Hochschule Biberach

Studiengang Bauingenieurwesen

Bachelorarbeit

Effiziente Potentialnutzung kleiner Wasserkräfte

Stromerzeugung durch Wasserradbetrieb an der Rotach

eingereicht von:

Oliver Kamer

Matrikelnummer: 459910

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Anton Nuding

Ulm, den 28. Juni 2013

Inhaltsverzeichnis

Glossar **5**

Abkürzungsverzeichnis **7**

Formelzeichenverzeichnis **8**

1. Einleitung **9**
1.1. Einstieg 9
1.2. Aufgabenstellung 9
1.3. Begründung der Arbeit 10

2. Theorie zum Wasserrad **11**
2.1. Funktionsweise eines Wasserrades 11
2.2. Zulaufgerinne 12
2.3. Rechen 13
2.4. Einlauf und Eintritt 14
2.4.1. Einlauf über ein Schütz 14
2.4.2. Einlauf über Bodenöffnungen 15
2.4.3. Zuführung über offenes Gerinne 16
2.4.4. Zellform eines Wasserrades 18
2.5. Austritt und Verluste 21
2.6. Freihang und Waten 27

3. Projektstandort **28**
3.1. Lage 28
3.2. Wasserbauliche Geschichte des Standortes 28

4. Hydrologie und Bestand **32**
4.1. Abflussdaten 32
4.2. Einzugsgebiet 32
4.3. Abflussanalyse 34
4.4. Bestand 36
4.5. Reaktivierung 38

5. Bemessung **40**
5.1. Bemessung des Wasserrades 40
5.2. Zuführung durch ein Schütz 47

5.3. Zulauf 48
5.4. Weitere Berechnungen 50

6. Berechnung der Verluste 51
6.1. Einlaufverlust 52
6.2. Statischer Verlust 53
6.3. Dynamischer Verlust 55
6.4. Gesamtverlust 55
6.5. Leistungsberechnung 56

7. Konstruktive Details 57

8. Wasserrecht und Fördermittel 60

9. Zusammenfassung 61

10. Conclusion 63

Literaturverzeichnis 64

Anhang 65

A. Lageplan von 1824 65

B. Unterschreitungstage und Dauerlinien 66

C. Fotos 68

D. Fördermittelantrag 71

E. Übersichtsplan 75

F. Draufsicht Einlaufbereich 76

G. Schnitt Einlaufbereich 77

H. Draufsicht Mühlenbereich 78

I. Seitenansicht Wasserrad 79

J. Frontansicht Mühlenbereich 80

K. Detailzeichnungen Schütz 81

Abbildungsverzeichnis

1. Schütz- und Bodeneinlauf 15
2. Zuführung über offenes Gerinne 16
3. Zuführung über offenes Gerinne mit Gefälle 17
4. Eintrittsstrahl 18
5. Konstruktion der Zellenausformung 22
6. Wasseraustritt (statischer Verlust) 24
7. Ermittlung der Flächen- und Winkeländerung 25
8. Dynamischer Verlust 26
9. Historische Francis-Turbine 31
10. Einzugsgebiet 33
11. Ganglinien der Rotach 35
12. Vergrößerte Ansicht der Dauerlinien 36
13. Höhenverlauf 38
14. Konstruktion der Zellen 46
15. Konstruktionszeichnung des Wasserrades 46
16. Eintrittspunkt 51
17. Grafische Ermittlung der statischen Austrittsverluste 54
18. Lageplan 1824 65
19. Dauerlinien 67
20. Foto des Einlaufbereichs 68
21. Foto der Brücke 69
22. Foto des Mühlenbestandes 70

Tabellenverzeichnis

1. Strickler-Beiwerte für Gerinne 13
2. Kritische Geschwindigkeiten für Erosion im Gerinne 13
3. Zellen- und Armzahlen 20
4. Kennwerte der alten Francis-Turbine 30
5. Hauptwerte der Rotach 32
6. Modi der Schützsteuerung 48
7. Berechnungsergebnisse der Verluste 55
8. Übersicht der Ergebnisse 62

Glossar

benetzter Umfang

Der Umfang eines Gerinnes, das von Wasser bedeckt ist.

Düker

Unterführung einer Rohres oder einer Leitung unter einer Straße, einem Deich, einem Tunnel oder einem Fluss.

Fallhöhe

Die Höhendifferenz zwischen Oberwasserspiegel und Unterwasserspiegel, die für die Stromerzeugung genutzt werden kann.

Gerinne

Bezeichnung für eine nach oben offene Umschließung abfließender Gewässer natürlichen oder künstlichen Ursprungs.

kleine Wasserkraft

Unter kleiner Wasserkraft versteht man Wasserkraftanlagen mit einer Leistung von unter 1 MW.

oberschlächtig

Ein Wasserrad, das von oben mit Wasser beaufschlagt wird. Hier wird die Fallhöhe ausgenutzt.

potentielle Lageenergie

Die potentielle Lageenergie beschreibt die Energie eines physikalischen Systems, die sich aus seiner aktuellen Lage bestimmt. Wasserkraftwerke nutzen die Lageenergie, um Strom zu erzeugen. Je größer die Wassermenge und je größer der Höhenunterschied ist, desto mehr elektrische Energie kann geliefert werden.

Schütz

In der Höhe verstellbare Sperr- und Regelvorrichtung, um Wasserstände und Durchfluss zu steuern.

unterschlächtig

Ein Wasserrad, das allein durch die Fließgeschwindigkeit des Wassers angetrieben wird.

Verluste

Verluste entstehen an jeder Stelle und jedem Bauteil, das von Wasser passiert wird. Hierbei wird die theoretisch mögliche Energiegewinnung reduziert.

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist ein Maß für die Effizienz von Energieumwandlungen und Energieübertragungen und wird in Prozent angegeben. Im Bereich der Wasserräder liegt dieser zwischen 50 % und 85 %.

Abkürzungsverzeichnis

bspw.	beispielsweise
CAD	Computer Aided Design
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch
EZG	Einzugsgebiet
GWK	Gewässerkennzahl
kW	Kilowatt
m	Meter
m^3/s	Kubikmeter pro Sekunde
müNN	m über Normalnull
sog.	sogenannte
U/min	Umdrehungen pro Minute
usw.	und so weiter
z. B.	zum Beispiel

Formelzeichenverzeichnis

A	Fläche	[m^2]
a	radiale Kranztiefe	[m]
B	Breite des Wasserrades	[m]
b_0	Gerinnebreite	[m]
c	Geschwindigkeit	[m/s]
n	Drehzahl	[U/Min]
ε	Füllfaktor	[1]
g	Erdbeschleunigung	[9,81 m/s^2]
H_T	Tauchtiefe des Wasserrades	[m]
H	Fallhöhe	[m]
h_{D2}	Druckhöhe	[m]
h_{gr}	Grenztiefe	[m]
h_V	Verlusthöhe	[m]
h	Wassertiefe im Gerinne	[m]
I_E	Gefälle	[m/m]
k_{st}	Manning-Strickler-Beiwert	[m$^{\frac{1}{3}}$/s]
L	Länge	[m]
M	Drehmoment	[Nm]
μ	Ausflussbeiwert	[1]
m	Masse	[kg]
ρ	Dichte des Wassers	[1000 kg/m^3]
R_i	Innenradius	[m]
P	Leistung	[W]
Q	Durchfluss	[m^3/s]
R_a	Außenradius	[m]
r_{hy}	hydraulischer Radius	[m]
R_S	Schwerpunktradius	[m]
u_S	Umfangsgeschwindigkeit des R_S	[m/s]
s_0	Öffnungsweite des Schütz	[m][cm]
t_Z	Teilung der Schaufel	[m]
u_a	Umfangsgeschwindigkeit von R_a	[m/s]
V	Volumen	[m^3]
t	Zeit	[s]
z	Anzahl der Zellen	[1]

1. Einleitung

1.1. Einstieg

Seit der Atomausstieg in aller Munde ist, müssen wir uns mit alternativen Energiequellen befassen. Hierbei bietet es sich an, auf regenerative Energiequellen wie Wind, Sonne und Wasserkraft zu setzen. Allerdings wird die alternative Energiegewinnung fast ausschließlich über Großprojekte wie Windparks oder Pumpspeicherkraftwerke realisiert. Dabei empfiehlt es sich gerade in Deutschland an, dezentrale Energiequellen zu nutzen, die teilweise auch schon vor Jahrzehnten ausreichend waren und ihren Teil für die Stromversorgung beigetragen haben. In Deutschland gab es bereits im Mittelalter viele Mühlen, die mit Wasserkraft angetrieben wurden. Die entsprechenden Flüsse und Zuleitungen sind oftmals heute noch vorhanden und warten nur darauf, reaktiviert zu werden. Diese Reaktivierung der sogenannten „kleinen Wasserkraft“ bietet für die Beteiligten und Anwohner den Vorteil, dass hierfür keine Berge abgetragen oder Täler geflutet werden müssen, um Strom zu erzeugen. Die kleine Wasserkraft nutzt vorteilhaft die Standorte, an denen geringe Fallhöhen und Wassermengen vorzufinden sind, um eine akzeptable Menge an Strom zu erzeugen. Da es in Deutschland viele geeignete Standorte für die kleine Wasserkraft gibt, wird der Strom hier durch eine Masse an Kleinstanlagen erzeugt, anstatt durch eine einzige Großanlage. Dank EEG-Vergütung und staatlicher Subventionen ist sogar ein finanzieller Anreiz vorhanden, um diese Standorte zu nutzen. Der Betreiber des hier bearbeiteten Standorts möchte allerdings keine EEG-Vergütung bekommen, da er den erzeugten Strom vollständig zur Eigennutzung vorsieht, um eine vorhandene 50-kW-Gastherme zu entlasten.

1.2. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung der Bachelorarbeit sah vor, ein oberschlächtiges Wasserrad an einer Mühle zu berechnen. Um ein Wasserrad zu bemessen, muss zuerst die dahinterstehende Theorie erläutert werden. Im Anschluss daran wird die Geschichte der Wasserkraft am Standort Ittenhausen aufgearbeitet und die Grundlagensammlung erstellt. Hierzu gehört die Analyse der Abflüsse der Rotach sowie

das Vermessen des noch vorhandenen Mühlgrabens und dem Absturz. Mit den gesammelten Daten und dem erarbeiteten Fachwissen wird anschließend das oberschlächtige Wasserrad samt zugehöriger Bauteile dimensioniert. Anschließend wird eine Leistungsberechnung durchgeführt und in einigen Plänen veranschaulicht. Zusätzlich soll noch auf eventuelle Subventionen eingegangen werden. In der Zusammenfassung wird schlussendlich die Eignung des Standorts sowie der gewählten Art der Stromerzeugung bewertet.

1.3. Begründung der Arbeit

Ich schreibe die vorliegende Bachelorarbeit über das Thema „Effiziente Potentialnutzung kleiner Wasserkräfte - Stromerzeugung durch Wasserradbetrieb an der Rotach“, um auf die Möglichkeit der dezentralen Stromerzeugung durch die kleine Wasserkraft hinzuweisen. Dass es sich bei der kleinen Wasserkraft nicht immer um klassische Turbinen handeln muss, sondern dass es eine Vielzahl an Alternativen zur Stromerzeugung gibt, soll ebenfalls eine Anregung sein, zumal ein Mühlenstandort schon früher ein Wasserrad in Betrieb hatte. Dass von Anfang an ein Wasserrad gewünscht war, machte die Arbeit nicht weniger spannend, da es für mich eine willkommene Abwechslung zu den typischen Kraftwerksturbinen wie Francis oder Pelton ist. Außerdem lässt sich die sichtbare Erzeugung von Strom, wie sie bei einem Wasserrad möglich ist, in sozialer Weise einbinden, bspw. als Schulprojekt oder als touristische Attraktion mit Informationstafeln. Es sind somit verschiedene Möglichkeiten gegeben, die Verbindung zwischen Technikgeschichte und moderner Stromerzeugung zu schaffen.

2. Theorie zum Wasserrad

2.1. Funktionsweise eines Wasserrades

Ein Wasserrad wird entweder durch die Fließgeschwindigkeit des Wassers durch ein unterschlächtiges Wasserrad oder durch die Ausnutzung der potentiellen Lageenergie mit Hilfe eines oberschlächtigen Wasserrades in Bewegung versetzt. Da sich bei diesem Projekt wegen der vorhandenen Fallhöhe von etwa 4 m ein oberschlächtiges Wasserrad anbietet, soll auch nur auf dieses eingegangen werden.
Durch das Eindringen von Wasser in Zellen oder Schaufeln wird das Wasserrad in Bewegung versetzt. Diese Zellen sind kreisförmig um eine Achse angeordnet und in ihrer Lage zum Wassereintritt hin offen. Es gibt hierbei verschiedene Formen wie z. B. einfache Bretter, die senkrecht zur Achse stehen und somit das Rad in „Tortenstücke“ unterteilen, genauso wie schaufel- oder kelchförmige Bleche, die das Wasser als Strahl auffangen. Allen gemein ist, dass die jeweiligen Zellenbegrenzungen in irgendeiner Weise fest mit der Achse verbunden sind. Durch die aufgebrachte Masse des Wassers in den gefüllten Zellen entsteht ein Moment in Bezug auf die Achse. Durch die Erdanziehungskraft g senkt sich die gefüllte Zelle nach unten, aufgrund der Radform ergibt sich aus dem Weg der Zelle eine Drehung, die in kontinuierlicher Weise das Rad und somit auch die Achse antreibt. Das Moment M und somit auch die Leistung P ($P = M \cdot H$) ist umso größer, je weiter außen am Rad sich der Schwerpunkt der Zellenfüllung befindet. Aus diesem Grund muss die Zelltiefe t und somit die Kranzbreite a gering gehalten werden.[1]

In diesem Kapitel soll eine theoretische Betrachtung konstruktiver Details die Feinheiten und Schwierigkeiten von Wasserrädern erläutern. Mit Hilfe der erarbeiteten Grundlagen wird es später möglich sein, ein effizientes Wasserrad unter Beachtung der genannten Punkte zu dimensionieren und bauen. Sämtliche Herleitungen und Formeln sind, sofern nicht anders angegeben, in [1] zu finden.

2.2. Zulaufgerinne

Die Zuführung von Wasser zum Wasserrad ist von essentieller Bedeutung. Bei schlecht dimensionierten Zuläufen sinkt der Zufluss von Wasser, sodass das Wasserrad anschließend mit weniger Wasser als bemessen beaufschlagt wird. Dies ergibt dann eine geringere Stromerzeugung.
Um das Wasser vom Gewässer zum Wasserrad zu befördern, ist ein Gerinne nötig. Dieses Gerinne kann naturnah ausgebaut werden, indem ein Trapezquerschnitt von entsprechenden Dimensionen mit natürlichen Materialien wie Kies oder Erde errichtet wird. Ebenfalls möglich ist die technische Gestaltung mit Holzverkleidungen, Betonrohren oder Stahlgerinnen, wobei oftmals die naturnahe Variante in Verbindung mit einer Holzverkleidung in der Zuführung gewählt wird. Die Bemessung erfolgt in allen Fällen über die Gauckler-Manning-Strickler-Formel (kurz Strickler-Gleichung). In Abhängigkeit des Gefälles I_E und den Abmessungen des Gerinnes lässt sich die Fließgeschwindigkeit und somit auch der Durchfluss ermitteln:

$$\boxed{Q = c \cdot A = k_{st} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I_E^{1/2} \cdot A} \tag{1}$$

I_E wird hierbei als Dezimalbruch angegeben; 1 m Gefälle auf 1000 m Länge entspricht somit $I_E = 0,001$. A ist die Fläche des Gerinnes und wird in m^2 angegeben, c ist die Fließgeschwindigkeit des Wassers in m/s. k_{st} ist ein materialabhängiger Beiwert, welcher die Rauhigkeit der Sohle und Böschung beschreibt. In der folgenden Tab. 1 werden die wichtigsten Beiwerte aufgezählt. Die Beiwerte zeigen, dass ein großer k_{st}-Wert bei gleichem Gefälle und gleicher Fläche für eine schnellfließendere und somit größere Wassermenge sorgt als ein niedriger k_{st}-Beiwert.
Der hydraulische Radius r_{hy} stellt eine gedachte Größe dar, in welcher der durchflossene Gerinnequerschnitt mit einem komplett gefüllten Kreisquerschnitt verglichen wird, wodurch weitere Berechnungen deutlich vereinfacht werden. r_{hy} ist der Quotient aus durchflossenem Querschnitt und benetztem Umfang, unabhängig von der Gerinneform.
Bei Gerinnen, die aus lockeren Materialien wie Erde oder Kies bestehen, muss die Fließgeschwindigkeit genauer betrachtet werden. Zum einen sollte sie hoch genug sein ($c \geq 0,4$ m/s), damit sich Feinteile und Schwebstoffe nicht ablagern und zu einem Versanden des Gerinnes führen können, zum anderen muss die Fließgeschwindigkeit niedrig genug sein, um keine Erosion im Gerinne hervorzurufen ($c \leq c_{krit}$). Die kritischen Geschwindigkeiten lassen sich in der nachfolgenden Tabelle 2 finden. Für den Ablauf gelten die gleichen Angaben wie für den Zulauf,

Material	Art, Form, Zustand	k_{st} in $m^{1/3}/s$
Holz	gehobelte Bretter	85-90
	ungehobelte Bretter	75-85
	ältere Holzgerinne	65-70
	neue, glatte Gerinne	90-95
Fels	mittelgrober Felsausbruch	25-30
	grober Felsausbruch	15-20
Erde	Fein- bis Mittelkies	40-45
	Grobkies	35
	Erdkanäle und Gräben, stark bewachsen	25-25
	natürliche Flussbette mit fester Sohle	40

Tab. 1: Strickler-Beiwerte für Gerinne

Material	c_{krit} in m/s
fest gelagerter Lehm, Ton, Schlamm	0,70-1,00
Mittelsand (0,2-0,63 mm)	0,35-0,45
Grobsand (0,63-0, 2mm)	0,45-0,60
Feinkies (2-6,3 mm)	0,60-0,80
Mittelkies (6,3-20 mm)	0,80-1,25
Grobkies (20- 63mm)	1,25-1,60
Flussschotter, Geröll (50-75 mm)	1,70-1,80
Flussschotter, Geröll (75-100 mm)	1,90-2,00
Steinschüttung (100-150 mm)	1,90-3,40

Tab. 2: Kritische Geschwindigkeiten für Erosion im Gerinne

allerdings muss der Bereich unter dem Wasserrad besonders gesichert sein, um den ständigen Impulsen durch das aus dem Wasserrad fallende Wasser gewachsen zu sein, ansonsten kann es zu Erosion kommen. Eine größere Neigung I_E als im Zulauf ist ebenfalls von Vorteil, damit das Wasser schneller abgeführt werden kann.

2.3. Rechen

Um im Wasser treibende grobe Feststoffe von Wasserrädern und Turbinen abzuhalten, werden oft Rechen eingebaut. Diese hindern grobe Feststoffe wie Äste, Geröll oder auch Unrat daran, in die teilweise sehr empfindlichen Maschinen zu geraten. Wird ein Rechen eingebaut, so erzeugt dieser, je nach Stabform (Rechteck,

Tropfenform, Kreis), Stababstand (60-80 mm) und Neigungswinkel Verluste in der Fallhöhe. Diese sind zwar sehr klein, müssen aber berücksichtigt werden und reduzieren somit die Leistung des Wasserrades. Um eine aufwändige Berechnung zu umgehen, werden Rechenverluste bei schrägstehenden Rechen oftmals pauschal angesetzt, je nachdem, wie oft der Rechen gereinigt wird. Wird der Rechen häufig gereinigt, so wird ein Höhenverlust $h_{V,r} = 0,05$ m angesetzt, wird der Rechen nur selten gereinigt, setzt man $h_{V,r} = 0,1$ m an.
Oberschlächtige Wasserräder besitzen einen Selbstreinigungseffekt, da das Wasser über die gleiche Kante austritt, über die es eingetreten ist. Somit kann bei einem oberschlächtigen Wasserrad wie im Falle der Mühle Ittenhausen auf einen Rechen verzichtet werden.

2.4. Einlauf und Eintritt

Nachdem das Wasser nun im Zulaufgerinne auf dem Weg zum Wasserrad ist, muss der Übergang vom Gerinne in das Wasserrad erarbeitet werden. Die verschiedenen Möglichkeiten mitsamt ihren technischen und betrieblichen Vor- und Nachteilen sollen hier untersucht werden.
Für oberschlächtige Wasserräder gibt es mehrere Varianten des Wassereintritts. Zum einen der Eintritt über ein Schütz oder einen Bodeneinlass, zum anderen über ein offenes Gerinne mit oder ohne Gefälle. Für einen hohen Wirkungsgrad sind eine möglichst tangentiale Zuführung des Wasser zum Radumfang sowie ein Eintrittspunkt, der in der Nähe des oberen Scheitels liegt, günstig.

2.4.1. Einlauf über ein Schütz

Eine Variante ist der Einlauf über ein Schütz, sodass der Durchfluss geregelt werden kann. Hierbei trifft das Wasser immer mit konstanter Geschwindigkeit auf das Rad, sofern ein konstanter Wasserspiegel und somit auch eine konstante Druckhöhe h_{D2} vorliegt. Das Schütz, wie jedes Bauwerk in fließendem Wasser, erzeugt ebenfalls Verluste h_V, diese können aber durch eine gute Ausrundung der Schützkante minimiert werden. Die hydraulischen Verluste an einem Schütz lassen sich mit Hilfe der Beiwerte $\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{\psi \cdot s_0}{h_{D2}}}}$ (Geschwindigkeitsabminderungsfaktor) und ψ (Ausrundungsbeiwert des Schützes, Kontraktionsbeiwert) und dem Abstand

des Schütz zum Boden s_0 folgendermaßen berechnen:

$$\boxed{h_{V,e1} = h_{D2} \cdot (1 - \varphi^2) + \frac{c_1^2}{2 \cdot g} - \psi \cdot s_0} \tag{2}$$

Dem Vorteil von konstanter Geschwindigkeit stehen als Nachteil sowohl die Notwendigkeit eines Rechens als auch der Betrieb mit Wärter gegenüber.

2.4.2. Einlauf über Bodenöffnungen

Ähnlich wie der Einlauf über ein Schütz, wie in Kap. 2.4.1 beschrieben, funktioniert der Einlauf über eine Bodenöffnung. Hierbei gelten ebenfalls die Beiwerte φ und ψ, allerdings werden sie hier zum Ausflussbeiwert μ ($\mu_A = \varphi \cdot \psi$) zusammengefasst. Der Reibungsverlust wird über $h_{V,e1} = h_{D2} \cdot (1 - \varphi^2)$ berechnet.
Diese Art der Zuführung wird für oberschlächtige Wasserräder nicht empfohlen, da hierbei ein tangentialer Eintritt im Scheitel nicht möglich ist, der aber für einen hohen Wirkungsgrad notwendig ist. Aus diesem Grund wird der Einlauf über eine Bodenöffnung für dieses Projekt nicht berücksichtigt.
In Abb. 1 ist der Austritt des Wassers aus einem Schütz sowie aus einer Bodenöffnung mit den Bezeichnungen der einzelnen Größen dargestellt.

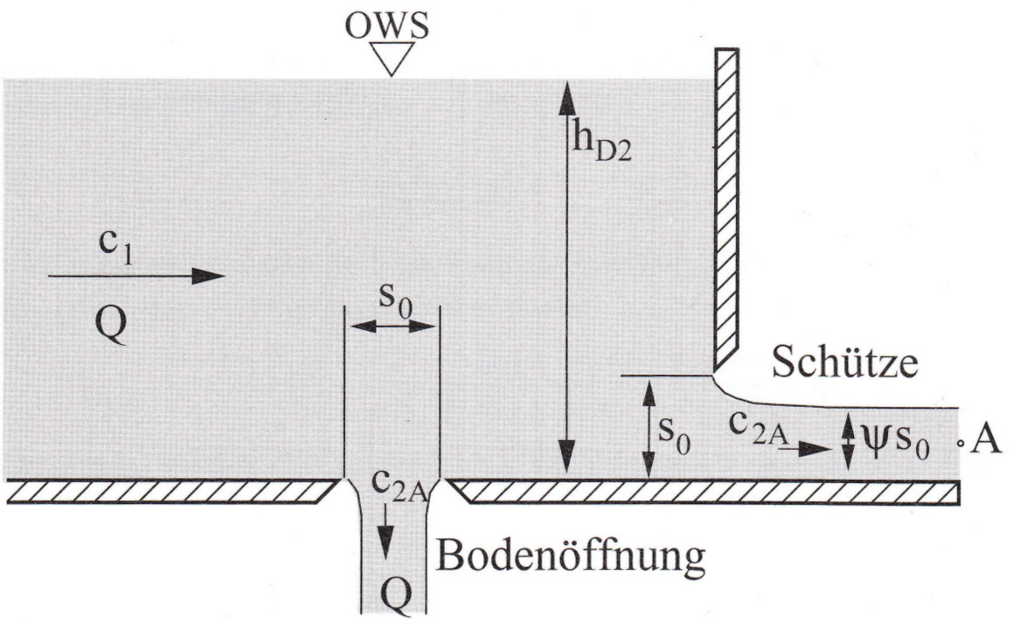


Abb. 1: Schütz- und Bodeneinlauf, (aus [1] S.22)

2.4.3. Zuführung über offenes Gerinne

Die Zuführung über ein offenes Gerinne ist durch zwei Varianten möglich. Die erste Variante ist die Zuführung über ein offenes Gerinne ohne Gefälle, die zweite Variante ist ein offenes Gerinne mit Gefälle. Beide sollen hier erörtert werden.
Bei der ersten Variante wird das Wasser über eine horizontale, rechteckige Rinne über das Wasserrad geführt. Die näherungsweise Berechnung der Rinne gleicht der des breitkronigen Wehrs. Da auf einem breitkronigen Wehr das Wasser in parallelen Strombahnen abfließt, sinkt der Wasserspiegel auf der Wehrkrone auf die Grenztiefe ab. Die Grenztiefe h_{gr} in rechteckigen Gerinnen beträgt $h_{gr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot b_0^2}}$; b_0 ist hierbei die Gerinnebreite. Der Durchfluss Q wird über die Poleni-Formel für das breitkronige Wehr berechnet und lautet: $Q = 1,705 \cdot b_0 \cdot h^{\frac{3}{2}}$, h ist die Fließtiefe des Wassers. Die Austrittsgeschwindigkeit ist annähernd gleich der Grenzgeschwindigkeit und beträgt im Rechteckgerinne $c = \sqrt{g \cdot h_{gr}}$. Somit ist der Durchfluss und die Austrittsgeschwindigkeit vergleichsweise schnell berechnet. In Abb. 2 ist ein solches Gerinne dargestellt.

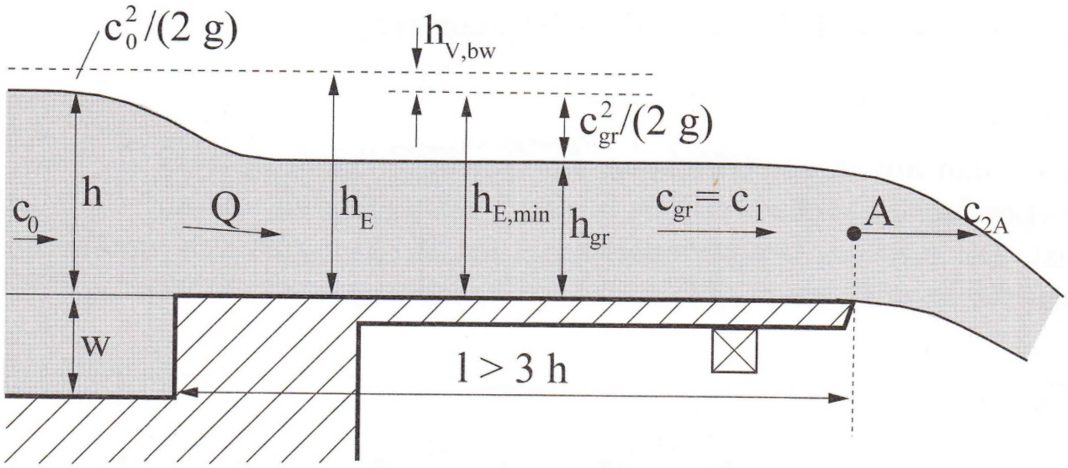


Abb. 2: Zuführung über offenes Gerinne (aus [1], S.24)

Erfolgt die Zuführung über ein offenes Gerinne mit Gefälle, also eine Schussrinne, verringert sich die Nutzhöhe um die entsprechende Höhendifferenz der Neigung. Durch das Gefälle wird die Geschwindigkeit c am Austritt erhöht, sodass ein größerer Impuls auf die Rückwände der Zellen des Wasserrades erfolgt. Dies ist insbesondere bei geringen Wassermengen von Vorteil. Die Berechnung der Austrittsgeschwindigkeit erfolgt iterativ über die Strickler-Gleichung aus Gl. (1), hier muss die Höhe variiert werden, da der Durchfluss Q bekannt ist.

Vorteile bei beiden Gerinnevarianten sind die geringen Verluste, die sich im Bereich weniger Zentimeter abspielen, sowie ein wärterloser Betrieb. Durch die einfache Bauform ist das offene Gerinne nicht anfällig für Verschmutzungen und kann sogar zur Messung des Durchflusses verwendet werden. Nachteilig bei offenen Gerinnen ist, dass stark schwankende Wassermengen an unterschiedlichen Punkten auf das Rad treffen, da hier die Geschwindigkeit variiert. Dies lässt sich mit verschiebbaren Zungen umgehen, die das Gerinne je nach Durchflussmenge verlängern oder verkürzen, um bei verschiedenen Geschwindigkeiten den gleichen Eintrittspunkt in das Wasserrad zu erreichen. In Verbindung mit Ultraschallmessgeräten lässt sich dieser Vorgang automatisieren, sodass jederzeit ein effizienter und zugleich wärterloser Betrieb möglich ist. In Abb. 3 ist das Abfallen der Wasserhöhe im Gefälle deutlich zu erkennen.

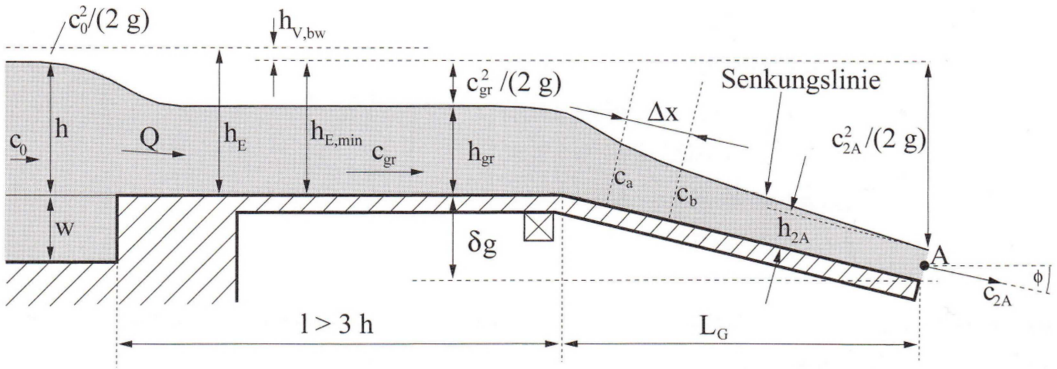


Abb. 3: Zuführung über offenes Gerinne mit Gefälle (aus [1], S.28)

Bei allen Formen der Zuführung muss das Gewicht des Wassers innerhalb der Zuführung beachtet werden, da sämtliche Zuführungen über eine Länge L von etwa dem Radius des Wasserrades überhängend sind. Diese Masse m lässt sich über das Volumen des Gerinnes und der Dichte des Wasser einfach berechnen, die Dichte ρ des Wassers wird mit $\rho = 1000$ kg/m^3 angegeben: $m = \rho \cdot V = 1000 \cdot L \cdot h \cdot b_0$ was einer Kraft von $m \cdot g$ entspricht, die abgestützt werden muss.

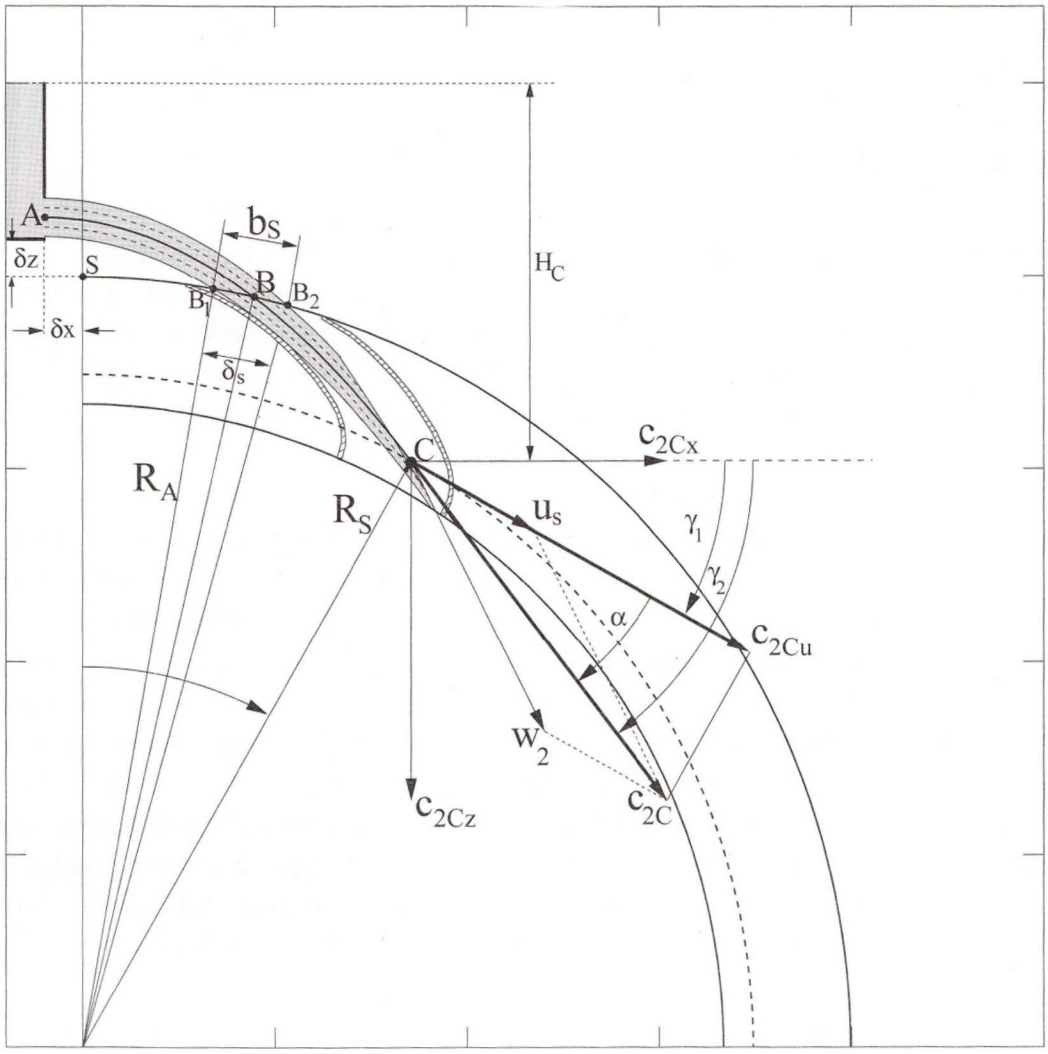


Abb. 4: Strahleintritt in Wasserrad nach Austritt aus einem Schütz (aus [1], S.41)

2.4.4. Zellform eines Wasserrades

Wie in Abb. 4 gut zu erkennen ist, tritt das Wasser aus einem Schütz an Punkt A aus. Die Strahlmitte verläuft parabelförmig und tritt an Punkt B in das Wasserrad ein. Der Eintrittspunkt B soll für ein gutes Anlaufverhalten im Scheitelpunkt S oder etwas in Drehrichtung versetzt liegen. Liegt der Punkt B gegen die Drehrichtung versetzt hinter S, ist eine geringe Steigerung des Wirkungsgrades möglich. Allerdings muss in diesem Fall eine Anlaufhilfe vorgesehen werden, die den wärterlosen Betrieb ausschließt. Bevor die Zellenform berechnet werden kann, muss der eintretende Wasserstrahl berechnet werden. Die Berechnung erfolgt über eine Parabelgleichung, die hier nicht hergeleitet werden soll, die Herleitung ist in [1] nachvollziehbar erörtert. Da sich die Punkte B, B_1 und B_2 auf einem Kreis

befinden, lautet die Gleichung für die Parabel:

$$\boxed{F(x) = 0 = x^2 - R^2 + \left(-\frac{g}{2} \cdot \left(\frac{x - x_A}{c_{2A} \cdot \cos\gamma}\right)^2 - (x - x_A) \cdot \tan\gamma + z_A\right)^2} \tag{3}$$

Diese Gleichung ist ein Polynom 4. Ordnung und kann nur mit Hilfe einer Iteration gelöst werden. Die Punkte B_1 und B_2 sind die obere und untere Strahlbegrenzung und bestimmen die Länge des Einlaufbogens b_S und somit den Winkel φ_S. Die Begrenzungen werden über die Addition von $\pm s_0/2$ zur Strahlmitte am Punkt B berechnet. Anstatt der Iteration kann der Eintrittspunkt auf dem Außenradius R_a auch grafisch bestimmt werden. Hierfür muss nur die Flugbahn bestimmt werden mit der Gleichung:

$$\boxed{z(x) = -\frac{g}{2} \cdot \left(\frac{x - x_A}{c_{2A} \cdot \cos\gamma}\right)^2 + (x - x_A) \cdot \tan\gamma + z_A} \tag{4}$$

b_S bestimmt den Abstand der Zellen untereinander und muss kleiner sein als die Teilung t_Z, da sonst keine ausreichende Belüftung erfolgen kann. Nicht ausreichende Belüftung äußert sich in teilweise störenden Geräuschen, wenn das Wasser in die Zellen eintritt, Näheres dazu in Kap. 7.
Anhand den errechneten Längen ist es nun möglich, die Größe und Anzahl der Zellen, sowie die Überdeckung der Zellen zu ermitteln. Aus der Anzahl der Zellen resultiert auch die Teilung des Wasserrades und die Anzahl der Arme, die das Rad stützen. Um die Zellenteilung und die Anzahl der Arme zu ermitteln, muss zuerst die Kranzbreite a bekannt sein. Die Kranzbreite a gibt die Tiefe der Zellen vertikal zum Rad an und wird durch den Innenradius R_i begrenzt. Sie wird in Abhängigkeit von der Fallhöhe H gewählt und errechnet sich aus $a = \frac{1}{6} \cdot H^{\frac{1}{3}} \cdots \frac{1}{4} \cdot H^{\frac{1}{3}}$, gebräuchliche Werte für a liegen zwischen 0,25 und 0,4 m. Anschließend wird die vorläufige Zellenteilung über die Gleichung $t_{z,a} = 0,75 \cdot a + 0,1$ errechnet. Diese Annahme wird in folgende Gleichung eingesetzt und das Ergebnis gerundet, um die Anzahl der Zellen zu erhalten:

$$\boxed{z_a = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_a}{t_{z,a}} \qquad [\mathrm{z} = z_a]} \tag{5}$$

Anschließend muss die Teilung noch einmal überprüft werden:

$$\boxed{t_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_a}{z}} \tag{6}$$

Es ist hierbei sinnvoll, für den Teilungswinkel $\gamma_t = \frac{360°}{z}$ geradzahlige Werte zu verwenden. Ganzzahlige Werte erhält man durch Verwendung der Tab. 3.

Bedingung	Zellenzahl z	Armzahl i	Teilungswinkel γ_t
$z \leq 21$	18	6	20°
$21 < z < 26$	24	6	15°
$26 < z < 33$	30	6	12°
$33 < z < 39$	36	6	10°
$39 < z < 46$	45	6	8°

Tab. 3: Zellen- und Armzahlen (Auszug aus [1])

Beim oberschlächtigen Wasserrad soll das Wasser möglichst lange im Rad verbleiben, um es anzutreiben. Bei einfachen Bretterkonstruktionen in I-Form ist das Wasser schon auf halber Fallhöhe vollständig ausgetreten und leistet so keine Arbeit mehr, weshalb sich eine L-förmige Schaufel bewährt hat, da so das Wasser erst im unteren Drittel des Rades austreten kann und somit länger Kraft ausübt. Die Zellenform soll mehreren Ansprüchen genügen, allerdings lassen sie sich nicht gleichzeitig lösen:

1. Der Rückschlag gegen den Schaufelrücken sollte möglichst klein gehalten werden.
2. Der eintretende Strahl sollte möglichst vollständig umgelenkt werden.
3. Der Austritt des Wassers sollte möglichst tief erfolgen.

Bei der Berechnung muss auch die Materialwahl des späteren Rades berücksichtigt werden. Holzzellen haben, aufgrund der dickeren Wände, ein kleineres Schluckvolumen, und somit auch eine geringere Effizienz als Blechzellen. Für die Effizienz sind gebogene Zellformen von Vorteil. Holzzellen in gebogener Form lassen nicht wirtschaftlich herstellen, weshalb hier nur auf Blechzellen eingegangen. Gute Ergebnisse in Bezug auf die Größe und Ausrundung der Zelle gibt es für folgende Maße

$$\boxed{\widehat{J_1E} = 1,25 \cdots 1,3 \cdot t_z \qquad \widehat{JF} = 0,33 \cdots 0,4 \cdot a} \tag{7}$$

Die Geraden werden auch Riegelschaufel ($\widehat{JF}$) oder Stoßschaufel ($\widehat{FE}$) genannt. Häufig wird das Geradenstück $\widehat{JF}$ durch einen Halbkreisbogen ersetzt, was den eintretenden Strahl fast vollständig umlenkt. Um ein Wasserrad wirtschaftlich zu machen, wird der Bogen oftmals durch mehrfach gekantete Bleche ersetzt, diese Methode ermöglicht eine einfachere Herstellung und Montage. Die Schluckfähigkeit

der einzelnen Zellen ist von der Stärke b_{Mat} des verwendeten Materials abhängig, Bleche haben etwa 2-4 mm Stärke, hölzerne Zellen hingegen sind mit 15-25 mm deutlich dicker und haben somit eine geringere Schluckfähigkeit. Das Schluckvolumen V einer einzelnen Zelle ist von der Drehzahl n und der Breite des Wasserrades B abhängig und beträgt somit:

$$V_z = B \cdot \left(\frac{\pi \cdot R_a^2 - \pi \cdot R_i^2}{z} \right) - B \cdot b_{Mat} \cdot \left(\widehat{EF} + \widehat{FJ} \right)$$

Der Durchfluss, den das Rad somit pro Sekunde verarbeiten kann, ist:

$$\boxed{Q_{Max} = \varepsilon \cdot n \cdot B \cdot \pi \cdot \frac{\left(R_a^2 - (R_a - a)^2 - \frac{(\widehat{EF} + \widehat{FJ}) \cdot b_{Mat} \cdot z}{\pi} \right)}{60}} \tag{8}$$

Der Füllfaktor ε gibt den Füllungsgrad der einzelnen Zellen an, er ist zwischen 0,25 und 0,5 frei wählbar. In nachfolgender Abb. 5 ist die Zellenform durch die errechneten Längen dargestellt.

2.5. Austritt und Verluste

Wie bei jeder Umwandlung von Bewegung in Energie werden Verluste erzeugt. Bei einem Wasserrad unterscheidet man zwischen drei Arten von Verlusten. Beim Eintritt in das Wasserrad entstehen Eintrittsverluste und Verluste durch Rückschlag. Beim Austritt wird zwischen statischem und dynamischem Verlust unterschieden. Ein Verlust wird als Längeneinheit angegeben, da er die gleiche Wirkung hat wie eine Reduzierung der Fallhöhe.
Tritt das Wasser in die Zelle ein, erzeugt es einen Impuls in der Stoßschaufel. Durch die Krümmung der Zelle wird der Strahl vollständig umgelenkt, wodurch ein rückwärts gerichtetes Drehmoment entsteht. Für die rückwärtsgerichtete Relativgeschwindigkeit gilt somit $w_{3c} = c_{2C,u} - u_s$. Mit der Umfangsgeschwindigkeit im Schwerpunkt u_S, die mit Hilfe von Gl. (3) berechnet werden kann, lässt sich die umgesetzte Energiehöhe ermitteln:

$$h = \frac{(c_{2c,u} - u_S) \cdot u_S \cdot (1 - \cos\gamma)}{g}$$

Der Eintrittsverlust $h_{V,e1}$ bildet sich durch die Differenz von H_C und h, hierbei gilt für H_C die Differenz von dem anstehenden Oberwasserspiegel zum Punkt C.

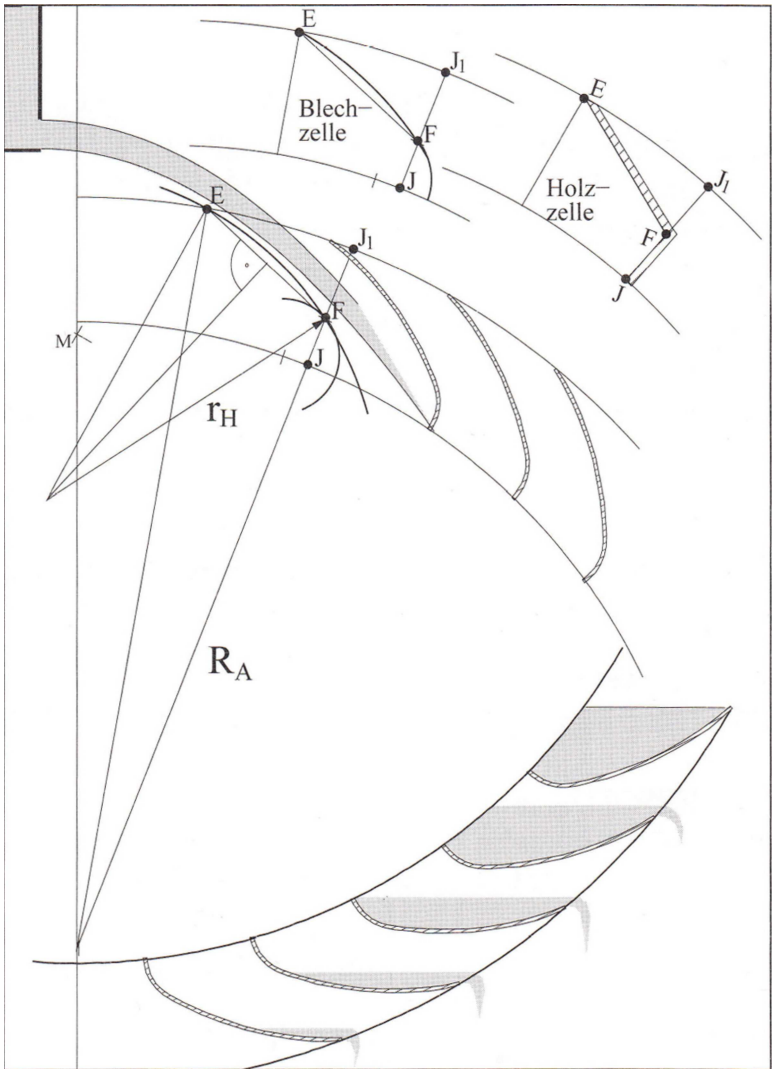


Abb. 5: Konstruktion der Zellenausformung (aus [1], S.48)

Bei sehr gut ausgerundeten Blechzellen, die ein Umlenkung des Wasserstrahls von $\gamma \approx 180°$ erlauben, gilt vereinfacht:

$$\boxed{h_{V,e1} = H_C - K \cdot \frac{(c_{2C,u} - u_S) \cdot u_S}{g}} \tag{9}$$

Der Vorfaktor K beschreibt die Zellenausrundung. Bei einfachen Holzzellen beträgt er $K = 1,0$, während bei sehr gut ausgerundeten Blechzellen der Faktor mit $K = 2,0$ angesetzt werden kann. Die vereinfachende Annahme gilt allerdings nur bei einem schmalen Strahl, da sich bei einem breiten Strahl die jeweiligen Strahlrichtungen gegenseitig stören. Treten mehrere Teilstrahlen ein, wird dieses Problem umgangen, zusätzlich vermindert sich dadurch die Lärmbelastung.

Um den Eintrittsverlust zu minimieren, ist es erforderlich, den Abstand H_C so gering wie möglich zu halten und die Zelle gut ausgerundet zu konstruieren. Nach dem Eintritt in die Zelle kommt ein Teil des Strahls mit der Rückwand der Zelle in Kontakt, wodurch ein Rückschlag entsteht. Der Verlust ist abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit und der Fläche des rückschlagenden Wasserstrahls. Ist die Eintrittsgeschwindigkeit in das Wasserrad klein, tritt der Durchfluss als Rückschlagsverlust ein. Ist die Zelle nach der Flugbahn des Wasserstrahls gekrümmt, ist der Rückschlagsverlust gleich Null.

Der Wasseraustritt beginnt im unteren Drittel des Wasserrades. Er beginnt bei Winkel φ_1 und ist bei Winkel φ_2 vollständig abgeschlossen. Der kontinuierliche Wasserverlust stellt einen statischen Verlust dar, da durch den Wasseraustritt die Gewichtswirkung und damit auch das Arbeitsvermögen sinkt. Da das Wasser beim Austritt zudem eine gewisse Bewegungsenergie hat, entsteht hier gleichzeitig ein dynamischer Verlust. Der Verlust durch Waten, also ein Eintauchen des Rades in das Unterwasser, soll hier nicht behandelt werden, da er durch den konstruktiven Entwurf vollständig vermeidbar und somit vernachlässigbar ist.
Der statische Verlust (s. Abb. 6) ist eine Volumenänderungen dV_Z (bzw. bei konstanter Breite eine Flächenänderung dA_Z) in Abhängigkeit der Zeit t. Daraus ergibt sich die Differentialgleichung für die Wassermengenabnahme. Das negative Vorzeichen deutet auf diese Reduzierung hin:

$$\frac{dV_Z}{dt} = B \cdot \frac{dA_Z}{dt} = -Q_A(t)$$

Um die gefüllte Fläche der Zelle vor Wasseraustritt zu berechnen, muss die einfließende Wassermenge durch die Zellenparameter des Rades dividiert werden und dient damit als Startwert für den Wasseraustritt bei Winkel φ_1:

$$A_q = \frac{Q \cdot 60}{z \cdot n \cdot B}$$

Die resultierende Fallhöhe des austretenden Wassers ändert sich mit dem Winkel φ und wird somit angegeben als

$$h(t) = R_a \cdot (1 - \sin\varphi)$$

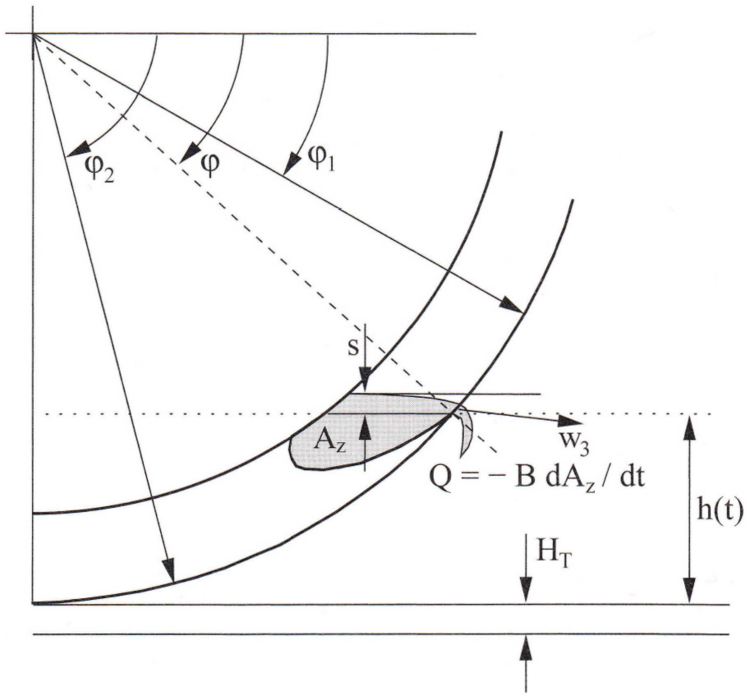


Abb. 6: Wasseraustritt aus der Zelle (aus [1], S.60)

Aus den nun vorhandenen Angaben lässt sich das Integral für die Verlusthöhe angeben:

$$\boxed{h_{V,a1} = -\frac{z \cdot n \cdot B}{Q \cdot 60} \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{dA_z}{d\varphi} \cdot R_a \cdot (1 - \sin\varphi) \cdot d\varphi} \tag{10}$$

Diese Gleichung lässt sich nur mit der Funktion $\frac{dA_z}{d\varphi}$ lösen, die stark von der verwendeten Zellenform abhängt und sich nicht analytisch wiedergeben lässt. Für diese Bestimmung muss der Anfangs- und Endwinkel des austretenden Wassers bestimmt werden. Anschließend muss grafisch die Änderung der Fläche in Relation zum Winkel gesetzt werden. Die grafische Ermittlung der Flächen und Winkel wird in Abb. 7 deutlich gemacht.

Der dynamische Verlust, der ein Impuls des austretenden Wassers ist, hängt von der Austrittsgeschwindigkeit ab. Hierbei gibt es eine exakte Variante zum genauen Berechnen des Höhenverlusts, genauso wie eine Näherung. Die genaue Variante benötigt die absolute Abflussgeschwindigkeit c_3, die sich über den Kosinussatz berechnen lässt:

$$c_3 = \sqrt{u_a^2 + w_3^2 - 2 \cdot u_a \cdot w_3 \cdot \cos(90° - \varphi)}$$

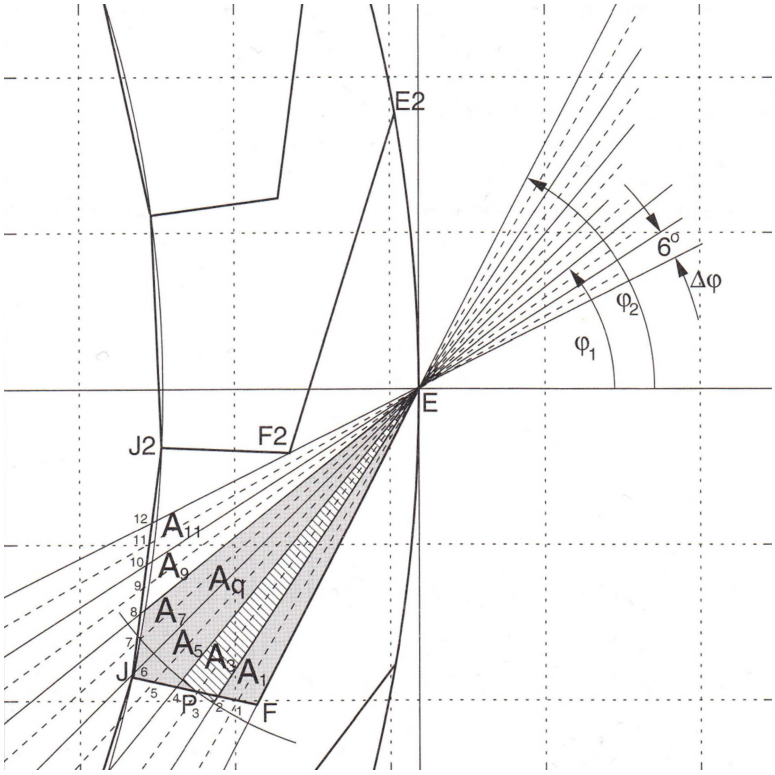


Abb. 7: Ermittlung der Flächen- und Winkeländerung (aus [1], S.66)

Der die Austrittsgeschwindigkeit einschließende Winkel α_3 ergibt sich durch erneute Anwendung des Kosinussatzes:

$$\cos\alpha_3 = \frac{u_a^2 + c_3^2 - w_3^2}{2 \cdot u_a \cdot c_3}$$

Für die Umfangsgeschwindigkeit der Ausströmgeschwindigkeit gilt somit:

$$c_{3,u} = c_3 \cdot \cos\alpha_3$$

Mit Hilfe der Umfangsgeschwindigkeit lässt sich nun die Formel für die Verlusthöhe herleiten. Hierbei ist zu beachten, dass die Verlusthöhe negativ ist, wodurch sich allerdings kein Energiehöhenzuwachs ergibt. Vielmehr ist die Flächenänderung $\frac{dA_z}{d\varphi}$ negativ, sodass tatsächlich ein Energieverlust berechnet wird:

$$\boxed{h_{V,a2} = -\frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{dA_z}{d\varphi} \cdot (c_{3,u} - u_a) \cdot u_a \cdot d\varphi}{g \cdot A_z}} \tag{11}$$

Weiterhin benötigt man für die Berechnung des dynamischen Verlusts die relative Austrittsgeschwindigkeit w_3, die über die Kontinuitätsgleichung hergeleitet werden kann.

$$w_3 = \sqrt{2 \cdot g \cdot s}$$

s ist hierbei die Überfallhöhe über die Zellenaustrittskante und wird berechnet über:

$$s = \left(\frac{1}{\frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot \left(-\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot \frac{dA_z}{d\varphi} \right) \right)$$

Wird die Austrittskante aus der Zelle scharfkantig ausgebildet, wird hiermit der Ausfluss gehemmt. Dadurch steigt die Überfallhöhe s und die Geschwindigkeit w_3 nimmt zu. Durch den Anstieg von w_3 sinkt die Umfangskomponente der Ausströmgeschwindigkeit $c_{3,u}$, weshalb der dynamische Verlust kleiner wird.
Alternativ lässt sich der dynamische Verlust auch näherungsweise mit

$$\boxed{h_{V,a2} = 0,8 \cdot \frac{u_a^2}{2 \cdot g}} \tag{12}$$

angeben, da die exakte Berechnung nach Gl. (11) recht aufwändig ist. In Abb. 8 sind die einzelnen Komponenten für die Berechnung dargestellt.

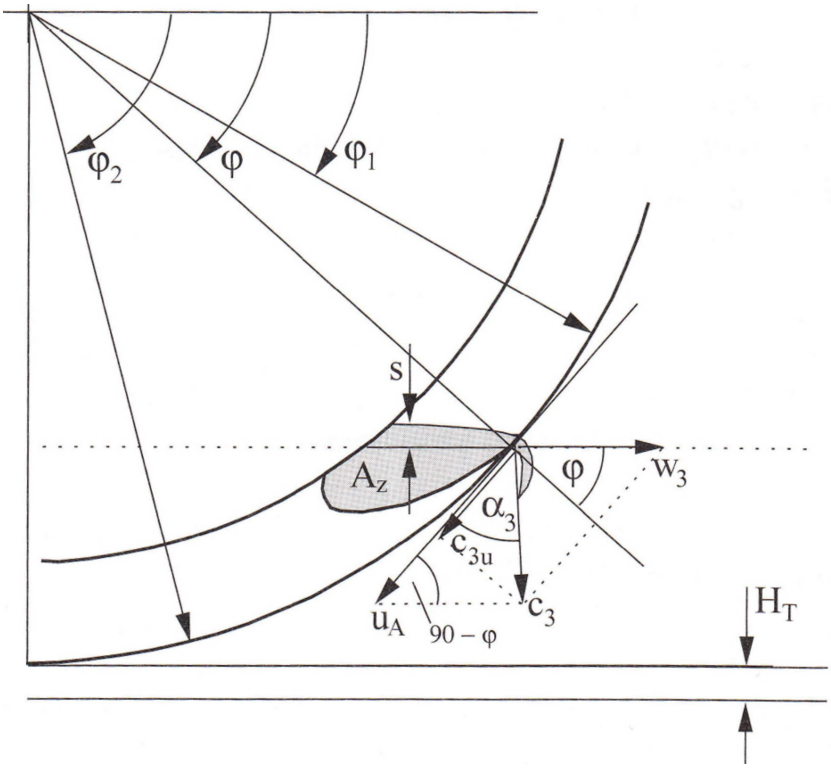


Abb. 8: Dynamischer Verlust beim Austritt von Wasser aus der Zelle (aus [1], S.62)

2.6. Freihang und Waten

Zusätzlich zu den bisherigen Verlusten gibt es zusätzlich einen Verlustanteil durch das sog. Waten. Dieser Effekt tritt auf, wenn das Wasserrad in das Unterwasser eintaucht. Die Verlusthöhe $h_{V,a3} = H_T$ variiert je nach Unterwasserspiegel. Der Unterwasserspiegel ändert sich mit dem Durchfluss des Wasserrades, sodass bei großem Durchfluss ein größerer Verlust durch Waten entsteht. Der Verlust durch Waten kann mit einem großen Freihang H_T vollständig vermieden werden, allerdings verringert sich bei einem großen Freihang der Durchmesser des Rades.

Nachdem nun alle Berechnungen theoretisch erläutert wurden, wird mit der Grundlagensammlung fortgefahren, um konkrete Werte für die Bemessung des Wasserrades und den zugehörigen Bauteilen zu erhalten.

3. Projektstandort

3.1. Lage

Etwa 3 km nördlich von Friedrichshafen liegt das Dorf Ittenhausen, das zur Gemeinde Ailingen gehört. In der Rotachstr. 1 befindet sich das historische Gebäude der Mühle. Zum Gelände gehört der inzwischen brach liegende, etwa 270 m lange Oberwasserkanal für die Wasserentnahme aus der Rotach, sowie der ca. 30 m lange Unterwasserkanal, durch den das Wasser nach einer Dükerung unter der Hauptstraße zurück in die Rotach fließt. Wie dem Lageplan aus dem Jahre 1824 (Anhang A) zu entnehmen ist, befindet sich die Mühle an einem Knie des Flusses Rotach. Schon früh wurde dieser natürliche Umstand gemeinsam mit der resultierenden Höhendifferenz von etwa 4 m für die Erzeugung von Wasserkraft genutzt, um eine Mühle, ein Sägewerk und ein Elektrizitätswerk anzutreiben.

3.2. Wasserbauliche Geschichte des Standortes

Im Jahre 1198 wurde die Mühle an das Kloster Kreuzlingen durch die habsburgischen Ministralien Wernher und Kuno verschenkt. Dies ist die erste schriftliche Erwähnung der Mühle; sie ist damit auch die älteste Mühle im Stadtgebiet von Friedrichshafen. Es wird allerdings vermutet, dass diese Mühle schon einige Jahre älter ist. Die Wasserkraft der Rotach wurde früher von 22 Mühlen entlang des Flusses genutzt, allein im heutigen Stadtgebiet Friedrichshafens waren 8 Mühlen in Betrieb. Wie genau die Mühle ausgesehen hat, ist nicht überliefert, vermutlich war es eine schlichte Holzhütte mit einem Wasserrad. Da die Rotach heute nachweislich tiefer liegt als damals, gab es häufig Hochwasser, die Schäden anrichteten. Beispielsweise riss 1735 ein Hochwasser das vorhandene Wehr fort, das erst 1860 durch Betonierung ein dauerhaftes Bauwerk wurde. Leider liegen keine konkreten historischen Abflusswerte der Rotach vor, um historische Hochwasser mit Fakten zu unterlegen, sondern nur Beschreibungen, dass es Hochwasser gab.
Baulich von Interesse ist das Jahr 1743, in dem nach einem Hochwasser mit schweren Schäden die Mühle wieder so aufgebaut wurde, wie sie heute noch aussieht.
Bemerkenswert ist, dass die Mühle um die Jahrhundertwende mit mehreren Wasserrädern einen Dynamo antrieb, der 100 Volt Gleichstrom produzierte. Für die

Stromproduktion musste zuerst das angrenzende Sägewerk vom Wasser genommen werden. Der Strom wurde vor Ort mit Hilfe von 50 2-Volt-Batterien gespeichert und in den Orten Ittenhausen und Berg von der Bevölkerung für die Innenbeleuchtung der Wohnhäuser verwendet. In der Chronik des Ortes wird auch die Installation der Leitungen angesprochen:

> *„Es ist bemerkenswert, daß Johann Rauch bereits 1905 eine elektrische Leitung für Licht, in ganz Berg und Ittenhausen, verlegen liess. Geplant und ausgeführt wurde die Leitung bereits um die Jahrhundertwende! Gebaut hatte diese Anlage der erste Elektriker in der ganzen Gegend, Elektroinstallateur Schiele!*
> *Natürlich war die Anlage noch mit etlichen Mängeln belastet, so z.B. durch die Entfernung nach Berg nahm die Stromleitung an Leistung ab, u.s.w. Als erstes hatte „Wengle“ auch einen Elektromotor zum Heuhäkseln. Der Dynamo lieferte Kraft, es mußte aber mit dem Müller Rauch abgemacht werden, daß Wengle seinen Motor erst laufen liess wenn in der Säge wenig Wasserkraft benötigt wurde. Schiele hatte die Zähler in Berg und Ittenhausen abzulesen, die die verbrauchte Strommenge anzeigten.“* [2]

Das Bauamt bemängelte 1908, dass viele bauliche Änderungen gemacht wurden, die nicht angezeigt oder genehmigt waren. Es wurde ein Wasserbautechniker beauftragt, der diese Änderungen herausfinden sollte:

8. *„An den Arbeitsfallen sind in den letzten Jahren verschiedene Veränderungen vorgenommen worden.“*
9. *„Im Jahre 1905 wurde die Säge und im Jahre 1906 der an diese angebaute Dynamoraum neu erstellt.“*
10. *„Im Betrieb sind zur Zeit 4 Wasserräder und zwar dienen 2 dem Betrieb der Mahlmühle, eines dem Betrieb der Säge und eines, das zuletzt eingebaute, zur Erzeugung von elektrischem Licht.“*
11. *„Da weder ein alter Eichpfahl vorhanden, noch ein Festpunkt in den Akten angegeben ist und Veränderungen an der Wehrkrone, den Kanaleinlaßfallenschwellen und an den Arbeitsfallenschwellen vorgekommen sind, lässt sich die alte Wehrkronenhöhe schwer feststellen. Der Werkbesitzer wird zu veranlassen sein, Pläne und Beschreibungen seines Wassertriebwerks vorzulegen.“[3]*

Im Jahr 1922 wurden 2 Wasserräder durch eine Francis-Turbine der Firma Escher, Wyss & Cie aus Ravensburg ersetzt. Diese Francis-Turbine kostete laut Rechnung vom 12. Juli 1922 95.000 Mark und hatte folgenden Kennwerte:

Δh	=	4,07 m	Leistung	=	Wirkungsgrad
Q	=	360 l/s	15 PS (11,03 kW)	=	78%
Nennleistung	=	15 PS	11,3 PS	=	79%
Umdrehungen	=	260 U/min	7,5 PS	=	75%

Tab. 4: Kennwerte der alten Francis-Turbine

Der Wirkungsgrad der Turbine von 78 % unter Volllast war zur damaligen Zeit ein vergleichsweise guter Wirkungsgrad. Heutige Francis-Turbinen haben einen Wirkungsgrad von über 90 %.
Interessant hierbei ist, dass die Genehmigung für den Umbau zweier Wasserräder zu obiger Francis-Turbine erst 1925 erteilt wurde.
Die Turbine ist heute noch eingebaut, allerdings liefert sie seit 1985 keinen Strom mehr, da der Oberwasserkanal seitdem brach liegt. Auf Abb. 9 ist ein Plan der Turbine zu sehen.

Heutzutage wird die Mühle als Wohn- und Geschäftshaus verwendet; mit einem Wasserrad soll sich die Geschichte und Technik mit moderner Nutzung in Einklang bringen lassen.

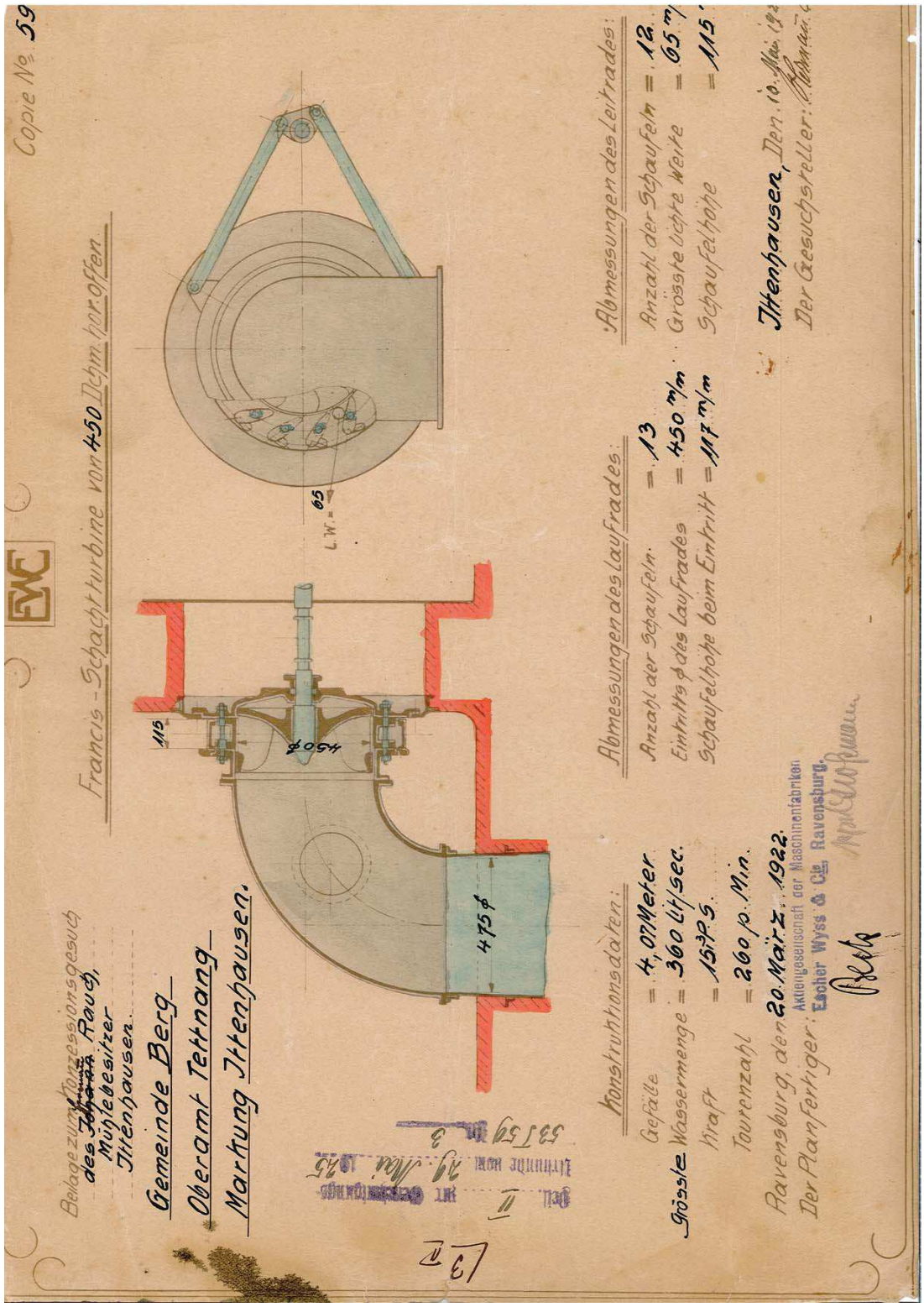


Abb. 9: Daten und Plan der alten Francisturbine, 1922

4. Hydrologie und Bestand

In diesem Kapitel sollen sämtliche Grundlagen, die den Bereich der Hydrologie umfassen, erarbeitet und erläutert werden. Die Hydrologie umfasst die Analyse von Abflüssen der Rotach, die Ermittlung des relevanten Einzugsgebiets, die tatsächlich nutzbaren Wassermengen nach Abzug des Fischpasses und die Erstellung von Jahresganglinie und Dauerlinie für die grafische Auswertung. Zusätzlich wurde die vorhandene Zuleitung vermessen und die Höhendaten analysiert.

4.1. Abflussdaten

Die Rotach mündet in Friedrichshafen in den Bodensee, weshalb sie zum Zuflusssystem des Rheins gezählt wird. Sie entspringt bei Wilhelmsdorf im Landkreis Ravensburg und mündet nach etwa 39 km in Friedrichshafen in den Bodensee. Sie entspringt auf etwa 620 müNN und erreicht an ihrer Mündung 395 müNN. Dabei entwässert sie ein Gebiet von 132 km^2. Ihre GWK ist die DE:21552. Aus dem DGJ 2009 [4] lassen sich die wichtigsten Abflusswerte und Pegeldaten entnehmen:

NQ	Niedrigstes Niedrigwasser	0,113 m^3/s	24.08.2003
MNQ	Mittleres Niedrigwasser	0,345 m^3/s	
MQ	Mittlerer Abfluss	1,83 m^3/s	
MHQ	Mittleres Hochwasser	34,7 m^3/s	
HQ	Höchstes Gemessenes Hochwasser	75,9 m^3/s	22.09.1968

Tab. 5: Hauptwerte der Rotach

Wie Tab. 5 zu entnehmen ist, schwankt der Abfluss sehr stark. Dies muss vor allem in Relation zu dem vergleichsweise kleinen Gewässer gesehen werden, in dem eine Abweichung vom MQ von 1 m^3/s fast 50 % des Abflusses ausmachen.

4.2. Einzugsgebiet

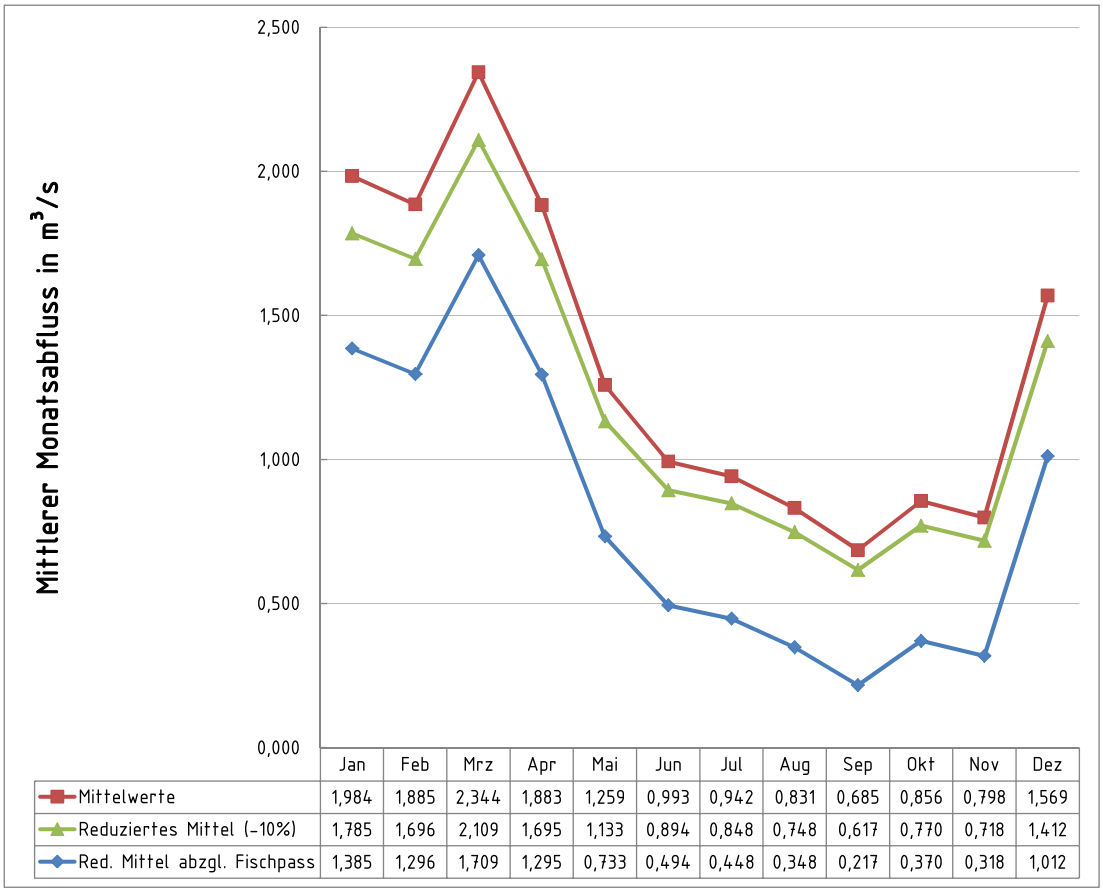
Das EZG der Rotach ist 132 km^2 groß. Der Projektstandort befindet sich, verglichen mit dem gesamten EZG, an dessen Ende. Da sich der Pegelstandort

Friedrichshafen näher an der Mündung befindet als der Projektstandort, müssen die Entfernungen und die an die Rotach angeschlossenen Flächen für die Pegeldaten und ihre Auswertung berücksichtigt werden. Die Rotach passiert von der Quelle bis zur Mündung dünn besiedeltes Gebiet mit vielen Wald- und Wiesenflächen. Einzig Friedrichshafen stellt eine größere abflusswirksame Fläche dar, allerdings ist diese Fläche im Vergleich zum gesamten EZG sehr gering. Zusätzlich wird Friedrichshafen über zwei Flüsse entwässert (Rotach und Mühlbach), sodass hier nicht maßgebende Abflüsse zustande kommen. Aus den genannten Gründen wird eine Reduzierung des Abfluss vom Pegelstandort Friedrichshafen um 10 % als ausreichend genau angesehen, um damit am Projektstandort Ittenhausen auf ausreichende Abflussmengen zuzugreifen. In Abb. 10 ist eine grobe Darstellung des EZG (rote Umrandung) zu sehen.

Abb. 10: Einzugsgebiet

4.3. Abflussanalyse

Für die Auswertung der vorhandenen Abflussmengen im Jahresgang sowie der Erstellung der Dauerlinien sind Pegeldaten notwendig. Da der Standort Ittenhausen nicht über einen eigenen Pegel verfügt, muss hier über das Einzugsgebiet vorgegangen werden. Der nächstgelegene Pegel befindet sich etwa 5 km flussabwärts in Friedrichshafen, ca. $1,2$ km von der Mündung entfernt. Mit Hilfe der dort gesammelten Daten wird die Auswertung und Analyse erfolgen, welche Wassermengen zur Nutzung zur Verfügung stehen.
Aus dem DGJ und aus Daten, die die Untere Wasserbehörde in Friedrichshafen zur Verfügung gestellt hat, hat der Autor die Daten der Jahre 2003-2011 gesammelt und ausgewertet. Da zwischen den einzelnen Jahren vergleichsweise große Abflussschwankungen vorhanden waren, die eine exakte Analyse verhindern, wurde aus den Daten jeweils der relevante Mittelwert (Dauerlinien, Ganglinien) gebildet. So lassen sich die auftretenden Schwankungen ausgleichen. Dieser Schritt zeigt somit statistisch sichere Wassermengen an, die der Betreiber nutzen kann.
Aus den vorhandenen Tagesabflüssen wurden monatliche Mittelwerte arithmetisch ermittelt. Wie in Abb. 11 deutlich zu erkennen ist, ist der nutzbare Abfluss in den Wintermonaten deutlich höher als in den Sommermonaten. Dieser Umstand ist von großer Bedeutung für den Betreiber, da mit dem erzeugten Strom das Gebäude beheizt und somit der Verbrauch der vorhandenen 50-kW-Gastherme im Verbrauch reduziert werden soll. Die niedrigen Abflüsse in den Sommermonaten resultieren zwar in geringerem Stromertrag, aber selbst mit der geringen Wassermenge lässt sich das Wasserrad betreiben. Nicht zu vernachlässigen ist hier auch der Aspekt des Schaurads; solange Wasser vorhanden ist, dreht sich das Rad und kann dadurch das ganze Jahr über in dieser Hinsicht Wirkung erzielen.
In Abb. 11 sind 3 Ganglinien erkennbar; hierbei handelt es sich um die Ganglinie am Pegel Friedrichshafen (rot), eine um 10% reduzierte Ganglinie, die dem Standort Ittenhausen entspricht (grün), und um die tatsächlich nutzbare Wassermenge nach Abzug des dortigen Fischpasses, der mit 0,4 / bemessen wurde (blau).
Die Daten aus Anhang B wurden auch in einer Dauerlinie in Anhang B ausgewertet. Eine Dauerlinie zeigt grafisch die Anzahl der Über- oder Unterschreitungstage eines Durchflusses an. Hier lässt sich sehr gut die extreme Bandbreite der Abflüsse ablesen, diese reichen von $0,24$ m^3/s bis $28,8$ m^3/s. Da die gesamte Darstellung sehr unübersichtlich ist, wurden diese Daten ab 300 Unterschreitungstagen nochmals in Abb. 12 grafisch aufbereitet. Es wird deutlich, dass die zum Antrieb des Wasserrades nutzbare Wassermenge recht gering sein wird, da der Fischpass



	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Mittelwerte	1,984	1,885	2,344	1,883	1,259	0,993	0,942	0,831	0,685	0,856	0,798	1,569
Reduziertes Mittel (-10%)	1,785	1,696	2,109	1,695	1,133	0,894	0,848	0,748	0,617	0,770	0,718	1,412
Red. Mittel abzgl. Fischpass	1,385	1,296	1,709	1,295	0,733	0,494	0,448	0,348	0,217	0,370	0,318	1,012

Abb. 11: Durchschnittliche Ganglinien

zusätzlich die Wassermenge um $0,4$ m^3/s reduziert. Die alte Francis-Turbine (Abb. 9) hatte einen maximalen Durchfluss von 0,36 m^3/s. In Summe mit dem Fischpass ergibt sich so ein Abfluss von 0,76 m^3/s, den die Rotach führen muss. Aus den Unterschreitungstagen (Anhang B) ergeben sich hierfür etwa 110-120 Unterschreitungstage. Für den Schauradbetrieb, welcher in den Sommermonaten von Bedeutung ist, werden etwa 0,1 m^3/s veranschlagt, dies gewährleistet den Schauradbetrieb bei sehr geringen Wassermengen. In den Wintermonaten können nach Abzug des Umgehungsgerinnes etwa 0,9 m^3/s verwendet werden, wie aus Abb. 11 zu entnehmen ist. Überschlägig lässt sich aus den gewählten Abflüssen die Leistung des Wasserrades berechnen. Hierbei gilt $P \approx 8 \cdot H \cdot Q$, was bei 0,9 m^3/s etwa 25 kW entspricht. Im reinen Schauradbetrieb in den Sommermonaten können immerhin noch etwa 3 kW erzeugt werden.

Bezeichnung	Durchfluss	Bemerkung
Q_{Max} (historisch)	0,36 m^3/s	Durchfluss der Francis-Turbine (1925)
$Q_{Min,neu}$	0,1 m^3/s	Für Schauradbetrieb ausreichend
$Q_{Max,neu}$	0,9 m^3/s	Während der Wintermonate

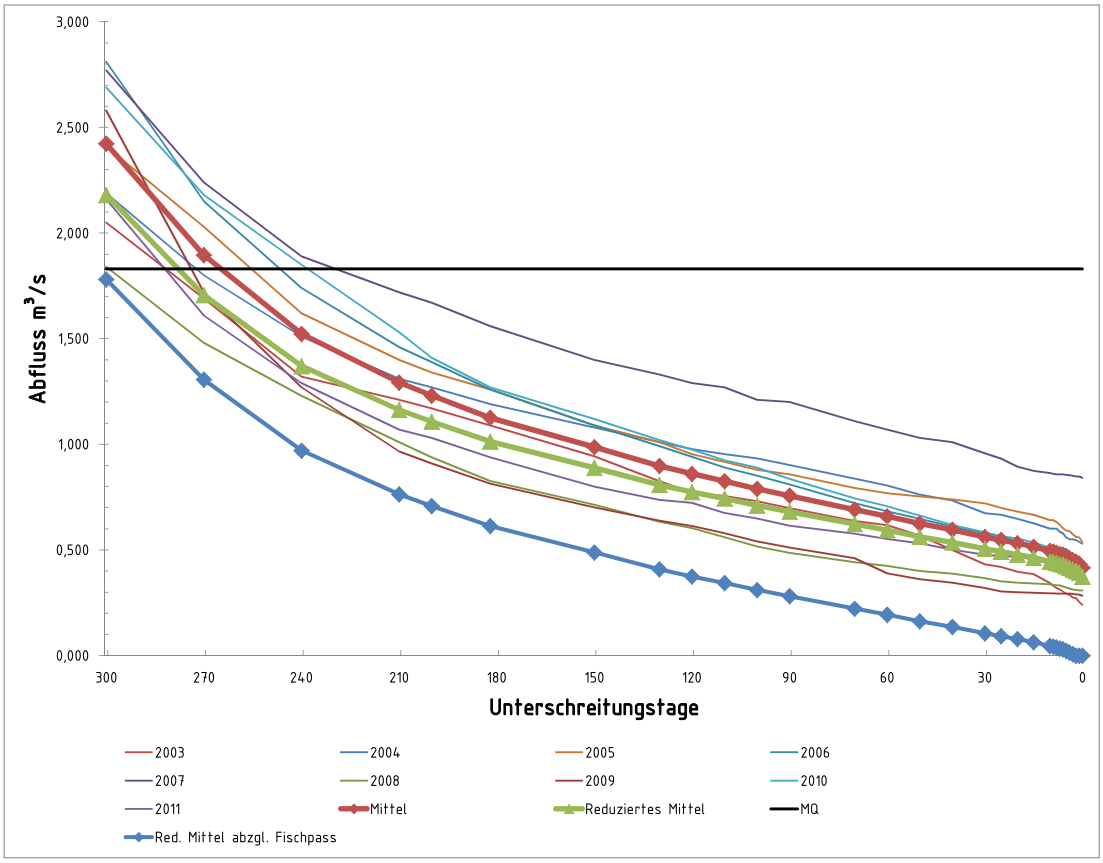


Abb. 12: Vergrößerte Ansicht der Dauerlinien

4.4. Bestand

Da die Mühle bereits seit Jahrhunderten mit Wasser betrieben wurde, ist die alte Zuleitung noch gut sichtbar, die bis ins Jahr 1985 die Francisturbine mit Wasser aus der Rotach versorgte. Auf einer Strecke von etwa 270 m gibt es nur ein sehr geringes Gefälle von etwa 1 ‰. Heutzutage ist der Zuleitungskanal im oberen Ende zugeschüttet, dies wurde im Jahr 2011 mit dem Neubau des Fischpasses ausgeführt. Vom Einlauf bis zu einer Brücke, die auf das Nachbargrundstück führt, ist der Kanal sehr flach, dafür teilweise bis zu 5 m breit. Nach dieser Brücke wird der Kanal deutlich definiert durch hohe Böschungen. Bei der Vermessung war auffällig, dass der Kanal auf dem Mühlengrundstück mit Mauern eingefasst

war und somit einen rechteckigen Querschnitt hat. Allerdings war dieser sehr bewachsen, eine Sohle war nicht auszumachen. Mit einem Hammer wurde ein gebogener Stahlstab in den Boden gerammt. Durch diese Hilfs-Rammsondierung wurde schnell bemerkt, dass sich unter dem Bewuchs teilweise noch Steinplatten befinden könnten, da hier der Rammwiderstand groß wurde. An jedem Messpunkt wurde dieser Versuch durchgeführt, dabei wurde deutlich, dass der Kanal bis zu einem Schütz ausgekleidet war. Das Schütz befindet sich etwa 150 m entfernt vom Absturz. Von diesem Schütz an ist der Kanal mit einer Breite von etwa 5 m ausgesprochen breit und endet fast auf Geländeniveau. Auf dem anschließenden Gelände befindet sich ein Betonwerk, dieser Umstand muss bei der Bemessung beachtet werden, da kein Wasseraustritt aus dem Kanal das Betonwerk überfluten soll.

Oberhalb des Schützes ist mit der hilfsweisen Rammsondierung kein fester Untergrund mehr erfassbar. Diese Art des Ausbaus lässt den Schluss zu, dass mit Hilfe eines zweiten Schützes an der Rotach (heute noch sichtbar) das Wasser abgeleitet wurde und an dem ersten Schütz ein Aufstau erzeugt wurde. Der breite, aber flache Querschnitt diente somit nur als Stauraum und musste folglich auch nicht ausgekleidet werden. Durch das Öffnen des Schützes wurde der ausgekleidete, recht schmale Kanal befüllt und auf das Wasserrad geleitet.

Ein in den 60er-Jahren erbautes Überlaufbauwerk in Mühlennähe (etwa 50 m kanalaufwärts) ist ebenfalls noch sichtbar. Lieferte der Kanal mehr Wasser als mit der Turbine verarbeitet werden konnte, floss dieses durch den Überfall vor Erreichen der Turbine aus dem Kanal, wodurch die Mühle vor Wasserschäden bewahrt werden konnte. Ein Notüberlauf direkt an der Turbine ist ebenfalls noch vorhanden. Auf dessen Höhe soll der zukünftige Wasseraustritt sein.

In Abb. 13 ist der ungefähre Höhenverlauf der vorhandenen Geländemitte des Kanals im Bestand dargestellt. Der Höhenbezugspunkt wurde auf die Oberkante des Wehrs gesetzt (bei 275 m), bei 250 m ist die Auffüllung deutlich zu erkennen. Am Absturzpunkt liegt eine Höhendifferenz von 3,80 m vor, welche für den Bemessung verwendet werden sollen. Diese befinden sich in Höhe des alten Notüberlaufs der Turbine.

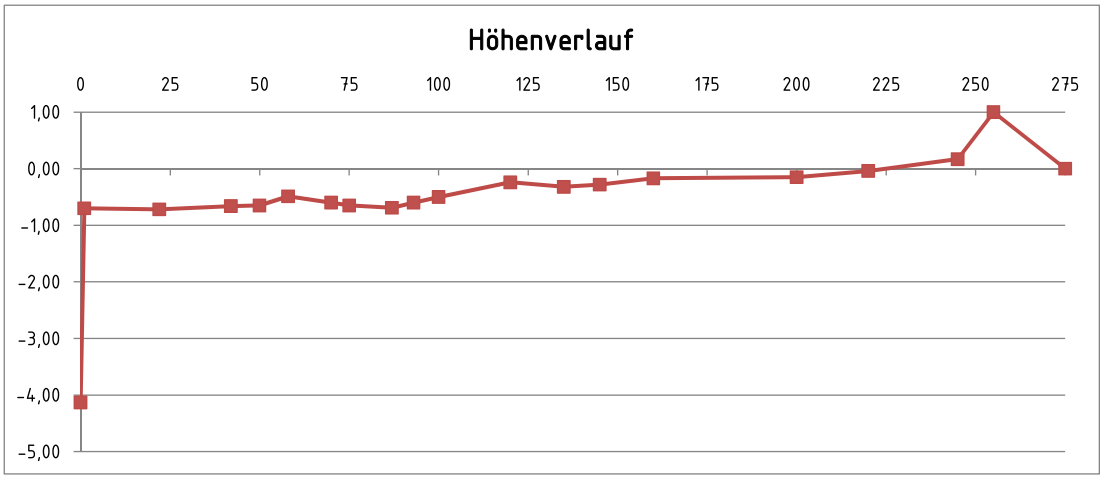


Abb. 13: Höhenverlauf mit der Wehroberkante als Bezugshöhe

4.5. Reaktivierung

Da der Kanal stellenweise entweder komplett zugeschüttet wurde oder durch natürliche Verschlammung zugewachsen ist, muss dieser durchgehend ausgebaggert werden. Anschließend muss nach einer zufriedenstellenden Lösung für die Anwohner und den Betreiber gesucht werden. Für die Reaktivierung des Kanals muss vor allem die niedrige Geländehöhe im Bereich des Betonwerks beachtet werden. Um hier eine ausreichende Sicherung zu erreichen, bieten sich folgende Lösungen an:

1. Im Bereich des Betonwerks muss eine hohe Böschung aufgeschüttet werden, der Kanal fließt dann in einem Einschnitt/Graben als offenes Gerinne.
2. Vom Einlauf bis zur Brücke muss der Kanal mit Betonrohren verrohrt werden, dies gewährt Überflutungsschutz beim Betonwerk und bietet die Möglichkeit der ansprechenden Gestaltung ab der Brücke bis zum Absturz. Die Betonrohre können mit Erde überdeckt werden.
3. Eine Vollverrohrung vom Einlauf bis zum Absturz mit Betonrohren muss gebaut werden. Diese können mit Erde überdeckt werden und fügen sich somit harmonisch in die vorhandene Böschung ein. Zusätzlich ist eine große Freifläche direkt vor der Mühle weiterhin nutzbar.

Somit sind drei Ausbaumöglichkeiten gegeben, wie sich der Oberwasserkanal sichern und gleichzeitig harmonisch in den Bestand eingliedern lässt.
Der Unterwasserkanal, der das Wasser wieder in die Rotach leitet, muss lediglich gereinigt und gegebenenfalls erneuert werden, da hier bereits ein DN 1000

Betonrohr mit ausreichendem Gefälle von etwa 2 % vorhanden ist. Um bei der Maximalwassermenge von 0,9 m^3/s das Rad noch frei bewegen zu können, muss das Wasser unterhalb des Rades schnell abfließen können. Der große Durchmesser des Kanals mitsamt dem vorhandenen Gefälle ist hierbei sehr förderlich. Unterhalb des Rades sollte der Boden mit einem geringen Gefälle betoniert werden. Zusätzlich bietet es sich an, die Flanken mit einer Betonmauer zur direkten Abführung des Wassers in den Kanal zu versehen.
Im Bestand ist auch die bereits angesprochene Francis-Turbine vorhanden, die nach Aussage des Betreibers aus Gründen des Denkmalschutzes und der Logistik am bisherigen Einbauort verbleiben soll. Dieser Umstand ist bei der Planung zu beachten. Gegebenenfalls dürfen geringfügige Anpassungen am Bestand erfolgen, diese schließen das Entfernen von überstehenden Betonbauteilen oder von alten Kanalrohren ein.
Im nachfolgenden Kapitel werden die einzelnen Bauteile bemessen.

5. Bemessung

Mit der gewählten Wassermenge von 0,9 m^3/s und der gemessenen Höhendifferenz von 3,8 m am Absturzpunkt können das Wasserrad und die zugehörigen Bauteile bemessen werden. Der Absturzpunkt soll sich auf Höhe des bisherigen Notauslaufes der Francis-Turbine befinden. Da das Wasserrad das maßgebende Bauteil der Anlage ist, muss dieses zuerst dimensioniert werden. Aus dieser Bemessung ergeben sich dann anschließend die Breite des Einlaufgerinnes und der Oberwasserkanal. Bekannt sind aus den vorhergehenden Kapiteln die Wassermenge und die Fallhöhe.

5.1. Bemessung des Wasserrades

Bekannt sind die Fallhöhe von 3,8 m und die gewählte Wassermenge von 0,9 m^3/s. Aus diesen Angaben lässt sich zunächst das Wasserrad berechnen. Hierbei muss insbesondere die Differenz zwischen Mindestwassermenge und Maximalwassermenge beachtet werden. Auf die technische Lösung für die Steuerung der Wassermenge wird später eingegangen.

1. Auswahl des Wasserrad- und Gerinnetyps
Im ersten Schritt muss der Typ des Wasserrades und des Gerinnes bestimmt werden. Der Wasserradtyp ist, wie aus der Aufgabenstellung zu entnehmen ist, vom Betreiber vorgegeben, es soll ein oberschlächtiges Wasserrad werden. Für die Wahl des Gerinnes stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Aufgrund der vorhandenen geringen Fallhöhe sollte kein offenes Gerinne mit Gefälle gewählt werden. Es ist abzuwägen, ob eine Zuführung mit Schütz oder ein offenes Gerinne die bessere Wahl ist. Jeder Typ hat seine verschiedenen Vor- und Nachteile, die hier nochmals erörtert werden sollen:

1. Zuführung über ein Schütz
   - Vorteile:
     - Gleichbleibende Austrittsgeschwindigkeit
     - Mit Durchflusssteuerung wärterloser Betrieb möglich

  - Bei Vollverrohrung kein Rechen notwendig
  - Verluste einfach kontrollierbar
- Nachteile:
  - Mechanisch aufwändig
  - Wärterloser Betrieb bei offenem Zulaufkanal nicht unbedingt möglich
  - Rechen bei offenem Zulaufkanal notwendig
  - Durch den erforderlichen hohen Wasserdruck muss viel Wasser im Gerinne abgestützt werden

2. Zuführung über offenes Gerinne
   - Vorteile:
     - Einfache Konstruktion
     - Durch zusätzliches Gefälle kann Austrittsgeschwindigkeit erhöht werden
     - Wärterloser Betrieb möglich
   - Nachteile:
     - Fallhöhenverlust bei zusätzlichem Gefälle
     - Bei verschiedenen Wassermengen ändert sich der Eintrittspunkt in das Wasserrad
     - Aufwändige verschiebbare Zungenkonstruktion, um Austrittspunkt zu variieren, wodurch ein konstanter Eintrittspunkt erreicht werden kann

Es wird deutlich, dass die Zuführung über ein offenes Gerinne konstruktiv zwar eine einfachere Lösung möglich macht, allerdings führt diese zu einer ineffizienten Nutzung des Durchflusses. Durch unterschiedliche Wassermengen besitzt das Wasser unterschiedliche Geschwindigkeiten, weshalb es bei einem starren Gerinne an verschiedenen Punkten als Strahl in das Wasserrad eintreten würde. Wird an das Gerinne eine bewegliche Zunge angebaut, kann bei verschiedenen Geschwindigkeiten der Eintrittspunkt konstant gehalten werden, indem bei niedrigem Durchfluss und somit niedriger Geschwindigkeit die Zunge näher an das Wasserrad geführt wird. Bei hohem Durchfluss und hoher Geschwindigkeit wird die Zunge vom Wasserrad weg geführt, sodass der Eintrittspunkt in das Rad konstant bleibt. Diese Lösung ist mechanisch durchführbar, der große Nachteil im Vergleich zu einem Schütz ist allerdings die geringere Fallhöhe, die beim Schütz durch den Aufstau deutlich erhöht werden kann. Bei einem offenen Gerinne kann vollständig

auf einen Rechen verzichtet werden, da sich Schmutzpartikel nicht ablagern, bzw. keine mechanischen Schäden anrichten können.
Für die Zuführung über ein Schütz spricht die Vergrößerung der Fallhöhe, sowie der konstante Eintrittspunkt in das Rad bei allen Geschwindigkeiten. Die Notwendigkeit eines Rechens lässt sich durch eine vollständige Verrohrung der Zuleitung von der Rotach bis zum Schütz umgehen. Bei dieser Lösung wird eine Eintrittsmöglichkeit von Blättern oder Ästen vollständig verhindert, sodass kein Rechen benötigt wird. Zusätzlich verhindert eine Verrohrung auch ein Übertritt der Zuleitung von der Rotach, sodass das angrenzende Betonwerk nicht überflutet werden kann. Da sich auf der gegenüberliegenden Seite des Betonwerks etwas erhöht ein Recyclinghof befindet, wird durch eine Vollverrohrung ebenfalls ein Eintreten von Schutt und Unrat in die Zuleitung verhindert. Aus den oben aufgeführten Gründen wird eine Zuführung über ein Schütz in Verbindung mit einer Vollverrohrung empfohlen. Auf die Vollverrohrung soll in Kap. 5.3 genauer eingegangen werden.

2. Annahme der Umfangsgeschwindigkeit u_a

Für die Bemessung muss eine Umfangsgeschwindigkeit angenommen werden. Die angenommene Umfangsgeschwindigkeit $u_{a,ang}$ wird zwischen $1,5$ m/s und $2,2$ m/s gewählt. Bei kleinem Gefälle wird eine kleinere Geschwindigkeit gewählt, bei großen Gefällen soll die Geschwindigkeit groß sein. Gewählt wird $u_{a,ang} = 2$ m/s.

3. Annahme des Füllfaktors ε

Der Füllfaktor der Zellen geht in die Radbreite mit ein. Allerdings beeinflusst er auch die Verluste beim Ein- und Austritt. Ein großer Wert von ε veringert die Radbreite und die Austrittsverluste. Gleichzeitig werden jedoch die Eintrittsverluste vergrößert. Für den Füllfaktor wird $\varepsilon = 0,4$ gewählt.

4. Annahme der Druckhöhe

Da eine Zuführung mit einem Schütz geplant ist, muss hierfür noch die Druckhöhe angenommen werden. Eine hohe Druckhöhe erlaubt eine geringe Schützöffnung, wodurch der austretende Strahl schmal gehalten wird. Allerdings muss beachtet werden, dass eine hohe Druckhöhe in einer großen Masse resultiert, die innerhalb des frei über dem Wasserrad stehenden Gerinnes abgestützt werden muss. Bei

einer Zuführung über ein Schütz sollte ein hoher k_{st}-Beiwert vorhanden sein, weshalb eine Anordung aus Stahl oder Edelstahl einem Holz- oder Betongerinne vorzuziehen ist. Zudem erlaubt eine stählerne Anordnung ein genaueres Arbeiten mit dem Schütz, da hier teilweise geringe Öffnungen notwendig sind. Für die Druckhöhe wird $h_{D2} = 0,7$ m gewählt. Um die auftretenden Verluste hierbei gering zu halten, muss die Schützkante gut ausgerundet werden.

5. Berechnung der Kranzbreite a

Aus der Theorie ist bekannt, dass das Wasser in den Zellen nahe des Randes seinen Schwerpunkt haben soll, um das größtmögliche Moment zu erzeugen. Die Kranzbreite a definiert die obere und untere Begrenzung der Zelle. Sie soll sich im Bereich zwischen

$$a = \frac{1}{6} \cdot H^{\frac{1}{3}} \cdots \frac{1}{4} \cdot H^{\frac{1}{3}}$$

befinden. H ist hierbei der geodätische Höhenunterschied zwischen dem gestauten Oberwasserspiegel und dem Unterwasserspiegel. Bei einer Höhendifferenz von etwa 4 m ergibt sich hierfür ein Wert für die Kranzbreite zwischen $0,26$ m und $0,39$ m. Es wird gewählt: $a = 0,35$ m.

6. Radien

Die Radien des Rades werden in Abhängigkeit der Fallhöhe berechnet. Von der Fallhöhe H wird die Druckhöhe h_{D2}, der Tiefgang H_T und der Abstand vom Gerinne zum Scheitelpunkt δ_Z abgezogen. Der Tiefgang beträgt 0 cm und ist somit vernachlässigbar. Durch die Vermessung ist bereits bekannt, dass ein Rad mit einem Durchmesser von $3,4$ m Platz hätte, um noch genug Platz für den Unterwasserspiegel zu haben. Hieraus resultiert für den Außenradius $R_a = 3,4/2 = 1,7$ m, für den Innenradius gilt $R_i = R_a - a = 1,7 - 0,35 = 1,35$ m. Zusätzlich werden 2-5 cm für den Spritzschutz am Kranz vorgesehen, allerdings ist diese Radiusvergrößerung irrelevant für die eigentliche Bemessung.

7. Bestimmung der Drehzahl n

Die Drehzahl wird bestimmt durch

$$n = \frac{u_{A,ang} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_a} = \frac{2 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1,7} = 11,23 \text{ U/min}$$

Aus der Drehzahl lässt sich nun die Umfangsgeschwindigkeit u_a des Außenradius ermitteln:

$$u_a = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_a \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,7 \cdot 11,23}{60} = 1,99 \text{ m/s}$$

8. Bestimmung der Radbreite B_R

Die Radbreite errechnet sich aus

$$B_R = \frac{Q_{max}}{\varepsilon \cdot a \cdot u_A} = \frac{0,9}{0,4 \cdot 0,35 \cdot 1,8} = 2,57 \text{ m}$$

und wird anschließend auf einen gerundeten Wert gebracht. Hieraus resultiert eine Radbreite von $B_R = 2,6$ m.

9. Breite b_0 des Zulaufs

Das Zulaufgerinne soll etwa 20 cm schmaler sein als die errechnete Radbreite.

$$b_0 = B_R - 0,2 = 2,6 - 0,2 = 2,4 \text{ m}$$

Der Grund hierfür ist mit der Lärmbelastigung und der Erhöhung des Wirkungsgrads begründbar. Ist das Zulaufgerinne schmaler als das Rad, kann die in den Zellen vorhandene Luft beim Wassereintritt zu den Seiten hinaus entweichen, wodurch die Geräuschkulisse etwas verringert wird. Durch den Luftauslass erhöht sich zusätzlich der Wirkungsgrad der Anlage. Bei breiten Gerinnen wird zusätzlich empfohlen, den Strahl zu teilen, damit die Luft auch aus den mittleren Radbereichen besser entweichen kann. Näheres hierzu wird in der Schützbemessung erläutert.

10. Vorläufige Teilung $t_{Z,a}$

Die vorläufige Teilung ergibt sich aus

$$t_{z,a} = 0,75 \cdot a + 0,1 \text{ m}.$$

Es ergibt sich hieraus $t_{z,a} = 0,75 \cdot 0,35 + 0,1 = 0,3625$ m. Dieses Ergebnis ist allerdings nur vorläufig und wird im nachfolgenden Schritt exakt berechnet.

11. Bestimmung der Anzahl der Zellen und die zugehörige Teilung

Die Zellenzahl ergibt sich aus der vorläufigen Teilung der Zellen:

$$t_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_a}{t_{z,a}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,7}{0,3625} = 29,47$$

Mit dem soeben ermittelten Wert werden anschließend aus einer Tabelle die Zellenzahl mitsamt dem zugehörigen Teilungswinkel abgelesen. Ein Auszug aus Tab. 3 zeigt, dass die Zellenanzahl $z = 30$ ist, woraus sich die tatsächliche Zellteilung berechnen lässt:

$$t_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_a}{z} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,7}{30} = 0,356$$

12. Bestimmung der Form der Zelle

Für das Wasserrad werden Blechschaufeln vorgeschlagen, da sie eine größere Wassermenge in den einzelnen Zellen erlauben als Holzzellen. Zudem ist eine effizientere Ausnutzung durch Ausrundung der Zellwände möglich als in Holzzellen, die nur grob gekantet werden können. Es gilt:

$$\widehat{J_1E} = 1,25 \cdots 1,3 \cdot t_z = 0,44 \cdots 0,46 \text{ m}$$

$$\widehat{JF} = 0,33 \cdots 0,4 \cdot a = 0,12 \cdots 0,14 \text{ m}$$

Das Geradenstück JF muss durch einen Halbkreisbogen ersetzt werden, um den Wirkungsgrad zu erhöhen. Mit den ermittelten Daten lässt sich die Form einer Zelle aufzeichnen. Eine Zelle ist in Abb. 14 dargestellt.

13. Bestimmung des Schwerpunktradius R_S

Der Radius des Schwerpunktes berechnet sich aus

$$R_s = \sqrt{\frac{Q \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot B} + (R_a - a)^2} = \sqrt{\frac{0,9 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 11,23 \cdot 2,7} + (1,7 - 0,35)^2} = 1,45 \text{ m}$$

Die Umfangsgeschwindigkeit im Schwerpunkt leitet sich daraus ab:

$$u_s = R_s \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 11,23 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 11,23}{60} = 1,7 \text{ m/s}$$

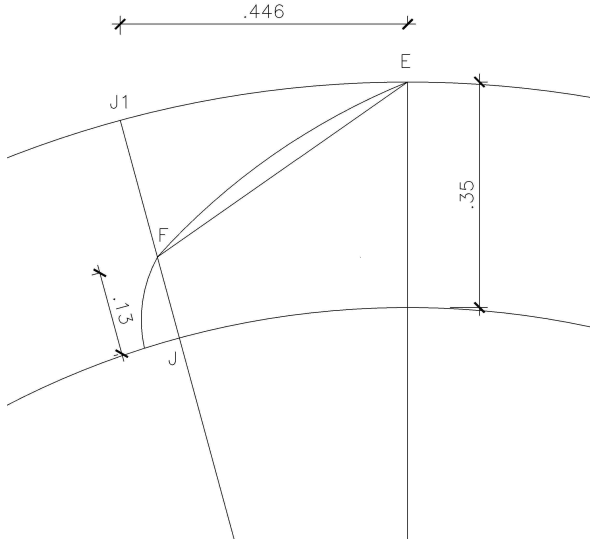


Abb. 14: Konstruktion der Zellen

Aus den bisher berechneten Werten lässt sich das Wasserrad vollständig aufzeichnen, ein Auszug ist in Abb. 15 zu finden.

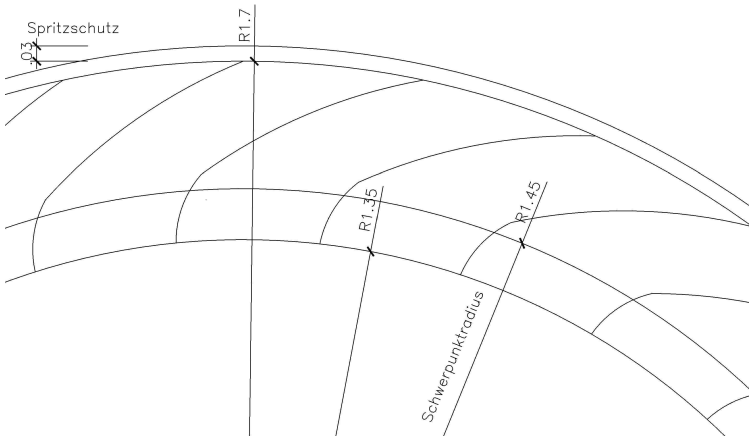


Abb. 15: Konstruktionszeichnung des Wasserrades

5.2. Zuführung durch ein Schütz

Das Wasserrad soll über ein Schütz beaufschlagt werden. Die Gerinnebreite am Schütz wurde in Kap. 5.1 mit $b_0 = 2,4$ m angegeben. Für die Zuführung ist eine konstante Druckhöhe $h_{D2} = 0,7$ m gegeben. Dadurch wird eine konstante Austrittsgeschwindigkeit aus dem Schütz erreicht, die bei jeder Wassermenge gilt. Die Steuerung erfolgt über ein Schütz, je nach Schützhöhe fließt eine bestimmte Wassermenge mit konstanter Geschwindigkeit aus dem Schütz in das Wasserrad. Um die Kontraktion des Wasserstrahls gering zu halten, wird als Schützbeiwert $\varphi = 0,9$ gewählt. Dies impliziert allerdings eine gute Ausrundung der Schütztafel in Anströmrichtung. Es ergibt sich somit für die Austrittsgeschwindigkeit

$$c_{2A} = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{D2}} = 0,85 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot 0,7} = 3,33 \text{ m/s}$$

und für die Schützöffnung, die gleichzeitig die Strahldicke darstellt, ein s_0 von:

$$s_{0,900} = \frac{Q}{b_0 \cdot c_{2A}} = \frac{0,9}{2,4 \cdot 3,33} = 0,11 \text{ m}$$

Dies ist noch unterhalb des in [1] bestimmten Wert von $s_0 < 0,125$. Durch das Schütz muss ebenfalls auch die Mindestwassermenge von 100 l/s fließen. Da Geschwindigkeit und Druckhöhe hierbei gleich bleiben, gilt:

$$s_{0,100} = \frac{0,1}{2,4 \cdot 3,33} = 0,01 \text{ m}.$$

Eine Öffnungsweite von 1 cm ist sehr gering und somit auch störungsanfällig. Es wird eine Teilung des Schütz vorgeschlagen, um bei Niedrigwasser eine ausreichend hohe Schützöffnung zu gewährleisten. Eine Schützbreite von 1 m ist erforderlich, um bei der Mindestwassermenge eine Öffnung von 3 cm zu erreichen. Aus Symmetriegründen wird eine Teilung des Schützes in 3 Felder mit den Maßen 90 - 60 - 90 cm vorgeschlagen. Dadurch lassen sich die Wassermengen in Abhängigkeit von dem vorhandenen Durchfluss sehr leicht mit einer automatischen Schützsteuerung steuern. Die beiden äußeren 90-cm-Schütze sind gleichzeitig zu bewegen, das innere 60 cm breite Feld lässt sich getrennt von den äußeren bewegen. Je nach Durchfluss werden die Schützfelder bewegt, um eine außreichend große Schützöffnung zu erreichen. Daraus ergeben sich die Modi für die Steuerung, die in Tab. 6 aufgelistet sind. Die Teilung hat zusätzlich den positiven Nebeneffekt, dass die Strahlen bei voller Beaufschlagung geteilt werden, sodass auch zwischen den Strahlen Luft

entweichen kann. Um diese Teilung und die Radbreite aneinander anzupassen, wird für die Radbreite $2,7$ m gewählt, da davon ausgegangen wird, dass die Führungen für die einzelnen Felder des Schütz in der Gesamtbreite 10 cm benötigen. Dadurch wird das Schütz $2,7$ m breit, besitzt aber aufgrund der Strahlteiler die gleichen Durchflüsse wie vorher berechnet. Um die Verluste durch Verwirbelungen zu vermeiden, muss das Schütz im unteren Bereich bis etwa 20 cm geschlitzt sein und in einer Führung laufen, die eben mit den Schützteilern abschließt. Nähere Angaben sind den Plänen J und K im Anhang zu entnehmen.

Feld	90 (Links)	60 (Mitte)	90 (Rechts)
Öffnungsweite in cm Durchfluss in m^3/s	0	4,9 0,1	0
	0	9,9 0,2	0
	3,3	0 0,2	3,3
	0	10,8 0,6	0
	8,1	8,1 0,6	8,1
	11,3	11,3 0,9	11,3

Tab. 6: Modi der Schützsteuerung

Es ist zu beachten, dass aufgrund der Stauhöhe von 70 cm eine Wasserlast von etwa 3500 kg auf einer Gesamtbreite von $2,8$ m abgestützt werden muss.

5.3. Zulauf

Um das Wasser aus der Rotach zum Wasserrad zu befördern, muss der Zulauf bemessen werden. Es wird hierbei ausschließlich auf die Variante der Vollverrohrung eingegangen, da sie die größte Hochwassersicherheit für das angrenzende Betonwerk bietet. Vorhanden ist eine Länge von etwa 270 m sowie eine Höhendifferenz von etwa 70 cm. Daraus resultiert ein Gefälle von $I_E = 2,6$ ‰. Mit diesen Werten kann in den hydraulischen Tabellen [5] nach passenden Rohrdurchmessern gesucht werden. Für die Rohrreibung in einem Stahlbetonrohr soll $k_b = 0,5$ mm gelten. Für einen Durchfluss von 0,9 m^3/s und einer Stauhöhe am Schütz von $h_{D2} = 0,7$ m ist eine Zuleitung aus zwei parallel verlegten DN 700 Stahlbetonrohren die sinn-

vollste Lösung. Durch die Stau- und Druckhöhe $h_{D2} = 0,7$ m am Schütz und dem Rohrdurchmesser von ebenfalls $0,7$ m ergibt sich ein Dauerstau in beiden Rohren. Innerhalb der Rohre ist eine ausreichend große Geschwindigkeit vorhanden, um auch bei Mindestwasser (0,1 m^3/s) eine Versandung zu verhindern.
Im Bereich der Brücke auf Abb. 21 im Anhang C ist aller Voraussicht nach keine ausreichende Überdeckung vorhanden, da diese Stelle mit LKW befahrbar bleiben muss. Es wird vorgeschlagen, die Rohre hier dem bisherigen Verlauf anzupassen und unter der Brücke durchzuführen. Die hierbei auftretenden hydraulischen Reibungsverluste sind vernachlässigbar, da beide Rohre dauerhaft eingestaut sind. Der exakte Verlauf der Leitungen muss vor Ort festgelegt werden, da der Leitungsverbund eine Breite von etwa 2 m besitzt, die nicht an allen Stellen problemlos auf dem verfügbaren Baugrund zur Verfügung steht. Die hierbei eventuell auftretenden hydraulischen Verluste sind vernachlässigbar klein, da der Aufstau am Schütz Verluste innerhalb der Rohrleitung ausgleicht. Aus landschaftsgestalterischen Gründen sollen die Rohre mit Erde überdeckt werden, um sie an die Umgebung anzupassen.
Der Zulauf geht mit einer Aufweitung in das $2,8$ m breite Zuführungsgerinne über, das vollständig überdeckt sein soll. Lediglich im unmittelbaren Bereich des Schützes ist eine etwa 50 cm breite Öffnung vorzusehen, damit ein Befahren mit einer Kamera möglich ist um eventuelle Schäden aufzuspüren. Vor dem Schütz soll eine kleine Öffnung einen Überlauf markieren, der ab Überschreiten der 70-cm-Marke anspringt. Das hierbei austretende Wasser kann über eine Rampe seitlich am Rad vorbeigeleitet werden. Aus den beiden DN 700 Rohren ergibt sich ein benötigter Platzbedarf von etwa 2 m in der Breite.
Der Einlauf an der Rotach erfolgt über ein Sammelbecken, das mit einem Rechen geschützt werden muss. Ein Schütz soll hier den Abfluss in die Zuleitung regulieren, bevor nach diesem Schütz die geplanten zwei DN 700-Stahlbetonrohre beginnen. Um hier schon einen akzeptablen Wasserstand zu erreichen, wird vorgeschlagen, dass das Wehr um etwa 20 cm erhöht wird. Zusätzlich kann das gesamte Gefälle der Zuleitung verringert werden, sodass jeweils 5 m Länge vollständig eben verlaufen können, in denen sich der Stau ausbilden soll. Durch diese Maßnahme bildet sich im Kanal stellenweise ein druckrohrähnlicher Zustand aus. Näheres ist den Plänen (F, G) und Abb. 20 aus dem Anhang zu entnehmen.

5.4. Weitere Berechnungen

Nachdem nun das Rad und die Zuführung über ein Schütz getrennt voneinander bemessen wurden, müssen sie noch zusammengeführt werden. Hierbei ist der Eintrittspunkt des Wasserstrahls zu berechnen. Durch eine tabellarische Auflistung der Gl. (4) ergeben sich für die Flugbahn folgende Werte, welche in Abb. 16 grafisch dargestellt werden.

x_A in m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
z_A in m	-0,004	-0,018	-0,040	-0,071	-0,110	-0,159	-0,216	-0,282

Für den Ursprungspunkt wurde die Strahlmitte bei voller Beaufschlagung am Austrittspunkt gewählt.
Aus den ermittelten Werten wurde die Flugbahn grafisch konstruiert, anschließend wurde ein Modell des Wasserrades in CAD solange verschoben, bis der Eintrittspunkt ideal gelegt war und die Strahlbreite zwischen zwei Zellwände passte. Dadurch ergibt sich eine Distanz vom Scheitelpunkt des Wasserrades bis zum Austrittspunkt von $51,45$ cm und ein Eintrittspunkt im Abstand von 69 cm.

Konstruktiv ist hierbei zu beachten, dass der Austrittspunkt sehr weit weg vom Scheitelpunkt liegt. Nach einer vollständigen Entleerung des Kanals muss zuerst der vollständige Aufstau hergestellt werden, bevor das Schütz geöffnet werden darf, da ansonsten das Wasser nur sehr langsam austritt und sich in rückwärtig gelagerte Zellen begibt. Im Extremfall kann sich das Wasserrad dann in die falsche Richtung drehen. Aus diesem Grund sollte eine Anlaufhilfe in das Rad integriert werden.

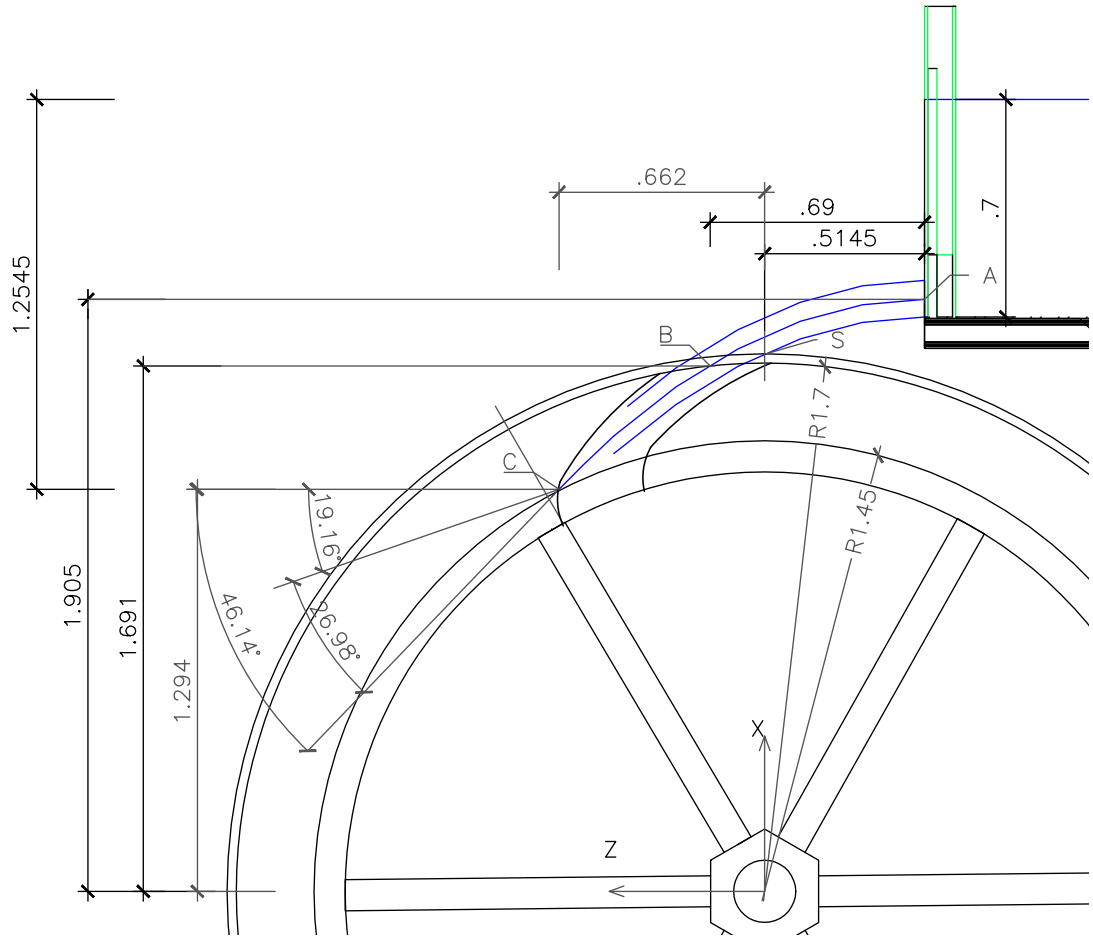


Abb. 16: Eintrittspunkt des Wassers in das Rad

6. Berechnung der Verluste

Wie in Kap. 2.5 bereits angesprochen, müssen auch die Verluste berechnet werden. Erst nach dieser Berechnung kann die Leistung des Wasserrades ermittelt werden. Im Kap. 2.5 werden drei Arten der Verluste genannt, jeder Einzelne ist von großer Bedeutung für die Leistung. Sämtliche Verluste treten dauerhaft auf und können somit nicht vernachlässigt werden.

6.1. Einlaufverlust

Den Verlust, der beim Eintritt in die Zelle auftritt, nennt man Einlaufverlust. Bei einer gut ausgerundeten Blechzelle wird hierbei der Strahl vollständig umgelenkt, der Verlust wird somit geringer als bei einer Holzzelle, die den Strahl nicht umlenkt. Der Verlust berechnet sich mit

$$h_{V,e1} = H_C - K \cdot \frac{(c_{2C,u} - u_s) \cdot u_s}{g}$$

Der Wert H_C lässt sich aus der Abb. 16 ablesen, er liegt bei $H_C = 1,25$ m. Die Geschwindigkeit im Schwerpunktradius beträgt $u_s = 1,7$ m/s, wie im obigen Abschnitt errechnet wurde. Für den Beiwert K, der die Ausrundung der Zelle beschreibt, wird ebenfalls der weiter oben bestimmte Wert $K = 1,8$ gewählt. Für die Berechnung des Einlaufverlustes muss die Eintrittsgeschwindigkeit am Punkt C bestimmt werden. Hierfür werden die Koordinaten der Ein- und Austrittspunkte A und C benötigt, die sich aus Abb. 16 ablesen lassen. Der Koordinatenursprung liegt hierbei in der Radmitte. Es gilt somit $x_C = 0,662$ m und $z_C = 1,905$ m, für den Austrittspunkt A gilt $x_A = -0,51$ m. Die gesamte Höhe vom Oberwasserspiegel bis zum Eintrittspunkt wird als $H_C = 1,25$ m angegeben. Die Austrittsgeschwindigkeit c_{2A} soll gleich der Geschwindigkeit in X-Richtung sein, somit gilt $c_{2A} = c_{2C,x} = 3,33$ m/s. Mit

$$t = \frac{x_C - x_A}{c_{2A} \cdot \cos\gamma} = \frac{0,662 - (-0,51)}{3,33 \cdot \cos 90} = 0,353 \text{ s}$$

wird die Zeit, die ein Wasserteilchen vom Austritt A bis zum Schnittpunkt C benötigt, berechnet. Nun lassen sich die Geschwindigkeiten in X- und Z-Richtung des Punktes C angeben:

$$c_{2C,x} = c_{2A} \cdot \cos\gamma = 3,33 \text{ m/s}$$

$$c_{2C,z} = -g \cdot t + c_{2A} \cdot \sin\gamma = -9,81 \cdot 0,353 = -3,47 \text{ m/s}$$

$$c_{2C} = \sqrt{c_{2C,x}^2 + c_{2C,y}^2} = \sqrt{3,33^2 + 3,47^2} = 4,81 \text{ m/s}$$

Anschließend muss der Winkel α bestimmt werden, um die Umfangskomponente von C_{2C} zu erhalten.

$$\gamma_1 = 90° - \arctan\left(\frac{z_C}{x_C}\right) = 90° - \arctan\left(\frac{1,905}{0,622}\right) = 19,16°$$

$$\gamma_2 = -\arctan\left(\frac{c_{2C,z}}{c_{2C,x}}\right) = -\arctan\left(\frac{-3,456}{3,33}\right) = 46,147°$$

$$\alpha = \gamma_1 - \gamma_2 = 46,146° - 19,16° = 26,98°$$

Daraus ergibt sich die Umfangsgeschwindigkeit des Punktes C aus

$$c_{2C,u} = c_{2c} \cdot \cos\alpha = 4,81 \cdot \cos\ 26,98° = 4,28 \text{ m/s}$$

Nun sind alle Faktoren für die Berechnung des Eintrittsverlustes bestimmt und können in oben genannte Gleichung eingesetzt werden. Daraus folgt

$$h_{V,e1} = H_C - K \cdot \frac{(c_{2C,u} - u_s) \cdot u_s}{g} = h_{V,e1}$$

$$= 1,25 - 1,8 \cdot \frac{(4,283 - 1,705) \cdot 1,705}{9,81} = 0,44 \text{ m}$$

In dieser Berechnung werden die Verluste durch den Rückschlag nicht beachtet, da sie je nach Strahldicke und Zellenausrundung stark variieren können.

6.2. Statischer Verlust

Die Bemessung des statischen Verlustes ist beim Wasseraustritt relevant und soll hier nur für die Maximalbeaufschlagung von 0,9 m^3/s erfolgen. Zunächst wird das mit Wasser gefüllte Zellvolumen bei der vorgegebenen Drehzahl von $n = 11,23$ U/min bestimmt. Es errechnet sich aus

$$A_z = \frac{Q \cdot 60}{n \cdot z \cdot B} = \frac{0,9 \cdot 60}{11,23 \cdot 30 \cdot 2,7} = 0,059 \text{ m}^3$$

Diese Fläche wird nun grafisch in eine Zelle eingetragen. Nachdem eine Tangente an die Blechzelle in Punkt E gelegt wurde, werden die beiden Winkel φ_1 und φ_2 bestimmt. Die Differenz der beiden Winkel wird nun in gleich große Winkel geteilt, die zwischen 2° und 6° liegen sollen. Gewählt wurde hier ein Winkel $\Delta\varphi = 4,52°$, was 6 Unterteilungen ermöglicht. In Abb. 17 werden grafisch die einzelnen Flächen der Unterteilungen A_1 bis A_6 ermittelt. Die Flächensummen ergeben sich anschließend aus der Addition, hierbei gilt $S_1 = A_1$, $S_2 = A_1 + A_2$, $S_3 = A_1 + A_2 + A_3$ usw.

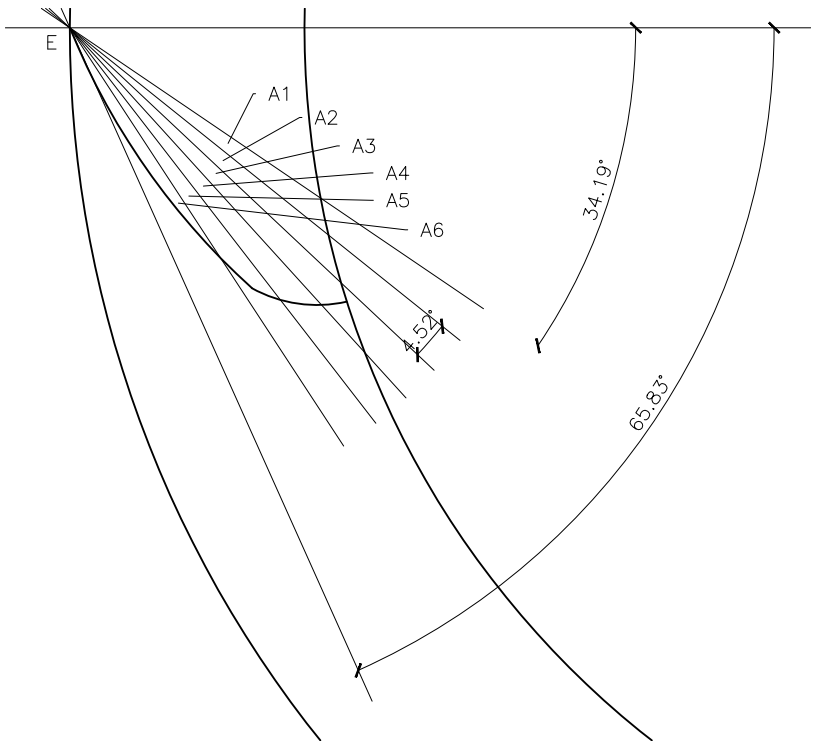


Abb. 17: Grafische Ermittlung der statischen Austrittsverluste

Im Anschluss daran müssen die den Flächen zugeordneten Drehzahlen bestimmt werden, dies erfolgt durch:

$$n_1 = \frac{Q \cdot 60}{S1 \cdot z \cdot B}$$

Aus Tab. 7 lässt sich erkennen, dass gilt:

$$S_6 \approx A_z \qquad n_6 \approx n_{ge}$$

Dies bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt die Zelle vollständig geleert ist. Nun lässt sich der jeweilige Verlust bei einer gewählten Drehzahl durch

$$h_{V,a1i} = \frac{1}{S_i} \cdot \sum_{i=1}^{n} \cdot A_i \cdot R_a \cdot (1 - \sin(\varphi_2 - i \cdot \Delta\varphi))$$

ermitteln. Die genauen Werte sind in der folgenden Tab. 7 zu finden.

i	A_i in m^2	S_i in m^2/°	$\frac{dA_i}{D\varphi}$	n_i in U/min	φ_i in °	$h_{V,a1i}$ in m
1	0,0088	0,0088	-0,0019	75,76	65,83	0,15
2	0,0108	0,0196	-0,0024	34,01	61,31	0,18
3	0,0128	0,0324	-0,0028	20,58	56,79	0,22
4	0,0113	0,0437	-0,0025	15,26	52,27	0,25
5	0,0089	0,0526	-0,0020	12,67	47,75	0,29
6	0,0053	0,0579	-0,0012	11,51	43,23	0,31

Tab. 7: Berechnungsergebnisse der Verluste

6.3. Dynamischer Verlust

Die Berechnung der dynamischen Verluste ist sehr aufwändig, allerdings lassen sie sich durch eine Näherung einfach berechnen. Hierfür ist lediglich die Umfangsgeschwindigkeit u_S des Außenradius nötig.

$$h_{V,a2} = 0,8 \cdot \frac{u_a^2}{2 \cdot g} = 0,8 \cdot \frac{1,99^2}{2 \cdot g} = 0,32 \text{ m}$$

6.4. Gesamtverlust

Da sämtliche Verluste in den vorherigen Kapiteln errechnet wurden, können diese nun zum Gesamtverlust addiert werden. Daraus errechnet sich

$$h_{V,ges} = \sum \Delta h_{V,i} = 0,44 + 0,31 + 0,32 = 1,08 \text{ m}$$

als Gesamtverlust. Damit ergibt sich ein Wirkungsgrad für das Wasserrad von

$$\eta_{WR} = 1 - \frac{h_{V,ges}}{H} = 1 - \frac{1,08}{4,5} = 0,76$$

6.5. Leistungsberechnung

Für die volle Beaufschlagung des Rades mit 0,9 m^3/s in den Wintermonaten ergibt sich eine theoretische Leistung von

$$P_{th} = g \cdot Q \cdot H = 9,81 \cdot 0,9 \cdot 4,5 = 39,73 \text{ kW}$$

und eine tatsächliche Leistung des Rades nach Abzug dieser Verluste von

$$P_{WR} = \eta_{WR} \cdot P_{th} = 0,76 \cdot 39,73 = 30,20 \text{ kW}$$

Hierbei werden allerdings sämtliche Verluste, die durch Generatoren und eventuelle Getriebe entstehen, vernachlässigt, daraus resultiert eine etwas niedrigere Gesamtleistung bei Vollbeaufschlagung. Bei Mindestwasser wird an Strom erzeugt:

$$P = \eta_{WR} \cdot g \cdot Q \cdot H = 0,76 \cdot 9,81 \cdot 0,1 \cdot 4,5 = 3,34 \text{ kW}$$

Für die Jahresleistung muss die Ganglinie aus Abb. 11 hinzugezogen werden. Es wird ersichtlich, dass die Maximalbeaufschlagung von 0,9 m^3/s nur in den Monaten von Dezember bis einschließlich März zur Verfügung stehen. Die Monate Mai bis November haben einen Abwärtstrend die Wassermengen betreffend, hier werden die Wassermengen der blauen Linie gemittelt. Somit ergibt sich ein durchschnittlicher Abfluss von etwa 0,42 m^3/s. Da zu jedem Zeitpunkt die Rampe in der Rotach ebenfalls überströmt werden soll, wird hier ein Wert von $Q_{mittel} = 0,3$ angenommen. Somit ergibt sich für die Jahresleistung bei einer angenommenen Jahresdauer von 360 Tagen ($360 * 24 = 8640$ h) folgende Berechnung:

$$P_a = (5 \text{ Monate} \cdot 0,9 + 7 \text{ Monate} \cdot 0,3) \cdot g \cdot 4,5 \text{ m} \cdot 8640 \text{ h} = 159.431 \text{ kWh}$$

Für diese Berechnung wird angenommen, dass das Jahr nur 360 Tage besitzt, sodass an 4 Tagen im Jahr das Rad stillstehen kann, um Reparaturen oder Wartungsarbeiten durchzuführen. Damit ist auch der Fall abgedeckt, dass die Rotach an 1-2 Tagen im Jahr zu wenig Wasser führt, um das Rad zu betreiben.
Auch wenn der Betreiber keine EEG-Vergütung für das Wasserrad erhalten möchte, soll dies berechnet werden. Da ein Fischpass vorhanden ist, kann der volle Vergütungssatz in Höhe von 0,127 €/kWh angesetzt werden. Dies entspricht bei der angegebenen Jahresleistung einer theoretischen Vergütung von $0,127$ € $\cdot 159.431\ kWh/a = 20247,7$ €/a

7. Konstruktive Details

In diesem Kapitel soll zusätzlich auf einige Details, die die Konstruktion betreffen, eingegangen werden.

1. Tieferlegung durch Gefälleänderung

Das Gefälle ändert sich von ursprünglich 2,6 ‰ auf 1,9 ‰. Dies hat den Vorteil, dass der Einlaufbereich in der Rotach um etwa 30 cm ab Wehroberkante tiefergelegt werden kann, sodass hier ein hoher Grundstau für den Kanal aufgebaut werden kann. Im Einlaufbereich der Rotach soll das Wehr zusätzlich um 20 cm erhöht werden, sodass ein Grundstau von etwa 60 cm vorhanden sein wird, wodurch ein Großteil der Leitungen als Druckrohr wirkt, sodass hydraulische Verluste durch Umlenkungen oder einen eventuellen Düker im Brückenbereich vollständig vernachlässigt werden können. Nähere Details können Anhang G entnommen werden.

2. Zuführung und Schützbereich

Die Betonkonstruktion der Zuführung muss mit einer Stahlplatte oder einem Stahlblech abgedeckt werden. Dies hat den Vorteil, dass die Aufstandsfläche des Schützes vollständig eben wird, sodass in den geschlossenen Zuständen hier kein Wasser fließen kann. Zusätzlich verhindert der Stahl eine Erosion des Betons bei der hohen Austrittsgeschwindigkeit von 3,33 m/s.

Unter die Stahlplatte muss an den Aufstandspunkten der Schützführung ein Stahlträger angebracht werden, auf dem die Führungen befestigt werden können. Hier muss darauf geachtet werden, dass noch ausreichend Abstand zum Wasserrad vorhanden ist. Der Spritzschutz zählt hier nicht zum Abstand dazu, da er sich etwas versetzt zu den Aufstandspunkten befindet.

Ein Notüberlauf muss seitlich angebracht werden, um eine Überlastung des Rades zu verhindern. Hydraulisch ist dieser durch die Durchflussbegrenzung der verlegten Rohre fast vernachlässigbar, allerdings kann bei plötzlichem Hochwasser der Rotach der Druck innerhalb der Rohre und somit auch die Druckhöhe stark zunehmen, was zu einem Überströmen des Schützes führen kann. Durch einen Notüberlauf könnten somit eventuelle Schäden an Wasserrad und Schütz vermieden werden.

3. Frostschutz

Bei jedem Gerät, das sämtlichen Witterungen ausgesetzt ist, muss damit gerechnet werden, dass bei Frosttemperaturen Eisbildung auftritt. Auch bei einem Wasserrad kann dies vorkommen. Die Eisbildung hat beim Wasserrad einen großen Einfluss auf den Wirkungsgrad, der vor allem im Winter bei großen Wassermengen auch entsprechend hoch sein sollte, um ausreichend Strom zu erzeugen. Wenn Wasser an einzelnen Stellen oder Kanten am Rad gefriert, führt dies zu einem ungleichmäßigem Drehen des Rads. Dreht das Rad unrund, kann es zu Lagerschäden an der Achse kommen, die dann vorzeitig ausgetauscht werden muss. Durch ungleichmäßiges Drehen des Rades sinkt der Wirkungsgrad des Rades, die Energieausbeute wird reduziert. Im schlimmsten Fall kann das gesamte Rad vereisen. Um ein Wiederanlaufen des Wasserrades zu ermöglichen, muss das Rad und die zugehörigen Gerinne erst vollständig von Eis befreit werden, was ein großes Risiko für Leib und Leben sein kann. Ein Stillstand über mehrere Monate widerspricht auch dem Ziel des Betreibers, Strom für die Heizung des Hauses zu erzeugen (siehe Kap. 1). Um den Betrieb aufrecht zu erhalten, kann auf eine technische Maßnahme zurückgegriffen werden. Es wird eine Einhausung für das Rad vorgeschlagen, die bei auftretendem Dauerfrost um das Rad gestellt wird. Hierfür ist es denkbar, eine Faltkonstruktion in Schienen oder Führungen um das Rad herum zu errichten, die bei Dauerfrost einfach um das Rad geklappt werden kann. Sollten noch tiefere Temperaturen auftreten, kann zusätzlich die Einhausung beheizt werden, dies ist zum Teil auch mit der Abwärme aus dem Generator möglich. Eine Faltkonstruktion hat den Vorteil, dass die Schauradfunktion während der Sommermonate nicht beeinträchtigt wird. Im Winterbetrieb ist vermutlich nicht mit hohem Besucherandrang zu rechnen, sodass der Wegfall des Schaurads zu verkraften ist. Sobald die Temperaturen außerhalb der dauerhaften Frostgefahr liegen, kann die Einhausung aufgeklappt werden, der Blick auf das Wasserrad wird für Besucher wieder freigegeben. Eine starre Einhausung aus Glas wird nicht vorgeschlagen, da durch das dauerhafte Auftreten von Spritzwasser die Glasscheiben keinen klaren Blick auf das Wasserrad erlauben. Der Projektstandort Ittenhausen hat ein relativ mildes Klima vorzuweisen, wie auch [6] aufzeigt. Die Frosttemperaturen sind hierbei in den Monaten Dezember, Januar und Februar nur knapp unter 0 °C, sodass eventuell auf eine Einhausung verzichtet werden kann. Es wird vorgeschlagen, dass vorerst auf eine Einhausung verzichtet wird, da die Temperaturen nicht tief genug sind, um schnell-fließendes Wasser mit etwa 4 °C innerhalb kürzester Zeit vom Austritt aus dem Gerinne bis zum Wiedereintritt in den Unterwasserkanal ($t \approx 4$ s) gefrieren zu lassen.

4. Wasserrad und Generator

Das Wasserrad kann bei Bedarf zusätzlich mit Stahlblechen verstärkt werden. Hier kann entweder eine Verstärkung in der Mitte erfolgen oder in Verlängerung zu den Strahlteilern bzw. den Schützführungen.

Da der Austrittspunkt weit hinter dem Scheitel des Wasserrades liegt, sollte eine Anlaufhilfe für das Rad vorgesehen werden. Diese verhindert, dass das Rad sich beim Anlaufen nach einem vollständigen Entleeren des Gerinnes in die rückwärtige Richtung dreht.

Ein Generator soll nicht bemessen werden, da sich für diese Lösung ein drehzahlunabhängies System anbietet. Ein klassischer Generator mit variablem Getriebe erzeugt durch das mechanische Übertragen der Drehzahl Verluste im zweistelligen %-Bereich. Realisieren lässt sich dies durch integrierte modulare Generatoren, die sich entlang dem Kranz befinden. Erfunden wurde dies von der Firma Drews [7], die zusätzlich Wasserräder als Baukastensystem auf ihrer Homepage anbietet.

8. Wasserrecht und Fördermittel

Für das Wasserrecht müssen beim Landratsamt Friedrichshafen Pläne eingereicht werden, aus denen der Umfang der geplanten Maßnahme zu entnehmen ist. Nach einer Prüfung der Pläne und den Wassermengen können Details angepasst werden, bevor es in die Ausführungsplanung geht. Die Pläne, die für das Wasserrecht nötig sind, werden in DIN A3-Format dieser Arbeit beigelegt. Eine kurze Übersicht über die Planinhalte soll hier erfolgen:

0. Übersichtsplan (Anhang E)
1. Grundriss des Einlaufbauwerks an der Rotach (Anhang F)
2. Schnitt des Einlaufbauwerks an der Rotach (Anhang G)
3. Grundriss der Zuführung im Bereich der Mühle (Anhang H)
4. Seitenansicht des Wasserrades (Anhang I)
5. Frontalansicht der Zuführung mit Wasserrad (Anhang J)
6. Konstruktive Details des Schützes (Anhang K)

Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft fördert die technische und ökologische Modernisierung der kleinen Wasserkraft mit bis zu € 200.000. Hierfür sind die unter [8] erhältlichen Unterlagen auszufüllen. Für das Ausfüllen der Unterlagen muss eine Abschätzung der Baukosten erstellt werden. Hierbei ist zu beachten, dass der Zuleitungskanal der größte Kostenverursacher ist. Dieser wäre bei jeder anderen Turbinenart ebenfalls so kostspielig. Als Baugesamtkosten werden € 341.000 angenommen, allerdings ist dies nur eine grobe Schätzung, die realen Baukosten können stark abweichen. Eine Zusammenstellung der Baukosten ist in Anhang D zu finden, hier ist ein Teil des Antragsformulars bereits ausgefüllt, die dort angegebenen Daten können für den einzureichenden Antrag verwendet werden. Der Antrag ist bei der zuständigen Unteren Wasserbehörde in Friedrichshafen an Herrn Thomas Kugel abzugeben.

9. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, ein Wasserrad zu bemessen, das im Winter eine 50-kW-Gastherme entlasten soll und gleichzeitig im Sommer bei Mindestwassermenge als Schaurad dient.
Nachdem die Theorie des Wasserrades ausführlich behandelt wurde und die Grundlagen für eine Bemessung vorhanden waren, konnte das Wasserrad vollständig bemessen werden. Hierbei wurde der vorhandene Platz im Bestand weitestgehend ausgenutzt, um die große Wassermenge von 0,9 m^3/s in den Wintermonaten abführen zu können. Die größte Schwierigkeit der Arbeit lag darin, die hohen Verluste eines Wasserrades zu reduzieren. Dies wurde mit einem Aufstau in Höhe von 0,7 m und einer Zuführung über ein Schütz realisiert. Das Wasserrad kann in den Sommermonaten weiterhin als Schaurad betrieben werden, hierfür sollen etwa 0,1 m^3/s ausreichend sein. Der Bestand bleibt hierbei unangetastet, sodass die vorhandene Francis-Turbine aus dem Jahre 1922 an Ort und Stelle verbleiben kann. Eine genaue Planung über die exakte Lage der Zuführung durch zwei DN 700 Betonrohre muss vor Ort durchgeführt werden.
Das Wasserrad besitzt einen Wirkungsgrad bei Volllast von 76 %, dadurch lassen sich bei Vollbeaufschlagung etwa 30 kW erzeugen, was die Gastherme deutlich entlasten wird. In den Sommermonaten werden nur 3 kW erreicht.
Durch diese Arbeit wird deutlich, dass schon mit geringen Wassermengen und Fallhöhen eine ausreichende Menge Strom erzeugt werden kann. Da es in Deutschland viele alte Mühlen gibt, bietet es sich an, diese alten Mühlenstandorte mit Wasserkraftanlagen auszustatten. Auch wenn Wasserräder nicht zu den effizientesten Wasserkraftanlagen zählen, haben sie durchaus Vorteile. Sie sind gegenüber Verunreinigung bei Weitem nicht so empfindlich wie Turbinen und können problemlos mit stark schwankenden Wassermenge umgehen. Auch kann durch eine Mühle mit intaktem Wasserrad eine soziale Einbindung in Schulprojekten oder Jugendgruppen bezweckt sowie der lokale Tourismus gefördert werden.
In Tab. 8 findet sich abschließend eine Übersicht aller relevanter Werte und Daten, die das Wasserrad und die zugehörigen Bauteile beschreibt.

Ergebnisübersicht

Eingangswerte		
Q_{min}	0,1 m^3/s	Mindestdurchfluss
Q_{max}	0,9 m^3/s	Maximaldurchfluss
H	3,8 m (4,5 m)	Fallhöhe (mit Aufstau)
Zuleitung		
I_E	1,9 / 2,6 ‰	Gefälle
L	260 / 270 m	Länge der Zuleitung
gewählter Querschnitt: zwei DN 700		
Schütz		
b_0	2,7 m	Gesamtbreite am Schütz
h_{D2}	0,7 m	Druckhöhe
3-feldriges Schütz	90 - 60 - 90 cm	Schützfeld Teilung
s_0	0,03-0,11 m	Schützöffnung
Wasserrad		
B	2,7 m	Radbreite
a	0,35 m	Kranzbreite
R_a	1,7 m	Außenradius
R_i	1,25 m	Innenradius
z	30	Zellenanzahl
h_V	1,08 m	Verlusthöhe
η	76 %	Wirkungsgrad

Tab. 8: Übersicht der Ergebnisse

10. Conclusion

The aim of this thesis was the construction of a water wheel, which should partly replace a central gas heating during the winter. In summer, when not much heat is needed and a lot less water than in winter is available, the water wheel is supposed to be a tourist attraction.
After identifying the theoretical background of water wheels, basic facts regarding the water supply in the river Rotach and measuring the used distances were analyzed. The final calculation showed, that 0,9 m^3/s of water can be used during winter. The greatest difficulty which occured during this thesis was the reducing of loss value. This problem was solved by accumulating the water up to 0,7 m and using a clough to control water output. In summertime, when only 0,1 m^3/s water is available, it is enough to spin the water wheel for touristical purposes. The water wheel has a calculated efficiency of 76 % and results in total power generation of 30 kW. A specialty in construction is the original 1922 Francis turbine, which has to be preserved, so the construction has to go around it.
This thesis is supposed to show owners of water mills the possibility of power generation through the technique of using a water wheel. Even though the efficieny is not anywhere near that of a turbine, a water wheel will add a tourist attraction to the region. Also included are blueprints with constructive details regarding the water wheel and other constructions.

Literaturverzeichnis

[1] Nuernbergk, Dirk M.: *Wasserräder mit Freihang: Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen.* Schäfer, 2007

[2] Rauch: *Chroniken.* 1994

[3] Herter: *Mängelaufstellung.* 1908

[4] LUBW: *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch.* `http://www.hvz.baden-wuerttemberg.de/pdf/DGJ_Rheingebiet_Teil-I_2009.pdf`. Version: 2009

[5] Nuding, Anton: *Hydraulische Tabellen*

[6] Wetterkontor.de: *Klimadaten Friedrichshafen.* `http://wetterkontor.de/de/klima/klima2.asp?land=de&stat=10935`

[7] Drews: *Wasserräder der Firma Drews.* `http://www.wasserrad-drews.de/`

[8] Baden-Württemberg, Umweltministerium: *Fördergrundsätze kleiner Wasserkraft.* `http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/102570/`

A. Lageplan von 1824

Abb. 18: Lageplan der Mühle im Jahr 1824

B. Unterschreitungstage und Dauerlinien

	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	Mittel	Red. Mittel (-10%)	Red. Mittel abzgl. Fischpass
364	28,800	24,100	18,500	25,900	11,800	21,700	17,400	15,800	8,570	18,977	17,079	16,679
363	23,200	17,000	11,200	20,700	10,700	17,300	11,500	14,800	8,260	15,016	13,514	13,114
362	17,600	15,200	9,100	9,600	9,760	13,800	10,300	14,600	7,370	12,213	10,992	10,592
361	10,600	12,700	8,350	8,220	8,810	12,200	9,540	10,100	6,880	10,110	9,099	8,699
360	7,500	9,990	8,320	8,040	8,610	11,500	8,770	7,810	6,290	8,843	7,959	7,559
359	7,230	8,550	8,160	6,680	8,390	10,300	7,160	6,880	6,230	8,058	7,252	6,852
358	6,950	8,470	7,760	5,540	7,810	9,610	6,950	6,370	5,870	7,603	6,843	6,443
357	6,910	7,960	7,530	5,380	6,920	9,040	6,180	5,960	5,870	7,126	6,413	6,013
356	6,300	7,910	7,520	4,960	6,380	8,550	5,530	5,580	5,610	6,734	6,061	5,661
350	5,120	5,840	6,180	3,530	5,670	6,480	4,490	4,590	4,180	5,306	4,775	4,375
340	4,190	4,310	4,710	2,830	4,530	4,990	3,810	3,700	3,420	4,140	3,726	3,326
330	3,230	3,480	3,980	2,460	3,890	4,110	3,400	3,220	2,970	3,480	3,132	2,732
320	2,510	3,290	3,310	2,150	3,470	3,580	2,940	2,730	2,600	3,018	2,716	2,316
300	2,160	2,690	2,580	1,840	2,770	2,810	2,410	2,190	2,050	2,423	2,181	1,781
270	1,610	2,180	1,720	1,480	2,240	2,150	2,030	1,800	1,690	1,896	1,706	1,306
240	1,290	1,850	1,270	1,230	1,890	1,740	1,620	1,510	1,320	1,523	1,371	0,971
210	1,070	1,530	0,966	1,010	1,720	1,460	1,400	1,310	1,210	1,293	1,163	0,763
200	1,030	1,410	0,910	0,939	1,670	1,390	1,340	1,270	1,170	1,231	1,108	0,708
182	0,938	1,270	0,814	0,826	1,560	1,260	1,260	1,190	1,090	1,126	1,013	0,613
150	0,800	1,120	0,702	0,714	1,400	1,090	1,090	1,080	0,944	0,987	0,888	0,488
130	0,737	1,020	0,639	0,634	1,330	0,992	1,010	1,010	0,825	0,898	0,808	0,408
120	0,723	0,975	0,613	0,603	1,290	0,941	0,954	0,978	0,772	0,860	0,774	0,374
110	0,675	0,925	0,580	0,560	1,270	0,890	0,917	0,954	0,756	0,826	0,743	0,343
100	0,649	0,889	0,540	0,517	1,210	0,851	0,879	0,934	0,730	0,790	0,711	0,311
90	0,615	0,837	0,512	0,486	1,200	0,810	0,858	0,902	0,698	0,757	0,681	0,281
70	0,577	0,745	0,461	0,442	1,110	0,722	0,793	0,838	0,637	0,692	0,622	0,222
60	0,552	0,707	0,389	0,425	1,070	0,683	0,769	0,805	0,617	0,659	0,593	0,193
50	0,532	0,662	0,362	0,401	1,030	0,647	0,753	0,762	0,568	0,625	0,563	0,163
40	0,501	0,618	0,345	0,388	1,010	0,611	0,740	0,735	0,500	0,596	0,536	0,136
30	0,478	0,583	0,320	0,367	0,957	0,578	0,720	0,674	0,432	0,562	0,506	0,106
25	0,473	0,566	0,304	0,352	0,932	0,564	0,699	0,666	0,419	0,547	0,492	0,092
20	0,467	0,554	0,300	0,345	0,895	0,542	0,682	0,647	0,397	0,532	0,479	0,079
15	0,455	0,535	0,297	0,342	0,874	0,522	0,666	0,626	0,386	0,515	0,464	0,064
10	0,434	0,510	0,295	0,338	0,864	0,492	0,641	0,601	0,344	0,495	0,445	0,045
9	0,434	0,510	0,295	0,335	0,861	0,485	0,641	0,601	0,331	0,492	0,443	0,043
8	0,434	0,510	0,294	0,332	0,858	0,478	0,632	0,601	0,320	0,487	0,439	0,039
7	0,429	0,509	0,294	0,332	0,858	0,470	0,620	0,586	0,312	0,482	0,434	0,034
6	0,429	0,506	0,294	0,327	0,858	0,464	0,604	0,580	0,304	0,477	0,430	0,030
5	0,417	0,505	0,294	0,323	0,855	0,455	0,592	0,559	0,294	0,469	0,422	0,022
4	0,405	0,491	0,293	0,318	0,854	0,448	0,589	0,550	0,288	0,462	0,415	0,015
3	0,403	0,469	0,292	0,312	0,852	0,433	0,574	0,550	0,275	0,453	0,408	0,008
2	0,399	0,442	0,290	0,311	0,848	0,421	0,562	0,547	0,272	0,445	0,400	0,000
1	0,397	0,432	0,289	0,309	0,848	0,397	0,559	0,538	0,254	0,436	0,392	0,000
0	0,379	0,355	0,283	0,308	0,842	0,373	0,538	0,529	0,241	0,416	0,374	0,000

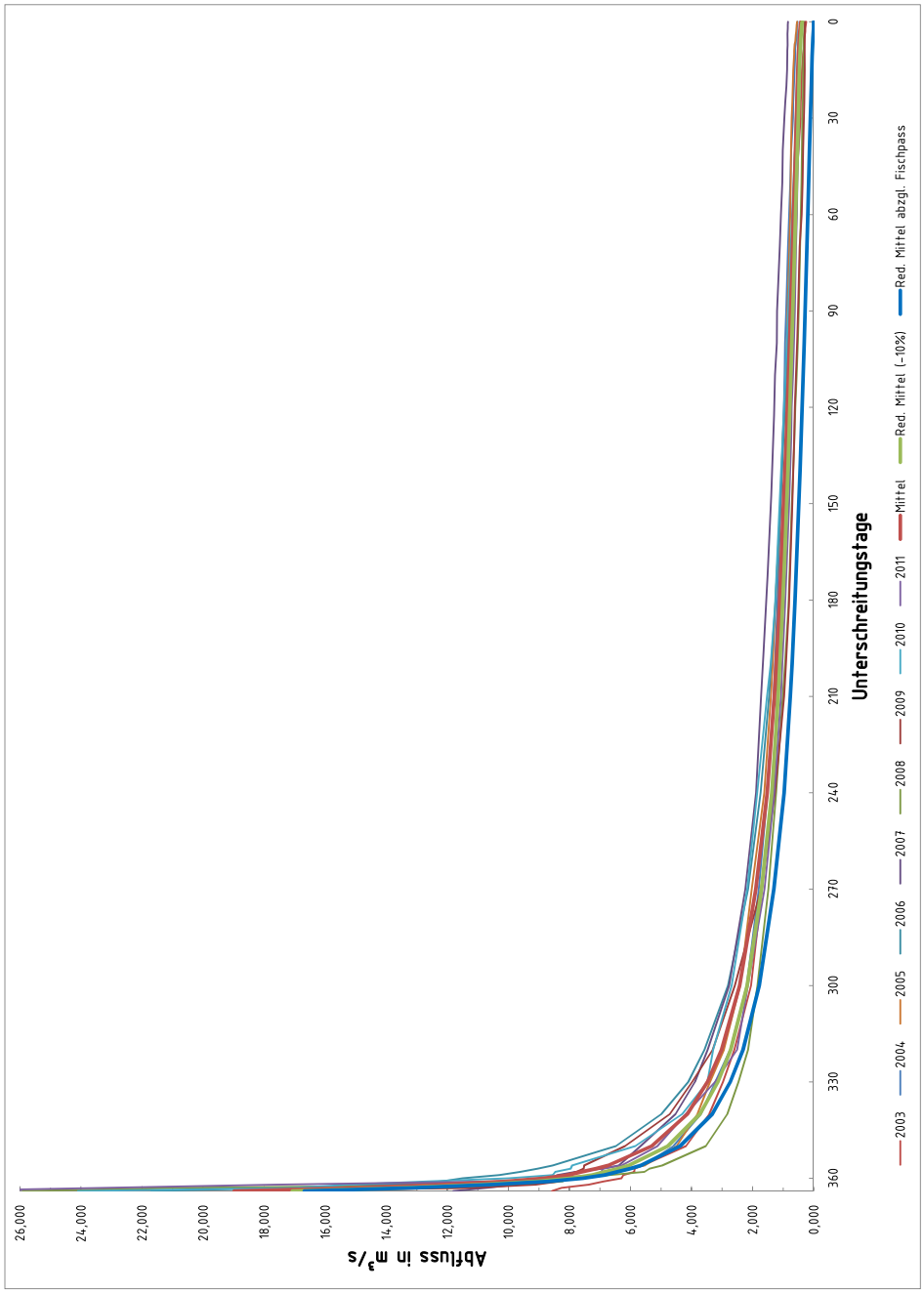


Abb. 19: Dauerlinien