Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 111 (2019)

Heft: 1

Artikel: Konzeptionelle Standortanalyse von Fischleitrechen mit Hilfe numerischer 3-D-Simulationen

Autor: Feigenwinter, Linus / Vetsch, David / Kammerer, Stephan

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-946157

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Konzeptionelle Standortanalyse von Fischleitrechen mit Hilfe numerischer 3-D-Simulationen

Linus Feigenwinter, David Vetsch, Stephan Kammerer, Carl Robert Kriewitz, Robert Boes

Zusammenfassung

Das revidierte Gewässerschutzgesetz von 2011 hat unter anderem die Wiederherstellung der Fischgängigkeit an Querbauwerken wie z. B. Wasserkraftanlagen zum Ziel. Während für den Fischaufstieg bereits funktionierende Massnahmen entwickelt und angewandt wurden, konzentrieren sich aktuelle Forschungsprojekte vermehrt auf Fischabstiegshilfen. Nach heutigem Wissensstand wird insbesondere horizontalen und vertikalen Fischleitrechen ein hohes Potenzial zugeschrieben. Deshalb wird in diesem Artikel ein Konzept für die optimale Standortwahl von Fischleitrechen mit Hilfe numerischer Simulationen vorgestellt. Das Schema basiert auf drei Schwerpunkten, namentlich der Fischbiologie, den baulichen Rahmenbedingungen und den hydraulischen Verhältnissen. Letztere können mittels hydrodynamischer 3-D-Simulationen ermittelt und anschliessend für potenzielle Standorte ausgewertet werden. Unter Berücksichtigung fischbiologischer Grundlagen kann eine Bewertung der Strömungsbedingungen durchgeführt und somit die Eignung der Standorte beurteilt werden. Anhand des Flusskraftwerks in Brügg an der Aare wird die Anwendung des präsentierten Konzeptes veranschaulicht und diskutiert.

1. Einleitung

Durch die Flusskorrektionen im 18. und 19. Jahrhundert wurden vielerorts die Schweizer Flüsse eingedämmt und begradigt, mit den vordergründigen Zielen des Hochwasserschutzes und der Landgewinnung. Dies führte zu negativen Effekten bezüglich der in den Flüssen vorkommenden Flora und Fauna. Um dem entgegenzuwirken, wird heutzutage bei flussbaulichen Massnahmen auch den ökologischen Aspekten eine hohe Bedeutung beigemessen. Dazu gehört unter anderem die Gewährleistung der Längsvernetzung, um das Wanderverhalten von Fischen nicht zu beeinträchtigen. Diese Längsvernetzung wird in den Schweizer Fliessgewässern durch rund 100 000 künstliche Abstürze und Bauwerke mit einer Höhendifferenz von über 50 cm unterbrochen, und insbesondere Flusskraftwerke stellen unüberwindbare Hindernisse für die Fische dar (*BAFU*, 2009). Es sind deshalb bauliche Massnahmen notwendig, um einen ungehinderten Fischauf- und Fischabstieg sicherzustellen. Seit der Revision des Gewässerschutzgesetzes und der Gewässerschutzverordnung von 2011 sind die Finanzierung und Umsetzungsordnung gesetzlich verankert (*GSchG/GSchV*, 2017).

Beim Wanderverhalten verschiedener Fischspezies gibt es grosse Variationen. Die gebräuchlichsten Einteilungen der Fischwanderungen beziehen sich dabei auf die Zielhabitate (z. B. Nahrungswanderung oder Laichwanderung) und die durchwanderten Lebensraumtypen. Bei der letzteren Klassifizierung wird zwischen potamodromen und diadromen Fischarten unterschieden. Potamodrome Spezies (z. B. Barbe, Nase) wandern ausschliesslich im Süsswasser, während diadrome Fischarten zwischen Süss- und Salzgewässer migrieren. Diadrome Arten werden weiter unterteilt in anadrome und katadrome Spezies. Anadrome Fischarten (z. B. Lachs) leben im Meer, steigen für die Fortpflanzung jedoch in Süssgewässer auf, während es sich bei den katadromen Spezies (z. B. Aal) umgekehrt verhält. Auch die Wanderdistanz weist eine grosse Bandbreite auf und reicht von wenigen Kilometern der Kurzdistanz- (z. B. Äsche) bis zu über 1000 km der Langdistanzwanderer (z. B. Lachs, Stör, Aal) (*Ebel*, 2013). Diese verschiedenen Migrationsmuster müssen bei der Dimensionierung von Fischwanderhilfen berücksichtigt werden, um deren Wirksamkeit sicherzustellen.

Für die flussaufwärtsgerichtete Fischmigration wurde früher mit der Massnahmenentwicklung begonnen als für die flussabwärtsgerichtete, weshalb heutzutage eine relativ gute Wissensbasis bezüglich Fischaufstiegsanlagen existiert. Bei den Fischabstiegshilfen ist we-

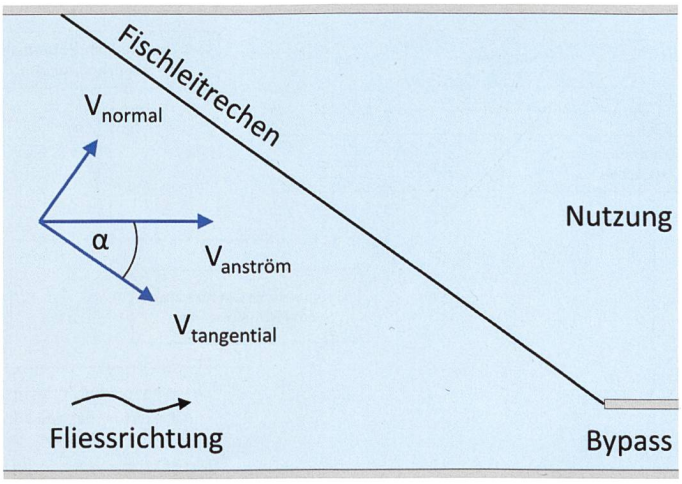


Bild 1. Anordnung eines Leitrechensystems mit Schräganströmung (charakterisiert durch den Anströmwinkel α) und dazugehörigen Geschwindigkeitsvektoren.

niger Erfahrung vorhanden, vor allem was das Verhalten der Fische beim Abstieg an grossen Wasserkraftanlagen betrifft (*Spillmann* & *Walter*, 2017). Gemäss *Kriewitz* (2015) und *Kriewitz et al.* (2015) lassen sich Fischabstiegsmassnahmen in die zwei Ansätze «Abschirmen und Umleiten» sowie «Durchleiten» unterscheiden. Insbesondere den dem Ansatz «Abschirmen und Umleiten» zugeordneten Fischleitrechen wird einiges Potenzial für eine erfolgreiche Fischabwanderung zugesprochen.

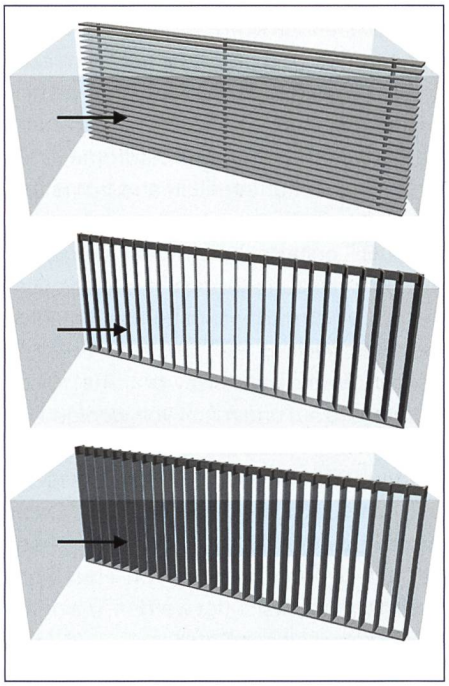


Bild 2. Beispielgeometrie eines Horizontalrechens (oben), Louvers (Mitte) sowie klassischen Bar Racks (unten) mit Schräganströmung. Die schwarzen Pfeile repräsentieren den Anströmvektor.

Für deren Auslegung müssen die hydraulischen Verhältnisse im Anströmbereich der Kraftwerke bekannt sein. Diese können einerseits mit Hilfe von Feldmessungen erhoben werden. Andererseits ist es dank der heute zur Verfügung stehenden Computerleistung möglich, die Strömungsbedingungen mit Hilfe numerischer Modelle zu simulieren.

2. Fischleitrechen

Fischleitrechen basieren auf dem Prinzip, die Fische entlang der Rechenachse in einen alternativen Abwanderungskorridor (Bypass) zu führen. Um dies zu erreichen, werden die Rechen in einem horizontalen Winkel zur Anströmrichtung angeordnet, welcher meist $\alpha < 45°$ beträgt *(Bild 1)*. Eine gute Leitwirkung ist zu erwarten, wenn die Tangentialgeschwindigkeiten entlang des Rechens grösser sind als die senkrecht auf den Rechen wirkenden Normalgeschwindigkeiten. Die Rechen können mit horizontal oder vertikal ausgerichteten Stabelementen ausgeführt werden. Horizontalrechen weisen meist Stababstände zwischen 10 und 20 mm auf und sind für eine grosse Zahl von Fischen nicht passierbar *(Bild 2)*. Deshalb werden sie zu den physischen Barrieren gezählt. Zu den bekanntesten Vertikalrechen zählen Louver und Bar-Racks, welche zu den mechanischen Verhaltensbarrieren gehören (*Kriewitz*, 2015; *Kriewitz et al.*, 2015; *Boes et al.*, 2016). Beim Louver sind die Rechenstäbe normal zur Hauptströmung angeordnet, bei klassischen Bar-Racks sind diese orthogonal zur Rechenachse ausgerichtet *(Bild 2)*. Daneben gibt es Weiterentwicklungen des Bar-Racks mit Rechenstäben, die nicht orthogonal zur Rechenachse angeordnet sind und rechteckige (Modified-Bar-Rack, MBR, *Kriewitz et al.*, 2015) bzw. gekrümmte Stabquerschnittsformen (Modified-Curved-Bar-Rack, MCR; *Beck et al.*, 2019) aufweisen. Die Fischleitwirkung wird bei mechanischen Verhaltensbarrieren durch zwei Mechanismen erreicht:

- Ein zentraler Aspekt sind die von den Rechenstäben verursachten hydraulischen Strömungsveränderungen. Zu nennen sind hier insbesondere die Strömungsablösungen entlang der Rechenkanten, welche bei Fischen eine Vermeidungsreaktion auslösen. Diese turbulenten Strukturen führen dazu, dass nur wenige Fische den Rechen durchschwimmen (*Kriewitz*, 2015). Die Vermeidungsreaktion nimmt jedoch mit zunehmendem Stababstand ab (*Ebel*, 2013). Tatsächlich konnten in ethohydraulischen Versuchen zwei fischartenspezifische Reaktionsmuster beobachtet werden. Einige Arten wie z. B. Barben, Bachforellen und Aale zeigen ein investigatives und strukturliebendes Verhalten und meiden den Rechenkontakt nicht. Anders verhalten sich z. B. Äschen und Schneider, welche strukturmeidend sind und den Rechen nur in Ausnahmesituationen berühren.
- Der zweite Aspekt der hydraulischen Wirkung wird als Leitströmung (engl.: *sweeping flow*) bezeichnet. Es handelt sich um eine rechenparallele Strömungskomponente, die die Fische aktiv in Richtung Bypass verdriftet.

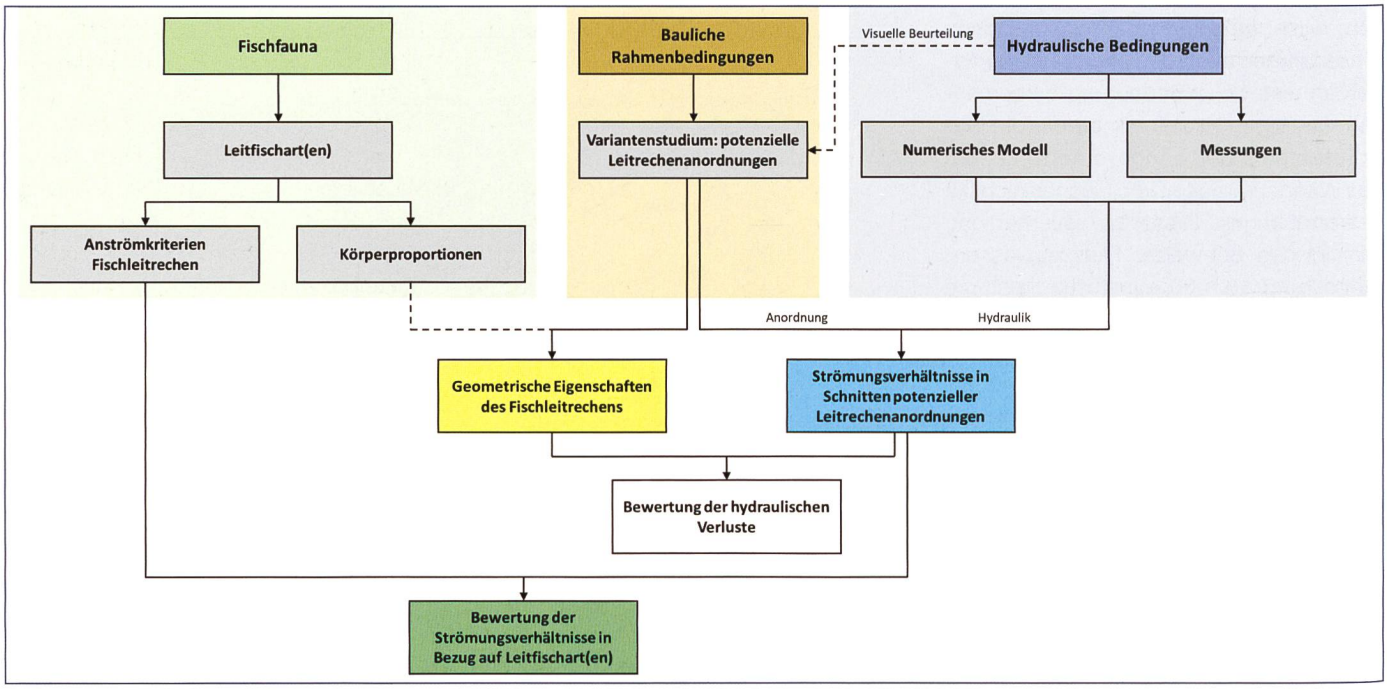


Bild 3. Konzept zur Standortevaluierung von potenziellen Fischabstiegshilfen.

Der Stababstand bei Vertikalrechen beträgt meist 5 cm oder mehr, was im Vergleich zu den Horizontalrechen einen einfacheren Unterhalt bedeutet, da ein Teil des Geschwemmsels und Geschiebes durch den Rechen abgeführt werden kann. Dieser Vorteil macht sie für den Einsatz an grossen Kraftwerken denkbar, da hier aufgrund der grossen Rechenlänge die Reinigung von Feinrechen aktuell technisch äusserst aufwendig ist (*Kriewitz*, 2015; *Boes et al.*, 2016).

3. Konzept für die Standortevaluierung von Fischleitrechen

Das entwickelte Konzept *(Bild 3)* basiert auf den drei Schwerpunkten Fischfauna, bauliche Rahmenbedingungen und hydraulische Gegebenheiten.

Fischfauna

In einem ersten Schritt müssen die biologischen Aspekte der vorkommenden Fischfauna untersucht werden (Artenvielfalt, Lebensräume, Wanderverhalten, Fliessgewässerzone usw.). Basierend auf diesen Grundlagen, werden die für die Dimensionierung des Leitrechens massgebenden Leitfischarten definiert. Für diese Spezies müssen anschliessend die fischbiologischen Grundlagen ermittelt werden, welche die zulässige Anströmgeschwindigkeit des Rechens sowie die Körperproportionen der Leitfischarten beinhalten.

Bauliche Rahmenbedingungen

Die zweite Stütze des Konzeptes stellt die Anlage und die damit verbundenen baulichen Rahmenbedingungen dar. In einem Variantenstudium können mögliche Anordnungen von Abstiegshilfen bezüglich der Realisierbarkeit, der Kosten sowie der benötigten baulichen Massnahmen untersucht und gegebenenfalls bereits ausgeschlossen werden.

Hydraulische Bedingungen

Der dritte Schwerpunkt des Konzeptes beinhaltet die hydraulischen Bedingungen im Zuströmbereich des Kraftwerks. Diese können mittels numerischer Modelle ermittelt oder durch Feldmessungen erhoben werden. Mit Hilfe einer visuellen Beurteilung der Strömungsverhältnisse können unter Umständen strömungstechnisch ungünstige Varianten bereits identifiziert und aus dem Variantenstudium ausgeschlossen werden.

In einem nächsten Schritt werden die gemessenen oder simulierten hydraulischen Bedingungen für die im Variantenstudium definierten, potenziellen Standorte ausgewertet. Bei Fischleitrechen mit horizontaler Schräganströmung sind die parallel zum Rechen wirkenden Tangential- sowie die senkrecht auf den Rechen gerichteten Normalgeschwindigkeiten von Interesse. Bei quer angeströmten Rechen wird die darauffolgende Bewertung aufgrund der Anströmgeschwindigkeit durchgeführt.

Mit Hilfe der leitfischartspezifischen zulässigen Anströmgeschwindigkeit des Rechens werden anschliessend die ermittelten Strömungsverhältnisse und somit die Eignung des Standortes beurteilt. Nach der Ermittlung eines geeigneten Standortes können die geometrischen Eigenschaften des Fischleitrechens festgelegt werden. Bei physisch weitgehend undurchlässigen Barrieren muss die lichte Stabweite in Bezug auf die Körperproportionen der Leitfischarten definiert werden, bei durchlässigen Rechen ist die negative Korrelation zwischen lichter Stabweite und Schutzwirkung zu beachten (*Ebel*, 2013). Die Wahl der Rechengeometrie sollte zudem konstruktive Aspekte wie Stabilität und Schwingungsarmut des Rechens und die Installation der Rechenreinigungsanlage berücksichtigen.

In einem letzten Schritt können die durch den Fischleitrechen verursachten hydraulischen Verluste abgeschätzt werden. Bei Wasserkraftanlagen sollten diese minimiert werden, um die Einbussen der Stromproduktion so gering wie möglich zu halten. Im Folgenden werden einzelne Aspekte des Konzeptes ausführlicher erläutert.

3.1 Fischbiologische Grundlagen

Bei den fischbiologischen Grundlagen stehen die Körperproportionen sowie die Schwimmleistungen der definierten Leitfischarten im Vordergrund. Die Körperproportionen von Fischen lassen sich durch die relative Körperbreite $b_{Fisch,rel}$, die relative Körperhöhe $h_{Fisch,rel}$ und den Proportionsindex G beschreiben. Die relative Körperhöhe und -breite sind als Verhältnis zwischen der maximalen Breite $b_{Fisch,max}$, respektive maximalen Körperhöhe $h_{Fisch,max}$ und der Totallänge L des Fisches definiert (*Ebel*, 2013):

$$b_{Fisch,rel} = \frac{b_{Fisch,max}}{L} \quad (1)$$

$$h_{Fisch,rel} = \frac{h_{Fisch,max}}{L} \quad (2)$$

$$G = \frac{h_{Fisch,rel}}{b_{Fisch,rel}} \quad (3)$$

Für Fische mit einem Proportionsindex $G > 1$ kann die kritische Körperlänge L_{krit} für die physische Passierbarkeit eines Leitrechens in Abhängigkeit der lichten Stabweite s wie folgt ermittelt werden (*Ebel*, 2013):

$$L_{krit} = \frac{s}{b_{Fisch,rel}} \quad (4)$$

Dieses Kriterium ist strikt gültig für vertikal ausgerichtete Stäbe. Bei Horizontalrechen ist für Fische mit einem Proportionsindex $G > 1$ und gleicher Stabweite eine höhere Schutzwirkung zu erwarten, da aktuelle Untersuchungen darauf hinweisen, dass Fische ihre natürliche Körperausrichtung nur bedingt ändern und die Barriere entsprechend selten in Seitenlage passieren (*Schmalz*, 2010). Da aber noch keine allgemein gültigen Verhaltensmuster der Fische bekannt sind, wird empfohlen, für Horizontalrechen die gleichen Grundsätze wie für vertikal ausgerichtete Stäbe zu verwenden (*Ebel*, 2013). Gleichung (4) wird bei der Dimensionierung der Rechengeometrie invers angewandt, indem die Stabweite s für eine gegebene kritische Körperlänge L_{krit} definiert wird. Dabei sollte die Körperlänge der Leitfischart während ihres ersten Wanderstadiums im Lebenszyklus als L_{krit} gewählt werden.

Für die Bemessung der Anströmgeschwindigkeiten und -winkel von Fischleitrechen mit horizontaler Schräganströmung wurden diverse Modelle entwickelt wie beispielsweise die Ansätze von *Pakhorukov* u. *Kuragina* (1978, in *Pavlov* 1989), *Pavlov* (1989) oder von *Bates* u. *Vinsonhaler* (1957). Gemäss *Ebel* (2013) besitzt jedoch die Methode von *O'Keeffe* u. *Turnpenny* (2005) die günstigsten Voraussetzungen für einen effektiven Fischschutz. Demnach müssen Fischleitrechen so bemessen werden, dass die Geschwindigkeitskomponente v_{normal} orthogonal zum Rechen die maximale Dauerschwimmgeschwindigkeit v_{opt} des Fisches nicht überschreitet, um Schäden der Fische durch Anpressung an den Rechen zu verhindern:

$$v_{normal} \leq v_{opt} \quad (5)$$

Die Dauerschwimmgeschwindigkeit bezeichnet die Schwimmaktivität, welche ein Fisch über mehrere Stunden (oft wird t = 200 min als Grenzwert definiert) ohne Ermüdung aufrechterhalten kann. Da die Schwimmfähigkeit der Fische mit sinkender Temperatur T abnimmt, wird meist eine Wassertemperatur von 5 °C als Referenzwert verwendet. Für die Abschätzung von

v_{opt} wurde eine Vielzahl von empirischen allgemeinen sowie gildenspezifischen uni- und multivariaten Modellen entwickelt. Einen diesbezüglichen Literaturüberblick bieten die Arbeiten von *Wolter* u. *Arlinghaus* (2003), *Peake* (2008) und *Ebel* (2013). Für eine erste Beurteilung der Dauerschwimmgeschwindigkeit kann das allgemeine multivariate Modell von *Ebel* (2013) angewandt werden:

$$\log(v_{opt}) = 0.513 + 0.7941 * \log(L) - 0.0906 * \log(t) + 0.2921 * \log(T) \quad (6)$$

Es gilt zu beachten, dass dieser Ansatz für Fischspezies mit speziellem Schwimmstil wie Neunaugen, Aale oder Störe nicht anwendbar ist und auf artenspezifische Modelle zurückgegriffen werden muss.

3.2 Numerische Modelle vs. Feldmessungen

Die hydraulischen Bedingungen können, wie bereits erwähnt, mit Hilfe numerischer Modelle oder Feldmessungen ermittelt werden. Der Aufbau eines numerischen Modells ist mit erheblichem Daten- und Zeitaufwand für die Ausarbeitung der Topografie und der Kraftwerksgeometrie verbunden. Bei erfolgreicher Erstellung eines Modells können die hydraulischen Bedingungen jedoch in jedem beliebigen Schnitt und für jeden gewünschten Betriebszustand des Kraftwerks ausgewertet werden. Dies ist der grosse Vorteil gegenüber Feldmessungen, welche für jeden potenziellen Standort bei dem gewünschten Abflussregime durchgeführt und aufgearbeitet werden müssen. Idealerweise werden Feldmessungen und Computermodell kombiniert, indem Letzteres anhand von Ersterem kalibriert bzw. validiert wird. Dank der fortgeschrittenen Computertechnologie ist es heutzutage möglich, auch mit handelsüblichen Computern Strömungsanalysen von grossen Modellperimetern mit Hilfe dreidimensionaler numerischer Simulationen mit angemessenem Zeitaufwand durchzuführen. Durch das Lösen der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen in Kombination mit einem Turbulenzmodell können die realen Strömungsverhältnisse mittels numerischer Simulationen zweckmässig approximiert werden. Ein aktuelles Beispiel stellt die Arbeit von *Fuentes-Perez et al.* (2018) dar, in welcher hohe Übereinstimmungen zwischen gemessenen und simulierten Strömungsbedingungen in einem Vertikalschlitzpass einer Fischaufstiegsanlage erzielt werden konnten.

4. Anwendung des Konzeptes auf das Flusskraftwerk Brügg

Das von der BKW Energie AG betriebene Flusskraftwerk Brügg befindet sich an der Aare rund 2.2 km unterstrom des Bielersees und stellt zusammen mit dem Regulierwehr Port ein zentrales Bauwerk der zweiten Juragewässerkorrektion dar (*Früh* u. *Schudel*, 2013). Es handelt sich um ein Buchtenkraftwerk in Deckelbauweise mit zwei frontal angeströmten, doppelt regulierten Kaplan-Rohrturbinen *(Bild 4)*. Der Ausbaudurchfluss beträgt 220 m^3/s. Bei höheren Abflüssen wird das überschüssige Wasser über das Wehr abgeführt (*BKW*, 2014). Die Anlage in Port/Brügg verfügt bereits über eine Fischaufstiegsanlage in Form eines Schlitzpasses, jedoch ist der Fischabstieg zum heutigen Zeitpunkt nur bei Wehrbetrieb sowie zeitlich begrenzt durch die Schiffsschleuse möglich.

Aufbauend auf dem revidierten Gewässerschutzgesetz (GSchG, 2017), erarbeitete der Kanton Bern ein kantonales Gewässerentwicklungskonzept (GEKOBE). Da die Aare die Kantone Bern, Solothurn und Aargau durchfliesst, wurde für die Sanierungspflichten das Teilprojekt «Interkantonale Planung Aare» ausgearbeitet. Dabei wurde die Sanierungspflicht der Fischgängigkeit der Anlage Port/Brügg mit der Priorisierung «sehr hoch» bewertet, sowohl für den Fischauf- als auch den Fischabstieg. Aufgrund dieser Priorisierung sind Sanierungsmassnahmen bis 2020 durchzuführen (*BVE et al.*, 2014).

Durch die Bemühungen, im Rhein wieder eine selbsterhaltende Lachspopulation anzusiedeln, wird diese Fischart längerfristig auch im Aaresystem erwartet. Deshalb wurden der Lachs (*Salmo salar*) und die Barbe (*Barbus barbus*) als Leitfischarten für die Dimensionierung von Fischwanderhilfen entlang der Aare definiert. Die kritische Körperlänge L_{krit} dieser Arten beträgt 10–20 cm, die relative Körperbreite $b_{Fisch,rel}$ 0.10 für den Lachs und 0.11 für die Barbe (*Ebel*, 2013). Bei einem Horizontalrechen bedingt dies eine lichte Stabweite zwischen s = 1.0 und 2.2 cm. Da die Proportionsindizes des Lachses (G = 1.80) und der Barbe (G = 1.55) über 1 liegen, ist bei horizontalen Stäben mit einer hohen Schutzwirkung zu rechnen. Die Dauerschwimmgeschwindigkeiten liegen je nach Wahl der Schwimmdauer (t = 100–200 min) und der Wassertemperatur (T = 5–10 °C) zwischen v_{opt} = 0.4 und 0.8 m/s.

4.1 Variantenstudium

Basierend auf den bereits durchgeführten Variantenstudien von *Höttges* u. *Sausen* (2016) sowie der *BKW* (2016), wurden vier potenzielle Anordnungen für einen Fischleitrechen definiert *(Bild 5)*. Die Variante V1* stellt eine Optimierung von V1 dar, indem der Leitrechen vor der linken Turbine bis unterstrom des Ausstiegs der Fischaufstiegsanlage führt.

Nebst den hydraulischen Bedingungen sollten die verschiedenen Standorte auch bezüglich weiterer Vor- und Nachteile beurteilt werden. Die Varianten V1, V1* und V2 weisen die Möglichkeit auf, dass der Brückenpfeiler im Falle einer positiven statischen Prüfung als Auflager für den Rechen verwendet werden kann. Jedoch erschwert der Pfeiler die Auslegung der Rechenreinigungsanlage. Die Rechenlängen betragen ca. 36 m für V1 und V2

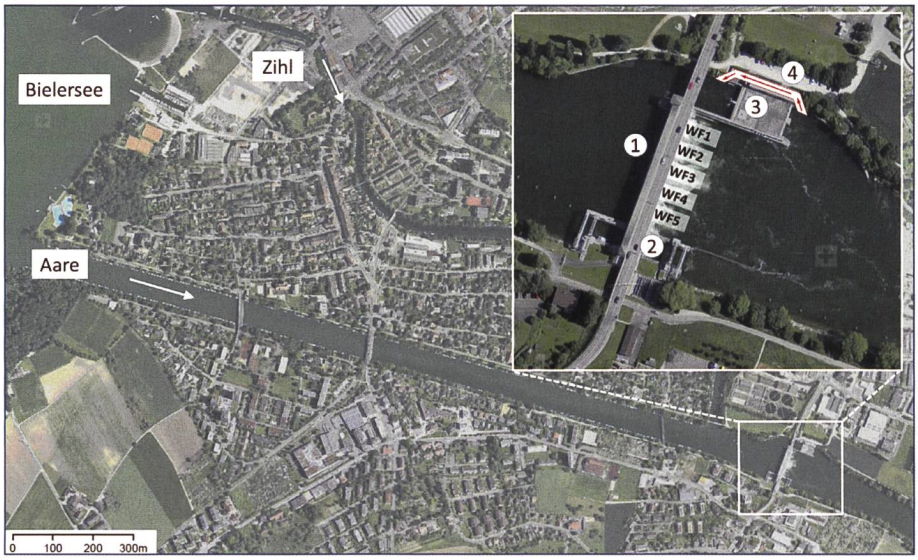


Bild 4. Situation Regulierwehr Port (1) mit Wehrfeldern WF1 – WF5, Schiffschleuse (2), Kraftwerk Brügg (3) und Fischaufstiegsanlage (4). Die weissen Pfeile zeigen die Fliessrichtung an (Bilder: map.geo.admin.ch).

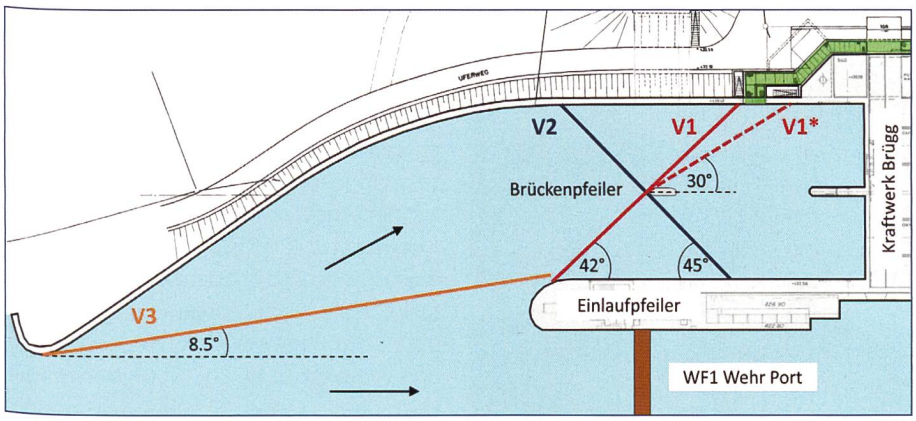


Bild 5. Potenzielle Anordnungen für Fischabstiegshilfen beim Kraftwerk Brügg. Die Varianten V1 und V1* weisen vor der rechten Turbine die gleiche Linienführung auf. In Grün dargestellt ist die vorhandene Fischaufstiegsanlage in Form eines Vertikalschlitzpasses. Die schwarzen Pfeile zeigen die Fliessrichtung an.

sowie ca. 42 m für V1* und sind somit relativ kurz. Die Variante V1* weist den Vorteil auf, dass die aktuelle Linienführung der Fischaufstiegsanlage beibehalten werden kann. Bei V1 muss der Ausstieg verschoben werden und V2 und V3 bedingen gar eine verlängerte Linienführung der Fischaufstiegshilfe ins Oberwasser. Der Bypass der Standorte V1 und V1* kann mittels ähnlicher Linienführung wie derjenige der Fischaufstiegsanlage ausgeführt und dessen Abfluss kann als Lockströmung für den Fischaufstieg verwendet werden. Die Variante V2 ermöglicht einen sehr kurzen Bypass durch den Einlaufpfeiler des Kraftwerks ins Unterwasser, macht allerdings die Anbindung einer sohlnahen Bypassöffnung unmöglich. Da sich die Standorte V1, V1* und V2 nahe vor den Turbineneinläufen befinden, besteht die Möglichkeit, den Bereich zwischen Rechen und Einlauf abzudecken und gegebenenfalls auf einen Grobrechen zu verzichten. Die Position der Variante V3 weist den Vorteil auf, dass bei Überwasser eine Verbesserung der Fischabwanderung über das Wehr zu erwarten ist. Jedoch weist diese Variante eine grosse Rechenlänge von 70 m auf, und es ist mit erheblichen konstruktiven Aufwänden zu rechnen, um die Stabilität der Rechenkonstruktion zu gewährleisten. Ein weiterer Nachteil ist eine unumgängliche Verlängerung der Fischaufstiegsanlage ins Oberwasser.

4.2 Numerisches Modell

Die hydraulischen Verhältnisse wurden mit Hilfe numerischer 3-D-Simulationen mit der freiverfügbaren Software *OpenFOAM* (Version v1712) ermittelt (*Greenshields*, 2015). Für Freispiegelabflüsse eignet sich der zu *OpenFOAM* gehörende *InterFoam-Solver*. Dessen physikalisches Modell basiert auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen in Kombination mit einem Turbulenzmodell, welches als Schliessungshypothese für die Reynolds-Spannungen dient (*Damián*, 2012). In der vorliegenden Arbeit wurde dazu das RNG-k-ε-Turbulenzmodell verwendet. Die Phasengrenzfläche zwischen Wasser und Luft wird beim *InterFoam-Solver* mit der VOF-Methode (Volume of Fluid) simuliert (*Hirt* u. *Nichols*, 1981). Ein weiterer Vorteil von *OpenFOAM* neben der freien Verfügbarkeit ist die Verwendung eines unstrukturierten Rechengitters. Durch die zusätzliche Verwendung polyedrischer Zellen (nebst hexaedrischen) können auch komplexe Geometrien exakt abgebildet werden *(Bild 6)*.

Aus Effizienzgründen wurde eine Abfolge von drei Simulationen durchgeführt, wobei der Modellperimeter jeweils verkleinert und im Gegenzug die räumliche Auflösung erhöht wurde. Die Modellgeometrie der ersten Simulation beinhaltet das Regulierwehr Port, das Kraftwerk Brügg sowie 930 m des Gerinnes oberstrom und 710 m unterstrom. Bei der zweiten Simulation wurden das Kraftwerk sowie das Wehr und bei der Dritten nur noch der Turbinenzulauf abgebildet. Die räumliche Auflösung des letzten Modells beträgt 20 cm in alle drei Raumrichtungen. Das Rechengitter dieses Modells ist in Bild 6 dargestellt und besteht aus rund 6.1 Mio. Zellen. Für die zweite und dritte Simulation wurde jeweils der stationäre Zustand der vorherigen Berechnung als Anfangsbedingung verwendet. Die Modelle wurden mittels Pegelmessungen im Ober- und Unterwasser kalibriert.

4.3 Hydraulische Verhältnisse und deren Bewertung

Es wurde ein Betriebszustand mit Turbinenabfluss bei geschlossenen Wehrfeldern simuliert, wobei der Durchfluss mit 195 m^3/s etwas unter dem Ausbaudurchfluss lag. Im nächsten Schritt wurden die hydraulischen Verhältnisse in den Schnitten der vier definierten Standorte ausgewertet (*Bild 7*, links). Da sämtliche Varianten eine horizontale Schräganströmung aufweisen, ist jeweils das Verhältnis der tangentialen zu den normalen Geschwindigkeitskomponenten dargestellt. Ist dieser Quotient grösser als 1, kann mit einer guten Leitwirkung des Rechens gerechnet werden. Die Normalgeschwindigkeiten wurden im Anschluss mit v_{opt} = 0.7 m/s bewertet (*Bild 7*, rechts), was innerhalb des oben genannten Intervalls der Dauerschwimmgeschwindigkeiten für die beiden Leitfischarten liegt. Für die konkrete Ausführung sollte für die optimale Wahl der Dauerschwimmgeschwindigkeit eine Fachperson für Fischbiologie konsultiert werden. Um die Sensitivität der Bewertung aufzuzeigen und Modellungenauigkeiten zu berücksichtigen, sind zusätzlich die Isotachen bei ±10 % der Grenzgeschwindigkeit dargestellt.

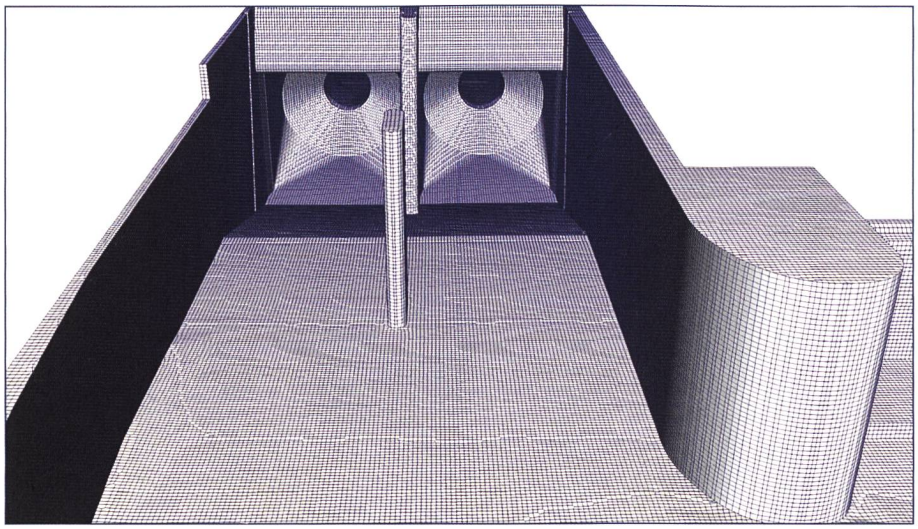


Bild 6. Rechengitter des OpenFOAM-Modells des Turbinenzulaufes. Das unstrukturierte Gitter ermöglicht eine präzise Abbildung der Geometrie.

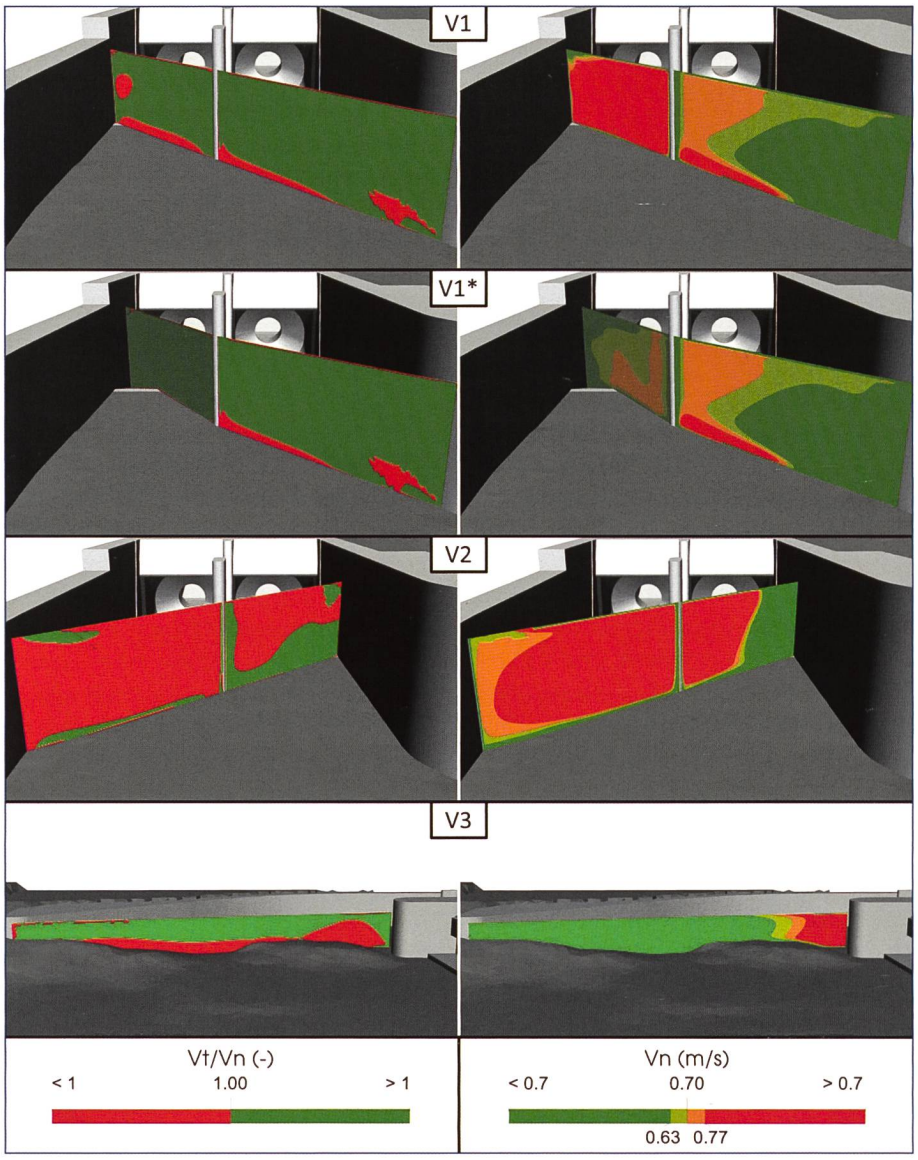


Bild 7. Links: Verhältnis der tangentialen (V_t) zu den normalen Geschwindigkeiten (V_n) für die vier berücksichtigten Varianten. Bei einem Quotienten grösser als 1 kann mit einer guten Leitwirkung gerechnet werden. Rechts: Bewertung der Normalgeschwindigkeiten für eine Fisch-Dauerschwimmgeschwindigkeit v_{opt} = 0.7 m/s. Zusätzlich sind die Isotachen bei ±10 % dieses Grenzwertes dargestellt.

Die Resultate zeigen, dass bei den Varianten V1, V1* und V3 mit einer guten Leitwirkung der Fische gerechnet werden kann, da die tangentialen Geschwindigkeiten bei diesen Anordnungen mehrheitlich grösser als die Normalgeschwindigkeiten sind. Beim Standort V2 ist ersichtlich, dass das Verhältnis zwischen den Tangential- und Normalgeschwindigkeiten weitgehend unter 1 liegt und deshalb mit einer schlechteren Leitwirkung zu rechnen ist als bei den anderen Positionen. Die Bewertung der Normalgeschwindigkeiten verdeutlicht, dass die Variante V1* das Kriterium am besten erfüllt. Bei den Varianten V1 und V2 sind die Normalgeschwindigkeiten insbesondere bei der linken Rechenhälfte höher als der Grenzwert, wodurch die Gefahr der Anpressung der Fische an den Rechen besteht. Dies gilt auch für den Standort V3 beim Einlaufpfeiler des Kraftwerkzulaufs, wo hohe Normalgeschwindigkeiten aufgrund der Strömungsablösung bei der Pfeilerumströmung auftreten.

Zusätzlich wurde ein Betriebszustand mit kombiniertem Turbinen- und Wehrabfluss untersucht. Durch die geöffneten Wehrfelder bildet sich eine kleinere Ablösungszone beim Einlaufpfeiler aus. Ansonsten konnten sehr ähnliche Strömungsverhältnisse im Turbinenzulauf wie beim gezeigten Lastfall ermittelt werden. Auf die Darstellung der Resultate für den kombinierten Betrieb der Anlage wird deshalb verzichtet.

Der Aspekt der hydraulischen Verluste wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Begründet wird dies durch die schwer realisierbare korrekte geometrische Abbildung der Fischleitrechen im numerischen Modell. Dies würde Zellgrössen im Millimeterbereich voraussetzen und zu einem unpraktikablen Rechenaufwand führen. Die hydraulischen Verluste können mit den entsprechenden Gleichungen aus der Literatur abgeschätzt werden, beispielsweise mit den Ansätzen von *Raynal et al.* (2013), *Kriewitz et al.* (2015), *Boes et al.* (2016), *Albayrak et al.* (2017) oder *Beck et al.* (2019) für vertikale, im Grundriss schräg angeordnete Leitrechen sowie von *Maager* (2016) und *Albayrak et al.* (2018) für horizontale Leitrechen. Diese Gleichungen wurden empirisch anhand von Laborversuchen für homogene Anströmung entwickelt. Bei stark inhomogenen Strömungsbedingungen, wie sie etwa beim Turbinenzulauf des Kraftwerks Brügg vorkommen, muss deshalb mit Abweichungen gerechnet werden.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das präsentierte Konzept weist den Vorteil auf, dass Standorte von Fischleitrechen mit Hilfe numerischer Simulationen beurteilt werden können, ohne die Rechen effektiv in den Modellen abzubilden. Die Verwendung eines numerischen Modells anstelle von Feldmessungen für die Ermittlung der Strömungssituation weist einige Vorteile auf. So können die hydraulischen Bedingungen nach der Erstellung eines kalibrierten Modells in jedem gewünschten Schnitt und für beliebige Betriebszustände ausgewertet werden. Des Weiteren können anhand der Simulationsresultate zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden. Beispielsweise können aus den Geschwindigkeitsvektoren die Kräfte auf im Wasser befindliche Strukturen abgeleitet oder turbinenspezifische Anströmkriterien für einen optimalen Wirkungsgrad überprüft werden.

Da die Rechen im numerischen Modell nicht berücksichtigt werden, kann deren Einfluss auf die Strömungsverhältnisse unmittelbar oberstrom nicht direkt beurteilt werden. Erste numerische Modellierungen von Fischleitrechen in einem einfachen Rechteckgerinne im Labormassstab weisen darauf hin, dass die Rechen zu einer Strömungsablenkung entlang der Rechenachse führen (*Feigenwinter,* 2018). Dadurch wird das Verhältnis zwischen den Tangential- und Normalgeschwindigkeiten erhöht, was zu einer Verbesserung der Fischleiteffizienz führt. Die Beurteilung der Strömungsbeeinflussung durch Fischleitrechen im unmittelbaren Oberwasser bedarf jedoch weiterer Forschungsarbeit.

Die Anwendung des Konzeptes auf das Kraftwerk Brügg zeigt, dass der Standort V1* die aus fischbiologischer Sicht günstigsten Voraussetzungen der getesteten Varianten aufweist. Eine Dauerschwimmgeschwindigkeit der Leitfischarten von 0.7 m/s wird nur lokal überschritten und die rechenparallele Tangentialgeschwindigkeitskomponente ist grösser als diejenige normal zum Rechen, sodass von einer guten Fischleitwirkung ausgegangen werden kann. Zudem besitzt diese Variante den Vorteil, dass die aktuelle Linienführung der Fischaufstiegsanlage grundsätzlich beibehalten werden kann. Ob sich ein Horizontal- oder ein Vertikalrechen besser eignet, muss in weiteren Abklärungen detailliert untersucht werden. Diese Variante zeigt, dass sich das Konzept auch zur Optimierung eines einzelnen Standortes eignet, da die Variante V1* erst nach der Beurteilung von V1 als Bestvariante untersucht wurde.

Die hydraulischen Verluste von Fischleitrechen müssen derzeit mit herkömmlichen Formeln abgeschätzt werden. Die effektive Berücksichtigung der Rechen in den numerischen Modellen ganzer Wasserkraftanlagen und die korrekte Modellierung der hydraulischen Verluste bleibt Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeit.

Literatur

Albayrak, I., Kriewitz, R.C., Hager, W.H., Boes, R.M. (2017). An experimental investigation on louvres and angled bar racks. Jl. of Hydr. Research, 56(1), 59–75, DOI: 10.1080/00221686.2017.1289265.

Albayrak, I., Maager, F., Boes, R.M. (2018). An experimental investigation on fish guidance structures with horizontal bars. Jl. of Hydr. Research: angenommen.

BAFU. (2009). Strukturen der Fliessgewässer in der Schweiz – Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie); Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. (Stand: April 2009). Bundesamt für Umwelt, Bern.

Bates, D. W. u. *Vinsonhaler, R.* (1957). Vorversuche zur Eignung horizontaler Rechenanlagen für den Schutz von Fischen an Kraftwerkseinläufen. Trans. Am. Fish. Soc. 86: 38–57.

Beck, C., Albayrak, I., Meister, J., Boes, R.M. (2019). Hydraulic performance of fish guidance structures with curved bars – Part 1: Head loss assessment. Jl. of Hydr. Research: in Begutachtung.

BKW. (2014). Betriebsvorschrift WKW BRG inkl. Wehr Port. Version 01.04.2014, Bielersee Kraftwerke.

BKW. (2016). Vorstudien – Sanierung Fischgängigkeit am WKW Brügg. Bielersee Kraftwerke.

Boes, R., Albayrak, I., Kriewitz, C.R., Peter, A. (2016). Fischschutz und Fischabstieg mittels vertikaler Leitrechen-Bypass-Systeme: Rechenverluste und Leiteffizienz. WasserWirtschaft 106(7/8), 29–35.

BVE, Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion, JGK, Justiz-, Gemeinde- und Kirchendirektion u. VOL, Volkswirtschaftsdirektion. (2014). Strategische Planung nach GSchG zur Wiederherstellung der Fischwanderung im Kanton Bern – Objektblätter Sanierung Fischaufstieg/Fischabstieg.

Damián, S. M. (2012). Description and utilization of interFoam multiphase solver. Technical report, International Center for Computational Methods in Engineering.

Ebel, G. (2013). Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen: Handbuch Rechen- und Bypasssysteme: Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Ebel, Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie, Halle (Saale).

Feigenwinter, L. (2018). Numerische Modellierung von Fischleitrechen. Masterarbeit, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, (unpublished).

Früh, H. u. *Schudel, B.* (2013). Regulierwehr Port – Das Kernstück der Juragewässerkorrektion. Amt für Wasser und Abfall (AWA), Bern.

Fuentes-Perez, J. F., Silva, A. T., Tuhtan, J. A., Garcia-Vega, A., Carbonell-Baeza, R., Musall, M. u. *Kruusmaa, M.* (2018). 3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways. Environmental Modelling & Software, 99, 156–169.

Greenshields, C. J. (2015). OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox. OpenFOAM Foundation Ltd.

Gewässerschutzgesetz (GSchG). SR 840.20 vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. Januar 2017). Gewässerschutzverordnung (GSchV). Vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. Juni 2018).

Hirt, C. W. & *Nichols, B. D.* (1981). Volume of Fluid (Vof) Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Computational Physics, 39(1), 201–225.

Höttges, A. u. *Sausen, S.* (2016). Einsatz von Fischleitrechen am Aare-Kraftwerk Brügg. Masterprojektarbeit, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, (unpublished).

Kriewitz, C. R. (2015). Leitrechen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz. VAW-Mitteilungen 230 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich.

Kriewitz, C.R., Albayrak, I., Flügel, D., Bös, T., Peter, A., Boes, R.M. (2015). Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken. «Wasser Energie Luft» 107(1): 17–28.

Maager, F. (2016). Fischleitrechen mit horizontalen Stabelementen. Masterarbeit, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, (unpublished).

O'Keeffe, N. u. *Turnpenny, W. H.* (2005). Screening for intake and outfalls: a best practice guide. Science Report SC030231, Bristol (Environment Agency).

Pakhorukov, A. M. u. *Kuragina, G. N.* (1978). Biological investigation of some fish-protecting devices which incorporate fish-diverters. Biologicheskie osnovy primeneniya rybozashchitnykh i rybopropusknykh sooruzheniy, 98–112.

Pavlov, D. S. (1989). Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR. FAO Fisheries Technical Paper 308, 97 S., Rome (Food and Agriculture Organisation of the United Nations).

Peake, S. (2008). Swimming performance and behavior of fish species to Newfoundland and Labrador: A literature review for the purpose of establishing design water velocity criteria for fishways and culverts. Can. Manuscript Rep. of Fish. Aquat. Sc. 2.843, 52 S.

Raynal, S., Chatellier, L., Courret, D., Larinier, M., u. *David, L.* (2013). An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 2. Angled trashracks. Journal of Hydraulic Research, 51(1), 67–75.

Schmalz, W. (2010). Untersuchungen zum Fischabstieg und Kontrolle möglicher Fischschäden durch die Wasserkraftschnecke an der Wasserkraftanlage Walkmühle an der Werra in Meiningen. Studie im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, 220 S., Breitenbach (Fischökologische und Limnologische Untersuchungsstelle Südthüringen).

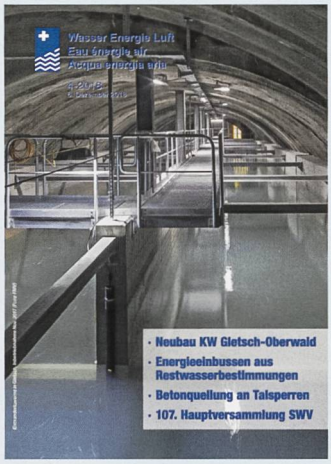
Spillmann, C. u. *Walter, F.* (2017). Erfolgreiche Sanierungen der Wasserkraft – Genügt das vorhandene Fachwissen? «Wasser Energie Luft», 109(1), 27–31.

Wolter, C. u. *Arlinghaus, R.* (2003). Navigation impacts on freshwater fish assemblages: the ecological relevance of swimming performance. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 13(1), 63–89.

Anschrift der Verfasser

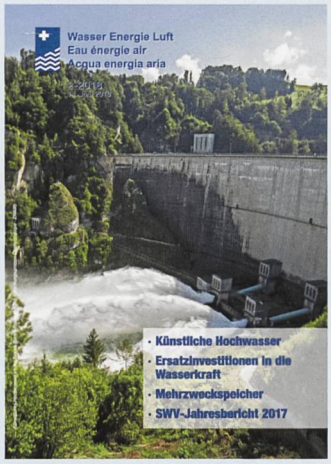
Linus Feigenwinter, linus.feigenwinter@gmx.ch
Dr. *David Vetsch, Stephan Kammerer,* Prof. Dr. *Robert Boes*
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) ETH Zürich
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
http://www.vaw.ethz.ch
vetsch@vaw.baug.ethz.ch
kammerer@vaw.baug.ethz.ch
boes@vaw.baug.ethz.ch
Dr. *Carl Robert Kriewitz*
BKW Energie AG, Viktoriaplatz 2, CH-3013 Bern
robert.kriewitz@bkw.ch

Bestellen Sie die Ausgaben von «Wasser Energie Luft» unter www.swv.ch (solange Vorrat)



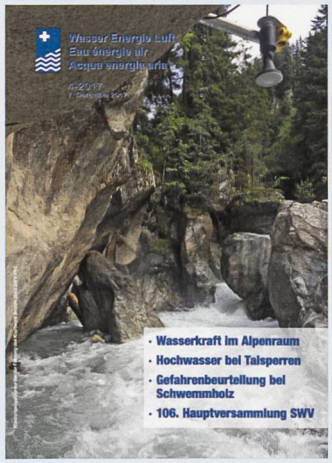
WEL 4-2018

WEL 3-2018



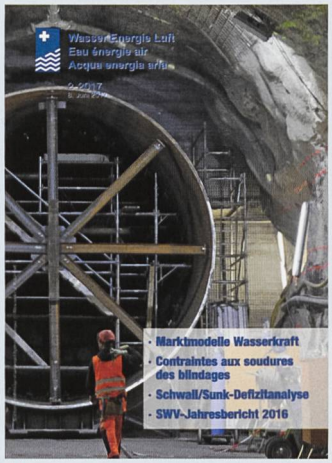
WEL 2-2018

WEL 1-2018

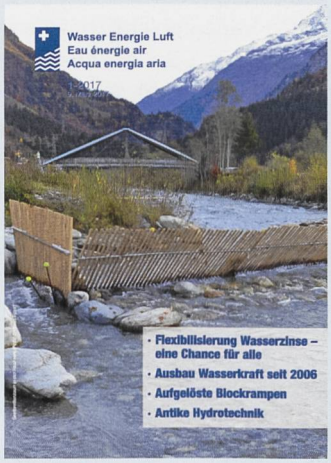


WEL 4-2017

WEL 3-2017

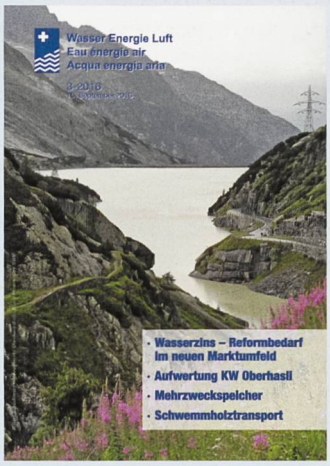


WEL 2-2017



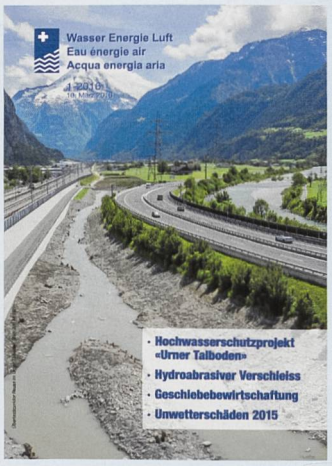
WEL 1-2017

WEL 4-2016



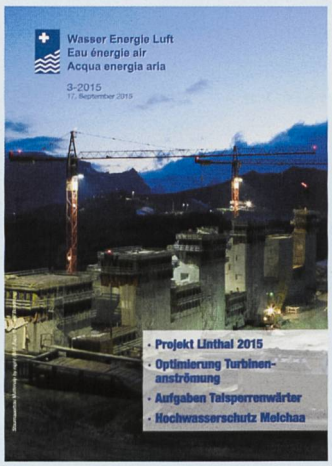
WEL 3-2016

WEL 2-2016

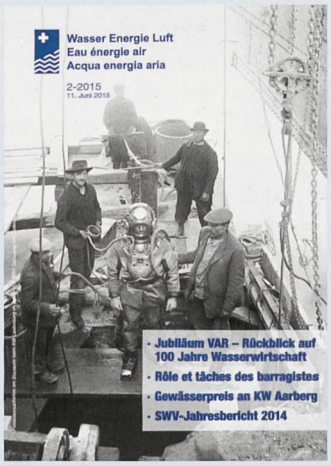


WEL 1-2016

WEL 4-2015



WEL 3-2015



WEL 2-2015

WEL 1-2015