

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

30/06/2020

Projekttitlel:

**Fischschutz und Anströmung an
Wasserkraftanlagen mit niedrigen
Fallhöhen**

Projektnummer:

865039

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	4. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/03/2018
Projektende	31/01/2020
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	23 Monate
Projektnehmer (Institution)	Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Wasserbau
Ansprechpartner	Markus Aufleger, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Leiter des Arbeitsbereichs Wasserbau
Postadresse	Arbeitsbereich Wasserbau Institut für Infrastruktur, Universität Innsbruck Technikerstraße 13 6020 – Innsbruck, Österreich
Telefon	+43 512 507 62200
Fax	+43 512 507 62199
E-Mail	markus.aufleger@uibk.ac.at
Website	https://www.uibk.ac.at/wasserbau/

Fischschutz und Anströmung an Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen

FINI

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Hannes Zöschg, Universität Innsbruck

Dipl.-Ing. Ruben Tutzer, Universität Innsbruck

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Aufleger, Universität Innsbruck

Dipl.-Ing. Bernhard Zeiringer, BOKU Wien

Dipl.-Ing. Dr. Günther Unfer, BOKU Wien

Dipl.-Ing. Ulli Stoltz, Voith Hydro GmbH & Co. KG

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung.....	5
3	Inhaltliche Darstellung.....	6
4	Methodik	8
4.1	Entwurf der Kraftwerksanordnungen	8
4.2	Mehrdimensionale hydrodynamische Berechnungen der Anströmung	10
4.3	Physikalische Modellversuche im Turbinenversuchsstand	11
4.3.1	Wirkungsgradversuche.....	11
4.3.2	Mortalitätsversuche mithilfe von Dummys	13
4.4	Weiterführende Untersuchungen der Turbinenpassage	14
4.5	Kostenanalyse.....	15
5	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	15
5.1	Untersuchung der Fischleitwirkung entlang von Leiteinrichtungen in den Bypass ..	15
5.2	Beschreibung von Bauweisen mit wirksamen Fischschutz- und Fischleitkonzepten für Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen.....	19
5.2.1	Empfehlungen hinsichtlich der Nachrüstung an Bestandsanlagen.....	19
5.2.2	Empfehlungen für Neubau-Projekte	22
5.3	Numerische Ermittlung der Verlustbeiwerte an Fischschutz- bzw. Fischleitrechen .	23
5.4	Wirkungsgradversuche mit einer StreamDiver-Kompaktturbine.....	25
5.5	Untersuchungen der Fischpassage durch die StreamDiver-Kompaktturbine	26
5.5.1	Numerische Modellierung des Fischdurchgangs am Beispiel des Fließgewässerkraftwerks an der Unteren Salzach.....	26
5.5.2	Untersuchung der Mortalitätsraten im Turbinenversuchsstand mithilfe von Dummys.....	28
5.6	Kostenanalyse.....	29
6	Diskussion	29
7	Ausblick und Empfehlungen.....	30
8	Anerkennung/Danksagung.....	31
9	Literaturverzeichnis.....	31
10	Kontaktdaten	33

2 Einleitung

Die Wasserkraft ist ein elementarer Bestandteil der Stromerzeugung in Österreich und trägt wesentlich dazu bei, dass Österreich im internationalen Vergleich zu einem Vorreiter bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen zählt (BMNT, 2018). Jedoch sieht sich die Wasserkraft zunehmend mit einer kritischen Betrachtung hinsichtlich der ökologischen Aspekte konfrontiert. Besonders die Unterbrechung des Längskontinuums der Gewässer hat erhebliche ökologische Auswirkungen: Neben der Einschränkung des natürlichen Sedimenttransportes wird das Wanderverhalten von aquatischen Organismen, vor allem von Fischen, gestört und Habitate sowie Lebensräume separiert. Viele Fischarten können dadurch ihre Laichhabitate nicht mehr erreichen und werden in ihrem natürlichen Verhalten signifikant eingeschränkt. Langfristig führt dies zu einem Rückgang der Fischpopulationen sowie zum Verschwinden einiger Fischarten aus den österreichischen Fließgewässern (BMLFUW, 2017).

Mit dem Inkrafttreten der EU-Wasserrahmenrichtlinie, dessen Maßnahmen in Österreich im Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplan schrittweise umgesetzt werden, wurde der Erhalt und die Wiederherstellung der flussauf- und -abwärts gerichteten Durchgängigkeit von Fließgewässern vorgeschrieben (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2000) (BMLFUW, 2017). Für die flussaufwärts gerichtete Fischmigration gibt es inzwischen vielseitige Lösungen in Form von technischen sowie naturnahen Fischaufstiegsanlagen. Die Problematik bei der flussabwärts gerichteten Migration blieb dagegen lange Zeit unerkannt (BMLFUW, 2012); es bestehen nach wie vor zahlreiche Wissenslücken (Berger, 2018).

Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen (d.h. die Wasserspiegeldifferenz ober- und unterstrom der Anlage liegt im Bereich zwischen 2 und 5 Metern) sind vornehmlich für den Einsatz an ökologisch wertvollen Flussstrecken geeignet, vor allem aufgrund der potenziell guten Eignung zur Beibehaltung der Gewässerdurchgängigkeit (Aufleger & Brinkmeier, 2015). Besonderes Augenmerk ist dabei sowohl bei der Planung von neuen Anlagen als auch bei der ökologischen Anpassung von Bestandsanlagen dem Fischschutz, d.h. dem Schutz der Fische bei der flussabwärts gerichteten Wanderung, zu schenken. Durch geeignete technische Maßnahmen gilt es dafür zu sorgen, dass Fische vor dem Turbinendurchgang geschützt und über einen Fischabstiegskorridor (Bypass) einen sicheren Weg in Richtung Unterwasser finden (Brinkmeier et al., 2017). Als Leitstruktur kann z.B. ein schräg zur Anströmung ausgerichteter Rechen mit horizontal oder vertikal angeordneten Stäben als mechanische Barriere verwendet werden (Ebel, 2013). Seit wenigen Jahren werden zudem Konzepte mit hybriden Barrieren entwickelt, welche eine Kombination aus mechanischer Barriere und Verhaltensbarriere (Beispielsweise ein gepulstes elektrisches Feld) darstellen und deren Fischschutzwirkung in ethohydraulischen Versuchen nachgewiesen wurde (u.a. Tutzer et al., 2019). Für eine fachgerechte Bewertung der Fischschutz- und Fischleitkonzepte, sowohl mit mechanischen als auch mit hybriden Barrieren, fehlen allerdings noch wichtige hydraulische Grundlagen. So können die

tatsächlichen Richtungen der Strömungsvektoren, aber auch die räumlichen Verteilungen der lokalen Geschwindigkeiten, mitunter erheblich von den idealisierten Annahmen in der Planungsphase abweichen (Abbildung 1). Außerdem können diese in Abhängigkeit von der gewählten Geometrie sowie den unterschiedlichen Abflüssen variieren.

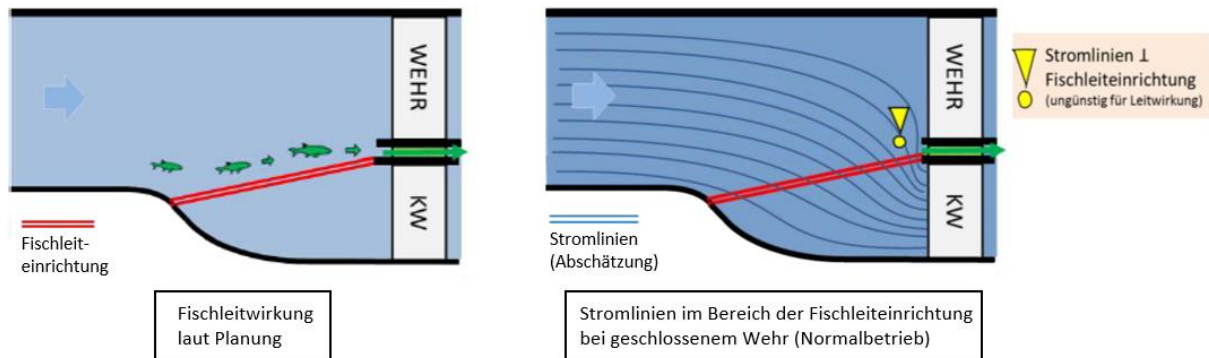


Abbildung 1: Buchtenkraftwerk mit Fischleiteinrichtung im Grundriss: Die Fische sollen entlang der Fischleiteinrichtung in den Bypass (grüner Pfeil) geleitet werden, welcher sich zwischen Wehr und Kraftwerk (KW) befindet.

Im Forschungsprojekt *Fischschutz und Anströmung an Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen*, kurz *FINI*, wurden diese Grundlagen unter Anwendung von 3D-numerischen Simulationen sowie experimentellen Versuchen erarbeitet und fortlaufend hinsichtlich der verhaltensbiologischen Zusammenhänge sowie der Auswirkungen auf die Anströmung der Turbinen bewertet. Diese Untersuchungen mündeten in einer Zusammenstellung wesentlicher Grundlagen zur Leitwirkung verschiedener Fischschutzkonzepte. Zudem wurden weiterführende, wissenschaftlich hochrelevante Aspekte rund um den Fischschutz sowie die Anströmung an Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen untersucht.

3 Inhaltliche Darstellung

Die Bearbeitung des Forschungsprojekts erfolgte in übergreifenden Arbeitspaketen, welche durch iterative Prozesse miteinander verbunden waren und deren Teilergebnisse stets kritisch bewertet wurden. Somit gelang es, eine umfassende Betrachtung aller relevanten Aspekte sicherzustellen und diese letztendlich für eine abschließende, fachliche Bewertung zusammenzuführen.

Im ersten Schritt wurden möglichst effektive Kraftwerksanordnungen hinsichtlich des Fischschutzes für typische Standorte im österreichischen Einzugsgebiet der Donau definiert. Für diese wurden grundlegende Annahmen getroffen, um aufgrund der sehr großen Anzahl an möglichen Variationen das eigentliche Ziel, die schrittweise Annäherung an möglichst effektive Lösungen, nicht aus den Augen zu verlieren. Im Sinne einer allgemeinen Parameterstudie wurden wesentliche Randbedingungen variiert und anschließend auf Basis der Ergebnisse aus den 3D-numerischen Simulationen sowie der verhaltensbiologischen Bewertung des Fischschutzes und der Fischleitwirkung optimiert. Ein Höhepunkt stellte

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

hierbei das geplante Fließgewässerkraftwerk an der Unteren Salzach bei Flusskilometer 39,9 dar (in weiterer Folge vereinfacht als Fließgewässerkraftwerk an der Unteren Salzach bezeichnet), welches flussbauliche Sanierungsmaßnahmen mit der Möglichkeit der Wasserkraftnutzung bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Durchgängigkeit kombiniert.

Das Hauptaugenmerk des Projektes lag auf den mehrdimensionalen hydrodynamischen Berechnungen der Anströmung. Diese dienten zur Ermittlung der tatsächlichen Geschwindigkeitsverteilungen und –vektoren im erweiterten Anströmbereich der Kraftwerksanordnungen und insbesondere an den Fischschutz- bzw. Fischleitstrukturen. Das Strömungsverhalten letzterer wurde in Detailuntersuchungen genauestens analysiert, anhand derer zudem die hydraulischen Verlustbeiwerte der jeweiligen Rechenkonfigurationen nach dem Stand der Technik ermittelt wurden.

Die Bewertung der Fischleit- und Fischschutzwirkung erfolgte anhand von Expertenbeurteilungen auf Basis aktueller Untersuchungsergebnisse, Literaturstudien sowie der im Projektteam vorhandenen Expertise aus Fischbiologie, Wasserbau, Hydraulik und Anlagentechnik. Unter Berücksichtigung der relevanten Fischarten in Abhängigkeit des Standortes wurde das Fischverhalten prognostiziert.

In physikalischen Modellversuchen wurde der Einfluss der Fischschutz- bzw. Fischleitstrukturen auf die Anströmung sowie den Wirkungsgrad von Kompaktturbinen untersucht. Hierfür wurde der Turbinenversuchsstand im Labor des Arbeitsbereichs Wasserbau der Universität Innsbruck verwendet, in welchem ein voll funktionsfähiger Prototyp einer StreamDiver-Kompaktturbine der Firma Voith verbaut ist. Zur Erweiterung der Datengrundlage und Visualisierung der Ergebnisse wurden diese Versuche in 3D-numerischen Berechnungen reproduziert sowie eine weitere Einbau-Variante simuliert.

Die Fischpassage durch die Kompaktturbinen wurde zum einen im Turbinenversuchsstand mithilfe von Dummys zur Ermittlung der Schädigungsraten eruiert, zum anderen wurde der Fischdurchgang durch die Turbine numerisch auf Basis der BioPA-Methode untersucht, welche in den USA bereits zur Entwicklung von möglichst „fischfreundlichen“ Turbinen verwendet wurde (Richmond et al., 2014) (DeBolt et al., 2015). Dadurch konnte die hohe Überlebenswahrscheinlichkeit von Fischen am Standort des Fließgewässerkraftwerks an der Unteren Salzach mit dem Gesamtkonzept StreamDiver-Kompaktturbinen in Kombination mit effektiven Fischschutz- bzw. Fischleiteinrichtungen und verschiedensten Abstiegsmöglichkeiten bestätigt werden.

In einer Kostenanalyse wurden typische Kostenansätze ermittelt und mit den gesamten Investitionskosten der Wasserkraftanlagen gegenübergestellt. Diese Betrachtung konzentrierte sich im Wesentlichen auf die Fischschutz- und Fischleitstrukturen.

Schlussendlich wurden alle Ergebnisse der zum Teil sehr vielseitigen Untersuchungen zusammengetragen, um hieraus zukünftig Empfehlungen für einen ökologisch nachhaltigen Ausbau der Wasserkraft bzw. zur Erhöhung der ökologisch nachhaltigen Stromerzeugung aus Wasserkraft ableiten zu können (Abbildung 2).

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

In den nachfolgenden Kapiteln wird die Methodik erläutert sowie die grundlegenden Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Abschließend werden in einem Ausblick noch offene Forschungsfragen und Empfehlungen für zukünftige Forschungsprojekte dargelegt.

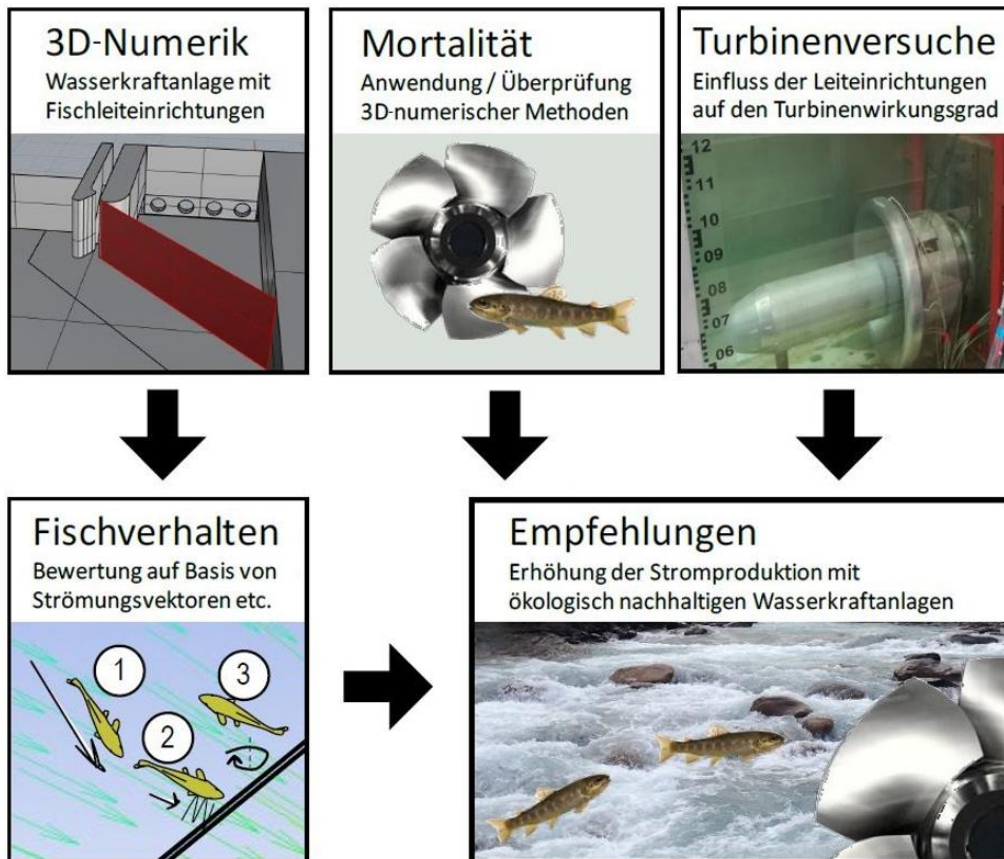


Abbildung 2: Struktur des Forschungsprojektes *FINI*

4 Methodik

4.1 Entwurf der Kraftwerksanordnungen

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurden vier potenzielle Kraftwerksanordnungen unter Beachtung der in Österreich geeigneten Standorte im alpinen und voralpinen Einzugsgebiet der Donau untersucht, deren zu berücksichtigende Fischarten aus den fischökologischen Leitbildern gemäß Haunschmid et al. (2006) abgeleitet wurden:

1. Fließgewässerkraftwerk an der Unteren Salzach: Dieser neuartige Kraftwerkstyp stellt das einzige konkrete Modell mit (nahezu) „ausgereifter“ Geometrie dar (Abbildung 3, links) und baut auf dem am Arbeitsbereich Wasserbau der Universität Innsbruck entwickelten Konzept des Fließgewässerkraftwerkes auf (Brinkmeier, 2012). Im Hinblick auf die angestrebte Realisierung dieses Konzeptes an der Unteren Salzach bei Flusskilometer 39,9 wurden im Zuge von *FINI* 3D-Modelle angefertigt, hydrodynamisch simuliert und ausgewertet. Biozönotisch wird dieser Flussabschnitt

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

dem Epipotamal (Barbenregion) zugeordnet und beinhaltet aktuell auf Basis des adaptierten Leitbildes (gemäß BMNT, 2019b, adaptiert nach Schmall, in prep.) 40 Fischarten.

2. Buchtenkraftwerk an der Unteren Salzach: Aufbauend auf der Geometrie des Fließgewässerkraftwerks an der Unteren Salzach (1.) wurde an einem gleichartigen Standort in der Bioregion bayrisch-österreichisches Alpenvorland mit einem Abfluss von 225 m³/s eine Kraftwerksanordnung definiert, welche mit „klassischen“ Fischschutz- und Fischleitstrukturen versehen ist und aufgrund vergleichbarer Abmessungen sowie Parameter zudem einen direkten Vergleich mit dem Fließgewässerkraftwerk erlaubt.
3. Blockkraftwerk an einem voralpinen Fluss: An einem voralpinen Fluss im österreichischen Einzugsgebiet der Donau (ohne konkrete Ortsangaben) mit einem Abfluss von 50 m³/s wurde ein Wasserkraftwerk in Blockbauweise definiert, das typischerweise in der Fischregion Hyporhithral (Äschenregion), aber auch im Epipotamal liegt und mindestens 20 Fischarten aufweist. In das 3D-Modell wurden Fischleitrechen im Winkel von 20° bzw. 40° zur Anströmrichtung implementiert (Abbildung 3, rechts).
4. Blockkraftwerk an einem alpinen Fluss: Prinzipiell weist diese Anordnung die gleichen Charakteristika wie das Blockkraftwerk an einem voralpinen Fluss (3.) auf, jedoch in einer „kleineren Ausführung“ (u.a. beträgt der Abfluss 10 m³/s). Dieser Standort liegt typischerweise in der Fischregion Metarhithral (untere Forellenregion) mit rund 10 Fischarten, aber auch im Hyporhithral mit deutlich mehr Fischarten.

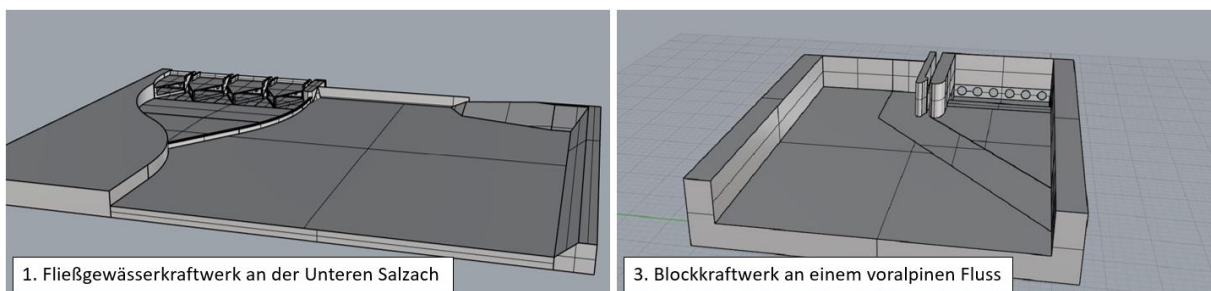


Abbildung 3: 3D-Berechnungsmodelle der numerischen Simulationen für den ersten (links) bzw. dritten (rechts) typischen Standort

Für diese Kraftwerksanordnungen wurden im Sinne einer allgemeinen Parameterstudie ausgewählte Randbedingungen variiert und deren Einfluss auf die hydraulischen Verhältnisse sowie das Fischverhalten bewertet. Hierfür wurden insgesamt 54 Variationen mit unterschiedlichen Geometrien oder Parametern durchgeführt. Abbildung 4 gibt in Form eines Baumdiagramms einen Überblick über die wesentlichen Variationen, exemplarisch für das Blockkraftwerk am voralpinen Fluss (dritter typischer Standort).

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

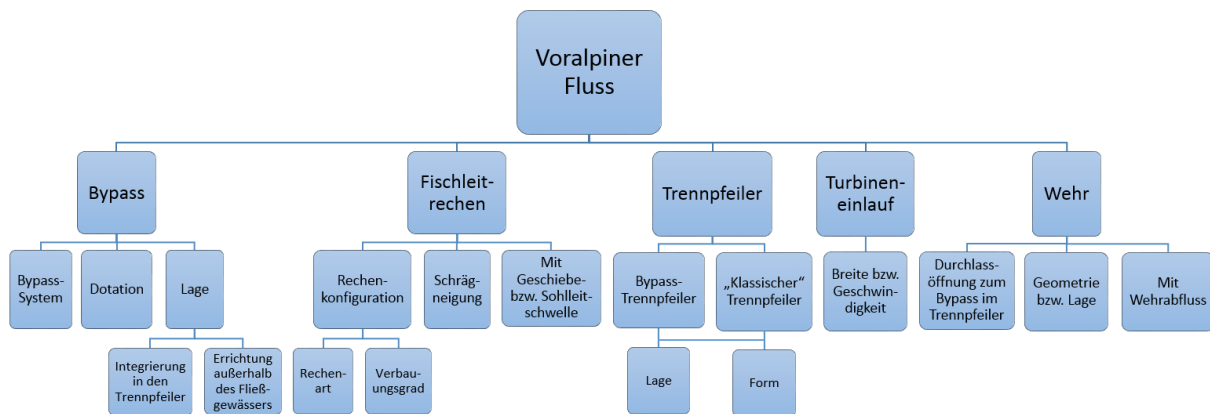


Abbildung 4: Überblick über die im Rahmen von *FINI* durchgeführten, wesentlichen Variationen, exemplarisch für das Blockkraftwerk an einem voralpinen Fluss (dritter typischer Standort)

4.2 Mehrdimensionale hydrodynamische Berechnungen der Anströmung

Zur Durchführung der numerischen Simulationen der Anströmung wurde die Software ANSYS Fluent eingesetzt. Die hydraulischen Verhältnisse wurden durch Verwendung von unstrukturierten Gitternetzen sowie des Realizable-k- ϵ -Turbulenzmodells ermittelt. Die räumliche Auflösung variierte je nach Kraftwerksanordnung, wobei die 3D-Berechnungsmodelle in mehrere Körper unterteilt wurden, um in Bereichen von besonderer Relevanz (z.B. Trennpfeiler) fein aufgelöste Ergebnisse zu erhalten. Daneben wurde die Phasengrenzfläche zwischen Wasser und Luft mit der VOF-Methode (Volume of Fluid) simuliert.

Die vollständige Berücksichtigung der hydraulischen Einflüsse der Fischleiteinrichtung auf das Strömungsverhalten erfordert eine sehr feine Diskretisierung des Berechnungsnetzes rund um die Rechenstäbe. Da diese hochaufgelösten Elemente nicht bzw. lediglich mit stark vereinfachten Annahmen in die großen Geometrien der Kraftwerksanordnungen implementiert werden können, wurde mit einem in der Rechenebene liegenden, dünnen porösen Medium eine simplifizierte, jedoch nach Stand der Technik realisierbare Vorgehensweise gewählt. Zur Berücksichtigung der zum Teil stark abweichenden Anströmwinkel wurde zudem eine Funktion programmiert, welche für jedes Element im porösen Medium den Winkel der Anströmung zur Rechenebene berechnet und hierfür einen individuellen hydraulischen Verlustbeiwert einsetzt. Als Eingangsdaten werden je nach Rechenkonfiguration Verlustbeiwerte in Abhängigkeit vom Anströmwinkel benötigt.

Die Detailuntersuchungen des Strömungsverhaltens sowie die Ermittlung der Verlustbeiwerte an Fischleiteinrichtungen wurden anhand von numerischen Simulationen in einfachen Rechteckgerinnen im Labormaßstab durchgeführt. Untersucht wurden hierbei verschiedenste Rechenkonfigurationen mit horizontalen und vertikalen Anordnungen der Stäbe sowie variierenden Stabformen und Verbauungsgraden in 3D- und, sofern zielführend, in 2D-numerischen Simulationen. Zur Darstellung möglichst realistischer hydraulischer Verhältnisse wurde das SST k- ω -Turbulenzmodell sowie eine sehr feine Diskretisierung um

die Rechenstäbe (Die Höhe des ersten Elementes liegt in der Größenordnung von 10^{-5} m) verwendet. Die Modelle wurden mittels früherer Laborversuche (Böttcher et al., 2019) sowie empirischer Formeln aus Literaturquellen (u.a. Meusbürger, 2002) kalibriert. Zudem konnte auf Basis der Detailuntersuchungen die Anwendung des porösen Mediums mit der programmierten Funktion der Winkelabhängigkeit validiert werden.

Zur Erweiterung der Datengrundlage und Visualisierung der Ergebnisse der Wirkungsgradversuche im Turbinenversuchsstand (siehe 4.3.1) wurden diese in 3D-numerischen Simulationen reproduziert und mithilfe der gemessenen Geschwindigkeiten in den physikalischen Versuchen kalibriert. Grundsätzlich wurden für die numerischen Simulationen auf dieselben Eingangsparameter und Randbedingungen wie bei den Simulationen der Kraftwerksanordnungen zurückgegriffen. Da die numerischen Simulationen weniger für Detailuntersuchungen, sondern vermehrt zur Abschätzung und Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse dienen, wurde das Realizable-k- ϵ -Turbulenzmodell verwendet.

4.3 Physikalische Modellversuche im Turbinenversuchsstand

4.3.1 Wirkungsgradversuche

Der Turbinenversuchsstand im Labor des Arbeitsbereichs Wasserbau der Universität Innsbruck wurde im Rahmen der Vorplanungen für das Fließgewässerkraftwerk an der Unteren Salzach (erster typischer Standort) errichtet und ist ein offenes Gerinne mit einer Länge von 16 m, einer Breite von 1,15 m und einer Höhe von 2,50 m, in welchem ein voll funktionsfähiger Prototyp einer StreamDiver-Kompaktturbine von Voith Hydro im Maßstab 1:4 verbaut ist (Abbildung 5, links). Dieses Turbinenmodell wurde speziell für Wasserkraftwerke mit niedrigen Fallhöhen entwickelt und in der Praxis bereits an Fließgewässern, u.a. in Österreich und Schweden, verbaut (Innerhofer et al., 2015). Das Modell im Wasserbaulabor weist einen Laufraddurchmesser von 0,35 m sowie einen Nenndurchfluss von 312 l/s bei einer Fallhöhe von 0,70 bis 0,85 m und einer Leistung von 2 kW auf. Die Turbinendaten sowie die hydraulischen Randbedingungen werden bei der Versuchsdurchführung mit einer Reihe von Messsensoren laufend erfasst, darunter Ultraschallsensoren zur Wasserstandmessung und einer Drehmoment-Messwelle zur Bestimmung der Wellenleistung der Turbine. Anhand der aufgezeichneten Messwerte können in der Auswertung die Wirkungsgrade aller untersuchten Einbaukonfigurationen bestimmt werden, welche bei konstanter Drehzahl sowie gleichbleibender Fallhöhe einen direkten Vergleich der Geometrievarianten erlauben.

Nach der grundsätzlichen Prüfung der Funktionalität der Versuchsanlage und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse galt es zu untersuchen, ob durch den Einbau von Fischschutz- bzw. Fischleiteinrichtungen in den Turbinenversuchsstand ein messbarer Einfluss auf den Wirkungsgrad durch Strömungsauslenkungen gegeben ist. Hierfür wurden „massive“ Einbauten in Form von Keilen unterschiedlicher Abmessungen unmittelbar vor der Turbine eingebaut. Der Keil in Variante 1 erstreckte sich dabei über die Hälfte der

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Querschnittsbreite (Abbildung 5, rechts), jener in Variante 2 über ein Viertel. Für jede Geometrievariante wurden mehrere unabhängige Einzelmessungen durchgeführt. Die Fließgeschwindigkeiten wurden mittels Vectrino ADV-Messungen in zwei Querprofilen mit jeweils 32 bzw. 35 Messpunkten oberstrom der Turbine ermittelt. Darüber hinaus wurden numerische Simulationen des Turbinenversuchsstands (siehe 4.2) zur Ergänzung und verbesserten Visualisierung der Ergebnisse sowie zur Durchführung der Variante 3 (Beidseitige Einschnürung des Querschnittes mit jeweils einem Keil über ein Viertel der Querschnittsbreite) durchgeführt. Abbildung 6 gibt einen Überblick über die untersuchten Varianten sowie die Lage der Geschwindigkeits-Messprofile.

Bedingt durch die geringen Auswirkungen auf den Wirkungsgrad (siehe 5.4) wurden keine weiterführenden Einbauten sowohl im physikalischen als auch im numerischen Modell des Turbinenversuchsstands untersucht.



Abbildung 5: Prototyp einer StreamDiver-Kompaktturbine im Maßstab 1:4 im Turbinenversuchsstand bei Versuchsdurchführung (links) und nach Einbau des Keiles über die halbe Querschnittsbreite unmittelbar vor der Turbine (Variante 1) (rechts)

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

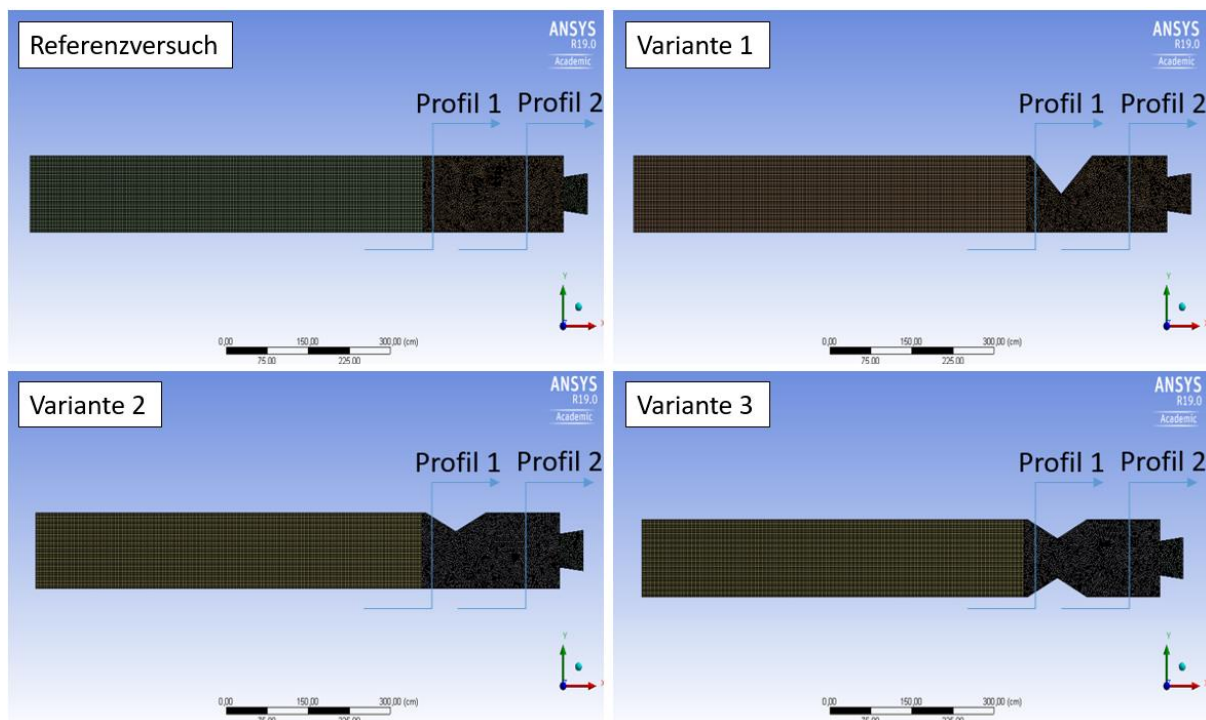


Abbildung 6: Berechnungsmodelle der untersuchten Varianten zur Anströmung der StreamDiver-Kompaktturbine im Grundriss mit Kennzeichnung der Geschwindigkeits-Messprofile, Fließrichtung von links nach rechts

4.3.2 Mortalitätsversuche mithilfe von Dummys

Im Labor des Arbeitsbereichs Wasserbau sind die notwendigen, spezifischen Anforderungen zur Haltung von Lebendfischen sowie zur Durchführung von Versuchen mit Lebendfischen nicht gegeben. Durch die sehr hohe Gefahr der unmittelbaren Schädigung bei der Turbinenpassage sprechen zudem v.a. ethische Gründe gegen die Verwendung von lebenden Individuen. Zur Abschätzung der Mortalitätsraten anhand von Laborversuchen wurde deshalb auf Dummys zurückgegriffen. Nach Vorbild der Untersuchungen in Kostheim, Deutschland, bei welchen neben Lebendfischen 102 handelsübliche Bockwürste eingesetzt wurden (Schneider et al., 2012), wurden im Rahmen von *FINI* unter Berücksichtigung des Maßstabes 1:4 des StreamDiver-Prototyps 60 Essiggurken zweier verschiedener Sorten (Delikatessgurken mit einer durchschnittlichen Länge von 8,6 cm und Cornichons mit durchschnittlich 6,1 cm) als Dummys verwendet. Um den Faktor 4 hochskaliert entspricht deren Längen-Höhen-Verhältnis in etwa jenem von typisch vorkommenden Adultfischen in den definierten Standorten (siehe 4.1). Ziel dieser Untersuchungen war die Ermittlung der Schädigungen bei der Turbinenpassage und die Beurteilung der Aussagekraft.

Vor Versuchsbeginn wurden alle Dummys vermessen und gewogen. Zum visuellen Vergleich wurden vor sowie nach der Turbinenpassage Fotoaufnahmen der Dummys angefertigt. Die Besatzstelle wurde während der Versuchsdurchführung variiert. Mithilfe eines Gitterrostes wurden die Dummys nach der Passage wieder eingefangen und umgehend auf Schäden (Abtrennungen) geprüft sowie deren Zustand protokolliert.

4.4 Weiterführende Untersuchungen der Turbinenpassage

Bei der Entwicklung von Turbinen werden CFD-Simulationen für gewöhnlich zur Beurteilung des Wirkungsgrades und des Kavitationsverhaltens verwendet. Durch die Analyse der Stromlinien der simulierten Strömungsfelder können zudem die Einflüsse auf Fische bei der Turbinenpassage bewertet werden. Hierfür bieten Analyseverfahren auf Basis der BioPA-Methode (biological performance assessment method) vom Pacific Northwest National Laboratory, USA, die Möglichkeit, die wesentlichen Einflussfaktoren für Fischschäden anhand der Ergebnisse numerischer Simulationen der Turbinendurchströmung zu bestimmen und mit der biologischen Sensitivität des Fisches zu kombinieren. Dies erlaubt die Auslegung von Turbinen mit „verbesserte“ Fischpassage (Richmond et al., 2014). Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurde diese Methode für das Fließgewässerkraftwerk an der Unteren Salzach (erster typischer Standort) angewandt.

Auf Basis der Jahressganglinien an der oberstrom situierten Pegelmessstation Oberndorf erfolgte im ersten Schritt die Festlegung der zu untersuchenden Turbinenmodelle. Hierfür wurden zur Überprüfung des Einflusses der Turbinengröße und der Drehzahl zwei mögliche Baugrößen des Typs StreamDiver (SD14.90 und SD16.95) von Voith Hydro für das Projekt definiert und untersucht. Für diese wurden darauffolgend numerische Simulationen mit dem Strömungslöser von ANSYS CFX durchgeführt. Unter der Annahme, dass ein Fisch als auftriebsfreier Körper mit der Strömung durch die Turbine getragen wird, wurden mit den Ergebnissen der Strömungssimulation Stromlinien erzeugt, auf denen die zu erwartenden Einflüsse auf die Fische statistisch erfasst werden. Aus diesen Stromlinien konnten Informationen über die Einflüsse von Druck, Kollision und Scherkraft auf den Fisch gewonnen werden. Zur Betrachtung der Kollision wurden die Geschwindigkeitsvektoren in der Nähe der Schaufeleintrittskante extrahiert, um die Kollisionswahrscheinlichkeit und die Aufprallgeschwindigkeit zu bestimmen. Im Gegensatz zu empirischen und physikalischen Ansätzen erlaubte die Auswertung auf Basis der Stromlinien zusätzlich die Möglichkeit, kritische Zonen örtlich zu identifizieren. Für die Bewertung wurde über eine große Anzahl von Stromlinien eine Expositionswahrscheinlichkeit für die jeweiligen Einflussfaktoren abgeleitet. Dadurch ergab sich eine statistische Auswertung für alle denkbaren Durchgangspfade der Turbine. Das Verletzungsrisiko konnte somit durch die Kombination der physikalischen Informationen aus der Strömungsberechnung mit der biologischen Sensibilität, basierend auf Laboruntersuchungen, für die jeweiligen Fischarten abgeschätzt werden. Zur Bestimmung der Überlebenswahrscheinlichkeit wurde über das Produkt der Expositionswahrscheinlichkeit und der Wahrscheinlichkeit tödlicher Verletzungen der Fische in Abhängigkeit der individuellen Fischlängen integriert (Richmond et al., 2014). Zudem wurden anhand der beiden untersuchten Turbinenvarianten Rückschlüsse der Einflüsse von Turbinengröße und Drehzahl auf die einzelnen Einflussfaktoren (Stressoren) getroffen.

4.5 Kostenanalyse

Auf Basis von Datengrundlagen an Wasserkraftanlagen in Österreich und Deutschland wurden die jeweiligen Kosten für sämtliche Strukturen von Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen im Gesamten sowie insbesondere für die Rechenstrukturen ermittelt und gegenübergestellt. Ziel dieser Analyse war es, typische Kostenansätze für Fischschutz- und Fischleiteinrichtungen zusammenzustellen und somit den Anteil dieser Strukturen an den Gesamtkosten von Wasserkraftanlagen abschätzen zu können. Für letzteren Punkt wurden die Kostenansätze aus dem *Durchgängigkeitskonzept Saale* (TLUG, 2015) verwendet, welche in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Tabelle 1: Kostenansätze für Fischabstieg- und Fischschutzsysteme (Datenquelle: TLUG, 2015)

Maßnahme	Kostenansatz für Fischabstieg- und Fischschutzsysteme
Nachrüstung einfacher Anlagenstandorte bzw. Neubau	20.000 €/((m ³ /s) * Q _A [m ³ /s])
Nachrüstung von Anlagen mit durchschnittlichen Schwierigkeitsgrad	30.000 €/((m ³ /s) * Q _A [m ³ /s])

5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

5.1 Untersuchung der Fischleitwirkung entlang von Leiteinrichtungen in den Bypass

Bei der Planung von Fischschutz- und Fischleiteinrichtungen an Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen wird die erforderliche Schräganströmung, welche die Fische zu einem geeigneten Bypass ableiten und somit ein sicheres Absteigen ins Unterwasser gewährleisten soll, häufig mit einer Anordnung in Bezug auf die unbeeinflusste Fließrichtung des Gewässers erzielt. Die tatsächliche Richtung der Strömungsvektoren, aber auch die räumlichen Verteilungen der lokalen Geschwindigkeiten, können bei genauerer Untersuchung jedoch deutlich von diesen idealisierten Annahmen abweichen (Abbildung 7). Dadurch können sich ungünstige Bedingungen für den Fischschutz und die Fischleitwirkung ergeben.

Abbildung 7 zeigt zudem, dass die in der Praxis oftmals eingesetzte Methode, die mittlere Fließgeschwindigkeit am Rechen mithilfe des Abflusses und der im Wasser befindlichen Rechenfläche (Kontinuitätsgleichung) abzuschätzen, aufgrund lokaler Geschwindigkeitsmaxima im Bereich des unterstromigen Endes der Leiteinrichtung nicht zielführend ist.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

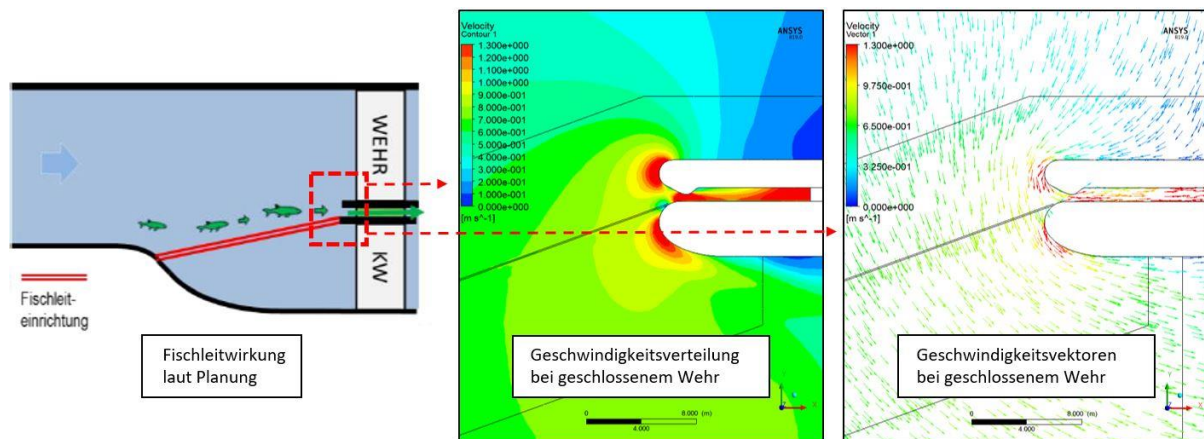


Abbildung 7: Buchtenergiekraftwerk mit Fischleiteinrichtung im Grundriss (links); Darstellung der lokalen Geschwindigkeitsverteilung (Mitte) und der tatsächlichen Geschwindigkeitsvektoren (rechts) in mittlerer Fließtiefe im unmittelbaren Nahbereich des Bypass-Einlaufes bei geschlossenem Wehr (Normalbetrieb)

Aufbauend auf Erfahrungen aus früheren Forschungsprojekten und Literaturquellen (u.a. Ebel, 2013), angepasst an die Ergebnisse aus den numerischen Simulationen, wurden Bemessungs- bzw. Bewertungsempfehlungen festgelegt, mit welchen die Leitwirkung im Nahbereich der Fischleiteinrichtung sowie des Bypasses beurteilt werden kann. Als maßgebendes Kriterium wurde hierfür eine geeignete Leitströmung in Richtung des Bypass-Eingangs definiert.

Generell ist von einer guten Leitwirkung auszugehen, wenn die Tangentialgeschwindigkeit größer als die Normalgeschwindigkeit zur Fischleiteinrichtung ist ($v_{\text{tan}} > v_{\text{normal}}$). Der Winkel der Anströmung α zur Leiteinrichtung ist somit kleiner als 45° . Unabhängig von den untersuchten Rechenneigungen von 20° und 40° zur unbeeinflussten Strömungsrichtung sind jedoch geeignete flache Anströmwinkel der Stromlinien nur im oberstromigen Bereich der Leiteinrichtung aufgrund der größeren Entfernung zum Turbineneinlauf gegeben, wie in Abbildung 8 ersichtlich ist. Im unterstromigen Bereich nahe dem Trennpfeiler werden die Anströmwinkel der Stromlinien zur Leiteinrichtung nahezu rechtwinklig ausgebildet.

Um Fischschäden durch Anpressen an die Barriere bzw. um ein Passieren der Barriere (abhängig von den Fischabmessungen im Vergleich zu den Abständen der Rechenstäbe) zu vermeiden, ist in Bereichen mit einer geringen (d.h. α ist größer als 45° und damit $v_{\text{tan}} < v_{\text{normal}}$) bzw. keiner Leitwirkung ($v_{\text{tan}} = 0$, $\alpha = 90^\circ$) die zulässige Anströmgeschwindigkeit zum Rechen das maßgebende Kriterium. Diese sinkt mit zunehmenden Anströmwindeln zur Barriere ($v_{\text{zulässig}} = v_{\text{normal}} / \sin\alpha$) und sollte nicht nur als pauschaler Grenzwert betrachtet, sondern in Abhängigkeit der Schwimmleistung der im Gewässerabschnitt zu berücksichtigenden Fischarten differenziert werden. Die Aufenthaltszeit der Fische im Anströmbereich kann mehrere Stunden betragen (Ebel, 2013). In vorangegangenen Untersuchungen (u.a. im FFG-Projekt *Elektro-Seilrechen*) konnte dies, trotz vorhandener Leitwirkung, durch den Aufenthalt im Anströmbereich der Leiteinrichtungen über einen längeren Zeitraum bestätigt werden. Zur Vermeidung des Anpressens an die Barriere ist deshalb die Normalgeschwindigkeit zur Barriere auf die maximale

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Dauerschwimmgeschwindigkeit der Fische zu beschränken. Anhand von verfügbaren Dauerschwimmgeschwindigkeitsmodellen basierend auf Fischgilden, die eine Beziehung zwischen Schwimmgeschwindigkeit und Schwimdauer herstellen (Ebel, 2014), können somit geeignete Fließgeschwindigkeitsbereiche abgeleitet werden.

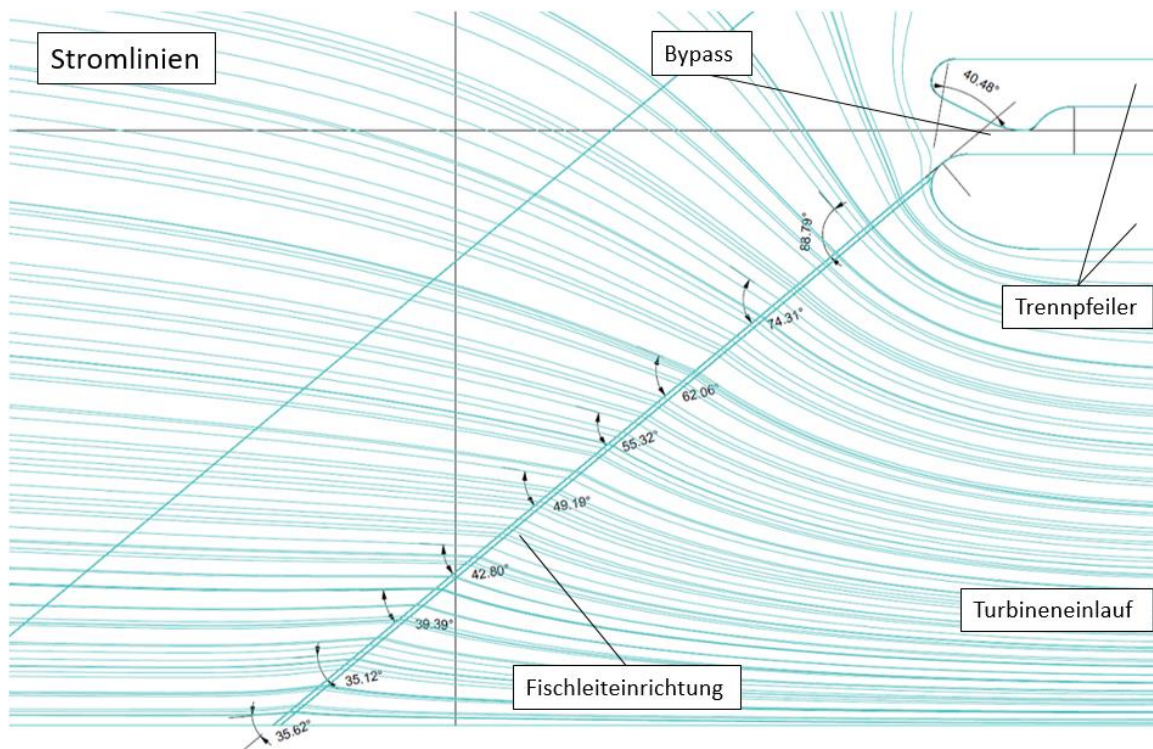


Abbildung 8: Stromlinien im Bereich des Fischleitrechens (40° Schrägneigung zur unbeeinflussten Fließrichtung) beim Blockkraftwerk am voralpinen Fluss mit Angabe des Anströmwinkels zum Rechen an mehreren Stellen im Grundriss, Fließrichtung von links nach rechts

Bei der hydraulischen Bemessung von Fischleiteinrichtungen ist die Betrachtung der hydraulischen Verhältnisse nahe der Sohle für bodenorientierte Fische sowie nahe der Wasseroberfläche für oberflächlich wandernde Fische von besonderer Bedeutung. Diese weichen teilweise signifikant voneinander ab, ausgelöst durch Strömungsauslenkungen in der Vertikalen, u.a. durch das verwendete Bypass-System, wie z.B. dem Leitreechen-Bypass-System nach Ebel, Gluch & Kehl (2001) gemäß Ebel (2013), und/oder den Turbineneinlauf. Abbildung 9 zeigt ein Beispiel hierfür mit einer kaum erkennbaren Leitwirkung zum Bypass in Sohlhöhe ($z = 0,1$ m) bzw. einer deutlich besser ausgeprägten Leitwirkung nahe der Oberfläche ($z = 3,5$ m). Zudem sollten sohlennahe Strukturen, wie etwa eine Sohleleitschwelle, aufgrund des potentiell erheblichen Einflusses auf die Fischleitwirkung (siehe 5.2) berücksichtigt werden. Hiermit ist auch die Aussage der grundsätzlichen Nichteignung von 2D-numerischen Simulationen als Planungsinstrument für Detailuntersuchungen begründet, da Fließgeschwindigkeiten in der 2D-Numerik generell als tiefengemittelt angenommen werden (Habersack et al., 2007) und somit die tatsächlichen Strömungsverhältnisse sohl- bzw. oberflächennahe nicht korrekt abgebildet werden können.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

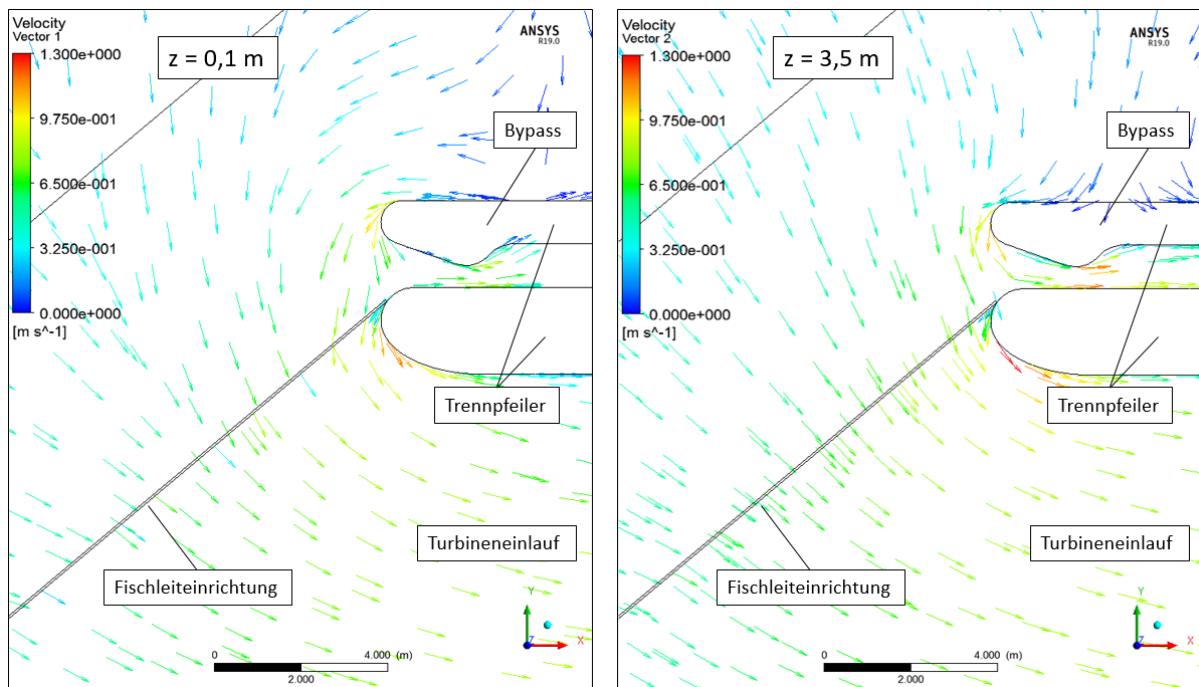


Abbildung 9: Darstellung der sohnahen (links) bzw. der oberflächennahen (rechts) Geschwindigkeitsvektoren im Bereich der Fischleiteinrichtung beim Blockkraftwerk am voralpinen Fluss (Normalbetrieb) im Grundriss

Die im Forschungsprojekt untersuchten Schrägrechen mit horizontal angeordneten Stäben erzielen die Leitwirkung hauptsächlich durch den Anstellwinkel und ihre mechanische Barrierewirkung. Durch die Ablenkung der Strömungsvektoren wird lediglich ein geringfügiger Einfluss auf die Leitwirkung im Oberwasser erzielt. Die Stromlinien und Geschwindigkeitsvektoren werden durch die Schrägneigung kaum ausgelenkt und verändern sich je nach lichter Weite zwischen den Stäben, im Gegensatz zu den hydraulischen Verlusten, nicht erheblich. Bei weiterführenden numerischen Simulationen von Fischleiteinrichtungen mit horizontalen Stäben kann somit die Empfehlung ausgesprochen werden, in Abhängigkeit der lichten Abstände und sofern dies dem Ziel der Aufgabenstellung entspricht, Fischleitstrukturen zur Reduktion des erheblichen Rechenaufwandes zu vernachlässigen.

Ein wesentliches Kriterium für die Bewertung des Fischabstieges ist neben der Leitwirkung entlang der Fischleiteinrichtung die Auffindbarkeit des Bypasses, welche durch eine zum Bypass-Einlauf gerichtete Leitströmung erzielt werden soll. Empfehlungen für ausreichend hohe Geschwindigkeiten bzw. Geschwindigkeitsverläufe unmittelbar vor und im Bypass können der Literatur entnommen werden (u.a. Ebel, 2013). Die Notwendigkeit einer Überprüfung mittels numerischer Simulationen zeigt sich in Abbildung 7 bzw. Abbildung 9, in welchen die empfohlenen, maximal zulässigen Fließgeschwindigkeiten zwar am Leitbauwerk eingehalten werden, sich jedoch zum Teil keine attraktiven Leitströmungen zum Bypass-Einlauf hin ausbilden. Bauliche Maßnahmen können zudem erhebliche Unterschiede in der Leitwirkung bewirken (siehe 5.2) und sollten bei der Planung neben der Einhaltung der empfohlenen Grenzwerte berücksichtigt werden.

5.2 Beschreibung von Bauweisen mit wirksamen Fischschutz- und Fischleitkonzepten für Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen

Die Herstellung einer Fischschutz- und Fischleiteinrichtung hin zur Abstiegseinrichtung ins Unterwasser stellt sich in der Regel bei den Planungen von neuen Wasserkraftanlagen und speziell bei der fischökologischen Nachrüstung von Bestandsanlagen als schwierige Herausforderung dar. Aufgrund von anlagen- und standortspezifischen Gegebenheiten sollte jede Anlage gesondert betrachtet werden. Trotzdem lassen sich mithilfe der Ergebnisse der 3D-numerischen Simulationen einige allgemeingültige Aussagen anhand von Beispielen ableiten.

5.2.1 Empfehlungen hinsichtlich der Nachrüstung an Bestandsanlagen

Im Prinzip stellt die Errichtung einer Fischleiteinrichtung, welche an den Trennpfeiler angeschlossen wird, sowie eines geeigneten Bypasses, abgegrenzt von der wehrseitigen Strömung durch den Bau eines zweiten Trennpfeilers, die zugleich einfachste und effektivste Lösung zum wirksamen Fischschutz dar. Abbildung 10 zeigt hierfür ein Beispiel im Normalbetrieb (d.h. Kraftwerksbetrieb bei geschlossenem Wehr und voller Beaufschlagung der Turbinen), in welchem zudem der neuerrichtete, wehrseitige Trennpfeiler variiert wird. In A ist ersichtlich, dass am unterstromigen Ende der Leiteinrichtung sowie in den Bypass hinein keine den Empfehlungen entsprechende, ausgeprägte Fischleitwirkung (siehe 5.1) vorliegt, sondern lediglich eine kleinräumige Leitströmung. Durch Vorziehen des „neuen“ Trennpfeilers in Richtung oberstrom in B treten günstigere Bedingungen bezüglich der Leitwirkung auf, jedoch auch erhöhte Geschwindigkeiten um den wehrseitigen Trennpfeiler sowie eine erschwerte Auffindbarkeit des Bypasses für Fische, welche sich im Wehrbereich aufhalten. Die Auffindbarkeit des Bypasses sowie die Leitwirkung zum Bypass-Einlauf für Fische im Wehrbereich kann durch die Verschiebung des „neuen“ Trennpfeilers in Richtung unterstrom hergestellt werden, mit dem beiläufigen Effekt einer abgeminderten Leitwirkung am unterstromigen Ende der Leiteinrichtung. Auch wehrseitige zusätzliche Öffnungen zum Bypass (In Abbildung 10 nicht dargestellt) stellen hierfür keine optimale Lösung dar, da sie die häufig bereits ungünstigen Anströmungsbedingungen am Bypass-Einlauf weiter verschlechtern. In D wurde die Form des wehrseitigen Trennpfeilers so optimiert, dass dieser Trennpfeiler gleichmäßiger umströmt wird und demzufolge geringere Ablösungen auftreten. Auf die Geschwindigkeitsgröße sowie Vektorenrichtung direkt an der Leiteinrichtung wirkt sich dies allerdings nicht wesentlich aus. Hinsichtlich der Trennpfeilervariationen für diese Kraftwerksanordnung würde eine Maßnahmenkombination aus Variante B und D zu einer verbesserten Lösung führen.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

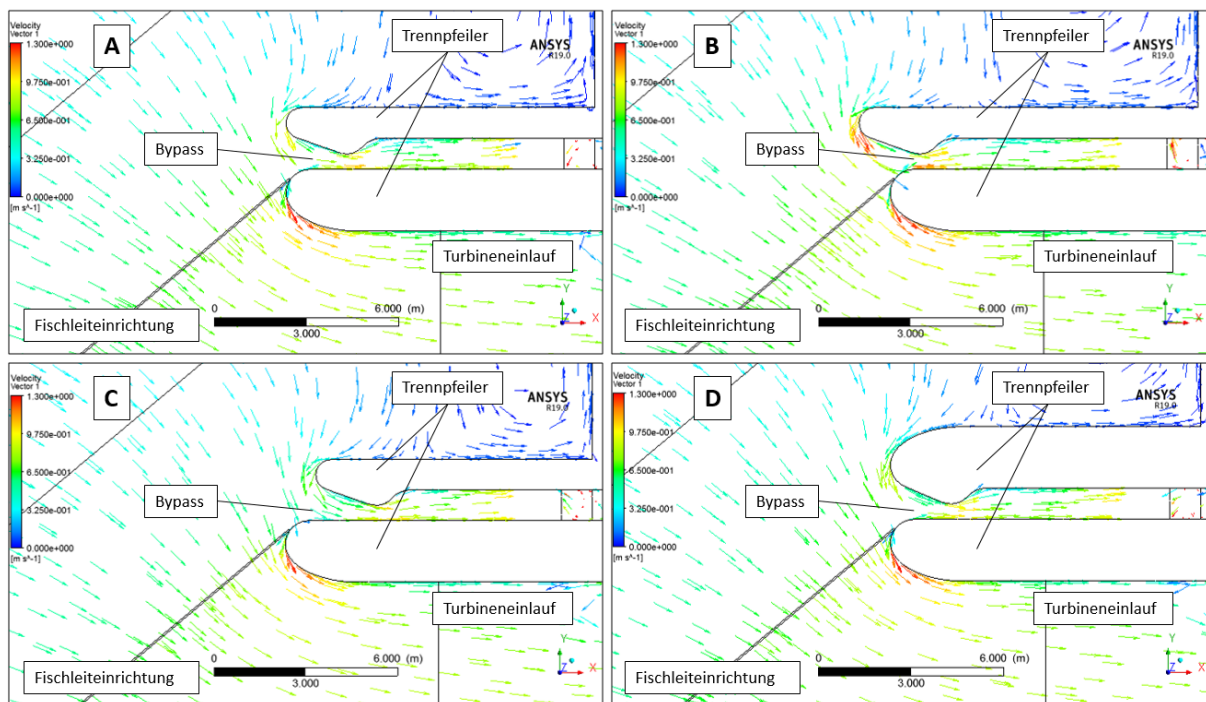


Abbildung 10: Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren in mittlerer Fließtiefe ($z = 2,0$ m) im unmittelbaren Nahbereich des Bypass-Einlaufes beim Blockkraftwerk am voralpinen Fluss (Normalbetrieb) im Grundriss; Variation der Lage sowie der Form des neu errichteten, wehrseitigen Trennpfeilers: Variationen A (Ausgangsvariante), B (Lage um 1,0 m in Richtung oberstrom verschoben), C (Lage um 1,0 m in Richtung unterstrom verschoben) und D (Strömungsgünstige Formoptimierung).

Der Einbau einer Sohlleitschwelle, welche in der Regel primär zur Abweisung von Geschiebe aus dem Turbineneinlauf verwendet wird, kann eine für den Fischschutz zusätzlich günstige Barrierewirkung und darüber hinaus eine verbesserte Leitwirkung darstellen. Fische, welche v.a. bodennah flussab wandern, können bei Leitrechen mit Sohlleitschwelle effizienter in Richtung Bypass geleitet werden (Ebel, 2013). Wie in Abbildung 11 dargestellt, führt diese Maßnahme im unterstromigen Bereich des Leitbauwerks zu einer weiteren Ablenkung der Geschwindigkeitsvektoren in der sohnahen Höhe ($z = 0,1$ m) und reduziert dementsprechend die Leitwirkung in den Bypass. Im oberstromigen Bereich werden die Vektorrichtungen dagegen in der sohnahen Höhe tangential zur Leiteinrichtung ausgelenkt, die Fischleitwirkung wird verbessert. Die Fließgeschwindigkeiten unmittelbar vor der Sohlleitschwelle reduzieren sich in der sohnahen Höhe nicht bzw. nur geringfügig. Sofern die hydraulische Bemessung anhand der Dauerschwimmgeschwindigkeiten der schwimmschwächsten Zielart durchgeführt wurde (siehe 5.1), weist sich eine sohnahne Struktur prinzipiell als positiv aus, da angenommen werden kann, dass der Fisch nach längerer Schwimmdauer den Bypass-Einlauf auffindet.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

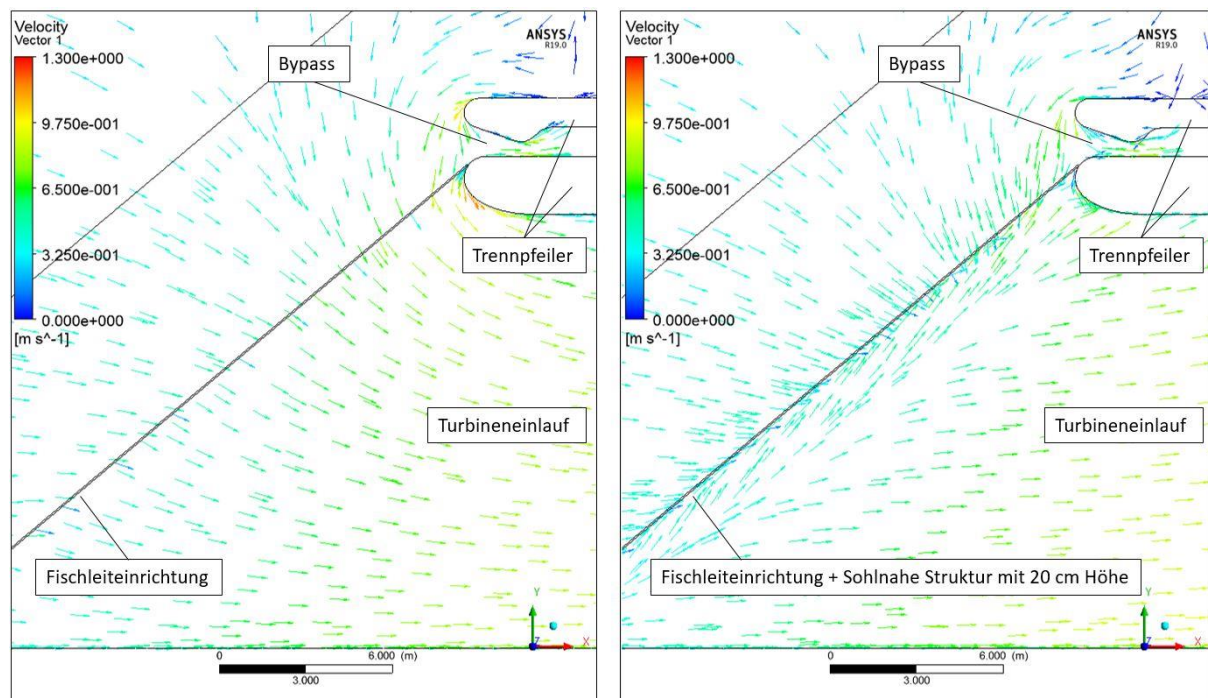


Abbildung 11: Darstellung der sohlnahen Geschwindigkeitsvektoren ($z = 0,1$ m) im Bereich der Fischleiteinrichtung ohne (links) bzw. mit Sohlleitschwelle (20 cm Höhe) in der Rechenebene (rechts) beim Blockkraftwerk am voralpinen Fluss (Normalbetrieb) im Grundriss

Je nach Betriebsart des Kraftwerks treten unterschiedliche Leitwirkungen auf. Die oben angeführten Erläuterungen betreffen die im Allgemeinen für den Fischschutz sowie die Fischleitwirkung ungünstigste Situation bei geschlossenem Wehr und voller Beaufschlagung des Kraftwerks (Normalbetrieb). Grundsätzlich wirken sich zusätzliche Abstiegsmöglichkeiten, wie z.B. ein überströmtes Wehr, positiv auf die fischökologische Betrachtung aus, wenn ein sicherer Abstieg ohne Verletzungsrisiko gewährleistet ist (BMNT, 2019a), während aus Sicht der Kraftwerksbetreiber ein oft erheblicher Anteil des Gesamtabflusses nicht energiewirtschaftlich genutzt werden kann.

Bei Bestandsanlagen bietet sich häufig die Option an, Fischleiteinrichtungen in Turbineneinläufe zu implementieren, wenn z.B. die Errichtung des Bypasses nahe des Trennpfeilers aufgrund baulicher Gründe ausgeschlossen und/oder bereits bestehende Wanderkorridore, wie Fischaufstiegshilfen, zusätzlich zum Abstieg ins Unterwasser genutzt werden können. Hier ist in erster Linie besonders darauf zu achten, dass die Anströmgeschwindigkeiten auf den Leitreechen die allgemein gültigen Schwellenwerte nicht überschreiten, um ein Anpressen der Fische vermeiden zu können. Bei zu hohen Geschwindigkeiten, selbst wenn die tangentielle Geschwindigkeit deutlich höher als die normale ist, kann ein Kontakt der Fische mit dem Rechen und somit Schädigungen nicht ausgeschlossen werden. Zudem stellen bei Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen wenige cm an Fallhöhenverlusten bereits große Energieeinbußen dar. Da diese Höhenverluste bekanntlich quadratisch mit der Geschwindigkeit zunehmen (Meusburger, 2002), stellt sich die Implementierung von Fischleiteinrichtungen in den Turbineneinlauf auch aus energiewirtschaftlicher Sicht als nicht optimale Lösung heraus. Um Höhenverluste,

ausgelöst durch Fischleiteinrichtungen, möglichst klein zu halten, drängen sich aktuell vermehrt hybride Lösungen auf. Die Wirksamkeit dieser Kombination aus mechanischer und Verhaltens-Barriere hat sich u.a. im FFG-Projekt *Elektro-Seilrechen* anhand der Untersuchungen in Lunz am See bestätigt (Tutzer et al., 2019). Hybride Barrieren erlauben die Verwendung von großen lichten Stababständen und minimieren somit den Einfluss auf das Strömungsverhalten sowie die hydraulische Verlusthöhe (Berger, 2018).

5.2.2 Empfehlungen für Neubau-Projekte

Prinzipiell gelten für Neubau-Projekte dieselben Empfehlungen wie bei Bestandsanlagen. Im Hinblick auf eine möglichst langlebige Nutzung ohne weitere Umbaumaßnahmen sollten die erheblichen Anforderungen des Fischschutzes direkt in die Planung eingebunden und typische ungünstige Anordnungen unter Berücksichtigung der standortspezifischen Gegebenheiten vermieden werden.

Grundsätzlich weist die Bauweise des Blockkraftwerkes hinsichtlich der Fischleitwirkung günstigere Charakteristika gegenüber dem Buchtenkraftwerk auf. Die zusätzliche Auslenkung der Hauptströmung zu den Turbinen aufgrund der anthropogenen Bucht führt zu erhöhten Anströmwinkeln an den Fischleitstrukturen sowie gegebenenfalls zu ausgelenkten Strömungen im Turbineneinlauf. Sofern die Planung in Blockbauweise nicht umsetzbar ist, bieten sich komplexere Anlagenvarianten an. Ein Beispiel hierfür stellt das geplante Fließgewässerkraftwerk an der Unteren Salzach bei Flusskilometer 39,9 dar, welches im Rahmen von *FINI* als einer der typischen Standorte definiert und untersucht wurde. Mit mehreren Fischabstiegskorridoren (Bypässe kraftwerksseitig sowie asymmetrisch aufgelöste Rampe wehrseitig, siehe Abbildung 12) liegen mehrere Möglichkeiten der effektiven Fischleitwirkung vor (Brinkmeier, 2012). Bodenorientierte Fische können durch eine Geschiebeschwelle vor dem Einschwimmen in den Turbineneinlauf abgehalten und in Richtung des Schlauchwehrs geleitet werden, wobei jedoch bei Normalbetrieb (Schlauchwehr nicht überströmt) sowie in Abhängigkeit des dynamischen Oberwasserspiegels keine direkte Anbindung zu einer Abstiegsmöglichkeit gegeben ist. Die Fische müssen entweder aktiv über die Schwelle zu den kraftwerksseitigen Bypässen oder ans gegenüberliegende Rampenbauwerk gelangen, um die Barriere zu passieren. Im Bereich des Turbineneinlaufs ergeben sich heterogene Anströmungsverhältnisse zu den unterschiedlichen Leitbauwerken und Bypass-Öffnungen, sowohl in der lateralen als auch in der vertikalen Ebene. Die Anströmgeschwindigkeiten und -richtungen, bezogen auf die einzelnen Leitelemente direkt vor den Turbineneinlässen, variieren wesentlich voneinander, dennoch sind für beide Betriebszustände (Klappen über der Erzeugungseinheit geschlossen und geöffnet) durchwegs adäquate Abstiegskorridore gegeben.

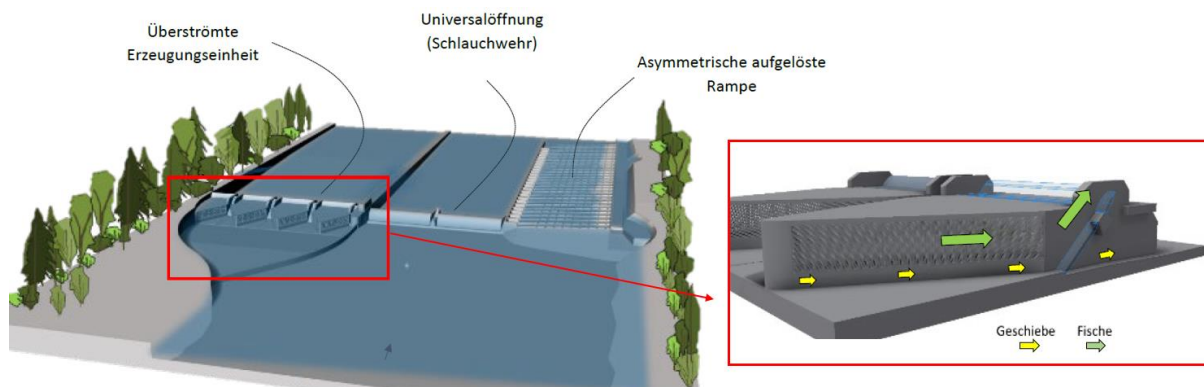


Abbildung 12: Visualisierung des Fließgewässerkraftwerks an der Unteren Salzach mit Kennzeichnung der wesentlichen Anlagenelemente (links); Konzept für den Fischabstieg sowie für die Geschiebeableitung durch einen der vier Bypässe zwischen den V-förmigen Strukturen (rechts)

5.3 Numerische Ermittlung der Verlustbeiwerte an Fischschutz- bzw. Fischleitrechen

Auf Basis von numerischen Simulationen wurden die hydraulischen Höhenverluste verschiedener Rechenkonfigurationen von gängigen Fischschutz- bzw. Fischleitrechen ermittelt. Zudem erlaubten diese hochaufgelösten Berechnungsmodelle die eingehende Untersuchung der hydraulischen Strömungsverhältnisse sowie des wahrscheinlichen Fischverhaltens.

Die Auswertung der numerischen Simulationen zeigte, dass je nach betrachteter Rechenkonfiguration grundsätzliche Unterschiede bei den Einstellungen notwendig waren, um Verlustbeiwerte zu erhalten, welche in etwa in den Bereichen der zu erwarteten Werte aus Literatur und früheren Modellversuchen liegen.

Bei Schrägrechen (= horizontal angeordnete Stäbe mit einer Schrägneigung zur unbeeinflussten Strömung) handelt es sich um nicht-symmetrische Problemstellungen, zu deren Bearbeitung 3D-numerische Simulationen erforderlich sind. Zur vereinfachten Betrachtung genügt ein Ausschnitt von wenigen Stäben (z.B. 3 oder 5), unter der Voraussetzung, dass an den Wänden symmetrische Bedingungen angenommen werden. Bei den meisten Stabformen reicht eine geringe Breite (z.B. 1 bis 2 m) aus, um die horizontalen Einflüsse der Schrägneigung auf das Strömungsverhalten ausreichend berücksichtigen zu können. Breitere Rechenstäbe erhöhen den Verlustbeiwert nur geringfügig. Bei Schrägneigungen mit einem Winkel von 90° (= symmetrische Problemstellung) sind 2D-numerische Simulationen aufgrund des deutlich geringeren Rechenaufwandes zu bevorzugen.

Exemplarisch sind in Abbildung 13 die Ergebnisse für einen Circular Bar Trash Rack (CBTR = Schrägrechen mit kreisförmigen, horizontal angeordneten Stäben) mit einem Verbauungsgrad von 50% dargestellt. Hierfür wurden 2D- und 3D numerische Simulationen (ohne Berücksichtigung der freien Wasseroberfläche) durchgeführt und die Ergebnisse mit jenen aus früheren Modellversuchen (Böttcher et al., 2019) sowie einer empirischen Berechnungsformel gegenübergestellt. Dabei wurden Winkel von 40° bis 90° Schrägneigung

untersucht. Geringere Schrägneigungen stellten sich aufgrund der schlechten Qualität des Berechnungsnetzes als problematisch heraus. In Abbildung 13 ist ersichtlich, dass sich die ermittelten Verlustbeiwerte aus den 2D- und 3D-numerischen Simulationen lediglich geringfügig voneinander unterscheiden. Die Vergleichswerte aus dem physikalischen Modellversuch sowie der Berechnungsformel aus der Literatur werden jedoch um bis zu 20% unterschritten. Durch die Berücksichtigung der freien Wasseroberfläche mit der sogenannten VOF-Methode in ANSYS Fluent gelang es in weiterführenden 2D-numerischen Simulationen der oben genannten Rechenkonfiguration, Verlustbeiwerte in den gewünschten Bereichen zu erhalten. Nachteil der Anwendung dieser Methode ist allerdings die deutlich erhöhte Rechenzeit, welche trotz Verwendung von Hochleistungsclustern Simulationen mit annehmbaren Berechnungsdauern lediglich im 2D-Bereich (d.h. symmetrische Problemstellungen) erlaubt.

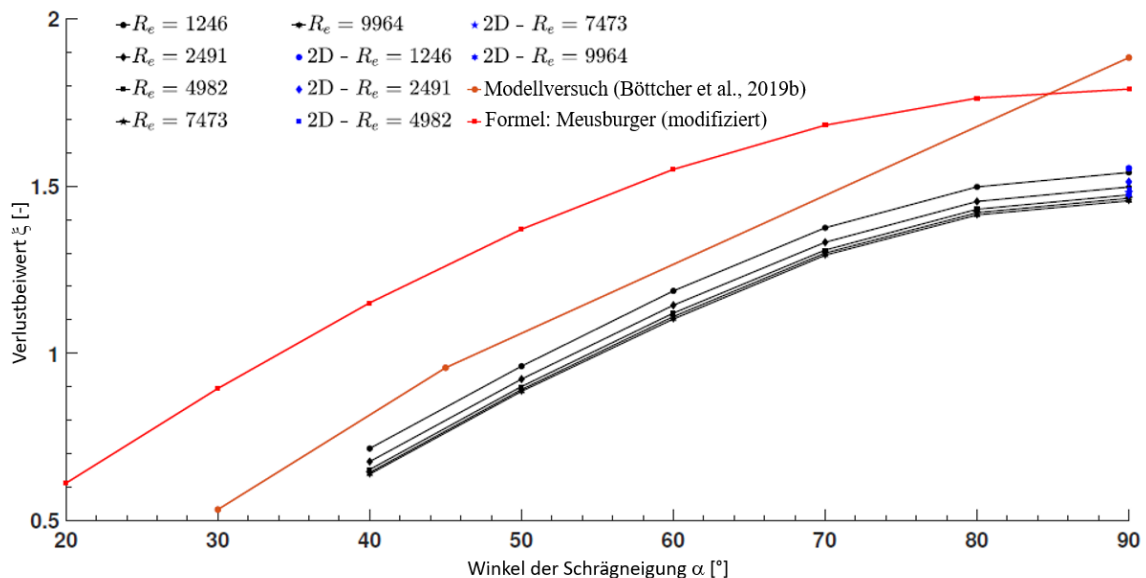


Abbildung 13: Ergebnisse der 2D- und 3D-numerischen Simulationen der Rechenkonfiguration Circular Bar Trash Rack mit horizontal angeordneten Stäben, 10 mm Stabdurchmesser und 50% Verbauungsgrad in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl R_e ohne Berücksichtigung der freien Wasseroberfläche, gegenübergestellt zu den Ergebnissen der physikalischen Laborversuche und der empirischen Berechnungsformel Meusburger (modifiziert) aus Böttcher et al. (2019)

Bei Rechenkonfigurationen mit vertikal angeordneten Stäben reichen, sofern keine vertikale Neigung des Rechens vorliegt, 2D-numerische Simulationen aufgrund nahezu übereinstimmender Ergebnisse mit vergleichbaren 3D-Simulationen aus. In der Auswertung wurden verhältnismäßig gute Übereinstimmungen der Verlustbeiwerte aus den numerischen Simulationen mit jenen aus Literaturquellen erreicht. Entscheidend für den Verlustbeiwert war die Breite des betrachteten Abschnittes. Hintergrund hierfür sind die deutlich größeren horizontalen Auslenkungen der Strömung durch die Barriere, welche in der Auswertung der numerischen Simulationen im Vergleich zu horizontal angeordneten Rechen mit gleichen Schrägneigungen beobachtet wurden.

Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass numerische Simulationen physikalische Modellversuche zur Ermittlung der Verlustbeiwerte nach aktuellem Stand der Technik nicht lückenlos ersetzen können. Je nach betrachteter Rechenkonfiguration zeigten sich mehr oder weniger gut übereinstimmende Verlustbeiwerte. Dennoch eignen sich numerische Simulationen aufgrund der Notwendigkeit wesentlicher Datenquellen (u.a. zur Kalibrierung) lediglich unter bestimmten Umständen als zuverlässige Methode zur Ermittlung von Verlustbeiwerten. Vielmehr kann in Zukunft ein hybrides System, bestehend aus wenigen physikalischen Modellversuchen und darauf aufbauenden sowie weiterführenden numerischen Untersuchungen, angestrebt werden. Dies ermöglicht einerseits eine Einsparung finanzieller sowie zeitlicher Ressourcen und erweitert andererseits den Kenntnisstand über das Strömungsverhalten durch die einfache Abbildbarkeit der hydraulischen Vorgänge in der Numerik.

5.4 Wirkungsgradversuche mit einer StreamDiver-Kompaktturbine

Im Turbinenversuchsstand wurden die Anströmungsbedingungen der StreamDiver-Kompaktturbine mithilfe von „massiven“ Einbauten möglichst weitreichend verändert, um einen messbaren Einfluss auf den Wirkungsgrad erfassen zu können.

Die Auswertung der Messreihen zeigte, dass die damit erzielten Strömungsauslenkungen einen lediglich geringfügigen Einfluss auf den Wirkungsgrad der Turbine haben. Trotz größtmöglicher Veränderungen der hydraulischen Anströmungsbedingungen verringerte sich der Wirkungsgrad bei gleichbleibender Fallhöhe lediglich um 3,9% bei Variante 1 (Keil über 50% der Querschnittbreite) bzw. um 1,8% bei Variante 2 (Keil über 25% der Querschnittbreite) gegenüber dem Referenzversuch. Diese Werte beziehen sich ausschließlich auf die Auslenkungen der Strömung; die Energiehöhenverluste, bedingt durch die Einbauten, wurden hierfür nicht berücksichtigt. Die StreamDiver-Kompaktturbine reagiert somit sehr robust auf verschiedene Anströmungsverhältnisse.

Mit den Geschwindigkeitsmessungen wurden die Strömungsverhältnisse vor bzw. nach den Einbauten eruiert und zusätzlich die numerischen Modelle kalibriert. Auf Basis dieser ergänzenden, numerischen Untersuchungen konnten relevante Ergebnisse, deren Ermittlung in physikalischen Versuchen oftmals nicht bzw. lediglich unter schwierigen Bedingungen möglich ist, einfach dargestellt werden. Abbildung 14 zeigt als Beispiel hierfür die Auslenkungen der Strömung im Schnitt durch die Turbine unmittelbar vor den Leitschaufeln. Die asymmetrischen Strömungsauslenkungen bei Variante 1 sind dabei deutlich zu erkennen.

Zusätzlich erlaubte die Numerik die Durchführung einer weiteren Variante (Variante 3 in Abbildung 14, beidseitige Einschnürung um jeweils ein Viertel der Querschnittsbreite). Der Wirkungsgrad dieser Variante lässt sich aus den numerischen Simulationen aufgrund fehlender Abbildbarkeit essenzieller Bauteile nicht ableiten, dennoch kann bei näherer Betrachtung der Stromlinien im Vergleich zu den anderen untersuchten Varianten darauf

geschlossen werden, dass die beidseitige Einschnürung des Querschnittes keine weitreichendere Auslenkung der Strömung zur Folge hat.

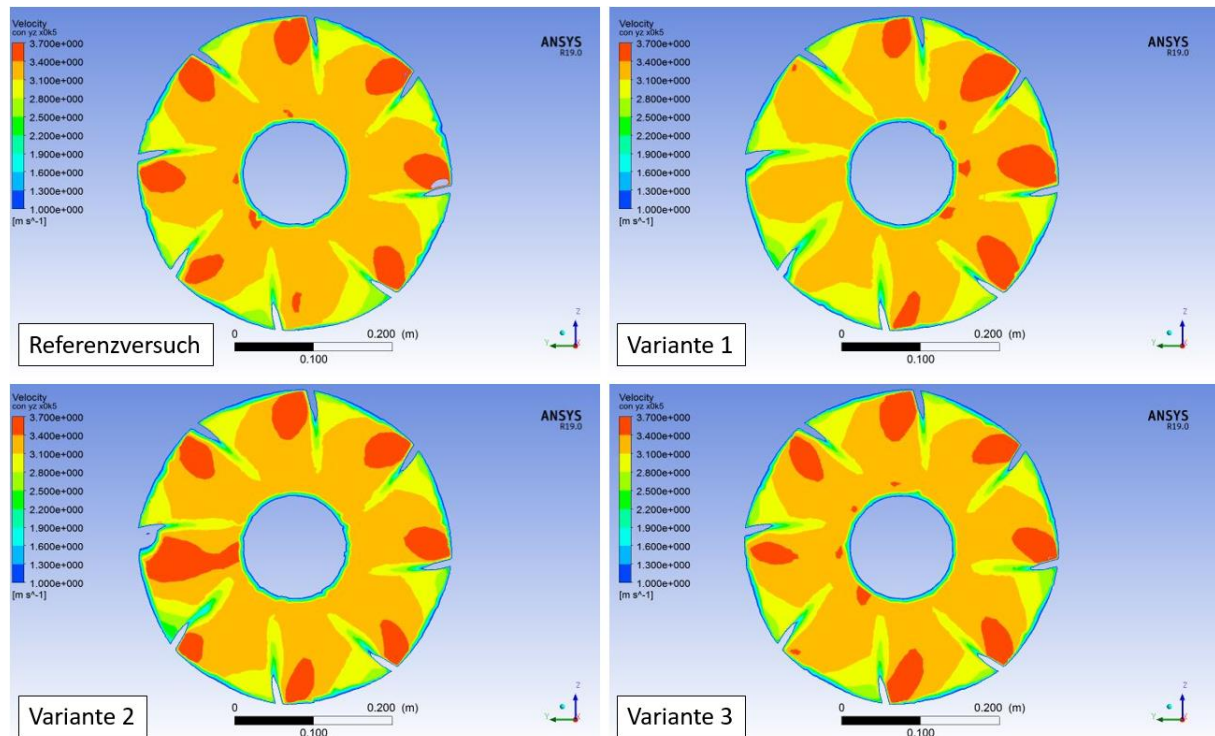


Abbildung 14: Darstellung der Geschwindigkeitsverteilungen im Schnitt durch die Turbine unmittelbar vor den Leitschaufeln für alle untersuchten Varianten, in Fließrichtung betrachtet

Weiterführende Untersuchungen mit Einbauten von Fischschutz- bzw. Fischleiteinrichtungen im Turbinenversuchsstand, sowohl im physikalischen Modell als auch in der Numerik, wurden aufgrund des zu erwarteten, geringen Einflusses dieser Strukturen auf die Strömungsverhältnisse und der damit verbundenen, geringen Aussagekraft der Ergebnisse nicht durchgeführt.

5.5 Untersuchungen der Fischpassage durch die StreamDiver-Kompakturbine

5.5.1 Numerische Modellierung des Fischdurchgangs am Beispiel des Fließgewässerkraftwerks an der Unteren Salzach

Aufbauend auf den hydraulischen und fischbiologischen Daten des an der Unteren Salzach geplanten Fließgewässerkraftwerks (erster typischer Standort) wurde unter Anwendung der neuartigen BioPa-Methode die Wahrscheinlichkeit der Fischmortalität bei der Passage durch die StreamDiver-Kompakturbinen ermittelt. Untersucht wurden hierbei die maßgebenden Ursachen für Fischschäden bei der Turbinenpassage, Stressoren genannt, welche sich aus der Kollision mit den rotierenden Laufschaufeln, dem Barotrauma durch starke Druckänderungen sowie Scherkräfte, ausgelöst durch Sekundärströmungen, zusammensetzen (Richmond et al., 2014).

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Abbildung 15 zeigt den Einfluss der einzelnen Stressoren auf Fische mit einer Länge von 10 cm. Die Kollision mit den rotierenden Laufschaufeln stellt hierbei das dominante Phänomen für Fischmortalitäten bei den definierten Turbinen dar. Das potenzielle Risiko für Schädigungen durch Kollision ist stark abhängig von der Turbinengröße und der Drehzahl (Ebel, 2013). Dies erklärt die Unterschiede zwischen den beiden StreamDiver-Modellen SD14.90 und SD16.95. Die Wahl einer größeren Turbine mit einer geringeren Drehzahl führt somit zu einer höheren Überlebenswahrscheinlichkeit. Das durch die Druckänderung verursachte Barotrauma und die Scherkräfte haben dagegen mit ungefähr 1% bzw. 2% bei beiden Maschinengrößen einen deutlich untergeordneten Einfluss auf die Mortalitätsraten. Aufgrund der niedrigen Fallhöhen beim Fließgewässerkraftwerk, sowie bei Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen im Allgemeinen, ist der Einfluss der Druckänderung demzufolge als nebensächlich einzustufen. Durch die niedrigen Scherraten der StreamDiver-Turbinen werden auch die Scherkräfte nicht maßgebend.

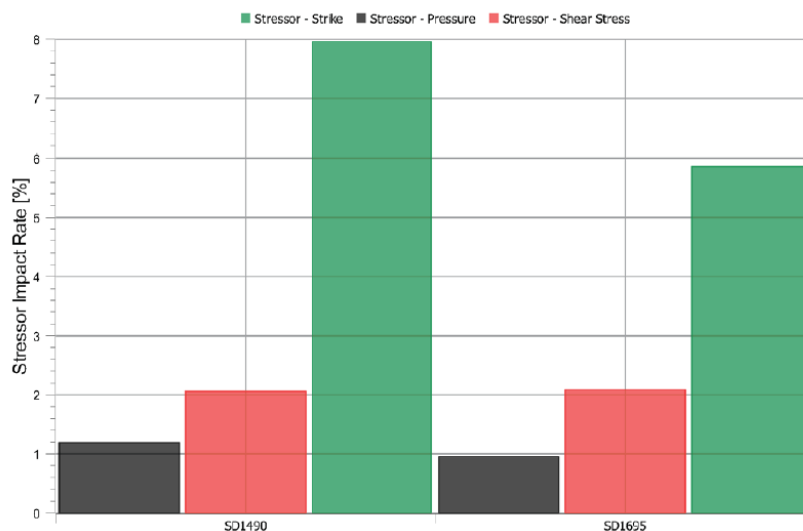


Abbildung 15: Einfluss der Stressoren Kollision (Strike), Barotrauma (Pressure) und Scherkräfte (Shear Stress) auf Fische mit einer Länge von 10 cm bei der Passage durch die StreamDiver-Turbinen SD14.90 und SD16.95 ohne Berücksichtigung weiterer Fischschutzmaßnahmen, ermittelt mit der BioPA-Methode

Zur Berücksichtigung der verschiedenen Lebensstadien wurde die Fischgröße variiert, um den Einfluss dieses Parameters zu untersuchen. Die Überlebenswahrscheinlichkeit bei Kollision nimmt mit der Fischgröße in etwa linear ab: Während bei einer Fischlänge von 10 cm die Mortalität mit 8% bei der SD14.90 bzw. 6% bei der SD16.95 abgeschätzt werden kann (Abbildung 15), sind es bei einer Fischlänge von 45 cm bereits 36% bei der SD14.90 bzw. 27% bei der SD16.95. Da die Baugrößen der Turbinen oft limitiert sind und die Drehzahl zur Erreichung einer wirtschaftlichen Energiedichte nicht unbegrenzt reduziert werden kann, ist in diesem Zusammenhang die Errichtung von Fischschutz- bzw. Fischleiteneinrichtungen an Wasserkraftanlagen von erheblicher Relevanz. In Abhängigkeit der Stababstände bei mechanischen Barrieren führen diese dazu, dass lediglich ein geringer Anteil der Fische zu den Turbinen gelangt, welcher vorwiegend eine geringe Fischlänge

aufweist (BMNT, 2019a). Kleine Fischlängen sind somit maßgebend für die Mortalitätsraten an den Turbinen. Dadurch bestätigt sich, dass die untersuchten StreamDiver-Kompaktturbinen in Kombination mit wirksamen Fischschutz- bzw. Fischleiteinrichtungen, welche die Turbinenpassage für Fische deutlich verringern und ein sicheres Absteigen über den Bypass ermöglichen, sehr hohe Überlebensraten bei Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen erzielen können. Die Kombination dieser Maßnahmen eröffnet folglich die Möglichkeit, bei geringem Eingriff in die Flussökologie umweltfreundliche, CO₂-neutrale Energie zu erzeugen.

5.5.2 Untersuchung der Mortalitätsraten im Turbinenversuchsstand mithilfe von Dummys

Im Turbinenversuchsstand wurden zur Abschätzung der Mortalitätsraten sowie zur Beurteilung einer möglichen Übertragbarkeit der Ergebnisse auf lebende Fische Versuche mit Dummys durchgeführt. Hierfür wurden 60 Essiggurken zweier verschiedener Sorten (Delikatessgurken mit einer durchschnittlichen Länge von 8,6 cm und Cornichons mit durchschnittlich 6,1 cm) verwendet.

Die Auswertung der Versuche zeigte, dass 40% der Cornichons und 57% der Delikatessgurken nach der Turbinenpassage die charakteristische Schädigung durch Kollision mit den Laufschaufeln aufwiesen (Abbildung 16). Die deutlich abweichenden Schädigungsraten sind auf die unterschiedlichen Längen der Dummys zurückzuführen und unabhängig von der variierten Besatzstelle.



Abbildung 16: Essiggurken vor (links) bzw. nach (rechts) der Turbinenpassage im Versuchsstand

Zur Überprüfung sowie Plausibilisierung wurden die Ergebnisse mit den Auswertungen der BioPA-Methode verglichen. Hierbei wurde eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung beobachtet. Eine Übertragung auf lebende Fische erscheint somit als zulässig. Zudem wurden die Schädigungsraten jenen der gängigsten empirischen Formelwerken gegenübergestellt und teils große Unterschiede festgestellt. Der Hintergrund hierfür ist, dass einige maßgebende Parameter nicht hochskaliert werden können (z.B. die Drehzahl). Weitere Unsicherheiten ergeben sich durch die Strömungsverhältnisse an der Turbine im Vergleich mit der Großausführung sowie bei der Repräsentativität sowohl der durchgeführten Modellversuche mit 60 Essiggurken als auch der empirischen Formeln, welche zum Teil für

bestimmte Fischarten optimiert sind. Daraus lässt sich schließen, dass mit dem Prototyp im Maßstab 1:4 keine generelle Aussage über die Mortalitätsrate für die Großausführung getroffen werden kann. Die prinzipielle Eignung von Essiggurken als Dummies bei Mortalitätsuntersuchungen für Turbinen konnte bestätigt werden, u.a. zur Darstellung von Fischen des juvenilen Altersstadiums. Die Vergleichbarkeit der Untersuchungen mit Lebendfischversuchen muss in Zukunft jedoch noch mit der Sensitivität verschiedener Spezies bezüglich der Verletzungen durch Kollisionen überprüft werden. Unter anderem können eventuelle Einflüsse durch Fischbewegungen mit dieser Methode nicht erfasst werden.

5.6 Kostenanalyse

Die Ergebnisse der Kostenanalyse für Fischschutz- bzw. Fischleitrechen zeigten, dass deren spezifische Kosten bei den zwölf untersuchten Anlagen wesentlich voneinander abweichen und je nach betrachteter Rechenkonfiguration zwischen 750 und 3.000 € pro m² Rechenfläche variieren. Verglichen mit den Gesamtkosten der untersuchten Wasserkraftanlagen beträgt deren Anteil in etwa zwischen 0,5 und 2,0% der Investitionskosten. Zudem standen für einige Anlagen auch die Gesamtkosten der Rechenreinigungsmaschinen zur Verfügung, deren Anteil an den Investitionskosten ungefähr im gleichen Bereich liegt, wie jener der Rechen.

Da für die Fischschutz- bzw. Fischabstiegsanlagen (Rechen, Rechenreinigung, Bypass, etc.) keine Datengrundlagen zur Ermittlung typischer Kosten vorlagen, wurde diese mithilfe der Kostenansätze aus dem *Durchgängigkeitskonzept Saale* (TLUG, 2015) abgeschätzt und mit den Gesamtkosten der Wasserkraftanlagen verglichen. Hierbei zeigte sich, dass der Großteil der untersuchten Fischschutz- bzw. Fischleitkonzepte einen Anteil von in etwa 8% der gesamten Investitionskosten beim Neubau sowie bei der Nachrüstung von Wasserkraftanlagen ausmacht. Die Kosten von nachträglich errichteten Fischabstiegsanlagen liegen prinzipiell über jenen von Neubauten (siehe auch Tabelle 1), markante Änderungen der Anteile an den gesamten Investitionskosten treten jedoch nicht auf.

6 Diskussion

Im Rahmen des von der FFG geförderten Forschungsprojektes *FINI* wurden verschiedenste Aspekte rund um den Fischschutz und die Anströmung an Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen unter Verwendung aktueller Methoden untersucht. Durch die Verknüpfung aller Teilergebnisse wurden wesentliche Grundlagen des wirkungsvollen Fischschutzes und der effektiven Fischleitwirkung abgeleitet und günstige Bauweisen für die Nachrüstung von Bestandsanlagen sowie generell für Neubauten empfohlen. Eine individuelle Planung, angepasst an die projekt- und standortspezifischen Gegebenheiten, können diese dennoch nicht ersetzen.

Als konkrete Kraftwerksanordnung wurde das geplante Fließgewässerkraftwerk an der Unteren Salzach bei Flusskilometer 39,9 modelliert, simuliert und ausgewertet. Aufbauend auf den umfassenden Erhalt der Fließgewässercharakteristika bezogen sowohl auf den Fischschutz als auch auf die geschieberelevanten Prozesse stellt dieses ein ausgereiftes Konzept einer ökologisch vertretbaren Wasserkraftanlage dar. Daneben wurden weitere, fiktive Kraftwerksanordnungen an Standorten in voralpinen und alpinen Flüssen im österreichischen Einzugsgebiet der Donau untersucht.

Detailuntersuchungen der Fischschutzrechen lieferten aussagekräftige Grundlagen zum Strömungsverhalten der jeweiligen Rechenkonfigurationen. Darüber hinaus konnten die hydraulischen Verlusthöhen größtenteils im befriedigenden Ausmaß nachgebildet und die in Abhängigkeit der betrachteten Rechenkonfiguration potenzielle Eignung von numerischen Simulationen als Ersatz von bzw. als Ergänzung zu physikalischen Modellversuchen bestätigt werden.

Auf Basis der Ergebnisse von Versuchsdurchführungen im Turbinenversuchsstand mit massiven Einbauten unmittelbar vor dem voll funktionsfähigen Prototyp einer StreamDiver-Kompakturbine zur möglichst weitreichenden Beeinflussung der Strömungsbedingungen zeigte sich, dass dieser Turbinentyp sehr robust auf verschiedene Anströmungsverhältnisse reagiert. Somit lässt sich davon ausgehen, dass Fischschutz- bzw. Fischleiteneinrichtungen keinen bzw. einen vernachlässigbar geringen Effekt auf das Strömungsverhalten im Nahbereich der Turbinen haben, selbst wenn diese unmittelbar vor den Turbinen verbaut werden. Die hydraulischen Verlusthöhen, ausgelöst durch solche Strukturen, führen jedoch bei Anlagen mit niedrigen Fallhöhen hinsichtlich der energiewirtschaftlichen Betrachtung zu empfindlichen Einbußen. In diesem Zusammenhang vereinen hybride Barrieren effektive Fischschutz- bzw. Fischleitkonzepte mit niedrigen hydraulischen Verlusthöhen durch den geringen Verbauungsgrad dieser Systeme.

Die potenziellen Auswirkungen der Fischpassage durch StreamDiver-Kompaktturbinen wurden am Beispiel des Fließgewässerkraftwerks an der Unteren Salzach unter Anwendung der BioPA-Methode evaluiert. Dabei zeigte sich, dass bei Anlagen mit niedrigen Fallhöhen die maßgebende Ursache für Fischschäden die Kollision mit den Laufschaufeln ist. Diese kann, bedingt durch die geringe Größe und die vergleichsweise hohe Drehzahl dieser Turbinen, für größere Fische relativ hoch ausfallen. Durch die Anordnung von wirksamen Fischschutz- bzw. Fischleiteneinrichtungen können jedoch sehr geringe Schädigungsraten von absteigenden Fischen am Kraftwerk erreicht werden.

7 Ausblick und Empfehlungen

Die Anströmungsuntersuchungen der Fischschutz- bzw. Fischleitstrukturen im Forschungsprojekt *FINI* zeigten das fortlaufend steigende Potenzial von 3D-numerischen Simulationen als Planungsinstrument bei der Nachrüstung von Bestandsanlagen sowie bei der Neuerrichtung von Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen auf. Neuartige Methoden, wie die im Forschungsprojekt angewandte BioPA-Methode, aber auch aktuelle

technische Entwicklungen, wie die ölfrei betriebenen StreamDiver-Kompaktturbinen der Firma Voith Hydro, führen zu immer effizienteren und ökologisch vertretbaren Wasserkraftanlagen. Dennoch besteht weiterhin Forschungsbedarf hinsichtlich des Erhalts bzw. der Wiederherstellung der flussauf- und flussabwärts gerichteten Durchgängigkeit von Fließgewässern. Das große Ziel der Zukunft muss es sein, ganzheitliche Konzepte von Wasserkraftanlagen zu entwerfen, welche den Grundstein des umweltfreundlichen Ausbaus der Wasserkraft bilden können. Ein Beispiel für ein solches Konzept stellt das Fließgewässerkraftwerk an der Unteren Salzach bei Flusskilometer 39,9 dar, dessen Umsetzung in der Praxis gegenwärtig vorbereitet wird. Nach erfolgtem Bau sollte das Projekt von einem umfangreichen Monitoring-Programm begleitet werden, um die erwarteten Ziele hinsichtlich des Fischschutzes, dem Erhalt der Durchgängigkeit sowie der Energieeffizienz zu evaluieren. Hieraus können wesentliche Betriebserfahrungen gesammelt und weiterführende Empfehlungen für Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen abgeleitet werden.

8 Anerkennung/Danksagung

Die CFD-Simulationen im Forschungsprojekt *FINI* wurden zum Großteil mit der LEO HPC-Infrastruktur der Universität Innsbruck durchgeführt.

9 Literaturverzeichnis

- Aufleger, M.; Brinkmeier, B. (2015): Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen – Verschiedene Konzepte im kritischen Vergleich. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 67 (7-8), S. 281-291, Springer-Verlag Wien.
- Berger, C. (2018): *Rechenverluste und Auslegung von (elektrifizierten) Schrägrechen anhand ethohydraulischer Studien*. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt.
- BMLFUW (2012): *Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- BMLFUW (2017): *Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2015*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- BMNT (2018): *Energie in Österreich 2018. Zahlen, Daten, Fakten*. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.
- BMNT (2019a): *Fischschutz und Fischabstieg in Österreich – Endbericht*. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.
- BMNT (2019b): *Leitfaden zur Erhebung der Biologischen Qualitätselemente. Teil A1 – Fische*. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.
- Böttcher, H.; Gabl, R.; Aufleger, M. (2019): Experimental Hydraulic Investigation of Angled Fish Protection Systems – Comparison of Circular Bars and Cables. In: *Water* 2019, 11, 1056.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Brinkmeier, B. (2012): Wasserkraftnutzung an ökologisch sensiblen und erosionsbedingt sanierungsbedürftigen Standorten. Das Konzept des Fließgewässerkraftwerkes. Forum Umwelttechnik und Wasserbau, Band 16, Innsbruck university press (iup), Innsbruck.
- Brinkmeier, B.; Böttcher, H.; Tutzer, R.; Aufleger, M. (2017): Fish Protection using Electric Flexible Fish Fences. In: *Proceedings of 2017 HYDRO*, Sevilla.
- DeBolt, D.; Richmond, M.C.; Donelson R.K.; Strickler, B.; Weisbeck, M. (2015): Development of the priest rapids turbine upgrade project. In: *HydroVision 2015, July 14-17 2015, Portland, Oregon*. Portland.
- Ebel, G. (2013): *Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen - Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung*. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie, Bd. 4, Haale.
- Ebel, G. (2014): Modellierung der Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten – Zielgrößen für die hydraulische Bemessung von Fischschutzsystemen. In: *WasserWirtschaft 104*, Heft 7-8, S. 40-47.
- Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union (2000): *Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*. Amtsblatt Nr. L 327 vom 22/12/2000 S. 0001 – 0073.
- Habersack, H.; Hengl, M.; Knoblauch, H.; Reichel, G; Rutschmann, P.; Sackl, B.; Tritthart, M. (2007): Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik: *Grundlagen, Anwendung und Modelle für die Praxis*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Haunschmid, R.; Wolfram, G.; Spindler, T.; Honsig-Erlenburg, W.; Wimmer, R.; Jagsch, A.; Kainz, E.; Hehenwarter, K.; Wagner, B.; Konecny, R.; Riedmüller, R.; Ibel, G.; Sasano, B.; Schotzko, N. (2006): *Erstellung einer fischbasierten Typologie österreichischer Fließgewässer sowie einer Bewertungsmethode des fischökologischen Zustandes gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie*. Schriftenreihe des BAW, Band 23, Wien.
- Innerhofer, D.; Lochschmidt, J.; Lampl, J.; Wührer, R.; Brinkmeier, B.; Aufleger, M. (2015): Anströmung von Kompaktturbinen. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 67 (7-8)*, S. 307-314, Springer-Verlag Wien.
- Meusburger, H. (2002): *Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken*. Mitteilungen Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Heft 179.
- Richmond, M.C.; Serkowski, J.A.; Ebner, L.L.; Sick, M.; Brown, R.S.; Carlson T.J. (2014): Quantifying barotrauma risk to juvenile fish during hydro-turbine passage. In: *Fisheries Reserach 154*, S.152-164.
- Schneider, J.; Hübner, D.; Korte, E. (2012): *Funktionskontrolle der Fischaufstiegs- und Fischabstiegshilfen sowie Erfassung der Mortalität bei Turbinendurchgang an der Wasserkraftanlage Kostheim am Main*. Final report, Bürogemeinschaft für Fisch-& Gewässerökologische Studien, Frankfurt am Main.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

TLUG (2015): *Durchgängigkeitskonzept für die Mittlere Saale in Thüringen - „Durchgängigkeitskonzept Saale“*. Schlussbericht. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Breitenbach.

Tutzer, R.; Brinkmeier, B.; Böttcher, H.; Aufleger, M. (2019): Der Elektro-Seilrechen als integrales Fischschutzkonzept. In: *WasserWirtschaft 109 (2-3)*, S. 36-40.

10 Kontaktdaten

Markus Aufleger, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.

Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Wasserbau

Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck – Österreich

t: +43 512 507 62201

f: +43 512 507 62199

m: wasserbau@uibk.ac.at

<https://www.uibk.ac.at/wasserbau/>

<https://www.uibk.ac.at/wasserbau/forschung/fini/index.html.de>

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. Kooperationspartner:

- Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement
- Voith Hydro GmbH & Co. KG
- VERBUND Hydro Power GmbH
- Grenzkraftwerke GmbH