

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

Herr  
**Jakob Krabacher**

**Auslegung eines  
Kleinwasserkraftwerks für ein  
Mehrfamilienhaus**

Mittweida, 2023



Fakultät Ingenieurwissenschaften

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

## **Auslegung eines Kleinwasserkraftwerks für ein Mehrfamilienhaus**

Autor:

**Herr Jakob Krabacher**

Studiengang:

**Mechatronik**

Seminargruppe:

**KM17sMFA**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Jörg Hübler**

Zweitprüfer:

**Dr.-Ing. Hagen Bankwitz**

Einreichung:

**Mittweida, 31.05.2023**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2023**

Faculty Engineering

---

# DIPLOMA THESIS

---

## Dimensioning of a micro-hydroelectric power plant for a multi-family house

author:

**Mr. Jakob Krabacher**

course of studies:

**Mechatronics**

seminar group:

**KM17sMFA**

first examiner:

**Prof. Dr.-Ing. Jörg Hübler**

second examiner:

**Dr.-Ing. Hagen Bankwitz**

submission:

**Mittweida, 31.05.2023**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2023**

## **Bibliografische Beschreibung:**

Krabacher, Jakob:

Auslegung eines Kleinwasserkraftwerks für ein Mehrfamilienhaus. - 2023. - IV, 61 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Diplomarbeit, 2023

## **Referat:**

Mit dieser Arbeit wird dem Besitzer eines Kleinwasserkraftwerks ein Überblick der Möglichkeiten zur Verbesserung seiner Anlage gegeben. Dafür werden zuerst die benötigten Daten gesammelt und aufbereitet. Danach wird auf die einzelnen Bereiche näher eingegangen und es werden Verbesserungsvorschläge dargelegt. Dabei werden Vor- und Nachteile aufgezeigt und die Verluste zwischen derzeitigem Stand und den Vorschlägen verglichen. Am Ende wird noch die gesamte mögliche Leistung ermittelt und geklärt ob sich eine Modernisierung lohnt.



# Inhalt

|   |            |
|---|------------|
| <b>Inhalt</b>                                     | <b>I</b>   |
| <b>Abkürzungsverzeichnis/Kurzzeichen</b>          | <b>III</b> |
| <b>1 Einleitung</b>                               | <b>1</b>   |
| <b>2 Hydrologische Daten</b>                      | <b>3</b>   |
| 2.1 <i>Einzugsgebiet</i>                          | 3          |
| 2.2 <i>Durchflusswerte der Messstelle</i>         | 4          |
| 2.2.1 Jahresdauerlinie                            | 4          |
| 2.2.1.1 Basiswasserführung (Basisabfluss $NQ_t$ ) | 5          |
| 2.2.1.2 Dynamischer Anteil                        | 6          |
| 2.3 <i>Hochwasser</i>                             | 7          |
| 2.3.1 $HQ_{100}$ mit Weibull-Verteilung           | 7          |
| 2.3.2 $HQ_{100}$ mit Gumbel-Verteilung            | 8          |
| <b>3 Wasserkraftmaschinen</b>                     | <b>11</b>  |
| 3.1 <i>Bewertungsschlüssel</i>                    | 11         |
| 3.2 <i>Wasserrad</i>                              | 12         |
| 3.2.1 Mittelschlächtiges Wasserrad                | 13         |
| 3.2.2 Oberschlächtiges Wasserrad                  | 13         |
| 3.2.3 Lamellenturbine                             | 13         |
| 3.3 <i>Wasserkraftschnecke</i>                    | 15         |
| 3.4 <i>Turbinen</i>                               | 17         |
| 3.4.1 Durchströmturbine                           | 17         |
| 3.4.2 Kaplan-Turbine                              | 19         |
| 3.4.3 Pipeturbine                                 | 21         |
| 3.5 <i>Auswahl der Wasserkraftmaschine</i>        | 23         |
| 3.6 <i>Grobe Turbinenbemessung</i>                | 24         |
| 3.6.1 Turbinenmaße                                | 24         |
| 3.6.2 Kavitationsprüfung                          | 26         |
| 3.6.3 Generatorwirkungsgrad                       | 27         |
| 3.7 <i>Fazit Turbine</i>                          | 28         |

---

|                                    |  |           |
|------------------------------------|--|-----------|
| <b>4</b>                           | <b>Saugrohr</b> .....                          | <b>29</b> |
| 4.1                                | <i>Krümmen</i> .....                           | 29        |
| 4.2                                | <i>Diffusor</i> .....                          | 31        |
| 4.3                                | <i>Grobe Bemessung Saugrohr</i> .....          | 33        |
| 4.3.1                              | Krümmenbemessung .....                         | 33        |
| 4.3.2                              | Diffusor bemessung .....                       | 35        |
| 4.3.3                              | Verbesserungsmöglichkeiten .....               | 36        |
| <b>5</b>                           | <b>Wehranlage</b> .....                        | <b>39</b> |
| 5.1                                | <i>Vorhandenes Wehr</i> .....                  | 40        |
| 5.1.1                              | Wasserstandregulierung .....                   | 41        |
| 5.1.1.1                            | Benötigter Antrieb .....                       | 42        |
| 5.1.1.2                            | Abflussleistung .....                          | 42        |
| 5.1.2                              | Hochwasserabfuhr .....                         | 45        |
| 5.2                                | <i>Tosbecken</i> .....                         | 47        |
| 5.2.1                              | Tosbeckenbemessung .....                       | 47        |
| 5.3                                | <i>Einlaufbereich und Wasserentnahme</i> ..... | 48        |
| 5.4                                | <i>Verbesserungen an der Wehranlage</i> .....  | 49        |
| 5.4.1                              | Turbineneinlauf .....                          | 49        |
| 5.4.2                              | Revisionsverschluss .....                      | 52        |
| 5.4.3                              | Einlaufrechen .....                            | 53        |
| 5.4.4                              | Tosbecken .....                                | 54        |
| <b>6</b>                           | <b>Leistung des Wasserkraftwerks</b> .....     | <b>55</b> |
| 6.1                                | <i>Jahresarbeitsvermögen</i> .....             | 56        |
| 6.2                                | <i>Einsparungen</i> .....                      | 56        |
| 6.2.1                              | Förderung .....                                | 57        |
| <b>7</b>                           | <b>Ergebnisdiskussion</b> .....                | <b>59</b> |
| <b>8</b>                           | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....      | <b>61</b> |
| <b>Literatur</b>                   | .....  | <b>63</b> |
| <b>Selbstständigkeitserklärung</b> | .....  | <b>65</b> |

## Abkürzungsverzeichnis/Kurzzeichen

|                |   |
|----------------|---|
| $a_1 - a_9$    | Koeffizient für die Berechnung der Ausflusszahl $\mu$ |
| $a$            | Schützenhebung  |
| $A_A$          | Austrittsquerschnitt                                  |
| $A_E$          | Eintrittsquerschnitt                                  |
| $A_S$          | Fläche der Schützentafel                              |
| $b_A$          | Breite des Austrittsquerschnitts                      |
| $C_p$          | Druckumsetzungsbeiwert                                |
| $D_3$          | Laufraddurchmesser der Turbine                        |
| $D_R$          | Rohrdurchmesser                                       |
| $E$            | Einsparung  |
| $F$            | Förderung   |
| $F_G$          | Gewichtskraft   |
| $F_{ges}$      | Gesamtkraft   |
| $F_R$          | Reibungskraft   |
| $Fr$           | Froude-Zahl   |
| $g$            | Erdbeschleunigung                                     |
| $h_0$          | Oberwasserhöhe  |
| $h_{amb}$      | Atmosphärendruckhöhe                                  |
| $h_D$          | Dampfdruckhöhe  |
| $h_f$          | Fallhöhe  |
| $h_{f,N}$      | Nettofallhöhe   |
| $h_{S,zul}$    | zulässige Saughöhe                                    |
| $h_{v,e}$      | Verlusthöhe des Einlaufs                              |
| $h_{v,k}$      | Verlusthöhe des Krümmers                              |
| $h_{v,r}$      | Rohrverluste  |
| $h_{v,rechen}$ | Rechenverluste  |
| HQ             | Hochwasser  |
| HQ100          | hundertjähriges Hochwasser                            |
| $i$            | Übersetzung   |
| $l_0$          | Gefälle   |
| $K_G(n,T)$     | Wahrscheinlichkeitsfaktor                             |
| $k_{St}$       | Strickler-Beiwert                                     |
| $k_{u,K}$      | Beiwert für Kaplan- und Propellerturbinen             |
| $L_S$          | Länge des Saugrohrs                                   |
| $m$            | Masse   |
| $M$            | Drehmoment  |
| MHQ            | mittlerer Hochwasserabfluss                           |

|                    |  |
|--------------------|--|
| MJNQ <sub>t</sub>  | Mittel der niedersten Abflüsse von mehreren Jahren   |
| m.ü.A.             | Meter über Adria                                     |
| MQ                 | mittlerer Abfluss                                    |
| n                  | Turbinendrehzahl                                     |
| n <sub>q</sub>     | spezifische Drehzahl                                 |
| NQ <sub>t</sub>    | Basisabfluss   |
| n <sub>q,max</sub> | maximale spezifische Drehzahl                        |
| p.                 | page (Seite)   |
| P                  | Leistung   |
| P <sub>m</sub>     | Krümmungsradius des Rohrs                            |
| P <sub>theo</sub>  | theoretisch mögliche Leistung                        |
| Q                  | Abfluss  |
| Re                 | Reynolds-Zahl  |
| R <sub>h</sub>     | hydraulischer Radius                                 |
| S <sub>HQ</sub>    | Standardabweichung des Hochwasserabflusses           |
| S <sub>q</sub>     | Saugkennzahl   |
| T                  | Jährlichkeit   |
| U                  | benetzter Umfang                                     |
| v                  | Fließgeschwindigkeit des Wassers                     |
| α`                 | Winkel des Einlaufrechens                            |
| ε                  | Eintauchungsgrad                                     |
| ζ <sub>e</sub>     | Verlustbeiwert bei Einläufen                         |
| ζ <sub>k</sub>     | Verlustbeiwert bei Krümmern                          |
| η                  | Wirkungsgrad   |
| θ                  | Öffnungswinkel des Saugrohrs                         |
| λ                  | Verlustbeiwert für Strömungen in Gerinnen und Rohren |
| μ                  | Ausflusszahl   |
| μ <sub>H,S</sub>   | Gleitreibungskoeffizient zwischen Holz und Stahl     |
| v                  | kinematische Viskosität                              |
| ρ                  | Dichte   |
| σ <sub>Th</sub>    | Thoma-Beiwert (Kavitationsbeiwert)                   |
| ψ                  | Einschnürungszahl ψ                                  |

# 1 Einleitung

Die Nutzung des Wassers durch den Menschen hat eine sehr lange Geschichte. Von der Entstehung erster Zivilisationen am Wasser, Mühlen mit einfachen Wasserrädern, zu großen, modernen Wasserkraftwerken, welche ganze Gebiete mit Strom versorgen. Die Geschichte der Wasserkraftnutzung am Doserbach begann in den 1930er Jahren, als die Bewilligung des Wasserbenutzungsrechtes für ein Sägewerk mit Wasserrad erteilt wurde. Das alte Mühlrad dieser Anlage existiert bis heute, jedoch wird die Energieumwandlung des Wassers seit 1985 von einer Francis-Turbine übernommen. Da der Betrieb des Sägewerks in den 60er Jahren eingestellt wurde, liefert sie nun Strom für ein Mehrfamilienhaus. Die Anlage wurde beim Umbau auf eine Leistung von 11 KW ausgelegt, welche sie aber nie erreichte. Bei einem Brand im Jahr 2016 wurde zwar die Turbine nicht beschädigt, aber es musste das gesamte Haus abgerissen werden und deshalb wurde sie stillgelegt.

Seit 2022 ist das Wasserkraftwerk wieder in betrieb. Es ist wie in Abbildung 1 angeordnet und ein Laufwasserkraftwerk. Das heißt, dass der Bach durch ein Wehr aufgestaut wird, um eine Fallhöhe zu erzeugen. Durch diesen Aufbau kann die Anlage beinahe das ganze Jahr durch Strom erzeugen. In die Wehranlage sind auch noch eine Fischtreppe und die Wasserentnahme integriert. Die Fischtreppe gewährleistet die Durchlässigkeit für Fische flussaufwärts. Durch die Wasserentnahme wird ein Teil des Wassers aus dem Bach abgeleitet und durch ein Rohr der Turbine zugeführt. Diese treibt durch einen Keilriemen den Generator an, welcher den Strom erzeugt. Nach der Turbine wird durch ein Rohr das Wasser wieder dem Bach zugeleitet. Für die Francis-Turbine ist die vorhandene Fallhöhe zu gering und es fehlt ein Saugrohr zur Energierückgewinnung. Deshalb wird zurzeit der erzeugte Strom nur für das Aufheizen von Wasser verwendet.

Mit dieser Arbeit möchte man dem Besitzer einen Überblick der Möglichkeiten zur Leistungssteigerung der Anlage geben. Dafür wird der Ist-Zustand erfasst und es werden, an die Gegebenheiten angepasste, sinnvolle Verbesserungen vorgeschlagen. Um dies zu erreichen werden als erstes die Rahmenbedingungen bestimmt. Dann werden die einzelnen Bereiche der Anlage betrachtet und Optionen zur Optimierung angegeben. Da die Turbine die wichtigste Komponente eines Wasserkraftwerks ist, wurde für die Beurteilung und Auswahl ein Bewertungssystem erstellt, um die am besten geeignete zu bestimmen. Um einen Vergleich zwischen den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zu schaffen, werden deren Verluste gegenübergestellt. Bei Wasserkraftanlagen werden diese Verluste in Metern angegeben und von der Fallhöhe abgezogen.

Am Ende werden alle Verbesserungen zusammengefasst und damit die Leistung einer komplett überarbeiteten Wasserkraftanlage dargestellt.

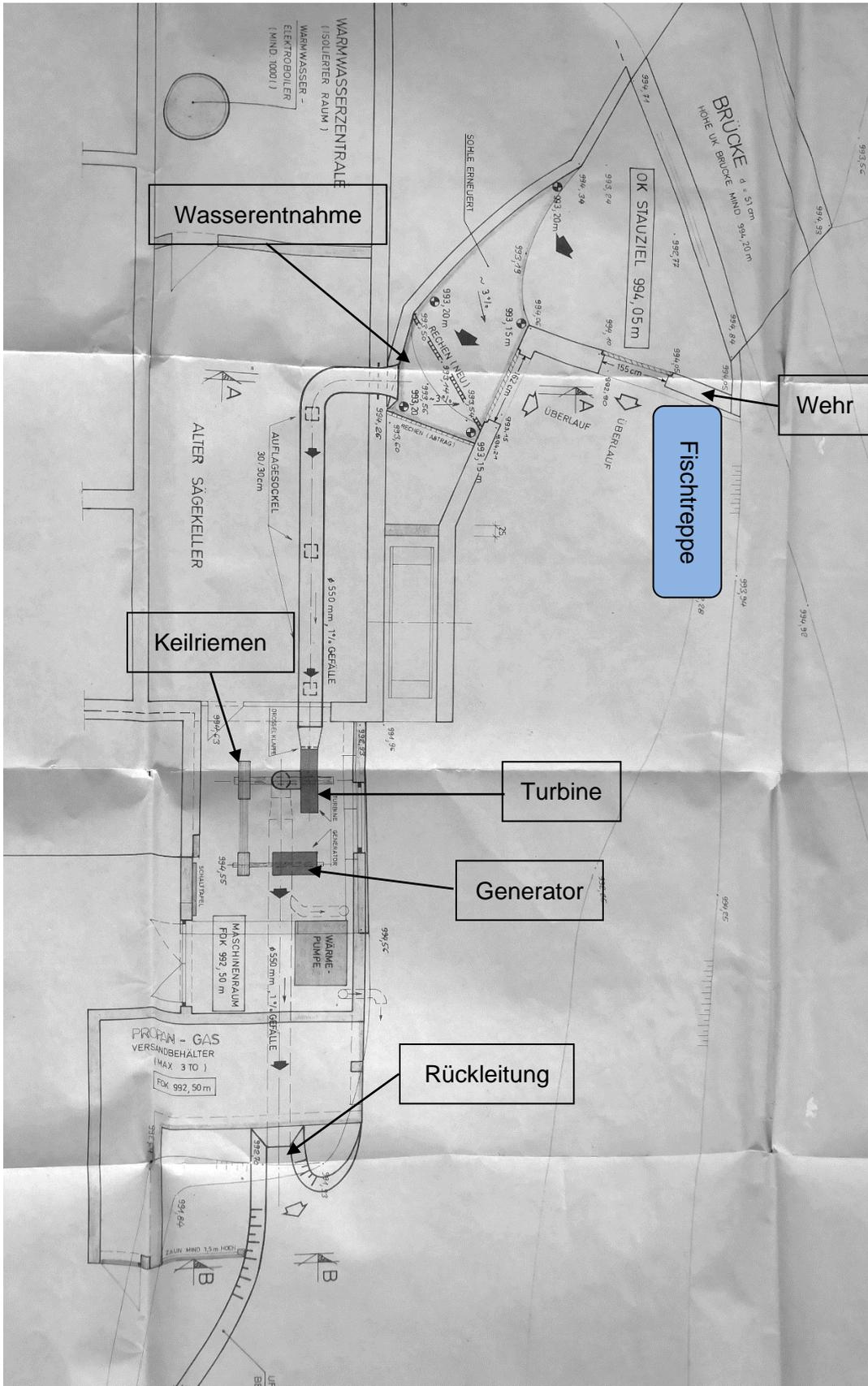


Abbildung 1: Gesamtansicht der Wasserkraftanlage mit Anmerkungen

## 2 Hydrologische Daten

Um für die neue Auslegung des Wasserkraftwerks die am besten geeigneten Komponenten und baulichen Maßnahmen auszuwählen, werden genaue Daten des Gewässers benötigt. Diese liegen entweder schon vor oder müssen zuerst ermittelt werden. In diesem Fall gibt es eine Messanlage des Hydrographischen Dienstes vom Land Tirol, welche seit 01.05.2003 besteht. Nach dem Brand wurde sie für längere Zeit außer Betrieb genommen und erst 2022 gegen eine Neue ausgetauscht. Diese befindet sich noch in der Kalibrierphase, weshalb ihre Messwerte noch nicht verwendet werden können.

### 2.1 Einzugsgebiet

Der Doserbach liegt in der Gemeinde Häselgehr im Bezirk Reutte im Bundesland Tirol. Er hat eine Länge von ca. 0,83 km und mündet in den Lech. Sein Einzugsgebiet (Abbildung 2) hat eine Fläche von 6,515 km<sup>2</sup>, und erstreckt sich vom höchsten Punkt mit 2608 m.ü.A. bis zum niedersten mit 990 m.ü.A.. Das Wasserkraftwerk liegt kurz vor der Mündung in den Lech und hat ein Stauziel von 994,05 m.ü.A., weshalb es das ganze Einzugsgebiet ausnutzen kann.

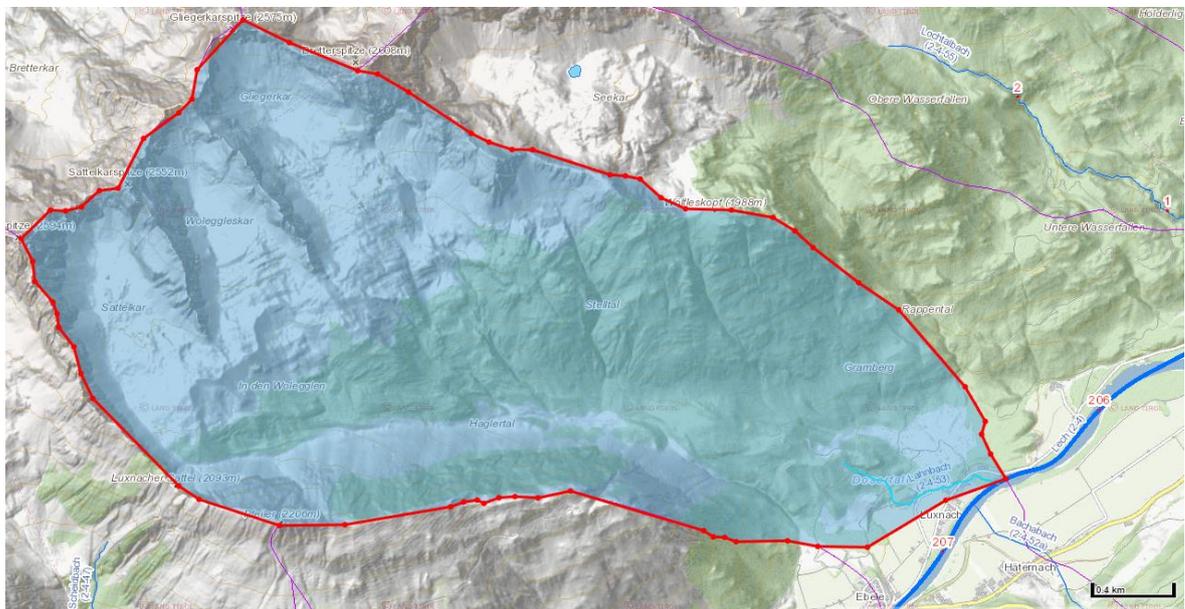
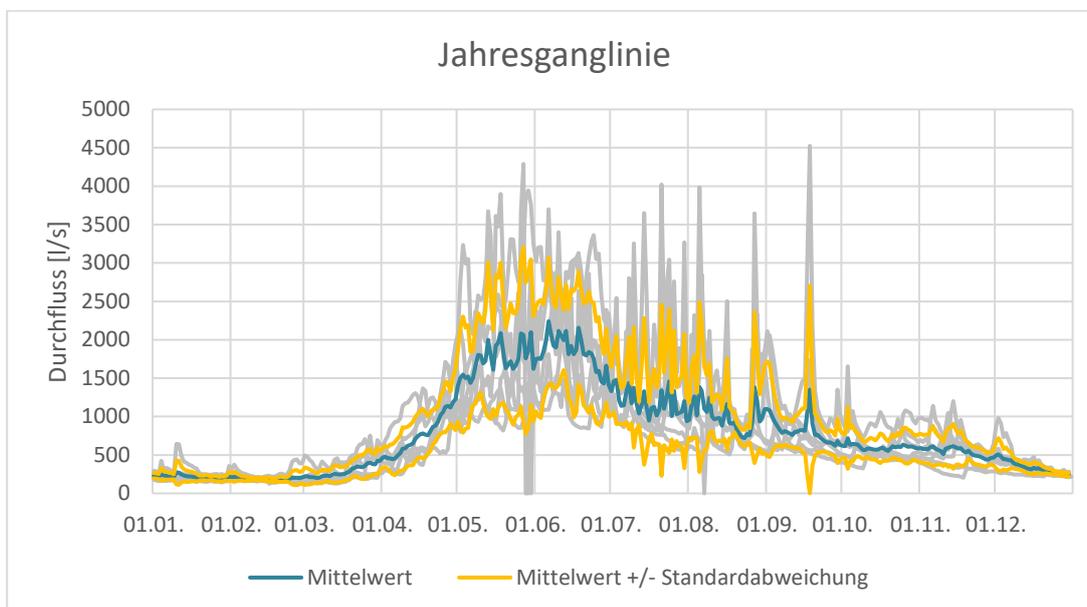


Abbildung 2: Einzugsgebiet des Doserbaches [1]

## 2.2 Durchflusswerte der Messstelle

Die vom Hydrographischen Dienst Tirol zur Verfügung gestellten Messerwerte sind in l/s und es wird der Tagesmittelwert des Durchflusses angegeben. Daraus können die Jahresganglinie und die Jahresdauerlinie erstellt werden. Die Jahresganglinie gibt den gemessenen Durchfluss und den Messzeitpunkt an. Diese Messungen werden regelmäßig vorgenommen und chronologisch über einen vorgegebenen Zeitraum (meistens ein Jahr) aufgelistet. Es liegen zwar Daten vom 01.05.2003 bis zum 29.05.2016 vor, aber es kam immer wieder zu Ausfällen der Messstation. Aus diesem Grund werden zur Bestimmung der mittleren Gang- und Dauerlinie nur die Jahre mit keinen oder geringen Messlücken herangezogen.



**Abbildung 3: Ganglinie des Doserbachs mit Mittelwert**

In Abbildung 3 ist der Durchfluss der Jahre 2006, 2008, 2009, 2010, 2013, 2014, 2015 und deren Mittelwert dargestellt. Man kann hier gut die alpine Charakteristik des Doserbachs erkennen. Die Durchflüsse im Winter sind sehr gering und zur Schneeschmelze im Frühjahr steigen sie drastisch an. Im Sommer kann es immer wieder zu Sommergewittern kommen, welche diese kurzzeitigen Durchflussspitzen verursachen. Durch diese Spitzen, welche nicht jedes Jahr zur gleichen Zeit auftreten, liegt die Standardabweichung auch weit vom Mittelwert entfernt.

### 2.2.1 Jahresdauerlinie

Wie man in Abbildung 3 erkennt, liefert der Doserbach nicht das ganze Jahr über die 600 l/s die entnommen werden dürfen. Daraus folgt, dass die Turbine nicht durchgehend voll beaufschlagt werden kann. Um die durchschnittliche Dauer der Teilbeaufschlagung zu bestimmen, wird aus den Messwerten die Jahresdauerlinie bestimmt. Sie setzt sich aus denselben Werten wie die Jahresganglinie zusammen, wobei diese aber nicht nach Zeit,

sondern absteigend nach Größe sortiert werden. Durch diese Sortierung erhält man einen Mittelwert von besserer Qualität, da die Standardabweichung geringer ist. In Abbildung 4 erkennt man, dass der Ausbaudurchfluss an ca. 180 Tagen erreicht wird. Hier wird aber noch nicht der gesetzlich vorgeschriebene Basisabfluss berücksichtigt.

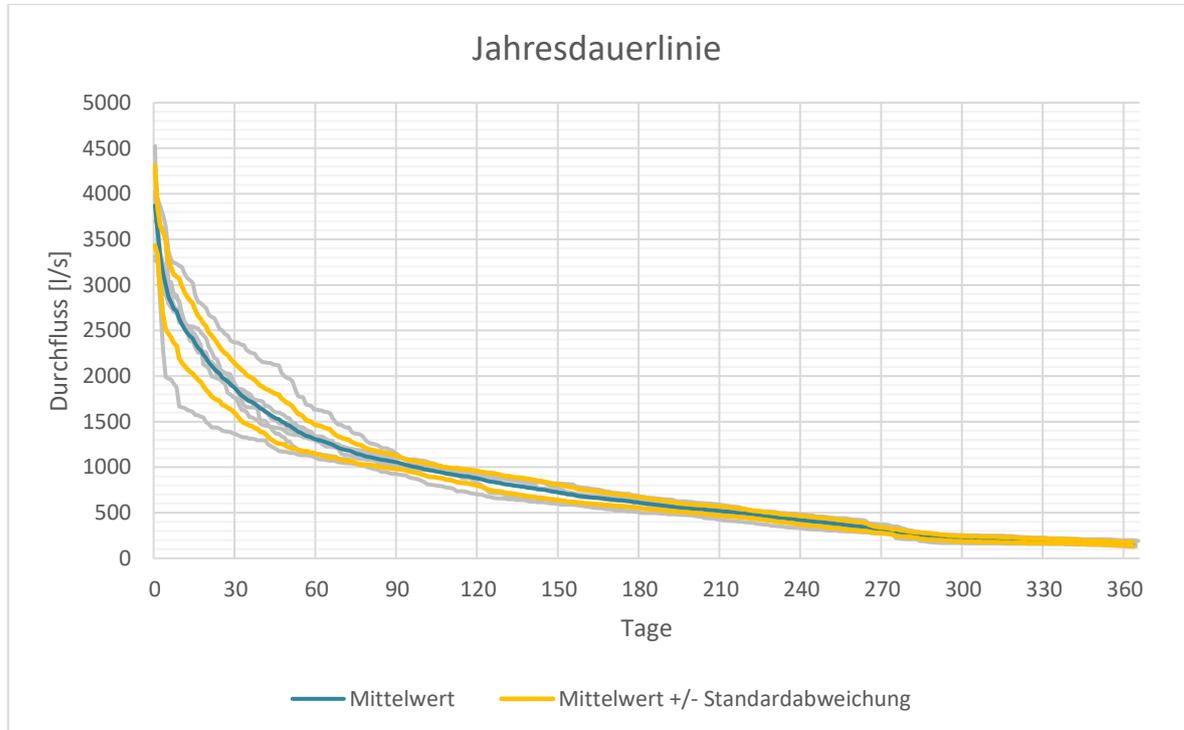


Abbildung 4: Dauerlinie des Doserbachs mit Mittelwert

### 2.2.1.1 Basiswasserführung (Basisabfluss $NQ_t$ )

Um den guten hydromorphologischen Zustand des Doserbachs zu gewährleisten, muss eine Mindestmenge von Wasser im Gewässer verbleiben. Dieser ökologisch notwendige Mindestabfluss wird in der österreichischen Rechtsvorschrift „Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer“ auch Basisabfluss oder Basiswasserführung genannt und festgelegt. Durch ihn wird die Strömung und die sich daraus ergebende Verbindung zum Grundwasser sichergestellt, wodurch die vorgeschriebenen Werte für die biologischen Qualitätskomponenten mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit erreicht werden.

Es gibt unterschiedliche Faktoren um den Basisabfluss zu bestimmen, welche sich nach Gewässergröße und Charakteristik richten. Da der Doserbach ein alpines Gewässer mit einem mittleren Abfluss von  $MQ=0,798 \text{ m}^3/\text{s}$  ist, muss der Basisabfluss mindestens die Hälfte des natürlichen mittleren Jahresniederrwassers  $MJNQ_t$  sein. Das mittlere Jahresniederrwasser ist das arithmetische Mittel der niedersten Abflüsse von mehreren Jahren. Zur Ermittlung von  $MJNQ_t=148 \text{ l/s}$  wurden dieselben Jahre herangezogen, mit welchen auch schon die mittlere Jahresganglinie erstellt wurde. Daraus folgt, dass der Basisabfluss  $NQ_t$  mindestens  $74 \text{ l/s}$  betragen muss. [2]

### 2.2.1.2 Dynamischer Anteil

Um wesentliche Gewässerfunktionen, wie zum Beispiel die saisonale Sohlenumlagerung oder die gewässertypischen Sauerstoff- und Temperaturverhältnisse zu gewährleisten wird noch ein Dynamischer Anteil zum Basisabfluss addiert. Mit einem Anteil von 20% des aktuellen Abflusses werden laut „Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer“ alle rechtlichen Ansprüche mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit erfüllt. Somit muss ein Gesamtdurchfluss von mindestens 842,5 l/s vorliegen, damit die maximal genehmigten 600 l/s aus dem Gewässer entnommen werden dürfen. [2]

Bei der Neubewilligung der Wasserkraftanlage im Jahr 2009 wurde eine Fischaufstiegshilfe gefordert und errichtet. Wichtig ist hier, dass eine ganzjährige Mindestwassermenge von 140 l/s über die Aufstiegshilfe abfließen muss. Deshalb gilt bis zu einem Gesamtabfluss  $Q$  von 330 l/s ein Basisabfluss von 140 l/s und erst ab einem höheren Gesamtabfluss wird der Basisabfluss  $NQ_t$  laut Gl. 1 angewendet. In Abbildung 5 ist die maximal entnehmbare Wassermenge anhand des mittleren Abflusses dargestellt. Es ist auch gekennzeichnet, dass der Ausbaudurchfluss durchschnittlich an 125 Tagen im Jahr aus dem Gewässer entnommen werden kann.

$$NQ_t = 74 \frac{l}{s} + Q * 0,2$$

Gl. 1

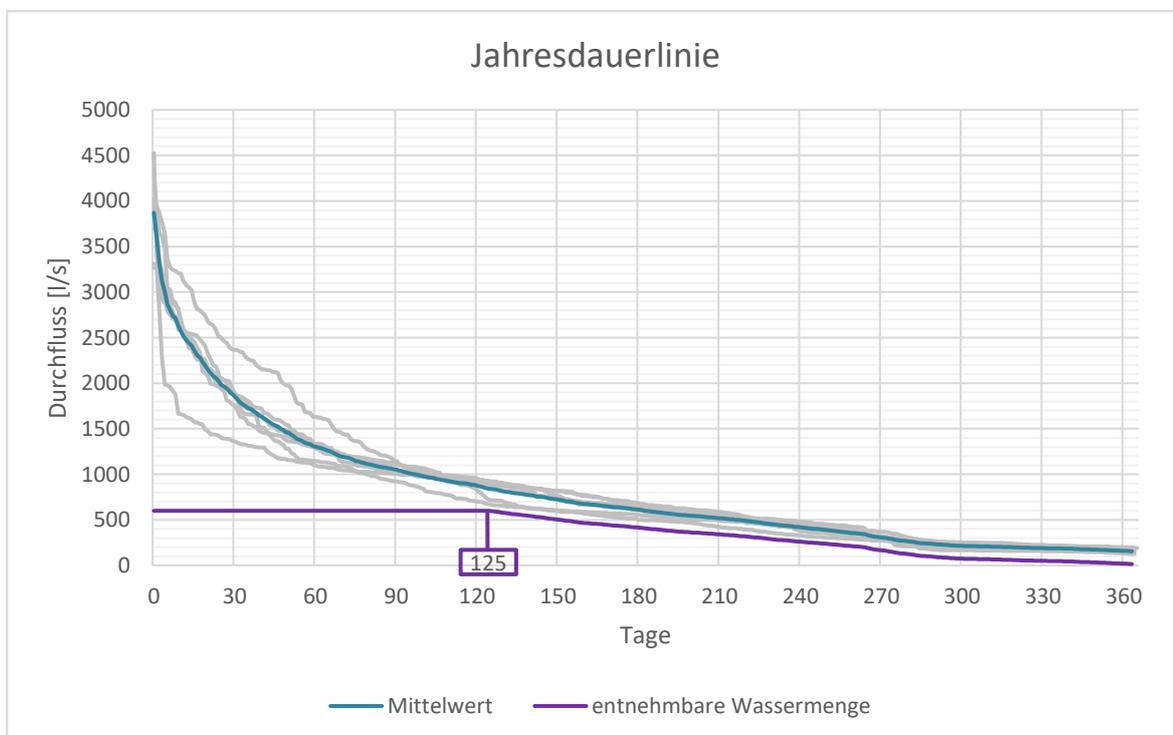


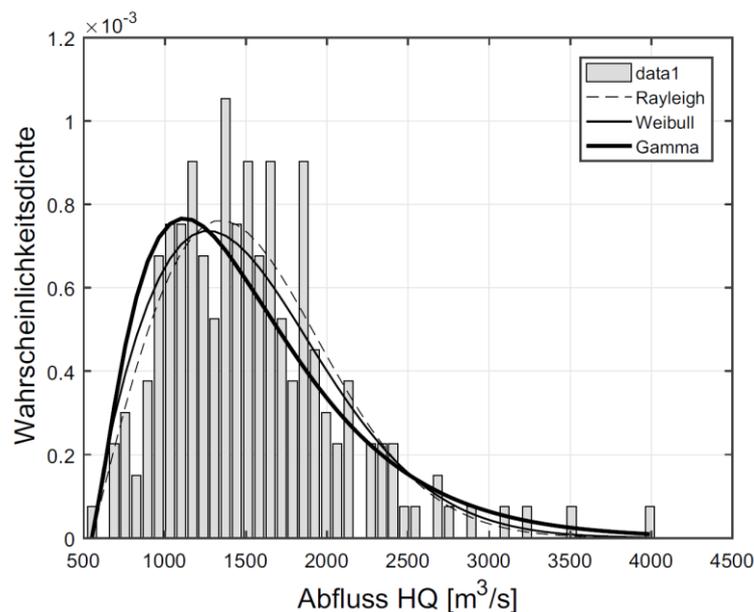
Abbildung 5: Dauerlinie des Doserbachs mit durchschnittlich entnehmbarer Wassermenge

## 2.3 Hochwasser

Für die Bemessung von wasserbaulichen Anlagen, vor allem Wehren, ist der mögliche Hochwasserabfluss entscheidend. Dieser wird als Abfluss in l/s oder m<sup>3</sup>/s und der Wahrscheinlichkeit mit welcher er auftritt angegeben. Für Wehranlagen in Flüssen wird in der Regel das hundertjährige Hochwasser HQ<sub>100</sub> für die Bemessung herangezogen. Ein Abfluss dieser Größenordnung tritt durchschnittlich alle 100 Jahre auf oder wird überschritten. Um ein Hochwasser mit dieser Jährlichkeit genau bestimmen zu können würde man Abflussmessungen von mehreren Hundert Jahren benötigen. Da solche Daten bei keinem Gewässer in zufriedenstellender Genauigkeit vorliegen, werden dafür unterschiedliche statistische Wahrscheinlichkeitsverteilungen herangezogen. [3]

### 2.3.1 HQ<sub>100</sub> mit Weibull-Verteilung

Um mit dieser Verteilung das HQ<sub>100</sub> zu bestimmen wird von jedem Jahr nur der höchste gemessene Abfluss HQ verwendet und daraus eine Häufigkeitsverteilung erstellt. Dann wird versucht die Weibull-Verteilung dieser Häufigkeitsverteilung anzupassen. Wenn man jetzt von dieser Verteilung eine kumulative Weibull-Verteilung erstellt, kann man den Wert bestimmen welcher mit der gewünschten Wahrscheinlichkeit (einmal in 100 Jahren) auftritt. In Abbildung 6 ist eine Häufigkeitsverteilung mit angepassten Rayleigh-, Weibull- und Gamma-Verteilung dargestellt. Man erkennt das keine Verteilung immer genau zutrifft.



**Abbildung 6: Die Häufigkeitsverteilung der höchsten Abflüsse am Pegel Pfelling an der Donau [4, p. 46]**

Wendet man diese Methode auf den Doserbach an, dann erhält man ein HQ<sub>100</sub> von 5525 l/s. Bei dieser Methode hängt die Qualität des Ergebnisses stark von der Datenmenge ab. In der Regel ist eine Anwendung ab einem Messzeitraum von 10 Jahren möglich, jedoch

erst nach 30 Jahren empfohlen. Da bei dem Doserbach nur Daten von 13 Jahren zur Verfügung stehen, sollte das Ergebnis sehr kritisch betrachtet werden. Man erkennt auch in Abbildung 7, dass die Weibull-Verteilung hier nicht zutrifft. [4]

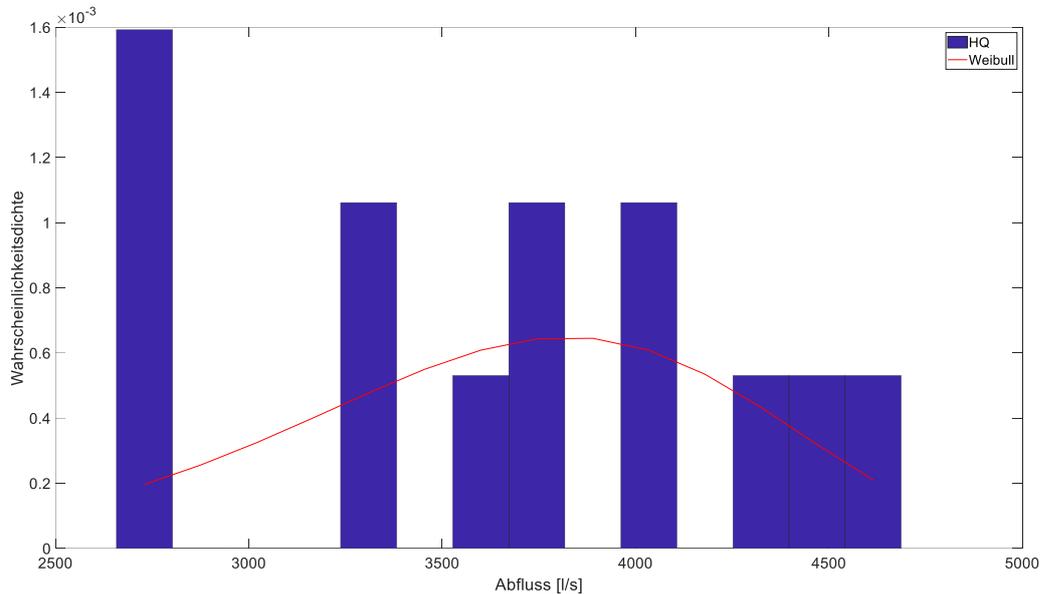


Abbildung 7: HQ-Werte des Doserbachs mit Weibull-Verteilung

### 2.3.2 HQ<sub>100</sub> mit Gumbel-Verteilung

Für die Bestimmung des HQ<sub>100</sub> scheint die Gumbel-Verteilung geeigneter. Hier wird der mittlere Hochwasserabfluss MHQ, also das arithmetische Mittel der HQ aller Jahre, mit der Standardabweichung  $s_{HQ}$  addiert. Durch den Wahrscheinlichkeitsfaktor  $K_G(n,T)$  wird die Anzahl der Stichproben  $n$  und der gewünschten Jährlichkeit  $T$  des Hochwassers mitberücksichtigt. In der Tabelle 1 sind einige Werte für  $K_G(n,T)$  aufgelistet. Das Ergebnis wird mit steigender Stichprobenanzahl genauer, deshalb sinkt der Korrekturfaktor. [3]

Tabelle 1:  $K_G(n,T)$ -Werte bei Verwendung der Gumbel-Verteilung

| T    | n = 10  | n = 25  | n = 50  | n = 100 | n = 1000 | n → ∞   |
|------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| 2    | -0,1355 | -0,1506 | -0,1568 | -0,1604 | -0,1640  | -0,1643 |
| 5    | 1,0580  | 0,8879  | 0,8197  | 0,7791  | 0,7295   | 0,7194  |
| 10   | 1,8481  | 1,5754  | 1,4663  | 1,4010  | 1,3211   | 1,3046  |
| 50   | 3,5872  | 3,0886  | 2,8892  | 2,7700  | 2,6231   | 2,5923  |
| 100  | 4,3224  | 3,7283  | 3,4908  | 3,3487  | 3,1735   | 3,1367  |
| 500  | 6,0213  | 5,2066  | 4,8809  | 4,6860  | 4,4455   | 4,3947  |
| 1000 | 6,7517  | 5,8421  | 5,4785  | 5,2609  | 4,9923   | 4,9355  |

Für den Korrekturfaktor wird der Wert für eine Stichprobenanzahl von  $n=10$  angenommen.

$$HQ_{100} = MHQ + s_{HQ} * K_G(10,100) = 3652,769 \frac{l}{s} + 619,071 \frac{l}{s} * 4,3224 \quad \text{Gl. 2}$$

$$HQ_{100} = 6328,641 \frac{l}{s}$$

Im Vergleich zum höchsten gemessenen Abfluss von 4614 l/s scheint dieser Wert sehr hoch, aber es liegt auch nur ein geringer Messzeitraum vor. Deshalb wird dieser Wert für die in Kapitel 5.1.2 folgende Überprüfung der Hochwasserabfuhr des Wehres herangezogen. Der durch die Weibull-Verteilung berechnete Abfluss wird wie zuvor schon bemerkt als sehr ungenau erachtet und wird deshalb nicht verwendet.



## 3 Wasserkraftmaschinen

Eine Wasserkraftmaschine nutzt die kinetische und potentielle Energie des durchströmenden Wassers und wandelt diese in Rotationsenergie um, mit welcher sie einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Je nach Typ kann noch eine Leiteinrichtung und ein Saugrohr benötigt werden. Die Wasserkraftmaschine ist der Hauptbestandteil eines jeden Wasserkraftwerks. Deshalb wird mit der Auswahl dieser begonnen, da die anderen Komponenten an sie angepasst werden müssen, um den wirtschaftlichsten Betrieb zu gewährleisten. Dies ist in der Praxis durch Sicherheits- und Umweltauflagen meistens nicht ganz möglich. In den folgenden Kapiteln werden für die Rahmenbedingungen geeignete Wasserkraftmaschinen erläutert und anhand eines Bewertungsschlüssels benotet.

### 3.1 Bewertungsschlüssel

Um die Auswahl zu erleichtern wird ein Bewertungsschlüssel aufgestellt. Dabei werden Auswahlkriterien festgelegt und anhand eines Faktors deren Gewichtung bestimmt. Die Kriterien werden von 0 bis 10 bewertet, wobei 0 als nicht erfüllt und 10 als optimal angesehen wird. Die Punkte werden anhand vorliegender Werte vergeben oder wenn diese nicht zur Verfügung stehen abgeschätzt. Der Faktor wird anhand der Wichtigkeit des Kriteriums bestimmt und die Summe aller Faktoren ergibt 1 (100%). Die Punkte und Faktoren werden mit dem Besitzer der Wasserkraftanlage besprochen und vergeben. Unter Kapitel 3.5 sind die Ergebnisse in Tabelle 2 ersichtlich.

#### Eignung für den Einsatzbereich:

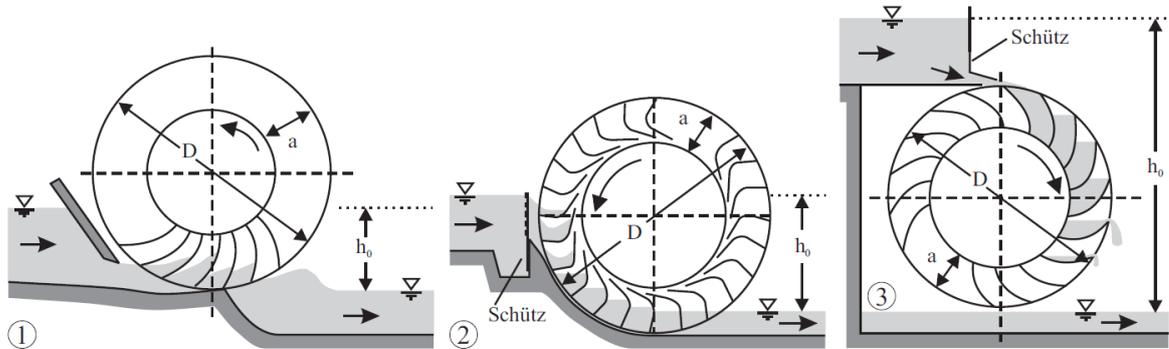
Der Standort verfügt über eine Bruttofallhöhe, vom Oberwasser bis zum Unterwasser, von 2,3m und es dürfen maximal 600 l/s aus dem Gewässer entnommen werden. Hier ist zu beachten, dass nicht jeder Wasserkraftmaschinentyp die komplette Fallhöhe nutzen kann, was in die Bewertung mit einfließt. Die Eignung für den Einsatzbereich ist eine Grundvoraussetzung für den wirtschaftlichen Betrieb der Wasserkraftanlage, deshalb wird dieses Kriterium mit dem Faktor 0,35 (35%) bewertet.

#### Wirkungsgrad:

Der von den Herstellern angegebene Wirkungsgrad wird nur unter idealen Bedingungen erreicht. Das heißt, dass Durchfluss und Fallhöhe den optimalen Wert aufweisen, welche im Idealfall der Ausbaudurchfluss und die Fallhöhe der Anlage sind. Da die Anlage nicht immer unter den optimalen Bedingungen betrieben werden kann, wird auch der Wirkungsgrad unter Teillast in die Bewertung mit einbezogen. Da sich die mögliche Leistung



erfolgt, wie aus Abbildung 9 ersichtlich, anhand der Position des Wassereintritts in das Wasserrad. Auf das Unterschlächtige Wasserrad wird hier nicht näher eingegangen da es schlecht für die vorherrschenden Bedingungen geeignet ist und den schlechtesten Wirkungsgrad besitzt. Es wird auch noch auf eine Sonderform eingegangen, welche zwar als Turbine bezeichnet wird, aber eigentlich zur Familie der Wasserräder gehört. [5]



**Abbildung 9: Typen von Wasserrädern: 1) unterschlächtiges Schaufelrad; 2) mittelschlächtiges Zellenrad; 3) oberchlächtiges Zellenrad [5, p. 630]**

### 3.2.1 Mittelschlächtiges Wasserrad

Dieser Wasserradtyp war auch schon damals zum betrieb des Sägewerks installiert. Es hat tiefe, leicht geneigte Schaufeln und es liegt in einem Gerinne, welches dem Außendurchmesser des Rades angepasst ist. Wie in Abbildung 9 2) wird das Wasser ungefähr auf Höhe der Nabe zugeführt, wodurch nicht nur die kinetische, sondern auch die potentielle Energie des Wassers genutzt wird. Daraus ergibt sich auch der wesentlich höhere Wirkungsgrad von bis zu 80%. Der Einsatzbereich liegt zwischen 1,5 und 3 m Fallhöhe und einem Durchfluss von 0,2 bis 2 m<sup>3</sup>/s. [5]

### 3.2.2 Oberschlächtiges Wasserrad

Bei diesem Wasserradtyp wird das Wasser am höchsten Punkt zugeführt und fließt nach einer viertel bis maximal halben Umdrehung wieder aus den Wasserradschaufeln. Hierbei ist wichtig, dass das Wasserrad, im Unterschied zu den anderen Typen, nicht mit dem Unterwasser in Kontakt kommt, da es sonst gebremst wird. Es benötigt die größten Fallhöhen (2,5 bis 10 m) unter den Wasserrädern und dafür die geringsten Durchflüsse (0,05 bis 1,15 m<sup>3</sup>/s). Der maximal erreichbare Wirkungsgrad liegt bei 85%. [5]

### 3.2.3 Lamellenturbine

Die Lamellenturbine ist eine Sonderform des unterschlächtigen Wasserrades, welches im Vergleich zu herkömmlichen Wasserrädern dieser Gruppe einen höheren Wirkungsgrad von 60% bis 70% aufweist. Es besteht aus speziell geformten Lamellen, welche in einer bestimmten Anordnung fix am Laufradumfang angebracht sind. Wie aus Abbildung 10

ersichtlich, ist das Rad an einer verstellbaren Vorrichtung befestigt mit welcher es an den Wasserstand angepasst oder ganz aus dem Wasser gehoben werden kann. Sie zeichnet sich durch ihre kompakte Bauweise und die geringen Wartungskosten aus. Ihr Einsatzbereich liegt zwischen 0,5 m und 10 m Fallhöhe mit einem Durchfluss von 0,5 m<sup>3</sup>/s bis 10 m<sup>3</sup>/s. [6]



Abbildung 10: Lamellenturbine [6, p. 21]

## Bewertung Wasserrad

Von dem Wasserrad gibt es viele unterschiedliche Entwicklungen, welche sich hauptsächlich in deren Form und Wirkungsgrad unterscheiden. Deshalb wird hier das Wasserrad allgemein bewertet und falls es in die engere Auswahl kommt, werden die einzelnen Entwicklungen noch einmal genauer untersucht.

### Einsatzbereich:

So gut wie alle Wasserradtypen weisen eine sehr gute Eignung für den vorliegenden Einsatzbereich auf. Als einziger Negativpunkt sind hier die Lärmemissionen zu nennen, welche auch bei einer optimalen Auslegung auftreten. Deshalb werden hier 9 Punkte vergeben.

### Wirkungsgrad:

Je nach Typ kann bei einer guten Auslegung des Rades ein Wirkungsgrad von 85 % erreicht werden. Da dieser Wert im Labor mit optimalen Bedingungen erreicht wird, kann in der Praxis von einem niederen Ergebnis ausgegangen werden. Bei der Lamellenturbine wurden zum Beispiel Wirkungsgrade von 60 % von den Betreibern bestätigt, jedoch mit dem Verweis auf Verbesserungsmöglichkeiten. Deshalb wird ein Wirkungsgrad von 60 % bis 70 % als realistisch angesehen. Bei Teillast wird von einem noch niederen Wirkungsgrad ausgegangen, weshalb hier 5 Punkten vergeben werden.

Instandhaltung:

Der grundsätzlich sehr simple Aufbau der Wasserräder führt auch zu einem geringen Wartungsaufwand und es kann dadurch angenommen werden, dass der Betreiber auch eigenständig Reparaturen durchführen kann. Im Winter besteht jedoch die Gefahr des Vereisens. In diesem Fall muss das Rad außer Betrieb genommen und enteist werden. Dieser Nachteil kann durch bauliche Maßnahmen verringert werden. Da es im Winter nachweislich zu langen Kälteperioden mit bis zu  $-15^{\circ}$  Celsius kommen kann und die Sonnenstunden sich auf unter 2 h verringern, wird das Vereisen als großer Nachteil gewertet. Hier werden 4 Punkte vergeben.

Investitionskosten:

Die Kosten für ein Wasserrad werden geringer geschätzt als für eine Turbine mit vergleichbarer Leistung. Da das alte Wasserrad und seine Halterung auch noch existiert werden die Umbauarbeiten auch gering eingeschätzt. Dafür werden 8 Punkte vergeben.

### 3.3 Wasserkraftschnecke

Eine Wasserkraftschnecke (Abbildung 11) ist geometrisch sehr ähnlich zu einer Wasserförderschnecke, aber sie hat die entgegengesetzte Drehrichtung und verwendet die potentielle Energie des Wassers. Im Wesentlichen besteht sie aus einer biegesteifen Hohlwelle auf welche ein Schneckenprofil mit 3 bis 6 Schneckenflügeln aufgeschweißt wird. Die Schnecke liegt meistens in einem U-förmigen Trog mit einem Anstellwinkel von  $20^{\circ}$  bis  $35^{\circ}$ , wobei der Wirkungsgrad mit einem flacheren Winkel steigt und bis zu 85 % erreichen kann. Das Getriebe und der Generator liegen oberwasserseitig beim Traglager. Um den Oberwasserspiegel konstant zu halten wird sie meistens im drehzahlvariablen Betrieb mit einem Frequenzumrichter betrieben. Mit ihr können Durchflüsse von  $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$  bis  $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$  und Fallhöhen zwischen 1 m und 6,5 m bewältigt werden. [5]

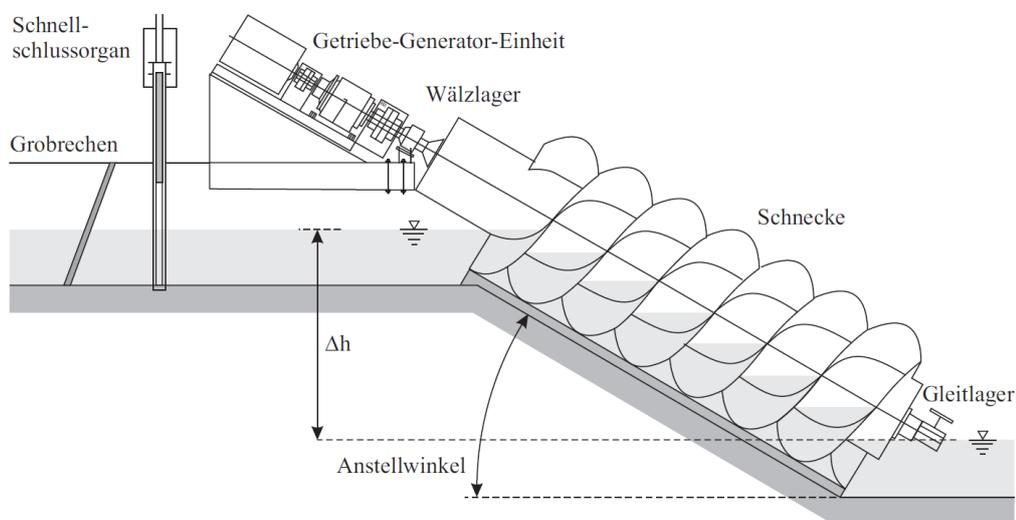
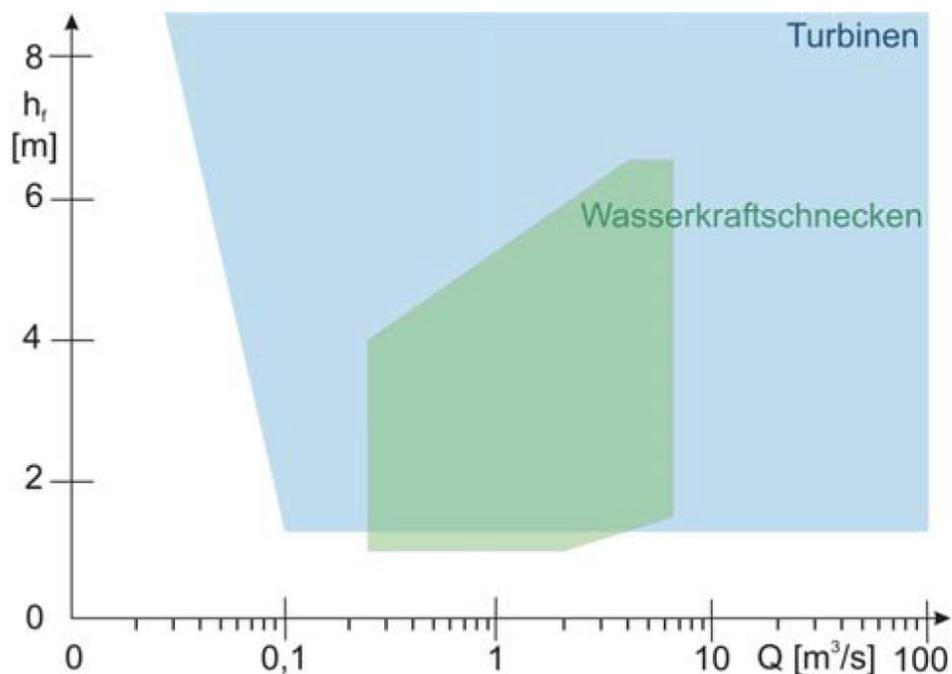


Abbildung 11: Prinzipieller Aufbau einer Wasserkraftschnecke [5, p. 635]

## Bewertung Wasserkraftschnecke

### Einsatzbereich:

Wie in Abbildung 12 zu sehen ist, eignet sich die Wasserkraftschnecke nur für kleine Wasserkraftanlagen. Mit dem vorliegende Einsatzbereich der Schnecke kann der vorhandene Durchfluss und Fallhöhe abgedeckt werden. Hier werden 7 Punkte vergeben.



**Abbildung 12: Haupteinsatzbereich für Wasserkraftschnecken im Vergleich zu Turbinen bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss [5, p. 635]**

### Wirkungsgrad:

Bei Wirkungsgradmessungen von 14 bestehenden Anlagen wurde, mit unterschiedlichen Beaufschlagungen, ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 69% bestimmt. Somit weist auch die Wasserkraftschnecke bei richtiger Auslegung ein gutes Teillastverhalten auf. Bei Volllast kann sogar ein Wirkungsgrad von 85% erreicht werden. Deshalb werden für dieses Kriterium 7 Punkte vergeben. [6]

### Instandhaltung:

Wasserkraftschnecken werden zwar noch nicht so lange wie andere Turbinentypen verwendet (Anfang 1990er Jahre), aber durch die einfache und robuste Bauart kann von einer Lebensdauer von über 25 Jahre ohne große Wartungsarbeiten ausgegangen werden. Sie sind verschleißfest, selbstreinigend und die Instandhaltungsarbeiten können selbständig durchgeführt werden. Außerdem entfällt der meist notwendige Feinrechen. Es werden 8 Punkte vergeben.

Investitionskosten:

Das Fundament für die Schnecke besteht aus Beton und kann in der Regel eigenständig erstellt werden. Die Wasserkraftschnecke und der Trog werden schon im Werk vormontiert. Nach der Montage und Ausrichtung wird der Trog mit Beton noch hintergossen. Da die Schnecke im Freien liegt, könnte es zu unzulässigen Lärmemissionen kommen. Um diese zu reduzieren, fallen nochmal erhebliche Kosten an, da eine Einhausung für die Wasserkraftschnecke errichtet werden muss. Dafür werden 6 Punkte vergeben.

### 3.4 Turbinen

#### 3.4.1 Durchströmturbine

Die, dem Wasserrad sehr ähnliche, Durchströmturbine kommt vor allem bei Kleinwasserkraftwerken zum Einsatz. Ihr Einsatzgebiet liegt bei Durchflüssen von ca.  $0,025\text{-}13\text{ m}^3/\text{s}$  und Fallhöhen zwischen  $2\text{-}200\text{ m}$ . Es können Wirkungsgrade von bis zu  $87\%$  (bei Volllast) erzielt werden und durch das unterteilte Laufrad (Abbildung 13) kann auch bei Teillast ein hoher Wirkungsgrad erreicht werden. Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, wird das walzenförmige Laufrad zweimal durchströmt, wodurch die Turbine sich selbst reinigt. Sie ist zwar eine Gleichdruckturbine, aber es wird meistens ein Saugrohr nach der Turbine eingebaut, um die sonst verlorene Fallhöhe zwischen Turbine und Unterwasserspiegel auszunutzen.

[5]

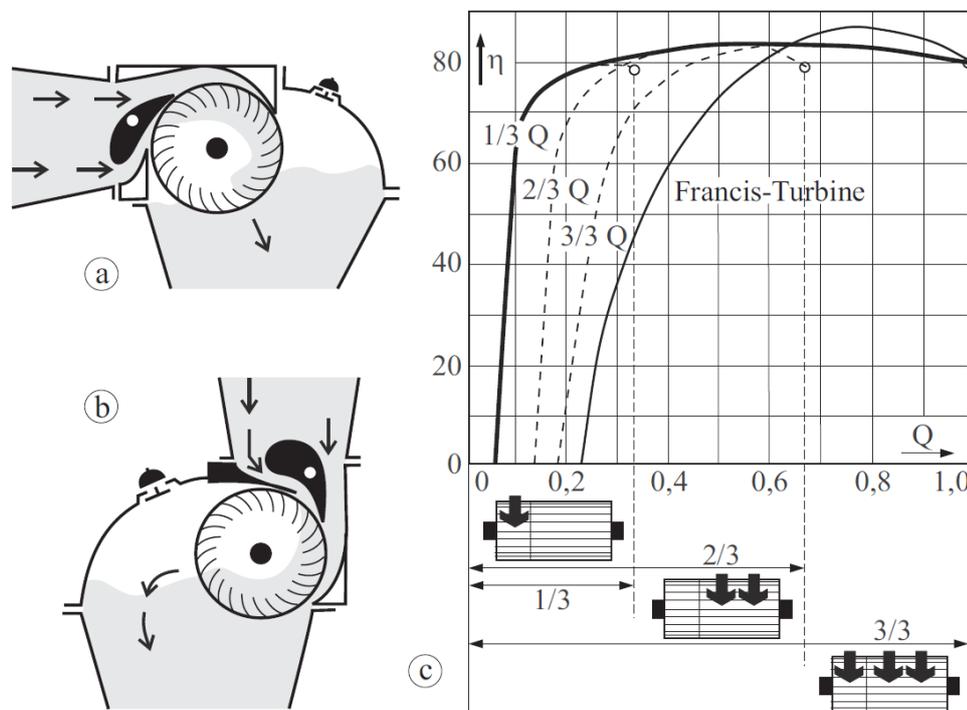


Abbildung 13: Durchströmturbine: Strömungsverlauf bei a) horizontalem und b) vertikalem Zufluss; c) Wirkungsgradkennlinie bei einer 1:2-Unterteilung von Leitapparat und Laufrad im Vergleich zur Francis-Turbine [5, p. 627]

## **Bewertung Durchströmturbine**

### Einsatzbereich:

Die Durchströmturbine eignet sich gut für den Ausbaudurchfluss vom  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , aber die Fallhöhe von 2,3 m liegt knapp am unteren Ende des Einsatzbereichs der Turbine. Dies kann dazu führen, dass es keine standardisierte Serienmaschine für den vorliegenden Einsatzbereich gibt. Die höheren Kosten und der Wirkungsgrad bei Teilbeaufschlagung werden in den anderen Kriterien berücksichtigt. Deshalb werden für die Eignung auf den Einsatzbereich 7 Punkte vergeben.

### Wirkungsgrad:

Der maximale Wirkungsgrad liegt bei 87 %, welcher jedoch nur von größeren Anlagen erreicht wird. In der Praxis kann von einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 80% ausgegangen werden, welcher auch normalerweise überschritten wird. [6]

In Abbildung 13 ist das Teillastverhalten der Durchströmturbine dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass der Wirkungsgrad von 80 % auch bei einer Beaufschlagung von nur 30 % erreicht wird. Deshalb werden hier 8 Punkte vergeben.

### Instandhaltung:

Dieser Turbinentyp erreichte 1933 die Serienreife und wurde als Patent angemeldet. Da diese Turbine schon so lange auf dem Markt ist, gibt es viele Referenzanlagen und Erfahrungsberichte. Durch die robuste Konstruktion werden geringen Betriebskosten erwartet. Da aber mit einer Sonderlösung zu rechnen ist, können die Wartungskosten höher ausfallen, da unter Umständen kein Serienteil getauscht werden muss. Durch die Selbstreinigung sind kleine Verschmutzungen kein Problem und es kann von einer hohen Lebensdauer ausgegangen werden. Durch den geringen Wartungsaufwand und der Möglichkeit zur selbständigen Reparatur werden hier 8 Punkte vergeben. [6]

### Investitionskosten:

Die Turbine kommt standardmäßig vom Werk vormontiert und kann somit direkt eingebaut werden. Leider konnte kein Hersteller gefunden werden, welcher Turbinen in der benötigten Dimension serienmäßig fertigt. Es müsste dann entweder eine überdimensionierte Turbine angeschafft werden, welche nur Teilbeaufschlagt wird oder eine für den Einsatzbereich extra ausgelegte. Beide Varianten führen zu höheren Investitionskosten. Um die Durchströmturbine am effektivsten zu nutzen muss ein Saugrohr installiert werden. Dafür muss eine betonierte Bodenplatte aufgerissen werden und der Einsatz von schwerem Gerät ist durch die engen Platzverhältnisse nur bedingt möglich. Deshalb gibt es hier nur 5 Punkte.

### 3.4.2 Kaplan-Turbine

Die Kaplan-Turbine kommt vor allem bei geringen Fallhöhen und großen Durchflüssen zum Einsatz. In ihrem Aussehen ähnelt sie stark einer Schiffsschraube. Vor der Turbine befindet sich ein Leitrad oder Leitschaufeln, welche die Beaufschlagung regeln. Die Kaplan-Turbine kann einzeln oder doppelt reguliert ausgeführt werden oder als starre Propellerturbine. Welche dieser Ausführungen ausgewählt wird hängt hauptsächlich von den Durchflussschwankungen des Gewässers ab. Propellerturbinen sind nur für einen gewissen Durchfluss ausgelegt und ihr Wirkungsgrad sinkt beträchtlich sobald dieser abweicht. Bei regulierten Kaplan-Turbinen sind entweder nur die Laufradschaufeln oder Leit- und Laufradschaufeln beweglich ausgeführt, um ein besseres Teillastverhalten zu gewährleisten (Abbildung 16). Dieser Turbinentyp benötigt ein Saugrohr das die Strömungsenergie in Druckenergie umwandelt. Durch ihre unzähligen Formen ist sie sehr flexibel einsetzbar und kann in so gut wie jeder Lage verbaut werden. Für die vorliegenden Verhältnisse sind vor allem folgende Kaplan-Turbinenformen geeignet. [5]

#### Heberbauweise

Bei dieser Bauform (Abbildung 14) liegt der Leitapparat ganz oder nur teilweise über dem Oberwasserspiegel. Dadurch wird Kavitation bis zu einer Fallhöhe von 4 m vermieden. Durch die höhere Position der Turbine kann das Saugrohr besser ausgebildet werden, da mehr Platz zur Verfügung steht. Der Generator liegt hier über der Turbine und viele Hersteller bieten permanenterregte Synchrongeneratoren an, welche direkt mit der Turbine verbunden sind. Es können Wirkungsgrade von 80% bis 95% erreicht werden. Der Einsatzbereich liegt bei niederen Fallhöhen von 1 m bis maximal 25 m und Durchflüssen von  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  bis  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ .

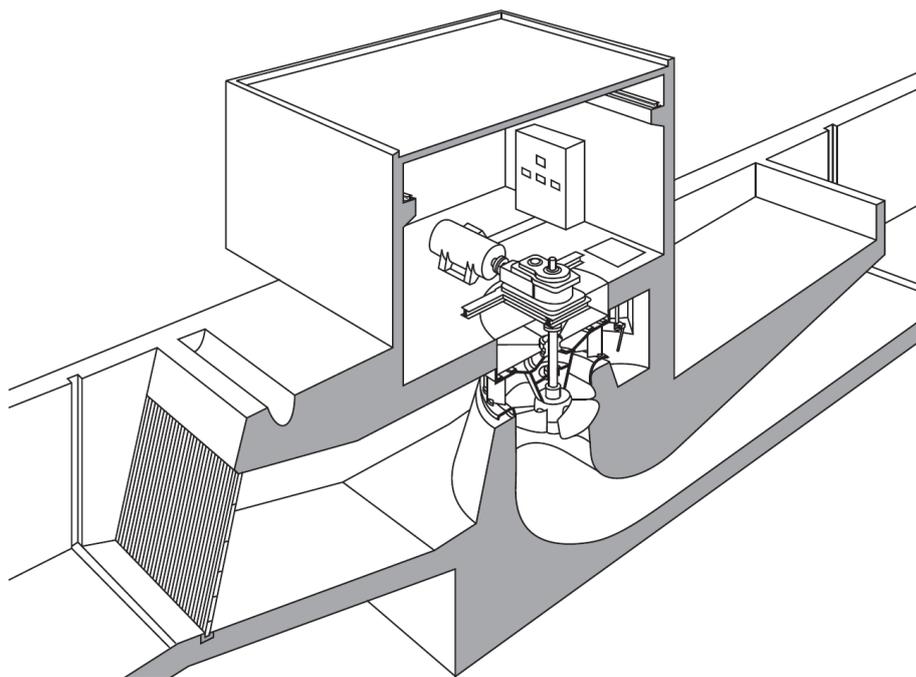


Abbildung 14: Kaplan-Turbine in Heberbauweise [5, p. 594]

## S-Rohrturbine

Ihr Name kommt von dem s-förmig gekrümmten Saugrohr (Abbildung 15). Im Gegensatz zu den meisten anderen Bauformen liegt hier der Generator außerhalb der Turbinenleitung und ist somit leichter zugänglich. Er ist entweder direkt, durch ein Getriebe oder einen Riemenantrieb mit der Turbine verbunden. Dadurch kann die Turbine kleiner konstruiert werden, da der Generator nicht mehr in der Turbinenbirne untergebracht werden muss. Der Wirkungsgrad und Einsatzbereich ist mit dem der Heberbauweise identisch. [5]

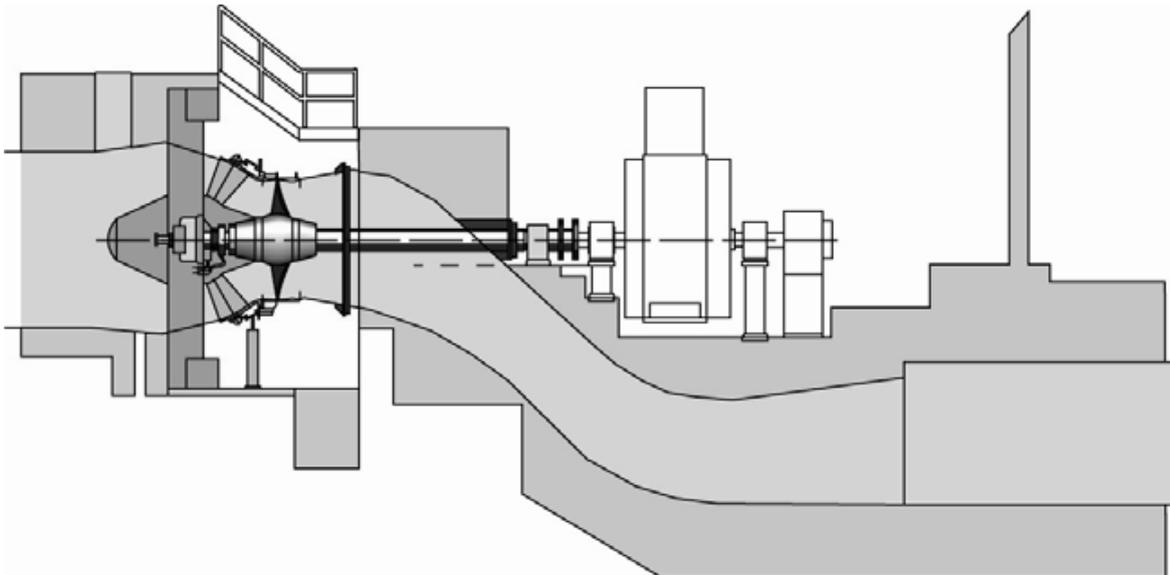


Abbildung 15: Längsschnitt durch eine S-Turbine [3, p. 334]

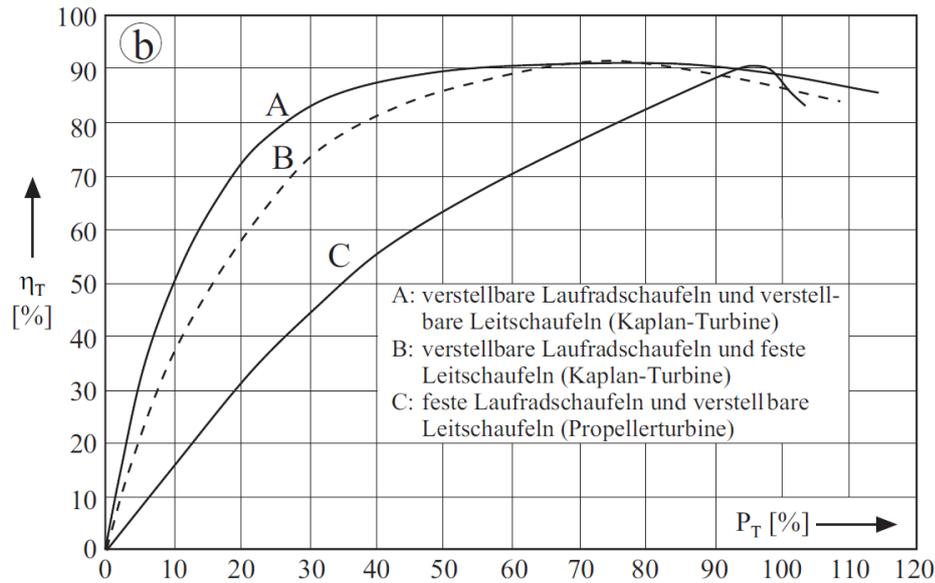
## Bewertung Kaplan-Turbine

### Einsatzbereich:

Da Kaplan-Turbinen nur eine geringe Fallhöhe benötigen, ist sie für die vorliegende Fallhöhe gut geeignet, aber dafür liegt der vorhandene Durchfluss an der unteren Grenze des Turbineneinsatzbereichs. Durch das Saugrohr nach der Turbine kann diese die komplett zur Verfügung stehende Fallhöhe abarbeiten. Deshalb werden hier 9 Punkte vergeben.

### Wirkungsgrad:

Die Kaplan-Turbine ist eine der am meisten genutzten Turbinentypen und kann daher als technisch ausgereift angesehen werden. Deshalb kann von einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 85 % ausgegangen werden, solange keine Propellerturbine verwendet wird. Da der Ausbaudurchfluss nicht über das ganze Jahr entnommen werden kann, sollte eine doppelt regulierte Kaplan-Turbine verwendet werden, um auch bei Teilbeaufschlagung einen genügend hohen Wirkungsgrad zu erreichen. In Abbildung 16 sind die unterschiedlichen Wirkungsgradverläufe dargestellt, wobei Kurve A für die doppelt regulierte Turbine steht. Vor allem wegen des sehr guten Teillastverhaltens werden 8 Punkte vergeben.



**Abbildung 16: Vergleich der Wirkungsgrad-Kennlinien bei Propeller- und Kaplan-Turbinen bei unterschiedlicher Regulationsart [5, p. 545]**

#### Instandhaltung:

Durch den frei zugänglichen Generator kann eine leichte Wartung für diesen gewährleistet werden. Die Kaplan-Turbine wird generell als Wartungsarm betrachtet, aber falls Reparaturen an den Laufradschaufeln durchgeführt werden, muss das gesamte Laufrad ausgebaut werden. Deshalb werden für dieses Kriterium 7 Punkte vergeben.

#### Investitionskosten:

Es gibt mehrere Hersteller welche Kaplan-Turbinen serienmäßig für den gewünschten Einsatzbereich anbieten. Wenn man Abbildung 15 und Abbildung 8 vergleicht, erkennt man die ähnlichen Platzverhältnisse. Wenn eine S-Rohrturbine installiert wird, müssten am Turbinenzulauf nur geringe Änderungen vorgenommen werden. Aber da nach der Turbine nur ein normales Ablaufrohr verbaut ist, müsste hier die Bodenplatte aufgerissen werden, um dieses zu entfernen. Erst dann könnte ein richtiges Saugrohr verbaut werden. Bei der Heberbauweise müsste zusätzlich noch der Turbineneinlauf verändert werden. Deshalb können hier nur 4 Punkte vergeben werden, da mit hohen Kosten zu rechnen ist.

### 3.4.3 Pipeturbine

Die Pipeturbine ist der Kaplan-Rohrturbine sehr ähnlich. Hier befindet sich das Laufrad samt verstellbarer Leiteinrichtung in einem Rohr, aber die Generatorpole befinden sich außerhalb der Wasserleitung und sind um den Laufradkranz befestigt (Abbildung 17). Dadurch ergibt sich eine kompakte Bauweise für die gesamte Turbine und Generatoreinheit. Diese Baugruppe kommt vom Werk vormontiert und kann wie ein FF-Stück in die Rohrleitung geflanscht werden. Ihr Einsatzbereich wird mit einem Durchfluss von 50 l/s bis

200 l/s (0,05-0,2 m<sup>3</sup>/s) und einer Fallhöhe von 2 m bis 8 m angegeben. Es können auch mehrere Einheiten parallel oder in serie kombiniert werden, um höher Durchflüsse abzu- arbeiten. Unter optimalen Bedingungen kann die Pipeturbine einen Wirkungsgrad von 70% erreichen. [7]

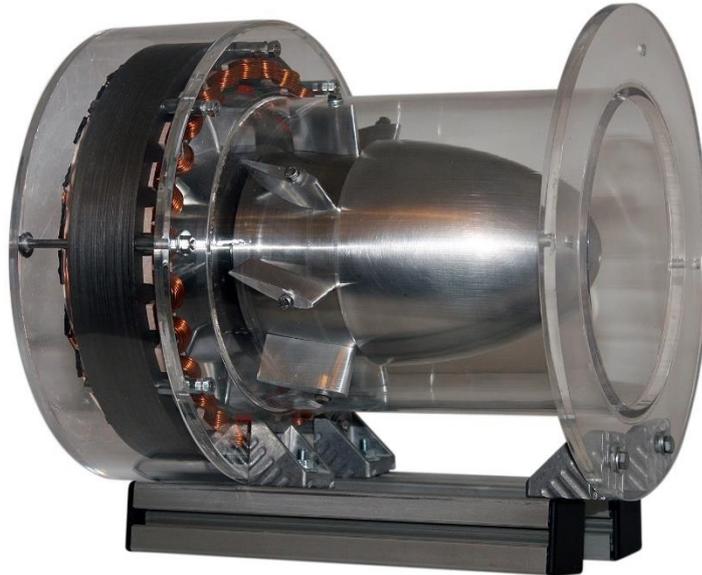


Abbildung 17: Model einer Pipeturbine mit Generator [7]

Einsatzbereich:

Da eine einzelne Pipeturbine nur 200 l/s abarbeiten kann, müssen mehrere Turbinen verwendet werden. Für die Serienschaltung wird in der Regel eine höhere Fallhöhe benötigt, weshalb für die volle Ausnutzung des vorliegenden Einsatzbereichs drei Turbinen, wie in Abbildung 18, parallelgeschaltet werden. Da die vorhandene Fallhöhe von 2,3 m im unteren Einsatzbereich der Turbine liegt werden für dieses Kriterium 6 Punkte vergeben.

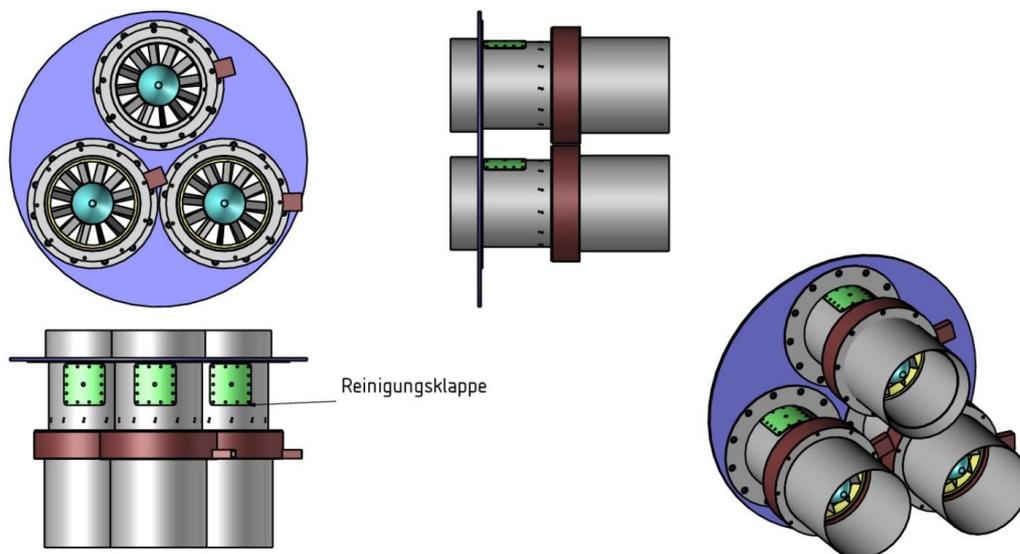


Abbildung 18: Pipeturbine 3-fach Rohr [8]

Wirkungsgrad:

Wie zuvor schon beschrieben, erreicht die Turbine unter optimalen Bedingungen einen Wirkungsgrad von 70 %. Leider gibt es noch keine unabhängigen Berichte über diese Turbine, weshalb hier für die Praxis ein geringerer Wert von ca. 60% angenommen wird. Dafür werden 6 Punkte vergeben.

Instandhaltung:

Die Turbinen-Generatoreinheit wird vom Hersteller als Wartungsfrei bezeichnet. Der Generator und seine Rotormagnete sind vakuumvergossen und befinden sich außerhalb des Wasserstroms. Für diese Anordnung wird eine hohe Lebensdauer angenommen. Die Turbine wird aus korrosionsbeständigem Edelstahl gefertigt. Für die Wartung und Reinigung ist eine Revisionsklappe im Rohr vorgesehen (Abbildung 18). Es gibt zwar noch keine Langzeitberichte, aber diese Konstruktion wird als Wartungsarm angenommen, weshalb für dieses Kriterium 7 Punkte vergeben werden.

Investitionskosten:

Für den Betrieb dieser Turbine müssten Änderungen am vorhandenen Abflussrohr vorgenommen werden, aber da die Pipeturbine kein Saugrohr benötigt, kann der Aufwand geringer eingeschätzt werden als für die Verbauung eines Saugrohrs. Es müssen dafür aber auch 3 Turbinen beschafft werden. Hier werden 6 Punkte vergeben.

### 3.5 Auswahl der Wasserkraftmaschine

Die Auswahl der Turbine erfolgt nach den in Kapitel 3.1 genannten Kriterien. In Tabelle 2 sind die für die einzelnen Kriterien vergebenen Punkte noch einmal aufgelistet.

**Tabelle 2: Bewertung**

|                    |            | Wasserrad      |             | Durchströmturbine |             | Wasserkraftschnecke |             |
|--------------------|------------|----------------|-------------|-------------------|-------------|---------------------|-------------|
| Kriterium          | Faktor [%] | Punkte         | Teilwertung | Punkte            | Teilwertung | Punkte              | Teilwertung |
| Einsatzbereich     | 35         | 9              | 315         | 7                 | 245         | 7                   | 245         |
| Wirkungsgrad       | 30         | 5              | 150         | 8                 | 240         | 7                   | 210         |
| Instandhaltung     | 15         | 4              | 60          | 8                 | 120         | 8                   | 120         |
| Investitionskosten | 20         | 8              | 160         | 5                 | 100         | 6                   | 120         |
| Gesamtwertung      | 100        |                | 685         |                   | 705         |                     | 695         |
|                    |            | Kaplan-Turbine |             | Pipeturbine       |             |                     |             |
| Kriterium          | Faktor [%] | Punkte         | Teilwertung | Punkte            | Teilwertung |                     |             |
| Einsatzbereich     | 35         | 9              | 315         | 6                 | 210         |                     |             |
| Wirkungsgrad       | 30         | 8              | 240         | 6                 | 180         |                     |             |
| Instandhaltung     | 15         | 7              | 105         | 7                 | 105         |                     |             |
| Investitionskosten | 20         | 4              | 80          | 6                 | 120         |                     |             |
| Gesamtwertung      | 100        |                | 740         |                   | 615         |                     |             |

In der Gesamtwertung erreicht die Kaplan-Turbine die meisten Punkte. Mit Ausnahme der Investitionskosten, schneidet sie sehr gut ab. Um sich ein besseres Bild von einer Wasserkraftanlage mit einer Kaplan-Turbine zu machen, wurde eine Anlage mit der ungefähr gleichen Dimension besichtigt. Dort war eine doppelt regulierte Turbine mit vertikaler Welle in Heberbauweise (ähnlich Abbildung 14) verbaut. Vom Betreiber wurde auch die schon in Kapitel 3.4.2 genannten Vorteile bestätigt. Es wurde vor allem das gute Teillastverhalten hervorgehoben. Der Generator wurde noch über einen Keilriemen angetrieben, wobei der Betreiber darauf verwies, dass mit neuen Generatoren auch ein direkter Anschluss an die Turbine möglich ist.

## 3.6 Grobe Turbinenbemessung

Hier wird nur eine grobe Vordimensionierung durchgeführt, um die ungefähren Hauptabmessungen der Turbine zu ermitteln. Für die genaue Auslegung werden Modellversuche oder aufwendige numerische Simulationsverfahren von den Turbinenherstellern eingesetzt.

### 3.6.1 Turbinenmaße

Als erstes muss die spezifische Drehzahl  $n_q$  bestimmt werden. Sie ist eine der gebräuchlichsten Kennzahlen von Turbinen. Sie beschreibt die Drehzahl einer fiktiven, geometrisch ähnlichen Turbine mit einem Durchfluss von  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  und einer Fallhöhe von  $1 \text{ m}$ . Sie wird oft zum Vergleich von Turbinen verwendet, aber es kann auch die Drehzahl einer geometrisch ähnlichen Turbine berechnet werden. Mit der Formel in Gl. 3 wird die höchste, zulässige spezifische Drehzahl  $n_{q,max}$  berechnet.

$$n_{q,max} = \frac{850}{\sqrt{h_f}} = \frac{850}{\sqrt{2,3m}} = 560,473 \text{ min}^{-1} \quad \text{Gl. 3}$$

Es ist wichtig das  $n_{q,max}$  verwendet wird um die Drehzahl  $n$  der realen Turbine zu berechnen, da sich dadurch der kleinste und somit wirtschaftlichste Laufraddurchmesser  $D_3$  ergibt.

$$n = \frac{n_{q,max} * h_f^{0,75}}{\sqrt{Q}} = \frac{560,473 \text{ min}^{-1} * (2,3m)^{0,75}}{\sqrt{0,6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}} = 1351,372 \text{ min}^{-1} \quad \text{Gl. 4}$$

Bevor  $D_3$  bestimmt werden kann, muss noch der Beiwert  $k_{u,K}$  berechnet werden.

$$k_{u,K} = 0,79 + 0,00478 \cdot n_q = 0,79 + 0,00478 \cdot 560,473 \text{min}^{-1} = 3,469 \quad \text{Gl. 5}$$

$$D_3 = \frac{60 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{\pi} \cdot \frac{k_{u,K}}{n} \cdot \sqrt{h_f} = \frac{60 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}{\pi} \cdot \frac{3,469}{1351,372 \text{min}^{-1}} \cdot \sqrt{2,3 \text{m}} \quad \text{Gl. 6}$$

$$D_3 = 0,329 \text{m}$$

Mit dem grob bestimmten Laufraddurchmesser können auch noch die weiteren Dimensionen der Turbine (Abbildung 19) und dem Saugrohr (Abbildung 20) überschlägig bestimmt werden.

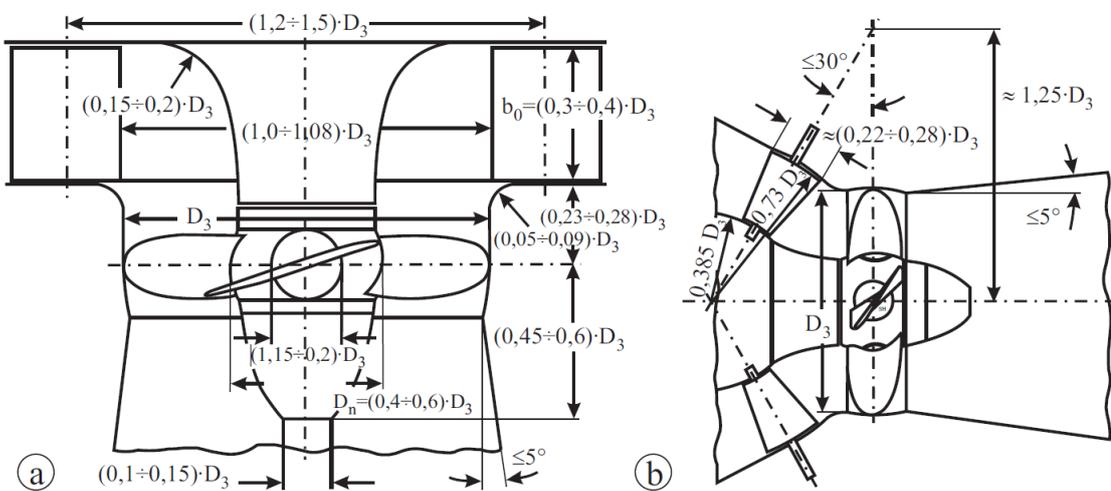


Abbildung 19: Definitionsskizzen zur Vordimensionierung: a) Kaplan-/Propellerturbine; b) Rohrturbine [5, p. 604]

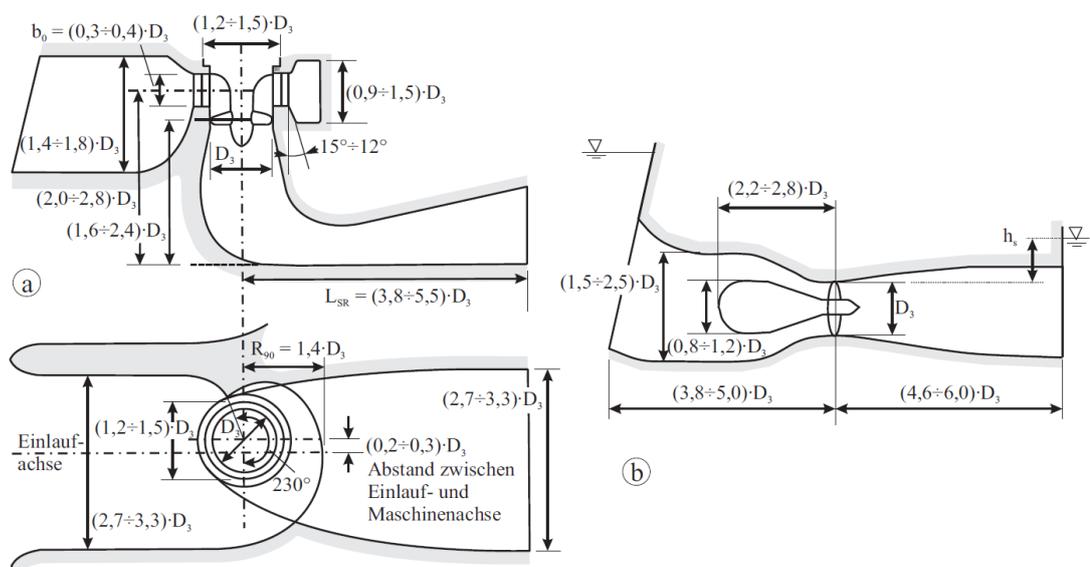


Abbildung 20: Richtwerte für die Vordimensionierung von Einlauf und Saugrohr: a) Kaplan-/Propellerturbine; b) Rohrturbine [5, p. 605]

Die überschlägig berechneten Außenmaße von Turbine und Einlauf bestätigen, dass sie in den gegebenen Räumlichkeiten Platz hat. [5]

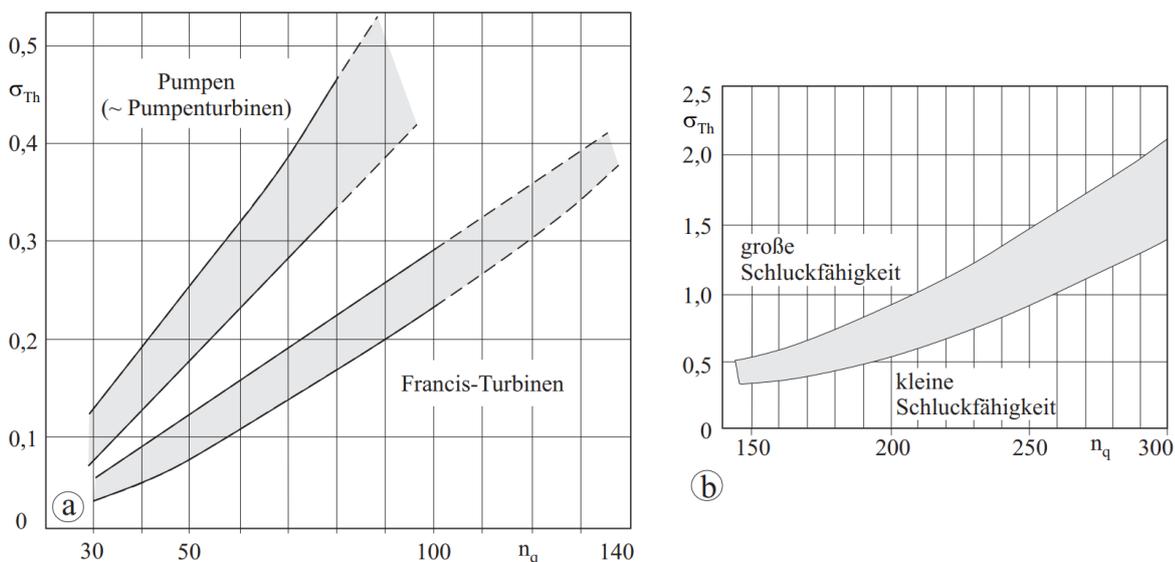
### 3.6.2 Kavitationsprüfung

Wichtig ist am Ende noch die Überprüfung der Saughöhe  $h_s$ . Ist diese größer als die zulässige Saughöhe  $h_{s,zul}$  dann tritt Kavitation auf. Darunter versteht man das Bilden von Dampfblasen durch Druckabfall. Wenn diese Blasen dann in Zonen höheren Druckes kommen implodieren sie abrupt und verursachen dadurch Schäden an Bauteilen und vermindern den Wirkungsgrad. Für die Berechnung der zulässigen Saughöhe müssen zuerst die Dampfdruckhöhe  $h_d$ , die Atmosphärendruckhöhe  $h_{amb}$  und der Kavitationsbeiwert  $\sigma_{Th}$  bestimmt werden. Die Atmosphärendruckhöhe ist 10 m und die Dampfdruckhöhe wird aus Tabelle 3 für eine Wassertemperatur von 10°C entnommen.

**Tabelle 3: Dampfdruckhöhe des Wassers bei unterschiedlichen Temperaturen [5, p. 564]**

| Wassertemperatur [°C]    | 0     | 10    | 20    | 30    | 40    |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dampfdruckhöhe $h_d$ [m] | 0,062 | 0,125 | 0,238 | 0,433 | 0,752 |

Der Kavitationsbeiwert oder auch Thoma-Beiwert genannt, kann aus Diagrammen wie in Abbildung 21 abgelesen werden. Er fasst die Strömungsverhältnisse auf der Laufradrückseite zusammen. Leider sind in diesem Diagramm nur Werte bis  $n_q=300 \text{ min}^{-1}$  angegeben. Er kann aber auch mit Gl. 7 berechnet werden. [5]



**Abbildung 21: Thoma-Beiwert  $\sigma_{Th}$  für Turbinen in Abhängigkeit von  $n_q$ : a) Francis Turbinen und Pumpenturbinen; b) Rohr- und Kaplan-Turbinen [5, p. 543]**

Dafür wird die Saugkennzahl  $S_q$  benötigt, welche die Strömungsverhältnisse auf der Laufradsaugseite beschreibt. Da keine genauen Unterlagen für die Wahl von  $S_q$  vorliegen, wird der empfohlene Wert von 0,6 für Kaplan-Turbinen angenommen. [9]

$$\sigma_{Th} = \frac{1}{2304,3} * \left(\frac{n_q}{S_q}\right)^{\frac{4}{3}} = \frac{1}{2304,3} * \left(\frac{560,473}{0,6}\right)^{\frac{4}{3}} = 3,963 \sim 4 \quad \text{Gl. 7}$$

$$h_{s,zul} = h_{amb} - h_d - \sigma_{Th} * h_f = 10m - 0,125m - 4 * 2,3m = 0,675m \quad \text{Gl. 8}$$

Falls der Turbineneinlauf der Kaplan-Turbine auf derselben Höhe wie bei der bestehenden Francis-Turbine liegt, dann ergibt sich eine Saughöhe  $h_s$  von ca. 1,6 m. Da diese größer als die zulässige ist, wird mit Kavitation gerechnet. Um dies zu vermeiden gibt es 3 Möglichkeiten.

#### 1. Möglichkeit:

Es wird der Laufraddurchmesser vergrößert und dadurch die Drehzahl der Turbine verringert. Dadurch verringert sich auch die Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers in das Saugrohr und dieses kann kleiner ausgebildet werden. Schon bei einem Laufraddurchmesser von  $D_3=0,35$  m ( $n_q \sim 450$  min<sup>-1</sup>) ergibt sich eine zulässige Saughöhe von  $h_{s,zul} \sim 3$  m.

#### 2. Möglichkeit:

Es wird die Kaplan-Turbine mit vertikaler Welle über dem Oberwasserspiegel in Heberbauweise (Abbildung 14) verbaut. Dadurch wird ein Kavitationsfreier betrieb gewährleistet, da das Saugrohr länger wird und dadurch die Abströmverhältnisse verbessert werden. Nachteil dieser Anordnung ist die Schlechte Zugänglichkeit der Turbine von oben, da die Decke des Turbinenraums nur 0,75 m höher liegt als der Oberwasserspiegel.

#### 3. Möglichkeit:

Es wird eine Rohr- oder S-Rohrturbine (Abbildung 15) verbaut. Durch die horizontale Welle wird keine so große Bauhöhe, als bei vertikaler Welle, benötigt. Um jedoch die zulässige Saughöhe nicht zu überschreiten, müsste eine Vertiefung in die Bodenplatte des Turbinenraums gemacht werden. Die Bodenplatte liegt nämlich nur 0,75 m über dem Unterwasserspiegel. [5]

### 3.6.3 Generatorwirkungsgrad

Bei Turbinen dieser Leistungs- und Größenordnung wird der Generator direkt vom Turbinenhersteller mitgeliefert. Dabei handelt es sich in der Regel um einen permanenterregten Synchrongenerator. Diese haben eine geringe Baugröße und können direkt mit der Turbine

verbunden werden. Durch die nahezu konstanten Erregerverluste hat dieser Generatortyp vor allem im Teillastbereich einen Wirkungsgradvorteil gegenüber anderen. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung haben moderne permanenterregte Generatoren einen Wirkungsgrad zwischen 96% und 98%. [5]

### 3.7 Fazit Turbine

Der Hauptgrund warum kein Wasserrad ausgewählt wurde, ist die Gefahr des Stillstands durch Eis. Der Besitzer kannte noch die Anlage mit dem alten Mühlenrad und ihrer Neigung zum Vereisen. Dies konnte so schlimm werden, dass das Wasserrad bis zum Einsetzen von Tauwetter stillstand. Bei der Wasserkraftschnecke wäre eine Montage außerhalb des Hauses nötig gewesen. Dies hätte merkbar das Landschaftsbild verändert und wurde als zusätzlicher Negativpunkt gewertet. Die Durchströmturbine hat die zweitbeste Bewertung und liegt nur hinter der Kaplan-Turbine, weil diese in den wichtigen Kriterien (Einsatzbereich und Wirkungsgrad) noch besser ist. Da es noch keine Referenzberichte über die Pipeturbine gibt, wird diese eher kritisch betrachtet. Wobei auch der vom Hersteller angegebene Wert für den Wirkungsgrad sehr gering ist, im Vergleich zu den anderen Wasserkraftmaschinen.

Aus dem Bewertungsverfahren geht die Kaplan-Turbine als Sieger hervor. Ihr größter Nachteil, die hohen Investitionskosten, werden durch ihre gute Verfügbarkeit und hervorragendes Teillastverhalten ausgeglichen. Durch die Besichtigung einer Referenzanlage konnten die Vorteile bestätigt werden und etwaige Zweifel konnten beseitigt werden. Es kommen zwei unterschiedliche Bauarten infrage, wobei keine einen wesentlichen Vorteil gegenüber der anderen hat. Hier werden die Kosten der Entscheidungsfaktor sein.

Bei der Grobauslegung wurde noch ein Problem mit der Saughöhe erkannt und es wurden drei mögliche Maßnahmen gefunden. Für die zweite und dritte Möglichkeit fallen noch einmal zusätzliche Baumaßnahmen an. Außerdem entstehen bei der S-Rohrturbine, bei einer sehr geringen Bauhöhe, größere Verluste im darauffolgenden Saugrohr. Durch die geringen Krümmungsradien des Rohrs erhöhen sich die Strömungsverluste. Auf dieses Phänomen wird in Kapitel 4.1 genauer eingegangen. Die erste Möglichkeit wird als Kostengünstigste eingeschätzt und sollte deshalb verfolgt werden. Der Laufraddurchmesser von 0,35 m wird bei den meisten Hersteller auch als kleinster Durchmesser von Serienturbinen angegeben. Hier sollte aber nicht außer Acht gelassen werden, dass dies nur eine grobe Bemessung nach Kenn- und Erfahrungswerten aus der Fachliteratur ist. Um die, für die vorliegenden Rahmenbedingungen, beste Auswahl zu treffen, sollte die Erfahrung und technischen Hilfsmittel (Simulation) des Herstellers genutzt werden.

## 4 Saugrohr

Derzeit ist nur ein normales Rohr installiert, welches das Wasser vom Turbinenaustritt ins Unterwasser leitet. Wie schon zuvor erwähnt benötigt die Kaplan-Turbine ein Saugrohr um die komplette Fallhöhe abarbeiten zu können. Da die Turbine laut der groben Bemessung eine spezifische Drehzahl von  $560 \text{ min}^{-1}$  hat, ist diese ein Schnellläufer. Bei solchen Turbinen ist die Fließgeschwindigkeit des Wassers nach dem Laufrad noch recht hoch. In diesem Fall ist das Saugrohr sehr wichtig, denn durch dieses können bis zu 5% der hydraulischen Energie des Wassers zurückgewonnen werden. Dies erfolgt in zwei Schritten:

1. Das Saugrohr verbindet die Turbine mit dem Unterwasserspiegel, wodurch die komplette Fallhöhe ausgenutzt wird. Dies wird auch als statische Saughöhe beschrieben. In Abbildung 22 sind die Saugrohrformen dargestellt. Man erkennt das die Form durch die Turbinenausrichtung bestimmt wird.
2. Ein Teil der Geschwindigkeitsenergie des Wassers wird durch Querschnittserweiterung in Druckenergie umgewandelt. Durch diesen Unterdruck wird das Wasser wortwörtlich durch die Turbine gesogen und erhöht die Energieausbeute. Diese Funktion des Saugrohrs wird auch dynamische Saughöhe genannt.

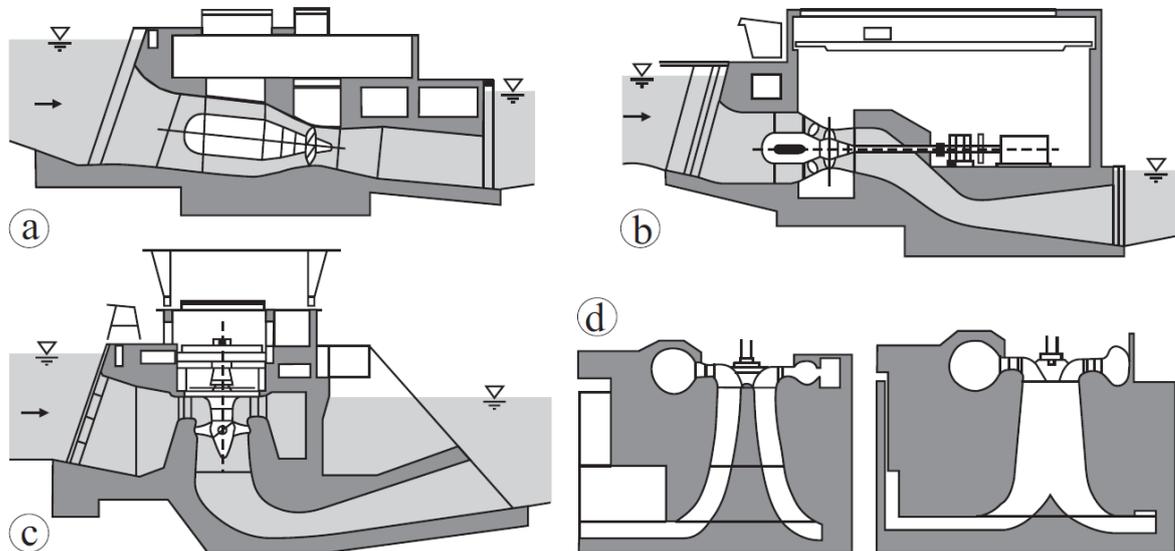


Abbildung 22: Saugrohr: a) horizontal, gerade; b) horizontal mit Krümmer; c) vertikal mit Saugkrümmer; d) Erweiterungs- oder Spreizsaugrohre [5, p. 562]

### 4.1 Krümmer

Da ideal ausgebildete Saugrohre eine beträchtliche Länge erreichen, wird bei vertikalachsen Turbinen ein Krümmer verbaut. Durch ihn wird die Rohrachse vom vertikalen Turbi-

nenaustritt in die Horizontale überführt. Dadurch werden Tiefbaukosten eingespart, was aber auch einen leicht schlechteren Wirkungsgrad des Saugrohrs verursacht. Diese Wirkungsgradeinbußen werden durch die erzwungene Richtungsänderung der Strömung und der daraus entstehenden Sekundärströmungen verursacht. Diese Strömungen entstehen durch eine ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung, da das Wasser auf der Krümmereinnenseite langsamer fließt als auf der Außenseite (Abbildung 23).

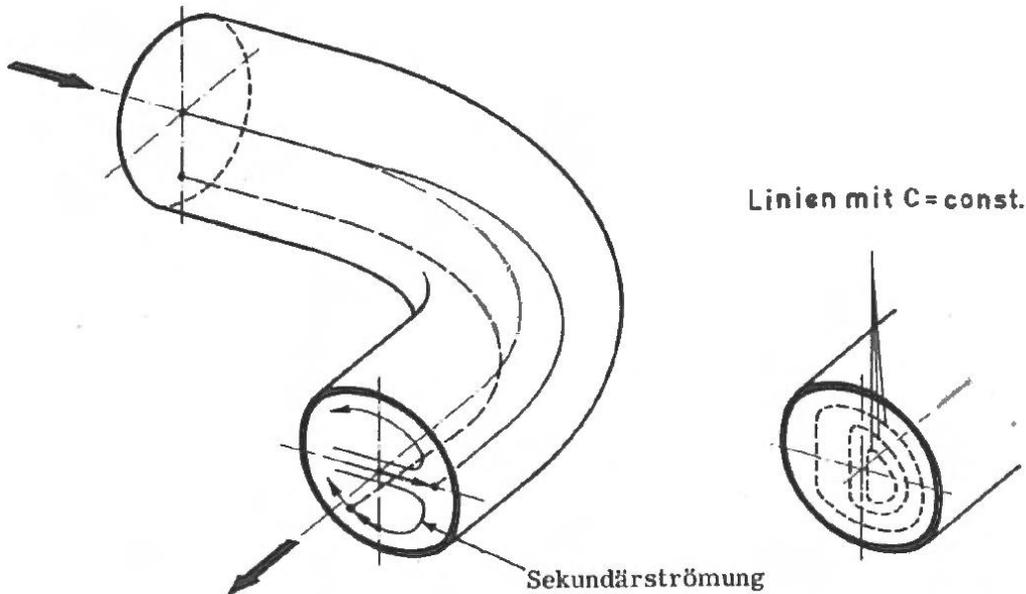


Abbildung 23: Sekundärströmung im Krümmer endlicher Breite [9, p. 110]

Um die Verluste gering zu halten sollte bei rechtwinkligen Krümmern das Verhältnis von Krümmungsradius der Rohrachse durch Rohrdurchmesser zwischen 3 und 4 liegen. Bei der S-Rohrturbine wird ein sogenannter Doppelkrümmer verbaut. Dieser sollte wie in Abbildung 24 ausgeführt werden.

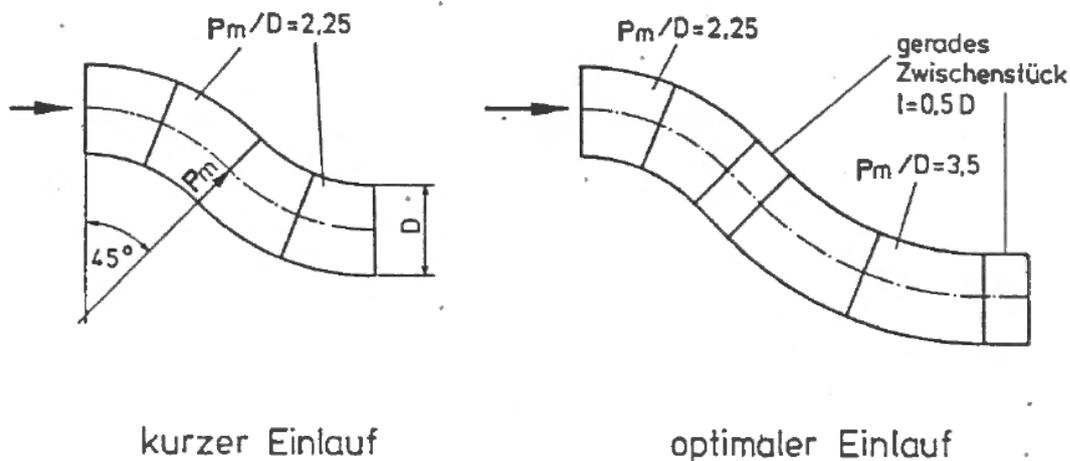


Abbildung 24: Der „kurze“ und der „optimale“ S-Krümmer [9, p. 118]

Außerdem sollte nach dem Krümmer das Rohr noch mindestens mit einer Länge von  $L=D_R$  gerade weiterverlaufen bevor das Saugrohr beginnt. Dadurch kann sich die Sekundärströmung beruhigen und wird nicht ins Saugrohr weitergeleitet. [9]

## 4.2 Diffusor

Der Teil des Saugrohrs, in welchem die Energieumwandlung stattfindet, wird Diffusor genannt. Seine ideale Länge wird durch zwei Faktoren bestimmt. Dem Verhältnis zwischen Ein- und Austrittsquerschnitt  $A_A/A_E$  und dem Öffnungswinkel  $\theta$ . Der Austrittsquerschnitt kann rechteckig oder rund ausgeführt werden (Abbildung 25). Er sollte so ausgelegt werden, dass die Fließgeschwindigkeit des austretenden Wassers zwischen 1 bis maximal 2 m/s beträgt. Dies wird in der Regel mit einem Verhältnis  $A_A/A_E$  von 3-5 erreicht.

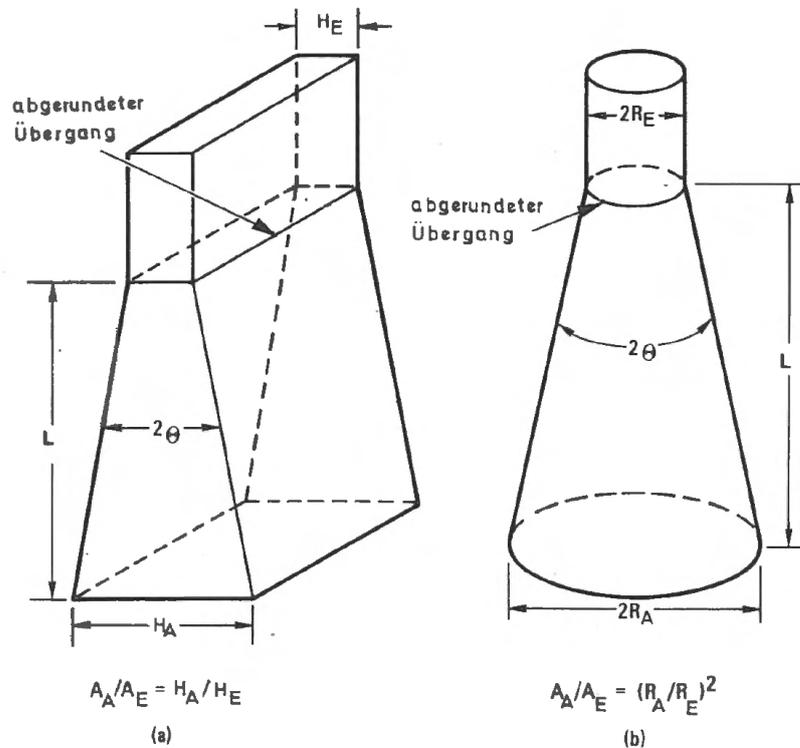


Abbildung 25: Keildiffusor (a) und Kegeldiffusor (b) [9, p. 86]

Beim Öffnungswinkel muss ein Kompromiss zwischen Reibungs- und Ablösungsverlusten gefunden werden. Ablösungsverluste entstehen, wenn das Wasser der Rohrwand, bei zu großem Winkel, nicht mehr folgen kann. Es löst sich ab und es entstehen Rückströmungen und instationäre Vorgänge, wie sie in Abbildung 26 dargestellt sind.

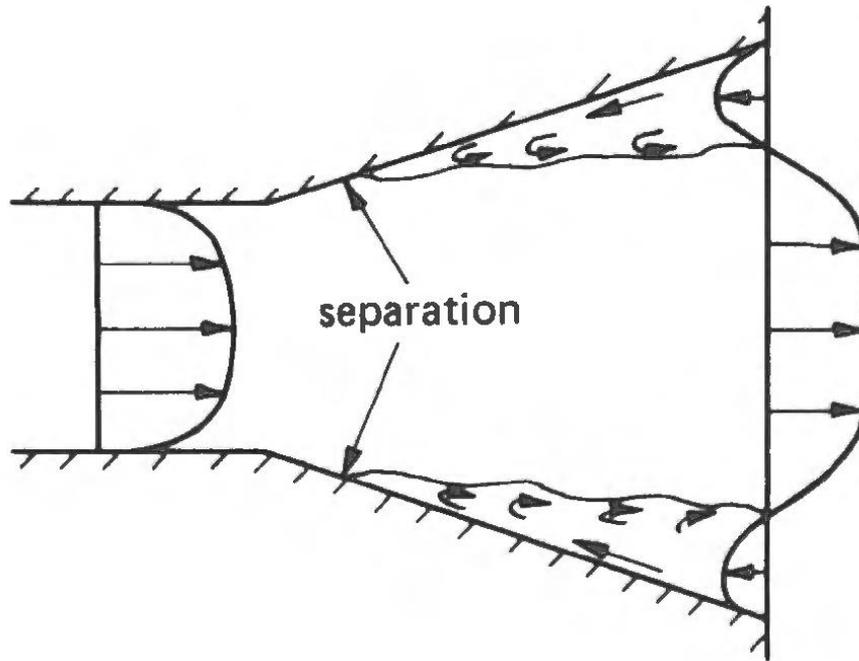


Abbildung 26: Enddiffusor [9, p. 97]

Bei zu kleinem Winkel  $\theta$  wird das Saugrohr zu lang und die Reibungsverluste steigen. Dies kann so weit gehen, dass sie größer werden als der Nutzen der verringerten Ablösungsverluste. In Abbildung 27 ist der Wert  $S$  der beiden Verluste bei einem Winkel von  $2\theta \sim 7^\circ$  am kleinsten. [9]

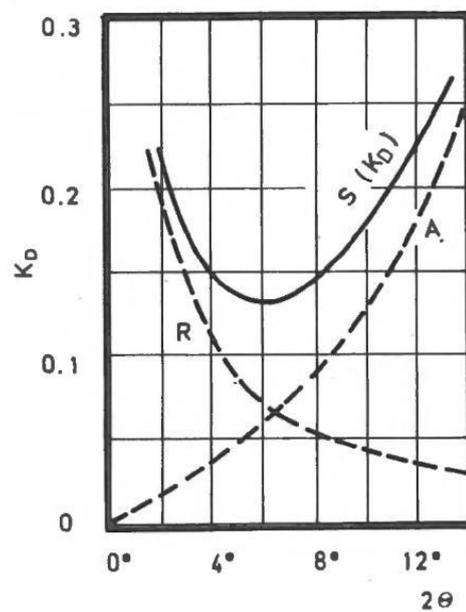


Abbildung 27: Einteilung der Diffusorverluste:  $R$ =Reibungsverluste,  $A$ =Ablösungsverluste,  $S$ =Summenkurve,  $K_D$ =Verlustbeiwert [9, p. 88]

### 4.3 Grobe Bemessung Saugrohr

Für die Bemessung des Saugrohrs werden der Diffusor und Krümmer getrennt betrachtet und es wird von einem Laufraddurchmesser von 0,35m ausgegangen. Durch ihn wird, wie in Kapitel 3.6 beschrieben, eine kavitationsfreie Saughöhe von ~3 m erreicht. Sie werden so dimensioniert, dass sie die Gesamtabmessungen der derzeitigen Komponenten nicht überschreiten.

#### 4.3.1 Krümmerbemessung

Beim Krümmer müssen zwei Versionen ausgelegt werden, da sie sich je nach Turbinenform unterscheiden.

##### Version 1:

Für die vertikalachsige Kaplan-Turbine wird ein rechtwinkliger Krümmer benötigt. Um die Verluste im Krümmer gering zu halten, wird der Radius der Rohrachse mit 1,225 m ausgeführt. Der Abstand von der Turbinenachse bis zum Saugrohraustritt beträgt 8,5 m. Dadurch kann das Rohr nach dem Krümmer noch 1,144 m gerade verlaufen bevor der Querschnitt erweitert wird. Dies sollte eine genügende Beruhigung der Sekundärströmung gewährleisten. Abbildung 28 ist in derselben Ansicht wie Abbildung 8 dargestellt und die Turbine befindet sich an der gleichen Position wie die alte Francis-Turbine.

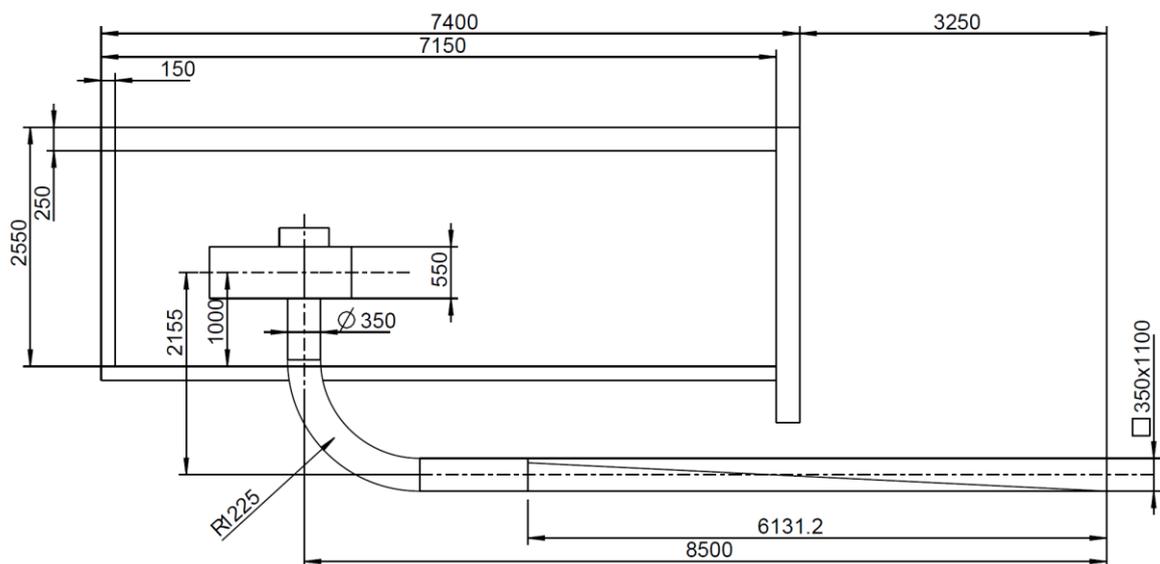


Abbildung 28: vertikalachsige Kaplanmaschine mit Krümmer und Saugrohr

##### Version 2:

Der Doppelkrümmer wird nach der optimalen Form in Abbildung 24 ausgelegt. Dadurch ergeben sich die Krümmerradien von 0,7875 m und 1,225 m (Abbildung 29). Damit er nicht zu lang wird, muss der Krümmungswinkel auf 60° erhöht werden. Das gerade Zwi-

schenstück wird 1,26 m lang ausgeführt, damit der Krümmer die nötige Tiefe für das Saugrohr erreicht. Da der Doppelkrümmer länger als der rechtwinklige ist, kann nur mehr ein 0,35m langes, gerades Rohr zur Strömungsberuhigung eingefügt werden. [9]

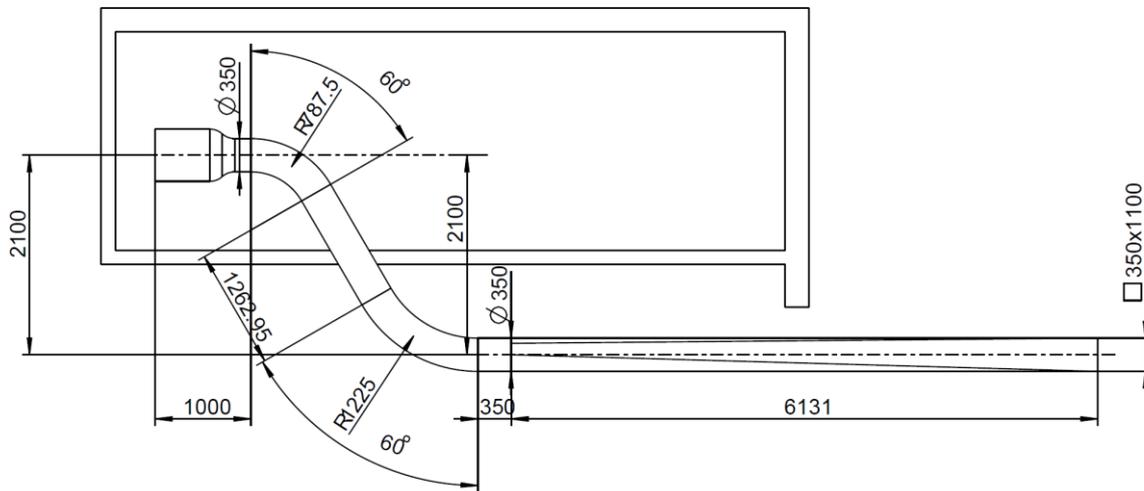


Abbildung 29: S-Rohrturbine mit Doppelkrümmer und Saugrohr

Um die Krümmeverluste zu berechnen wird der Verlustbeiwert  $\zeta_k$  aus Tabelle 4 verwendet und in die Gl. 10 eingesetzt.

Tabelle 4: Verlustbeiwerte  $\zeta_k$  in Abhängigkeit vom Umlenkungswinkel für Kreisrohrkrümmer und Kreisrohrkniestücke [5, p. 250]

|                              | Umlenkungswinkel |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              | 10°              | 20°   | 22,5° | 30°   | 45°   | 60°   | 90°   |
| Kreisrohrkrümmer $P_m/D_R=2$ | --               | 0,030 | 0,450 | 0,060 | 0,090 | 0,120 | 0,140 |
| 3                            | --               | 0,030 | 0,450 | 0,055 | 0,080 | 0,100 | 0,130 |
| 5                            | --               | 0,030 | 0,450 | 0,050 | 0,070 | 0,080 | 0,110 |
| 10                           | --               | 0,030 | 0,450 | 0,050 | 0,070 | 0,070 | 0,110 |
| Kreisrohrkniestücke glatt    | 0,034            | 0,042 | 0,066 | 0,130 | 0,236 | 0,471 | 1,129 |
| rau                          | 0,044            | 0,062 | 0,154 | 0,165 | 0,320 | 0,684 | 1,265 |

$$v_E = \frac{Q}{A_E} = \frac{Q}{\frac{D_3^2 * \pi}{4}} = \frac{0,6 \frac{m^3}{s}}{\frac{(0,35m)^2 * \pi}{4}} = 6,236 \frac{m}{s} \quad \text{Gl. 9}$$

$$h_{v,k1} = \zeta_{k1} * \frac{v_E^2}{2 * g} = 0,13 * \frac{\left(6,236 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,258m \quad \text{Gl. 10}$$

$$h_{v,k2} = \zeta_{k2,1} * \frac{v_E^2}{2 * g} + \zeta_{k2,2} * \frac{v_E^2}{2 * g}$$

$$h_{v,k2} = 0,12 * \frac{\left(6,236 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} + 0,1 * \frac{\left(6,236 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,436m$$

Gl. 11

Durch das 1,26 m lange Zwischenstück beim Doppelkrümmer wird die Sekundärströmung soweit beruhigt, dass sie nicht in den nächsten Krümmer eintritt. Deshalb werden die Verluste beider nur addiert. Der rechtwinklige Krümmer verursacht einen geringeren Fallhöhenverlust als der Doppelkrümmer.

### 4.3.2 Diffusorbemessung

Für Diffusorbemessung wird zuerst der Austrittsquerschnitt bestimmt, bei dem der Bemessungsdurchfluss Q eine Fließgeschwindigkeit zwischen 1 – 2 m/s hat. Es wird ein Flächenverhältnis von  $A_A/A_E=4$  angenommen.

$$v_A = \frac{Q}{A_A} = \frac{Q}{\frac{D_3^2 * \pi}{4} * 4} = \frac{0,6 \frac{m^3}{s}}{\frac{(0,35m)^2 * \pi}{4} * 4} = 1,559 \frac{m}{s}$$

Gl. 12

Mit dem angenommenen Flächenverhältnis liegt die Fließgeschwindigkeit im gewünschten Bereich. Da die Verluste bei einem Winkel von  $2\theta=7^\circ$  am geringsten sind, wird dieser für die Erweiterung des Saugrohrs verwendet. Am Saugrohraustritt beträgt die Wassertiefe 0,6 m. Damit die Druckumwandlung im Rohr funktioniert, muss dieses unter Wasser sein. Deshalb wird der runde Querschnitt  $A_E$  in einen rechteckigen überführt. Die Höhe des Rechtecks bleibt dabei konstant und es wird nur auf  $b_A=1,1$  m verbreitert. Da nun beide Querschnitte und der Öffnungswinkel bekannt sind, kann die Länge des Saugrohrs berechnet werden.

$$L_S = \frac{\frac{b_A}{2} - \frac{D_3}{2}}{\tan \theta} = \frac{\frac{1,1m}{2} - \frac{0,35m}{2}}{\tan 3,5^\circ} = 6,131m$$

Gl. 13

Um den Wirkungsgrad des Diffusors  $\eta_D$  zu berechnen, wird der Druckumsetzungsbeiwert  $c_p$  benötigt. Dieser kann aus Abbildung 30 abgelesen werden und liegt bei ca. 0,75. [9]

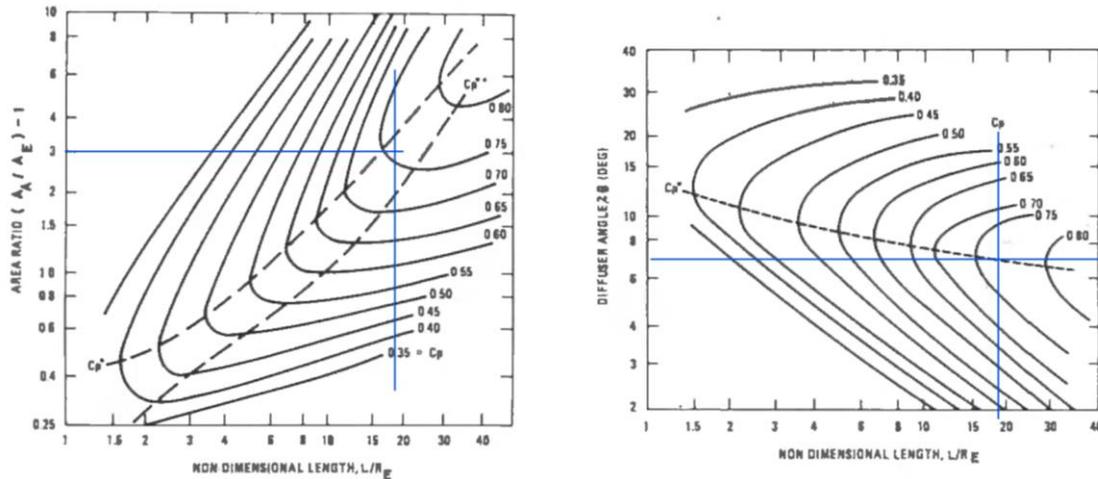
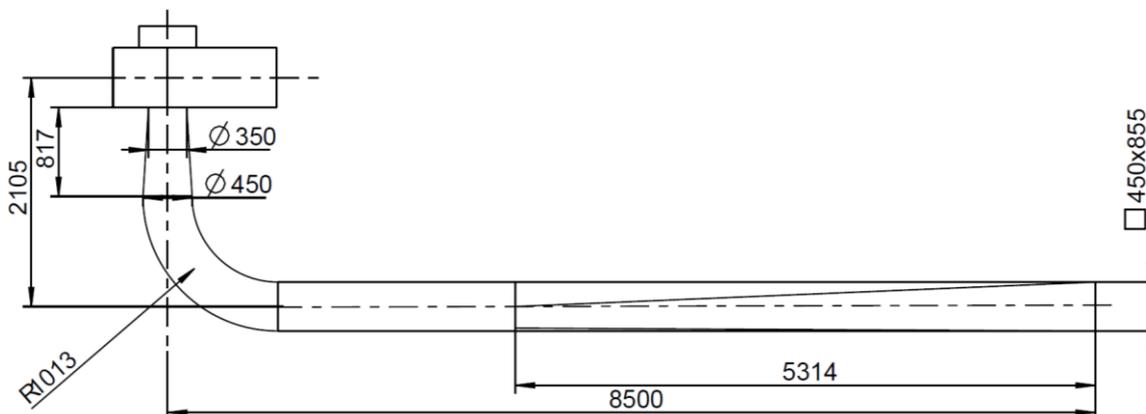


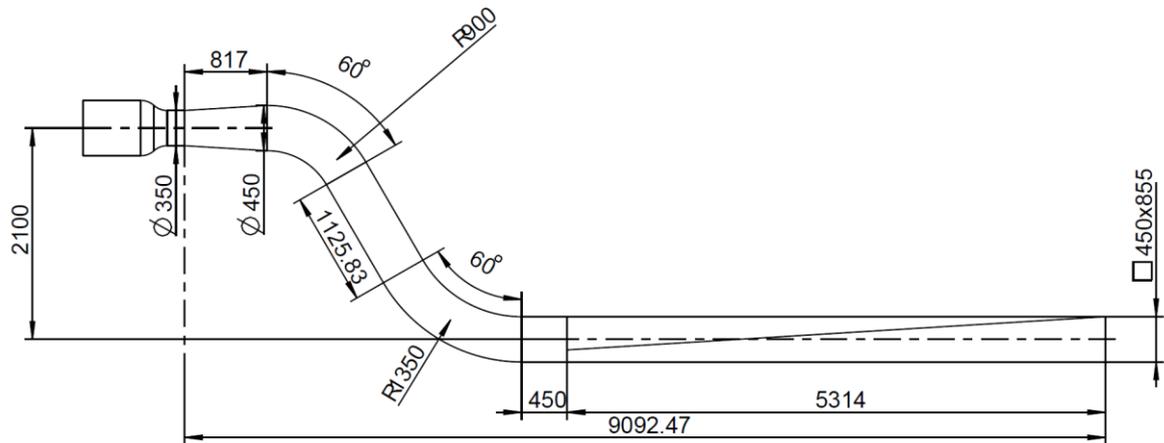
Abbildung 30: Diffusor Kennzahlen [9, p. 96]

$$\eta_D = \frac{c_p}{1 - \left(\frac{A_E}{A_A}\right)^2} = \frac{0,75}{1 - \left(\frac{0,096\text{m}^2}{0,385\text{m}^2}\right)^2} = 0,8 \quad \text{Gl. 14}$$

### 4.3.3 Verbesserungsmöglichkeiten

Die Verluste im Krümmer hängen hauptsächlich von der Fließgeschwindigkeit ab. Wenn sie verringert wird, ergeben sich auch geringere Fallhöhenverluste. Um das zu erreichen, wird der Rohrdurchmesser nach dem Turbinenaustritt auf den Durchmesser  $D_R=0,45\text{ m}$  erweitert. Mit dem Öffnungswinkel von  $2\theta=7^\circ$  ergibt sich durch die Verwendung von Gl. 13 eine Länge von  $0,817\text{ m}$ . Dadurch verringert sich die Fließgeschwindigkeit auf  $3,773\text{ m/s}$ . Bei der S-Rohrturbine verlängert sich das gesamte Rohr um  $0,592\text{ m}$ . Die restliche Ausführung des Krümmers und Saugrohrs kann aus Abbildung 31 entnommen werden. Die Parameter des Diffusors bleibt unverändert, da bei einer Verlängerung die Energiegewinne durch die Reibungsverluste ausgeglichen werden.





**Abbildung 31: Optimierte Krümmen mit Saugrohr**

Durch die Verringerung der Fließgeschwindigkeit ergibt sich bei der vertikalen Kaplan-Turbine ergibt sich ein Krümmerverlust von 0,102 m und bei der S-Rohrturbine 0,16 m.



## 5 Wehranlage

Bei Laufwasserkraftwerken muss das Gewässer meist aufgestaut werden um eine wirtschaftliche Nutzung möglich zu machen. Dafür wird ein Bauwerk errichtet welches meistens quer zur Fließrichtung steht, dieses wird Wehr genannt. Das Wehr übernimmt nicht nur das Aufstauen des Wassers, sondern reguliert auch den Oberwasserspiegel. Im Fall eines Hochwassers muss es im Stande sein die anfallende Wassermenge abzuführen. Wehre werden je nach Aufbau in zwei Gruppen unterteilt. Es gibt feste Wehre (Abbildung 32a), welche die simpelste Möglichkeit sind um Gewässer aufzustauen. Weil sie jedoch fest sind, kann mit ihnen der Wasserstand nicht reguliert werden und deshalb werden sie nur selten verwendet. Heutzutage werden hauptsächlich bewegliche Wehre (Abbildung 32b) verwendet, da mit ihnen der Oberwasserspiegel reguliert werden kann. [3]

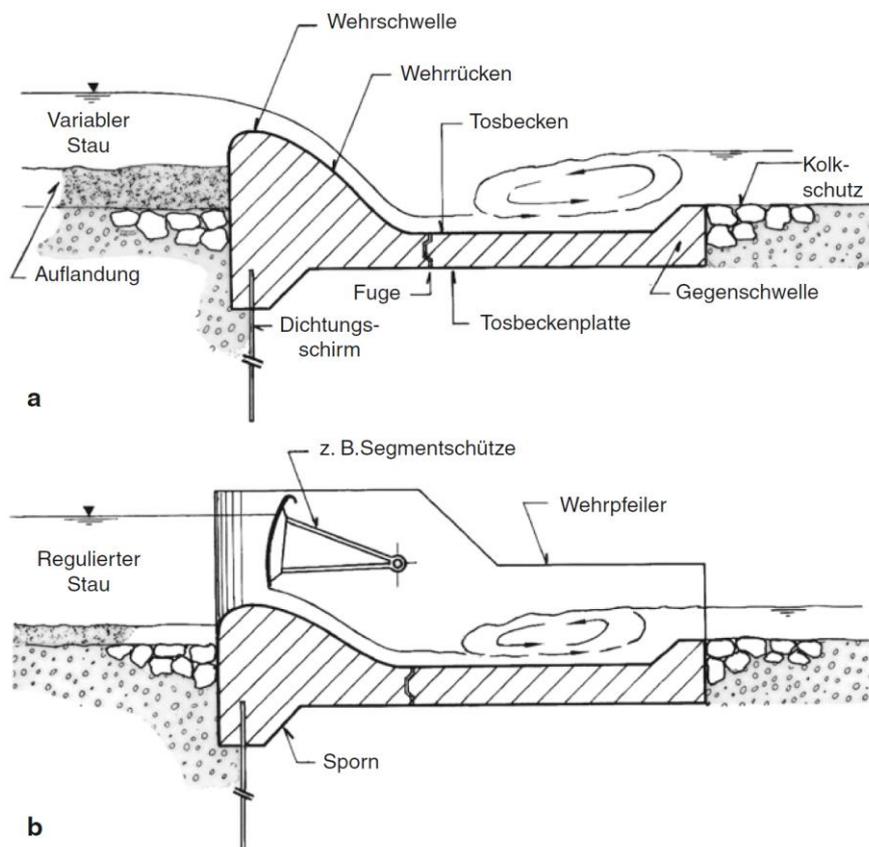


Abbildung 32: Querschnitt durch a ein festes Wehr und b ein bewegliches Wehr [10, p. 122]

## 5.1 Vorhandenes Wehr

Um den Oberwasserspiegel von 994,05 m.ü.A. zu erreichen und zu halten, wird der Doserbach derzeit durch einem Hubschützenwehr mit zwei Schützentafeln aufgestaut. Dieses einfache Wehr wird vor allem bei kleinen Wasserkraftanlagen verwendet. Es besteht aus Holzbrettern welche durch Stahlbänder zusammengehalten werden und in einem U-Profil geführt sind. Die Hauptschützentafel wird durch einen Elektromotor gehoben oder gesenkt. Falls es zu einem Ausfall des Motors kommt kann das Wehr mithilfe einer Handkurbel verstellt werden. Die zweite kleinere Schützentafel kann nur von Hand gehoben werden und dient zum Spülen des Einlaufbereichs. Durch den Druck des aufgestauten Wassers werden die Tafeln gegen die Nutenwand gedrückt, wodurch die Dichtheit gewährleistet wird. In Abbildung 33 ist das bestehende Wehr mit einem geringeren Wasserstand dargestellt und in Abbildung 34 ein Auszug aus dem Detaillageplan der Wasserkraftanlage. [3]



Abbildung 33: Bestehendes Hubschützenwehr

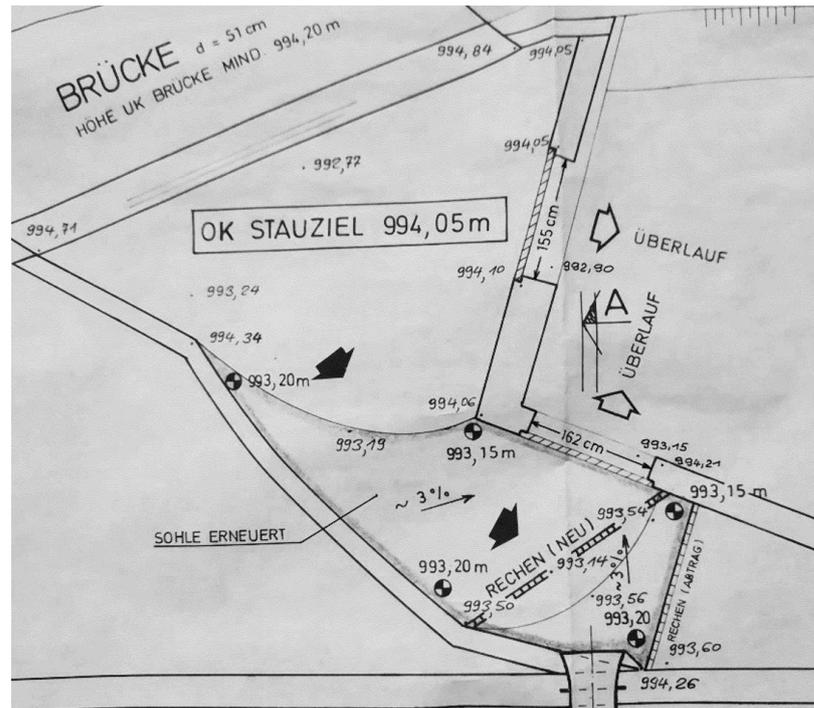


Abbildung 34: Bestehendes Hubschützenwehr; Auszug aus dem Detaillageplan der Wasserkraftanlage

### 5.1.1 Wasserstandregulierung

Die Höhe des Oberwasserstands wird mit einem Schwimmer überwacht. Wenn er unter einen Grenzwert fällt, dann wird das Schütz gesenkt und wenn der Schwimmer den Grenzwert überschreitet wird das Schütz gehoben. Die genauen Ausflusswerte werden in Kapitel 5.1.1.2 bestimmt.



Abbildung 35: Schwimmer zur Wasserstandsregelung

### 5.1.1.1 Benötigter Antrieb

Um den Oberwasserstand zu regulieren, muss die Hauptschützentafel gehoben oder gesenkt werden, wobei bei jeder Verstellung die Gleitreibung zwischen Schützenplatte und Stahlprofil überwunden werden muss. Die Höhe des aufgestauten Wassers vor dem Hub-schützenwehr ist 1,15 m und der Reibungskoeffizient für Gleitreibung  $\mu_{H,S}$  zwischen Holz und Stahl liegt zwischen 0,45 und 0,55. Mit einer Schützenfläche von  $A_S=1,783 \text{ m}^2$  ergibt sich die Reibungskraft  $F_R$  wie folgt: [10]

$$F_R = \mu_{H,S} * \rho * g * \frac{h}{2} * A_S = 0,5 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \frac{1,15\text{m}}{2} * 1,783\text{m}^2 \quad \text{Gl. 15}$$

$$F_R = 5028,729\text{N}$$

Beim Heben der Schützentafel muss auch noch ihr Gewicht von  $\sim 102 \text{ kg}$  berücksichtigt werden.

$$F_{ges} = F_R + F_G = F_R + m * g = 5028,729\text{N} + 102\text{kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 6029,349\text{N} \quad \text{Gl. 16}$$

Nun kann das Drehmoment berechnet werden, welcher benötigt wird um das Schütz zu heben. Zwischen der Zahnstange und dem Elektromotor befindet sich noch ein Schneckenradgetriebe mit einer Übersetzung  $i_{21}$  von 0,1.

$$M_M = M_2 * i_{21} = F_{ges} * r * i_{21} = 6029,349\text{N} * 0,01\text{m} * 0,1 = 6.029\text{Nm} \quad \text{Gl. 17}$$

Dieses Drehmoment kann auch von Hand geschafft werden. Die Spülschützentafel ist kleiner als die Hauptschützentafel und es kann deshalb angenommen werden, dass diese auch von Hand gehoben werden kann.

### 5.1.1.2 Abflussleistung

Der Abfluss von Wasser an einem Wehr wird in zwei Gruppen eingeteilt. Wenn das Oberwasser nicht durch das Unterwasser beeinflusst wird (Abbildung 36), dann spricht man von einem vollkommenen Überfall beziehungsweise Ausfluss. Wenn eine Beeinflussung des Oberwassers durch das Unterwasser stattfindet (Abbildung 37), dann liegt ein unvollkommener Überfall beziehungsweise Ausfluss vor. Am vorhandenen Wehr liegt der vollkommene Ausfluss vor, weshalb auch nur dieser näher betrachtet wird.

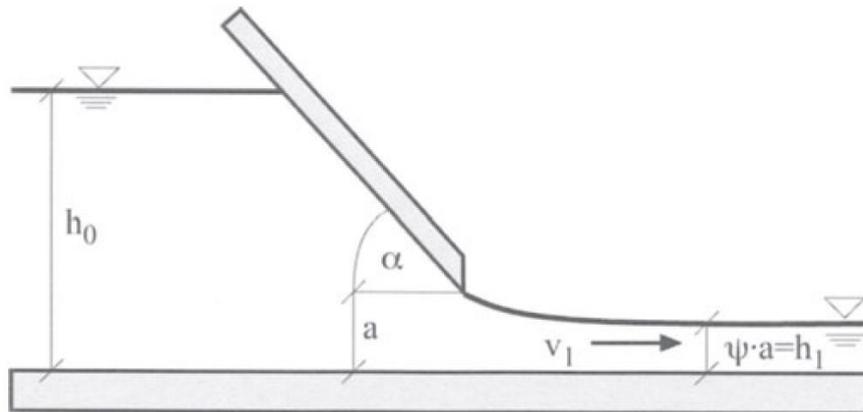


Abbildung 36: Freier Ausfluss an unterströmten Wehren [11, p. 64]

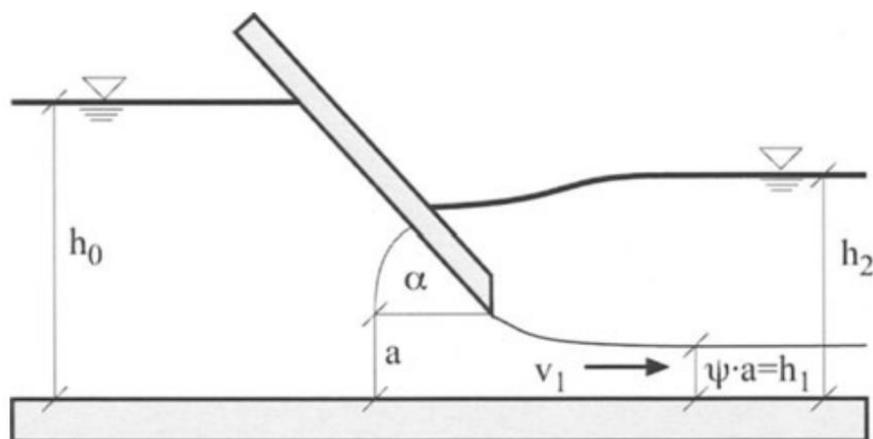


Abbildung 37: Rückgestauter Ausfluss an unterströmten Wehren [11, p. 105]

Wird in Abbildung 36 der Energiesatz auf die Stelle 0 und den engsten Querschnitt angewandt, so kann man den Ausfluss  $Q$  am Wehr ermitteln.

$$Q = a * b * \frac{\psi}{\sqrt{1 + \psi * \frac{a}{h_0}}} * \sqrt{2 * g * h_0} \quad \text{Gl. 18}$$

Der Bruch kann auch durch die Ausflusszahl  $\mu$  ersetzt werden.

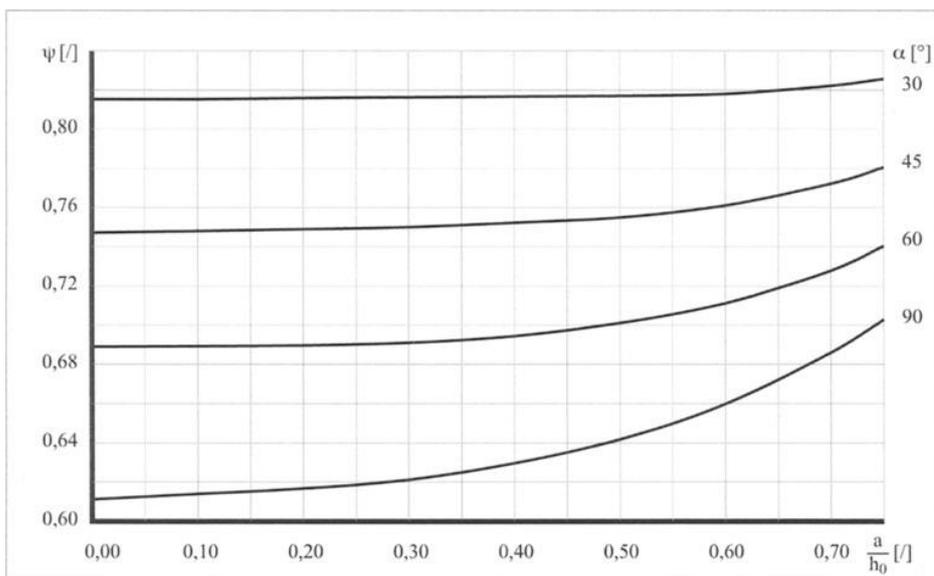
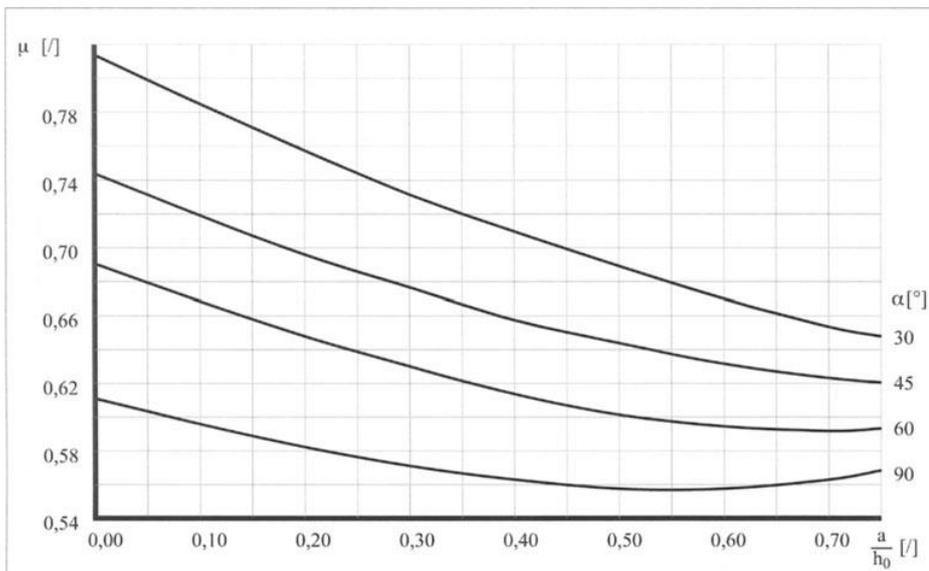
$$\mu = \frac{\psi}{\sqrt{1 + \psi * \frac{a}{h_0}}} \quad Q = a * b * \mu * \sqrt{2 * g * h_0} \quad \text{Gl. 19}$$

Die Einschnürungszahl  $\psi$  und die Ausflusszahl  $\mu$  können anhand der Diagramme in Abbildung 38 bestimmt werden oder es wird die Ausflusszahl mit der Gl. 20 und den Koeffizienten aus Tabelle 5 berechnet.

$$\mu = \frac{a_1 + a_2 * \ln(x) + a_3 * y + a_4 * y^2 + a_5 * y^3}{1 + a_6 * \ln(x) + a_7 * (\ln(x))^2 + a_8 * y + a_9 * y^2} \text{ mit } x = \frac{h_0}{a} \text{ und } y = a \quad \text{Gl. 20}$$

**Tabelle 5: Koeffizienten für die Berechnung der Ausflusszahl  $\mu$**

|               |                   |                |
|---------------|-------------------|----------------|
| a1=0,7341169  | a2=-0,04261387    | a3=-0,01410859 |
| a4=0,00016111 | a5=-0,00000040072 | a6=-0,18920573 |
| a7=0,02434395 | a8=-0,01236335    | a9=0,00012978  |



**Abbildung 38: Ausflusszahl  $\mu$  und Einschnürungszahl  $\psi$  an unterströmten Wehren [11, p. 67]**

Die Ausflusszahl gilt nur für die dazugehörige Oberwasserhöhe  $h_0$  und Schützenhebung  $a$ , dadurch ergibt sich für jede Schützenstellung ein anderes  $\mu$ . Das Diagramm in Abbildung 39 zeigt den Ausfluss  $Q$  wenn die Hauptschützentafel gehoben wird und der Oberwasserspiegel konstant bleibt. Die verwendete Formel ist gültig bei einem Schützenwinkel  $\alpha$  zwischen  $15^\circ$  und  $90^\circ$  und bis zu einem maximalen Verhältnis zwischen  $h_0/a$  von 1,33, was bei dem vorhandenen Wehr einer Schützenhebung von 0,865m entspricht. [11]

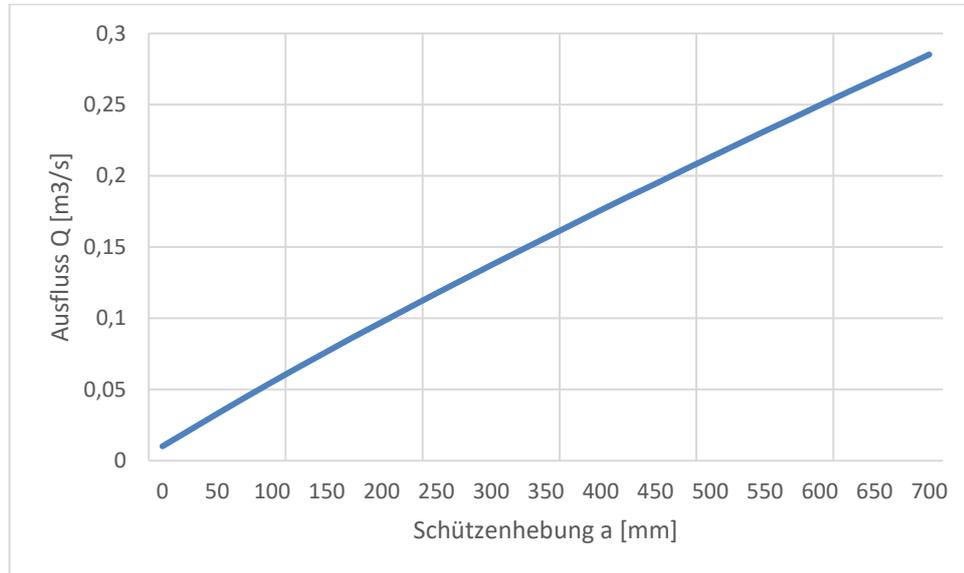


Abbildung 39: Ausfluss bei unterschiedlicher Schützenhebung und konstantem Oberwasser

### 5.1.2 Hochwasserabfuhr

Das Wehr muss in der Lage sein, dass in Kapitel 2.3.2 bestimmte hundertjährige Hochwasser  $HQ_{100}$  abzuführen. Hier bietet sich die empirische Fließformel nach Manning-Strickler (Gl. 22) an. Mit ihr kann die mögliche Fließgeschwindigkeit durch den freigegebenen Schützenquerschnitt berechnet werden. Dafür muss zuerst der hydraulische Radius  $R_h$  und der Strickler-Beiwert  $k_{St}$  bestimmt werden. Der hydraulische Radius ist der Quotient aus der Querschnittsfläche  $A$  und dem benetzten Umfang  $U$ . Dieser wird für beide Schützentafeln berechnet, wobei der Index H für das Hauptschütz und S für das Spülschütz steht.

$$R_{hH} = \frac{A_H}{U_H} = \frac{1,55m \cdot 1,15m}{2 \cdot 1,15m + 1,55m} = 0,463m$$

Gl. 21

$$R_{hS} = \frac{A_S}{U_S} = \frac{1,62m \cdot 0,9m}{2 \cdot 0,9m + 1,62m} = 0,426m$$

Der Strickler-Beiwert wird anhand der Beschaffenheit des Bachbettes ausgewählt. Es wird ein Wert von  $28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  für Wildbäche mit grobem Geröll (kopfgroße Steine) bei ruhendem Geschiebe angenommen. Das Gefälle des Doserbachs im Abschnitt vor dem Wehr be-

trägt ca. 4%. Damit können die Fließgeschwindigkeiten durch die Schützenfelder berechnet werden.

$$v_H = k_{St} * R_{hH}^{\frac{2}{3}} * I_o^{\frac{1}{2}} = 28 \frac{m^{\frac{1}{3}}}{s} * (0,463m)^{\frac{2}{3}} * 0,04^{\frac{1}{2}} = 3,352 \frac{m}{s}$$

**Gl. 22**

$$v_S = k_{St} * R_{hS}^{\frac{2}{3}} * I_o^{\frac{1}{2}} = 28 \frac{m^{\frac{1}{3}}}{s} * (0,426m)^{\frac{2}{3}} * 0,04^{\frac{1}{2}} = 3,171 \frac{m}{s}$$

Nun muss nur mehr der Durchfluss Q mit der Kontinuitätsgleichung berechnet werden.

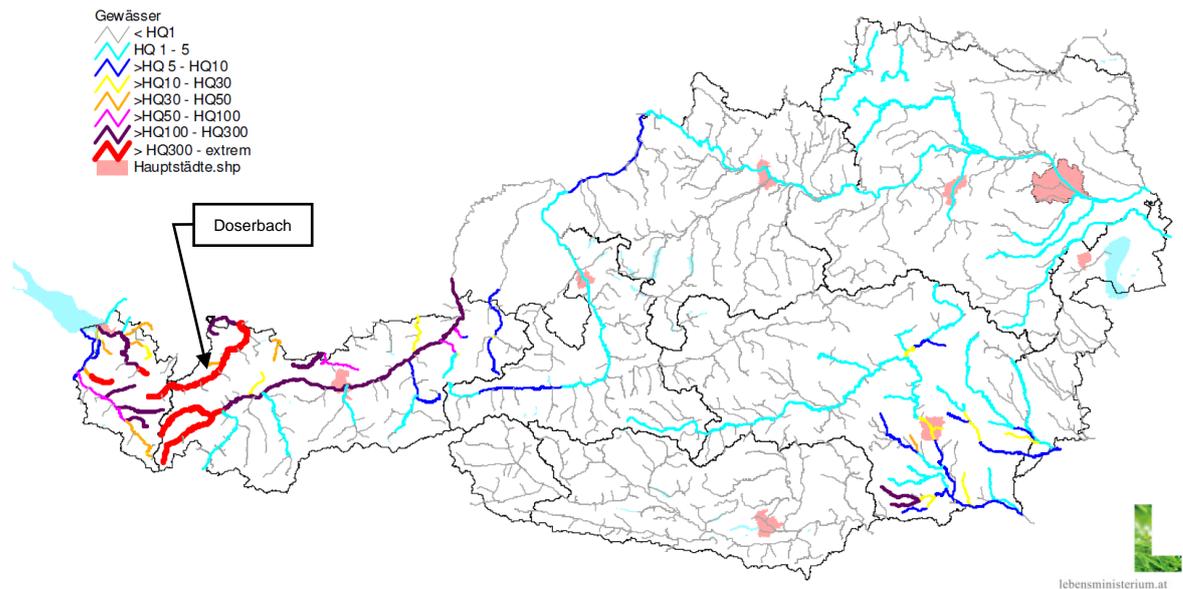
$$Q_H = v_H * A_H = 3,352 \frac{m}{s} * 1,55m * 1,15m = 5,975 \frac{m^3}{s} = 5975 \frac{l}{s}$$

**Gl. 23**

$$Q_S = v_S * A_S = 3,171 \frac{m}{s} * 1,62m * 0,9m = 4,623 \frac{m^3}{s} = 4623 \frac{l}{s}$$

Hinzu kommen noch die 140 l/s die über die Fischtreppe abfließen. Da die Turbine im Hochwasserfall nicht in Betrieb ist, um Beschädigungen zu vermeiden, darf der sonst entnommene Ausbaudurchfluss nicht miteinbezogen werden. Somit kann das Wehr einen Durchfluss von 10738 l/s bewältigen und hat eine ausreichende Sicherheit gegenüber dem HQ<sub>100</sub>. [12]

Es wird auch noch angemerkt, dass das bestehende Wehr höchstwahrscheinlich schon einem größeren Hochwasser als dem angegebenen HQ<sub>100</sub> standgehalten hat. Nämlich dem Alpenhochwasser vom 20. bis 25. August 2005. Bei diesem Hochwasserereignis wurde an den meisten Messstellen im Bezirk Reutte, welche nicht ausfielen, die höchsten Werte seit Beginn der regelmäßigen Beobachtung aufgezeichnet. Die meisten Messwerte übertrafen die jeweiligen HQ<sub>100</sub>. Leider ist die Messstelle am Doserbach, wahrscheinlich durch die Wassermassen, ausgefallen. In Abbildung 40 ist eine Übersicht der Betroffenen Gewässer, in welcher die ungefähre Position des Doserbachs eingezeichnet ist. [13]



**Abbildung 40: Übersicht der betroffenen Gewässer mit Einschätzung des Wiederkehrintervalls [13, p. 25]**

## 5.2 Tosbecken

Nach dem Wehr folgt in der Regel das Tosbecken. Es hat die Aufgabe die potentielle und kinetische Energie des durchströmenden Wassers in Wärmeenergie umzuwandeln. Dies geschieht durch Verwirbelung (Deckwalze in Abbildung 41) und wird Dissipation genannt. Diese Umwandlung ist notwendig um Erosionsschäden am Bachbett durch die erhöhte Fließgeschwindigkeit nach dem Wehr zu verhindern. Derzeit gibt es noch kein Tosbecken. [3]

### 5.2.1 Tosbeckenbemessung

Die Dimension des Tosbeckens kann nur auf einen bestimmten Durchfluss ideal ausgelegt werden. Bei einem anderen Durchfluss erfolgt keine optimale Energieumwandlung. Durch den Einbau von Störkörpern oder Strahlteilern kann der wirksame Bereich vergrößert werden. Als Bemessungsdurchfluss wird auch beim Tosbecken das hundertjährige Hochwasser verwendet. In Abbildung 41 ist die Skizze eines Tosbeckens mit Tosbecken-eintiefung und Endschwelle dargestellt.

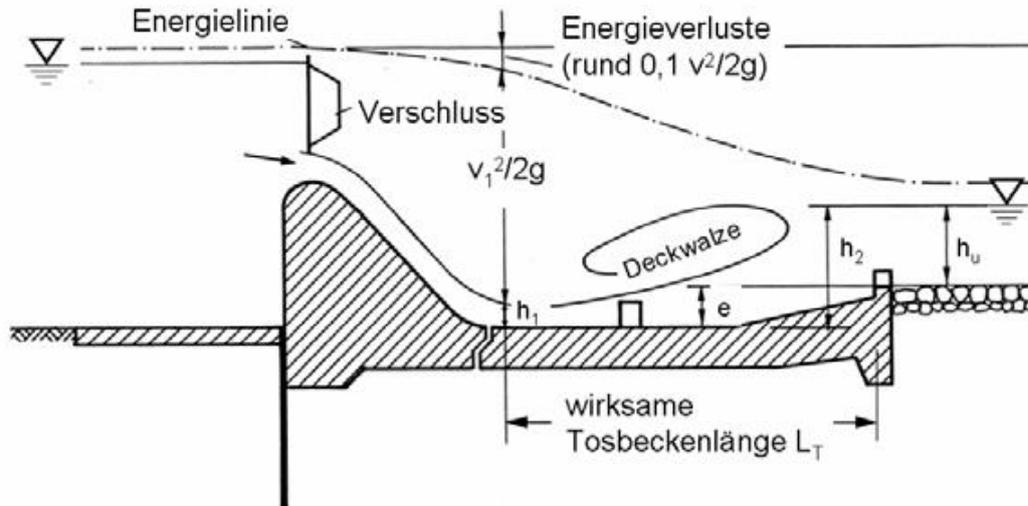


Abbildung 41: Angaben zur Tosbeckenbemessung [3, p. 164]

Das Becken sollte so gestaltet werden, dass die Deckwalze sich im Tosbecken bildet und nicht Flussauf oder Flussabwärts wandert. Dies wird in der Regel erreicht, wenn die Froude-Zahl  $Fr_1$  an Punkt 1 zwischen 4 und 8 liegt und der Einstauchgrad  $\varepsilon$  zwischen 1,05 und 1,25. [3]

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot h_1}} \quad \varepsilon = \frac{h_1 + e}{h_2} \quad \text{Gl. 24}$$

Die genaue Ausbildung des Tosbeckens kann nur mit einem Modelversuch oder durch numerische Simulation bestimmt werden.

### 5.3 Einlaufbereich und Wasserentnahme

Der Einlaufbereich und die Wasserentnahme wurden schon im Forschungsmodul genau betrachtet. Es werden hier nur nochmal die wichtigsten Punkte angeführt. Die ermittelten Verbesserungsvorschläge werden in Kapitel 5.4 näher beschrieben.

Die Aufgabe des Einlaufbereichs ist die möglichst turbulenz- und geschiebearme Zufuhr von Wasser zur Wasserentnahme. Die Entnahme ist so ausgebildet, dass die Einlaufverluste möglichst gering sind. Außerdem ist in ihr ein Rechen der verhindert, dass Feststoffe in den Turbinenzulauf und zur Turbine gelangen können. [5]

Der verbaute Rechen hat eine Breite von 2 m und eine Höhe von 1,05 m und besteht aus 110 vertikalen und einem horizontalen Rechenstab. Die Rechenstäbe sind rechteckig und haben eine Breite von 3 mm und einen Abstand von 15 mm. Der Winkel des gesamten Rechens  $\alpha$  beträgt  $90^\circ$ . In Abbildung 42 ist die Schemaskizze einer Wasserentnahme mit Einlaufrechen dargestellt.

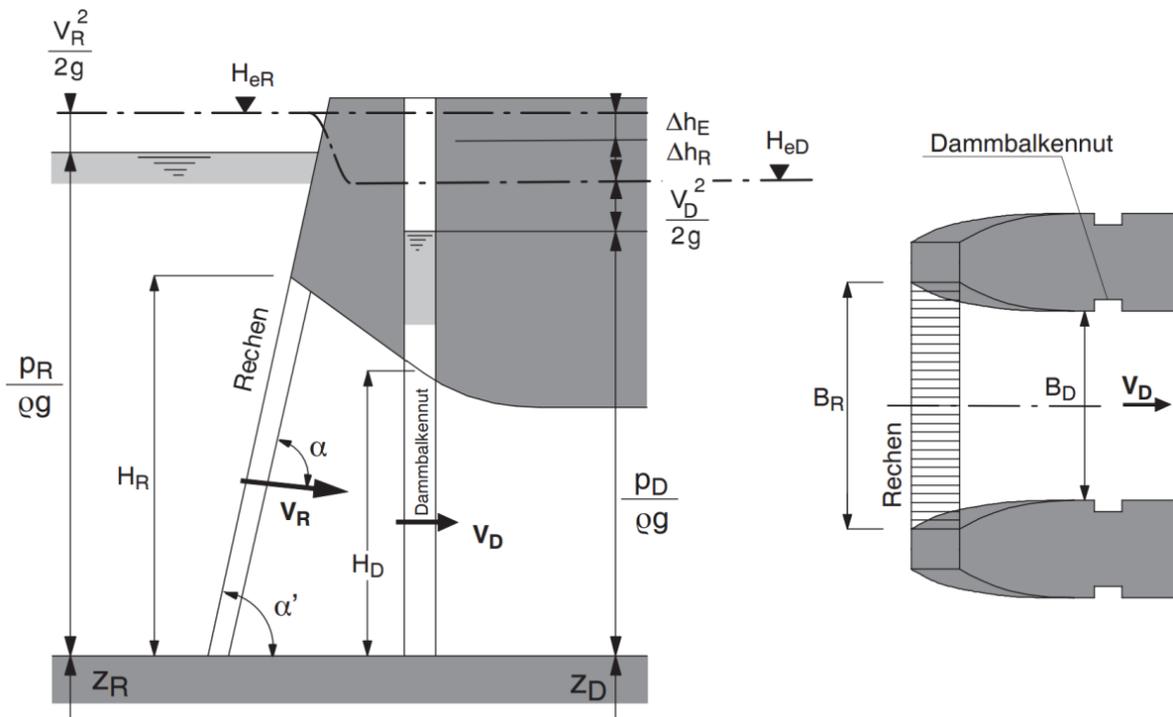


Abbildung 42: Schemaskizze einer möglichen Einlaufrechengeometrie [14, p. 170]

Der Rechen ist ein notwendiger Störkörper, welcher auch Leistungsverluste verursacht. Deshalb ist seine Dimensionierung immer eine Gradwanderung zwischen Schutzfunktion und geringen Verlusten. Die Rechenverluste für den bestehenden Rechen wurden schon im Forschungsmodul genau berechnet. Dabei stellte sich heraus, dass ein Großteil der Verluste von der Einlaufgeometrie des Turbineneinlaufs und nicht von dem Einlaufrechen kommen. [14]

## 5.4 Verbesserungen an der Wehranlage

Es werden nun die einzelnen Verluste der Verbesserungsmaßnahmen berechnet und dann in Tabelle 6 mit dem derzeitigen Stand verglichen.

### 5.4.1 Turbineneinlauf

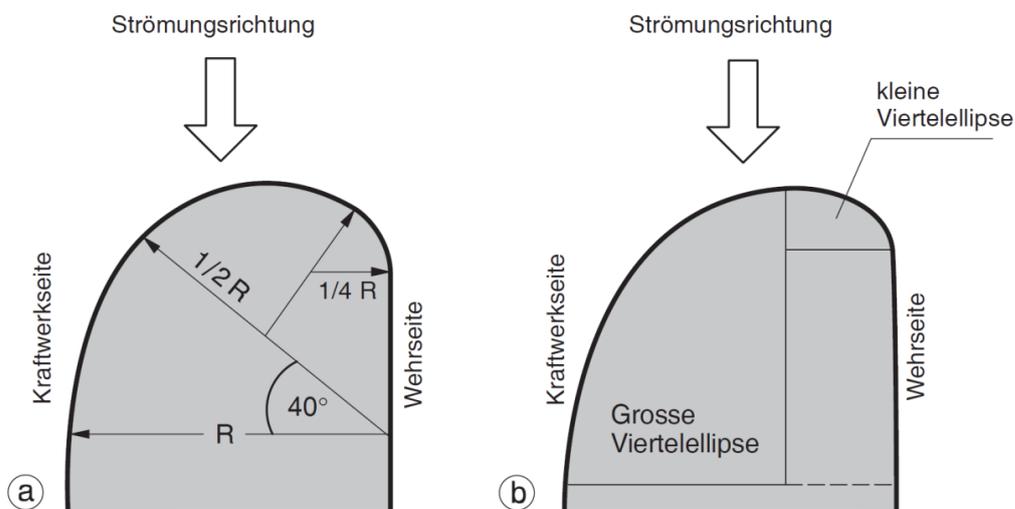
Um die hohen Einlaufverluste zu verringern, wird der Durchmesser des Turbineneinlaufs vergrößert und somit die Einlaufgeschwindigkeit des Wassers reduziert. Durch die Kontinuitätsgleichung kann die Fließgeschwindigkeit bei einem Rohrdurchmesser von 0,7 m berechnet werden.

$$v_R = \frac{Q}{A_R} = \frac{0,6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{0,7^2 * \pi}{4}} = 1,559 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Gl. 25

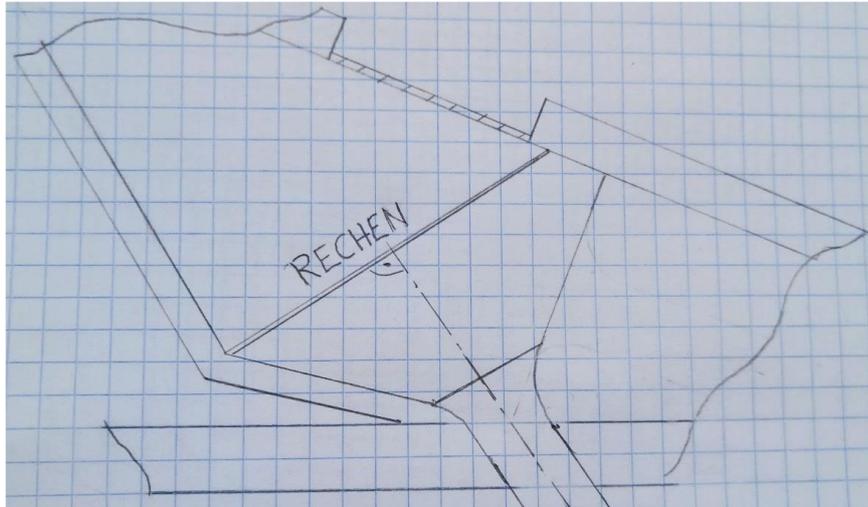
Wenn der Übergang in den Turbineneinlauf auch noch geometrisch verändert wird, dann können die Verluste noch weiter reduziert werden. Die verlustärmste Form wäre dabei eine Ellipse ( $\zeta_e=0,1$ ) nach Abbildung 43. Damit können die Verluste um ~80% verringert werden. Falls diese komplexe Form nicht möglich ist, sollt ein möglichst großer Radius verwendet werden.

$$h_{v,e} = \zeta_e * \frac{v_R^2}{2 * g} = 0,1 * \frac{\left(1,559 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,012m \quad \text{Gl. 26}$$



**Abbildung 43: a) Trennpfeilerform nach Wittmann & Gabrecht (1954); b) Trennpfeilerform nach Rouvé (1958) [14, p. 39]**

Durch eine Positionsveränderung des Turbineneinlaufs kann eine günstigere Anströmung erreicht werden. Wie in Abbildung 44 sollte die Rohrachse im rechten Winkel zum Einlauf stehen, da sich die Strömung nach diesem richtet. Dadurch verringert sich auch der Krümmungswinkel von 90° auf 60°, wodurch die Krümmerverluste sinken. Das Krümmungsverhältnis  $P_m/D$  wird auch noch von 1,5 auf 3 erhöht. Damit ergibt sich der neue Krümmerverlust von 12,4 mm. Diese Werte wurden auf die gleiche Weise wie in Kapitel 4.3.1 berechnet.



**Abbildung 44: Skizze des neu positionierten Turbineneinlaufs**

Im Rohr zur Turbine entstehen noch Reibungsverluste. Diese hängen hauptsächlich von der Oberflächenrauheit und der Fließgeschwindigkeit ab. Um diese sogenannten Rohrverluste  $h_{v,r}$  zu bestimmen benötigt man den Reibungsbeiwert  $\lambda$ , den Durchfluss  $Q$ , die Länge des Rohrs  $L$  und seinen Durchmesser  $D_R$ . Der Reibungsbeiwert kann aus dem Diagramm in Abbildung 45 abgelesen werden. Dafür muss die dimensionslose Reynolds-Zahl  $Re$ , welche das Verhältnis von Trägheits- zur Zähigkeitskraft wiedergibt, bestimmt werden und die äquivalente Rauheit  $k$  aus einer Tabelle entnommen werden.

$$Re = \frac{v_R * D_R}{\nu} = \frac{1,559 \frac{m}{s} * 0,7m}{1,3 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = (1,068 * 10^6) 8,395 * 10^5 \quad \text{Gl. 27}$$

Die kinematische Viskosität  $\nu$  von Wasser beträgt bei 10°C  $1,3 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Für die Rauheit wird der Wert für neue, geschweißte Rohre  $k=0,1 \text{ mm}$  verwendet.

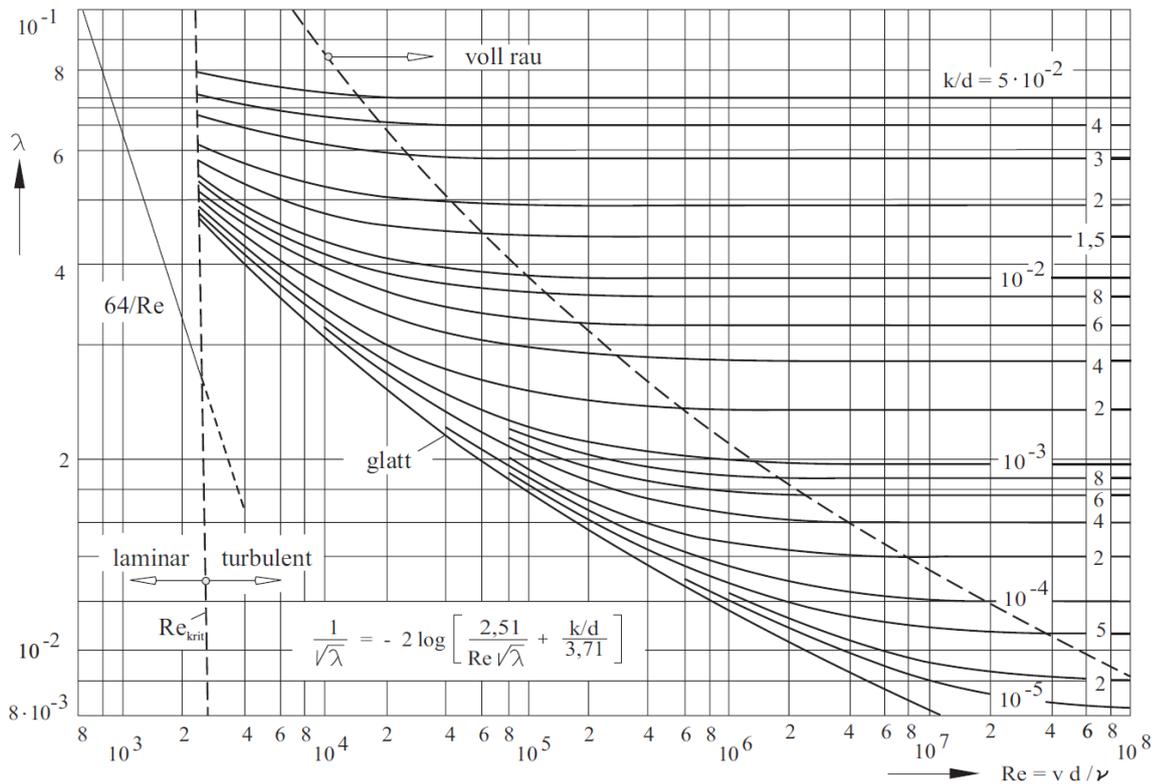


Abbildung 45:  $\lambda$ -Re-Diagramm nach Nikuradse-Moody [5, p. 249]

Damit wird ein Reibungsbeiwert von  $\lambda = 1,4 \cdot 10^{-2}$  abgelesen. Jetzt können die Rohrverluste berechnet werden. [5]

$$h_{v,r} = \frac{8 * \lambda * L * Q^2}{g * \pi^2 * D_R^5} = \frac{8 * 1,4 * 10^{-2} * 8,5m * \left(0,6 \frac{m^3}{s}\right)^2}{9,81 \frac{m}{s^2} * \pi^2 * (0,7m)^5} = 0,021m \quad \text{Gl. 28}$$

Die Rohrverluste des Saugrohrs sind bereits in seinem Wirkungsgrad berücksichtigt, deshalb werden hier nur die Verluste des Rohrs zur Turbine berechnet.

### 5.4.2 Revisionsverschluss

Es fehlt derzeit noch ein oberwasserseitiger Revisionsverschluss um Instandhaltungsarbeiten am Einlaufbereich und Rechen durchzuführen. Die einfachste und günstigste Möglichkeit ist ein Verschluss mit Dammbalken. Dafür müssen nur zwei Nuten erstellt werden in welchen die Balken eingelegt werden können. Die vorgeschlagene Position der Dammbalkennuten ist in Abbildung 46 gekennzeichnet. Damit sich keine Wirbel in den Nuten bilden, sollten sie im Normalbetrieb abgedeckt werden. [5]



Abbildung 46: vorgeschlagene Position für die Dammbalkennuten

### 5.4.3 Einlaufrechen

Der vorhandene Einlaufrechen verursacht nur geringe Fallhöhenverluste. Dies liegt hauptsächlich an dem großen Einlaufquerschnitt und der daraus resultierenden geringen Fließgeschwindigkeit des Wassers. Die einfachste Möglichkeit um die Verluste noch weiter zu reduzieren wäre ein anderes Stabprofil. Die Eignung der unterschiedlichen Stabprofile wurde schon im Forschungsmodul ausführlich untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass nur ein abgerundetes Stabprofil den geforderten Schutz und geringere Verluste gewährleisten kann. Da der Unterschied zwischen rechteckigem und abgerundetem Stabprofil sehr gering ist, sollte nur bei einem kompletten Austausch des Rechens das Profil verändert werden. Es besteht keine Notwendigkeit diesen sofort zu tauschen. [14]

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Verluste zwischen derzeitigem Stand und den vorgeschlagenen Verbesserungen

|                                    | Derzeitiger Stand | Verbesserungen |
|------------------------------------|-------------------|----------------|
| Einlaufverluste $h_{v,e}$ [mm]     | 162               | 12             |
| Rohrverluste $h_{v,rges}$ [mm]     | 48,7 + 113        | 12,4 + 21      |
| Rechenverluste $h_{v,rechen}$ [mm] | 4,781             | 3,298          |
| Gesamter Fallhöhenverlust [mm]     | 328,481           | 48,698         |

#### **5.4.4 Tosbecken**

Obwohl das Tosbecken keinen wirtschaftlichen Nutzen hat, wird es als sinnvoll erachtet eines zu errichten. Es würde der Erosion im Bachbett nach dem Wehr entgegenwirken und für eine natürlichere Gewässersohle sorgen. Bei einer Sanierung der Wehranlage sollte auch ein Tosbecken errichtet werden. Die Bauarbeiten dafür sollten in den wasserarmen Monaten durchgeführt werden.

## 6 Leistung des Wasserkraftwerks

Die theoretische, maximale Leistung des Wasserkraftwerks hängt von dem Durchfluss und der zur Verfügung stehenden Fallhöhe ab.

$$P_{theo} = Q * g * h_f = 0,6 \frac{m^3}{s} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 2,3m = 13,538KW \quad \text{Gl. 29}$$

Da bei den verschiedenen Komponenten der Anlage Verluste auftreten, kann dieser Wert nie erreicht werden. Für eine realistische Einschätzung der möglichen Leistung müssen die Wirkungsgrade und Verluste mit einbezogen werden. Dabei werden manche Verluste direkt von der Fallhöhe abgezogen, weshalb man auch von Brutto und Nettofallhöhe spricht. Die anderen Verluste werden mit dem Wirkungsgrad beschrieben.

$$\eta_{ges} = \eta_T * \eta_G * \eta_D = 0,9 * 0,96 * 0,8 = 0,69 \quad \text{Gl. 30}$$

Wegen der unterschiedlichen Verluste zwischen der vertikalen Kaplan-Turbine und der S-Rohrturbine, werden zwei Nettofallhöhen berechnet.

$$h_{f,N1} = h_f - (h_{v,k1} + h_{v,e} + h_{v,r,ges} + h_{v,rechen}) \quad \text{Gl. 31}$$

$$h_{f,N1} = 2,3m - (0,102m + 0,012m + 0,0334m + 0,0033m) = 2,149m$$

$$h_{f,N2} = h_f - (h_{v,k2} + h_{v,e} + h_{v,r,ges} + h_{v,rechen}) \quad \text{Gl. 32}$$

$$h_{f,N2} = 2,3m - (0,16m + 0,012m + 0,0334m + 0,0033m) = 2,091m$$

Um nun die reelle Leistung zu berechnen wird die Gl. 29 mit dem Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges}$  erweitert und es wird die Nettofallhöhe eingesetzt. [5]

$$P_1 = Q * g * h_{f,N1} * \eta_{ges} = 0,6 \frac{m^3}{s} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 2,149m * 0,69 = 8,728kW \quad \text{Gl. 33}$$

$$P_2 = Q * g * h_{f,N2} * \eta_{ges} = 0,6 \frac{m^3}{s} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 2,091m * 0,69 = 8,492kW \quad \text{Gl. 34}$$

## 6.1 Jahresarbeitsvermögen

Die über ein Jahr produzierte Energiemenge wird mit dem Jahresarbeitsvermögen ausgedrückt. Dafür werden die Abflussdaten des Durchschnittsjahres, wie es in Abbildung 5 dargestellt ist, verwendet. Dabei sinkt der Wirkungsgrad der Turbine mit der Beaufschlagung, während die Fallhöhe konstant bleibt. Somit ergibt sich ein Jahresarbeitsvermögen von 46628 kWh für die vertikale Kaplan-Turbine und 45370 kWh für die S-Rohrturbine. Der durchschnittliche Jahresverbrauch des Mehrfamilienhauses liegt bei ca. 25000 kWh, was einem täglichen Verbrauch von 68,5 kWh entspricht.

## 6.2 Einsparungen

Die größten Einsparungen durch die verbesserte Wasserkraftanlage ergeben sich durch den Strom, welcher selbst produziert und verbraucht wird und nicht vom Stromanbieter zugekauft werden muss. Um die Einsparungen nicht zu verfälschen wird nicht der aktuelle Strompreis verwendet, sondern der Durchschnittspreis der letzten 5 Jahre. Somit ergibt sich ein Preis von 18,34 Ct/kWh. Da der Jahresverbrauch unter dem Jahresarbeitsvermögen der Turbine liegt, wird der überschüssige Strom verkauft. Für den Verkaufspreis wird ebenfalls der Durchschnittswert der letzten 5 Jahre verwendet. Laut [15] ergibt sich dann ein Verkaufspreis von 11,84 Ct/kWh gemäß § 41 des Ökostromgesetzes 2012.

In den Wintermonaten steigt der Stromverbrauch durch die Heizung an und gleichzeitig sinkt die Stromproduktion durch den geringeren Durchfluss. Deshalb kann im Winter nicht an allen Tagen der Stromverbrauch durch die Turbine gedeckt werden. Es wird davon ausgegangen, dass der Tagesverbrauch im Winter um den Faktor 1,5 höher ist als der Durchschnitt. Bei einem Jahr mit durchschnittlichem Winter (~100 Kältetagen) können somit ~72% des Jahresverbrauchs mit dem produzierten Strom gedeckt werden. Die restlichen 28% werden aus dem Stromnetz entnommen und deshalb nicht berücksichtigt. Somit ergeben sich die jährlichen Einsparungen  $E$  der verbesserten Anlage laut Gl. 35.

$$E_1 = 25000kWh * 0,1834 \frac{\text{€}}{kWh} * 0,72 + (46628 - 25000 * 0,72) * 0,1184 \frac{\text{€}}{kWh}$$

$$E_1 = 6690,76\text{€}$$

**Gl. 35**

$$E_2 = 25000kWh * 0,1834 \frac{\text{€}}{kWh} * 0,72 + (45370 - 25000 * 0,72) * 0,1184 \frac{\text{€}}{kWh}$$

$$E_2 = 6541,81\text{€}$$

### 6.2.1 Förderung

Die Anlage ist laut dem Bundesrecht „Rechtsvorschrift für Ökostromgesetz 2012“ eine Ökostromanlage und wird deshalb bei einer Revitalisierung gefördert. Dabei gelten für Kleinwasserkraftanlagen bis zu 50 kW vereinfachte Voraussetzungen. Bei dem Nachweis über den Umbau der Anlage durch einen technischen Sachverständigen, wird ein Investitionszuschuss von 1500 €/kW ausgeschüttet.

$$F_1 = P_1 * 1500 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 8,728 \text{kW} * 1500 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 13092 \text{€}$$

**Gl. 36**

$$F_2 = P_2 * 1500 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 8,492 \text{kW} * 1500 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 12738 \text{€}$$

Es ergibt sich eine einmalige Fördersumme F von 13092 € beziehungsweise 12738 € für die Anlage.



## 7 Ergebnisdiskussion

Es wurden die wichtigsten Komponenten dieses Wasserkraftwerks beleuchtet. Dabei wird der Austausch der bestehenden Turbine durch eine Kaplan-Turbine als am sinnvollsten bewertet. Durch die Auswahl dieses Turbinentyps wird auch eine Überarbeitung des Saugrohres notwendig. Somit wären diese Komponenten für den Großteil der Kosten verantwortlich. Die Änderungen an der Wasserentnahme und am Turbineneinlauf fallen dagegen nicht so aufwendig aus. Die Auslegung der Anlage wurde für zwei unterschiedliche Versionen einer Kaplan-Turbine durchgeführt, wobei aber nur geringe Leistungsunterschiede festgestellt wurden.

Es wurde in allen Bereichen versucht die Verluste zu minimieren und den Wirkungsgrad zu erhöhen. Dabei konnte an den meisten Stellen eine Optimierung erreicht werden. Vor allem am Turbineneinlauf konnte nur durch wenige Veränderungen eine Verbesserung von 85% erreicht werden. Hingegen wurde beim Saugrohr selbst nach mehrmaliger Optimierung und Überarbeitung der Wirkungsgrad nicht auf mehr als 80% gesteigert. Somit ist das Saugrohr hauptverantwortlich für den geringen Gesamtwirkungsgrad der Anlage. Bei einem tatsächlichen Umbau sollte ein besonderes Augenmerk auf dieses gelegt werden. Eine noch weitere Erhöhung des Wirkungsgrades könnte nur durch Modelversuche oder Simulationen erreicht werden.

In Tabelle 7 sind die einzelnen Verbesserungen und deren Wirkungsgradsteigerung angeführt. Der Gesamtwirkungsgrad von Turbine, Saugrohr und Generator wurde durch die derzeitige Maximalleistung von 5 kW zurückgerechnet. Die Werte in Klammern sind für die S-Rohrturbine.

**Tabelle 7: Einfluss der Verbesserungen**

| Änderung                           | Ist-Zustand | Verbessert             | Leistungssteigerung [%] |
|------------------------------------|-------------|------------------------|-------------------------|
| Einlauf [mm]                       | 162         | 12                     | 8,03                    |
| Rohr + Krümmer [mm]                | 161,7+102   | 33,4+102<br>(33,4+160) | 6,85<br>(3,75)          |
| Rechen [mm]                        | 4,781       | 3,298                  | 0,08                    |
| Turbine + Saugrohr + Generator [%] | 45,5        | 69                     | 51,65                   |

Die Kosten für solch einen Umbau werden vom Eigentümer auf ca. 150000 € geschätzt. Aus der ausführlichen Berechnung der Einsparungen geht eine Amortisierungsdauer von mehr als 20 Jahren hervor. Bei einer solchen Dauer werden die Unsicherheiten als zu groß eingestuft. Deshalb wird dem Eigentümer von einem Umbau abgeraten, da die wirtschaftlichen Aspekte nicht die Vorteile aufwiegen. Erst ab einer Leistung von 12,5 kW reduziert sich die Amortisierungsdauer unter 15 Jahre und ein Umbau sollte in Betracht gezogen werden.

Um trotzdem einen Nutzen aus dieser Arbeit zu ziehen, könnten nur einige der genannten Verbesserungen umgesetzt werden, um für geringe Kosten eine kleine Wirkungsgradsteigerung zu erzielen. Man erkennt aus Tabelle 7, dass der Austausch des Einlaufrechens den geringsten Nutzen bringt und das Auswechseln der Turbine und dem Saugrohr die größte Leistungssteigerung. Wenn jedoch der Einlauf und das Rohr zur Turbine laut Kapitel 5.4.1 verbessert werden, dann wird eine Leistungssteigerung von 14,88% erreicht. Mit dieser Steigerung können die Einsparungen wie in Kapitel 6.2 berechnet werden. Dadurch ergibt sich mit der derzeitigen Anlage ein Ersparnis von 4155,90 € und mit der Leistungssteigerung 4691,37 €. Somit können 535 € pro Jahr im Vergleich zur derzeitigen Anlage eingespart werden. Der Grund warum diese Kombination von Verbesserungen gewählt wurde ist, dass bei einem Umbau des Einlaufbereichs das Rohr zur Turbine auch angepasst werden muss. Deshalb ist es am sinnvollsten dieses auch gleich auszutauschen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den gesammelten und aufbereiteten hydrographischen Daten, wurde der Grundstein für die Auswahl der Wasserkraftmaschine und die Dimensionierung der restlichen Komponenten gelegt. Zusätzlich konnte durch die Ausarbeitung des Bewertungsschlüssels die am besten geeignete Turbine ausgewählt werden. Bedingt durch die Wahl der Kaplan-Turbine, wurden zwei unterschiedliche Saugrohre ausgelegt. Es wurde das hundertjährige Hochwasser  $HQ_{100}$  bestimmt und bestätigt, dass dieses durch das Wehr abgeführt werden kann. Außerdem wurde die Abflussleistung unter normalen Bedingungen bestimmt,  $t$  und die Kraft die zum Öffnen und Schließen des Wehrs nötig ist. Vor allem beim Turbineneinlauf und dem Rohr zur Turbine konnte eine Verbesserung erzielt werden. Zurzeit fehlen noch ein Tosbecken und der Revisionsverschluss, wobei vor allem der Revisionsverschluss noch umgesetzt werden sollte.

Trotz aller Verbesserungen war es nicht möglich die Wasserkraftanlage soweit zu optimieren, dass sich eine komplette Revitalisierung lohnt. Dies liegt an dem geringen Gesamtwirkungsgrad der Anlage von 69%, welcher vor allem durch das Saugrohr entsteht. Es war mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich seinen Wirkungsgrad auf über 80% zu erhöhen. Hier gibt es noch mit Sicherheit Verbesserungspotential, welches aber mit fortschrittlichen Methoden bestimmt werden muss. Bei dem Einlaufbereich und der Rohrleitung wurden Verbesserungen entdeckt, welche leicht umzusetzen sind und trotzdem eine Leistungssteigerung von ~15% bewirken. In Tabelle 7 sind die Verbesserungen dem Ist-Zustand gegenübergestellt. Um die Leistung der Wasserkraftanlage zu erhöhen gehen aus dieser Arbeit zwei Möglichkeiten hervor.

Es kann eine Revitalisierung der gesamten Anlage forciert werden, bei welcher jedoch mindestens eine Ausbauleistung von 12,5 kW erreicht werden muss, um eine Amortisierungsdauer unter 15 Jahren zu erreichen. Dabei kann besonders die Optimierung des Saugrohrs hilfreich sein. Diese Arbeit kann dabei als Leitfaden dienen und es können deren Ergebnisse den Angaben des Anbieters gegenübergestellt werden.

Falls der gesamte Umbau der Anlage für den Besitzer zu riskant ist, können auch nur die Verbesserungen am Einlaufbereich umgesetzt und das Rohr zur Turbine ausgetauscht werden. Dadurch können pro Jahr auch schon 535 € eingespart werden. Besonders vorteilhaft ist hier, dass diese Arbeiten von dem Besitzer selbst durchgeführt werden können und deshalb nur Materialkosten entstehen. Außerdem kann die restliche Anlage zu einem späteren Zeitpunkt immer noch nachgerüstet werden, da der Einlauf und das Rohr dabei nicht verändert werden müssen. Deshalb ist diese Maßnahme auf alle Fälle zu empfehlen.



## Literatur

- [1] „<https://maps.tirol.gv.at/>“, 12.02.2023. [Online].
- [2] B. I. N. 128/2019, „Gesamte Rechtsvorschrift für Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer“. Österreich 23.05.2019.
- [3] T. Strobl und F. Zunic, Wasserbau. Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen. 1. Auflage, München: Springer-Verlag, 2006.
- [4] A. Malcherek, Fließgewässer. Hydraulik, Hydrologie, Morphologie und Wasserbau, Neubiberg: Springer-Verlag, 2019.
- [5] J. Giesecke, S. Heimerl und E. Mosonyi, Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb 6. Auflage, Stuttgart: Springer-Verlag, 2014.
- [6] M. Reuter und C. Kohout, Praxishandbuch für den umweltbewussten Einsatz von Turbinentechnologien im Bereich der Kleinwasserkraft, Schleusingen: Institut für Wasserwirtschaft, Siedlungswasserbau und Ökologie GmbH, 2014.
- [7] „<https://pwl-anlagentechnik.de/produkte/pipeturbine/>“, 20.02.2023. [Online].
- [8] „<http://kraemer-energietechnik.com/node/25>“, 20.02.2023. [Online].
- [9] S. Deniz, M. Bosshard, H. Speerli und P. Volkart, „Saugrohre bei Flusskraftwerken“, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, Nummer 106, 1990.
- [10] H. Patt und P. Gonsowski, Wasserbau. Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen, Bonn: Springer-Verlag, 2011.

- 
- [11] G. Peter, Überfälle und Wehre. Grundlagen und Berechnungsbeispiele, Wiesbaden: Vieweg, 2005.
- [12] G. H. Jirka und C. Lang, Einführung in die Gerinnehydraulik, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.
- [13] H. Zentralbüro, Hochwasser 2005 - Ereignisdokumentation, Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Sektion Wasser, 2006.
- [14] H. Meusburger, Energieverluste an Einlaufrechen, P. D. H. Minor, Hrsg., Zürich, 2002.
- [15] „<https://www.e-control.at/marktteilnehmer/oeko-energie/marktpreis>,“ 01.05.2023. [Online].

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Reutte, den 24.05.2023

Jakob Krabacher