

Stadt Freiburg

Garten- und
Tiefbauamt

Freiburg 
IM BREISGAU

Umgestaltung des Schwabentorwehres

Machbarkeitsstudie und Realisierungskonzepte einer Wasserkraftanlage im denkmalpflegerischen und urbanen Umfeld

UNGER ingenieure
Freiburg, den 28.02.2014

.....
Dipl.-Ing. Thomas Zimmermann

.....
Dipl.-Ing. Christian Pfaff

INHALT	SEITE
1	Veranlassung und Zielsetzung 3
2	Grundlagen 4
3	Standortbedingungen 5
3.1	Holzrampe 5
3.2	Infrastrukturanlagen und Urbanes Umfeld 6
3.3	Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit 6
3.4	Hydrologische und hydraulische Randbedingungen 8
3.4.1	Abflussdauerlinie und Ausbaudurchfluss für den Standort 8
3.4.2	Fallhöhendauerlinie 11
3.4.3	Hochwasserneutralität einer möglichen Wasserkraftanlage 12
4	Turbinentechnologien für niedrige Fallhöhen 14
4.1	Untersuchte Technologien 14
4.2	Für den Standort sinnvolle Technologien 15
5	Realisierungskonzepte 19
5.1	Zusammenfassung der Realisierungskonzepte 19
5.2	Städtebauliche Aspekte [11] 27
5.3	Schallemissionen 28
5.4	Denkmalschutz der Holzrampe 29
6	Wirtschaftlichkeitsrechnung 31
6.1	Parameter für die dynamische Kostenvergleichsrechnung 31
6.2	Ergebnisse 33
6.3	Sensitivitätsanalyse 36
7	Zusammenfassung und Fazit 37
8	Anlagen 39

Anlagen

- Anlage 1: Bestandsplan
- Anlage 2: Leistungspläne der Realisierungskonzepte
- Anlage 3: Skizzen für das Realisierungskonzept mit einer vertikalachsigen Kaplanturbine ($Q_a=3,13 \text{ m}^3/\text{s}$) – Variante 1
- Anlage 4: Skizzen für das Realisierungskonzept mit einer vertikalachsigen Kaplanturbine ($Q_a=4,95 \text{ m}^3/\text{s}$) – Variante 1
- Anlage 5: Skizzen für das Realisierungskonzept mit dem beweglichen Kraftwerk ($Q_a=6,74 \text{ m}^3/\text{s}$) – Variante 2
- Anlage 6: Skizzen für das Realisierungskonzept mit der DIVE-Turbine – Variante 3

- Anlage 7: Skizzen für das Realisierungskonzept mit dem Gravitationswasserwirbelkraftwerk
– Variante 4
- Anlage 8: Aufstellung der Investitionskosten (netto)
- Anlage 9: Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsrechnung

1 VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG

Für das Schwabentorwehr als Bauwerk, das der Sohlensicherung dient, besteht Sanierungsbedarf und –pflicht. Da die Holzrampe ein Sohlgefälle von über 2,5 m vorweist, soll im Folgenden die Realisierbarkeit und die Wirtschaftlichkeit einer Kleinwasserkraftanlage für den Standort untersucht werden. Neben der ökologischen Integration der Wasserkraftanlage an den Standort müssen die Denkmaleigenschaft der Holzrampe sowie Anforderungen aus dem urbanen Umfeld (städteplanerische Aspekte und Lärmschutz) mit den äußerst beengten Platzverhältnissen durch Verkehrsinfrastrukturen, berücksichtigt werden.

Das Schwabentorwehr, unterstrom der Greiffeneggbrücke, stellt zudem ein unüberwindbares Wanderhindernis für aufwärtsgerichtete Wanderungen der Gewässerfauna in der Dreisam dar. Im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie muss die ökologische Durchgängigkeit an der Holzrampe durch den Unterhaltungsträger, hergestellt werden. Insbesondere für das Lachswiederansiedlungsprogramm ist die Herstellung der Durchgängigkeit eine wichtige Voraussetzung.



Abbildung 1-1: Blick von der Greiffeneggbrücke auf den Standort

2 GRUNDLAGEN

- Stadtarchiv: Historischer Bestandsplan von 1931 (Wasserpolizeiliche Genehmigungsunterlagen) auch in: D.Ti. 961 a und b Wasserpolizeiliche Genehmigung; Stadtarchiv [1]
- Stadtarchiv – Bestand: D.Ti. 959 Wasserbau Dreisam Wehr an der Schwabentorbrücke 1892 – 1936 [2]
- Stadtarchiv: C4/XVII/02/08 [3]
- Zustandsanalyse der Dreisam-Holzrampe im Zuge „der Machbarkeitsuntersuchung Lückenschluss Dreisamuferweg Nord“, UNGERingenieure, 2009 [4]
- DWA-M 509 (Entwurf): Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.; Hennef: 2010 [5]
- LUBW Leitfaden Teil 2: Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern; LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Karlsruhe; 2006 [6]
- Mitteilung des Umweltamtes der Stadt Freiburg; April 2013 [7]
- Schreiben d. Amts für öffentliche Ordnung an die Runz der Werkbesitzer, 1978 [8]
- Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Rheingebiet, Teil 1, Hoch- und Oberrhein, 2009; LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Karlsruhe; 2011 [9]
- Interview mit Hr. Bartl (Fischereireferent; Referat 33, Fischereiverwaltung – Regierungspräsidium Freiburg) [10]
- Mitarbeit – Städteplaner: Herr Thiele (Architekturbüro Thiele), Freiburg [11]
- Kulturdenkmaleigenschaft der Dreisam-Holzrampe, Schreiben an die Untere Denkmal-schutzbehörde, Dr. Wolfgang Kaiser, 2010 [12]
- Interview mit Fr. Dr. Zimdars und Fr. Reinhard-Fehrenbach (Referat 26, Bau- und Kunstdenkmalpflege des Regierungspräsidiums Freiburg) [13]
- Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen; DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.; Hennef; 2012 [14]
- Auszug aus dem Erfahrungsbericht 2011 gemäß § 65 EEG im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Projektleitung: Ingenieurbüro Flocksmühle; 2011 [15]
- Handbuch zur Planung und Errichtung von Kleinwasserkraftanlagen; European Small Hydropower Association; Belgien; 2004 [16]

3 STANDORTBEDINGUNGEN

3.1 Holzrampe

Die Holzrampe wurde 1873 von der Stadt Freiburg auf Kosten der Kronenmühlebach-Runzgenossenschaft erbaut. Sie diente sowohl der fixierten Ausleitung in den Kronenmühlebach, als auch der Sand- und Kiesgewinnung der Stadt Freiburg.

Die Holzrampe kann als Absturztreppe mit 10 Stufen unterschiedlicher Absturzhöhen klassifiziert werden. Die historische Ausdehnung der Holzrampe in Fließrichtung beträgt ca. 45 m (heute 42 m, unterste Stufe erodiert) [1] und quer zur Fließrichtung ca. 24 m über die gesamte Gewässerbreite. [2],[3]

Die aus der Fließbewegung resultierenden Druck- und Schubspannungen werden über den verankerten Holzrost in den Untergrund übertragen. Der Holzrost besteht aus ca. 10 cm starken, in Fließrichtung angeordneten Bohlen und Querbalken, die am Schwellenende sowie in den Feldern den Bohlen als Auflager dienen. Die Querbalken sind in die beidseitigen Ufermauern eingelassen und mit den Ankerpfählen aus Eichenholz verbunden. Über dem Bohlenbelag, folgend als „unterer Belag“ bezeichnet, ist eine Verschleißschicht aus Halbstangen (Nadelholz), folgend als „oberer Belag“ bezeichnet, angeordnet.

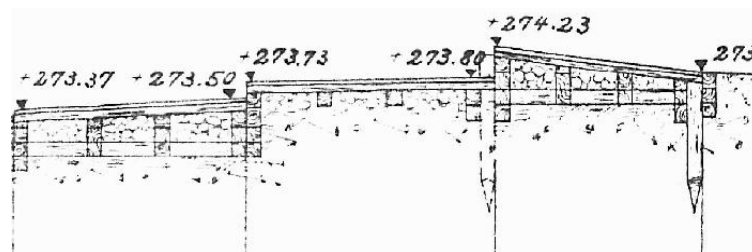


Abbildung 3-1: Auszug aus dem Bestandsplan von 1931, Längsschnitt durch die obersten drei Stufen [1]

Der untere und obere Belag, insbesondere im unteren, linken Bereich der Holzrampe, ist zur Zeit stark beschädigt, bzw. nicht mehr vorhanden. Ein Großteil der haupttragenden Querbalken weist eine ausreichende Festigkeit auf, soweit diese dauerhaft mit Wasser benetzt und durch den Belag vor Geschiebetrieb geschützt worden sind [4]. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass für die Instandsetzungsmaßnahmen eine Erneuerung der beiden Beläge sowie lokal die der Querbalken anzusetzen ist. Als die Dauerhaftigkeit der Holzrampe negativ beeinflusst

send ist der Geschiebetrieb der Dreisam als auch das zeitweise Trockenfallen einzuordnen. Nach derzeitiger Erkenntnis sind die größeren Abnutzungerscheinungen durch den Geschiebetrieb bedingt, denen durch das regelmäßige Erneuern der Verschleißschicht entgegengewirkt werden kann. Sowohl der Betrieb einer technischen Fischaufstiegsanlage als auch der einer Wasserkraftnutzung führen dazu, dass die Holzrampe im Regeljahr längere Zeit trockenfällt und die Dauerhaftigkeit der Holzrampe insbesondere im Wasserwechselbereich beeinträchtigt wird.

3.2 Infrastrukturanlagen und Urbanes Umfeld

Auf der linken Uferseite befindet sich der Dreisamuferweg, der im Radverkehrskonzept 2020 als Vorrangroute ausgewiesen ist und bereits heute eine hohe Radverkehrsdichte aufweist. Der Fußgängerweg auf der rechten, nördlichen Uferseite befindet sich zur Zeit in der Planungsphase. Unmittelbar neben den Uferwegen verlaufen die beiden Richtungsfahrbahnen der Bundesstraße 31 (Dreisam- und Schillerstraße). Insbesondere auf der rechten Uferseite verläuft die Dreisamstraße sehr nah entlang der Dreisam, während zwischen der Schillerstraße und dem linken Uferweg ein Grünstreifen angeordnet ist.

Auf den der Dreisam abgewandten Straßenseiten der Dreisam- und Schillerstraße befinden sich mehrgeschossige Wohnhäuser, für die Lärmemissionen, von einer Wasserkraftanlage ausgehend, zu berücksichtigen sind.

Bei den Leitungstrassen am Standort ist die Gashochdruckleitung (HDG 16bar 300 St), die das Dreisamtal versorgt und unter dem linken Uferweg verläuft, von besonderer Bedeutung. Des Weiteren kreuzen die beiden Gasleitungen (Mittel- (HGM 350 GGG) und Niederdruck (VGN 300 GGG)) sowie eine Hauptwasserversorgungsleitung (ZW 500 GGG), die Dreisam ca. 8 bis 10 m oberstrom der Holzrampe.

3.3 Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit

Lässt man den Erhalt der Holzrampe offen, so sind aus wasserbaulicher Sicht mehrere Möglichkeiten realisierbar, um die ökologische Durchgängigkeit herzustellen. Für einen möglichen Ersatz der Holzrampe durch ein naturnahes Sohlenbauwerk kommen Raue Rampen mit Beckenstruktur, wie sie beispielsweise am Sandfangwehr realisiert wurde, oder als Raugerinne in

Frage. Berücksichtigt man die Forderungen des Denkmalschutzes (siehe Kap.5.4), so ist die Herstellung der Durchgängigkeit mittels einer Teilrampe (naturnahe Bauweise) oder einer technischen Fischaufstiegsanlage zu realisieren. Um den Eingriff in das Gesamterscheinungsbild sowie in die Funktionsfähigkeit der Holzrampe möglichst gering zu halten, kann eine minimale Breite der Fischaufstiegsanlage als Ziel gesetzt werden. Eine technische Fischaufstiegsanlage mit einer vergleichsweise geringen lichten Breite ist der konventionelle Beckenpass. Die Beckendimensionen sind dabei von der größten zu erwartenden Fischart abhängig. [5],[6]

Der Dreisamabschnitt, der Programmstrecke des Lachswiederansiedlungsprogramms ist, kann der Äschenregion zugeordnet werden, wodurch sich die hydraulischen Grenzwerte für die Fischaufstiegsanlage ergeben. Als eine Zielfischart kann die bodenorientierte Groppe aufgeführt werden, die als schwimmschwach eingeschätzt wird und einer entsprechenden Sohlgestaltung und niedrigen Fließgeschwindigkeiten bedarf. Ebenso ist für den Aufstieg des Makrozoobenthos ein geeignetes Sohlsubstrat notwendig. Als Zielfischart für die Dimensionierung der Aufstiegsanlage kann der atlantische Lachs angesetzt werden. Beispielhaft ist in folgender Tabelle ein konventioneller Beckenpass vordimensioniert:[5]

Tabelle 3-1: Vordimensionierung eines konventionellen Beckenpasses

Vordimensionierung eines konv. Beckenpasses	
Lichte Beckenbreite	1,5 m
Breite inklusive Seitenwände	2,3 m
Lichte Beckenlänge	3,0 m
Beckenanzahl	17
Gesamtlänge	52,8 m
Wasserspiegeldifferenz zw. Becken	0,164 m
Schlupflochbreite	0,3 m
Schlupflochhöhe	0,3 m
Breite Kronenausschnitt	0,3 m
Höhe Kronenausschnitt	0,34 + 0,25 m
Durchfluss	0,225 m³/s

Für die folgenden Realisierungskonzepte einer Wasserkraftanlage, wird von einem (Teil-) Erhalt der Holzrampe ausgegangen, sodass zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit ein konventioneller Beckenpass oder eine Teilrampe (mit Beckenstruktur) angesetzt wird.

3.4 Hydrologische und hydraulische Randbedingungen

Zielgröße, um die in Strom umgewandelte Energie einer Wasserkraftanlage abschätzen zu können, ist das Regelarbeitsvermögen. Dabei berechnet sich die Jahresarbeit bzw. Energie aus dem Integral der momentanen Leistung über die Zeit. Die Leistung berechnet sich dabei wie folgt:

$$P(t) = \rho * g * Q_{\text{Turb}}(t) * h_f(t) * \eta_{\text{ges}}$$

ρ	Dichte von Wasser $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
g	Erdbeschleunigung $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$	$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$Q_{\text{Turb}}(t)$	Turbinendurchfluss $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$	
$h_f(t)$	Nettofallhöhe $[\text{m}]$	
η_{ges}	Gesamtwirkungsgrad der Anlage	

In dieser Formel wird die Abhängigkeit des Regelarbeitsvermögens vom Abfluss der Dreisam und der Fallhöhe am Standort im Regeljahr deutlich.

3.4.1 Abflussdauerlinie und Ausbaudurchfluss für den Standort

Die Abflussdauerlinie für den Standort wird auf Basis der Abflussdauerlinie am Pegel Ebnet ermittelt. Dafür werden die Dauerlinien für die Zu- und Ausleitungen vereinfacht berechnet:

Die Zuleitungen werden proportional zur Dauerlinie am Pegel Ebnet über die Größe des Teileinzugsgebietes zwischen dem Pegel Ebnet und dem Standort ermittelt. Da die Größe dieses Teileinzugsgebietes 3,7 % des Einzugsgebietes des Pegels Ebnet beträgt, sind die Zuleitungen vergleichsweise niedrig.

Relevante Ausleitungsmengen werden der Dreisam über den Gewerbekanal am Sandfangwehr und über den Kronenmühlebach an der Schwabentorbrücke entnommen. Für die Dauerlinie der Ausleitungen in den Gewerbekanal wird die 2013 wasserrechtlich festgelegte Verteilung zwischen Gewerbekanal und Dreisam angesetzt. Der maximale Abfluss im Gewerbekanal beträgt 2,2 m³/s [7].

Für die Ausleitungsdauerlinie in den Kronenmühlebach wird die ebenfalls wasserrechtlich festgeschriebene 1/3 zu 2/3 Aufteilung zu Gunsten der Dreisam für Niedrigwasserabflüsse angesetzt [7]. In einem Schreiben von 1978 [8] wird erwähnt, dass die maximale Ausleitungsmenge in den Kronenmühlebach 0,9 m³/s beträgt. Für die Ermittlung der Abflussdauerlinie wird davon ausgegangen, dass maximal 0,9 m³/s in den Kronenmühlebach ausgeleitet werden. Zurzeit werden auch für höhere Dreisamabflüsse augenscheinlich deutlich weniger Wasser in den Kro-

nenmühlebach ausgeleitet. Die momentane Entnahmeregelung an der Schwabentorbrücke (sowohl Geometrie des Ausleitungsbauwerks als auch die Stellungen des Drosselschützes) deutet darauf hin, dass die angesetzte Ausleitungsdauerlinie nicht der Realität entspricht. Da der Kronenmühlebach heute lediglich Bewässerungszwecken für Kleingärten dient, ist eine Diskussion über die momentane Ausleitungsregelung sinnvoll. Je nach Reduktion der Ausleitungen in den Kronenmühlebach ist eine theoretische Erhöhung des Regelarbeitsvermögens über 20% möglich.

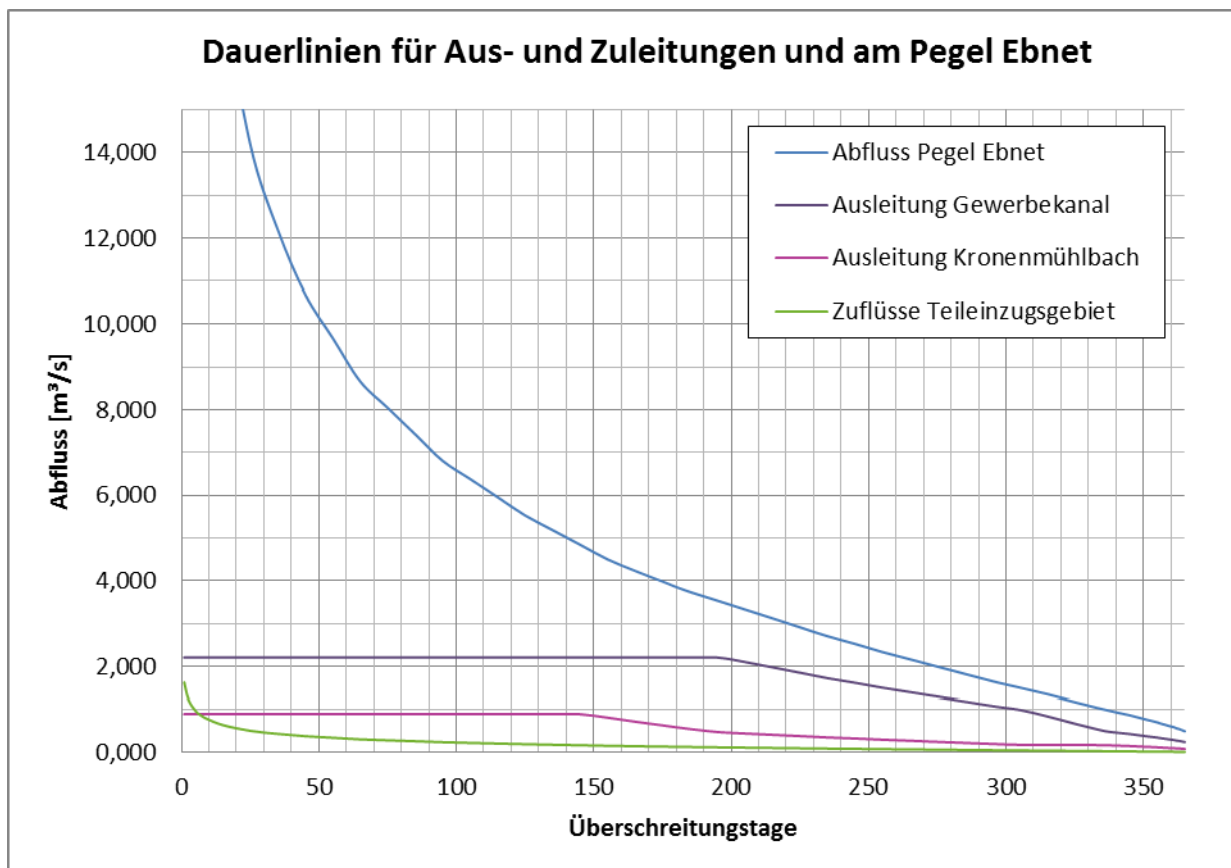


Abbildung 3-2: Dauerlinien für den Abfluss am Pegel Ebnet [9], für die Ausleitungen in den Gewerbekanal und den Kronenmühlebach sowie für die Zuflüsse im Teileinzugsgebiet

Die Abflussdauerlinie für den Standort ergibt sich aus der Summe der Dauerlinien für den Abfluss am Pegel Ebnet und den Zuflüssen im Teileinzugsgebiet, von der die Ausleitungen subtrahiert werden.

Um die Dauerlinie für die nutzbaren Abflüsse am Standort (rote Linie in Abbildung 3-3) zu erhalten, wird weiter, konstant über das Regeljahr, eine Restwassermenge von 0,33 m³/s (siehe Di-

mensionierung Beckenpass sowie Annahme für den Wasserbedarf einer Fischabstiegsanlage) abgezogen.

Aus Abbildung 3-3 ist zu erkennen, dass über die Hälfte des Regeljahres weniger als $1 \text{ m}^3/\text{s}$ zur Energieumwandlung zur Verfügung steht und eine Wasserkraftanlage an über 70 Tagen im Regeljahr stillstehen muss. Je nach Realisierungskonzept der Wasserkraftanlage muss die Anlage für hohe Abflüsse aufgrund des erhöhten Geschiebetriebs abgeschaltet werden (aus Erfahrungswerten für Abflüsse größer $28 \text{ m}^3/\text{s}$ – Einschätzung Hr. Wagner, Besitzer der Wasserkraftanlage am Sandfangwehr). Die Stromerzeugung muss deshalb im Regeljahr hauptsächlich zwischen Überschreitungstag 4 und 200 stattfinden.

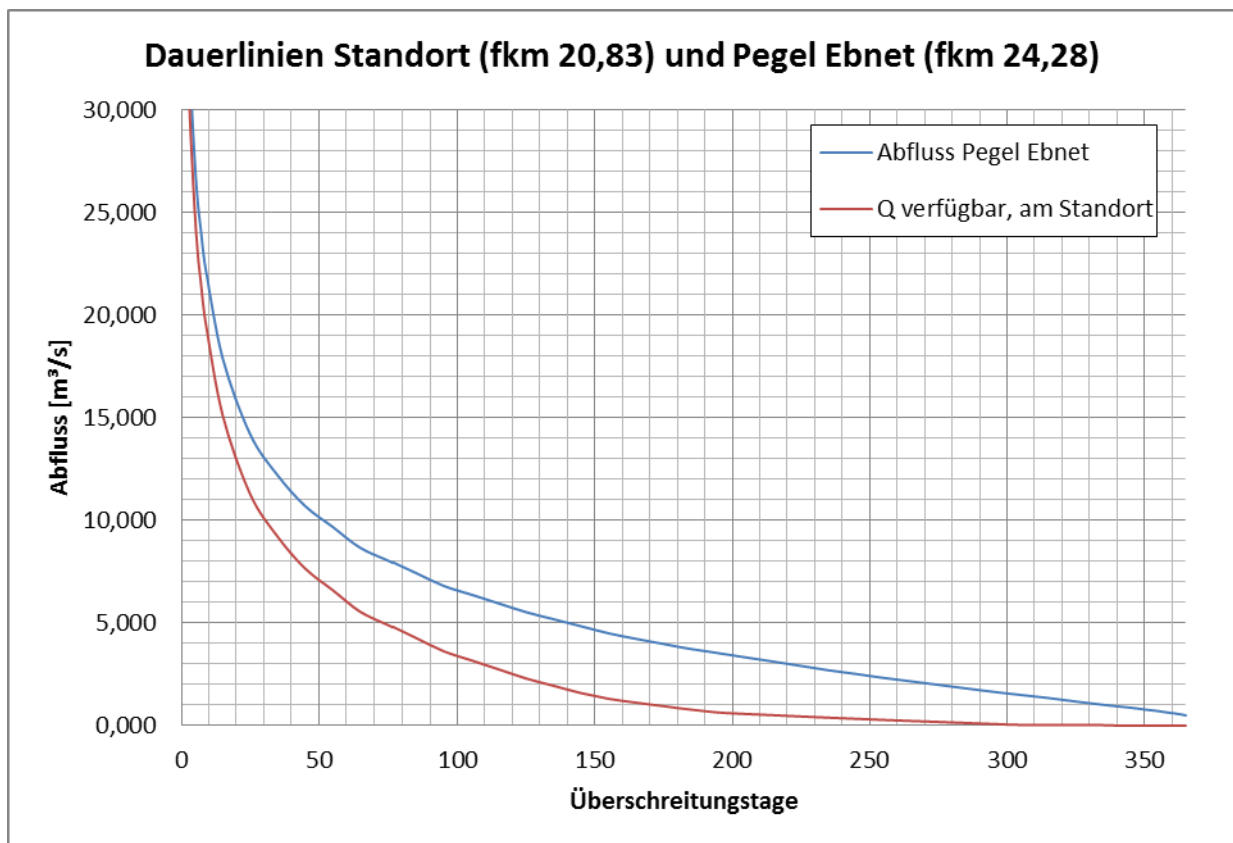


Abbildung 3-3: Dauerlinien für den Abfluss am Pegel Ebnet und für den energetisch nutzbaren Abfluss am Standort

Ausbaudurchfluss

Als Ausbaudurchfluss wird derjenige Abfluss am Standort definiert, der dem maximalen Durchfluss einer hydraulischen Maschine bzw. Turbine entspricht. Dreisamabflüsse über dem Ausbaudurchfluss werden nicht energetisch genutzt. Wird der Ausbaudurchfluss sehr hoch (mit

einer niedrigen Ausbauproduktion) gewählt, läuft die hydraulische Maschine viele Tage im Regeljahr im Teillastbereich (Wirkungsgradverluste) und die Investitionskosten sind sehr hoch (größere Laufräder, größeres Bauvolumen). Wird der Ausbaudurchfluss sehr niedrig angesetzt, fließt der Großteil der Wassermengen ungenutzt ab und das Regelarbeitsvermögen fällt niedrig aus. Aus Abbildung 3-3 scheint ein Ausbaudurchfluss zwischen 3 und 9 m³/s sinnvoll.

3.4.2 Fallhöhendauerlinie

Die Dauerlinie für die Nettofallhöhe ergibt sich aus der Bruttofallhöhe abzüglich der hydraulischen Verlusthöhen innerhalb der Wasserkraftanlage. Für die Ermittlung der Bruttofallhöhe werden die Dauerlinien für die Ober- und die Unterwasserstände in Abhängigkeit der Abflussdauerlinie für den Standort bestimmt. Für die Oberwasserstände ist für den Gewässerquerschnitt 5 m oberstrom der Holzrampenkrone (Dreisam Station 20+871,5) eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung mit Hilfe eines vorhandenen 2D-HN-Modell ermittelt worden. Das Stauziel im Oberwasser wird dem Niveau der Holzrampenkrone (274,5 m+NN) gleichgesetzt. Für Abflüsse größer dem Ausbaudurchfluss und der Restwassermenge wird das nicht turbinierte Wasser über die Holzrampe abgeführt. Für Abflüsse unter dem Ausbaudurchfluss fällt die Holzrampe trocken.

Um die Fallhöhe sinnvoll zu vergrößern, soll das Triebwasser zwischen der ersten und der zweiten Schwelle unterstrom der Holzrampe austreten. Als maßgebend für die Unterwasserstände wird der Gewässerquerschnitt 20 m unterstrom der Holzrampe (Dreisam Station 20+807,3) angesetzt. Für diesen ist wiederum eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung ermittelt worden.

Je nach Anlagenkonzept weichen die Fallhöhendauerlinien voneinander ab. Für Anlagenkonzepte, deren maßgebende Unterwasserstände unmittelbar unterstrom der Holzrampe angesetzt werden, wird die zuvor beschriebene Dauerlinie für die Unterwasserstände um 0,24 m angehoben.

Abbildung 3-4 zeigt die Bruttofallhöhendauerlinie für einen Ausbaudurchfluss von 5 m³/s. Die Bruttofallhöhe beträgt zwischen 2,6 und 2,96 m.

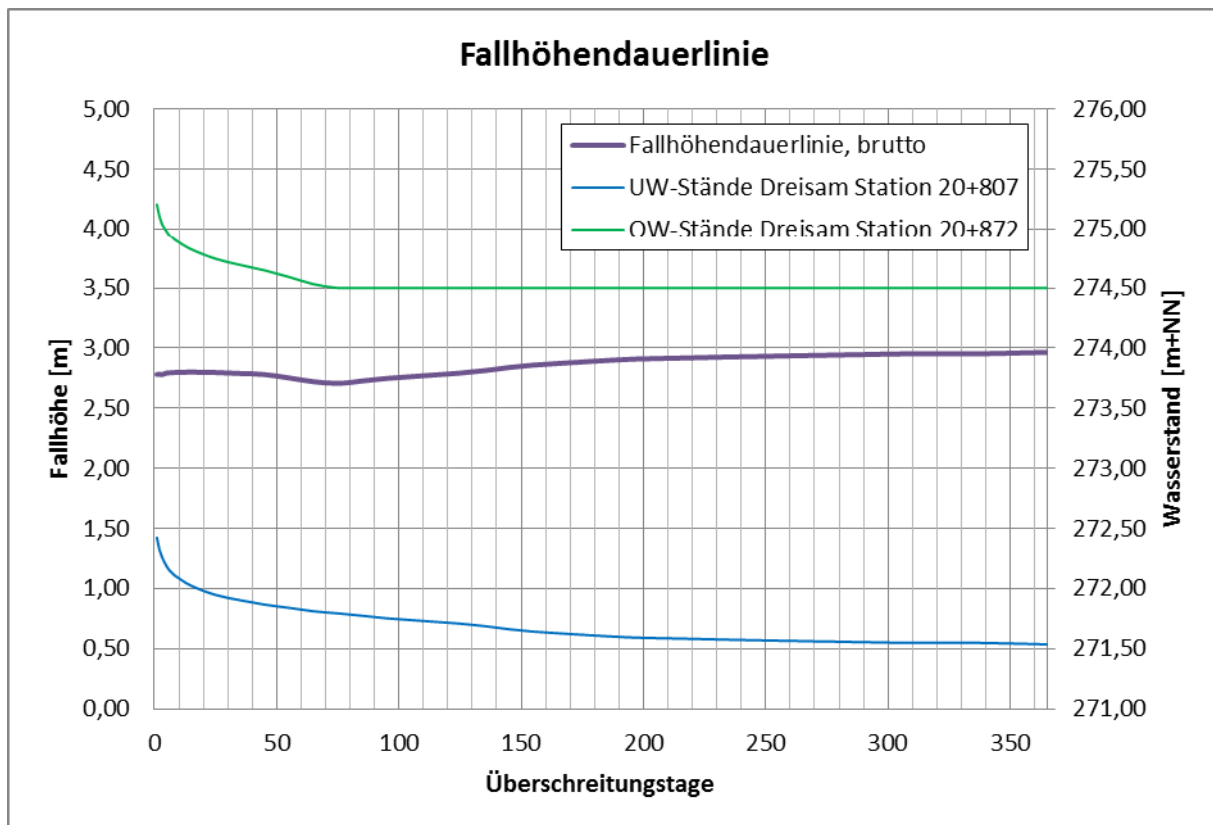


Abbildung 3-4: Dauerlinien für die Bruttofallhöhe sowie für die Ober- und Unterwasserstände

3.4.3 Hochwasserneutralität einer möglichen Wasserkraftanlage

Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Gewässer am Standort ist untersucht worden, inwiefern der Bau einer Wasserkraftanlage im bestehenden Fließquerschnitt der Holzrampe möglich ist, ohne dass die Hochwassersicherheit entscheidend negativ beeinflusst wird. Mit Hilfe des gleichen 2D-HN-Modells für das auch die Hochwasserneutralität des rechten, nördlichen Uferweges nachgewiesen wurde, ist eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt worden, bei der Fließquerschnittseinengungen von der linken und von der rechten Uferseite untersucht worden sind. Als Bemessungsabfluss ist wie für den Nachweis des rechten Uferweges das HQ100 multipliziert mit dem Klimafaktor angesetzt worden. Als entscheidender Parameter wird der Freibord unter der Greiffenegg- und der Schwabentorbrücke erachtet. Abbildung 3-5 zeigt die mögliche Fließquerschnittseinengung auf der linken Holzrampenseite (grün; 4,5 m - Streifen) und auf der rechten Holzrampenseite (rot; 3,77 m – Streifen ohne Einbeziehen des rechten Uferweges), die jedoch über dem Niveau von 275,5 m+NN überströmbar sein muss.

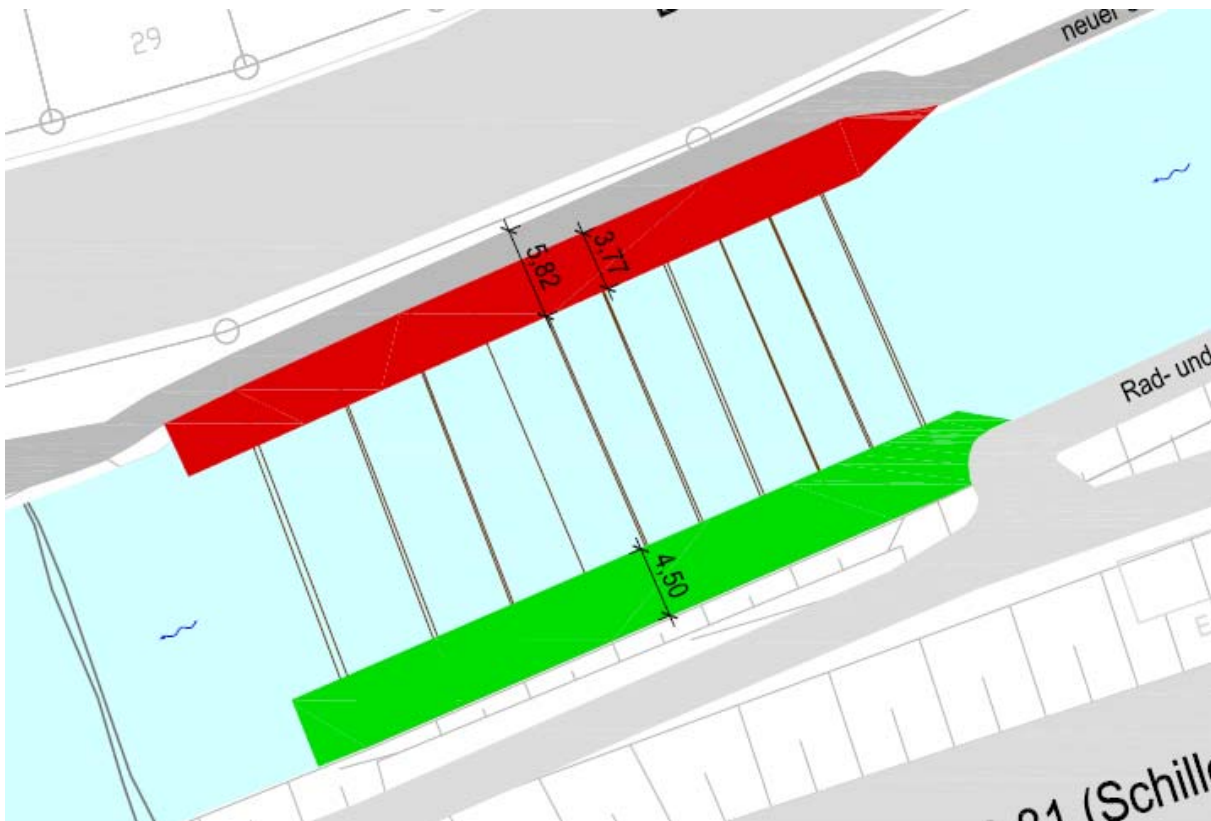


Abbildung 3-5: mögliche hochwasserneutrale Fließquerschnittseinengungen auf der Holzrampe; rote Fläche muss überströmbar sein.

4 TURBINENTECHNOLOGIEN FÜR NIEDRIGE FALLHÖHEN

4.1 Untersuchte Technologien

Für den Standort sind in Abhängigkeit der Fallhöhe und der Abflussdauerlinie, sowie den Anforderungen, die sich aus dem urbanen Umfeld ergeben, der Einsatz sämtlicher hydraulischer Maschinen untersucht worden:

- Kaplanturbinen (vertikalachsig und Rohrturbinen)
- Bewegliches, unter- und überströmbares Kraftwerk
- DIVE-Turbine
- Wasserkraftschnecke
- Durchströmturbinen
- Wasserräder (ober-, mittel- und unterschlächtig)
- Steffturbine
- Wasserdruckmaschine
- VLH-Turbine (Very Low Head – Turbine)
- Gravitationswasserwirbelkraftwerk

Als klassische Turbine für den Niederdruckbereich ist die Kaplanturbine untersucht worden. Francis-Schachtturbinen werden nicht in Erwägung gezogen, da die Herstellungskosten die einer Kaplanturbine übersteigen und einen schlechteren Wirkungsgradverlauf aufweisen.

Durchströmturbinen besitzen in Relation zur niedrigen Fallhöhe aufgrund des gewählten Ausbaudurchflusses große Laufraddimensionen. Für steigende Unterwasserstände kann der notwendige Freihang nicht garantiert werden.

Gleiches gilt für overschlächtige Wasserräder, für die ebenfalls ein Freihang über dem Unterwasser garantiert werden muss. Aufgrund der Lärmentwicklung, die von Wasserrädern ausgeht, müssten diese eine Einhausung erhalten. Mittel- und unterschlächtige Wasserräder besäßen in Abhängigkeit der Fallhöhe einen Durchmesser von bis zu 7 m. Um einen Ausbaudurchfluss von über 3 m³/s zu erreichen, müsste ein Wasserrad nahe an die maximale Radbreite von 5 m dimensioniert werden. Aus städtebaulicher und energetischer Sicht ist der Einsatz von Wasserrädern nicht sinnvoll.

Den Dimensionen eines mittelschlächtigen Wasserrades ähnlich, ist die zur Zeit in der Entwicklung befindliche Wasserdruckmaschine, deren Einsatz aus oben genannten Gründen am Standort ebenso nicht sinnvoll ist.

Die Steffturbine ist eine Neuentwicklung, deren Ursprung in der Fördertechnik liegt. Die kompakte Anlage, die aus einer mit Schaufeln bestückten Förderkette und einem innen angeordneten Generator besteht, ist aufgrund ihrer geringen Schluckfähigkeit und dem technischen Design für den Standort wenig vorteilhaft (Städtebaulicher Aspekt). Der benötigte Freihang über dem Unterwasser ist zudem mit einer Geräuschentwicklung verbunden.

Die Very Low Head – Turbine ist eine modifizierte, kompakte Kaplananlage mit feststehenden Leitschaufeln, die, einem Wehrverschluss ähnlich, aus dem Trogbauwerk schwenkbar ist. Da die VLH-Turbine für Ausbaudurchflüsse über 10 m³/s ausgelegt ist, wird ihr Einsatz für den Standort als nicht sinnvoll erachtet.

4.2 Für den Standort sinnvolle Technologien

Kaplanturbinen

Als sinnvolle Technologie für den Standort können Kaplanturbinen angesehen werden. In einer ersten Abschätzung verschiedener Anlagenkonzepte hat sich gezeigt, dass der vertikalachsigen Anordnung der Kaplanturbine (vertikale Turbinenwelle), der Vorzug gegenüber einer Rohrturbine (tiefliegendes hydraulisches System mit höheren Investitionskosten und Nachteilen in der Zugänglichkeit für die Wartung) zu geben ist. Durch die doppelte Turbinenregelung verfügt die Kaplanturbine über ein gutes Teillastverhalten. Je nach Wahl des Generators (Asynchrongenerator mit Drehzahlübersetzung oder Permanentmagnet Erregtem Synchrongenerator (PMG), direktgekoppelt) ist von einem vergleichsweise hohen Gesamtwirkungsgrad der Anlage auszugehen.

Der Ausbaudurchfluss einer vertikalachsigen Kaplanturbine ist von den standardisierten Lauf- radaußendurchmessern, die von Herstellern angeboten werden, abhängig.

Aufgrund der Betriebsdrehzahl der Turbine ist ein Fischschutz, sowie gegebenenfalls eine Fischabstiegsanlage notwendig.

Bewegliches, unter- und überströmbares Kraftwerk

Das bewegliche Kraftwerk besteht aus einem Stahlgehäuse, das, einem beweglichen Wehrverschluss ähnlich, in einem Trogbauwerk dreh- und höhenverstellbar gelagert ist. In dem Stahl-

gehäuse sind fischschonender Rundbogenfeinrechen, Rohrturbine mit direktgekoppelten PMG und Saugschlauch zu einer kompakten Anlage zusammengefasst. Außerhalb des Fließquerschnitts kann die Steuerwarte hochwassersicher gebaut werden. Für Abflüsse unter dem Ausbaudurchfluss wird die Wasserspiegeldifferenz durch das auf die Trogsohle aufliegende Stahlgehäuse gehalten. Für Hochwasserabflüsse kann das Stahlgehäuse angehoben werden, so dass ein größerer Fließquerschnitt zur Verfügung steht und Geschiebe an das Unterwasser weitergegeben wird. Im Vergleich zu anderen Anlagenkonzepten, muss das bewegliche Kraftwerk in Hochwassersituationen nicht abgeschaltet werden. Durch die Umströmung des Kraftwerks tritt ein Injektoreffekt auf, der die umgewandelte Energie erhöht (Mitteilung Hydro-Energie Roth GmbH).

DIVE-Turbine

Die DIVE-Turbine ist eine kompakte, doppeltregelbare Turbinen-Generator-Einheit mit einem Propellerlaufrad, die sich vollständig unter Wasser befindet. Im Vergleich zur Kaplan turbine verzichtet die DIVE-Turbine auf eine Laufradschaufelregelung und ist dafür drehzahlvariabel. An die Turbinenwelle ist der Permanentmagnet Erregte Synchrongenerator direkt gekuppelt. Die Turbinen-Generator-Einheit wird in einem (teilgeheberten) Einlaufschacht untergebracht, aus dem ein Energiestrang in die hochwassersicher gebaute Schaltwarte führt. Der Fischschutz und die Geschiebeabweisung müssen ähnlich der Kaplan turbine sichergestellt werden.

Wasserkraftschnecke

Aus hydraulischer Sicht ist der Einsatz einer Wasserkraftschnecke am Standort möglich. Als Vorteil gegenüber Kaplan- und DIVE-Turbine sind die Robustheit gegenüber Geschiebe und die fischschonendere Betriebseigenschaften zu nennen. Seitens der Hersteller wurde versucht, die Geräuscentwicklung beim Eintauchen der Schneckenblätter in das Unterwasser durch konstruktive Maßnahmen zu reduzieren. Ob trotz der konstruktiven Verbesserungen aufgrund des Lärmschutzes die gesamten Schnecken-Turbinen-Einheit eingehaust werden muss, kann an dieser Stelle nicht ausgeschlossen werden. Eine Wasserkraftschnecke könnte ansonsten mit einem Ausbaudurchfluss von 4 m³/s in dem (in der Sensitivitätsanalyse ermittelten) 4,5 m – Streifen auf der linken Rampenseite konzipiert werden. Durch die Einhausung wäre aus wirtschaftlicher Sicht eine Wasserkraftschnecke ähnlich einer Kaplan turbine einzuordnen: Die Kosten für die maschinentechnische Ausrüstung der Anlage für eine Wasserkraftschnecke liegt zwar unter der einer Kaplan turbine, dafür kann durch eine flexiblere Wahl des Ausbaudurchflusses und den etwas höheren Wirkungsgrad mit einer Kaplan turbine ein höheres Regelungsvermögen erzielt werden.

Da das Zentralrohr der Schnecke bei einer Neigung von 20 bis 26° bis über den Oberwasserspiegel hinaus zum Generator geführt werden muss, besäße ein Krafthaus mit Einhausung der Schnecke eine große Gebäudelänge in Fließrichtung sowie eine große Gebäudehöhe. Ein solches Krafthaus, ist aus städtebaulicher Sicht mit dem Standort sehr schwer zu vereinen.

Sowohl aus städtebaulicher als auch aus energetischer Sicht wird im Vergleich für diesen Standort der Einsatz einer Kaplan turbine als vorteilhafter angesehen. Im Folgenden wird deshalb das Realisierungskonzept einer Wasserkraftschnecke nicht weiter explizit untersucht.

Gravitationswasserwirbelkraftwerk

Das Gravitationswasserwirbelkraftwerk wandelt die Rotationsenergie eines Wasserwirbels über eine Turbinen-Generator-Einheit im Wirbelzentrum in elektrischen Strom um. Der Wasserwirbel bildet sich in einem kreisförmigen Rotationsbecken aus, das in Beckenmitte eine Öffnung in der Bodenplatte besitzt.

Als ökologische Vorteile sind nach Angaben der Anlagenhersteller neben dem Eintrag von Sauerstoff auch für gewisse Fischarten der Auf- und Abstieg durch die Anlage möglich.

Um den Aufstieg für schwimmschwache Fischarten und das Makrozoobenthos zu ermöglichen, wird das Anlagenkonzept zur Zeit weiterentwickelt: Durch Anrampungen an Sohlensprüngen und durch Sohlensubstrat soll ein durchgängiger Wanderkorridor innerhalb der Anlage geschaffen werden. Der Fischabstieg wird durch die niedrige Turbinendrehzahl von 30 Umdrehungen/min und ein geringes Spaltmaß zwischen Laufrad und Becken begünstigt. Erste Aufstiegsbeobachtungen im Sommer 2013 an einer Pilotanlage in Großharthau (Sachsen) an der Wesenitz haben gezeigt, dass die Anlage als Wanderkorridor für den Aufstieg wahrgenommen wird. Im Frühjahr 2014 sind eine ausführliche Funktionskontrolle des Fischeaufstiegs sowie die Untersuchung des Fischabstiegs durch das Institut für Wasserwirtschaft, Siedlungswasserbau und Ökologie GmbH (Weimar) vorgesehen. (Mitteilung Gesellschaft für Wasser-Wirbel-Kraftwerk mbH)

Ein Gravitationswasserwirbelkraftwerk als einzige Fischeaufstiegsanlage am Standort an der Dreisam kann jedoch nur realisiert werden, wenn ein quantifizierter Nachweis über die Funktionsfähigkeit des schadensfreien Auf- und Abstiegs für das gesamte Fischartenspektrum erbracht werden kann und die Ergebnisse auf das Artenspektrum in der Dreisam transferiert werden kann. Ob die Ergebnisse an der Pilotanlage auf das Artenspektrum der Dreisam übertragen werden können, ist fraglich. [10]

Aus Sicht der Fischereibehörde ist die Herstellung der Durchgängigkeit am Standort von besonderer Bedeutung, da sie eine wichtige Voraussetzung für die Lachswiederansiedlung dar-

stellt. An diesem „sensiblen Gewässerpunkt“ sind somit eine garantierte Funktionsfähigkeit von Fischauf- und –abstieg, sowie ein ausreichender Fischschutz zwingend. [10]

Aus diesen Gründen wird im Folgenden die Variante eines Wasserwirbelkraftwerkes mit zusätzlicher Fischaufstiegsanlage untersucht. Diese Lösung bietet zudem die Chance zwei alternative Aufstiegsmöglichkeiten auf wissenschaftlicher Basis zu vergleichen.

Da die Anlage als Fischaufstieg mit zusätzlich energetischer Nutzung der Restwassermenge konzipiert worden ist, liegt das Regelarbeitsvermögen um ein Vielfaches unter dem der zuvor genannten Technologien zur Wasserkraftnutzung.

5 REALISIERUNGSKONZEPTE

Mit vier der fünf in Kapitel 4.2 erläuterten Technologien sind Realisierungskonzepte für eine Kleinwasserkraftanlage entwickelt, das Regelarbeitsvermögen bestimmt und die Wirtschaftlichkeit untersucht worden. Außerdem sind die Realisierungskonzepte anhand städtebaulicher und denkmalpflegerischer Aspekte bewertet worden.

5.1 Zusammenfassung der Realisierungskonzepte

Für jede der vier hydraulischen Maschinen wird eine Realisierungsvariante konzipiert, wobei je nach Verfügbarkeit der Turbinengrößen und hydraulischen Gesichtspunkten der Ausbaudurchfluss variiert wird.

Zur Ermittlung des Regelarbeitsvermögens wird der Gesamtanlagenwirkungsgrad angesetzt und die hydraulischen Verluste innerhalb der Wasserkraftanlage abgeschätzt, sodass die Nettofallhöhe berechnet werden kann. Die Leistungspläne der Anlagenvarianten befinden sich in der Anlage.

Die Bruttoinvestitionen sind abgeschätzt worden und beinhalten in den folgenden Tabellen nur die Kosten für eine Wasserkraftanlage ohne Fischaufstiegsanlage und ohne Instandsetzungsarbeiten für die Holzrampe. Eine Aufstellung der Nettoinvestitionen für die Wasserkraft- und Fischaufstiegsanlage sowie für die Instandsetzungsmaßnahmen der Holzrampe sind Anlage 8 zu entnehmen.

Variante 1: Vertikalachsige Kaplan turbine

Der Standort der Wasserkraftanlage ist auf der linken Rampenseite (grüner Bereich aus der Sensitivitätsanalyse). In Tabelle 7-1 sind die gewählten Ausbaudurchflüsse Q_a (max. Schluckvermögen), Regelarbeitsvermögen und Bruttoinvestitionssummen für die Wasserkraftanlage ohne Fischaufstiegsanlage aufgeführt:

Tabelle 5-1: Ausbaudurchfluss Q_a , Regelarbeitsvermögen und Bruttoinvestitionssummen für Variante 1

Anlagenkonzept	Ausbaudurchfluss Q_a [m ³ /s]	Regelarbeitsvermögen RAV [kWh]	Investitionssumme (brutto) ohne FAA [€]
1	3,13	226.000	997.000
	3,87	257.000	1.051.000
	4,95	291.000	1.211.000

$Q_a = 3,13 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_a = 3,87 \text{ m}^3/\text{s}$

Für die Wahl eines Ausbaudurchflusses der vertikalachsigen Kaplan turbine von $Q_a = 3,13 \text{ m}^3/\text{s}$ oder $Q_a = 3,87 \text{ m}^3/\text{s}$ wird das hydraulische System wie in Abbildung 5-1 skizziert, vorgeschlagen. Das Triebwasser wird über das Einlaufbauwerk auf der linken Uferseite oberstrom der Holzrampe entnommen. Über einen offenen Triebwasserkanal entlang der bestehenden linken Ufermauer wird das Triebwasser zum Krafthaus geführt, das unmittelbar unterstrom der Holzrampe angeordnet wird. Die dem Fließquerschnitt zugewandte Seitenwand des Werkkanals soll im Hochwasserfall überströmbar sein. Der Turbinenzulauf im Krafthaus wird als Halbspirale ausgeführt. Die vertikale Kaplan turbine kann teilgehebert angeordnet werden, sodass der gekrümmte Saugschlauch höher gegründet werden und die Turbine selbstständig anlaufen kann. Die Turbinenwelle wird vertikal durch die Zwischendecke geführt, über der direkt ein Permanentmagnet Erregter Synchrongenerator oder eine Riemenscheibe sitzt, die über einen Flachriemen mit einem Asynchrongenerator verbunden ist. Der Saugschlauch endet zwischen der ersten und der zweiten Schwelle unterstrom der Holzrampe. Eine Längsskizze durch das Krafthaus ist in Anlage 3 zu finden.

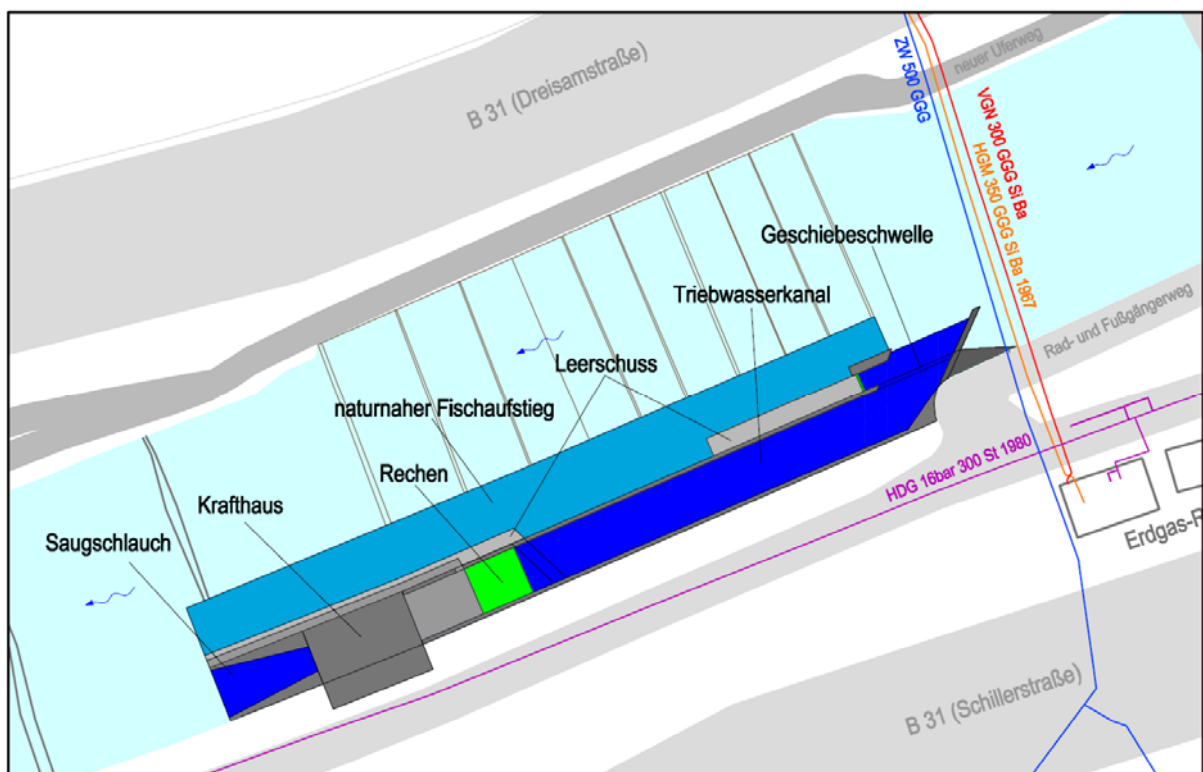


Abbildung 5-1: Lageskizze Variante 1 - vertikalachsige Kaplan turbine ($Q_a=3,13 \text{ m}^3/\text{s}$)

Da die linke Uferseite Kurveninnenseite ist, wird die Geschiebeakkumulation dort als hoch eingeschätzt. Um Geschiebe von der Turbine fern zu halten werden zwei Geschiebeabweiser bzw. –abzüge für bettbildende Abflüsse vorgesehen: Eine niedrige Geschiebeschwelle im Einlaufbauwerk soll einen Teil des Geschiebes vor dem Eindringen in den Triebwasserkanal abhalten und gleichzeitig soll über ein Schütz im Bereich der Rampenkronen eine Spülmöglichkeit in einen Leerschuss vorgesehen werden. Für Geschiebe, das in den Werkkanal gelangt, wird eine zweite Spülmöglichkeit (in einen weiteren Leerschuss) unmittelbar vor dem Rechen vorgesehen. Um die hydraulischen Verluste am Feinrechen gering zu halten und aus Gründen des Fischschutzes wird der Rechen in einem Winkel von 30° zur Sohle geneigt. Der Fischabstieg findet über die Rechengutrinne statt. Der Fischaufstieg kann naturnah mit Beckenstruktur oder durch eine technische Anlage realisiert werden. Es wird für die weitere Betrachtung ein naturnaher Beckenpass gewählt.

$Q_a = 4,95 \text{ m}^3/\text{s}$

Das hydraulische System der Wasserkraftanlage ist für den Ausbaudurchfluss $Q_a = 4,95 \text{ m}^3/\text{s}$ dasselbe, wie für $Q_a = 3,13 \text{ m}^3/\text{s}$. Lediglich für den Geschiebehaushalt und die Rechenanordnung wird das Konzept verfolgt, Geschiebe, Schwimmstoffe und Fische vom Werkkanal fern zu halten: Vor dem Einlaufbauwerk wird das Geschiebe durch eine „Grazer Kragsschwelle“ abgefangen und über ein tiefliegendes Schütz in den Leerschuss gespült. Ein Horizontalrechen (Feinrechen) im Einlaufquerschnitt des gedeckelten Einlaufbauwerks (unter der bestehenden Rampe für den linken Uferweg) hindert Fische und Schwimmstoffe vor dem Eindringen in den Werkkanal. Aus Gründen der Sicherheit wird im Werkkanal unmittelbar vor dem Krafthaus ein Grobrechen angeordnet. Da der Werkkanal nicht beliebig breiter gestaltet werden kann, kann die für einen solchen Ausbaudurchfluss benötigte Rechenfläche (Fischschutz) nicht im Werkkanal realisiert werden. Als Bauwerk für die ökologische Durchgängigkeit wird der konventionelle Beckenpass gewählt.

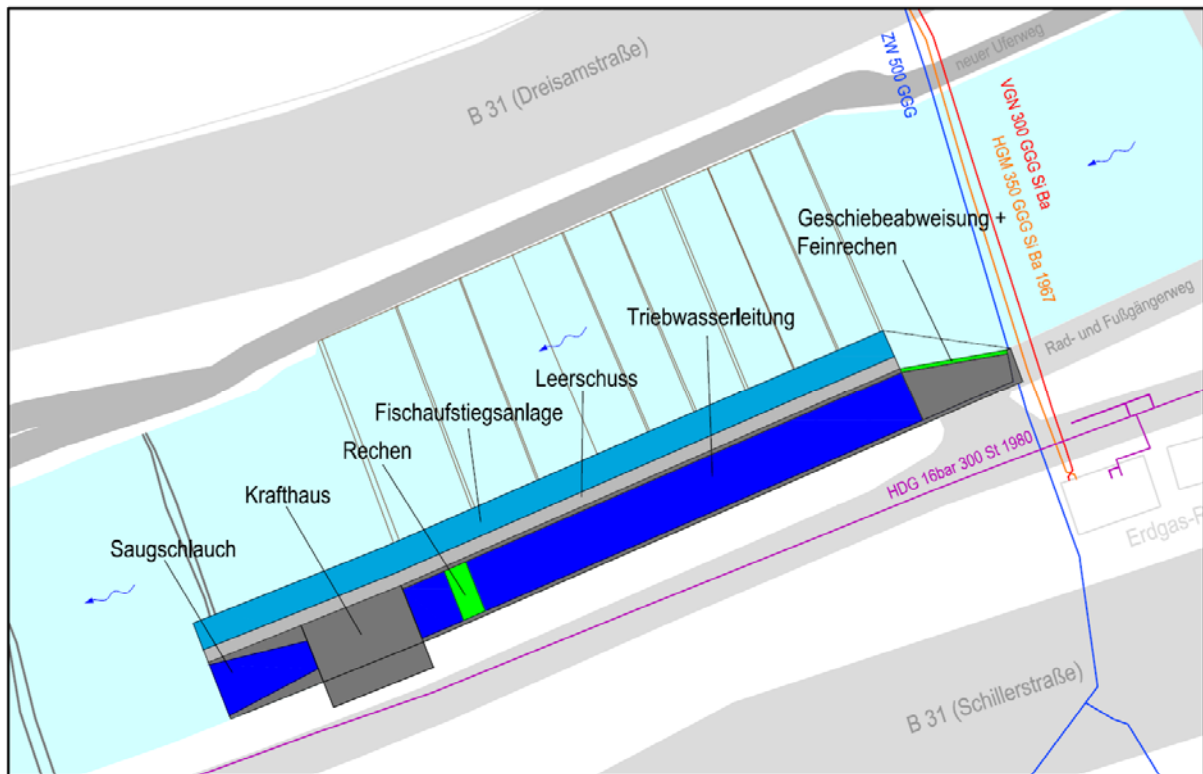


Abbildung 5-2: Lageskizze Variante 1 - vertikalachsige Kaplanturbine ($Q_a=4,95\text{m}^3/\text{s}$)

Neben dem größeren Platzangebot auf der linken Uferseite, sprechen die geringeren Kosten für die Unterfangung der Ufermauer, die Lage des Werkkanals zum Uferweg (der rechte Uferweg müsste neu trassiert bzw. höher angeordnet werden) sowie die geschützte Lage des Werkkanals (durch die Gestaltung des Einlaufbauwerks) für den Standort auf der linken Uferseite. Zudem ist die Zugänglichkeit auf der linken Uferseite für die Bauphase und für Revisionen günstiger einzuschätzen.

Variante 2: Bewegliches Kraftwerk

Das bewegliche Kraftwerk wird aufgrund der besseren Anströmsituation auf der Prallseite, möglichst nahe an der rechten Uferseite angeordnet. Umlenkungen des Triebwassers, die aufgrund einer Anordnung auf der linken Uferseite entstanden, führten zu erhöhten Wirkungsgradverlusten der Gesamtanlage.

Es werden zwei verschiedene Ausbaudurchflüsse (maximale Schluckvermögen) ausgewählt. Für diese Variante ergeben sich die unterschiedlichen Ausbaudurchflüsse bei gleichem Laufraddurchmesser über die unterschiedliche Flügelanzahl der Rohrturbine.

Tabelle 5-2: Ausbaudurchfluss, Regelarbeitsvermögen und Bruttoinvestitionssummen für Variante 2

Anlagen-konzept	Ausbaudurch-fluss Q_a [m³/s]	Regelarbeitsver-mögen RAV [kWh]	Investitionssumme, brutto ohne FAA [€]
2	6,74	348.000	1.597.000
	8,09	369.000	1.609.000

Abbildung 5-3 (Lageskizze) zeigt das bewegliche Kraftwerk, das im Trogbauwerk aus Stahlbeton am oberstromigen Kraftwerksende drehbar gelagert wird. Ein Längsschnitt durch das Kraftwerk ist in Anlage 4 skizziert. Als Standort für die Steuerwarte, die bis zu 200 m vom beweglichen Kraftwerk entfernt sein kann, kommt die linke Uferseite in Frage. Im Vergleich zur Variante 1 wird die geringere Fallhöhe mit den Unterwasserständen unmittelbar unterstrom der Holzrampe angesetzt. Der Fischaufstieg, für den sich eine technische Lösung (hier: verkürzter, konventioneller Beckenpass) anbietet, wird zwischen dem Trogbauwerk und der rechten Ufermauer angeordnet. Ausreichender Fischschutz ist durch den Rundbogenfeinrechen des Kraftwerks gegeben. Das Rechengut wird durch den im beweglichen Kraftwerk integrierten Rechenreiniger Richtung Wasseroberfläche gefördert und dort durch das Umlegen der Spülklappen über das Kraftwerk an das Unterwasser weitergegeben. Die Geschiebeweitergabe erfolgt bei erhöhtem Abfluss durch das Anheben des Kraftwerks.

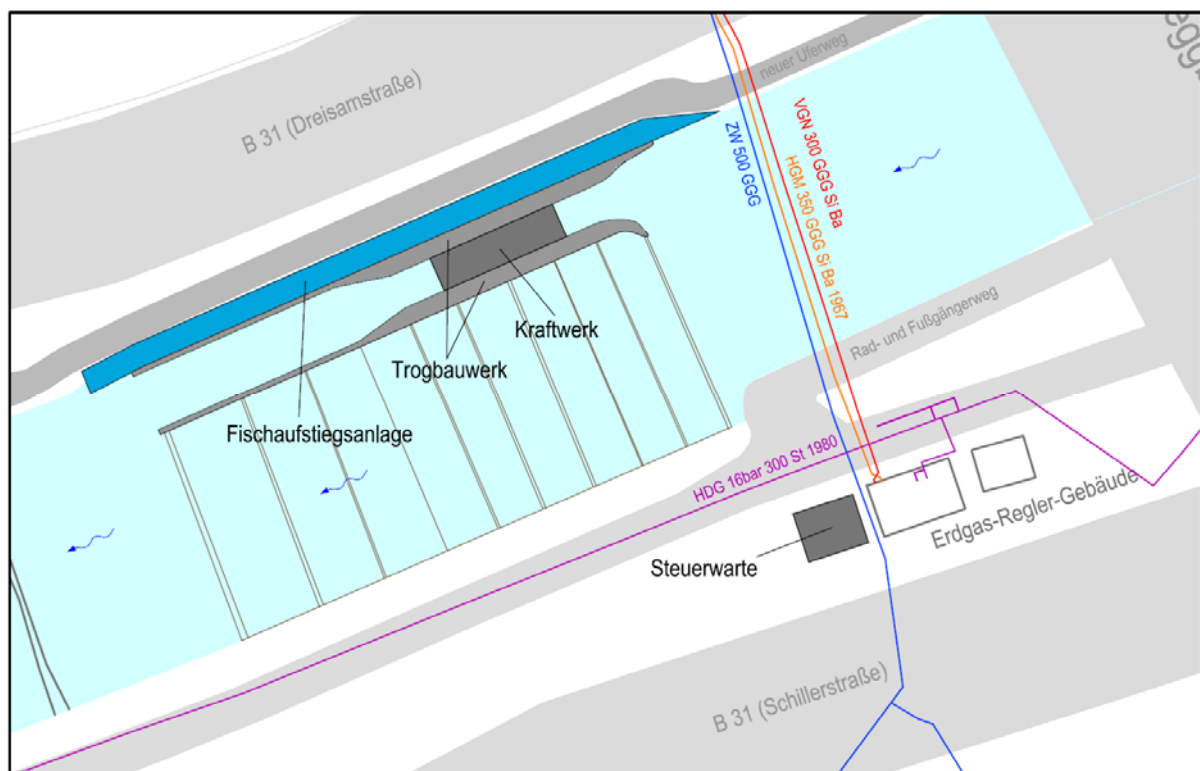


Abbildung 5-3: Lageskizze Variante 2 - bewegliches Kraftwerk

Aufgrund der positiven Betriebseigenschaften (Geschiebe- und Treibgutweitergabe) sind vergleichsweise große Wartungsintervalle zu erwarten und die Betriebskosten werden niedriger eingeschätzt. Aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit der rechten Uferseite (Teilspernung B 31) wird der Aufwand für die Wartungsarbeiten jedoch als kostenintensiv bewertet.

Variante 3: DIVE-Turbine

Für die DIVE-Turbine wird ein Ausleitungskraftwerk in Rampenmitte konzipiert (Abbildung 5-4).

Tabelle 5-3: Ausbaudurchfluss, Regelarbeitsvermögen und Bruttoinvestitionssumme für Variante 3

Anlagen-konzept	Ausbaudurch-fluss Q_a [m ³ /s]	Regelarbeitsver-mögen RAV [kWh]	Investitionssumme brutto ohne FAA [€]
3	5,20	303.000	1.394.000

Wie für Variante 1 wird das Triebwasser in einem Werkkanal der Turbine zugeführt. Um die Hochwasserneutralität, die mithilfe des 2D-HN-Modells untersucht worden ist, zu wahren, muss das Einlaufbauwerk sowie die Triebwasserleitung im Bereich der Rampenkronen überströmbar ausgebildet werden. Der Einlaufschacht für die DIVE-Turbine befindet sich am unterstromigen Ende der Holzrampe. Das Triebwasser wird im Einlaufschacht teilgehebert. Der Saugschlauch wird gekrümmt ausgeführt. Einlaufschacht und Steuerwarte, die hochwassersicher auf der linken Uferseite vorgesehen wird, sind durch einen Steg miteinander verbunden, über diese auch der Energiestrang zur Steuerwarte geführt wird.

Der Geschiebetrieb und der Schwimmstoffeintrag in den offenen Werkkanal werden als hoch eingeschätzt. Eine Spülmöglichkeit für das Geschiebe in die beiden Leeschüsse wird vor dem Feinrechen vorgesehen. Der Feinrechen wird mit 30° zur Sohle geneigt ausgeführt. Der Fischabstieg kann über die Spülrinne erfolgen. Um große Schwimmstoffe vom Feinrechen fernzuhalten, kann diesem ein Grobrechen im Werkkanal vorgeschaltet werden. Generell ist von einer hohen Verklausungswahrscheinlichkeit des Werkkanals auszugehen. Um dieser entgegen zu wirken können weitere konstruktive Maßnahmen vorgesehen werden.

Zur Herstellung der Durchgängigkeit bietet es sich für den Bau eines Ausleitungskraftwerks in Gewässermitten an, eine Seite der Holzrampe als naturnahe Teilrampe auszuführen und die andere Seite als Holzrampe zu erhalten. In der Mitte der Teilrampe kann die Niedrigwasserrinne eine Beckenstruktur erhalten, über die ein Aufstieg der Zielarten möglich ist.

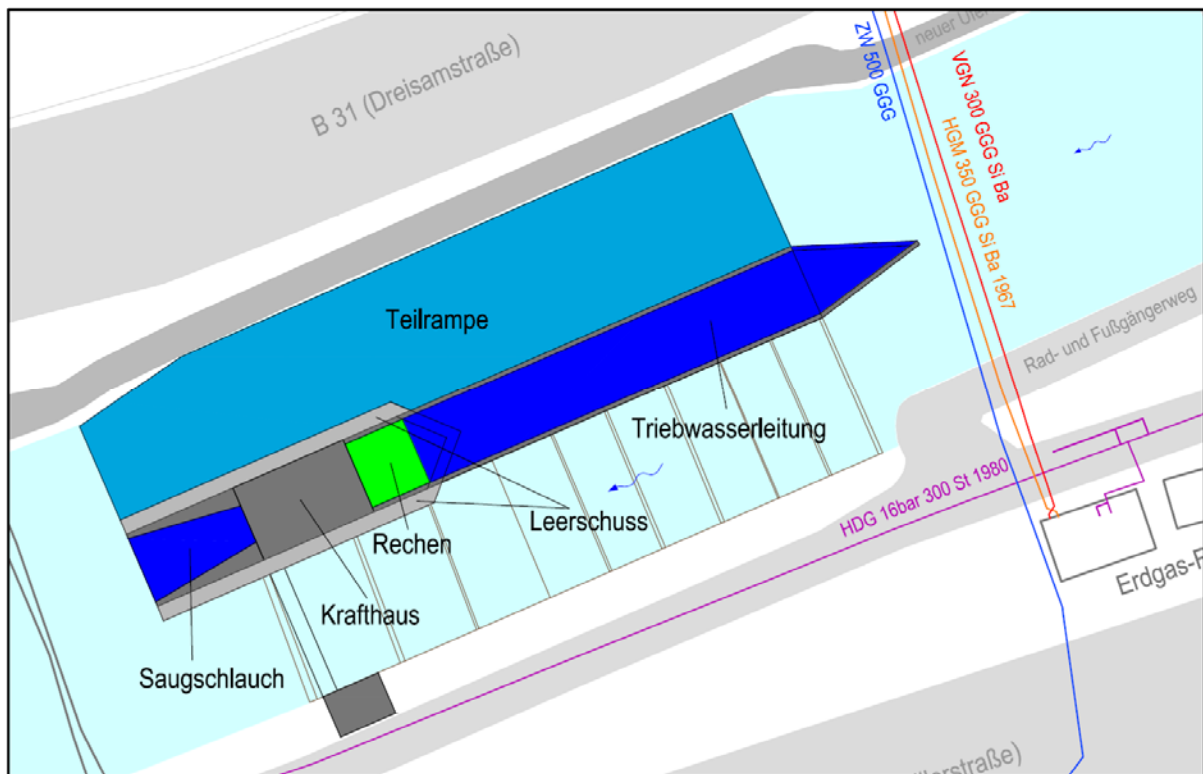


Abbildung 5-4: Lageskizze Variante 3 - DIVE-Turbine

Variante 4: Gravitationswasserwirbelkraftwerk

Da Fallhöhe und Ausbaudurchfluss vom Durchmesser des Rotationsbeckens begrenzt werden und für dieses ein maximaler Durchmesser von 5 m gewählt wird, werden für den Standort zwei Gravitationswasserwirbelkraftwerke auf der linken Uferseite konzipiert.

Tabelle 5-4: Ausbaudurchfluss, Regelarbeitsvermögen und Bruttoinvestitionssumme für Variante 4

Anlagen-konzept	Ausbaudurch-fluss Q_a [m³/s]	Regelarbeitsver-mögen RAV [kWh]	Investitionssumme brutto ohne FAA [€]
4	1,50	75.000	538.000

Durch beide Rotationsbecken wird eine Fallhöhe von 1,35 m abgebaut. Das Triebwasser wird den Rotationsbecken über einen offenen und überströmbaren Werkkanal zugeführt. Ein Grob-rechen am Kanaleinlauf soll große Schwimmstoffe vom Werkkanal fern halten. Ein Drossel-schütz vor dem ersten Becken regelt den Zufluss. Während der Werkkanal an der bestehenden Ufermauer entlang geführt wird, werden die Rotationsbecken in die Ufermauer integriert. Die

Generatoren (PMG) werden direkt an die Turbinenwelle gekoppelt und auf einem Steg, der über die Rotationsbecken montiert wird, gelagert.

Die Durchgängigkeit von Geschiebe durch das Gravitationswasserwirbelkraftwerk ist möglich. Für den Werkkanal wird eine Spülmöglichkeit für das Geschiebe vor dem ersten Becken vorgesehen.

Als Fischaufstiegsanlage wird ein konventioneller Beckenpass gewählt. Für die weiteren Berechnungen wird angenommen, dass der weitestgehend schadensfreie Fischabstieg durch das Gravitationswasserwirbelkraftwerk für kleine Individuen möglich ist, und auf ein Feinrechen verzichtet werden kann.

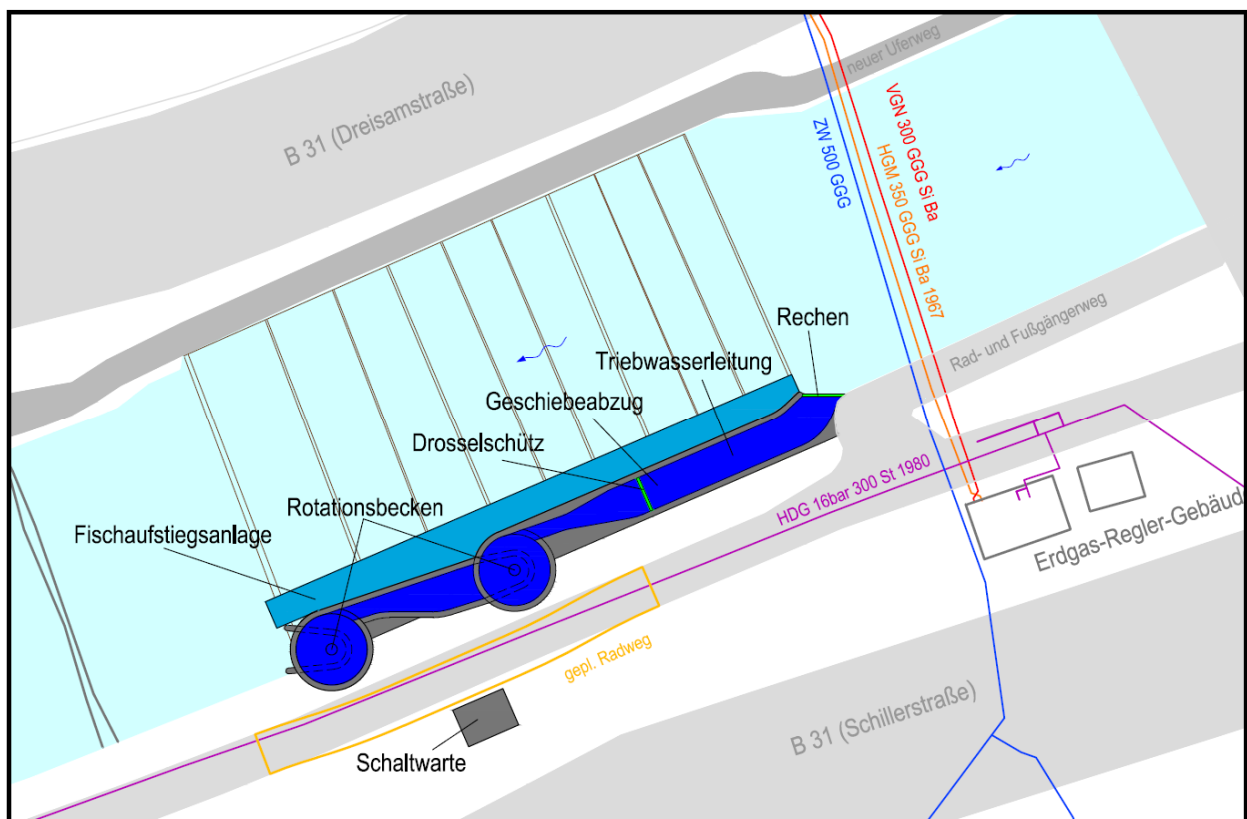


Abbildung 5-5: Lageskizze Variante 4 - Gravitationswasserwirbelkraftwerk

5.2 Städtebauliche Aspekte [11]

Während sich, von oberstrom betrachtet, der Werkkanal für Variante 1 (vertikalachsige Kaplan-turbine) im Rücksprung der linken Ufermauer unauffällig verhält und stets unterhalb der Oberkante der Ufermauer verläuft, ist das Krafthaus, welches 2 bis 3 m über das Niveau der linken Ufermauer reicht, von jedem Standpunkt des Betrachters aus wahrnehmbar. Hier bestehen erhöhte Anforderungen an die Gestaltung. Die Größe des Krafthauses sollte im Laufe der weiteren Planung optimiert werden, um die Einbindung in die Umgebung zu berücksichtigen. Die Raumgröße ergibt sich jedoch aus dem Platzbedarf für die Maschinentechnik und deren Wartung sowie gegebenenfalls für Besuchergruppen (Präsentation der Technik). Integration in das bestehende Bild des Standorts, das von Bäumen und Strauchvegetation geprägt ist, Funktionalität und Zweckmäßigkeit stehen für die konventionelle Wasserkraftanlage im Vordergrund. Wenn möglich, sollte der Werkkanal in Fließrichtung verkürzt werden, sodass das Krafthaus weiter nach oberstrom verlegt werden kann. Dabei ist jedoch mit einer Verringerung der Fallhöhe zu rechnen.

Für das bewegliche Kraftwerk (Variante 2) ist ebenso Funktionalität das dominante Merkmal. Im Vergleich zu Variante 1 reicht das Trogbauwerk, nur maximal 1,8 m über das Niveau der Holzrampe und liegt in Fließrichtung betrachtet stets unterhalb des Fußweg-Niveaus auf der rechten Uferseite. Als Leitbild kann auch hier die Integration der Wasserkraftanlage in die bestehende Holzrampe formuliert werden. Um den Eingriff in das Gesamterscheinungsbild der Holzrampe zu minimieren, kann ein Tausch des Trogbauwerks mit der Fischaufstiegsanlage untersucht werden, sodass das bewegliche Kraftwerk weiter zur rechten Uferseite gerückt wird. Ein Verlegen der Variante auf die linke Uferseite wäre städtebaulich zwar wünschenswert, widerspricht allerdings strömungstechnischen Voraussetzungen.

Im Gegensatz zu Variante 1 und 2 steht für Variante 3 nicht die Integration, sondern die ausdrucksvolle Demonstration der Wasserkraftnutzung in Kombination mit der Fischaufstiegsanlage im Mittelpunkt. Werkkanal und insbesondere das Krafthaus bzw. Schachtbauwerk werden exponiert in Rampenmitte positioniert und wirken als Trennelement zwischen historischem, denkmalgeschützten und naturnahem, modernen Sohlenbauwerk.

Variante 4 (Wasserwirbelkraftwerk) wiederum integriert sich in die linke Ufermauer, führt aber gleichzeitig durch die Rotationsbecken und die Linienführung der Trennwand zwischen Wasserkraft- und Fischaufstiegsanlage neue Formen am Standort ein. Dabei fügt sich die Wasser-

kraftanlage organisch in die linke Ufermauer ein. Der Eingriff in den Bestand fällt vergleichsweise gering aus, da die Anlage nicht über das Niveau der Maueroberkante hinausragt.

Vergleicht man die beiden Uferseiten miteinander, so lässt sich eine Wasserkraftanlage einfacher auf der linken Uferseite in die bestehende Uferböschung integrieren, da dort die Vegetation dominiert und eine Wasserkraftanlage „in den Schatten stellt“. Das Erscheinungsbild der rechten, sanierten Ufermauer reagiert ungleich sensibler auf Veränderungen, da dort keine wahrnehmbare Vegetation vorhanden ist, und der Blick auf die Häuserreihe der Dreisamstraße freigegeben ist. Ein mögliches Krafthaus, das sich in die Böschung auf der rechten Uferseite, unterstrom der Holzrampe integriert, ist aus den in Kapitel 5.1 genannten Gründen für die Varianten nicht sinnvoll.

Aus städtebaulicher Sicht werden hohe Anforderungen an die Gestaltung des Standortes gestellt. Für die gestalterische Einbindung einer Wasserkraftanlage an den Standort ist mit zusätzlichen Kosten für die Planung und Umsetzung zu rechnen, die in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kapitel 6 nicht berücksichtigt werden.

5.3 Schallemissionen

Nach TA-Lärm muss für die Wohngebäude in der Dreisam- und Schillerstraße (Zuordnung Mischgebiet) der Immissionsrichtwert für den Beurteilungspegel für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden von tagsüber 60 dB(A) und nachts 45 dB(A) eingehalten werden.

Eine Wasserkraftanlage muss somit unter Volllast den Immissionsrichtwert für den Beurteilungspegel von 45 dB(A) an den nächstgelegenen Gebäuden (Entfernung je nach Variante 20 bis 30 m) einhalten. Da die Luftschallemissionen einer Wasserkraftanlage das Ergebnis der Überlagerungen verschiedenster Geräuschquellen der einzelnen Anlagenteile sind, ist es schwierig eine zuverlässige Prognose zu treffen. Beispielsweise ist neben dem Generator und der Turbine die Geräuschentwicklung im Unterwasser maßgebend. (Einschätzung Hr. Rink, Ingenieurbüro für Schall- und Wärmeschutz)

Als Vergleich für das bewegliche Kraftwerk (Variante 2) kann eine bereits realisierte Anlage in Bad Sulza herangezogen werden: Das Kraftwerk mit einer Ausbauwassermenge von ca. 4,3 m³/s und einer Fallhöhe von 1,9 m hält den Immissionsrichtwert von 35 dB(A) in einem Kurgebiet für eine 70m entfernte Bebauung ein. (Mitteilung Hr. Roth, Hydro-Energie Roth GmbH).

Ebenso wie das bewegliche Kraftwerk wird die gesamte Turbinen-Generator-Einheit der DIVE-Turbine vollständig umströmt – auch hier sind voraussichtlich keine weiteren schalldämmenden Maßnahmen vorzusehen.

Bei Variante 1 sind die größten Emissionswerte vom Generator zu erwarten. Durch schalldämmende bauliche Maßnahmen im Krafthaus können die Emissionen soweit reduziert werden, dass der Richtwert mit Sicherheit eingehalten werden kann.

An der Pilotanlage des Gravitationswasserwirbelkraftwerkes konnte bei der bisher einzigen Messung lediglich festgestellt werden, dass der Schallpegel des Kraftwerks unter dem des nahegelegenen Wehrüberfalls (70 dB(A)) lag. Nach subjektiver Wahrnehmung ist das Laufrad des Wasserwirbelkraftwerkes geräuschintensiver, als der Generator. Würden zu hohe Schallemissionen für das Kraftwerk ermittelt, so können die Rotationsbecken mit geringem Aufwand eingehaust werden. (Mitteilung Gesellschaft für Wasser-Wirbel-Kraftwerk mbH)

5.4 Denkmalschutz der Holzrampe

Der Holzrampe wird ein Status als Kulturdenkmal gemäß §2 DSchG zugeschrieben. Dabei liege die Erhaltung aufgrund des „dokumentarischen und exemplarischen Wertes sowie des Seltenheitswertes im öffentlichen Interesse“ [12].

Aus Sicht der Denkmalpflege soll die „historisch überlieferte Substanz geschont“ und die „Nachvollziehbarkeit des Denkmalwertes erhalten“ werden (Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg über die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an denkmalgeschützten Querbauwerken).

Übertragen auf den Standort sind größtmöglicher Substanzerhalt, die historische Funktionserfüllung sowie das Gesamterscheinungsbild der Holzrampe entscheidende Kriterien, um die Authentizität des Denkmals zu wahren. So sollte eine Wasserkraftanlage am Standort sowohl einen geringen Flächenverbrauch aufweisen, als auch sich möglichst unscheinbar in den Standort integrieren. Die historische Funktionsfähigkeit (Stauhaltung und Sohlsicherung für erhöhte Dreisamabflüsse) soll durch eine Wasserkraftnutzung nicht negativ beeinflusst werden. Beobachtungen an der Holzrampe lassen die These zu, dass die Dauerhaftigkeit der Holzrampe mehr durch erhöhten Geschiebetrieb auf der linken Seite beeinträchtigt wird, als durch das häufigere Trockenfallen der rechten Rampenseite. Durch den Bau einer Wasserkraftanlage kann je nach Variante der Geschiebetrieb auf der Rampe reduziert werden, was die Dauerhaftigkeit der Holzrampe positiv beeinflussen kann.

Unabhängig von einer Wasserkraftnutzung muss den notwendigen Instandsetzungsmaßnahmen an der Holzrampe eine Schadensanalyse vorausgehen, die den Bestand detailliert erfasst und dokumentiert, sodass ein Vergleich mit historischen Planunterlagen möglich ist. Die Maßnahmen müssen so umgesetzt werden, dass die notwendigen Reparaturen den originalen Zustand erhalten. [13]

Für die Wasserkraftnutzung sind nach Kriterien des Denkmalschutzes Variante 1 und 4 am besten zu bewerten, da neben dem geringen Flächenbedarf eine unscheinbare Integration an den Standort möglich ist. Insbesondere Variante 4, die einen Innovationscharakter aufweist, ist aus Sicht der Denkmalpflege eine interessante Lösung, da sie als „historische Fortschreibung der Wassernutzung am Standort“ gesehen werden kann. Variante 3 stellt einen erheblichen Eingriff in das Denkmal dar und wird aus Sicht der Denkmalpflege negativ bewertet. [13]

6 WIRTSCHAFTLICHKEITSRECHNUNG

Eine überschlägige Berechnung zeigt, dass eine empfohlene Amortisationszeit für Wasserkraftanlagen von unter 20 Jahren für keine der vier zuvor beschriebenen Varianten erzielt werden kann. Mit dem Hintergrund des Handlungsbedarfs für die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit und den Instandsetzungsarbeiten für die Holzrampe sind die möglichen Lösungskonzepte für den Standort in einer dynamischen Kostenvergleichsrechnung über einen Betrachtungszeitraum von 60 Jahren untersucht worden. Zielgröße für die Untersuchung ist der Projektkostenbarwert der einzelnen Lösungskonzepte, der sich aus der Summe der Erst- und der Re-Investitionssummen sowie den Betriebskosten zusammensetzt. Um den Nutzen der Wasserkraftanlagen gegen zu rechnen, werden die abgeschätzten Erlöse aus der EEG-Vergütung ebenfalls dynamisiert. Es sind folgende Lösungskonzepte untersucht worden, die sich aus den vier Varianten für die Wasserkraftanlage inklusive der Fischaufstiegsanlage und den notwendigen Instandsetzungsmaßnahmen sowie zwei Konzepten ohne Wasserkraftnutzung ergeben:

1. Vollständiger Ersatz der Holzrampe durch ein naturnahes Sohlenbauwerk
2. Instandsetzung der Holzrampe und technische Fischaufstiegsanlage („0 - Variante“)
3. Variante 1 ($Q_a=3,13 \text{ m}^3/\text{s}$), naturnaher Fischaufstieg und Instandsetzung der Holzrampe
4. Variante 1 ($Q_a=3,87 \text{ m}^3/\text{s}$), naturnaher Fischaufstieg und Instandsetzung der Holzrampe
5. Variante 1 ($Q_a=4,95 \text{ m}^3/\text{s}$), technischer Fischaufstieg und Instandsetzung der Holzrampe
6. Variante 2 ($Q_a=6,74 \text{ m}^3/\text{s}$), technischer Fischaufstieg und Instandsetzung der Holzrampe
7. Variante 2 ($Q_a=8,09 \text{ m}^3/\text{s}$), technischer Fischaufstieg und Instandsetzung der Holzrampe
8. Variante 3, naturnahe Teilrampe und Instandsetzung der Holzrampe
9. Variante 4, technischer Fischaufstieg und Instandsetzung der Holzrampe

6.1 Parameter für die dynamische Kostenvergleichsrechnung

Der Betrachtungszeitraum von 60 Jahren für die Kostenvergleichsrechnung ist so gewählt, dass sie der Nutzungsdauer des langlebigsten Anlagenelements entspricht (Stahlbetonbau der Wasserkraftanlage und der technischen Fischaufstiegsanlage). Die Nutzungszeiträume der anderen Anlagenelemente liegen darunter und müssen in den 60 Jahren entsprechend oft erneuert werden. Die Nutzungszeiträume der verschiedenen Anlagenelemente basiert auf den Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen [14] und sind wie folgt gewählt worden:

Tabelle 6-1: Nutzungsdauer der Anlagenelemente nach [14]

Anlagenelement	gewählte Nutzungsdauer
Kleinwasserkraftanlage	
bauliche Anlagenteile	60 Jahre
elektromechanische Ausrüstung	30 Jahre
Rechenanlage	20 Jahre
kurzlebige Güter	10 Jahre
Bauwerk für die ökologische Durchgängigkeit	
naturnahes Sohlenbauwerk	30 Jahre
konv. Beckenpass (Stahlbetonbau)	60 Jahre
konv. Beckenpass Trennwände	15 Jahre
Holzrampe	
oberer Belag	7,5 Jahre
unterer Belag	15 Jahre

Um den Barwert der Reinvestition eines Anlagenelements zu erhalten, wird dessen Erstinvestition (abgeschätzte Bruttokosten) als einzelne Kostengröße auf den Bezugszeitpunkt (Inbetriebnahme der Wasserkraftanlage) diskontiert. Die Betriebskosten (jährlich anfallende, laufende Kosten) werden als Kostenreihe diskontiert. Die Betriebskosten sind als Anteil der Investitionskosten [15] und aus möglichen Personalkosten für die Wartung abgeschätzt worden. Der Zinssatz wird zunächst mit dem empfohlenen, langfristigen Wert von 3 % p.a. angesetzt [14].

Eine Kostenvergleichsrechnung setzt eine Nutzengleichheit der untersuchten Lösungskonzepte voraus, die hier nicht gegeben ist. Um den Nutzen der Wasserkraftanlage den Kosten gegenüber zu stellen, werden die Erlöse ebenfalls als Kostenreihe auf das Jahr der Inbetriebnahme diskontiert. Dabei wird 2017 als Jahr der Inbetriebnahme angenommen. Die Vergütung der ersten 20 Jahre wird nach EEG mit 12,08 ct/kWh angesetzt. Für die übrigen 40 Jahre wird eine Vergütung von 10 ct/kWh angenommen.

Für das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird der Barwert der Erlöse vom Projektkostenbarwert des Lösungskonzeptes abgezogen. Der „Differenz-Barwert“ liefert eine Vergleichsgröße und dient als Zielgröße der Vergleichsrechnung. Da die beschriebene Kosten-Nutzen-Analyse auf einer Vielzahl von angenommen Variablen beruht, ist eine Sensitivitätsanalyse für das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt worden.

6.2 Ergebnisse

In Tabelle 6-2 sind die Zwischen- und Endergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die im vorigen Kapitel beschrieben worden ist, dargestellt. In Spalte 2 sind die Brutto-Erstinvestitionen der Lösungskonzepte (Gesamtkosten für die Wasserkraftanlage, Fischaufstiegsanlage und Instandsetzungsmaßnahmen der Holzrampe) aufgeführt. Spalte 4 gibt den Barwert der Kosten und Spalte 6 den Barwert der Erlöse in dem Betrachtungszeitraum von 60 Jahren wider. Die letzte Spalte enthält die Differenz dieser beiden Barwerte. Eine positive Differenz bedeutet, dass im Betrachtungszeitraum die Gesamtkosten größer als die Gewinne der Wasserkraftanlage sind. Wie in folgender Tabelle zu erkennen ist, werden mit keiner der untersuchten Varianten mit Wasserkraftnutzung die Kosten der Gesamtmaßnahme im Betrachtungszeitraum amortisiert. Wenngleich die Tabellenwerte nicht gerundet sind, handelt es sich um Schätzwerte.

Tabelle 6-2: Ergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Lösungskonzept	Investitions-kosten	Betriebs-kosten/a	Projektkosten-barwert	Erlös/a (2017-2037)	Barwert Erlös	Differenz Barwerte
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €	1.120 €	725.154 €	0 €	0 €	725.154 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €	2.100 €	1.504.968 €	0 €	0 €	1.504.968 €
3. Variante 1 ($Q_a=3,13 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.440.827 €	22.755 €	2.866.400 €	27.301 €	695.404 €	2.170.996 €
4. Variante 1 ($Q_a=3,87 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.494.377 €	26.710 €	3.041.878 €	31.046 €	790.791 €	2.251.087 €
5. Variante 1 ($Q_a=4,95 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.638.544 €	30.115 €	3.279.425 €	35.153 €	895.409 €	2.384.016 €
6. Variante 2 ($Q_a=6,74 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.981.356 €	24.864 €	3.613.347 €	42.038 €	1.070.799 €	2.542.549 €
7. Variante 2 ($Q_a=8,09 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.993.256 €	25.006 €	3.634.102 €	44.575 €	1.135.416 €	2.498.686 €
8. Variante 3	1.758.912 €	31.501 €	3.366.053 €	36.602 €	932.333 €	2.433.720 €
9. Variante 4	1.018.423 €	8.225 €	2.040.965 €	9.060 €	230.776 €	1.810.189 €

Um das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsrechnung in Tabelle 6-2 für die einzelnen Kostenträger besser darzustellen, werden in Tabelle 6-3 zunächst die Investitionskosten den Anlagenteilen und anschließend den einzelnen Kostenstellen zugeordnet. In Tabelle 6-4 werden abschließend die Differenz-Barwerte den Kostenstellen zugeordnet, sodass zum Einen die Rentabilität einer Wasserkraftanlage und zum Anderen ein Projektkostenvergleich für die Stadt Freiburg dargestellt wird.

Es wird angenommen, dass das Land Baden-Württemberg eine Wasserkraftanlage mit dem Höchstsatz von 200.000 € fördert (Fehlbedarfsfinanzierung, Land Baden-Württemberg). Weiter wird vereinfacht angenommen, dass sich der Wasserkraftanlagenbetreiber (WKA-Betreiber) mit 70.000 € als Ausgleichsmaßnahme für das Errichten der Wasserkraftanlage an der Herstellung

der Durchgängigkeit beteiligt. Weiter wird davon ausgegangen, dass das Land Baden-Württemberg 50% des Restbetrags für die Herstellung der Durchgängigkeit finanziert. Die verbleibenden 50% des Restbetrags für die Herstellung der Durchgängigkeit sowie die Instandsetzungsmaßnahmen an der Holzrampe hat die Stadt Freiburg als Träger der Unterhaltungslast am Gewässerabschnitt zu tragen.

Tabelle 6-3: Aufstellung der Investitionskosten nach Anlagenteilen und Kostenstellen

Brutto-Investitionskosten - Zuordnung nach:								
		Anlagenteilen			Kostenstellen			
Lösungskonzept	Investitionskosten (gesamt)	WKA	FAA	Holzrampe	Land BW (FAA)	Land BW (WKA)	WKA Betreiber	Stadt Freiburg
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €		491.618 €		245.809 €			245.809 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €		176.766 €	446.645 €	88.383 €			535.028 €
3. Variante 1 ($Q_a=3,13 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.440.827 €	997.026 €	182.627 €	261.174 €	56.313 €	200.000 €	867.026 €	317.488 €
4. Variante 1 ($Q_a=3,87 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.494.377 €	1.050.576 €	182.627 €	261.174 €	56.313 €	200.000 €	920.576 €	317.488 €
5. Variante 1 ($Q_a=4,95 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.638.544 €	1.211.298 €	142.635 €	284.611 €	36.318 €	200.000 €	1.081.298 €	320.929 €
6. Variante 2 ($Q_a=6,74 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.981.356 €	1.596.965 €	92.920 €	291.471 €	11.460 €	200.000 €	1.466.965 €	302.931 €
7. Variante 2 ($Q_a=8,09 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.993.256 €	1.608.865 €	92.920 €	291.471 €	11.460 €	200.000 €	1.478.865 €	302.931 €
8. Variante 3	1.758.912 €	1.394.278 €	181.583 €	183.051 €	55.792 €	200.000 €	1.264.278 €	238.842 €
9. Variante 4	1.018.423 €	578.150 €	133.653 €	306.620 €	31.827 €	200.000 €	448.150 €	338.447 €

In Tabelle 6-4 sind neben den Investitionskosten die Betriebskosten, sowie die Projektkostenbarwerte und letztendlich die Differenz-Barwerte den einzelnen Kostenstellen zugeordnet. Eine Bezuschussung von Reinvestitionen durch das Land Baden-Württemberg wird nicht berücksichtigt.

Der Differenz-Barwert für den Wasserkraftbetreiber gibt Aufschluss über die Rentabilität einer Anlage: Ein negativer Wert bedeutet, dass sich eine Wasserkraftanlage im Betrachtungszeitraum von 60 Jahren unter den angenommenen Randbedingungen amortisiert. Der Differenz-Barwert für die Stadt Freiburg ist gleich den Projektkostenbarwerten für die Stadt Freiburg. Ein Kostenvergleich liefert das kostengünstigste Lösungskonzept für die Stadt Freiburg.

Die Betriebskosten für die Stadt Freiburg beinhalten die Wartungsarbeiten für die Fischaufstiegsanlage.

Tabelle 6-4: Zuordnung der Differenz-Barwerte für die Kostenstellen

Lösungskonzept	Investitionskosten (brutto)				Betriebskosten/Jahr (brutto)		
	gesamt	Land BW	WKA-Betreiber	Stadt FR	gesamt	WKA-Betreiber	Stadt FR
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €	245.809 €		245.809 €	1.120 €		1.120 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €	88.383 €		535.028 €	2.100 €		2.100 €
3. Variante 1 ($Q_a=3,13 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.440.827 €	256.313 €	867.026 €	317.488 €	22.755 €	20.655 €	2.100 €
4. Variante 1 ($Q_a=3,87 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.494.377 €	256.313 €	920.576 €	317.488 €	26.710 €	24.610 €	2.100 €
5. Variante 1 ($Q_a=4,95 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.638.544 €	236.318 €	1.081.298 €	320.929 €	30.115 €	28.015 €	2.100 €
6. Variante 2 ($Q_a=6,74 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.981.356 €	211.460 €	1.466.965 €	302.931 €	24.864 €	24.164 €	700 €
7. Variante 2 ($Q_a=8,09 \text{ m}^3/\text{s}$)	1.993.256 €	211.460 €	1.478.865 €	302.931 €	25.006 €	24.306 €	700 €
8. Variante 3	1.758.912 €	255.792 €	1.264.278 €	238.842 €	31.501 €	30.381 €	1.120 €
9. Variante 4 mit FAA	1.018.423 €	231.827 €	448.150 €	338.447 €	8.225 €	6.125 €	2.100 €
Lösungskonzept	Projektkostenbarwert für den Betrachtungszeitraum von 60 Jahren			Barwert Erlös	Differenz Barwerte		
	gesamt	WKA-Betreiber	Stadt FR	WKA-Betreiber	gesamt	WKA-Betreiber	Stadt FR
1. naturnahes Sohlenbauwerk	725.154 €		479.346 €		725.154 €		479.346 €
2. Holzrampe mit FAA	1.504.968 €		1.416.585 €		1.504.968 €		1.416.585 €
3. Variante 1 ($Q_a=3,13 \text{ m}^3/\text{s}$)	2.866.400 €	1.626.295 €	983.791 €	695.404 €	2.170.996 €	930.892 €	983.791 €
4. Variante 1 ($Q_a=3,87 \text{ m}^3/\text{s}$)	3.041.878 €	1.801.774 €	983.791 €	790.791 €	2.251.087 €	1.010.983 €	983.791 €
5. Variante 1 ($Q_a=4,95 \text{ m}^3/\text{s}$)	3.279.425 €	2.067.822 €	975.286 €	895.409 €	2.384.016 €	1.172.413 €	975.286 €
6. Variante 2 ($Q_a=6,74 \text{ m}^3/\text{s}$)	3.613.347 €	2.468.731 €	933.156 €	1.070.799 €	2.542.549 €	1.397.933 €	933.156 €
7. Variante 2 ($Q_a=8,09 \text{ m}^3/\text{s}$)	3.634.102 €	2.489.486 €	933.156 €	1.135.416 €	2.498.686 €	1.354.070 €	933.156 €
8. Variante 3	3.366.053 €	2.391.355 €	718.907 €	932.333 €	2.433.720 €	1.459.022 €	718.907 €
9. Variante 4	2.040.965 €	770.611 €	1.038.527 €	230.776 €	1.810.189 €	539.836 €	1.038.527 €

Betrachtet man die Differenz-Barwerte für den Wasserkraftbetreiber, so wird deutlich, dass sich eine Wasserkraftanlage trotz Förderung unter den angenommenen Randbedingungen selbst in einem Betrachtungszeitraum von 60 Jahren nicht amortisiert. Dafür maßgebend sind neben den Investitionskosten die Betriebskosten für die Wasserkraftanlage, die in Relation zu den Erträgen hoch ausfällt. Im Vergleich entsteht für den Wasserkraftanlagenbesitzer für Variante 4 das geringste Defizit. Für die Stadt Freiburg ist die kostengünstigste Variante die, welche einen möglichst großen Teil der Holzrampe umbaut (z.B. Variante 3). Grund dafür sind u.a. die kurzen Nutzungsdauern der Holzbeläge sowie die Größe der Holzrampenfläche. Setzt man längere Nutzungsdauern der Holzbeläge an (z.B. 10 Jahre für den oberen und 20 Jahre für den unteren Belag), so verringert sich der Projektkosten- bzw. Differenz-Barwert, im Vergleich zwischen den verschiedenen Lösungskonzepten gibt es jedoch keine Veränderungen.

Bis auf Variante 3 (Lösungskonzept 8) bewegen sich die Projektkostenbarwerte für die Stadt Freiburg für alle Varianten mit Wasserkraftnutzung im gleichen Bereich, da in etwa ein gleich großer Teil der Holzrampe umgebaut wird.

Da die angeführten Ergebnisse v.a. für die Wasserkraftanlage stark von den Betriebskosten abhängen, ist die Rechnung einer Sensitivitätsanalyse unterzogen worden.

6.3 Sensitivitätsanalyse

Es sind folgende Sensitivitätsanalysen durchgeführt worden (Ergebnisse in Anlage 9):

- S1: Variation des Zinssatzes (Variation zwischen 2 und 5 %)
- S2: Höhere Betriebskosten (für WKA: 4% d. Investitionssumme nach [16])
- S3: Niedrigere Betriebskosten (nach möglichem Aufwand abgeschätzt)
- S4: höheres Regelarbeitsvermögen durch Stilllegen des Kronenmühlebachs (Erhöhung des RAV um über 20 %)
- S5: Annahme einer Novellierung der EEG-Vergütung (höhere Vergütungssätze: 13,5 ct/kWh statt 12,08 ct/kWh, danach 12 ct/kWh statt 10 ct/kWh)
- S6: S3 kombiniert mit S4
- S7: S6 kombiniert mit S5

Die Sensitivitätsanalyse wurde mit den Gesamtkosten und nicht separat für die verschiedenen Kostenstellen durchgeführt.

Für die Variation des Zinssatzes bleibt das Ergebnis aus Kapitel 6.2 weitestgehend stabil. Werden die Betriebskosten höher angesetzt, so verschiebt sich das Ergebnis (Differenz-Barwert der gesamten Maßnahme) zugunsten des Lösungskonzepts 2. Werden die Betriebskosten niedriger angesetzt, so verringert sich zwar der Abstand zwischen Lösungskonzept 2 und den Lösungskonzepten mit einer Wasserkraftnutzung, das Ergebnis aus Tabelle 6-2 bleibt aber annähernd stabil. Ebenso wirken sich eine Erhöhung des Regelarbeitsvermögens um über 20% durch Stilllegen des Kronenmühlebachs sowie höhere Vergütungssätze nur marginal auf die Ergebnisse in 6.2 aus. Mit der Kombination aus niedrigen Betriebskosten, höherem Regelarbeitsvermögen und höheren Vergütungssätzen liegen die Differenz-Barwerte der Lösungskonzepte 2 bis 9 im gleichen Wertebereich (Anlage 9-8) und für den Wasserkraftanlagenbetreiber ergibt sich der niedrigste Differenz-Barwert für Variante 1 (Kaplanturbinen) und Variante 4 (Anlage 9-9).

7 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Am Standort des vorhandenen Holzwehres unterstrom der Schwabentorbrücke kann eine Bruttofallhöhe von 2,5 bis 3 m energetisch genutzt werden. Der Abfluss am Standort ist geprägt durch die Ausleitungen für den Gewerbekanal und den Kronenmühlebach. Dadurch kann nur in etwa der Hälfte des Regeljahres Strom erzeugt werden.

Im Rahmen der Studie werden Technologien zur Nutzung niedriger Fallhöhen untersucht und davon aus vier Technologien Realisierungskonzepte entwickelt. Für die Realisierungskonzepte werden hydraulische Prinzipskizzen erstellt, sowie das Regelarbeitsvermögen und die Investitionskosten ermittelt. Darüber hinaus werden Anforderungen des Denkmalschutzes und des urbanen Umfelds für die Realisierungskonzepte bewertet. Die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit, die im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie realisiert werden muss, wird als Teil der technischen Planung mitbetrachtet.

Je nach Realisierungskonzept für eine Wasserkraftanlage können am Standort bis zu 370.000 kWh Strom aus einer regenerativen Energiequelle im Regeljahr erzeugt werden, wodurch die CO₂-Emissionen in der Stromproduktion um 280 Tonnen - CO₂/Jahr reduziert werden könnten.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine Wasserkraftanlage am Standort nicht zu empfehlen, da sich, selbst durch Fördermittel bezuschusst und über einen Zeitraum von 60 Jahren betrachtet, eine Wasserkraftanlage nicht amortisieren würde.

Als Variante für eine Wasserkraftanlage mit niedrigstem Defizit für den Anlagenbetreiber kann das Gravitationswasserwirbelkraftwerk (Variante 4) genannt werden, wobei die energetische „Ausbeute“ des Standortes sehr niedrig ausfällt. Unter optimalen Bedingungen (keine Ausleitungen in den Kronenmühlebach, niedrige Betriebskosten für die Wasserkraftanlage und höhere Vergütungssätze) würden Variante 1 (Kaplanturbine) und Variante 4 (Gravitationswasserwirbelkraftwerk) das geringste Defizit für den Wasserkraftbetreiber darstellen. Dabei könnte mit Variante 1 ein deutlich höheres Regelarbeitsvermögen erzielt werden, als mit Variante 4.

Vergleicht man den Standort mit bereits realisierten Wasserkraftanlagen oberstrom des Standorts (Wasserkraftschnecke am Sandfangwehr und Rohrturbine beim Stadion), so lässt sich die Unwirtschaftlichkeit am Standort mit den geringeren Abflüssen, der niedrigeren Fallhöhe und der eingeschränkten Zugänglichkeit begründen.

Aus der dynamisierten Wirtschaftlichkeitsrechnung in Kapitel 6 geht als kostengünstigstes Lösungskonzept und somit als volkswirtschaftlich sinnvollste Vorzugsvariante zur vollständigen Ersatz der Holzrampe durch ein naturnahes Sohlenbauwerk hervor, da sowohl die Investitions-

als auch die Betriebs- bzw. Unterhaltungskosten am geringsten ausfallen. Die Realisierung des vollständigen Ersatzes der Holzrampe durch ein naturnahes Sohlenbauwerk wird aufgrund der Denkmaleigenschaft als Kulturdenkmal nach § 2 DSchG erschwert.

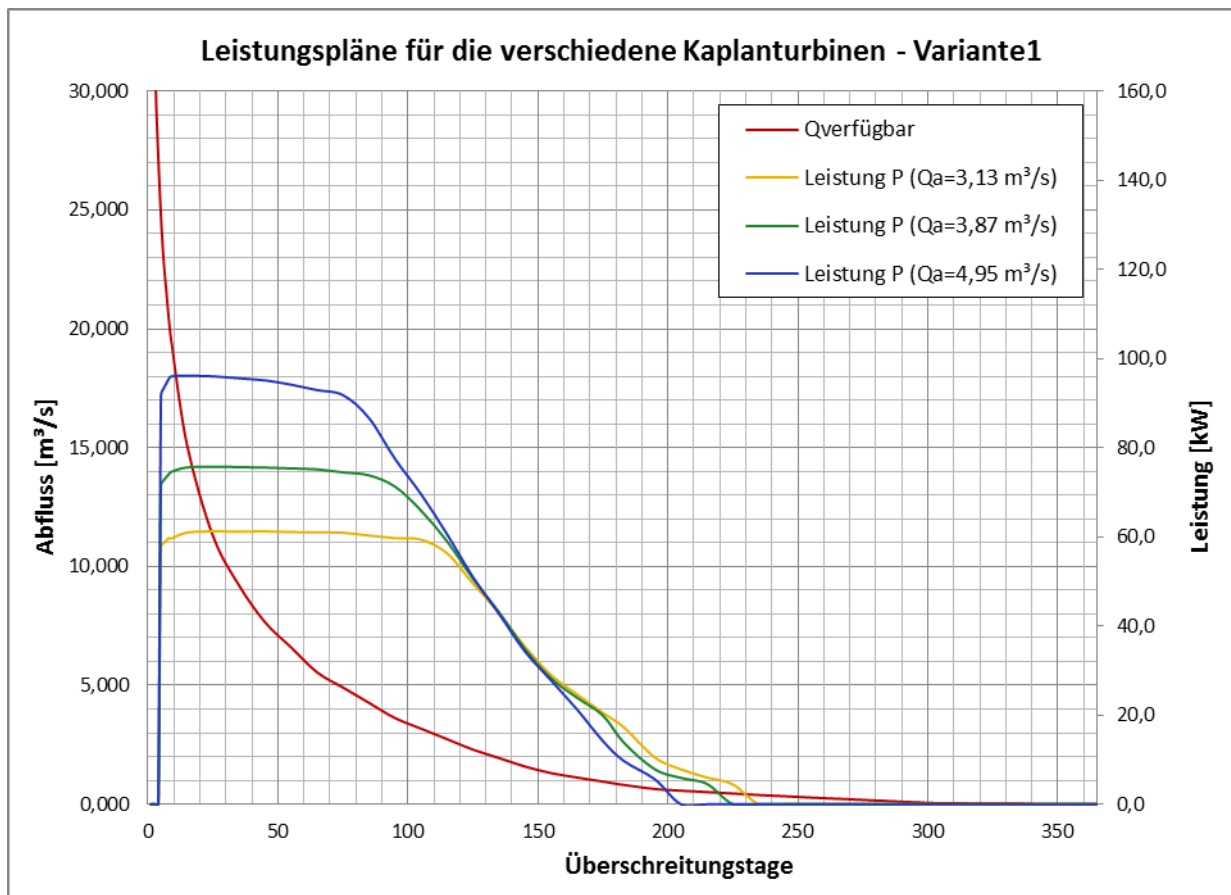
Aus städtebaulicher Sicht handelt es sich um einen sehr sensiblen Standort. Wie dargelegt, kann am Anlagenstandort das Ziel verfolgt werden, die Anlage in den Bestand zu integrieren und/oder die Wasserkraftnutzung ausdrucksvoll zu demonstrieren. Eine Integration könnte bei entsprechender Gestaltung gelingen, würde jedoch zusätzliche Kosten nach sich ziehen.

Aus denkmalpflegerischer Sichtweise ist lediglich eine unscheinbare Integration einer Wasserkraftanlage sinnvoll, da das Gesamterscheinungsbild nur geringfügig beeinträchtigt werden soll. Wichtige Entscheidungskriterien für die Denkmalpflege sind der größtmögliche Substanzerhalt, die Wahrung des Gesamterscheinungsbildes und die historische Funktion der Holzrampe.

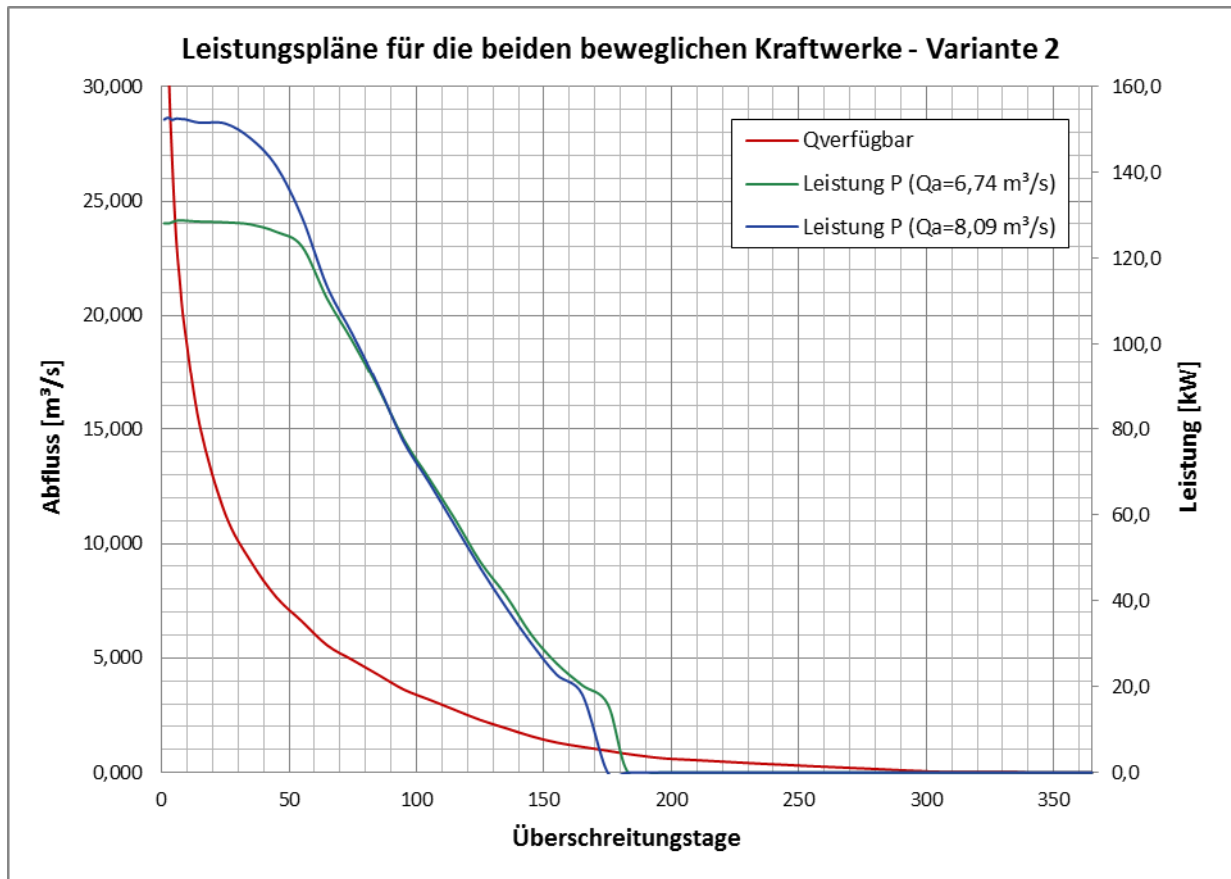
8 ANLAGEN

Anlage 1: Lageplan des Standorts (Bestand)

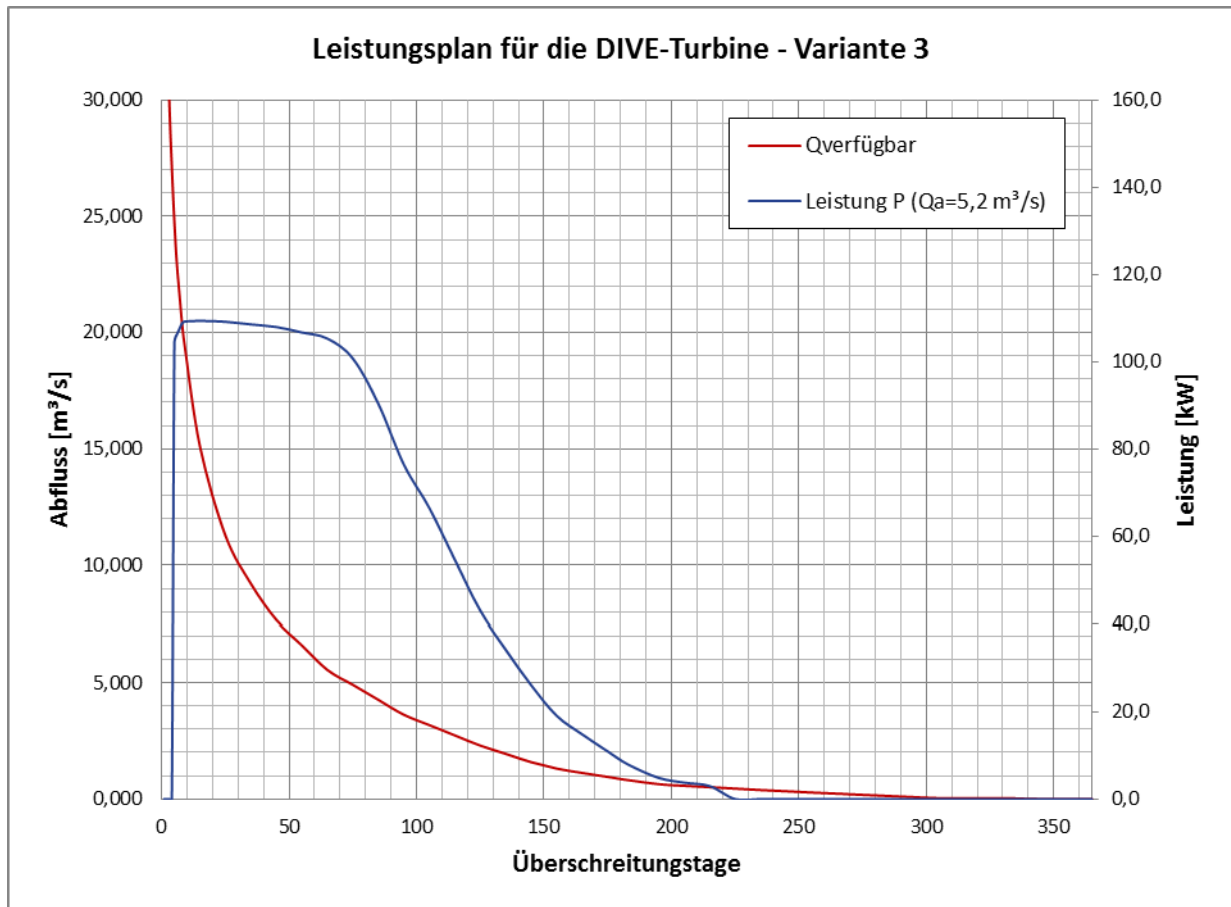
Anlage 2: Leistungspläne der hydraulischen Maschinen



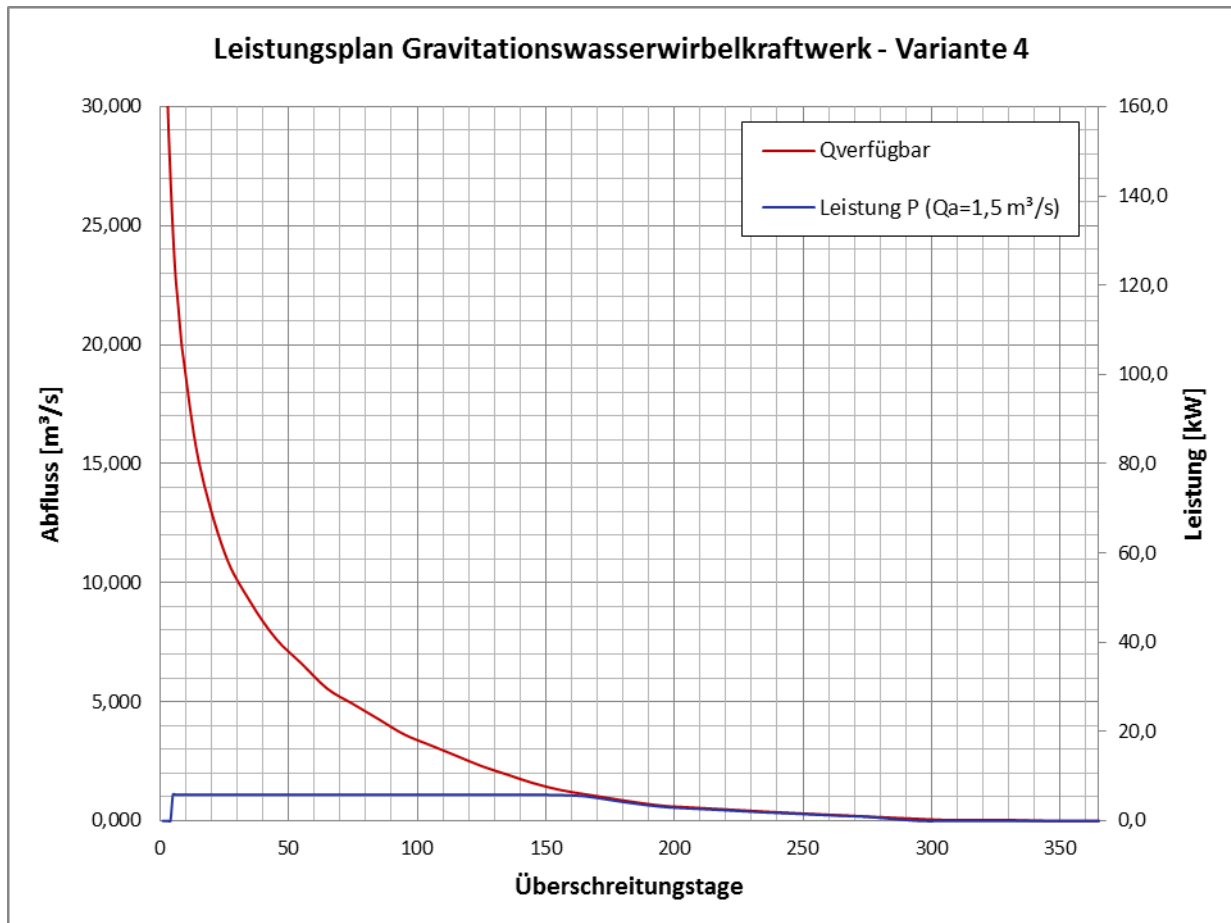
Anlage 2-1: Leistungspläne für verschiedene Laufradaußendurchmesser und Ausbaudurchflüsse der Kaplan-turbinen – Variante 1



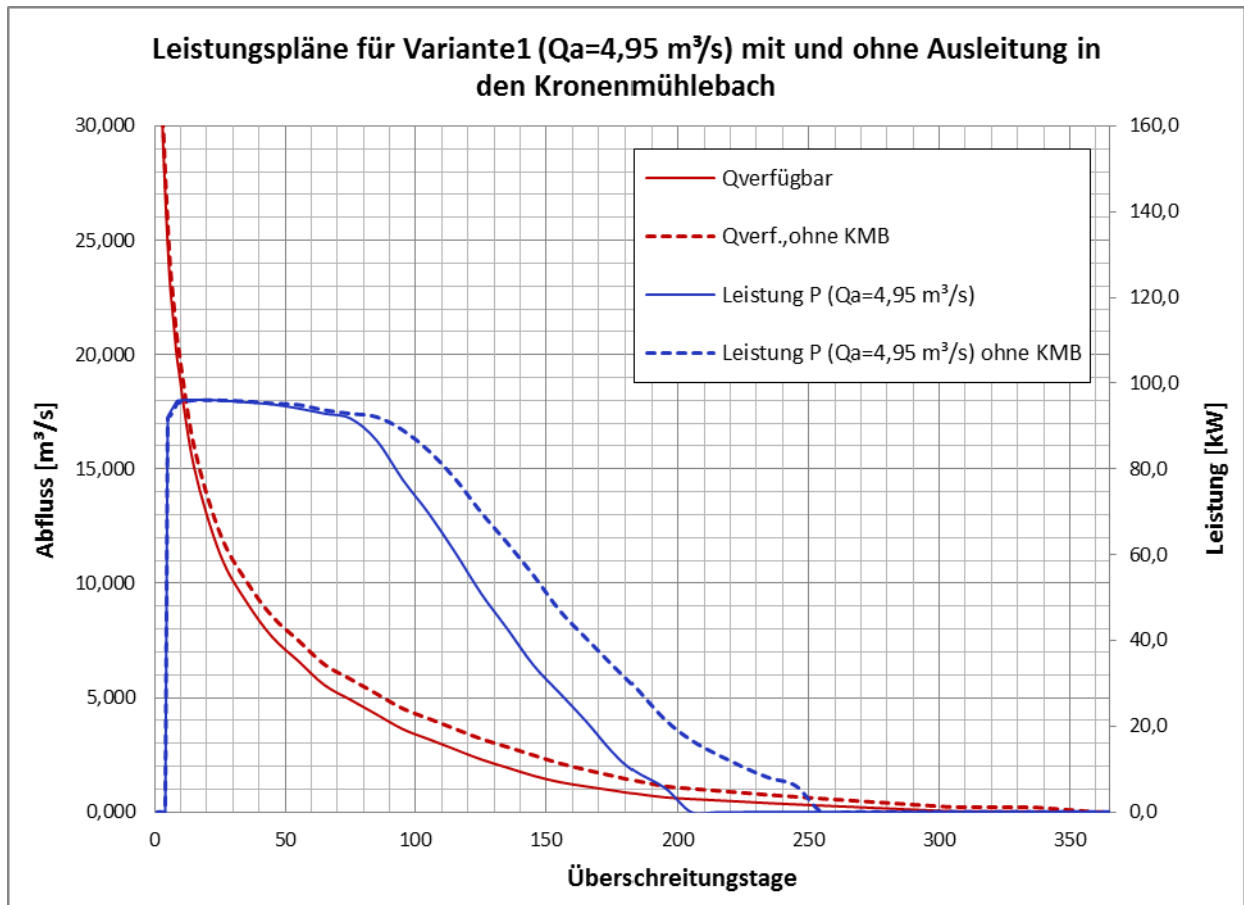
Anlage 2-2: Leistungspläne für die beweglichen Kraftwerke mit unterschiedlichen Ausbaudurchflüssen – Variante 2 (gleiche Laufradaußendurchmesser, unterschiedliche Flügelanzahl der Rohrturbinen)



Anlage 2-3: Leistungsplan der Wasserkraftanlage mit der DIVE-Turbine – Variante 3

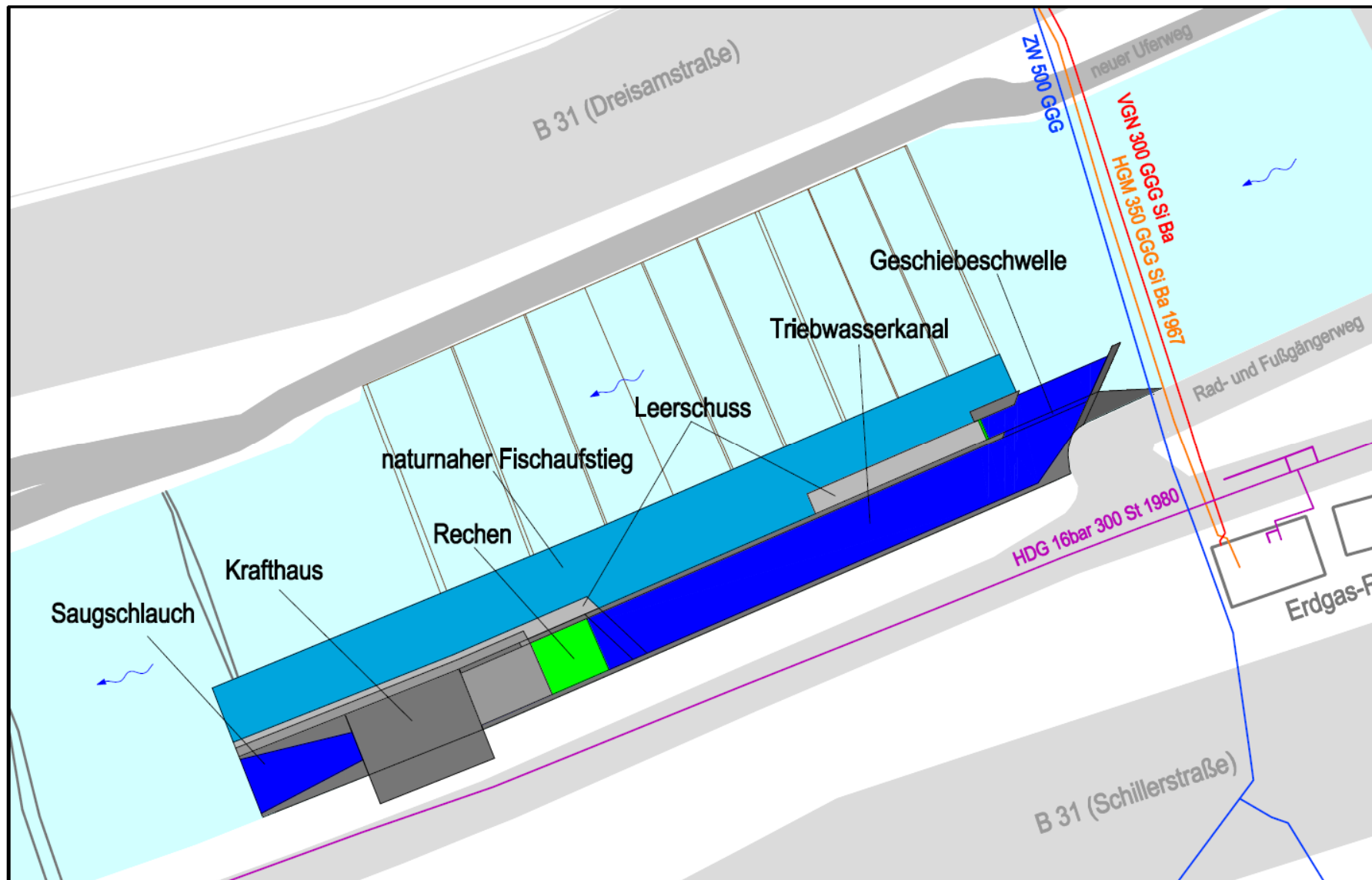


Anlage 2-4: Leistungsplan eines Gravitationswasserwirbelkraftwerkes - Variante 4.

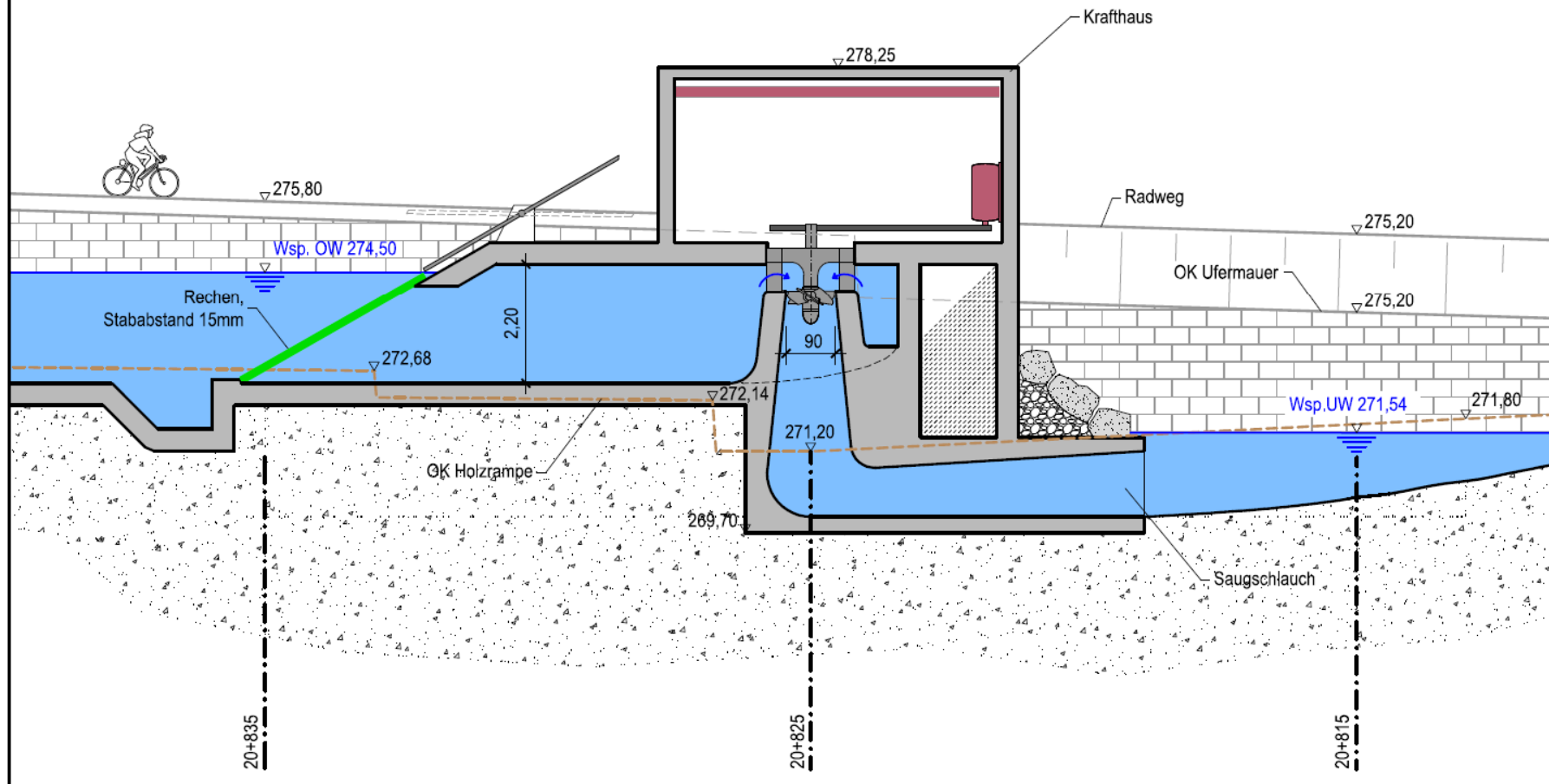


Anlage 2-5: Vergleich der Leistungspläne der Kaplanturbine aus Variante 1 ($Q_a=4,95 \text{ m}^3/\text{s}$) für die angenommene Ausleitung aus dem Kronenmühlebach und für den Extremfall „Stilllegen des Kronenmühlebachs“. Das Regelarbeitsvermögen würde sich um 21% erhöhen.

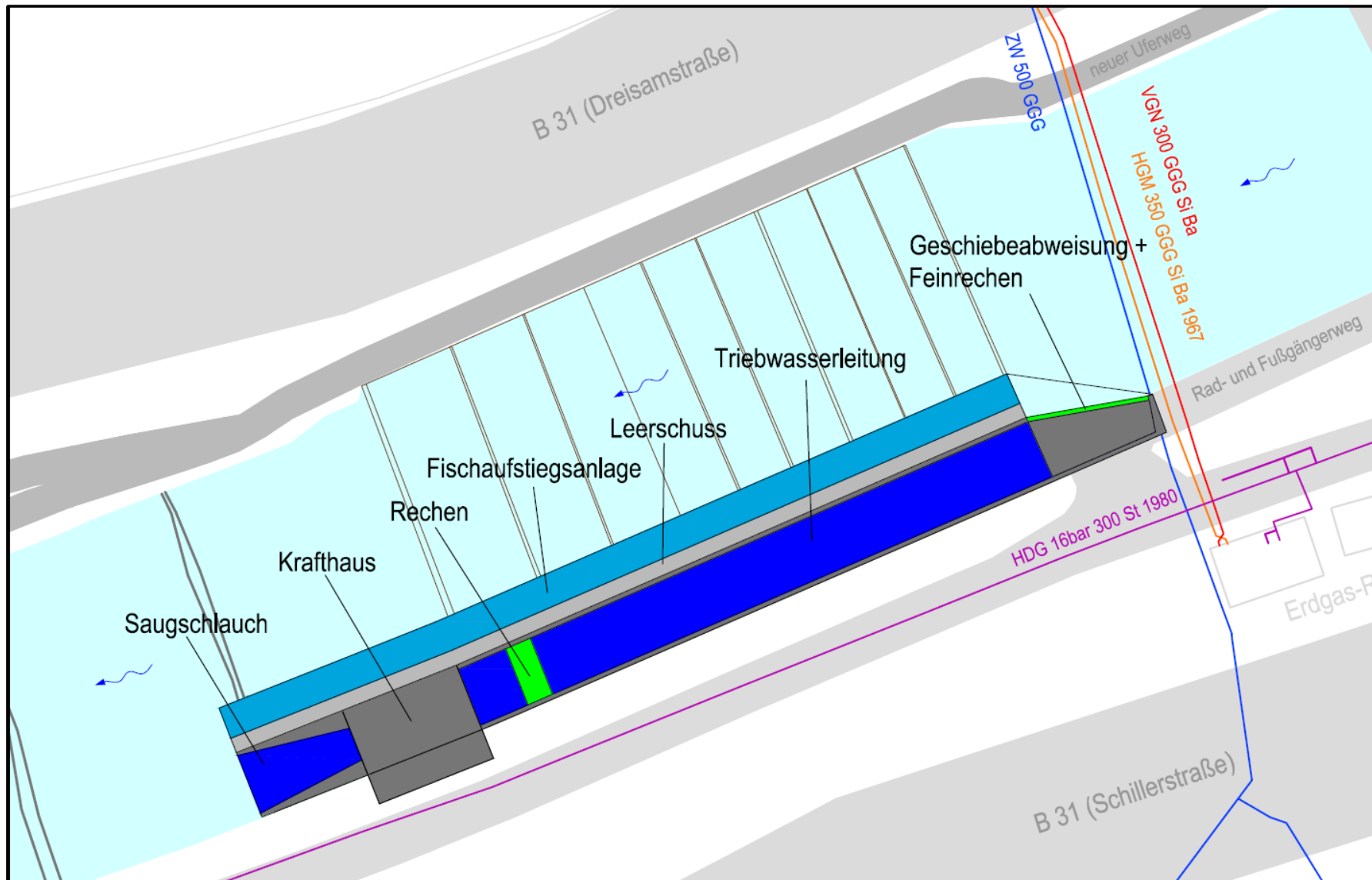
Anlage 3: Skizzen für das Realisierungskonzept mit einer vertikalachsigen Kaplan turbine ($Q_a=3,13 \text{ m}^3/\text{s}$) – Variante 1



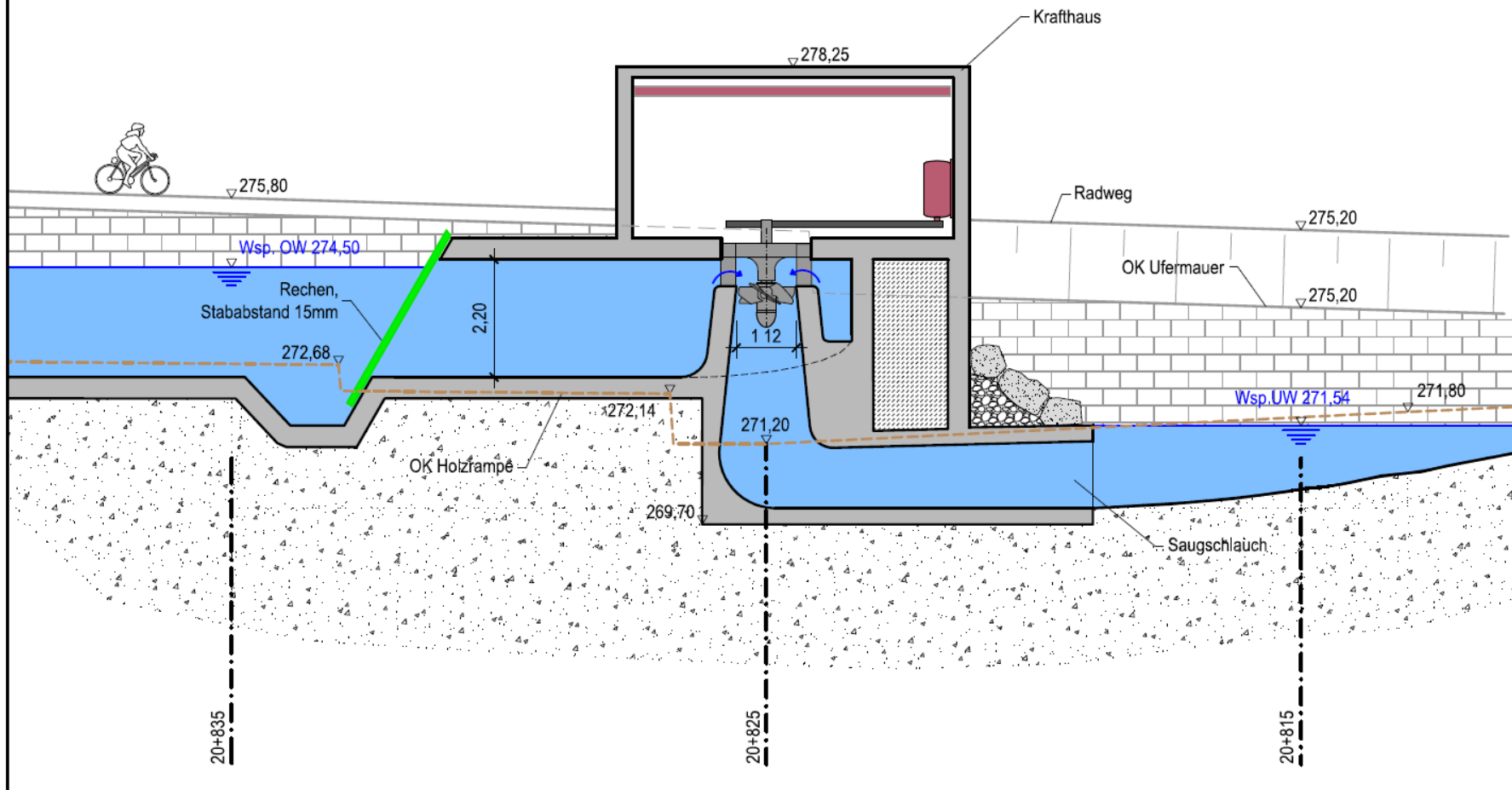
Längsschnitt Variante 1 - vertikale Kaplanturbine ($Q_a = 3,13 \text{ m}^3/\text{s}$)



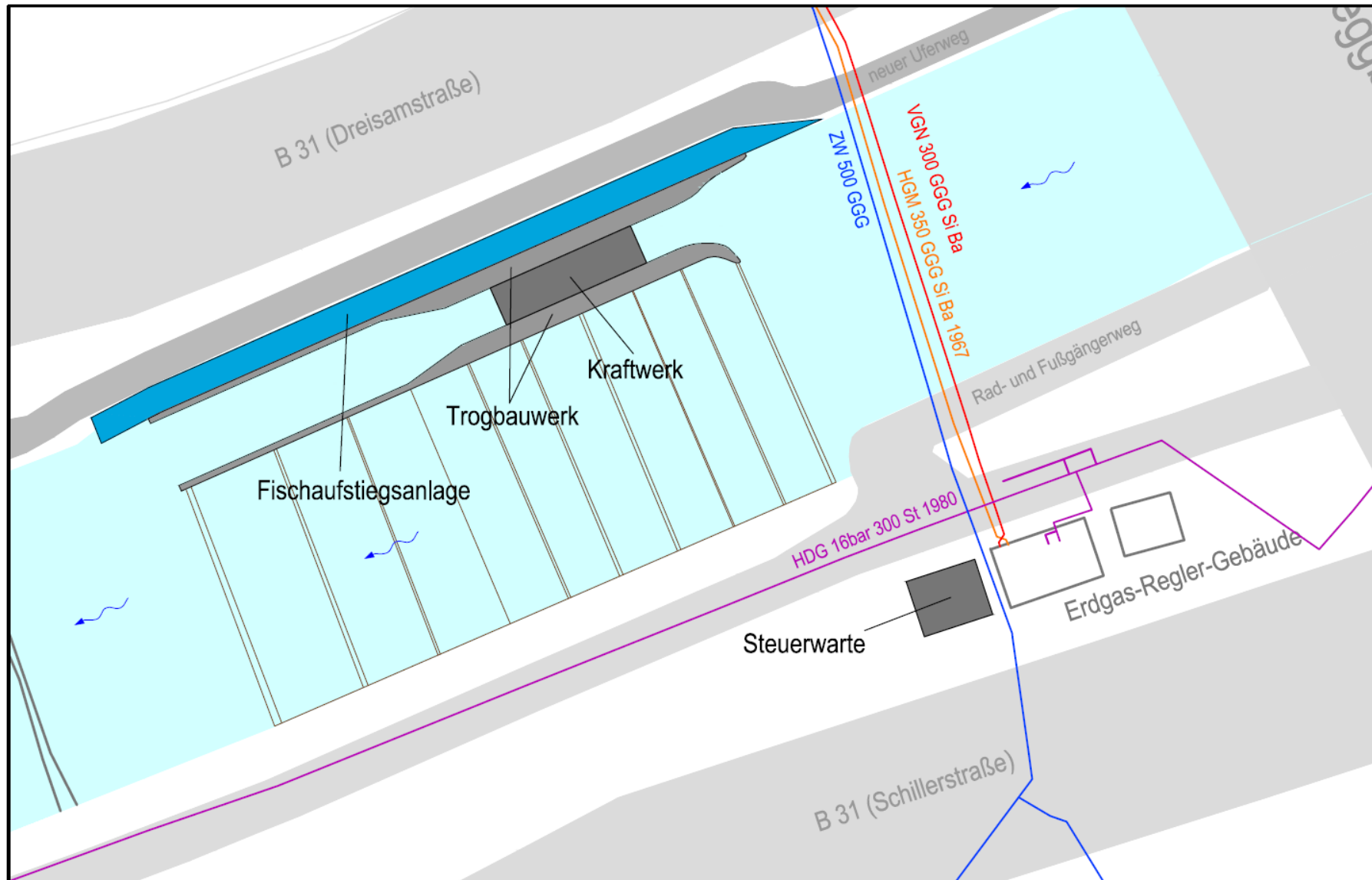
Anlage 4: Skizzen für das Realisierungskonzept mit einer vertikalachsigen Kaplanturbine ($Q_a=4,95 \text{ m}^3/\text{s}$) – Variante 1



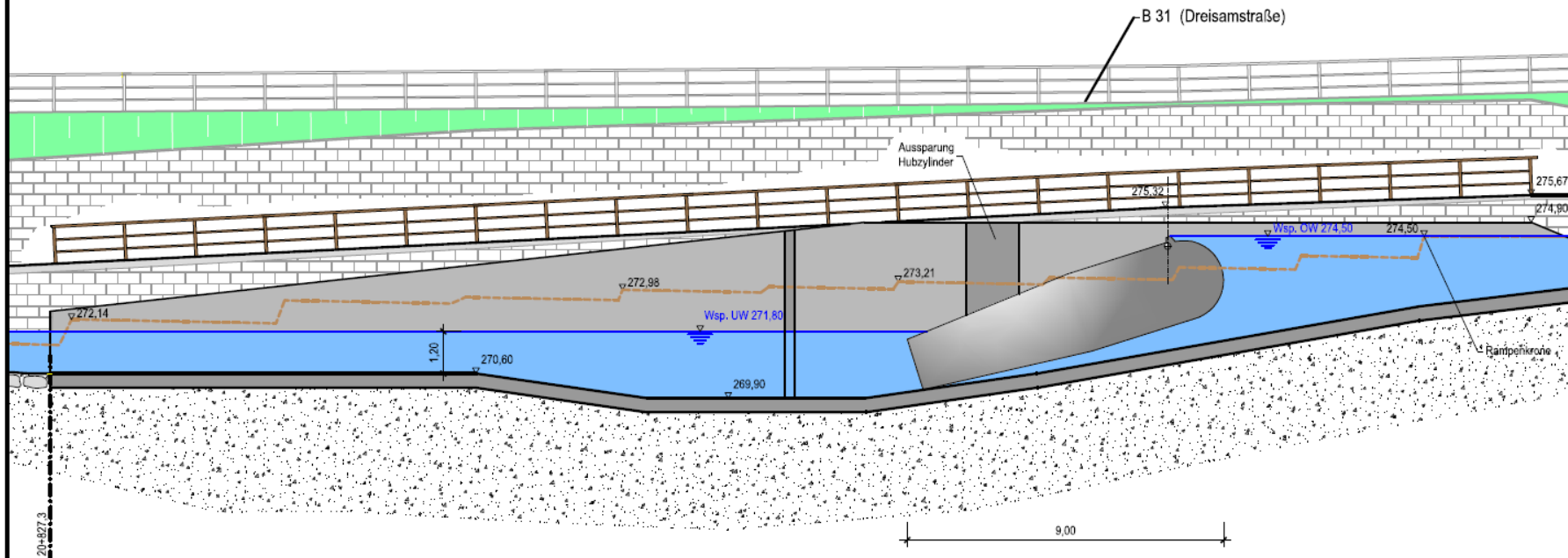
Längsschnitt Variante 1 - vertikale Kaplanturbine ($Q_a = 4,95\text{m}^3/\text{s}$)



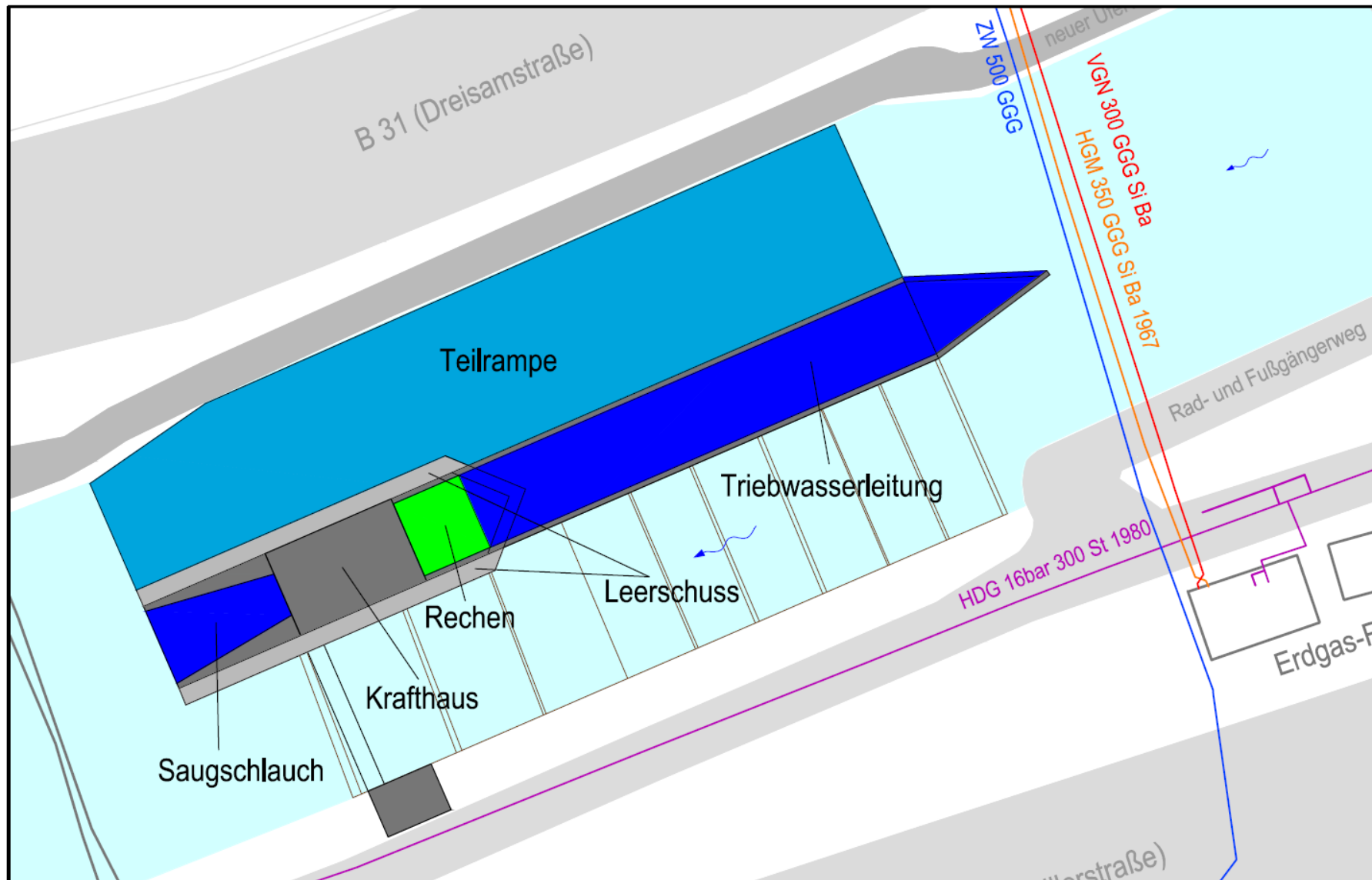
Anlage 5: Skizzen für das Realisierungskonzept mit dem beweglichen Kraftwerk ($Q_a=6,74 \text{ m}^3/\text{s}$) – Variante 2



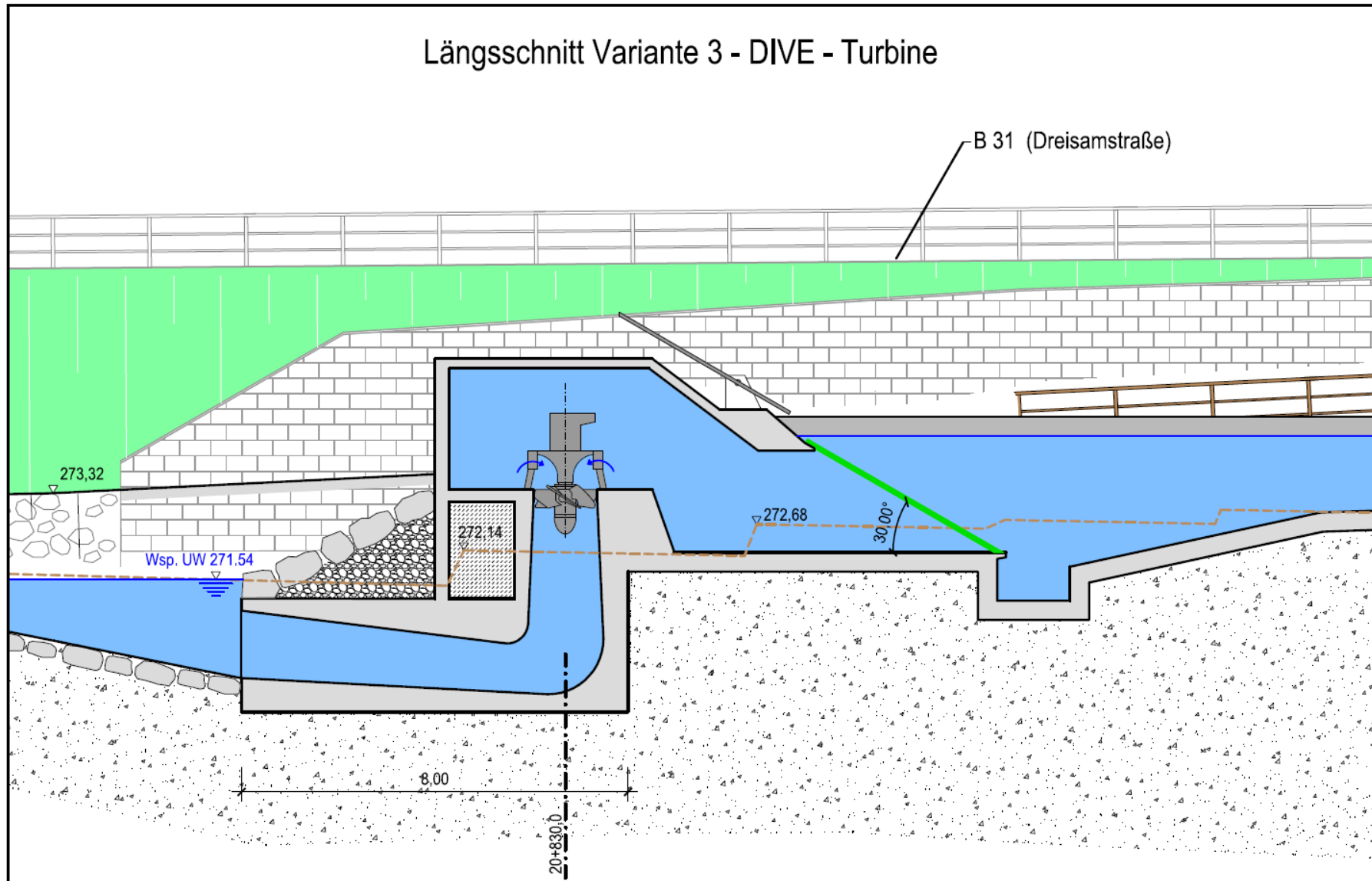
Längsschnitt Variante 2 - bewegliches Kraftwerk



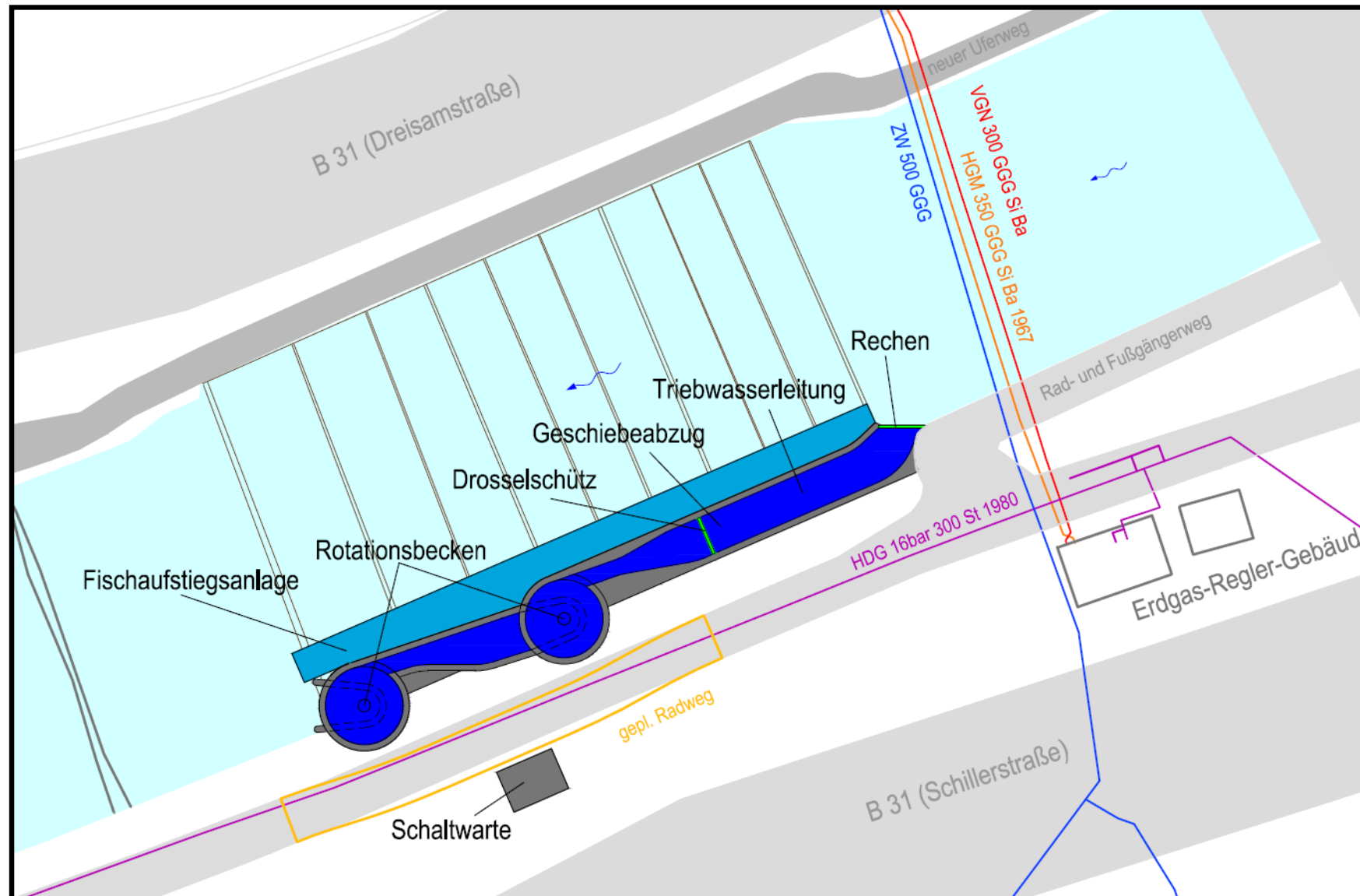
Anlage 6: Skizzen für das Realisierungskonzept mit der DIVE-Turbine – Variante 3



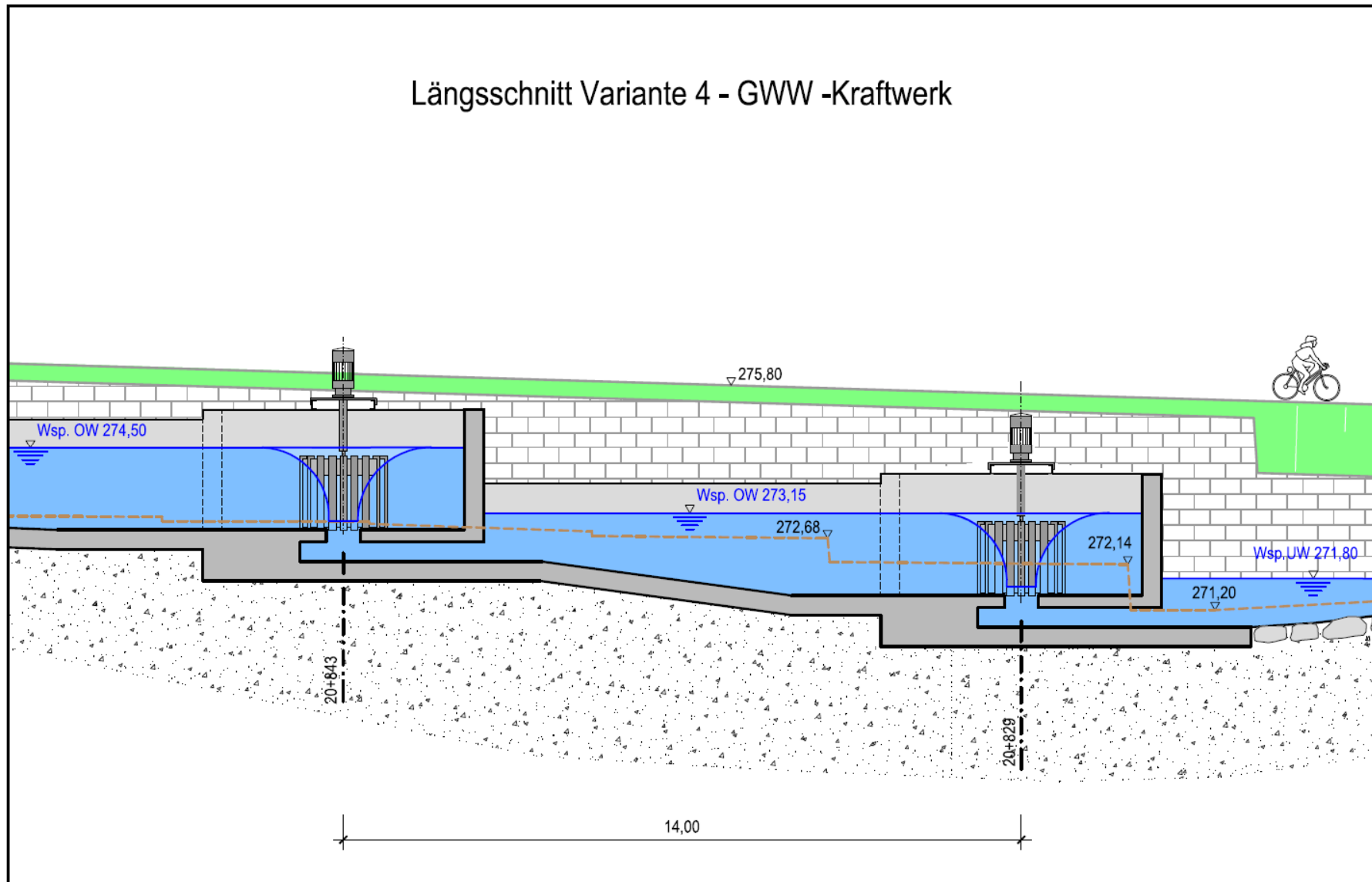
Längsschnitt Variante 3 - DIVE - Turbine



Anlage 7: Skizzen für das Realisierungskonzept mit dem Gravitationswasserwirbelkraftwerk – Variante 4



Längsschnitt Variante 4 - GWW -Kraftwerk



Anlage 8: Aufstellung der Investitionskosten (netto) für die Wasserkraft- und die Fischaufstiegsanlage, sowie für die Instandsetzung bzw. Erneuerung der Holzrampe

naturnahes Sohlenbauwerk	
geschätzte Nettokosten für ein naturnahes Sohlenbauwerk als Ersatz für die Holzrampe	
Position	Geschätzte Kosten (netto, gerundet)
1. Baustelleneinrichtung und bauzeitliche Anlagen	47.000 €
2. Erdarbeiten/Sohlgleite	249.000 €
3. Baugrubensicherung/ Wasserhaltung	47.000 €
4. Außenanlagen	2.000 €
5. Planungsleistungen/ Verfahrenskosten	69.000 €
Gesamtkosten naturnahes Sohlenbauwerk (netto)	414.000 €

Anlage 9-1: Aufstellung der Netto-Investitionskosten für Lösungskonzept 1 (naturnahes Sohlenbauwerk)

Erhalt Holzrampe und Herstellung der Durchgängigkeit	
geschätzte Nettokosten für die Fischaufstiegsanlage und für die Instandsetzung/Erneuerung der Holzrampe	
Position	Geschätzte Kosten (netto, gerundet)
1. Baustelleneinrichtung und bauzeitliche Anlagen	35.000 €
2. Erdarbeiten	72.000 €
3. Baugrubensicherung/ Wasserhaltung	39.000 €
4. Beton- und Mauerarbeiten	64.000 €
5. Holzarbeiten	244.000 €
6. Außenanlagen und Stahlwasserbau	3.000 €
7. Planungsleistungen/ Verfahrenskosten	67.000 €
Gesamtkosten Holzrampe+FAA (netto)	524.000 €

Anlage 9-2: Aufstellung der Netto-Investitionskosten für Lösungskonzept 2 („0-Variante“)

Variante 1: vertikale Kaplanturbine ($Q_a = 3,13 \text{ m}^3/\text{s}$) geschätzte Nettokosten für die Wasserkraft- und Fischaufstiegsanlage, sowie für die Instandsetzung/Erneuerung der Holzrampe	
Position	Geschätzte Kosten (netto, gerundet)
1. Baustelleneinrichtung und bauzeitliche Anlagen	70.000 €
2. Erdarbeiten	116.000 €
3. Baugrubensicherung/ Wasserhaltung	155.000 €
4. Beton- und Mauerarbeiten	229.000 €
5. Außenanlagen	10.000 €
6. maschinen- und elektrotechnische Ausrüstung/ Stahlwasserbau	255.000 €
7. Ausbau Krafthaus/Schaltwarte	20.000 €
8. Planungsleistungen/ Verfahrenskosten	137.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA (netto)	992.000 €
Instandsetzung der Holzrampe	219.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA+Holzrampe (netto)	1.211.000 €

Anlage 9-3: Aufstellung der Netto-Investitionskosten für Lösungskonzept 3 (Variante 1)

Variante 1: vertikale Kaplanturbine ($Q_a = 3,87 \text{ m}^3/\text{s}$) geschätzte Nettokosten für die Wasserkraft- und Fischaufstiegsanlage, sowie für die Instandsetzung/Erneuerung der Holzrampe	
Position	Geschätzte Kosten (netto, gerundet)
1. Baustelleneinrichtung und bauzeitliche Anlagen	70.000 €
2. Erdarbeiten	123.000 €
3. Baugrubensicherung/ Wasserhaltung	162.000 €
4. Beton- und Mauerarbeiten	240.000 €
5. Außenanlagen	10.000 €
6. maschinen- und elektrotechnische Ausrüstung/ Stahlwasserbau	275.000 €
7. Ausbau Krafthaus/Schaltwarte	20.000 €
8. Planungsleistungen/ Verfahrenskosten	137.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA (netto)	1.037.000 €
Instandsetzung der Holzrampe	219.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA+Holzrampe (netto)	1.256.000 €

Anlage 9-4: Aufstellung der Netto-Investitionskosten für Lösungskonzept 4 (Variante 1)

Variante 1: vertikale Kaplanturbine ($Q_a = 4,95 \text{ m}^3/\text{s}$) geschätzte Nettokosten für die Wasserkraft- und Fischaufstiegsanlage, sowie für die Instandsetzung/Erneuerung der Holzrampe	
Position	Geschätzte Kosten (netto, gerundet)
1. Baustelleneinrichtung und bauzeitliche Anlagen	77.000 €
2. Erdarbeiten	80.000 €
3. Baugrubensicherung/ Wasserhaltung	229.000 €
4. Beton- und Mauerarbeiten	271.000 €
5. Außenanlagen	13.000 €
6. maschinen- und elektrotechnische Ausrüstung/ Stahlwasserbau	289.000 €
7. Ausbau Krafthaus/Schaltwarte	21.000 €
8. Planungsleistungen/ Verfahrenskosten	157.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA (netto)	1.137.000 €
Instandsetzung der Holzrampe	239.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA+Holzrampe (netto)	1.376.000 €

Anlage 9-5: Aufstellung der Netto-Investitionskosten für Lösungskonzept 5 (Variante 1)

Variante 2: bewegliches Kraftwerk ($Q_a = 6,74 \text{ m}^3/\text{s}$) geschätzte Nettokosten für die Wasserkraft- und Fischaufstiegsanlage, sowie für die Instandsetzung/Erneuerung der Holzrampe	
Position	Geschätzte Kosten (netto, gerundet)
1. Baustelleneinrichtung und bauzeitliche Anlagen	75.000 €
2. Erdarbeiten	91.000 €
3. Baugrubensicherung/ Wasserhaltung	279.000 €
4. Beton- und Mauerarbeiten	234.000 €
5. Außenanlagen	2.000 €
6. maschinen- und elektrotechnische Ausrüstung/ Stahlwasserbau	529.000 €
7. Ausbau Krafthaus/Schaltwarte	14.000 €
8. Planungsleistungen/ Verfahrenskosten	196.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA (netto)	1.420.000 €
Instandsetzung der Holzrampe	245.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA+Holzrampe (netto)	1.665.000 €

Anlage 9-6: Aufstellung der Netto-Investitionskosten für Lösungskonzept 6 (Variante 2)

Variante 2: bewegliches Kraftwerk ($Q_a = 8,09 \text{ m}^3/\text{s}$) geschätzte Nettokosten für die Wasserkraft- und Fischaufstiegsanlage, sowie für die Instandsetzung/Erneuerung der Holzrampe	
Position	Geschätzte Kosten (netto, gerundet)
1. Baustelleneinrichtung und bauzeitliche Anlagen	75.000 €
2. Erdarbeiten	91.000 €
3. Baugrubensicherung/ Wasserhaltung	279.000 €
4. Beton- und Mauerarbeiten	234.000 €
5. Außenanlagen	2.000 €
6. maschinen- und elektrotechnische Ausrüstung/ Stahlwasserbau	539.000 €
7. Ausbau Krafthaus/Schaltwarte	14.000 €
8. Planungsleistungen/ Verfahrenskosten	196.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA (netto)	1.430.000 €
Instandsetzung der Holzrampe	245.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA+Holzrampe (netto)	1.430.000 €

Anlage 9-7: Aufstellung der Netto-Investitionskosten für Lösungskonzept 7 (Variante 2)

Variante 3: DIVE-Turbine geschätzte Nettokosten für die Wasserkraft- und Fischaufstiegsanlage (hier: Teilrampe), sowie für die Instandsetzung/Erneuerung der Holzrampe	
Position	Geschätzte Kosten (netto, gerundet)
1. Baustelleneinrichtung und bauzeitliche Anlagen	77.000 €
2. Erdarbeiten	178.000 €
3. Baugrubensicherung/ Wasserhaltung	226.000 €
4. Beton- und Mauerarbeiten	222.000 €
5. Außenanlagen	6.000 €
6. maschinen- und elektrotechnische Ausrüstung/ Stahlwasserbau	419.000 €
7. Ausbau Krafthaus/Schaltwarte	13.000 €
8. Planungsleistungen/ Verfahrenskosten	183.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA (netto)	1.324.000 €
Instandsetzung der Holzrampe	154.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA+Holzrampe (netto)	1.478.000 €

Anlage 9-8: Aufstellung der Netto-Investitionskosten für Lösungskonzept 8 (Variante 3)

Variante 4: Gravitationswasserwirbelkraftwerk geschätzte Nettokosten für die Wasserkraft- und Fischaufstiegsanlage, sowie für die Instandsetzung/Erneuerung der Holzrampe	
Position	Geschätzte Kosten (netto, gerundet)
1. Baustelleneinrichtung und bauzeitliche Anlagen	50.000 €
2. Erdarbeiten	43.000 €
3. Baugrubensicherung/ Wasserhaltung	50.000 €
4. Beton- und Mauerarbeiten	227.000 €
5. Außenanlagen	15.000 €
6. maschinen- und elektrotechnische Ausrüstung/ Stahlwasserbau	118.000 €
7. Ausbau Krafthaus/Schaltwarte	13.000 €
8. Planungsleistungen/ Verfahrenskosten	83.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA (netto)	599.000 €
Instandsetzung der Holzrampe	258.000 €
Gesamtkosten WKA+FAA+Holzrampe (netto)	857.000 €

Anlage 9-9: Aufstellung der Netto-Investitionskosten für Lösungskonzept 9 (Variante 4)

Anlage 9: Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Lösungskonzept	Investitions-kosten	Betriebs-kosten/a	Projektkosten-barwert	Erlös/a (2017-2037)	Barwert Erlös	Differenz Barwerte
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €	1.120 €	626.568 €	0 €	0 €	626.568 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €	2.100 €	1.189.962 €	0 €	0 €	1.189.962 €
3.Variante 1 (Qa=3,13 m³/s)	1.440.827 €	22.755 €	2.366.303 €	27.301 €	486.384 €	1.879.919 €
4. Variante 1 (Qa=3,87 m³/s)	1.494.377 €	26.710 €	2.501.936 €	31.046 €	553.101 €	1.948.835 €
5. Variante 1 (Qa=4,95 m³/s)	1.638.544 €	30.115 €	2.715.082 €	35.153 €	626.274 €	2.088.809 €
6. Variante 2 (Qa=6,74 m³/s)	1.981.356 €	24.864 €	3.034.830 €	42.038 €	748.946 €	2.285.885 €
7. Variante 2 (Qa=8,09 m³/s)	1.993.256 €	25.006 €	3.052.187 €	44.575 €	794.141 €	2.258.046 €
8. Variante 3	1.758.912 €	31.501 €	2.803.023 €	36.602 €	652.099 €	2.150.924 €
9. Variante 4	1.018.423 €	8.225 €	1.680.547 €	9.060 €	161.411 €	1.519.137 €

Anlage 9-1: Sensitivitätsanalyse S1 (Variation des Zinssatzes auf 5%)

Lösungskonzept	Investitions-kosten	Betriebs-kosten/a	Projektkosten-barwert	Erlös/a (2017-2037)	Barwert Erlös	Differenz Barwerte
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €	1.120 €	801.957 €	0 €	0 €	801.957 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €	2.100 €	1.753.246 €	0 €	0 €	1.753.246 €
3.Variante 1 (Qa=3,13 m³/s)	1.440.827 €	22.755 €	3.263.708 €	27.301 €	862.461 €	2.401.248 €
4. Variante 1 (Qa=3,87 m³/s)	1.494.377 €	26.710 €	3.471.290 €	31.046 €	980.763 €	2.490.527 €
5. Variante 1 (Qa=4,95 m³/s)	1.638.544 €	30.115 €	3.729.046 €	35.153 €	1.110.514 €	2.618.532 €
6. Variante 2 (Qa=6,74 m³/s)	1.981.356 €	24.864 €	4.072.408 €	42.038 €	1.328.037 €	2.744.371 €
7. Variante 2 (Qa=8,09 m³/s)	1.993.256 €	25.006 €	4.095.841 €	44.575 €	1.408.177 €	2.687.664 €
8. Variante 3	1.758.912 €	31.501 €	3.814.103 €	36.602 €	1.156.308 €	2.657.795 €
9. Variante 4	1.018.423 €	8.225 €	2.326.074 €	9.060 €	286.215 €	2.039.859 €

Anlage 9-2: Sensitivitätsanalyse S1 (Variation des Zinssatzes auf 2%)

Lösungskonzept	Investitions-kosten	Betriebs-kosten/a	Projektkosten-barwert	Erlös/a (2017-2037)	Barwert Erlös	Differenz Barwerte
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €	1.120 €	725.154 €	0 €	0 €	725.154 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €	2.100 €	1.504.968 €	0 €	0 €	1.504.968 €
3.Variante 1 (Qa=3,13 m³/s)	1.440.827 €	41.981 €	3.398.480 €	27.301 €	695.404 €	2.703.076 €
4. Variante 1 (Qa=3,87 m³/s)	1.494.377 €	44.123 €	3.523.783 €	31.046 €	790.791 €	2.732.992 €
5. Variante 1 (Qa=4,95 m³/s)	1.638.544 €	50.552 €	3.845.038 €	35.153 €	895.409 €	2.949.629 €
6. Variante 2 (Qa=6,74 m³/s)	1.981.356 €	64.579 €	4.712.483 €	42.038 €	1.070.799 €	3.641.684 €
7. Variante 2 (Qa=8,09 m³/s)	1.993.256 €	65.055 €	4.742.459 €	44.575 €	1.135.416 €	3.607.043 €
8. Variante 3	1.758.912 €	56.891 €	4.068.742 €	36.602 €	932.333 €	3.136.408 €
9. Variante 4	1.018.423 €	25.226 €	2.511.471 €	9.060 €	230.776 €	2.280.696 €

Anlage 9-3: Sensitivitätsanalyse S2 (Höhere Betriebskosten – 4% der WKA-Investition)

Lösungskonzept	Investitions-kosten	Betriebs-kosten/a	Projektkosten-barwert	Erlös/a (2017-2037)	Barwert Erlös	Differenz Barwerte
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €	1.120 €	725.154 €	0 €	0 €	725.154 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €	2.100 €	1.504.968 €	0 €	0 €	1.504.968 €
3. Variante 1 (Qa=3,13 m³/s)	1.440.827 €	17.960 €	2.733.684 €	27.301 €	695.404 €	2.038.281 €
4. Variante 1 (Qa=3,87 m³/s)	1.494.377 €	17.960 €	2.799.707 €	31.046 €	790.791 €	2.008.916 €
5. Variante 1 (Qa=4,95 m³/s)	1.638.544 €	16.980 €	2.915.916 €	35.153 €	895.409 €	2.020.507 €
6. Variante 2 (Qa=6,74 m³/s)	1.981.356 €	14.760 €	3.333.725 €	42.038 €	1.070.799 €	2.262.926 €
7. Variante 2 (Qa=8,09 m³/s)	1.993.256 €	14.760 €	3.350.528 €	44.575 €	1.135.416 €	2.215.112 €
8. Variante 3	1.758.912 €	19.080 €	3.022.297 €	36.602 €	932.333 €	2.089.964 €
9. Variante 4	1.018.423 €	8.320 €	2.043.588 €	9.060 €	230.776 €	1.812.813 €

Anlage 9-4: Sensitivitätsanalyse S3 (Niedrigere Betriebskosten – nach Aufwand)

Lösungskonzept	Investitions-kosten	Betriebs-kosten/a	Projektkosten-barwert	Erlös/a (2017-2037)	Barwert Erlös	Differenz Barwerte
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €	1.120 €	725.154 €	0 €	0 €	725.154 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €	2.100 €	1.504.968 €	0 €	0 €	1.504.968 €
3. Variante 1 (Qa=3,13 m³/s)	1.440.827 €	22.755 €	2.866.400 €	33.582 €	855.408 €	2.010.991 €
4. Variante 1 (Qa=3,87 m³/s)	1.494.377 €	26.710 €	3.041.878 €	37.931 €	966.180 €	2.075.698 €
5. Variante 1 (Qa=4,95 m³/s)	1.638.544 €	30.115 €	3.279.425 €	42.642 €	1.086.184 €	2.193.241 €
6. Variante 2 (Qa=6,74 m³/s)	1.981.356 €	24.864 €	3.601.447 €	50.615 €	1.289.266 €	2.312.181 €
7. Variante 2 (Qa=8,09 m³/s)	1.993.256 €	25.006 €	3.634.102 €	53.273 €	1.356.960 €	2.277.142 €
8. Variante 3	1.758.912 €	31.501 €	3.366.053 €	44.575 €	1.135.416 €	2.230.637 €
9. Variante 4	1.018.423 €	8.225 €	2.040.965 €	10.872 €	276.931 €	1.764.034 €

Anlage 9-5: Sensitivitätsanalyse S4 (höheres Regelarbeitsvermögen durch Stilllegen des Kronenmühlbachs; Regelarbeitsvermögen wird um über 20% erhöht)

Lösungskonzept	Investitions-kosten	Betriebs-kosten/a	Projektkosten-barwert	Erlös/a (2017-2037)	Barwert Erlös	Differenz Barwerte
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €	1.120 €	725.154 €	0 €	0 €	725.154 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €	2.100 €	1.504.968 €	0 €	0 €	1.504.968 €
3. Variante 1 (Qa=3,13 m³/s)	1.440.827 €	22.755 €	2.866.400 €	30.510 €	800.996 €	2.065.404 €
4. Variante 1 (Qa=3,87 m³/s)	1.494.377 €	26.710 €	3.041.878 €	34.695 €	910.867 €	2.131.011 €
5. Variante 1 (Qa=4,95 m³/s)	1.638.544 €	30.115 €	3.279.425 €	39.285 €	1.031.371 €	2.248.054 €
6. Variante 2 (Qa=6,74 m³/s)	1.981.356 €	24.864 €	3.613.347 €	46.980 €	1.233.392 €	2.379.955 €
7. Variante 2 (Qa=8,09 m³/s)	1.993.256 €	25.006 €	3.634.102 €	49.815 €	1.307.821 €	2.326.281 €
8. Variante 3	1.758.912 €	31.501 €	3.366.053 €	40.905 €	1.073.902 €	2.292.152 €
9. Variante 4	1.018.423 €	8.225 €	2.040.965 €	10.125 €	265.817 €	1.775.147 €

Anlage 9-6: Sensitivitätsanalyse S5 (angenommene Novellierung der EEG-Vergütungssätze: 13,5 ct/kWh statt 12,08 ct/kWh über die garantierte Vergütungsdauer von 20 Jahren, anschließend 12 ct/kWh statt 10 ct/kWh)

Lösungskonzept	Investitions-kosten	Betriebs-kosten/a	Projektkosten-barwert	Erlös/a (2017-2037)	Barwert Erlös	Differenz Barwerte
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €	1.120 €	725.154 €	0 €	0 €	725.154 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €	2.100 €	1.504.968 €	0 €	0 €	1.504.968 €
3.Variante 1 (Qa=3,13 m³/s)	1.440.827 €	17.960 €	2.733.684 €	33.582 €	855.408 €	1.878.276 €
4. Variante 1 (Qa=3,87 m³/s)	1.494.377 €	17.960 €	2.799.707 €	37.931 €	966.180 €	1.833.526 €
5. Variante 1 (Qa=4,95 m³/s)	1.638.544 €	16.980 €	2.915.916 €	42.642 €	1.086.184 €	1.829.732 €
6. Variante 2 (Qa=6,74 m³/s)	1.981.356 €	14.760 €	3.333.725 €	50.615 €	1.289.266 €	2.044.459 €
7. Variante 2 (Qa=8,09 m³/s)	1.993.256 €	14.760 €	3.350.528 €	53.273 €	1.356.960 €	1.993.567 €
8. Variante 3	1.758.912 €	19.080 €	3.022.297 €	44.575 €	1.135.416 €	1.886.881 €
9. Variante 4	1.018.423 €	8.320 €	2.043.588 €	10.872 €	276.931 €	1.766.658 €

Anlage 9-7: Sensitivitätsanalyse S6 (S3 (niedrigere Betriebskosten) kombiniert mit S4 (höheres Regelarbeitsvermögen))

Lösungskonzept	Investitions-kosten	Betriebs-kosten/a	Projektkosten-barwert	Erlös/a (2017-2037)	Barwert Erlös	Differenz Barwerte
1. naturnahes Sohlenbauwerk	491.618 €	1.120 €	725.154 €	0 €	0 €	725.154 €
2. Holzrampe mit FAA	623.411 €	2.100 €	1.504.968 €	0 €	0 €	1.504.968 €
3.Variante 1 (Qa=3,13 m³/s)	1.440.827 €	17.960 €	2.733.684 €	37.530 €	985.296 €	1.748.389 €
4. Variante 1 (Qa=3,87 m³/s)	1.494.377 €	17.960 €	2.799.707 €	42.390 €	1.112.888 €	1.686.819 €
5. Variante 1 (Qa=4,95 m³/s)	1.638.544 €	16.980 €	2.915.916 €	47.655 €	1.251.113 €	1.664.803 €
6. Variante 2 (Qa=6,74 m³/s)	1.981.356 €	14.760 €	3.333.725 €	56.565 €	1.485.032 €	1.848.693 €
7. Variante 2 (Qa=8,09 m³/s)	1.993.256 €	14.760 €	3.350.528 €	59.535 €	1.563.005 €	1.787.522 €
8. Variante 3	1.758.912 €	19.080 €	3.022.297 €	49.815 €	1.307.821 €	1.714.476 €
9. Variante 4	1.018.423 €	8.320 €	2.043.588 €	12.150 €	318.981 €	1.724.608 €

Anlage 9-8: Sensitivitätsanalyse S7 (S6 (niedrigere Betriebskosten + höheres RAV) kombiniert mit S5 (höhere Vergütungssätze))

Lösungskonzept	Projektkostenbarwert			Barwert Erlös	Differenz Barwerte		
	gesamt	WKA-Betreiber	Stadt FR		gesamt	WKA-Betreiber	Stadt FR
1. naturnahes Sohlenbauwerk	725.154 €		479.346 €	0 €	725.154 €		479.346 €
2. Holzrampe mit FAA	1.504.968 €		1.416.585 €	0 €	1.504.968 €		1.416.585 €
3.Variante 1 (Qa=3,13 m³/s)	2.733.684 €	1.493.580 €	983.791 €	985.296 €	2.170.996 €	508.285 €	983.791 €
4. Variante 1 (Qa=3,87 m³/s)	2.799.707 €	1.559.603 €	983.791 €	1.112.888 €	2.251.087 €	446.715 €	983.791 €
5. Variante 1 (Qa=4,95 m³/s)	2.915.916 €	1.704.313 €	975.286 €	1.251.113 €	2.384.016 €	453.200 €	975.286 €
6. Variante 2 (Qa=6,74 m³/s)	3.333.725 €	2.189.109 €	933.156 €	1.485.032 €	2.542.549 €	704.077 €	933.156 €
7. Variante 2 (Qa=8,09 m³/s)	3.350.528 €	2.205.912 €	933.156 €	1.563.005 €	2.498.686 €	642.907 €	933.156 €
8. Variante 3	3.022.297 €	2.047.599 €	718.907 €	1.307.821 €	2.433.720 €	739.778 €	718.907 €
9. Variante 4	2.043.588 €	773.235 €	1.038.527 €	318.981 €	1.810.189 €	454.254 €	1.038.527 €

Anlage 9-9: Sensitivitätsanalyse S7 – Zuordnung der Barwerte zu den Kostenstellen