischen dem Ober- und dem Unterwasserspiegel bezeichnet.

$$H_B = \nabla OWS - \nabla UWS \quad (3.2)$$

Nutzfallhöhe oder Nettofallhöhe ist die Höhendifferenz, die unmittelbar an der Turbine wirksam wird. Die Verluste, die wegen Reibung und Krümmungen in den Treibwasserleitungen, sowie die Einlaufverluste an der Treibwasserfassung entstehen, berücksichtigen der Unterschied zwischen der geodätisch vorhandenen Rohfallhöhe und der zur Energiegewinnung nutzbaren Fallhöhe.

$$H_N = H_B - \Sigma h \quad (3.3)$$

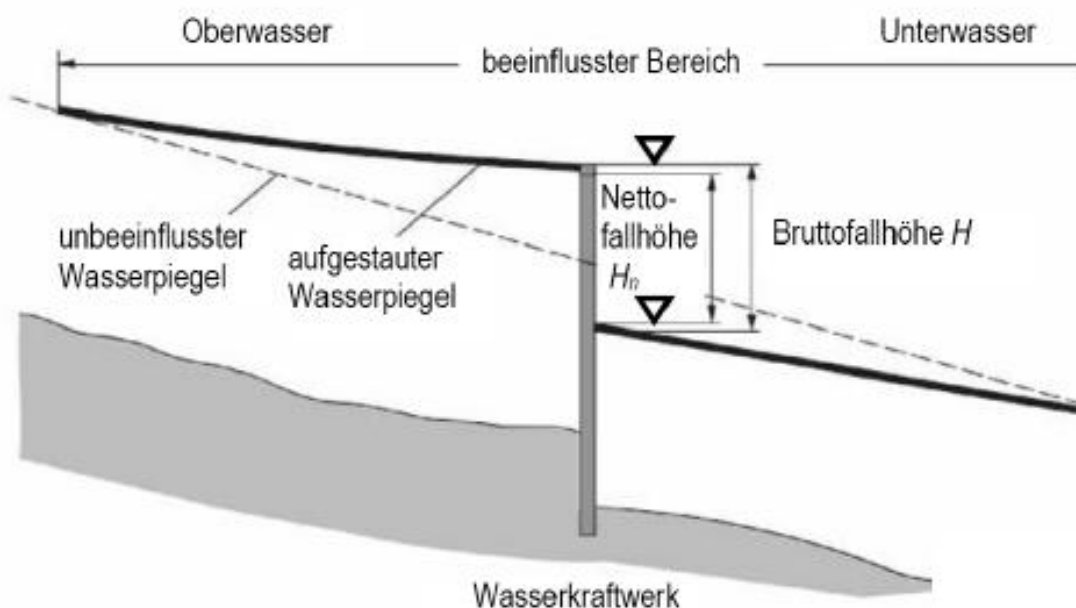


Abb.3.3 Brutto- und Nettofallhöhe an Wasserkraftanlagen [4]

2) Hydraulische Leistung einer Turbine

Hydraulische Leistung ist die im Treibwasser enthaltene, der Turbine zugeführte Leistung.

Der Wirkungsgrad bestimmt die Leistung einer Turbine.

$$P = \eta \cdot \gamma \cdot Q \cdot H_N \quad (3.4)$$

Wo:

- P – Leistung [kW]
- η – Wirkungsgrad der Wasserkraftanlage
- Q – Zufluss [m³/s]
- H_N – Nettofallhöhe [m]

3) Drehmoment - M

Das Wasser, das in die Turbine strömt und unter Druck steht, wird durch die Becher oder Schaufeln des Laufrades umgelenkt. Diese erzwungene Richtungsänderung bewirkt eine Kraft in Umfangsrichtung und damit ein Drehmoment.

4) Mechanische Leistung

Die Mechanische Leistung (P_{mech}) ist das Produkt von Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit:

$$P_{mech} = \omega \cdot M \quad (3.5)$$

5) Wirkungsgrad

Bei jeder Art von Energieumwandlung entstehen Verlusten. Daraus folgt, dass die von der Turbine an den Generator abgegebene Leistung kleiner ist als die zugeführte hydraulische Leistung.

Das Verhältnis dieser beiden Leistungen ist der Wirkungsgrad der Maschine. Er definiert die Güte der Turbine als Energietransformator.

$$\eta_T = \frac{P_{mech}}{P_{hyd}} \quad (3.6)$$

6) Ausbauleistung

Die maximale elektrische Leistung eines Kraftwerkes nennt man Ausbauleistung. Die wird nur beim Abarbeiten des Ausbauzuflusses Q_A erreicht. Dieser Zufluss steht aber nur an etwa 30 bis 60 Tagen im Jahr zur Verfügung wegen naturbedingter Ablaufschwankungen.

7) Spezifische Drehzahl

Mit der Hilfe der spezifischen Drehzahl lassen sich die Verschiedenen Turbintypen, von den Ähnlichkeitsgesetzen abgeleiteten Parameters, klassifizieren.

n_s ist die Drehzahl einer Turbine in $[\text{min}^{-1}]$, welche bei einem Gefälle von 1m eine Leistung von 1kW liefert.

$$n_s = n \frac{P^{1/2}}{H_n^{5/4}} \quad (3.7)$$

n_q ist die Drehzahle einer Turbine in U/min, welche bei einem Gefälle von 1m einen Volumenstrom von $1\text{m}^3/\text{s}$ aufweist.

3.1.2. Rechen und Rechenreinigungsanlage

Die Rechen werden in die Wasserkraftwerke installiert um die hydraulischen Maschinen vor gewissen vom Wasser mitbewegten Festkörpern zu schützen. Die Unterteilung dieser Feststoffe, ihre Definition und die Transportart sind in Abb. 3.4 und Tab. 4.1 dargestellt.

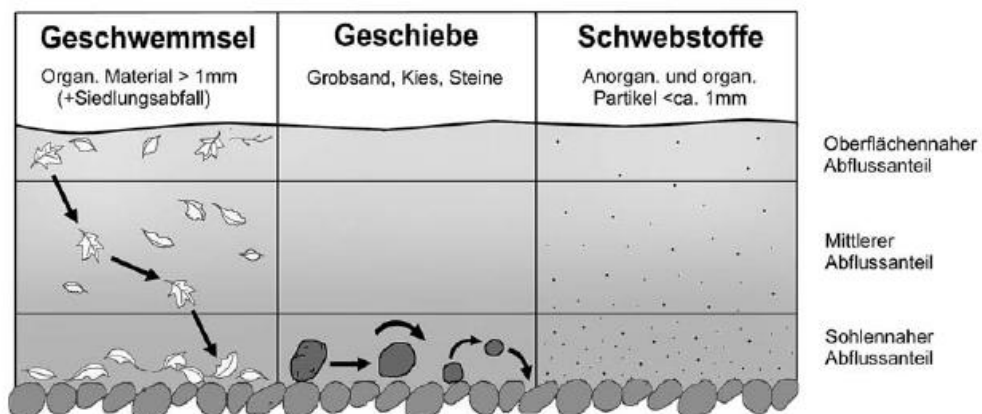


Abb. 3.4 Feststoffe und ihre Verteilung über die Abflusstiefe nach Schälchli et al. (1997) [5]

Art	Definition	Transport
Geschwemmel	<i>Partikuläres organisches Material mit Durchmesser > 1mm:</i> Laub, Nadeln, Grobholz, Feinholz, Gras, Heu, Spreu, Moose, Flechten, Knospenhüllen, Samen, Algen, Wasserpflanzen, Kadaver, Leichen etc. <i>Siedlungsabfall:</i> Fässer, Pneus, Flaschen, Plastikfolien, Boote etc.	schwimmend, schwebend
Geschiebe	Grobsand, Kies, Steine	rollend, gleitend, springend
Schwebstoffe	Alle organischen und anorganischen Feinpartikel mit Durchmesser < 1mm	schwebend
Treibeis	Platten, Schollen	schwimmend, schwebend

Tabelle 3.1: Art der transportierten Feststoffe, ihre Definition und Transportart im Fluss nach Schälchli et al. (1997) [5]

Zu den Rechenanlagen gehören zwei Gruppen von Rechen - Grob- und den Feinrechen. Dazu gehört aber auch die Rechenreinigungsgeräte – das sind die Einrichtungen zur Reinigung und Wartung der Rechen.

Der Grobrechen, der bei allen Kraftwerkstypen vorhanden ist und sich im Entnahmequerschnitt befindet, schützt die hydraulischen Maschinen vor grobem Treibgut.

Der Feinrechen ist immer dann anzutreffen, wenn die Triebwasserleitung und die Maschinen ein von feinem Treibgut befreites Wasser erfordern, wobei er sich am Eintritt in den geschlossenen Teil des Triebwasserweges befindet. Andernfalls sollte der daran anschließende Abschnitt durch fest montierte Gitter oder Ähnliches abgedeckt werden.

Der Feinrechen wird aber immer mitgeplant, wenn die Triebwasserleitung und die Maschinen kein Treibgut im Wasser annehmen, wobei er sich am Eintritt in den geschlossenen Teil des Triebwasserweges befindet. Als Alternative sollte der daran anschließende Abschnitt durch fest montierte Gitter oder Ähnliches abgedeckt werden.

Die Rechen sind meist aus senkrechten, selten horizontalen Stäben ausgebildet und erleichtern die Reinigung durch entsprechende Maschinen. Diese sogenannten Stabrechen setzen sich aus unterschiedlichen Profilstäben zusammen, die ab-

wechselnd angeordnet werden, und führen in speziellen Fällen zu besseren Reinigungsergebnissen. Die Stabrechen werden überwiegend aus Stahl und teilweise auch Edelstahl hergestellt, manchmal aber auch noch aus glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffen.

Als eine sinnvolle Alternative können auch die Lochblechrechen erwähnt werden, wobei diese sowohl senkrecht als auch seitlich der Hauptströmung des genutzten Gewässers angeordnet werden können. Derzeit zeigen diese vor allem bei kleineren Entnahmedurchflüssen bis ca. $10\text{m}^3/\text{s}$ durchaus gute Resultate. Über $20\text{m}^3/\text{s}$ werden derzeit noch geeignete, kostengünstige Bauweisen untersucht. Bei diesem Rechentyp werden handelsübliche Lochbleche besser aus korrosionsbeständigem Material verwendet. Bei einer Lochung von ca. 20-25mm beträgt der Lochanteil etwa 50-56%. Um keine großen Verluste zu erhalten, sollte die Geschwindigkeit im den Löchern ca. $0,6\text{m}/\text{s}$ betragen. Entsprechend der bisher vorliegenden Erfahrungen muss noch die Querschnittsfläche ca. 20% größer als bei Stabrechen sein. Da die gelochten Bleche über eine geringere Stabilität verfügen, bedürfen diese auf der Rück- bzw. Abströmseite einer Stützkonstruktion. Die Reinigung erfolgt bei vertikaler und geneigter Anordnung häufig über Horizontalreiniger, die von einer Spülströmung unterstützt werden können, indem ein entsprechendes Spülschütz kurzzeitig geöffnet wird. Bei schräg gestalteten Lochblechrechen können auch klassische Winkel- oder Steilrechenreiniger verwendet werden.

Wegen der Strömungsgeschwindigkeit und einer möglichen Verlegung des Rechen durch Treibgut und Treibeis wird dieser einer statischen und auch dynamischen Belastung ausgesetzt werden. Deswegen muss die Rechen so zu dimensioniert werden, dass diese mindestens dem örtlichen statischen Druck widerstehen. Die Kraftübertragung auf die Stützwände wird durch strömungsgünstig geformte, horizontale Querträger erreicht. Die Belastung umverteilen auch die Rahmen des Rechenfeldes, auf denen die einzelnen Rechentafeln montiert werden. Die Konstruktion der Rechentafeln besteht sich üblicherweise aus 1,0-1,5 m breiten Elementen, deren einzelne Stäbe durch mehrere Verbindungsstangen mit Distanzringen fest miteinander verbunden sind.

Der Abstand zwischen den Stäben ergibt sich aus den maximal möglichen Maßen des Treibgutes im Triebwasser, das keine Schadensfolge der Maschineneinrichtungen im Krafthaus (Leitapparat, Turbinenschaufeln etc.) bringen kann; gleichzeitig

verursacht ein enger werdender Rechenstababstand einen steigenden Strömungswiderstand, der wiederum die Energieausbeute verringert. Hinzu kommt, dass ab einem gewissen Grenzabstand nach unten die Rechenreinigung schwierig oder gar nicht möglich ist, da sich in diesem Fall vor allem faserige Materialien nicht mehr abstreifen lassen.

Als Grobrechen gelten in der Regel diese mit Durchgänge von 50-150 mm, bei Feinrechen variiert dieser Stababstand zwischen 20-30 mm. Die Rechenneigung ist üblicherweise in den Grenzen von 70-80° gegenüber der Horizontalen.

Eine Reduzierung der Stabweiten unter Berücksichtigung des Schutzes von Fischen bis ca. 20 mm oder weniger ist bei Wasserkraftanlagen in Fließgewässern nur dann sinnvoll, wenn der Bestand von Wanderfischen, z. B. Aalen, hoch ist und größere weiten schädlich für den Fischbestand sein würden. Nur dann können jedoch derartige Rechen wirksam sein, wenn die Anströmungsgeschwindigkeit des Rechens geringer als die mögliche Schwimm- bzw. Sprintgeschwindigkeit der relevanten Fischarten gegen die Strömung ist, damit diese Fische sich noch selbstständig aus dem Einlaufbereich entfernen können. Jedoch muss eine wirksame Umgehungsmöglichkeit der Wasserkraftanlage gleichzeitig eventuell noch in Kombination mit einer flacheren Rechenneigung geplant werden. Derartige Maßnahmen sind bisher jedoch nur in Verbindung mit geringeren Durchflüssen und bei Neubauten mit planerischen Gestaltungsfreiheiten und je Turbineneinheit sowie entsprechend ausgestalteten Rechenanlagen erfolgreich realisierbar.

3.1.3. Wehranlage

Das Wehrbauwerk hat die Aufgaben den Wasserstand zu regulieren und das Hochwasser abzuführen. Deswegen ist es notwendig, das Wehr so zu positionieren, dass die Hochwasser möglichst ungestört und ohne größere Strömungsumlenkung die geöffneten Wehrfelder passieren können. Daraus folgt, dass die Wehranlage im Bereich der Hauptströmung liegen soll. Eine seitliche Anordnung ist möglich, wenn der Fluss breit genug ist. 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.

3.1.3.1. Aufgaben von Flusssperren

1) Grundaufgaben von Flusssperren:

- Fallhöhegewinnung
- Aufstau nach Oberstrom für Ausleitungen (Bewässerung, Trinkwasserversorgung, Energieerzeugung und Schifffahrt)
- Erhöhung der Fahrwassertiefe für die Schifffahrt
- Sohlstabilisierung durch Verringerung des Energieliniengefälles und damit der Schleppkraft der Strömung (Schutz des Flussbettes vor Eintiefung)
- Anhebung des Grundwasserstandes
- Vergleichmäßigung der Abflüsse bei Schwellbetrieb

Ein Wehr wird Mehrzweckanlage genannt, wenn mehrere dieser Aufgaben erfüllt werden.

2) 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

3.1.3.2. Arten von Flusssperren

Das Hauptbauwerk einer Flusssperre ist die Wehranlage. Das Wehr staut den Fluss auf und gibt den Fließquerschnitt bei Hochwasser wieder frei. Ein Sperrbauwerk aus einem massiven Staukörper ohne bewegliche Teile nennt man 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.

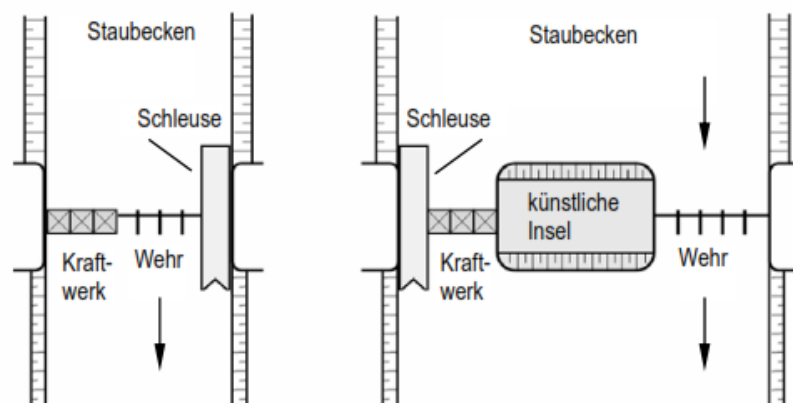


Abbildung 3.5: Beispiele für mögliche Anordnungen von Wehren und Staustufen [2]

3.1.3.2.1. Feste Wehre

Feste Wehre stellen die einfachste Möglichkeit dar, einen Fluss aufzustauen. Bei den ist keine Abflussregelung möglich. Der Wasserstand kann nicht vorgegeben werden, sondern stellt sich einzig aufgrund des jeweiligem Abflusses ein. Feste Wehre werden meist zur Sohlstabilisierung und bei Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren verwendet.

1) Bestandteile

Der Vorboden, der aus großen Wassersteinen oder einer Betonplatte in die Sohle ausgebildet ist, schützt das Wehr von Erosion.

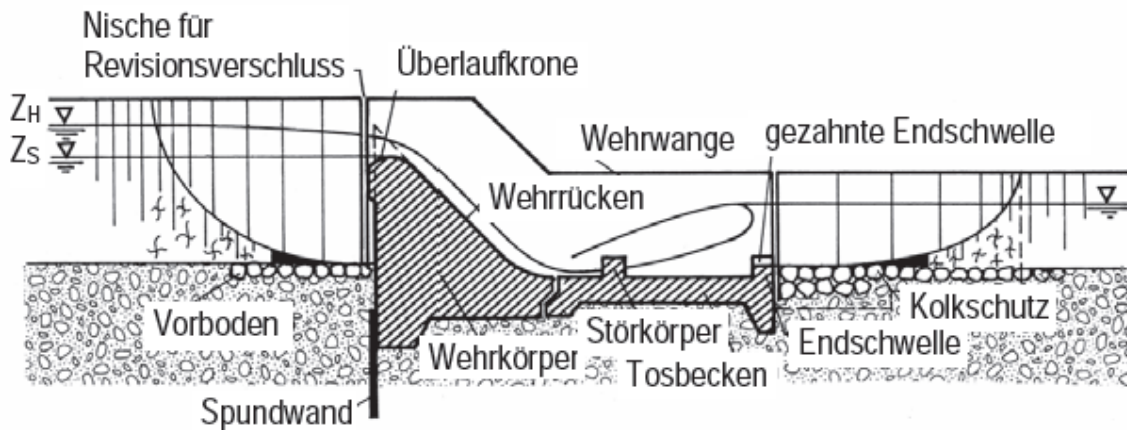


Abb.3.6: Bestandteile eines festen Wehres [2]

- Grunddreieck

Das Gewicht des Wehres leitet die Kräfte aus dem Wasserdruck in den Untergrund ab. Daraus ergibt sich ein einfaches Grundkonzept für die konstruktive Gestaltung des Wehrkörpers. In dieses sogenannte Grunddreieck wird ein hydrodynamisch günstig geformtes Überlaufprofil eingepasst. t 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.

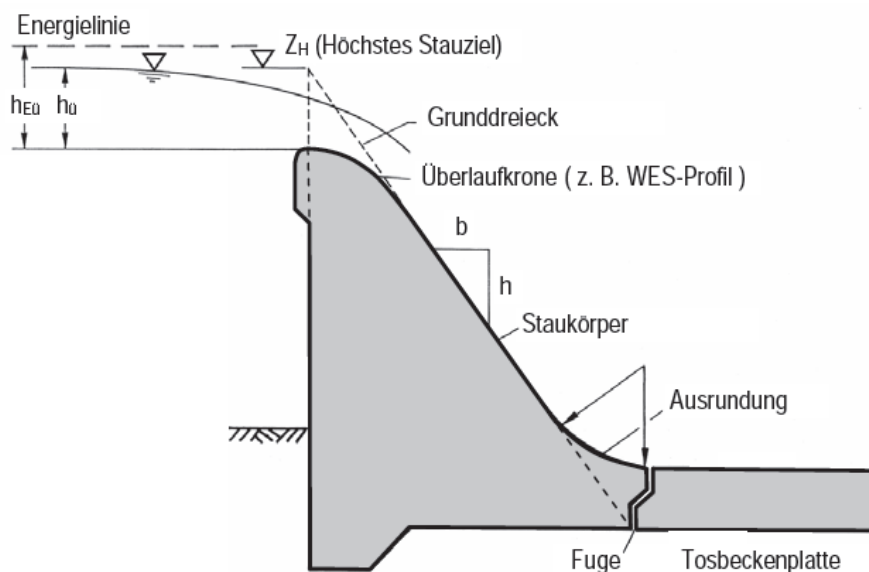


Abb. 3.7: Das Grunddreieck eines Festen Wehres [2]

- Überlaufprofil

Ein besonderes Augenmerk verdient das Überlaufprofil. Strahlablösungen und zu große Unterdrücke sollen 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 Rückstau einfluss zu.

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left(h_{\ddot{u}} + \frac{u^2}{2g} \right)^{3/2} \quad (3.8)$$

Die Geschwindigkeitshöhe kann vernachlässigt werden, wenn die Fließgeschwindigkeit u im Oberwasser kleiner als etwa 1 m/s ist. Der Überfallbeiwert μ hängt von der Form der Überlaufkrone ab. Strömungsgünstig ausgerundete Profile erreichen μ -Beiwerte zwischen etwa 0,65 und 0,75.

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 Kolkschutzes.

2) Sonderformen der festen Wehre - Hebewerke

Hebewerke beinhalten keine beweglichen Verschlusssteile. Deshalb sind sie feste Wehren. Wenn der Wasserstand knapp über der innen liegenden Wehrschwelle des Staukörpers erreicht, springt der Heber an. Nur kurzzeitig herrscht jetzt freier Überfall. Schon bei leicht steigendem Abfluss lenkt die Ansprünghase 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 sehr schnell eine Abflussleistung. Der Abfluss nimmt auch bei weiter steigendem Wasserstand kaum zu, da die Gesetze des Druckabflusses gelten. Nimmt der Zufluss in die Stauhaltung wieder ab und fällt der Wasserstand unter die Einlaufkante der Heberhaube an der Einlauflippe, 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.

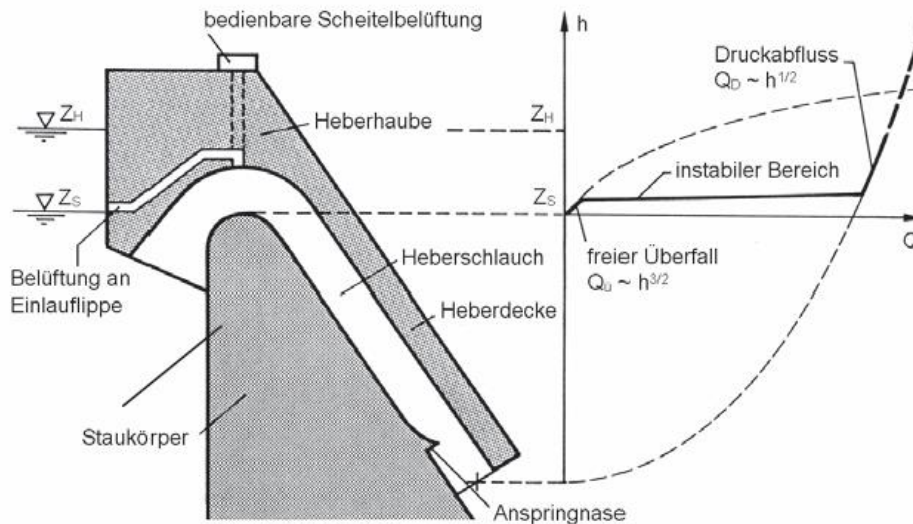


Abb. 3.8: Heberwehr mit spezieller Abflusscharakteristik [2]

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

3.1.3.2.2. Bewegliche Wehre

Bewegliche Wehre sind Stauvorrichtungen, bei denen der Aufstau durch bewegliche Verschlüsse bewirkt wird. Auf dieser Weise werden der Oberwasserstand und die Durchflussmenge gesteuert. Die Randbedingungen Bemessungshochwasserabfluss, Eis und Geschiebe, Untergrundverhältnisse und optisch Erscheinung bestimmen die Art der Verschlüsse, die Anzahl der Wehrfelder und deren lichte Weite sowie die Stauhöhe. Aspekte der Betriebssicherheit und der Wirtschaftlichkeit spielen auch eine wichtige Rolle. Wenn es eine Möglichkeit gibt, wählt man Wehrverschlüsse, die sich mit geringer Antriebskraft oder allein durch Wasserdruck bewegen lassen.

Bei der Formgebung ist es sehr wichtig zu kontrollieren, 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. Diese störenden Einflüsse können mit Hilfe eines wasserbaulichen Modellversuchs vermieden werden.

Die Verschlüsse können mechanisch, hydraulisch, elektrisch oder selbsttätig durch das Wasser bewegen. Bei Ausfall der primären Antriebsquelle müssen die Wehrverschlüsse weiterhin bedienbar bleiben (Öffnen und Schließen). In solchen Fällen ist eine zweite Energiequelle (Notaggregat) vorhanden. In der Praxis besitzen elektromechanische und ölhydraulische Antriebe zusätzlich einen Handantrieb. Dieser Handantrieb soll bei großen Wehrverschlüssen durch eine unabhängige Hilfsmotor bedienbar sein.

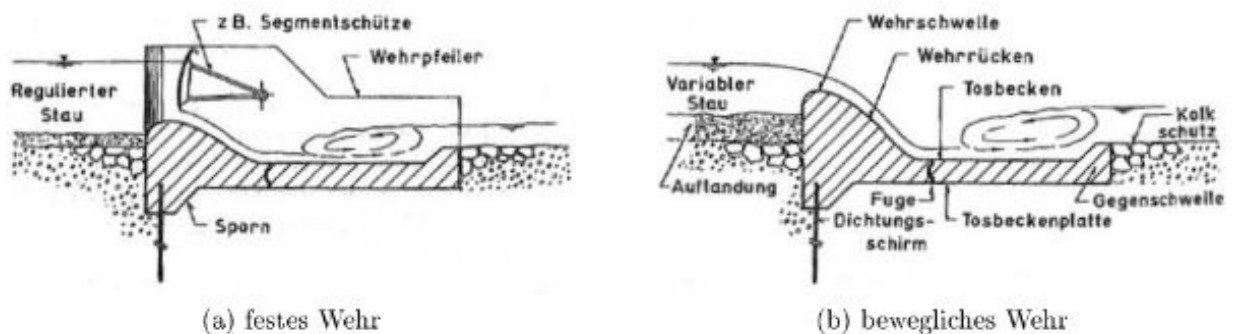


Abbildung 3.9: Typen von Wehranlagen [2]

- 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. Das ist besonders wichtig bei Stauhaltungen an schiffbaren Flüssen, da keine gefährlichen Schwallwellen und Sunkerscheinungen auftreten.

1) (n-1) Bedingung

Bei Hochwasser müssen die Verschlüsse sicher geöffnet werden und der ursprüngliche Flussquerschnitt muss freigegeben werden können. Wehre mit beweglichen Verschlüssen sollen so dimensioniert werden, dass der Bemessungshochwasserzufluss auch bei Ausfall eines Wehrfeldes schadlos und ohne Überschreitung des für diesen Fall festgesetzten Wasserspiegels abgeführt werden kann. Bei unter-

schiedlichen 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, 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.

Folgende Punkte sind noch zu beachten:

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

2) Ausnahme von der (n-1) Bedingung

Bei kleinen Wehranlagen, die nur aus ein Feld bestehen, darf auf die Einhaltung der (n-1) Bedingung 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.

- Einteilung der beweglichen Wehre

Man unterteilt 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. Die Kombinationen von unterschiedlichen Verschlussystemen ermöglicht die gleichzeitige Über- und Unterströmung. Auf eine gute Abfuhr von Eis, Geschiebe, Treibholz und Geschwemmsel ist bei der Wahl der Verschlüsse besonders zu beachten.

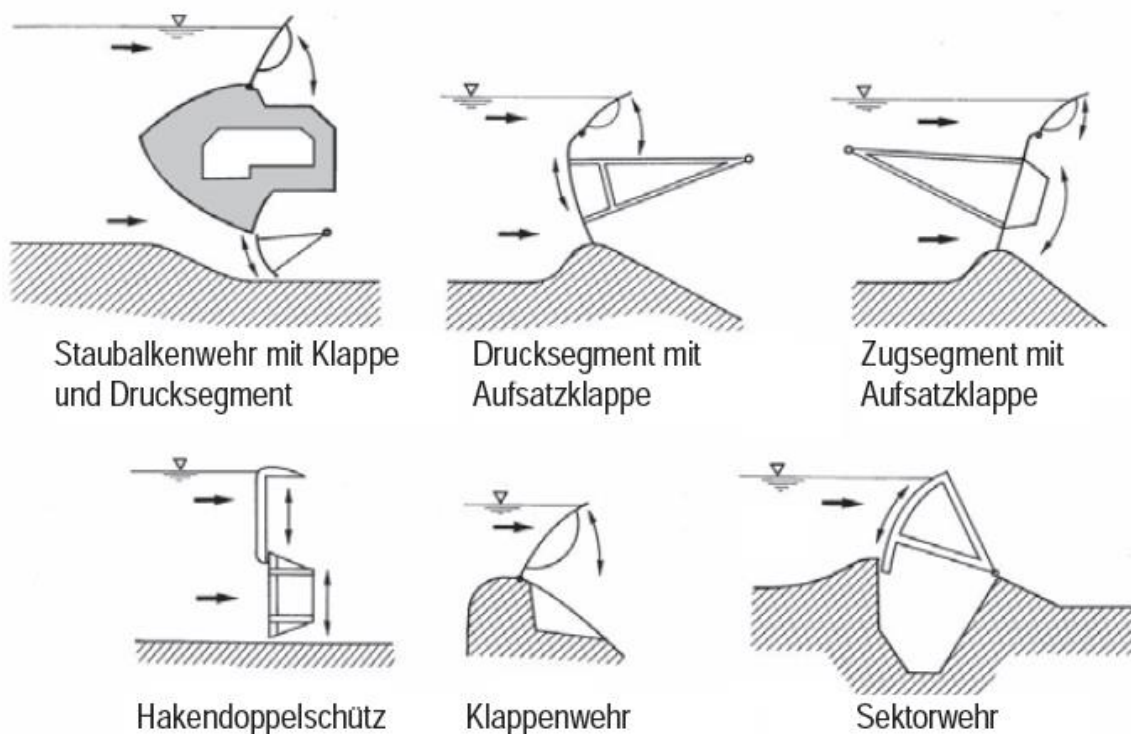


Abb. 3.10: Einteilung wichtiger Verschlüsse bezüglich ihrer Bewegung und der Art der Abflussfreigabe [2]

3.1.3.2.3. Kombinierte Wehre

Mit zunehmender Stauhöhe werden die beweglichen Wehrverschlüsse schwerer und teuer 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.

Feste Betonteile niedriger 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 ähnlich zu den festen Wehren mit Hilfe eines Grunddreiecks konstruiert.

- Staubalkenwehr

Der Durchflussquerschnitt bei dem Staubalkenwehr, der nicht für den Abfluss benötigt ist, wird mit der Hilfe einen festen Stahlbetonstaubalken abgeschlossen, der sowohl über- und unterströmt wird. Der Betonkörper kann bei kleineren Abmessungen massiv ausgebildet werden. Bei höheren anlagen bietet der allerdings genügend Platz für einen Durchgang durch das Wehr in dem auch Antriebsaggregate untergebracht werden können.

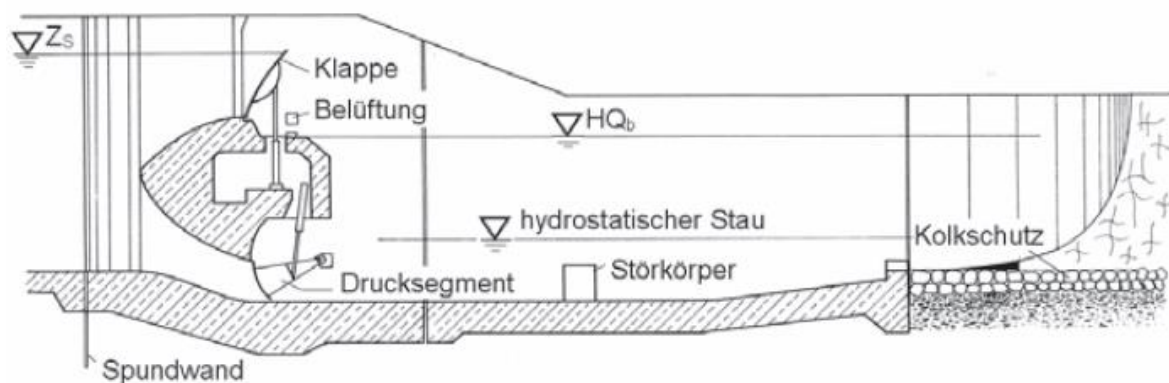


Abb. 3.11: Staubalkenwehr mit Drucksegment und Aufsatzklappe [2]

Vorteile:

- Große Verschlusshöhen sind durch die überwiegende Verwendung von Beton und relativ kleiner Stahlverschlüsse erreichbar
- Günstige Auswirkung auf die (n-1) Bedingung, da nur eine Abflussöffnung angesetzt zu werden braucht und nicht das ganze Wehrfeld
- Gute Energieumwandlung
- Optisch ansprechender Überfallstrahl
- Tiefliegende Auslässe ermöglichen Geschiebeabzug
- Sicherer Winterbetrieb, da keine Vereisungsgefahr der Grundablassverschlüsse besteht

Nachteil:

- Schlechte Zugänglichkeit der unteren Verschlüsse

3.1.4. Tosbecken

Das Tosbecken ist immer ein Teil des Wehres. Es dient zur Energieumwandlung und dem Schutz des Flussbereichs unmittelbar nach dem Wehr. Dabei wandelt sich die potentielle und kinetische Energie des Abflusswassers durch Wirbelbildung und Turbulenzen in Wärme- und Schallenergie um. Drei Arten von Tosbecken sind möglich: einfaches Tosbecken, Toswand und eine Kombination der beiden.

Wenn das Tosbecken auf Lockergesteinen gegründet wird, werden die Wehrkörper und das Tosbecken durch eine speziell ausgebildete Fuge getrennt. Diese Fuge 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.

1) Tosbeckenbemessung

Im Praxis benutzt man die Ergebnisse empirischer Untersuchungen und Modellstudien. Die Bemessung eines Tosbeckens und die Festlegung der geometrischen Abmessungen und seiner Hydraulischen Wirksamkeit gelingt nur auf einfachste Systeme analytisch.

ausreichende Impulskraft vom Unterwasser her erforderlich. Die Betrachtung des hydrodynamischen Gleichgewichtes ergibt eine zum Eingangsschussstrahl konjugierende Wassertiefe:

$$h_2 = -\frac{h_1}{2} + \sqrt{\frac{h_1^2}{4} + \frac{2 \cdot v_1^2 \cdot h_1}{g}} \quad (3.10)$$

Aus dem Vergleich der rechnerisch erforderlichen Unterwassertiefe h_2 mit der tatsächlich vorhandenen Tiefe h_u erhält man den Eintaugrad:

$$\varepsilon = \frac{h_u}{h_2} \quad (3.11)$$

Generell sollte der Eintaugrad einen Wert von etwa 1,05 besitzen. Das heißt es wird ein bestimmter Rückstau des Wechselsprunges vom Unterwasser in Kauf genommen. Damit bekommt man etwas ungünstigeren Energieumwandlung, aber größerer Sicherheit gegenüber einem Abwandern ins Unterwasser. Meist wird daher die Vertiefung des Tosbeckens und Anordnung einer positiven Stufe erforderlich. Damit wird eine entsprechend größere Stützkraft mobilisiert.

Tosbeckenlänge:

$$L_T = 5 \cdot (h_2 - h_1) \quad (3.12)$$

Wichtig bei der Berechnung ist, dass diese vorerst nur für einen einzelnen Abflusszustand gültig ist, so dass die Energieumwandlung für alle anderen Abflüsse nicht optimal ist.

3.1.5. Schiffschleuse

Die Anordnung der Schleusen an kanalisiertem Flüssen spielt eine wichtige Rolle an der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs. Je nach Flussverlauf (gerade, mäßig oder stark gekrümmt) ist die optimale Lage zu bestimmen. Bei stark gekrümmten Flüssen und Flussschleifen ist ein Durchstich fast immer die einzig sinnvolle Lösung.

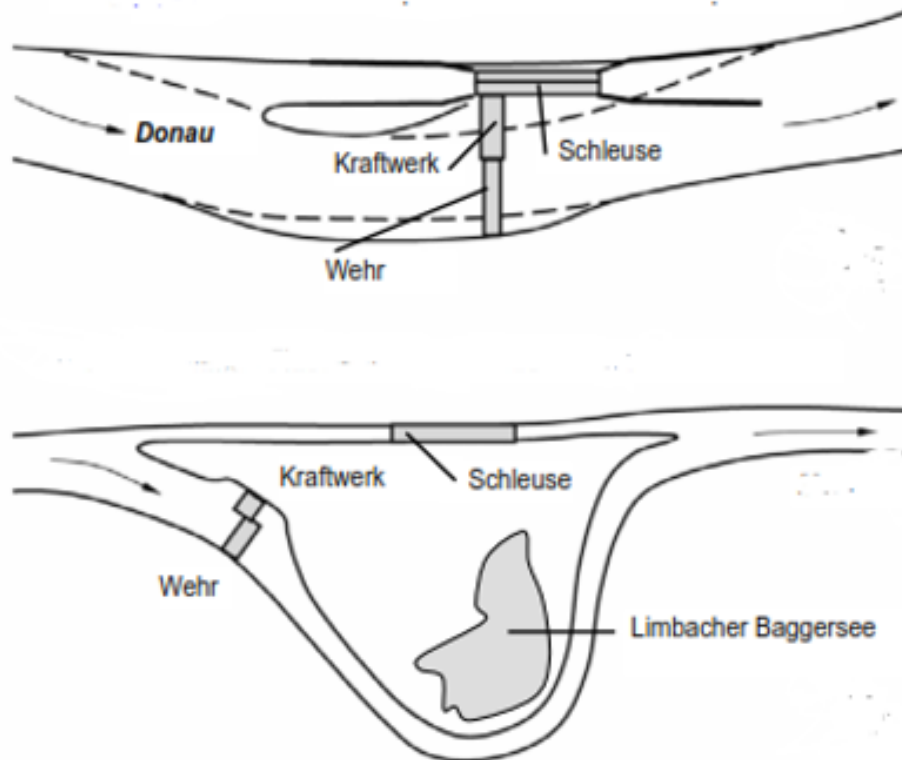


Abbildung 3.13: Anordnung von Schleusen an Staustufen [2]

Einen Höhenunterschied im Wasserspiegel zwischen Oberwasser und Unterwasser eines Flusses oder Kanals kann mit Hilfe von Schleusen überwunden werden. Unterschiedliche Wasserspiegel entstehen beispielsweise:

- an Wehren, wo Wasser zum Zwecke der Energiegewinnung aufgestaut wird
- um eine ausreichende Fahrwassertiefe zu erreichen

Schleusen sind auch üblich an künstlichen Schifffahrtskanälen, die einen Höhenzug überqueren. Bei guten Gründungsverhältnissen lassen sich Schleusen bauen, die einen Höhenunterschied von mehreren Metern überwinden.

3.1.5.1. Schleusung

Den Begriff Schleusung benutzt man bei einem Vorgang, bei dem Schiffe eine Fallstufe mit Hilfe einer Schiffschleuse oder eines Schiffshebewerks überwinden. Zur

Schleusung zählen die Einfahrt der Schiffe, Schließen des Tors, Füllen oder Leeren oder Schleusenkommer bzw. Heben oder Senken des Trogs, Öffnen des anderen Tors und Ausfahrt der Schiffe.

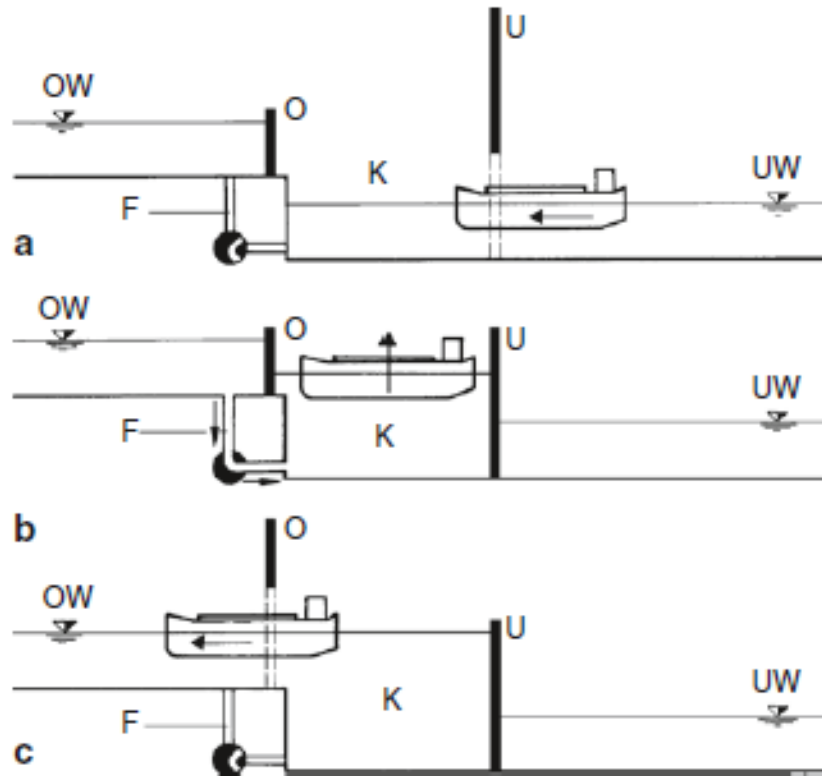


Abb. 3.14: Schleusungsvorgang bei Bergfahrt. a) Einfahrt in Schleusenkommer K; unteres Schleusentor U geöffnet; Füllleitung F geschlossen; b) Anhebung des Schiffes durch Füllung der Kammer K; unteres Tor U geschlossen; Füllleitung F offen; c) Ausfahrt aus Kammer K; oberes Tor O geöffnet; Füllleitung F geschlossen. [8]

Ein Schiff fährt bei geschlossenem oberem Schleusentor und offenem unterem Schleusentor in die Schleusenkommer ein. Dann wird das untere Tor geschlossen und die Schleusenkommer vom Oberwasser gefüllt. Dabei steigt auch das Schiff auf Oberwasserhöhe. Zuletzt wird das obere Tor geöffnet und das Schiff fährt aus der Schleusenkommer ins Oberwasser.

3.1.5.2. Füll- und Entleerung

Für das Füllen bzw. Entleeren der Schleusenammer unterscheidet man drei Methoden:

- Durch die Tore selbst oder mit Schützen in diesen Toren
- Durch Umlaufkanäle mit Abschlussorganen um die Tore
- Über ein System von Kanälen mit Öffnungen im Schleusenboden (Grundlaufsystem)

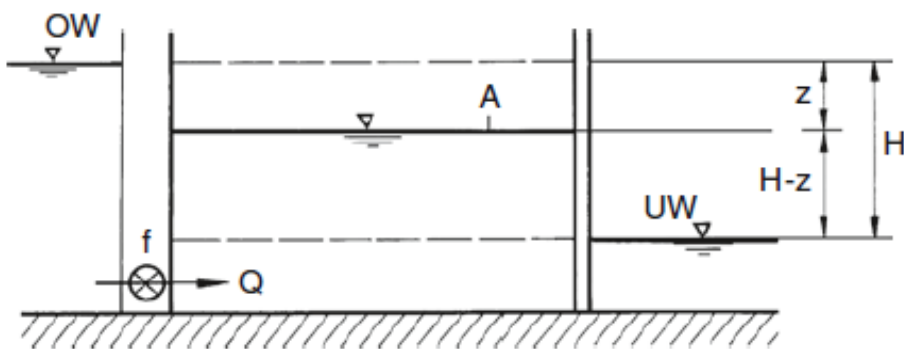


Abb. 3.15: Bezeichnungen für die Berechnung des Füllstroms und der Füllzeit. [8]

Ruhige Verhältnisse in der Schleusenammer sind nur bei der letzten Art selbst bei großen Schleusen und großen Hub- und Senkgeschwindigkeiten (bis zum 3m pro Minute) garantiert.

Die hydraulische Berechnung der Schleusenfüllung stützt sich auf die Kontinuitätsgleichung und die Ausflussgleichung. Die Füllstrom Q ist:

$$Q = \mu \cdot f \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot z}{1 + \Sigma \xi}} = A \frac{dz}{dt} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.13)$$

Wo:

A – Spiegelfläche in der Schleusenammer [m^2]

F – Austrittsquerschnitt der Füllleitung [m^2]

μ - Kontraktionsbeiwert des Austrittsstrahls [-]

ξ – Beiwerte der hydraulischen Verluste in der Füllleitung [-]

Die Differenzialgleichung kann deutlich gelöst werden, wenn die Schleusenwände senkrecht sind, d.h. die Fläche der Schleusenkammer A folglich unabhängig von z ist und der Füllquerschnitt f konstant bleibt. Die Füllzeit T ergibt sich dann zu:

$$T = \frac{2 \cdot A \cdot \sqrt{H}}{\mu \cdot f \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{1 + \Sigma \xi}}} \quad [\text{s}] \quad (3.14)$$

oder

$$T = \frac{2 \cdot V}{Q_{\max}} \quad [\text{s}] \quad (3.15)$$

Wo:

T – Füllzeit [s]

Q_{\max} – maximaler Füllstrom für $z=H$ [m^3/s]

V - gefülltes Kammervolumen = $A \cdot H$ [m^3]

Der Füllstrom Q und damit die Hubgeschwindigkeit müssen im Hinblick auf die Stabilität in der Schleusenkammer und in den Vorhäfen begrenzt werden. Ähnliche Berechnungen und Überlegungen gelten auch bei der Entleerung.

3.1.5.3. Schleusentore

Als Schleusentore werden am meisten Hub- oder Senkschützen am Oberhaupt und Stemmtoren am Unterhaupt eingebaut. Es ist möglich bei einer Schleuse mit großer Hubhöhe, als Untertor auch eine Hubschütze zu verwenden, die dann im oberen Teil durch eine feste Abschlusswand ersetzt wird.

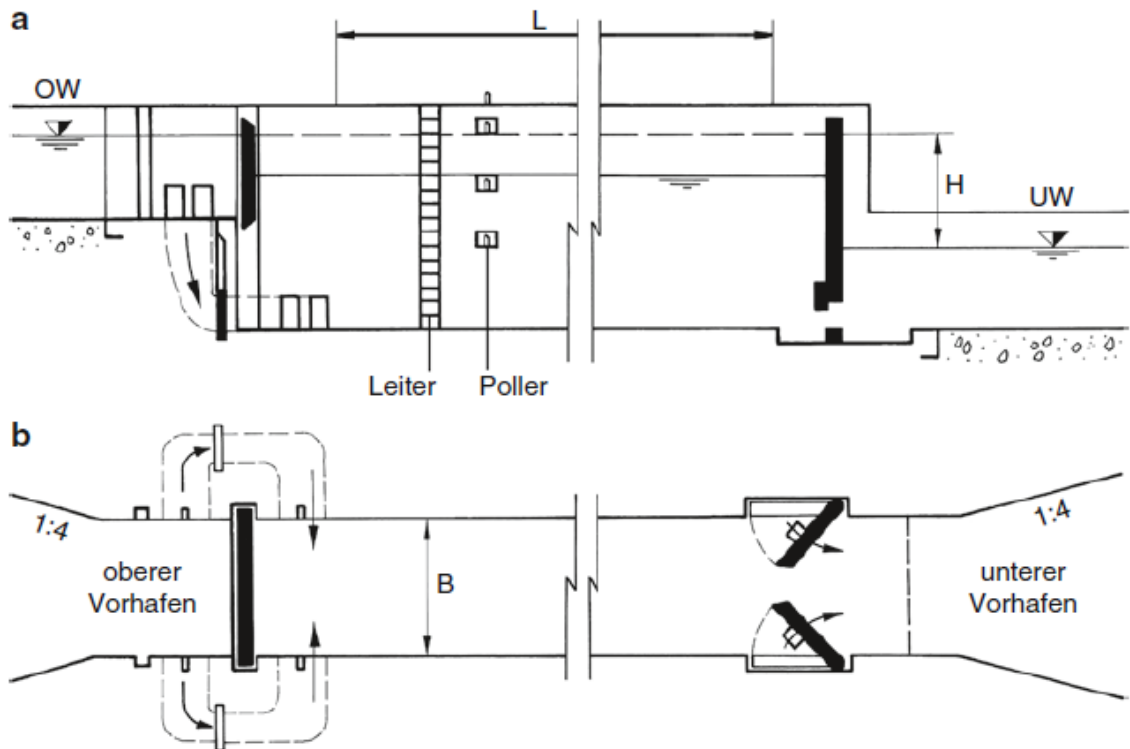


Abb. 3.16: Schleuse mit Senktor am Oberhaupt und Stemmtoren am Unterhaupt.

Längsschnitt; b) Lageplan [8]

Die Abbildung zeigt als Beispiel eine Schleuse mit einem Senktor am Oberhaupt und Stemmtoren am Unterhaupt. Die Füllung der Schleuse geschieht durch einen Umlaufkanal mit Abschlussorgan, die Entleerung durch Schützen in den Stemmtoren.

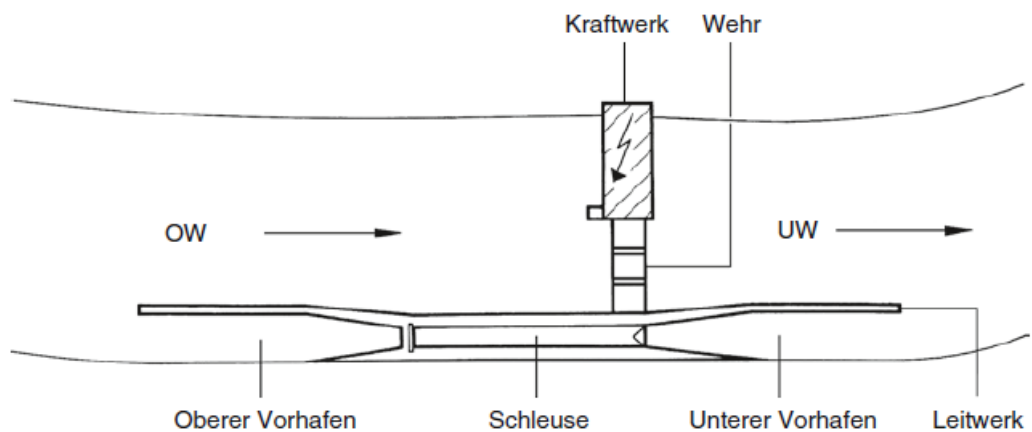


Abb. 3.17: Anordnung einer Schleuse neben einem Flusskraftwerk [8]

3.2. Nebenbauwerke

An jeder Niederdruckanlage sollen einige Nebenanlagen angeordnet werden. Sie zielen darauf ab, um einen rechtmäßig Betrieb einer Kraftwerksanlage zu gewährleisten, um den ökologischen Ansprüchen gerecht zu werden und um die Freizeitbedürfnisse von Naherholungssuchenden zu befriedigen.

3.2.1. Grundablass und Kiesschleuse

Wenn Reparaturen und Staurauminspektionen notwendig sind, muss den Stauraum vollständig leer zu sein. In diesen Fällen kommt zur Rettung den Grundablass. Der wird auch als Kiesschleuse ausgebildet, um Geschiebe und Schwebstoff aus dem Staubereich zu entfernen. Als Absperrvorrichtung kommen in beiden Fällen meist einfache Gleit- oder Rollschützen zur Anwendung.

3.2.2. Fischpassagen

Wehranlagen unterbrechen den natürlichen Abfluss in einem Gewässer und verhindern damit die Durchwanderbarkeit der Flüsse für alle im Fluss lebende Tiere. Eine Bewegung nach Unterwasser ist im Prinzip durch die Turbinen der Wasserkraftanlagen möglich, aber das führt zu einem hohen Mortalitätsrate, als die Fische versuchen die Turbinen zu durchschwimmen. Seit mehreren Jahrzehnten sucht man verschiedene Lösungen, um die Wanderung der Lebewesen an einem Wehr zu erleichtern. Es sind zahlreiche Fischaufstiege und Fischabstiege gebildet. Aber das Problem ist nicht die Ausgestaltung des Umgebungsgewässers selbst, sondern das die Tiere den Einstieg zum Gewässer nicht oder selten finden.

3.2.2.1. Fischaufstiegshilfen

Fischaufstiege werden gebaut, damit Fische eine Wehranlage nach Oberstrom überwinden können. Diese Aufstiege bestehen aus feste Gerinne, das von 0,75 bis 1,50m breit ist, und aus Stufen oder Hindernissen bis zu 30cm hoch. Heute bemüht man sich, der Natur nachempfundene Aufstiegshilfen zu realisieren, meist in Form von naturnah gestalteten Umleitungsgewässern, die einen ständigen Wasserstrom

aus dem Oberwasser zum Unterwasser erlauben und damit die ökologische Durchgängigkeit des Flusses bewirken.

Der unterwasserseitige Zugang (Einstieg) zu einem Fischpass oder einem Umleitungsgewässer sollte möglichst nah am Wehrbauwerk liegen und eine ausreichende Lockströmung aufweisen, damit Fische den Zugang finden können.

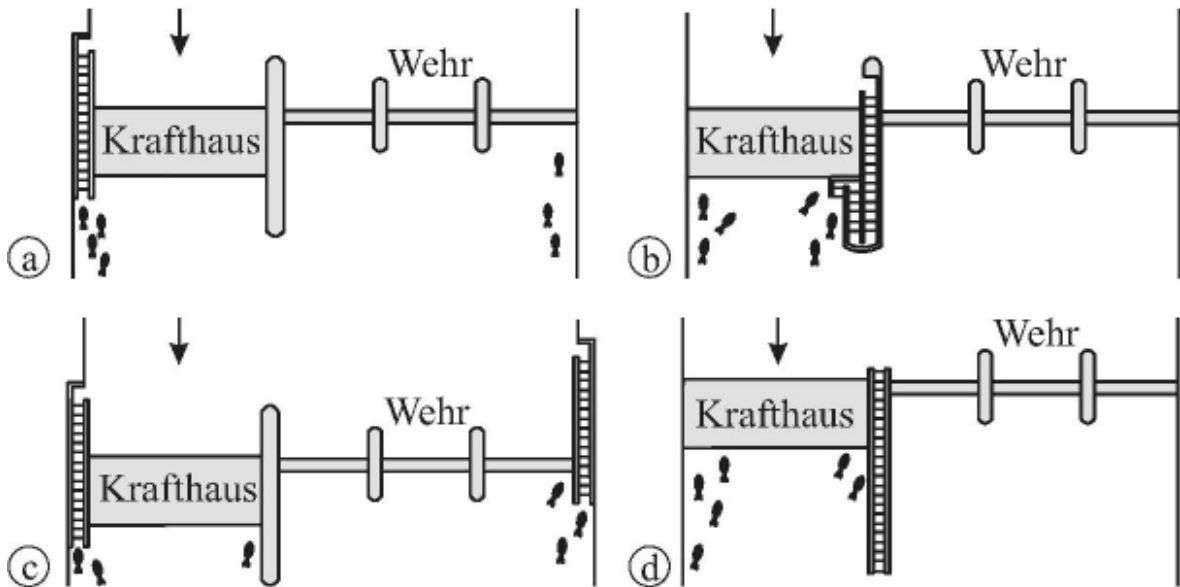


Abb.3.18 Beispiele für die wirksame (a,c) und unwirksame (b,d) Anordnung von Fischaufstiegsanlagen an Wasserkraftanlagen [4]

Um die Fische leichter der Einstieg in die Fischaufstiegsanlage zu finden, muss er an der Uferseite eingeordnet werden, an der die Hauptströmung des Fließgewässers anliegt. Das heißt an der das Krafthaus angeordnet ist.

3.2.2.2. Fischabstiegshilfen

Aale, aber auch andere Fischarten, wollen zu bestimmten Zeiten flussabwärts wandern. Bis heute gibt es hierfür jedoch keine wissenschaftlich abgesicherten Anlagen, die zudem auch mit finanziell vertretbarem Aufwand hergestellt werden könnten.

4. Entwurf von Flusskraftwerke

An Flüssen erfolgt die Errichtung von Wasserkraftanlagen immer in Verbindung mit Wehren. Das Wehr dient dazu, den Fluss auf die gewünschte Höhe (Stauziel) einzudämmen. In dieser Art und Weise ermittelt es den für die Energieerzeugung anwendbaren Unterschied zwischen Ober- und Unterwasser. Noch eine wichtige Aufgabe von dem Wehr ist die Abführung der Hochwasser darüber.

Die Flusssohle, die sich im Unterwasser des Kraftwerks befindet, wird ausgebaggert um tiefer gelegt zu werden. Dadurch wird eine größere Fallhöhe realisiert. Auch noch wird gleichzeitig versichert, dass auch in Zeiten niedriger Wasserführung der Auslauf des Kraftwerks stets eingedämmt bleibt. Dies ist aus betrieblichen Gründen unabdingbar.

Die Anordnung eines Kraftwerks in einem Fluss unterscheidet sich im Bezug auf seine Lage zum Wehr.

4.1. Blockbauweise bzw. Buchtenkraftwerke

In konventioneller Blockbauweise werden diese Kraftwerksanlagen aufgebaut, deren Krafthaus nur in einem Block ausgeführt ist.

Soweit dieses möglich ist im Zusammenhang mit den topographischen und den Siedlungsverhältnissen versucht man das schon vorhandene Flussbett zu verbreitern und das Krafthaus ganz oder mindestens zum Teil in der so geschaffenen Bucht zu errichten. Dieses hat zwar gewisse Nachteile, doch überwiegen in der Mehrzahl der Fälle ihre Vorteile. Für die Ausbildung einer Bucht sprechen folgende Erwägungen.

4.1.1. Verbreiterung des Flussbettes

- 1) Ableitung der Hochwässer ohne schädlichen Überstau.

Bei niedrigen Staustufen ist der Raum für das Krafthaus im ursprünglichen Flussbett wegen des zur Abführung der Hochwässer nötigen Wehrs nicht genügend. Je niedriger der Stau, desto schwieriger ist es, die Verbreiterung des Flussbettes zu vermeiden. Die Bucht muss auch um so breiter sein, je höher der Bezug zwischen

Ausbau- und maßgebender Hochwassermenge (Q_A/Q_{\max}) ist. Einfach mit anderen Worten: im Vergleich zu Flüssen mit ausgeglichener Abflussgang brauchen diese mit heftigerer Wasserführung unter sonst gleichen Bedingungen weniger verbreitert zu werden.

Die Gründe für eine Verbreiterung des natürlichen Flussbetts sind indessen mitunter nicht nur betrieblich, sondern wird dieses auch im Interesse der leichteren Bauausführung bevorzugt. Die Einschnürung des bestehenden Flussbettes durch die Umschließung der Krafthausbaugrube wird nicht immer zulässig sein. Strebt man sich dennoch nach den natürlichen Grenzen, darf die Krone der Umschließung nicht über den HHW-Spiegel zu liegen kommen, d.h. notfalls muss die Überflutung der Baugrube durch hohe Hochwässer hingenommen werden. Diese Schwierigkeiten lassen sich durch Unterbringung des Krafthauses im buchtenartig verbreiterten Flussbett umgehen. So bevorzugt man eine Bauausführung in der vor Hochwasser und Eisgang auf diese Weise hinreichend geschützten Bucht als die einfachere, schnellere und daher auch wirtschaftlichere Variante.

2) Geschützte Lage des Krafthauses bei starkem Eisgang.

Falls über dem Triebwasserverbrauch des Kraftwerkes noch große Überschusswassermengen verbleiben, dann ist es leichter die Eisschollen durch die Strömung auch ohne besondere Einrichtungen dem Wehr zugetrieben zu werden. Bei geringem Wasserüberschuss verwendet man schwimmende Eisbäume. Damit wird die Oberflächenströmung und somit das Treibeis den Wehröffnungen zugeleitet.

Bei der Buchtenanordnung wird das ursprüngliche Flussbett nur wenig oder überhaupt nicht verengt, so dass das Wehr die treibenden Eisschollen ohne Packeisbildung abzuleiten vermag – darin besteht sich einen der Vorteile dieser Errichtungsvariante. Darauf muss die Entscheidung über die Allgemeinanordnung besonders bei Flüssen mit starkem Eisgang bezogen werden.

In der abseits vom Stromstrich des Hochwassers liegenden Bucht bildet sich in der Regel eine zusammenhängende, den größten Teil des Winters über verbleibende Eisdecke. Diese behütet das Krafthaus vor dem Treibeis und verhindert die Bildung von Schweb- und Grundeis in der Bucht.

Demgegenüber erscheinen als Nachteile der Bettverbreiterung:

3) die starke Ablenkung der Triebwassermenge vom ursprünglichen Stromstrich. Sie ist ein ungünstiges Ergebnis der Buchtenausbildung. Allgemeinanordnung der ganzen Anlage, Linienführung der Bucht sowie Ausbildung des Trennpfeilers zwischen Kraftwerk und Wehr müssen daher mit großer Sorgfalt festgelegt werden, damit sich das Strömungsbild in der Bucht nicht zu ungünstig gestaltet. Die künstliche Ablenkung des Triebwassers in die Bucht führt zu schlechteren Strömungsverhältnissen und je breiter die Bucht im Vergleich zum ursprünglichen Gerinne, desto schlechter die Verhältnisse. Ablösungserscheinungen, tote Räume und Querströmungen, Bildung von Walzen und Neeren können als unerwünschte Folgen einer solchen Ablenkung erwähnt werden. Alle diese Auswirkungen verschulden Energieverluste, die in Spiegelabsenkungen in der Bucht resultieren. Die schlechten hydraulischen Verhältnisse bringen nicht nur überflüssigen Energieverlusten in der Bucht, haben aber noch eine schädliche Auswirkung sich auf die Energieerzeugung am Krafthaus. Bezüglich der Anströmung des Krafthauses hat das ungünstige Strömungsbild drei Merkmale:

- a. Ungleichmäßige Anströmung. Die dem Wehr nächstliegende Turbine wird außergewöhnlich schwächer gespeist, so entstehen wegen der toten Räume innerhalb eines Turbineneinlaufes einseitige Strömungen. Einlaufspirale und Turbine werden ungleichmäßig angeströmt, zwischen Ablösungsfläche und Wandung bilden sich Wirbelfelder, im eingeschnürten Durchflussraum kommen höhere Geschwindigkeiten zustande, als vorgesehen. Diese Faktoren vergrößern die Energieverluste.
- b. Erhebliche Vergrößerung der Rechenverluste auf Grund Schräganströmung.
- c. Die in der Regel eintretende Unbeständigkeit des Strömungsbildes. Die Ablösungsflächen verändern ihre Lage. Dieses führt zu einem Pulsieren in der Wasserbelastung der Turbine und damit gleichfalls zu einer schlechteren Turbinenwirkungsgrade.

Die Anströmung wird ungünstiger, wenn die Wasserführung des Flusses unter dem Ausbaudurchfluss bleibt und daher der ganze Zufluss in die Bucht umgeleitet werden muss.

Die insuffizienten Strömungsverhältnisse können auch noch eine schädliche Folge haben - Neeren und Walzen können einerseits selbst grobe Geschiebe mitreißen und in die Turbine schwemmen, andererseits die Verkleidung der Bucht angreifen.

Die einzige Möglichkeit, den beschriebenen Fehlern zu vermeiden bzw. annehmbare Strömungsverhältnisse zu ermöglichen, besteht sich in einer sorgfältigen und durch Modellversuche kontrollierten Entwurfsarbeit.

- d. Die Verlandung – noch eine gefährliche Erscheinung, die auch in hydraulisch günstig errichteten Buchten beobachtet werden kann. Je kleiner die Strömungsgeschwindigkeiten in der Bucht, um so größere Ausmaße nehmen die Geschiebeablagerungen an. Die beste Anordnung der Bucht ist an der Außenseite einer Staustufe, die sich in einer Krümmung befindet. So gelangt bedeutend weniger Geschiebe in der Bucht im Vergleich zu Ausbuchtungen, die an geraden Strecken oder an der Bogeninnenseite einer Flusskrümmung angeordnet wurden.

In den toten Räumen strömungstechnisch ungünstig gestalteter Buchten können sich überdies auch erheblichen Mengen von Schwebstoffe absetzen.

- e. Erhöhte Erstellungskosten. Zur Verbreiterung des Flussbettes muss der Uferstrich in Anspruch genommen werden. Unter Umständen betrifft der Bau Straßen, Eisenbahnen, Siedlungen usw. im Ufergebiet auf alle Fälle aber sind umfangreiche Erdarbeiten notwendig.

Welche Entscheidung trifft man aber nach Abwägen der angeführten Vor- und Nachteile? Bei geringer zulässiger Stauhöhe gelangt man in der Regel zu der Schlussfolgerung, dass die im Endergebnis günstiger ist als die Ausführung ohne Verbreiterung des Flussbettes.

Die andere Variante, Bau von Flusskraftwerken ohne Verbreiterung des Flussbettes, ist dann die bessere Lösung, wenn die zulässige Stauhöhe so groß ist, dass auch die um die Krafthauslänge verminderte Bettbreite zur Abführung des höchsten Hochwassers genügt.

Topographische und Siedlungsverhältnisse können aber (unabhängig von den Stauverhältnissen) die Möglichkeit einer Buchtenanordnung

verhindern oder sogar vollständig ausschließen. (Abb. 4.1). In solchen Fällen können die Nachteile

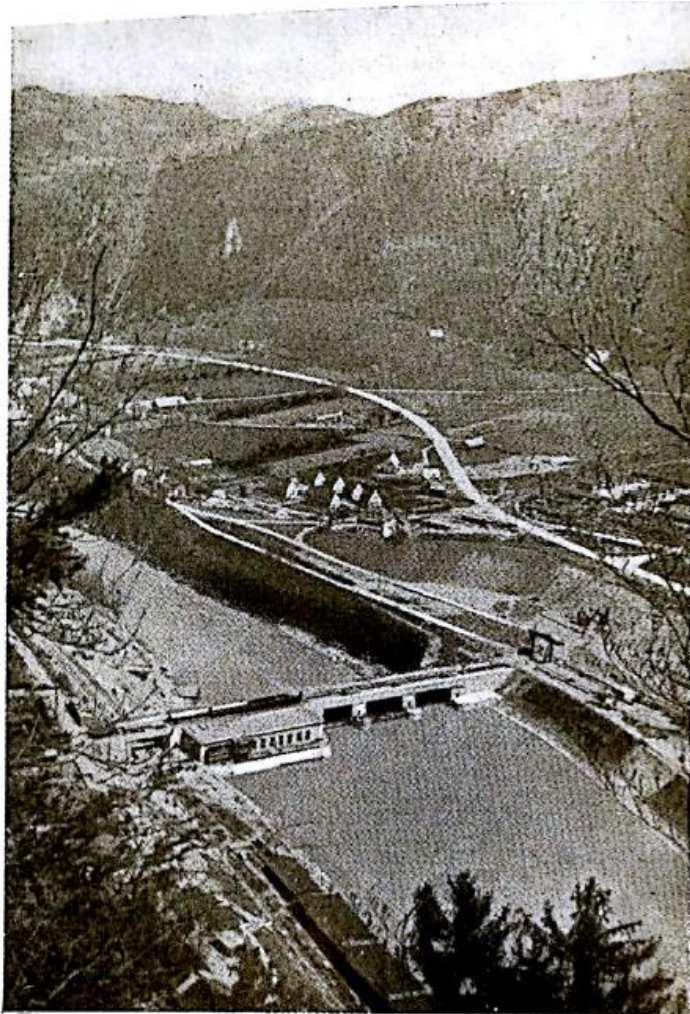


Abb. 4.1: Flusskraftwerk in einem engen Tal ohne Verbreiterung des ursprünglichen Gerinnes. Kraftwerk Ternberg, Enns, Österreich. [3]

der Betteinschnürung bis zu einer gewissen Grenze noch abgewägt werden, obwohl die Ausbildung einer Bucht unter anderen Bedingungen günstiger wäre. Falls aber die Verengung der Flussbreite durch den Krafthausbau keinesfalls zugelassen werden kann, so muss auf eine andere Bauweise gesucht werden und es treten das Pfeilerkraftwerk und das überströmbare Wehrkraftwerk in den Vordergrund, die in den folgenden Abschnitten eingehend behandelt werden.

4.1.2. Entnahmebauwerk

Da ein Fließgewässer ein komplexes System ist, befindet sich dieses nur selten im Gleichgewicht, sondern vielmehr in einem ständigen Anpassungsprozess, um seinen Zustand den aktuellen hydrologischen, topografischen, geologischen und flussbaulichen Randbedingungen anzupassen. Jeder Eingriff von außerhalb in dieses System, in diesem Kontext die Triebwasserentnahme, verursacht eine Störung der momentan entlang der Fließstrecke des Flusses vorhandenen Gleichgewichtszustände und zwingt dadurch das System, seinen laufenden Anpassungsprozess zu verändern. Deswegen darf im Rahmen der Planung die Entnahmestelle nicht nur lokal behandelt, sondern man muss eher die kurz- und langfristigen Auswirkungen des Eingriffes auf die ober- und unterhalb liegende Gewässerstrecke detailliert erforschen.

Besonders bedeutend ist für die Triebwasserentnahme ist die Verringerung der dem Kanaleintritt zugeführte Geschiebemenge. Die wichtigste Rolle dafür spielt die richtige Wahl der Entnahmestelle.

Die neueren Flusskraftwerke werden zumeist ohne Entnahmebauwerk gebaut, da es die Kosten wesentlich erhöht, ohne bemerkenswerte Vorteile zu bieten. Die Gründungsarbeiten für das Entnahmebauwerk erfordern nämlich entweder eine sehr umfangreiche Erweiterung der zu umschließenden und trockengelegenden Kraftwerksbaugrube oder eine eigene Baugrubenumschließung und Entwässerung. Unter schwierigen Gründungs- und Wasserhaltungsverhältnissen wird der Bau eines eigenen Entnahmebauwerkes nur in Ausnahmefällen wirtschaftlich sein.

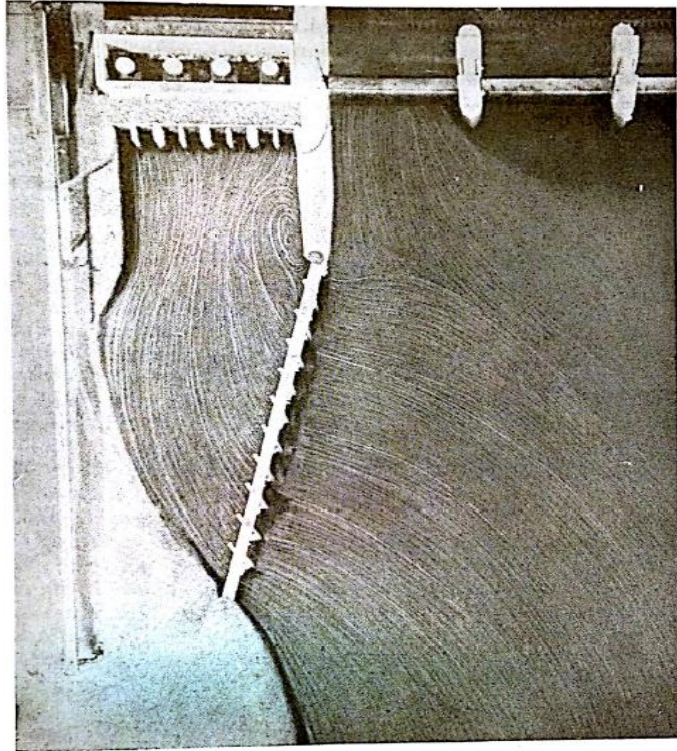


Abb. 4.2: Modellversuch für ein Flusskraftwerk, wo die Pfeiler des Entnahmebauwerks nicht parallel zueinander liegen [3]

Das Entnahmebauwerk liegt am Eingang der Bucht und besteht im Wesentlichen aus einer Schwelle mit Pfeilern zur Abstützung von Bedienungsbrücke, Tauchwand und Rechen.

4.1.3. Trennpfeiler

Wegen der strömungstechnischen Anforderungen ist es ganz wichtig, dass die Bucht mit einer ausreichend großen Verziehung der Uferlinie nicht nur auf der Ober- aber auch auf der Unterwasserseite eingeplant wird, damit die Strömung im Bereich des Kraftwerkes gleichmäßig bleibt. Eine wichtige Rolle spielen noch die Trennpfeileranordnung, -länge und -form. Gute Resultate zeigen im Allgemeinen ein Trennpfeiler mit einer Länge von etwa $\frac{1}{3}$ der Krafthauslänge und einer asymmetrischen Grundform mit wehrseitig gerader und kraftwerkseitig parabolischer Abgrenzung. Vor allem ist aber für das beste Ergebnis einen alle örtlichen Randbedingungen erfassenden Modellversuch wichtig.

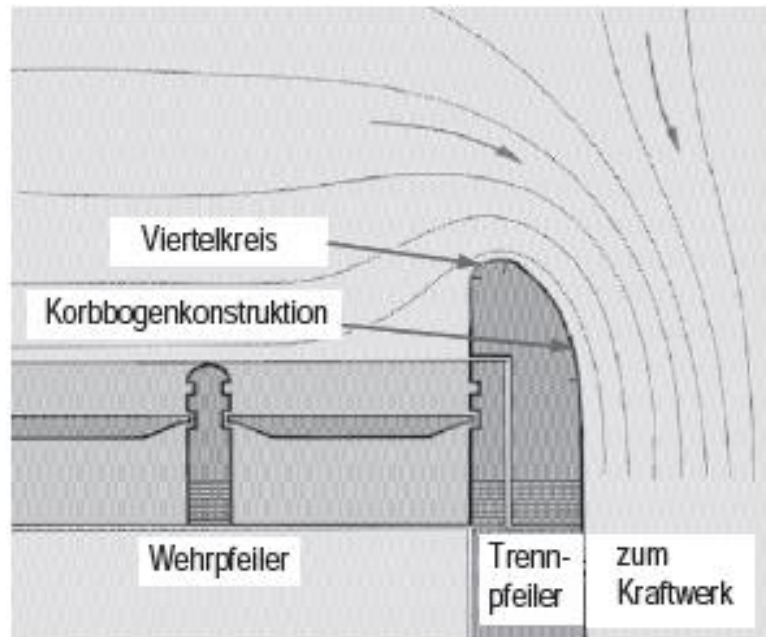


Abb. 4.3 Beispiel Trennpfeileranordnung am Fluss [2]

4.2. Zwillings- und Inselkraftwerke

Bei Flüssen mit großem Ausbaudurchfluss und kleiner Fallhöhe kommt es unter besonderen Umständen zu einer Zweiteilung des Kraftwerkes. Diesfalls sind beispielsweise aufgrund der höheren Anzahl von Maschinengruppen große Krafthauslängen erforderlich. Diese würden dann bei ungeteilter Unterbringung des Kraftwerkes an einem der beiden Ufer zu einem Missverhältnis zwischen Buchtweite und der ursprünglichen Flussbettweiten führen.

4.2.1. Warum Zwillingskraftwerk

Eine Zweiteilung des Kraftwerkes kann aus unterschiedlichen Gründen erforderlich werden:

- a. Die Anwendung von relativ großen Ausbauwassermengen unter sehr kleinen Fallhöhen setzt Krafthausbreiten voraus, die können öfters bei einer ungeteilten Verlegung des Krafthauses an eines der beiden Ufers zu einem Missverhältnis zwischen ursprüngliche Flussbett- und Buchtweite führen. Aus diesem Grund würde eine solche Anordnung erschwert, wenn nicht ganz unmöglich gemacht. Weiterhin würde die Strömungsverhältnisse in der

Bucht auch nur einigermaßen günstig gestaltet und eine gleichmäßig gute senkrechte Anströmung der Rechen erreicht.

Für den Fall, dass die Staustufe in eine Krümmung verlegt werden muss, ist eine Zweiteilung des Kraftwerkes trotz günstigen Gestaltung der Strömungsverhältnisse nicht anzuraten. Hierbei kommt es zu einer Verladung, die dadurch hervorgerufen werden kann, dass eines der beiden Kraftwerksteile unbedingt in die Bogeninnenseite zu liegen käme. Das kann dementsprechend Schwierigkeiten im Betrieb verursachen, die durch die Verbesserung der Strömungsverhältnisse keineswegs aufgewogen werden würden.

Die Zweiteilung des Kraftwerkes ist sehr oft an geraden Flussstrecken oder bei Staustufen zu empfehlen, die in den geraden Durchstrich einer Flussschleife zu liegen kommen. Dementsprechend bietet das in der Mitte gelegene, von zwei gleichgroßen Zwillingskraftwerken flankieren Stauwerk an geraden Strecken eine günstige Lösung, die allerdings nur in dieser Hinsicht zu beachten wird.

Wenn es um Flüssen mit unbedeutender Geschiebeführung geht, kann sich die Zweiteilung des Krafthauses auch in Krümmung begründet erweisen. Hierbei vermindert sich der Rückstau bei Krümmungen, was zu einer erhöhten hydraulischen Leistungsfähigkeit des Stauwerkes im Vergleich zum Blockkrafthaus an der Bogenaußenseite führt.

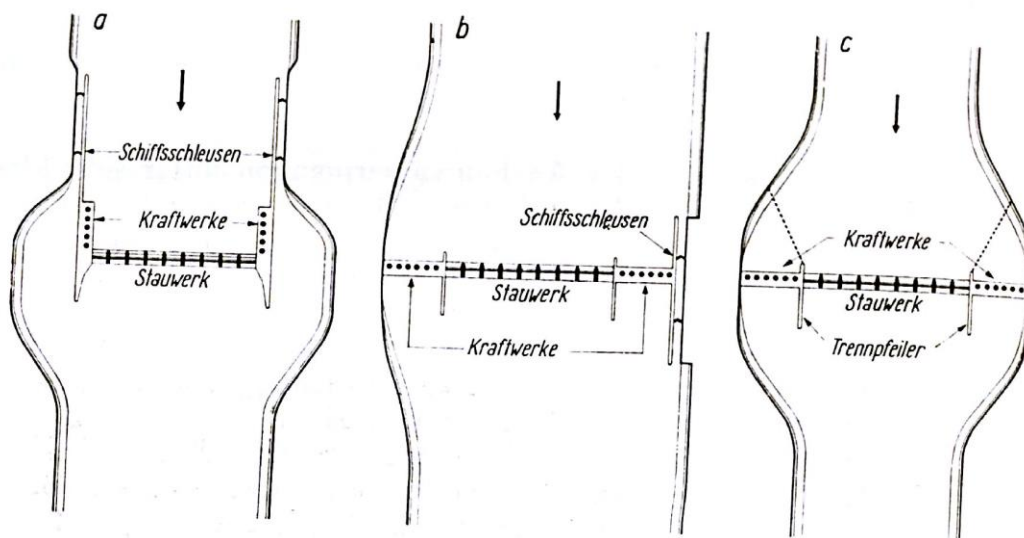


Abb. 4.4 Typische Grundrissanordnung für zweiteilige Kraftwerke [3]

b. Sehr häufig sind die Wasserkräfte von Grenzflüssen zwischen benachbarten Ländern in Zwillingskraftwerken verwendet. Einerseits bildet das in Flussmitte erbaute Stauwerk gemeinsamen Besitz, andererseits wird je ein Kraftwerk am eigenen Ufer zur Energieverwendung von beiden Nachbarländern errichtet. Darüber hinaus kann der Bau geteilter Kraftwerke auch innerhalb der Grenzen ein und desselben Landes in Frage kommen, falls die Energie durch zwei verschiedene Unternehmen verwendet wird.

4.2.2. Anordnung am Fluss

Die oben dargestellte Abb. 4.5 legt im weiteren Sinne dar, die schematischen Grundrissanordnungen von Zwillingsanlagen. Der Lageplan eines zweiteiligen Kraftwerkes an einem schiffbaren Grenzfluss mit je einer eigenen Schiffsschleuse an den beiden Krafthäusern wird von Skizze a) illustriert. Bild b) repräsentiert dagegen eine Lösung, bei der die Teilung des Kraftwerkes aus hydraulischen Gründen erfolgte, so dass nur eine Schiffsschleuse erforderlich war. Letztendlich zeigt die Anordnungsskizze c) einer geteilten Kraftanlage mit geschlossenen Buchten an einem nicht schiffbaren Fluss, der weiterhin mit Entnahmebauwerken versehen ist.

4.2.3. Nachteile

Unter anderen zeichnet sich die Zweiteilung des Krafthauses durch gewisse Nachteile aus:

- Im Vergleich zu den Anlagekosten erforderlich für Krafthaus in ungeteilter Bauweise, sind diese für ein zweiteiliges Krafthaus im allgemeinen wesentlich höher.
- Aufgrund der größeren Belegschaft, die ein Zwillingskrafthaus erfordert, kommt es zu einer Erhöhung der Personalkosten.
- Da beide Maschinenhallen getrennt sind, lässt sich ihre Überwachung schwer gewährleisten.

4.2.4. Inselkraftwerke

Beim Inselkraftwerke lässt sich in der Mitte des Flussbettes ein beiderseitig vom geteilten Stauwerk flankierte Kraftwerk erkannt werden. In Sonderfällen, wo eine seichte Stelle in Flussmitte günstige Möglichkeiten zur Errichtung des Krafthauses zur Verfügung stellt, kann sich diese Bauweise als geeignet erweisen. Hierbei werden die tieferen Teile oder Arme des Flussbettes durch bewegliche oder feste Wehranlagen abgesperrt. Zu dieser Anordnung wird sich man dann vornehmlich auf Grund baulicher oder gründungstechnischer Überlegungen entscheiden. Überwiegend wird die Inselbauweise für Kraftwerke in felsigen Flussbetten relevant sein.

4.3. Pfeilerkraftwerke

Die wechselnde Anordnung von Wehrfelder und Turbinenpfeiler in der Kraftwerksachse sind Kennzeichen der Pfeilerkraftwerke. Um gewährleistet zu sein, dass die Anströmung beider Anlagenteile gleichmäßig wird, ersetzen die Turbinenpfeiler separate Wehrpfeiler. Weiterhin nehmen diese gleichzeitig die Widerlager für die Wehrfelder auf. Dies gilt auch dann, wenn die Wehrfelder verschlossen und nur die Turbinen in Betrieb gesetzt sind. Es wurde weiter festgestellt, dass solche Bauweise einerseits Einsparungen an der Energieumwandlungsanlage für den Hochwasserabfluss erlaubt, andererseits führt sie zum Verzicht der Querschnittverbreitung für das Tosbecken durch Ausnützung der räumlichen Tosbeckenwirkung.

4.3.1. Anordnung am Fluss

Verglichen mit der Stauanlage konventioneller Blockkraftwerke setzt diese Bauweise wesentlich breitere Stauwerkspfeiler voraus. Der Verbreitung der Pfeiler, in denen die Turbinen untergebracht sind, benötigt insgesamt weniger Baulänge als ein gleichwertiges zusammenhängendes Krafthaus, was für eine kürzere Gesamtbaulänge spricht. Jeder Pfeiler des beweglichen Wehres ist mit einer Turbine ausgerüstet. Aufgrund der neueren Tendenzen, die auf dem Weg nach einer Vergrößerung der Maschinensätze sind, kann der Pfeiler mit einem Aggregat als die Grundform angesehen werden. Dennoch stehen natürlich in Sonderfällen dem Einbau zweiter Einheiten je Pfeiler keine besonderen Schwierigkeiten im Wege.

Bereits bei der Behandlung des Zwillingskraftwerkes hat sich die Verminderung der Bruchbreite ereignet. In dieser Hinsicht wurde dann weiter festgelegt, dass eine Zweiteilung des Krafthauses keineswegs das geeignete Mittel ist, die Flussbettverbreiterung umzugehen, sondern eher dessen Verteilung auf die beiden Ufer ermöglicht. Die Aufteilung des Kraftwerks auf die Pfeiler ist jedoch zugelassen, zumindest mit einer weniger starken Verbreiterung des Flussbettes auszukommen. Unter Umständen bringt sogar die ganze Staustufe in der ursprünglichen Flussbreite unter. Aus diesem Grund kann die Pfeilerbauweise überall dort zu einer gewissen Bedeutung gelangen, wo eine Staustufe in engem Raum (in einer engen Talstrecke) errichtet werden muss.

Die Anströmungsverhältnisse sind auch aufgrund der Aufteilung des Krafthauses verbessert. Allumfassend ist die Anströmung der Turbinen bzw. der vor diesen angeordneten Rechenfelder besser ausgebildet als bei Buchtenkraftwerken oder auch bei Blockkraftwerken, die nur die ursprüngliche Flussbreite einnehmen. Die auf die ganze Flussbreite verteilten Turbinen lenken die ursprüngliche Strömungsrichtung offensichtlich weniger ab als ein zusammenhängendes Kraftwerk, was für die Richtigkeit der Feststellung spricht. Tatsächlich sind auch bei der zusammenhängenden Bauweise Anordnungen möglich. Diese bringen zurzeit von Nieder- und Mittelwässern gleiche oder sogar etwas bessere Strömungsbilder zum Vorschein. Für die Abteilung der Hochwässer ist jedoch diese Lösung entschieden ungünstiger, weil deren Wassermassen, wenn nicht zur Gänze, so doch zum überwiegenden Teil durch die Wehröffnungen an der Bogeninnenseite abgelassen werden müssen. Die Verlegung des Kraftwerkes an die Bogeninnenseite dagegen käme zwar der Pfeilerbauweise in der Ableitung der Hochwässer gleich, weisen aber bei Nieder- und Mittelwasser ungünstigere Strömungsbilder auf. Die Aufteilung des Krafthauses auf die Wehrpfeiler lässt also bei beliebiger Wasserführung befriedigende Strömungsverhältnisse zustande kommen.

4.3.2. Pfeiler- und Wehrausbildung

Die gleichmäßige Umströmung der Pfeiler wird durch geeignete Wehrbedienung, spricht durch gleichmäßige Abteilung der Durchflüsse durch die einzelnen Wehröffnungen gesichert.

Weitere strömungstechnische Probleme leiten die richtige Pfeilerausbildung und die relative Lage der Wehrverschlüsse zu den Pfeilern ein.

Obwohl die kennzeichnenden Krafthausquerschnitte erst bei der späteren eingehenden Behandlung des zusammenhängenden Krafthauses gezeigt und erörtert werden sollen, schein es notwendig, die umströmte Bauart an dieser Stelle vorgreifend zu besprechen, da sonst der Einfluss des Stauwerkes nicht verständlich genug beleuchtet werden könnte.

Bei Hochwässern entstehen oberhalb der Wehrverschlüsse erhebliche Spiegelabsenkungen. Die Wehrverschlüsse müsse deshalb tunlichst gegen das Unterwasser hin verschoben werden, damit am Pfeilerkopf, also an den Turbinenläufen, möglichst kleine Senkungen und damit möglichst geringe Energieverluste entstehen. Die Verlegung der Wehrschwelle und der Staukörper gegen das Unterwasser zu hat auch den Vorteil, dass Wassersprung, der durch die über das Wehr herabgelassenen Wassermassen geweckt werden, nicht unmittelbar am Pfeilerende zustande kommen. Wirkt nämlich der Wassersprung bis zum Pfeilerende zurück, so werden der ruhige Austritt aus der Turbine und auch die Wirksamkeit des allfälligen Fallhöhenmehrers gestört. Bei Untersuchung der Strömungserscheinungen ist ferner zu beachten, dass das durch die Wehröffnungen abgeleitete Wasser im Raum hinter den Pfeilerenden, also im Ausflussbereich der Turbinen, eine starke lotrechte Walzenbildung hervorruft, wenn nicht für wirksame Energievernichtung gesorgt wird. Diese Walzen können im Unterwasser der Turbinen einen den Kraftbetrieb störenden, unbeständigen Strömungszustand verursachen.

Die Verschiebung der Wehrkörper gegen das Unterwasser hat indessen auch gewisse Nachteile. Durch Öffnen der Wehrschlüsse kann nämlich die vor dem Pfeiler abgelagerte Geschiebemenge um so weniger abgesaugt werden, je weiter entfernt die Wehrschwelle vom Pfeilerkopf, oder genauer, von der Einlaufschwelle des Pfeilers liegt. Die Abbeförderung der Geschiebeablagerungen vor den Pfeilern gestaltet sich also günstiger, wenn Wehrschwelle und Staukörper näher am Pfeilerkopf angeordnet werden.

Beim Entwurf ist ferner zu beachten, dass vom Sturzboden aus kein Geschiebe in den meistens erheblich tiefer liegenden Saugschlauch gelangen darf. Sturzboden und Energievernichter des Wehres sind daher den Saugschlauchausläufen anzupassen, und ihre Gesamtanordnung ist, wenn nötig, durch Versuche zu überprüfen.

4.4. Überströmbare Flusskraftwerke

An die Stelle des Nebeneinanders von Kraftwerk und Stauwehr tritt beim überströmbaren Kraftwerk ein einheitlicher und organisch durchgebildeter Baukörper. Er erfüllt gleichzeitig drei Aufgaben: Aufnahme der Maschinensätze, Stauhaltung und Hochwasserentlastung. Der Raumbedarf ist auf ein Minimum beschränkt, wodurch sich neben der Ersparnis an Baumaßnahmen die Gesamtanlage gut in das Landschaftsbild eingliedern lässt und eine Flussbettverbreiterung nicht notwendig ist.

4.4.1. Anordnung am Fluss

Das wesentliche Merkmal dieser Bauweise besteht darin, dass das Krafthaus im Körper des Überfallwehres untergebracht ist, der zur Ableitung des Überschusswassers dient. Die Hochwässer fließen teils durch die im Wehrkörper angeordneten Grundablässe, teils über den Überfallsrücken des Wehres ab. Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Wehres bzw. zur Verhinderung eines unzulässigen Überstaus liegt die Wehrkrone in der Regel erheblich unter dem Stauspiegel. Zur Aufrechterhaltung des Staus bzw. zur Regelung des Oberwasserspiegels ist über der Überfallkante des festen Wehres eine bewegliche Wehrkonstruktion angeordnet, die zumeist aus abgestützten Klappen, seltener aus einfachen oder aus Doppelschützen besteht.

Allgemein kann der Grundsatz gelten, dass überströmbare Kraftwerke nur an geschiebearmen Flüssen errichtet werden dürfen, weil der durchlaufende Wehrkörper die ganze Flussbreite einnimmt, also dem natürlichen Geschiebeabtrieb im Wege steht, und auch keine breiten Wehröffnungen mit tiefer Schwelle hat, durch die die Verlandungen mit dem zeitweilig vorhandenen Überschusswasser fortgespült werden könnten.

Wohl kann ein Teil des Geschiebes durch die Grundablässe abgelassen werden, doch ist deren Wirkungsbereich sehr beschränkt. Überdies bleibt in Flussschleifen die durch die Flechtströmung zustande kommende Ungleichmäßigkeit der Geschiebeverteilung unausgenützt, im Gegensatz zu den Verhältnissen beim Blockkraftwerk, das bekanntlich an das geschiebefreie Steilufer gelegt wird, während die Wehröffnungen mit ihren tiefliegenden Schwellen an die geschiebereiche Bogeninnenseite zu liegen kommen. In Krümmungen hat die gleichmäßige Verteilung der

Grundablässe des überströmbaren Kraftwerkes über die ganze Bettbreite den Nachteil, dass sie an der Geschiebeabführung zu einem Teil nicht wirksam genug teilnehmen, wogegen ein Teil der Turbinen starken Geschiebeeinwanderungen ausgesetzt ist.

4.4.2. Krafthaus

Die Grundablässe sind zumeist abwechselnd mit den Turbinenschläuchen über die ganze Länge des Wehrkörpers verteilt, doch kommt auch die gruppenweise Anordnung der Turbinen an einer Seite des Flussbettes vor.

Für überströmbare Kraftanlagen kommen folgender Turbinenarten in Frage:

- 1) Rohrturbinen in geradem oder schwach gekrümmtem Kanal, waagrecht oder schrägachsig liegend, mit Propeller- oder Kaplanlaufrädern;

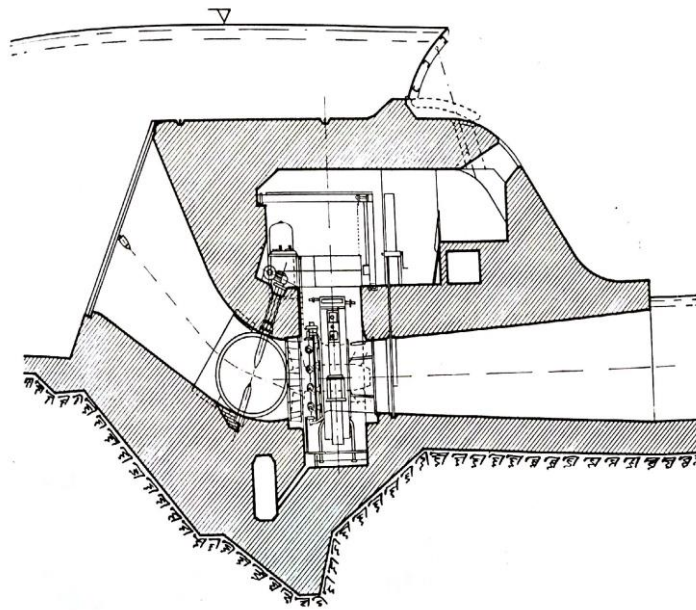


Abb. 4.5 Liegende Anordnung der Strafloturbine im Wehrkraftwerk [3]

2) Propeller- oder Kaplan-turbinen mit Spirale und Saugkrümmer.

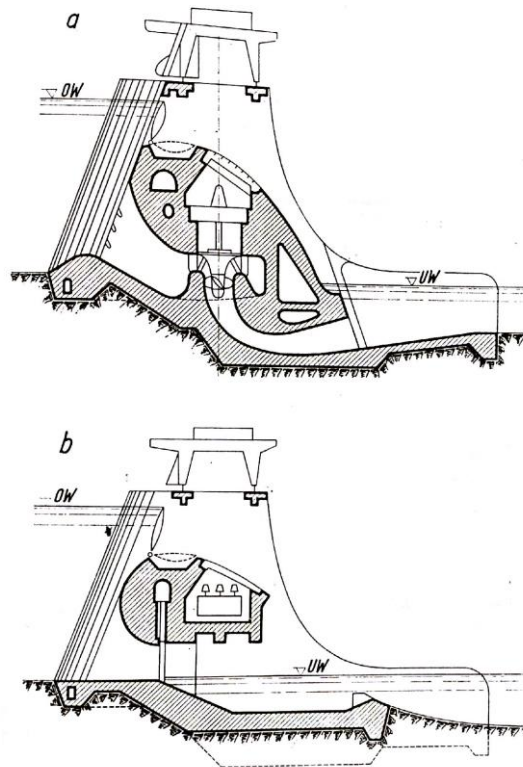


Abb. 4.6 Wehrkraftwerk mit stehenden Kaplaneinheiten. Schnitt a) in der Turbinenachse; Schnitt b) durch die Achse des Grundablasses [3]

Die Unterbringung der Maschinen im Wehrkörper ermöglicht es, das Kraftwerk in den Flusslauf ohne Bettverbreiterung einzuordnen, ja bei genügend hohem Stau kann diese Bauweise mit dem kleinsten Uferabstand ausgeführt werden.

4.4.3. Vorteile und Nachteile

Mit Rohrturbinen ausgestattete Kraftwerke haben folgende Vorteile:

- 1) Gerade Turbinenschläuche benötigen schmalere Bauten als die Anordnung mit Spiralturbinen.
- 2) Die abwechselnde Anordnung von Turbinenschläuchen und Grundablässen schafft in der ganzen Flussbreite günstige Strömungsverhältnisse.
- 3) Das Triebwasser durchfließt Turbinenkanal und Turbine fast ohne Richtungsänderung. Die Rohrturbine arbeitet mit kleineren hydraulischen Verlusten.

schen Verlusten, ein Umstand, der schließlich im guten Wirkungsgrad zum Ausdruck kommt.

- 4) Der Betonunterbau gestaltet sich einfacher, da die verwickelten Schalungsarbeiten zur Ausführung der Raumbildung von Spirale und Saugkrümmer entfallen, wodurch sich auch die Bauzeit verkürzt.
- 5) Die fallhöhenmehrende Wirkung des Überschlusswassers kommt gut zur Geltung.
- 6) Unter gewissen Umständen kommt man Dank den schwach gekrümmten Kanälen mit kleineren Gründungstiefen aus als bei Spiralturbinen.
- 7) Die Konstruktionshöhe ist klein und zumeist entfällt auch die Bedienungsbrücke
- 8) Das überströmbare Kraftwerk benötigt keine einzeln fundierten Pfeiler, höchstens pfeilerartige Trennwände auf der Wehrkrone.
- 9) Der Bedarf an Stahlkonstruktionen ist wesentlich geringer als an beweglichen Wehren mit tiefliegender Schwelle. Ebenso können Hebewerke und Kräne leichter ausgeführt sein als in Blockkrafthäusern.

Demgegenüber weist das überströmbare Kraftwerk folgende Nachteile auf:

- 1) Das Wehrkraftwerk ist geschiebeempfindlicher als andere. Vielfach hält man seine Zweckmäßigkeit in geschiebereichen Flüssen überhaupt für fraglich, da beachtliche Verlandungen befürchtet werden müssen. Starke Ablagerungen können den sicheren Betrieb der Grundlaßschützen in Frage stellen. Übrigens gehen die Ansichten über die Vermeidbarkeit von Verlandungen auseinander, da es Auffassungen gibt, die das überströmbare Kraftwerk in dieser Hinsicht für keineswegs nachteiliger halten als das konventionelle Blockkraftwerk.
- 2) Am Kranzgenerator und im Maschinenraum tauchen bei dieser Bauweise weit mehr Dichtungsprobleme auf als bei irgendeiner anderen Kraftwerksart.
- 3) Die geringe Konstruktionshöhe setzt – in Abhängigkeit von der Fallhöhe – dem Laufraddurchmesser und damit der Einzelleistung Schran-

ken. Je kleiner die Fallhöhe, um so kleiner müssen die Turbinenabmessungen gehalten sein, trotzdem eben bei kleineren Fallhöhen größere Maschinen erwünscht wären. Die Aufteilung der Kraftwerksleistung auf mehrere Maschinensätze verschlechtert auch den Wirkungsgrad.

Ein Teil dieser Faktoren vermindert oder erhöht auch die Baukosten. Alles in allem scheint das Wehrkraftwerk nach Ansicht einzelner Sachverständiger im bereits erwähnten Fallhöhenbereich bedeutend billiger zu sein als irgendeine gleichwertige andere Kraftwerksart, ob aber im gegebenen Fall die Höhe der Baukosten allein entscheiden kann, bleibt eine andere Frage. Erweist sich das Wehrkraftwerk unter den bereits bei der als die günstigste Lösung, oder steht der Energieverlust in keinem Verhältnis Ausschlag geben.

4.5. HYDROMATRIX®

Das HYDROMATRIX® wird aus einer Matrize kleiner Turbinengeneratoreinheiten ausgebildet. Die Matrize wird im Herstellerwerk modular vormontiert. Die Module haben die Möglichkeit flexibel zu verschiedenen Kraftwerksanordnungen zusammengesetzt werden und können beide in bestehenden wasserbaulichen Anlagen auch in Neubauprojekte benutzt werden.

4.5.1. Konzept

HYDROMATRIX®-Module werden werkseitig vormontiert und an den Kraftwerksstandort geliefert. Dort werden sie in dem vorhandenen Wasserlauf installiert. Die Turbinen-Generator-Einheit (TG-Einheiten) können durch hydraulisch betriebene Gleitschützen ein- und ausgeschaltet werden.



Abb. 4.7 Beispiel – Freudenau [6]

Das Heben oder Entfernen von der Betriebsposition ist von der Konstruktion der Module, wie bei einem Gleitschütz, ermöglicht. Das macht die Hochwasserabfuhr möglich und vereinfacht Inspektionsarbeiten und Wartungsarbeiten an den Turbinengeneratoreinheiten.

HYDROMATRIX®-Konzept kann eine sehr lukrative Lösung sein, für Projekte, die mit herkömmlicher Technologie nicht ausgeführt werden können.



Abb. 4.8 Ashta Kraftwerk, Shkoder, Albania [6]

4.5.2. Warum HYDROMATRIX®

HYDROMATRIX®-Anlagen haben zahlreiche Vorteile, wenn es keine konventionelle Lösung der Gestaltung eines Kraftwerkes gibt:

1) Hohe Wirtschaftlichkeit.

HYDROMATRIX®-Turbinen haben eine niedere Einbautiefe und können auch bei seichtem Unterwasser betrieben werden. Das heißt, dass kostenintensive Baumaßnahmen (wie ein tiefer Aushub) vermieden werden können. Höchstmögliche Energiegewinnung durch hohe hydraulische und elektrische Leistungsfähigkeit wird bei den modernsten hydraulischen Laufradprofilen und Generortechnologien garantiert. Dies trägt neben der hohen Anlagenverfügbarkeit durch die Vielzahl an Generatoreinheiten zur Wirtschaftlichkeit bei.

2) Vorteile für die Umwelt.

Die Nutzung existierender Bauwerke vermindert zusätzliche Verbauungen. Bestehende Überschwemmungsgebiete bleiben unverändert und Auswirkungen auf die Landwirtschaft oder Siedlungsgebiete werden minimiert. HYDROMATRIX®-Anlagen

können auch in städtischen Gebieten mit hohen ästhetischen Ansprüchen integriert werden.

3) Einsatz in vorhandenen Bauwerken.

Durch die Verwendung einer HYDROMATRIX®-Anlage können die brachliegende Wasserkraftpotenzial von Einlaufbauwerken, ungenutzten Schleusen, Kanalwehren sowie Wehranlagen und Bewässerungsdämmen als profitable und erneuerbare Energiequelle benutzt werden.

Die Flexibilität bei der Anordnung der TG-Einheiten und der elektromechanischen Ausrüstung ermöglicht die Integration von HYDROMATRIX®-Anlagen in bestehende Bauwerke, welche die grundlegenden Anwendungskriterien erfüllen.



Abb. 4.9 Hydromatrix beim Entnahmebauwerk, Chievo, Italy [6]

4) Kurzer Projektzeitraum

Da nur geringfügige Anpassungen an den bestehenden Bauwerken erforderlich sind, fallen die Baumaßnahmen erheblich kürzer aus, als bei herkömmlichen großen Wasserkraftwerken. Weitere Zeiteinsparungen bei Montage und Inbetriebnahme er-

geben sich durch die Vormontage und werkseitige Prüfung der HYDROMATRIX®-Kernelemente.



Abb. 4.10 Turbineninstallation [6]

5) Einfache Bedienung und Wartung.

Ungeregelte Turbinen und Synchrongeneratoren sind bei dem standardisierten und robusten HYDROMATRIX®-Konzept verwendet. Das ermöglicht die einfache Integration der Anlagen ins bestehende Stromnetz.

HYDROMATRIX®-Anlagen brauchen über lange Zeiträume keine aufwändigen Wartungsarbeiten, ausgenommen betriebsbedingte Wechsel der Schmierstoffe und Filter. Jede Turbinengeneratoreinheit kann leicht aus der Betriebsposition entfernt werden. Inspektionen können schnell, sicher und unkompliziert durchgeführt werden und haben fast keine Auswirkungen auf den Betrieb der anderen Turbinengeneratoreinheiten. Die geringe Größe der Einheiten erlaubt die Wartung in einer Werkstatt.

4.5.3. Anwendungskriterien

Für die technische und wirtschaftliche Durchführbarkeit sollen HYDROMATRIX®-Anwendungen folgende Voraussetzungen erfüllen:

1) Verfügbarer Durchfluss von etwa 100m³/s

Abhängig von der Fallhöhe liegt der Durchflussbereich einer einzelnen Turbinengeneratoreinheit zwischen 5 und 12m³/s. Das heißt, es sollten so viele Turbinengeneratoreinheit wie möglich installiert werden, weil sie unreguliert sind. Damit kann eine optimale Anpassung an das aktuelle Wasserdargebot gewährleistet und die anteiligen Kosten für Hilfseinrichtungen minimiert werden.

2) Fallhöhegrenzen - 2m bis 20m

HYDROMATRIX®-Anlagen werden am meisten bei niedrigen Fallhöhen benutzt. Basierend auf den Erfahrungen bei den Referenzanlagen ist die Wirtschaftlichkeit einer Anlage bei einer nominellen Fallhöhe von 5m gegeben. In Ausnahmefällen können auch höhere Fallhöhen bis zu 20m ausgeführt werden und mit wenigen Einheiten eine wirtschaftlich interessante Anlage ergeben.

3) Minimale Unterwassertiefe von 1,5m

Eine minimale Unterwassertiefe von 1,5m ist notwendig, wenn alle Turbinengeneratoreinheit auf eine Reihe angeordnet sind. Steht eine größere Unterwassertiefe zur Verfügung, sind auch zweireihige Ausführungen möglich. Bei geringem Platzbedarf lassen sie eine höhere Gesamtleistung zu.

4) Überdeckung

Zusätzlich zur oben genannten Unterwassertiefe benötigt die Turbinenhydraulik, abhängig von der verfügbaren Fallhöhe und dem Durchfluss, eine Überdeckung. Von 0,3m bis 2m sind notwendig bei Fallhöhen zwischen 2m und 12m. Bei höheren Fallhöhen kann die erforderliche Überdeckung bis zu 4m betragen.

5) Vorhandene Bauwerke für HYDROMATRIX®-Module geeignet.

Bestehende Bauwerke sollten die Voraussetzungen für Mindestdurchfluss und Unterwassertiefe erfüllen. HYDROMATRIX®-Anlagen mit neuen Bauwerken können dann als eine wirtschaftliche Alternative betrachtet werden, wenn herkömmliche Wasserkraftwerke lagebedingt kostenintensivere Baumaßnahmen erfordern.

6) Notwendige Netzanbindung.

Ein wichtiges Kriterium sind die Netzanschlussbedingungen nach den gültigen Normen und Bedingungen der jeweiligen Netzbetreiber. Zur Energieerzeugung können sowohl Synchron- als auch Asynchrongeneratoren bei einem HYDROMATRIX®-Wasserkraftwerk benutzt werden. Man kann die Gesamtleistung in Stufen durch Zu- und Abschalten von einzelnen Turbinengeneratoreinheiten anpassen.

Synchrongeneratoren können mit einer Synchronisationseinrichtung ans Stromnetz geschaltet werden und erfordern keine Blindleistungskompensation. Bei Verwendung von Asynchrongeneratoren kann je nach Rahmenbedingungen eine stufenweise Blindleistungskompensation notwendig werden.

In größeren Kraftwerksanlagen werden zur Netzunterstützung Übersetzungs-
transformatoren mit primärer Spannungsanpassung eingesetzt.

4.5.4. Anwendungstypen

4.5.4.1. Schifffahrtsanlagen

Große Schleusen- und Wehrbauten, die zur Schiffbarmachung größerer Flüsse gebaut werden, bieten ideale Anwendungsmöglichkeiten für HYDROMATRIX®. Die zusätzliche Wasserkraftnutzung kann sehr wirtschaftlich sein, wenn die bestehenden Bauwerke den HYDROMATRIX®-Einsatz erlauben.

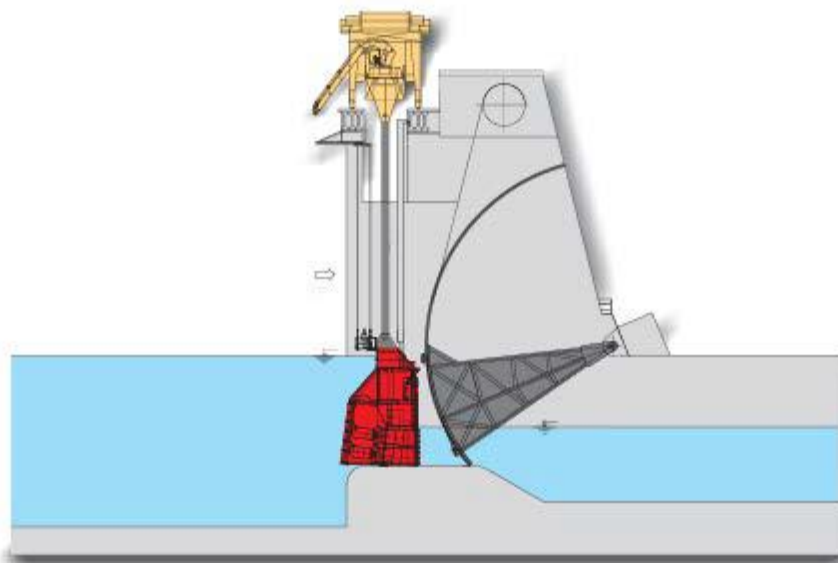


Abb. 4.11 HYDROMATRIX® bei Schiffahrtsanlagen [6]

4.5.4.2. Bewässerungsanlagen

Konstante Durchflussraten und in der Regel geringe Fallhöhenschwankungen machen Bewässerungsanlagen zu idealen Kandidaten für HYDROMATRIX®-Anwendungen. Das modulare Konzept ermöglicht es, unterschiedliche Stauwerke, die über eine geeignete Unterwassertiefe verfügen, mit HYDROMATRIX® auszustatten.

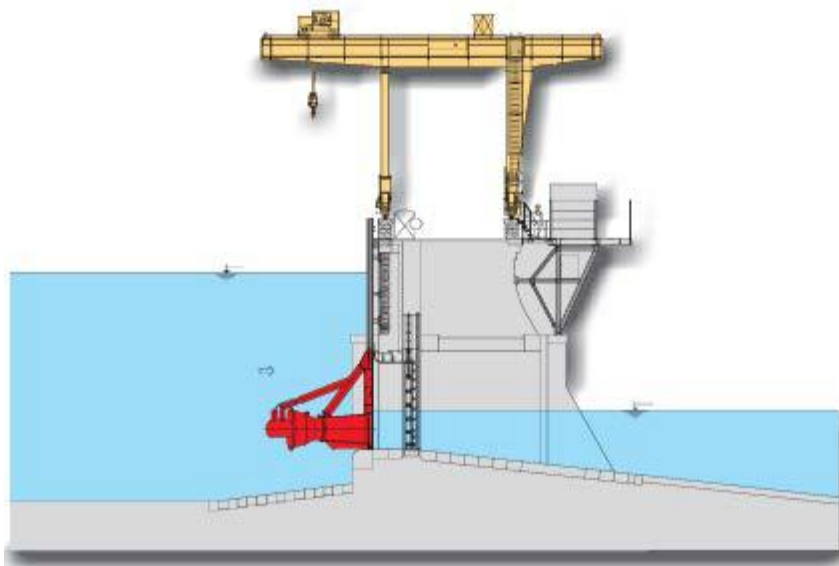


Abb. 4.12 HYDROMATRIX® bei Bewässerungsanlagen [6]

4.5.4.3. Einlaufbauwerke

Stauseen oder Umgehungsleitungen von bestehenden Wasserkraftwerken verfügen in der Regel über Einlaufbauwerke, die idealen Möglichkeiten für die Nutzung der HYDROMATRIX®-Technologie bieten. Bei ausreichender Überdeckung sind Fallhöhen bis zu 20m möglich.

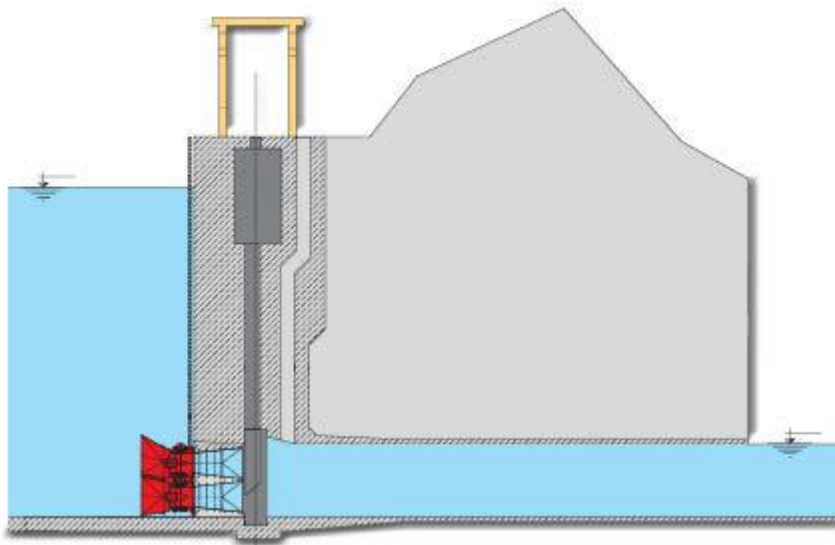


Abb. 4.13 STRAFLOMATRIX® beim Einlaufbauwerk [6]

4.5.4.4. Wehre und ungenutzte Schleusen

Wehrbauwerke in Kanälen und ungenutzten Schleusen verfügen häufig über ausreichende Fallhöhen, die den Einsatz von HYDROMATRIX® erlauben. Wenn Hochwasserabfuhr gefordert ist, können die Module vollständig aus dem Wasser gehoben werden. Als weitere Option kann das Kraftwerk so konstruiert werden, dass es während des Hochwassers überströmt wird.

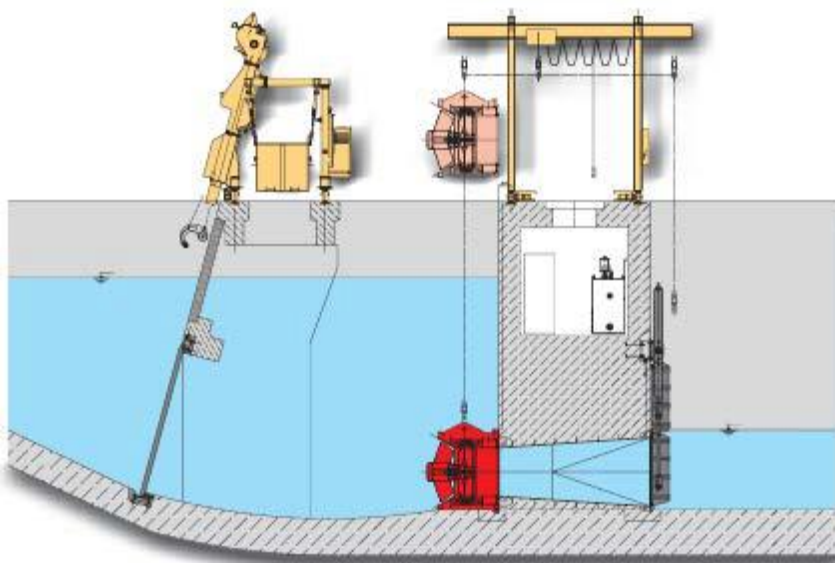


Abb. 4.14 STRAFLOMATRIX® bei Schleusen [6]

4.6. StrafloMatrixTM

Die Besonderheit des StrafloMatrixTM Systems ist die Ausführung des Generators. Das Turbinenlaufrad spielt gleichzeitig eine Rolle als Träger des Generatorrotors – beide drehen sich in der Strömung als eine Einheit. Die Konfiguration hat bedeutend reduzierte Abmessungen in der Durchflussrichtung, was sich besonders bei Anwendungen mit beengten Platzverhältnissen gut eignet. Die StrafloMatrixTM wird synchron mit dem Netz betrieben. Dies ist ein Vorteil bei Anwendungen wo Asynchrongeneratoren nicht anwendbar sind. Das ursprüngliche HYDROMATRIX®-Konzept kann noch immer die beste Lösung für viele Anlagen sein, das StrafloMatrixTM System wird aber viele technische und wirtschaftliche Entwicklungsmöglichkeiten an vielen weiteren Anlagen weltweit eröffnet.

Diese Innovation repräsentiert die nächste Generation der HYDROMATRIX®-Technologie und bietet einfache Projektlösungen mit hoher Wirtschaftlichkeit. Die Anwendungsbereiche für dieses einzigartige Turbinensystem sind vorzugsweise bestehende Wehranlagen oder Bewässerungsdämme, bei denen die StrafloMatrixTM-Einheiten in Modulen vor oder in den bestehenden Öffnungen angeordnet werden. Diese Öffnungen der Wehranlage haben idealerweise eine Breite von 3,5m bis 5m., so dass Module mit zwei oder drei StrafloMatrixTM-Einheiten angeordnet werden können.

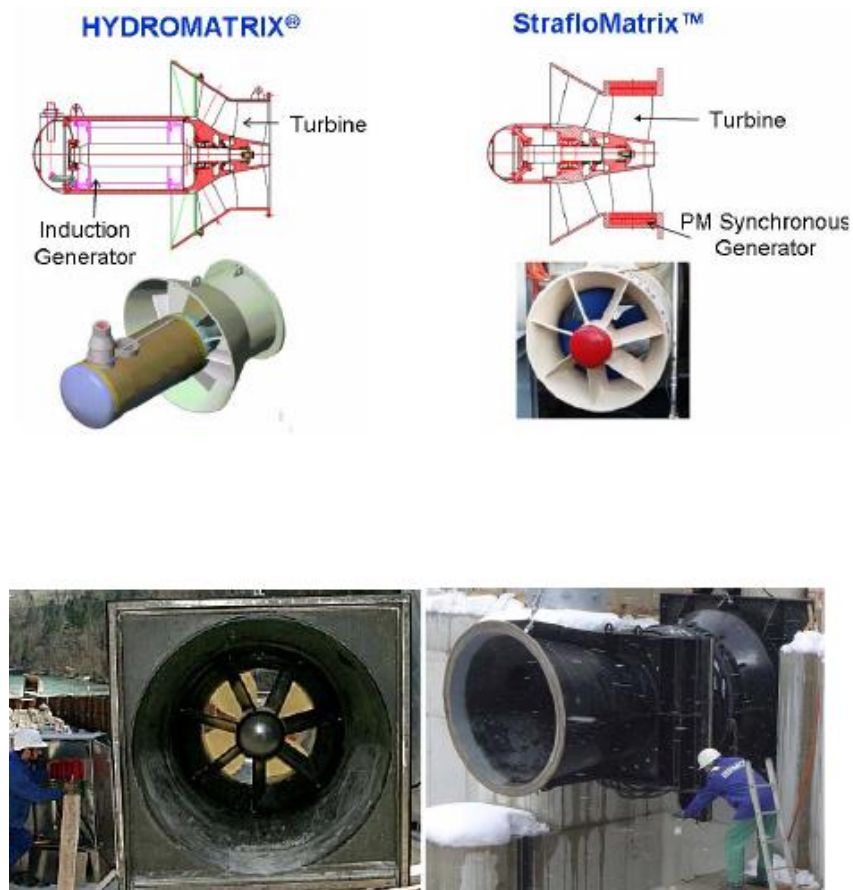


Abb. 4.15 Vergleich den Schnitten von HYDROMATRIX® und StrafloMatrix™ [7]

Wirtschaftliche Anwendungen, bei denen StrafloMatrix™-Einheiten in bestehende Wehranlagen eingebaut werden können, haben üblicherweise einen minimalen Durchfluss von $50\text{m}^3/\text{s}$ und eine minimale Fallhöhe von circa 3m. Die StrafloMatrix™-Turbine ist ebenso wirtschaftlich wie die HYDROMATRIX®-Turbine, kann jedoch in bestehende Wehranlagen oder Bewässerungsdämme mit limitiertem Platzangebot eingebaut werden, besonders bei engen Platzverhältnissen in der Turbinenachse.



Abb. 4.16 StrafloMatrixTM - Turbine Einheit [7]

Aufgrund der niedrigen Investitionskosten für solche Lösungen können neue und gegenwärtig nicht wirtschaftliche Wasserkraftanwendungen weltweit genutzt werden. Üblicherweise beträgt die Zeitdauer für den Bau eines Wasserkraftwerkes mit StrafloMatrixTM-Einheiten weniger als zwei Jahre.

4.7. Bewegliches Kraftwerk mit Roth-Turbinen – drehbare Rohrturbinen

Herkömmliche Wasserkraftwerke nutzen nur die potenzielle Energie – den Höhenunterschied zwischen dem oberen und unteren Wasserstand. Aber bei großen natürlichen Einflüssen oder Hochwasser verringert sich der Höhenunterschied. Diese Kraftwerke arbeiten nicht mehr optimal oder müssen abgeschaltet werden, anders das bewegliche Wasserkraftwerk. Die nutzen zusätzlich die kinetische Energie des fließenden Gewässers. Die Turbine kann einen größeren Druckunterschied nutzen.

4.7.1. Probleme von Niederdruckanlagen

Die Niederdruckanlagen haben natürlich ihre Nachteile, die man zu verbessern sucht:

- Die Anlagenleistung wird aus der großen Wassermenge generiert und weniger durch die Fallhöhe.
- Große Wassermengen verlangen nach großen Bauwerken und Anlagenteilen.
- Aufgrund der geringen Fallhöhen sollen die hydraulischen Verluste gering sein.
- Die Anlagen sind sensibel bei Fallhöhenverlusten (z.B. durch Geschiebeanlandungen).
- Der Ertrag wird durch hohe Unterwasserstände verringert.
- Neue Umweltauflagen verlangen nach Möglichkeiten des gefahrlosen Fischabstiegs.
- Am besten sollte die Anlage gar nicht sichtbar oder hörbar sein.
- Die spezifischen Erstellungskosten sind hoch.

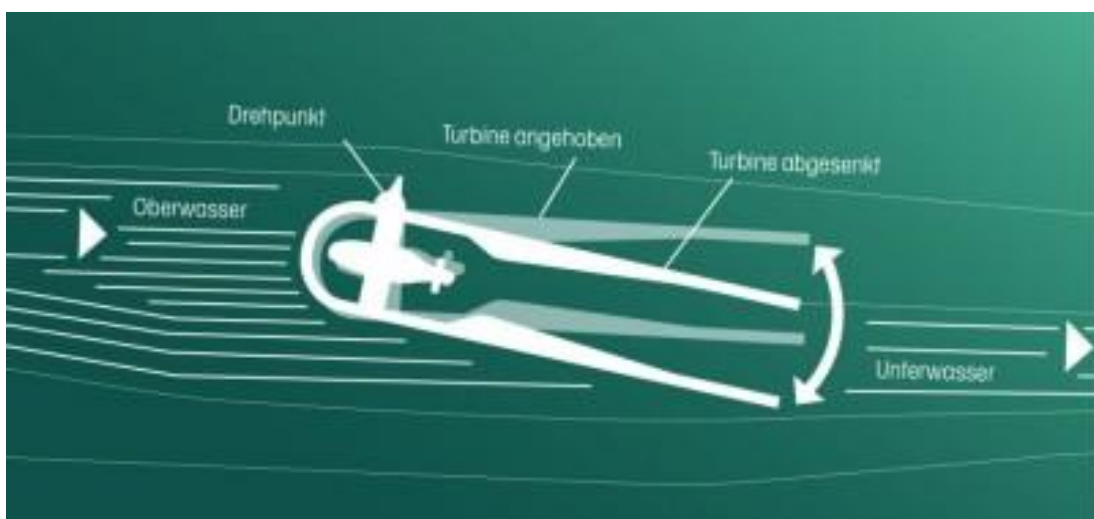


Abb. 4.17 Das bewegliche Wasserkraftanlage – Anordnung [5]

4.7.2. Idee und Ziele

Wasserkraft gilt als einer der ältesten erneuerbaren Energieformen und wird weltweit zur Stromerzeugung eingesetzt. Allerdings beeinträchtigen Wasserkraftanlagen die Gewässer – unter anderem verringern sie deren Durchgängigkeit. Bewegliche Wasserkraftwerke setzen hier an: Das Gehäuse, in dem die Anlage integriert ist, befindet sich unter der Wasseroberfläche. Dieses Gehäuse wird im Hochwasserfall angehoben und die Anlage damit zu einer Wehröffnung, was den Hochwasserabfluss deutlich verbessert. Eine zusätzliche Abschwemmklappe auf dem Gehäuse dient der Feinregulierung des Abflusses und der effektiven Weitergabe von ankommendem Schwemmgut. Damit ist die Durchgängigkeit des Gewässers gewährleistet. Kiesschütze und weitere Einrichtungen zur Hochwasserentlastung, wie bei konventionellen Anlagen üblich, werden damit überflüssig.

Bei Gestaltung von bewegliches Wasserkraftwerk werden zahlreiche Projektziele festgestellt:

- Einfache wasserrechtliche Bewilligungen von Niederdruckkraftwerken in bestehende Stauhaltungen in Verbindung mit einer Fischauf- und Abstiegsanlage
- Der Hochwasserschutz muss gewährleistet werden.
- Die Anlagen sollen wirtschaftlich zu bauen sein, mit hohe Lebensdauer und niedrigen Betriebskosten
- Erstellung eines einfachen Trogbauwerks möglichst direkt in der Wehranlage.
- Das standardisierte Krafthaus sollte anhebbar sein, um Geschiebe direkt weiter zu geben und den Stau zusätzlich zu regeln.
- Das Krafthaus soll ständig wasserüberströmt sein (für Fischabstieg und Treibgutweitergabe).
- Die Anlage soll optisch unauffällig und akustisch kaum wahrnehmbar sein (getriebeles mit hoch effizienter Generatortechnik).
- Ungenutzte Energie erhöhter Abflüsse sollten zur Leistungssteigerung zurückgewonnen werden.

- Das Treibgut muss bei geringen Rechenabständen (15mm) bewältigt werden.

4.7.3. Rentabilität

Der Bau eines beweglichen Wasserkraftwerkes ist durch die einfache Bauweise im Vergleich zu konventionellen Anlagen schneller und kostengünstiger zu realisieren. Die Anlage wird komplett vormontiert, so dass der Aufwand auf der Wasserbaustelle auf ein Minimum sinkt. Ein weiterer Vorteil ist die schnell durchführbare Baumaßnahme in der Niedrigwasserzeit. Die eingesetzte Technik ist grundsolide, wartungsarm und bringt bei Hochwasser große Vorteile. In den beweglichen Wasserkraftwerken werden hocheffiziente Turbinen und Generatoren eingesetzt. Zudem lässt sich das Energiepotenzial von Gewässern durch eine intelligente Steuerung des beweglichen Systems optimal nutzen – bei allen Wasserständen. Das führt zu dauerhaft mehr Ertrag.

4.7.4. Umströmung – mehr Leistung

Diese Kleinwasserkraftanlagen sind dafür geeignet, schwer erschließbare Stauhaltungen und Querbauwerke, die bisher aus ökologischen oder hochwasser-schutztechnischen Gründen nicht genehmigungsfähig waren, nutzbar zu machen. Es zeichnet sich durch die optimale An- und Abströmung des Systems und durch das Nutzen des sogenannten Ejektoreffektes im Hochwasserfall aus. Dieser Effekt steigert die Leistung bei Hochwasser um bis zu 25 % gegenüber konventionellen Anlagen durch ein hydraulisches Design, bei dem ein besonderes Augenmerk auf dem Saugrohr und dem Trogbauwerk liegt. Dadurch kann ein hoher zusätzlicher Energiegewinn bei der Umströmung des Saugrohres erzielt werden. Der hohe Anlagenwirkungsgrad wird auch durch das Zusammenspiel der doppelt regulierten Kaplan-Rohrturbine mit direkt gekoppeltem permanentmagnetisch erregtem Synchron-generator generiert.

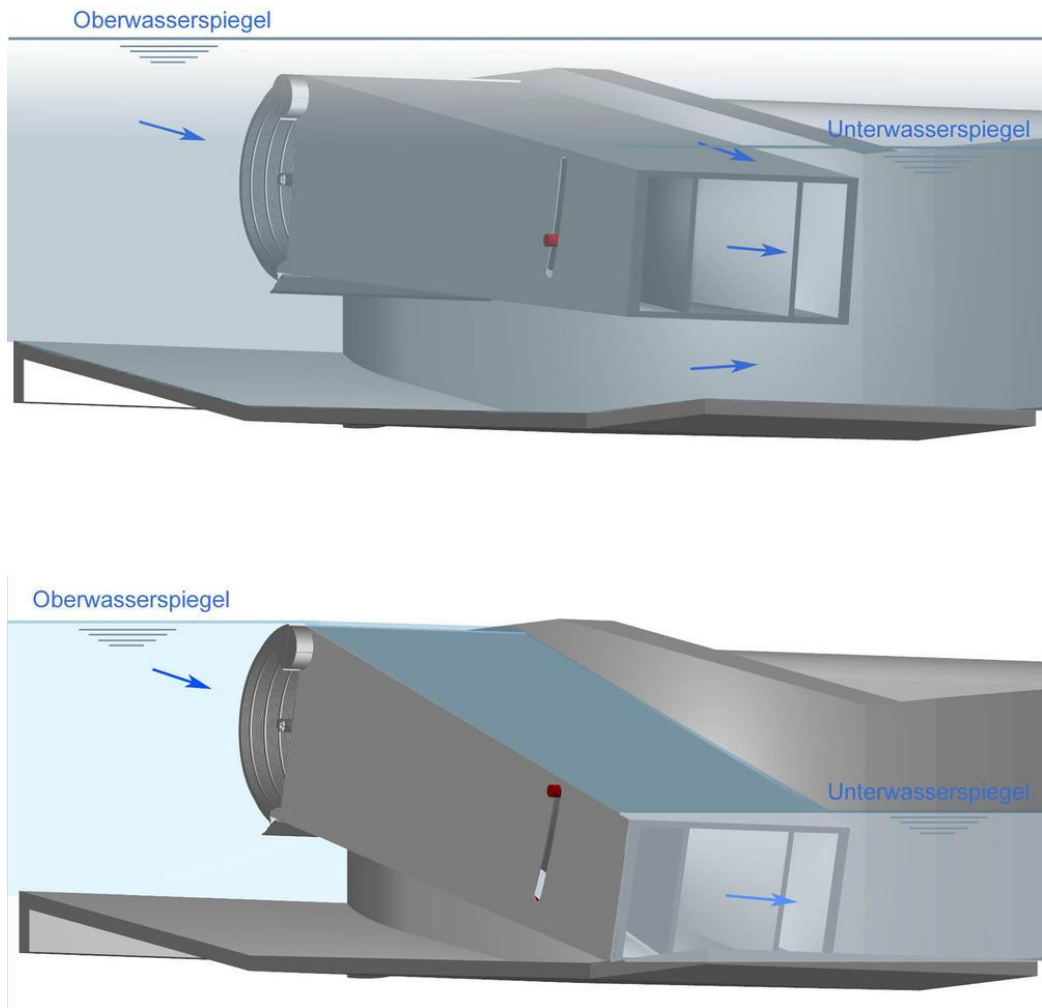


Abb. 4.18 Das bewegliche Krafthaus angehoben im Hockwasserfall (oben) und in Normalstellung (unten) [5]

Schwenkbares, über- und unterströmtes Krafthaus ermöglicht Fischen, Geschiebe und Treibgut, über oder unter dem Krafthaus zu passieren bei gleichzeitigem aktivem Hochwasserschutz.

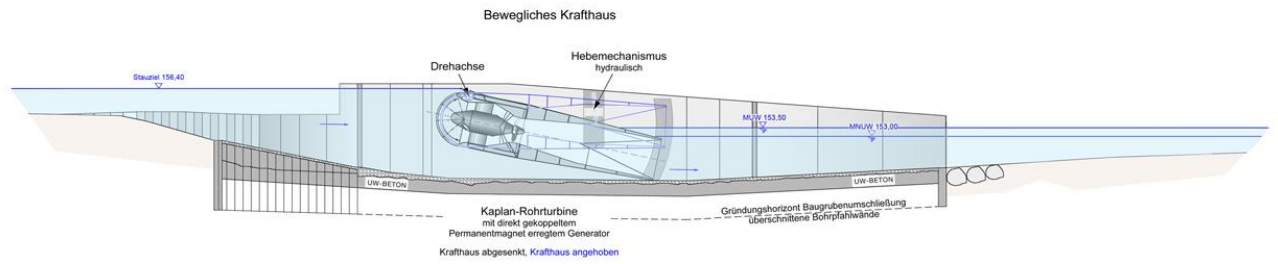


Abb. 4.19 Längsschnitt des beweglichen Wasserkraftwerks [5]

Zur Minimierung des Instandhaltungsaufwands und zur Reduzierung der Getriebeverluste wird auf eine direkte Kopplung von Generator und Turbine gesetzt bei Drehzahlen um 140 U/min.

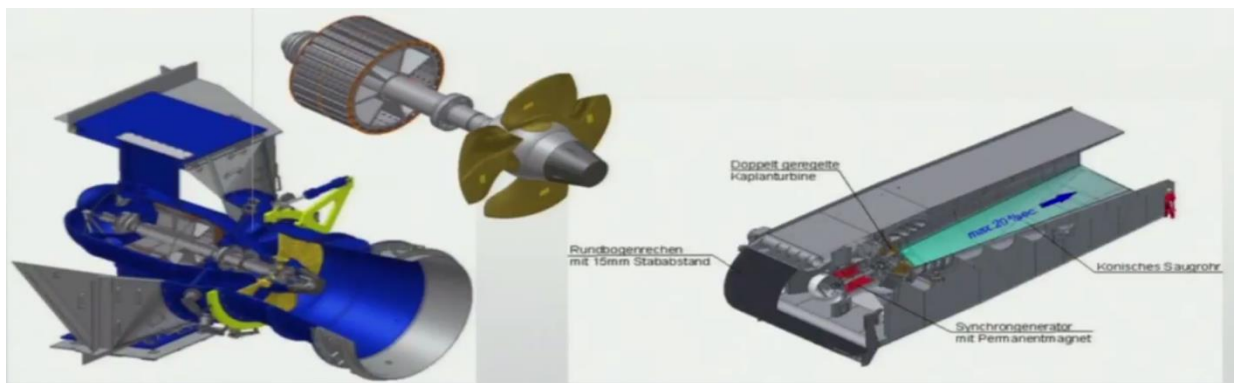


Abb. 4.20 Schnitt einer Kaplan-Turbine mit direkt gekoppeltem PM Generator [5]

5. Zusammenfassung

Ein Fließgewässer stellt ein komplexes System dar, das sich nur selten im Gleichgewicht, sondern vielmehr in einem ständigen Anpassungsprozess befindet, um seinen Zustand den aktuellen hydrologischen, topographischen, geologischen und flussbaulichen Randbedingungen anzupassen.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist, dem Leser ein grundlegendes Verständnis über die verschiedenen Möglichkeiten der Energieerzeugung mittels Wasserkraft zu vermitteln, basierend auf der zahlreichen bereits vorhandenen Literatur. Der ständig wachsende Bedarf an erneuerbaren Energiequellen erfordert die Errichtung von neuen Wasserkraftwerken. Das Potenzial von Einrichtung von Kleinwasserkraftwerken ist verhältnismäßig gut untersucht. In den letzten Jahren beobachtet man ein Wachstum des Interesses bei Privatanlegern, die in den Bau von Kleinwasserkraftwerken investieren möchten.

Die umweltfreundlichste Methode zur Energiegewinnung, sind die Flusskraftwerke. Bei ihnen ist der Bau eines Beckens nicht notwendig – diese stört die Landwirtschaft. Sie werden direkt auf den Fluss gelegt und benutzen die Wasserströmung, um die Turbinen anzutreiben. Für die ordnungsgemäße Errichtung der Flusskraftwerken müssen verschiedene Regeln und Gesetze eingehalten werden.

Das normale Leben der Wassertiere wird immer nach dem Bau eines Wehres gestört. Deswegen werden spezielle Fischwege rund um das Kraftwerk angelegt, damit die Fische von Oberwasser nach Unterwasser und umgekehrt schwimmen können.

Die einzelnen Teile der Gestaltung eines Flusskraftwerkes sind in dieser Arbeit detailliert beschrieben. Sie können in zwei Kategorien unterteilt werden. Nämlich sind diese in Haupt- und Nebenbauwerke.

Das Wehr und das Krafthaus sind die beiden Teile, die ein komplettes Kraftwerk zusammensetzen. Es sei denn, der Fluss ist schiffbar. Dann gibt es einen dritten Teil, zwar die Schiffschleuse, der sehr wichtig ist. Die Anordnung der Schleusen an kanalisierten Flüssen spielt eine wichtige Rolle an der Sicherheit und Erleichterung des Schiffsverkehrs.

Die unterschiedlichen topografischen, hydrologischen und geologischen Bedingungen des Flusses bestimmen die adäquate Anordnung des Wasserraftwerkes am Fluss. In der Diplomarbeit werden die verschiedenen Verfahren dargestellt, wobei ein Flusskraftwerk im Flussbett angeordnet wird. Noch werden ihre Unterscheide, Vorteile und Nachteile beschrieben.

Der Einsatz neuer Technologien zur Energieerzeugung in bereits laufenden Kraftwerken ist ein guter Weg, um den unbenutzten Wasserstrom zu nutzen. Ein gutes Beispiel ist die Einsetzung von HYDROMATRIX® und StrafloMatrix™ an Schifffahrtsanlagen, Bewässerungsanlagen, Einlaufbauwerke, Wehre und ungenutzten Schleusen. Selbstverständlich können sie auch zur Gestaltung eines völlig neuen Kraftwerks genutzt werden.

Der Bau eines Kraftwerks ist ein sehr kompliziertes Unternehmen. Deshalb muss jeder, der ein solches Projekt vornimmt, die wichtigsten Probleme verstehen, die damit verbunden sind. Das ist genau das Hauptziel dieser Diplomarbeit.

6. Literatur

- [1] Wasserbau: Hydrologische Grundlagen – Elemente des Wasserbaus, Nutzbauten an Binnengewässern. Springer, 2006
- [2] Wasserbau - Aktuelle Grundlagen — Neue Entwicklungen von Theodor Strobl und Franz Zunic
- [3] Wasserkraftwerke Band I – Niederdruckanlagen
- [4] Wasserkraftanlagen – Giesecke, Mosony 2014
- [5] <http://www.hydroenergie.de/>
- [6] HYDROMATRIX® - Produktdarstellung <http://www.andritz.com/>
- [7] Weiterentwicklung der Technologie -StrafloMatrix <http://www.andritz.com/>
- [8] Wasserbau – Peter Ganowski, Springer, 2011
- [9] Einführung in Wasserbau und Wasserwirtschaft – Müller, Blümel