

# Positionierung von Fischleitrechen bei verschiedenen Flusskraftwerkstypen

*David Vetsch, Stephan Kammerer und Romeo Arnold*

## Zusammenfassung

Die Wiederherstellung der Fischdurchgängigkeit an Wasserkraftanlagen und somit der Korridorfunktion von Fließgewässern ist elementar für eine natürliche Erhaltung von bestimmten Fischpopulationen. An einigen Anlagen wurde bereits ein neuer Fischaufstieg gebaut oder der bestehende soll saniert und ausgebaut werden. Hingegen sind Technologien für den Fischabstieg nach wie vor in Entwicklung. Eine mögliche Maßnahme zum Schutz der Fische beim Passieren der Anlagen ist der Bau von Fischleitrechen (FLR), wobei die Fische dem Rechen entlang in ein für sie vorgesehene Bypass-System an den Turbinen vorbeigeführt werden. Mögliche Standorte eines FLR können mit Hilfe eines numerischen 3D Modells des Kraftwerks untersucht werden. Dazu wird das Strömungsfeld in der Rechenebene evaluiert. Zudem kann damit der Einfluss des FLR auf die Strömung stromabwärts simuliert werden. Die optimale Position eines FLR kann je nach Flusskraftwerktyp unterschiedlich sein und hängt häufig auch von weiteren Aspekten wie Auslegung und Betrieb der Anlage, Hochwassersicherheit, Schwemmholz und Sedimentaufkommen ab. Im vorliegenden Beitrag werden die Möglichkeiten und Herausforderungen bei der Positionierung von FLR an einem Buchten-, einem Ausleit- und einem Blockkraftwerk sowie einer kombinierten Anlage aufgezeigt.

## 1 Einleitung

Die Wiederherstellung der Fischdurchgängigkeit an Wasserkraftanlagen wird in der Schweiz durch das revidierte Gewässerschutzgesetz seit 2011 gefordert. Entlang der Aare zwischen Bielersee und der Mündung in den Rhein gibt es 12 Flusskraftwerke. Aufgrund der artenreichen Fischpopulation und der Korridorfunktion der Aare wurde die Sanierung aller Anlagen als sehr dringlich ausgewiesen. An einigen Anlagen wurde bereits ein neuer Fischaufstieg gebaut oder der bestehende soll saniert und ausgebaut werden. Hingegen sind mögliche Technologien für den Fischabstieg nach wie vor unklar. Eine mögliche Maßnahme ist der Einsatz von FLR mit horizontal oder vertikal ausgerichteten Stäben, welche verhindern sollen, dass flussabwärts wandernde Fische in die Turbinen geraten. Durch den FLR sollen die Fische entlang der Rechenebene zu einem alternativen Bypass und anschließend ins Unterwasser geleitet werden.

## 2 Vorgehensweise

### 2.1 Evaluation möglicher FLR-Standorte

Für die Evaluation möglicher Standorte eines FLR kann ein numerisches 3D Modell des Kraftwerks erstellt und das Strömungsfeld für verschiedene Lastfälle simuliert werden. Üblicherweise werden dafür Abflüsse in Anlehnung an die Vorgaben für den Fischaufstieg zwischen  $Q_{30}$  und  $Q_{330}$  (Abfluss, der an durchschnittlich 30 Tagen, resp. 330 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird) gewählt.

Basierend auf dem berechneten Strömungsfeld können mögliche FLR-Standorte unter Berücksichtigung der Leitfischart evaluiert werden (Feigenwinter et al. 2019). Dazu gilt zu beachten,

dass die Rechenebene einen horizontalen Winkel zur Hauptfließrichtung von  $45^\circ$  nicht überschreitet, um ein vorteilhaftes Verhältnis zwischen den tangentialen ( $v_t$ ) zu den normalen ( $v_n$ ) Geschwindigkeitskomponenten zu erreichen. Bei einem Quotienten  $v_t/v_n > 1$  ist von einer guten Leitwirkung des Rechens hin zum Bypass auszugehen (U.S. Department of the Interior 2006). Ein weiteres Beurteilungskriterium für FLR sind die Normalgeschwindigkeiten in der Rechenebene. Diese dürfen die Dauerschwimmgeschwindigkeit  $v_{opt}$  der Leitfischart nicht überschreiten, sodass Fische nicht aufgrund von Ermüdung den Rechen passieren oder gegen die Rechenstäbe gedrückt werden. Für die Abschätzung von  $v_{opt}$  gibt es eine Vielzahl von Ansätzen (siehe z.B. Wolter & Arlinghaus 2003, Peake 2008, Ebel 2013).

Zur Bestimmung der optimalen Anordnung sind zudem weitere Aspekte zu berücksichtigen, auf welche in diesem Beitrag nicht weiter eingegangen wird, wie Auslegung und Betrieb der Anlage, Anströmung zum Bypass, Hochwassersicherheit, Schwemmholz und Sedimentaufkommen. Des Weiteren hat die Stabform des FLR einen Einfluss auf den Energieverlust am Leitrechen (Beck 2020, Kriewitz 2015), die Anströmung der Turbinen und allenfalls auf die Verluste am Einlaufrechen.

## 2.2 Numerisches Modell

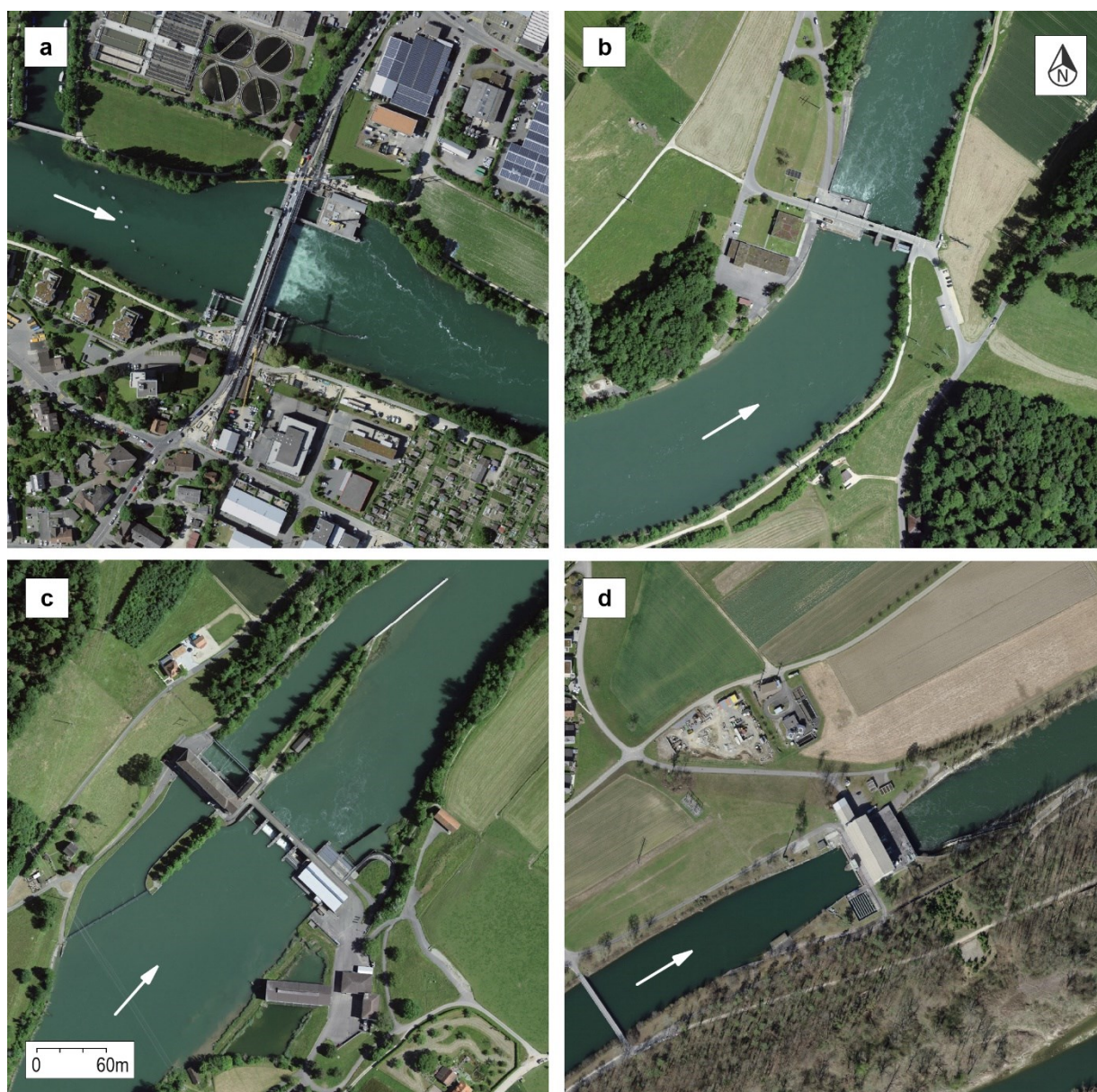
Für die 3D Simulationen wurde die frei verfügbare Software OpenFOAM (Version v1812) verwendet. Zur Simulation von Freispiegelabfluss eignet sich der zur OpenFOAM Toolbox gehörende InterFoam-Solver (Damián 2012), welcher eine Volume-of-Fluid (VOF) Methode (Hirt & Nichols 1981) zur Abbildung der freien Oberfläche verwendet. Bei diesem Solver werden die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) in Kombination mit einem Turbulenzmodell gelöst. Für die vorliegende Arbeit wurde das Realizable-k- $\epsilon$ -Turbulenzmodell verwendet. Aus der 3D-Berechnung resultieren für jede Zelle des Berechnungsgebietes die Geschwindigkeiten in den drei kartesischen Raumrichtungen, der Druck, die turbulenten Größen  $k$  und  $\epsilon$ , der Füllungsgrad der Gitterzellen und weitere abgeleitete Größen, wie z.B. die Wasserspiegellage. Die numerischen Modelle wurden, falls vorhanden, mit Feldmessungen (ADCP-Messungen) kalibriert und validiert.

Eine gegenständliche Abbildung des FLR, resp. jedes einzelnen Rechenstabs im numerischen Modell, würde zu einer sehr großen Anzahl von Gitterzellen und folglich zu einem großen Berechnungsaufwand führen. Darum wurde von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich ein spezielles Verfahren zur Abbildung von FLR entwickelt, der sogenannte «Bar Rack Baffle» (BRB). Beim BRB handelt es sich um eine spezielle Randbedingung mit der die lokalen Verluste und der lokale Einfluss des Leitrechens auf die Strömung berücksichtigt werden können.

## 3 Untersuchte Flusskraftwerktypen

Vier verschiedene Flusskraftwerke an der Aare in der Schweiz wurden untersucht. Das Buchtenskraftwerk Port-Brügg (Abb. 1a) reguliert mit dem Wehr Port den Abfluss und den Pegel des Bielersees. Das Kraftwerk hat zwei horizontalachsige Kaplan-Rohrturbinen und eine Ausbaumassermenge von  $220 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Anlage verfügt über eine Fischaufstiegsanlage in Form eines Schlitzpasses auf der orographisch linken Seite. Das Blockkraftwerk Bannwil (Abb. 1b) ist das zweite Kraftwerk nach der Einmündung der Emme, wodurch es zu einem verstärkten Sedimenteintrag in den Stauraum und gelegentlich zu einem hohen Schwemmgutanfall während Hochwasser kommen kann. Das Kraftwerk besitzt zwei horizontalachsige Kaplan-Rohrturbinen und eine Ausbaumassermenge von  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Anlage verfügt über eine Fischaufstiegsanlage in

Form eines Schlitzpasses auf der orographisch linken Seite. Die kombinierte Anlage Wynau-Schwarzhäusern (Abb. 1c) besteht aus dem Kraftwerk Wynau (rechtsufrig, angeordnet in Blockbauweise), dem Kraftwerk Schwarzhäusern (linksufrig, angeordnet als Buchtenkraftwerk) und dem dazwischenliegenden Wehr mit vier Wehrfeldern. Das Kraftwerk Schwarzhäusern verfügt über vier Kaplan-Turbinen mit einer Ausbauwassermenge von  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Das neuere Kraftwerk Wynau verfügt über eine Kaplan-Getriebschachtelturbine mit einer Ausbauwassermenge von  $220 \text{ m}^3/\text{s}$ . Zudem besteht ein verschlossener Einlauf für ein geplantes Ausleitkraftwerk. Für den Fischeufstieg befindet sich bei der Zentrale Wynau ein Beckenfischpass. Das Ausleitkraftwerk Wildeg-Brugg (Abb. 1d) wird über einen gut 2 km langen, künstlich erstellten Triebwasserkanal gespeist. Das Kraftwerk ist mit zwei vertikalachsigen Kaplan-turbinen ausgestattet, hat eine Ausbauwassermenge von  $420 \text{ m}^3/\text{s}$  und besitzt eine Fischeufstiegshilfe auf der orographisch rechten Seite der Kraftwerkzentrale.

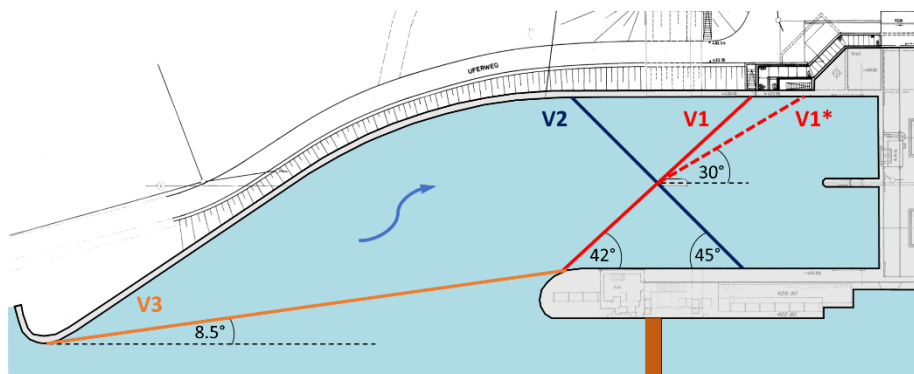


**Abb. 1** Untersuchte Kraftwerktypen an der Aare in der Schweiz: a) Buchtenkraftwerk Port-Brügg, b) Blockkraftwerk Bannwil, c) kombinierte Anlage Wynau-Schwarzhäusern und d) Ausleitkraftwerk Wildeg-Brugg. (Hintergrundbild: © Daten:CNES, Spot Image, swisstopo, NPOC).

## 4 Resultate

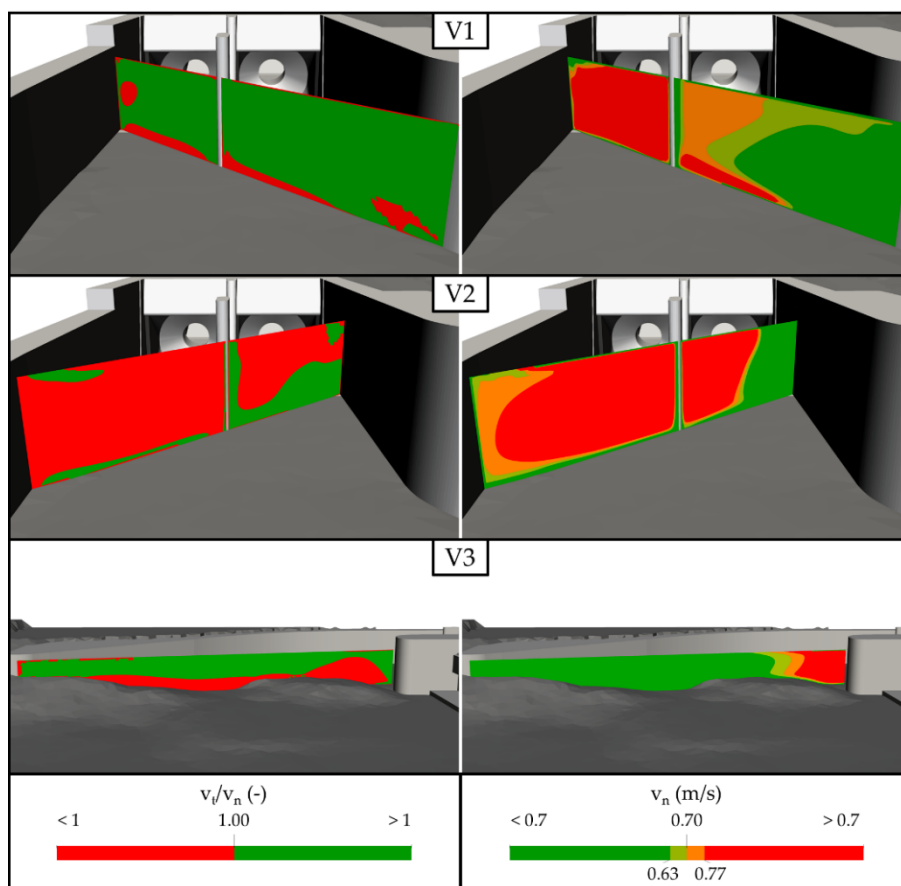
### 4.1 Buchtenkraftwerk

Beim Buchtenkraftwerk Port-Brügg wurden vier verschiedene FLR Positionen untersucht (Abb. 2), wobei für die Varianten V1, V1\* und V2 der Brückenpfeiler als Rahmenstruktur für den Rechen verwendet wird. Die Länge der Rechen beträgt 36 m bei den Varianten V1 und V2, ca. 42 m bei Variante V1\* und 70 m bei Variante V3.



**Abb. 2** Untersuchte Positionen von Fischleitrechen bei Buchtenkraftwerk Port-Brügg.

Die Auswertung des Strömungsfelds bei einem Abfluss von  $195 \text{ m}^3/\text{s}$  zeigt (Abb. 3), dass bei den FLR der Varianten V1, V1\* (nicht dargestellt) und V3 mit einer guten Leitwirkung der Fische gerechnet werden kann, weil die Bedingung  $v_t/v_n > 1$  größtenteils erfüllt wird.



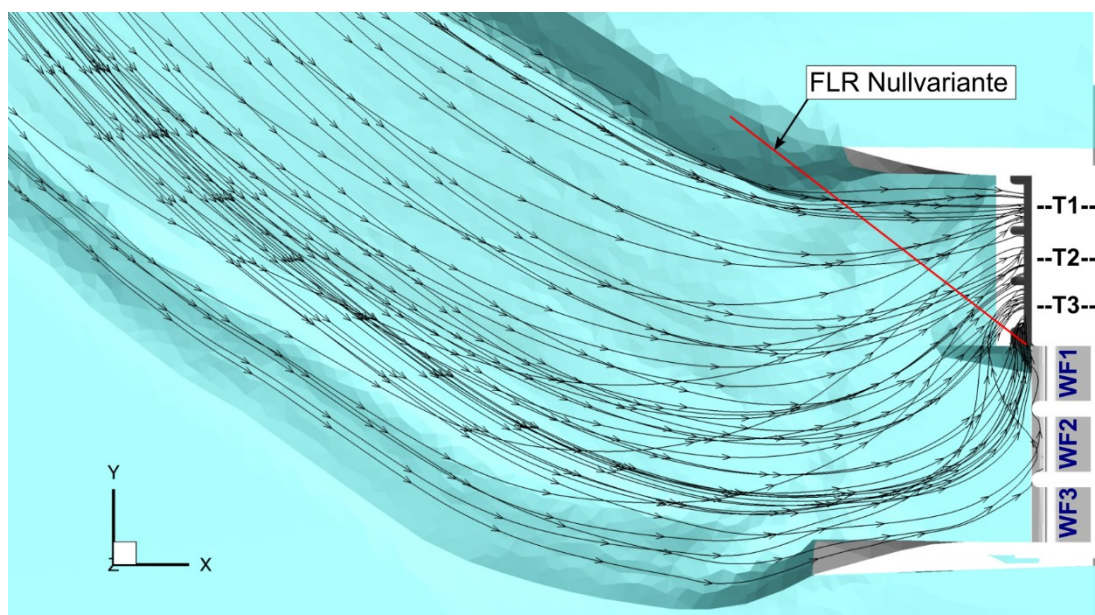
**Abb. 3** Verhältnis der tangentialen ( $v_t$ ) zu den normalen ( $v_n$ ) Fließgeschwindigkeiten und Normalgeschwindigkeiten zur Beurteilung der Fischleitwirkung beim Kraftwerk Port-Brügg.



Die Bewertung der Normalgeschwindigkeiten unter Annahme von  $v_{opt} = 0,7$  m/s zeigt, 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. Das Gleiche gilt für die Variante V3 beim Einlaufpfeiler des Kraftwerkzulaufes, wo hohe Normalgeschwindigkeiten aufgrund der Strömungsablösung auftreten. Da die Varianten V1, V1\* und V2 sich nahe vor den Turbineneinläufen befinden, besteht die Möglichkeit, den Bereich zwischen Rechen und Einlauf abzudecken und gegebenenfalls auf einen Einlaufrechen zu verzichten.

## 4.2 Blockkraftwerk

Bedingt durch die Bauweise, bei der sowohl das Wehr als auch das Maschinenhaus innerhalb des bestehenden Flussquerschnitts nebeneinander positioniert sind, ist die Anströmung von Kraftwerken in Blockbauweise besonders herausfordernd bezüglich der Positionierung von FLR. Beim Kraftwerk Bannwil verläuft die Strömung bei reinem Turbinenabfluss nahezu parallel zur Wehrachse in Richtung der Turbinen. Würde ein FLR so positioniert, wie in Abb. 4 als «FLR Nullvariante» bezeichnet, träfe die Strömung senkrecht oder sogar gegen die Hauptströmungsrichtung auf den Leitrechen, wodurch sehr hohe Normalgeschwindigkeiten auftreten und sich eine schlechte Leitwirkung hin zum Bypass ergibt. Aufgrund der Rechenreinigung sollte der FLR auch nicht im Bereich der Einlauframpe angeordnet werden.

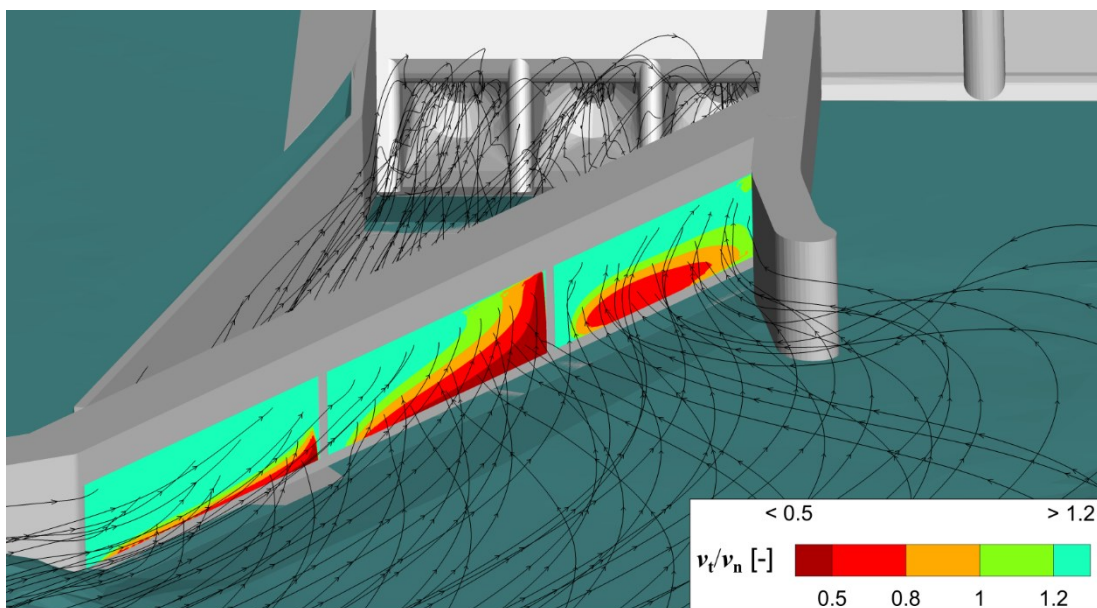


**Abb. 4** Strömungsverlauf am Blockkraftwerk Bannwil bei reinem Turbinenabfluss und Nullvariante für die Positionierung eines Leitrechens.

Anhand dieser Betrachtungen wird klar, dass eine Positionierung eines FLR mit Bypass ohne weitere bauliche Anpassungen nicht infrage kommt. Beim Kraftwerk Bannwil wird deshalb vorgeschlagen, den Trennpfeiler zwischen Maschinenhaus und Wehr ins Oberwasser zu verlängern, um die Strömung bereits stromaufwärts der Rechenebene mehr parallel zur Turbinenachse auszurichten. Der verlängerte Trennpfeiler dient dann gleichzeitig als bauliches Element zur Anbringung der Rechenkonstruktion.

Im Rahmen des Variantenstudiums wurden insbesondere zwei Varianten weiterverfolgt: FLR positioniert vom linken Ufer zum verlängerten Trennpfeiler hin mit Abwinklung von  $35^\circ$  zur Hauptströmungsrichtung (Turbinenachse), wobei der Bypass in den neuen Trennpfeiler integriert wird

(Variante 1) und Variante 2 mit FLR vom Trennpfeiler zum linken Ufer hin mit gespiegelter Abwinklung. Die Simulationen zeigen, dass bei Variante 1 die Bereiche mit einem Verhältnis von  $v_t/v_n < 1$  räumlich begrenzt sind und vor allem die untere Hälfte der Wassertiefe betreffen (Abb. 5). Die Normalgeschwindigkeiten liegen über den Großteil der Rechenfläche unter  $v_{opt} = 0,7$  m/s, überschreiten jedoch im Maximum die angenommene Dauerschwimmgeschwindigkeit der Leitfischart. Um die Verhältnisse zu verbessern, könnte eine Sohlleitwand eingebaut werden oder der Winkel des Rechens könnte gegenüber der Turbinenachse weiter abgeflacht werden. Letzteres hätte jedoch zur Folge, dass sich der ohnehin schon gut 100 m lange Rechen weiter ins Oberwasser verlängern würde. Bei Variante 2 betreffen die Bereiche mit einem Verhältnis von  $v_t/v_n < 1$  vor allem die obere Hälfte der Wassertiefe. Durch die lange Trennpfeilerverlängerung bei Variante 2 (ca. 1,5-mal länger als bei Variante 1) entsteht eine Art «Oberwasserkanal», was zu einer Strömungskonzentration stromaufwärts der Turbineneinläufe führt. Dadurch erhöhen sich die Fließgeschwindigkeiten, sodass die Normalgeschwindigkeiten in der Rechenebene Werte von 1,6 m/s erreichen. Im Vergleich zur Variante 1 wird die angenommene Dauerschwimmgeschwindigkeit bei der Variante 2 über einen größeren Teil der Rechenfläche überschritten. Dazu kommt, dass bei beim Bau eines Bypasses am linken Ufer die bestehende Infrastruktur (Gebäude, Fischaufstieg, Energieableitung) tangiert würde. Aus betrieblicher Sicht wird befürchtet, dass die Schwemmholzansammlung bei Hochwasser zunimmt und eine aufwändige Beseitigung erfordert. Bei Variante 1 kann das Schwemmholz allenfalls durch eine Öffnung im Trennpfeiler weiter zum Wehr geleitet werden. Insbesondere wegen der zuvor genannten baulichen und betrieblichen Aspekte wurde die Variante 1 als Bestvariante gewählt.



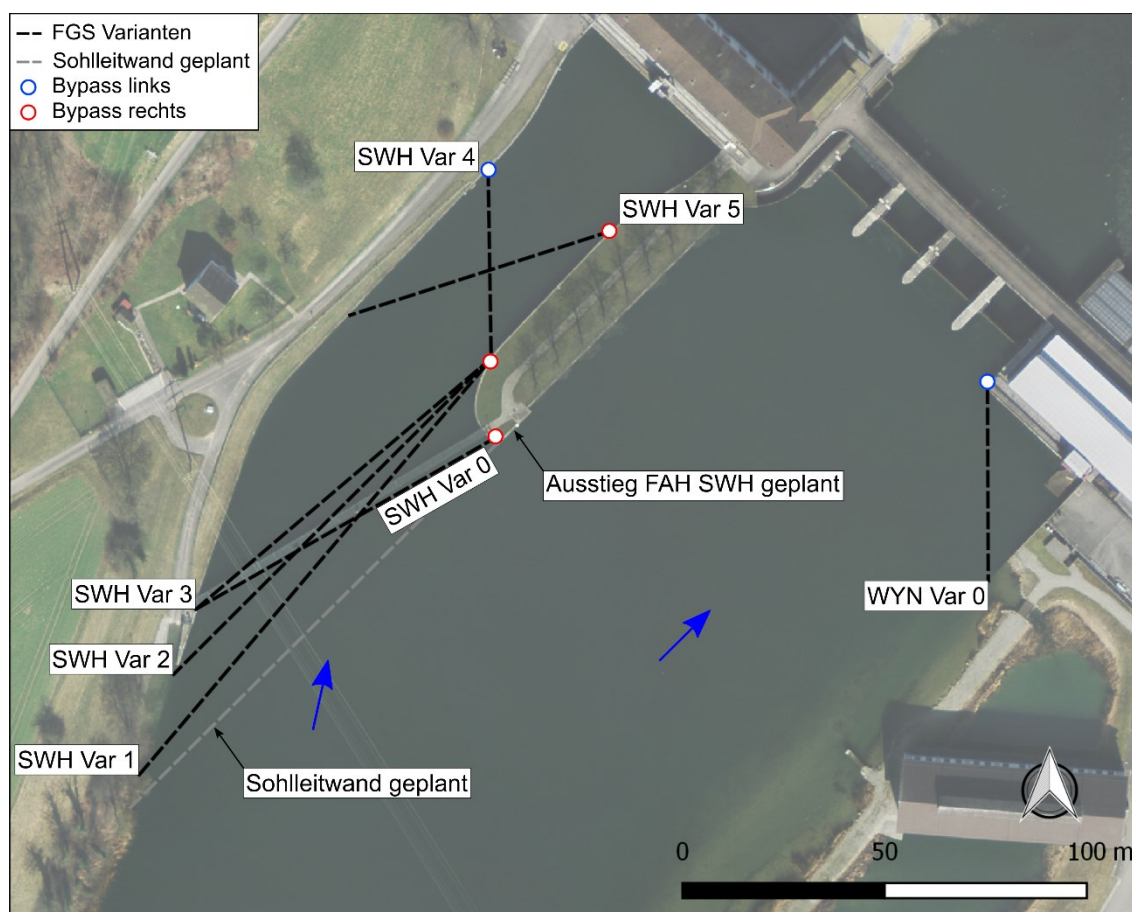
**Abb. 5** Mögliche Position eines Fischleitrechens (Variante 1) beim Kraftwerk Bannwil an der Aare und Verhältnis der tangentialen ( $v_t$ ) zu den normalen ( $v_n$ ) Fließgeschwindigkeiten zur Beurteilung der Fischleitwirkung.

### 4.3 Kombinierte Anlage

Bei der kombinierten Anlage Wynau-Schwarzhäusern ist die Situation auf der Seite des Kraftwerks Schwarzhäusern (orographisch links) vergleichbar mit der Situation beim Kraftwerk Port-Brügg. Auf dieser Seite wurden sechs potentielle Standorte von FLR untersucht (Abb. 6). Die Nullvariante (SWH Var 0), mit einem Leitreechen beim heutigen Steg, ist wegen den Strömungsbedingungen beim Einlauf zum Kanal ungeeignet. Es treten hohe Normalgeschwindigkeiten bei

der Mittelinsel auf und eine Leitwirkung entlang der Rechenebene ist nicht vorhanden. Hingegen ist bei den Varianten SWH 1 bis 3 eine gute Leitwirkung zu erwarten, da in der Rechenebene für alle Lastfälle ein Verhältnis  $v_t/v_n > 1$  erreicht wurde. Jedoch treten hohe Tangentialgeschwindigkeiten im Bereich der Mittelinsel auf, was für die Anordnung eines Bypasses problematisch sein könnte. Als Alternativen wurden die Varianten SWH 4 und 5 untersucht, die vollständig innerhalb des geraden Teils des Oberwasserkanals liegen. Bei beiden Varianten wäre eine gute Leitwirkung zu erwarten. Die Variante SWH 4 hat von allen Varianten die geringste Rechenlänge, jedoch ist der Winkel zur Kanalachse mit  $45^\circ$  eher steil. Entsprechend liegen die Normalgeschwindigkeiten über einen großen Bereich der Rechenebene bei knapp 1 m/s, wodurch schwimmschwächere Fische gegen die Rechenstäbe gedrückt werden könnten. Bei Variante SWH 5 sind die Normalgeschwindigkeiten kleiner und der Bypass würde rechts bei der Mittelinsel und somit näher beim Wehr angeordnet, wodurch sich die Distanz ins Unterwasser verkürzt.

Bei der Zentrale Wynau wurde lediglich die Nullvariante (WYN Var 0) untersucht. Bei der hier betrachteten Anordnung mit etwa  $45^\circ$  zur Wehrachse ist aufgrund der nahezu frontalen Anströmung des FLR von einer schlechten Leitwirkung hin zu einem Bypass beim Wehr auszugehen. Auch aus betrieblicher Sicht muss für die Zentrale WYN eine andere Lösung gefunden werden. Ein Leitrechen innerhalb des vertikalen Versatzes beim Turbineneinlauf wäre schwierig zu reinigen.

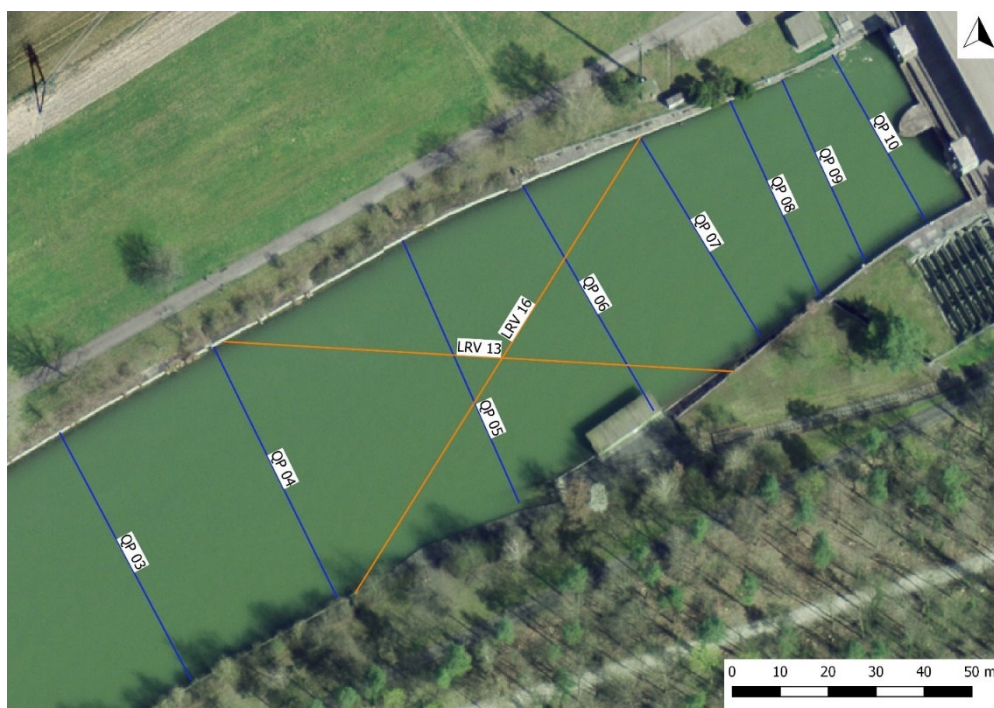


**Abb. 6** Potentiellen Standorte für Fischleitrechen (FLR) im Oberwasserkanal Schwarzhäusern (SWH) sowie bei der Zentrale Wynau (WYN).



#### 4.4 Ausleitkraftwerk

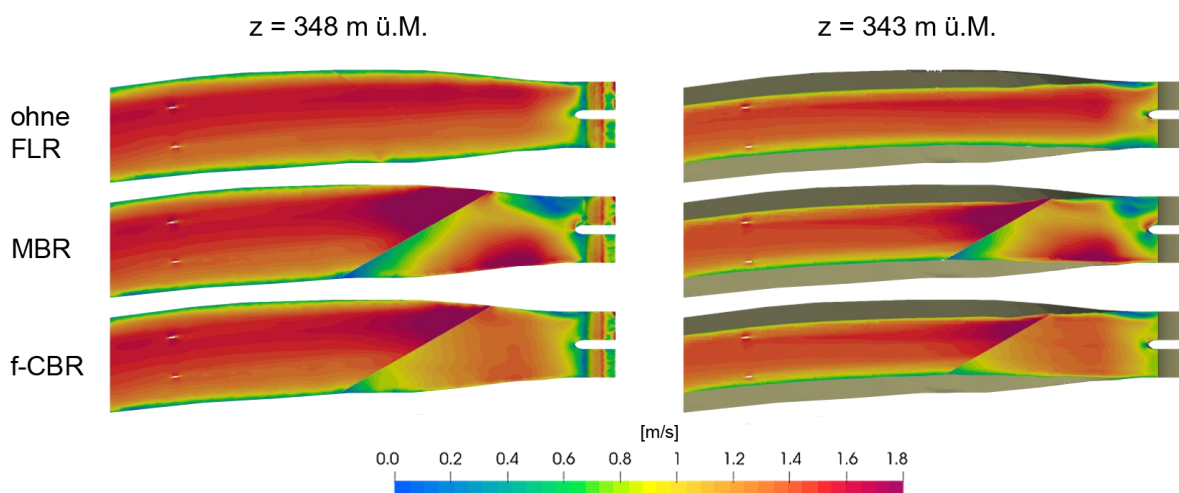
Beim Ausleitkraftwerk Wildegg-Brugg wurden 16 verschiedene FLR Positionen untersucht, wobei die Hälfte der Varianten von orographisch rechts nach links und die andere Hälfte von links nach rechts stromabwärts verläuft. Aufgrund der Bauweise ist das Strömungsfeld über den Fließquerschnitt bei Volllast symmetrisch und verlagert sich etwas bei Teillast. Für die Konfiguration von links nach rechts wurde als Bestvariante LRV13 (Winkel zur Fließrichtung  $\alpha = 31^\circ$ ) gewählt (Abb. 7). Der Abstand zum Krafthaus ist bei dieser Variante genügend groß, damit die Ablenkung der Strömung durch den FLR wieder ausgeglichen werden kann und eine zufriedenstellende Anströmung der Turbineneinläufe erreicht wird. Zudem bleibt der Zugang zur Bootsrampe gewährleistet. Für die Konfiguration von rechts nach links wurde als Bestvariante LRV16 ( $\alpha = 29^\circ$ ) gewählt (Abb. 7). Bei beiden Varianten wird das Kriterium  $v_t/v_n > 1$  bei allen Lastfällen gut erfüllt. Wird die Summenverteilung der Normalgeschwindigkeit pro Leitreechenfläche bei Volllast betrachtet, dann werden unter Annahme von  $v_{opt} = 0,7 \text{ m/s}$  bei LRV13 ca. 50 % und bei LRV16 ca. 30 % der Fläche über dem Grenzwert beaufschlagt, was weiter geprüft werden muss.



**Abb. 7** Evaluierte Bestvarianten LRV13 und LRV16 für die Positionierung eines Fischleitreechens beim Kraftwerk Wildegg-Brugg.

Der Einfluss des Fischleitreechens auf das Strömungsfeld stromabwärts wurde für verschiedene Lastfälle mit der BRB untersucht. Als Stabformen wurden der klassische „Modified Bar Rack“ (MBR) und der „foil-shaped Curved Bar Rack“ (f-CBR), eine Weiterentwicklung des MBR mit gekrümmten Stäben, verglichen. Der MBR führt zu relativ hohen Fließverlusten und zu einer asymmetrischen Strömung unterhalb des Rechens (Kriewitz 2015). Dies wird auch aus den Simulationen ersichtlich (Abb. 8). Die ausgeprägte Ablenkung der Strömung hat einerseits zur Folge, dass die Strömung unmittelbar vor dem Einlauf des Maschinenhauses starke Richtungswechsel aufweist und es zur Bildung von Wirbeln kommt, was die Anströmung des Maschinenhauses negativ beeinflusst. Andererseits wird die angeströmte Böschung unterhalb des Rechens stark beansprucht. Der f-CBR weist einen ca. 50% geringeren Verlustbeiwert als der MBR auf (Beck 2020) und führt zu einer deutlich geringeren Beeinflussung der Strömung nach dem FRL.





**Abb. 8** Betrag der Fließgeschwindigkeit bei Volllast an der Wasseroberfläche ( $z = 343$  m ü.M.) und auf halber Fließtiefe ( $z = 348$  m ü.M.) für die Variante LRV16.

## 5 Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Beitrag werden mögliche Anordnungen von Fischleitreechen bei verschiedenen Flusskraftwerktypen aufgezeigt. Die Herausforderungen unterscheiden sich dabei je nach Kraftwerktyp. Beim Ausleitkraftwerk ist die Situation hinsichtlich Fischleitwirkung nahezu ideal und vergleichbar mit der Anordnung bei Laborversuchen. Zudem kann der FLR in einem geeigneten Abstand zum Kraftwerk platziert werden, um den Einfluss des FLR auf die Anströmung des Krafthauses zu minimieren. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, den FLR unter vergleichbar guten Anströmungsbedingungen in zwei Richtungen anzuordnen, was Planungsflexibilität hinsichtlich baulicher Einschränkungen wie Bootsrampen oder Betriebsgebäude bringt. Je nach Breite des Kanals muss aber aufgrund der resultierenden Länge des FLR mit einem beachtlichen baulichen Aufwand gerechnet werden. Im Vergleich zum Ausleitkraftwerk ist beim Buchtenkraftwerk der Zulaufbereich deutlich verkürzt und die Platzverhältnisse für die Anordnung eines FLR deutlich geringer. Entsprechend kann die Anströmung des FLR durch die Umströmung des Trennpfeilers negativ beeinflusst werden oder der Nachlauf des FLR beeinflusst die Anströmung des Maschinenhauses. Hingegen sind aufgrund der kleineren Kanalbreite kürzere Leitreechen zu erwarten und der Bypass beginnt näher am Wehr, wodurch sich die Distanz ins Unterwasser verkürzt. Bei Blockkraftwerken sind aufgrund ihrer Bauweise umfangreiche bauliche Maßnahmen zur Anordnung eines FLR unumgänglich. Die hier gezeigte Verlängerung des Trennpfeilers führt letztendlich zu vergleichbaren Verhältnissen aber auch Herausforderungen wie bei einem Buchtenkraftwerk.

## Danksagung

Die diesem Beitrag zugrundeliegenden Untersuchungen wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich durchgeführt. Wir bedanken uns bei allen Mitwirkenden und der BKW Energie AG Hydraulische Kraftwerke (Kraftwerke Port-Brugg, Bannwil und Wynau-Schwarzhäusern) sowie der Axpo Power AG (Kraftwerk Wildegg-Brugg) für die finanzielle Unterstützung.

## Literatur

- Beck, C. (2020). Fish protection and fish guidance at water intakes using innovative curved-bar rack bypass systems VAW-Mitteilungen Nr. 257, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), R. M. Boes, ed., ETH Zürich, Schweiz.
- 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., Vetsch, D.F., Kammerer, S., Kriewitz, C.R., Boes, R.M. (2019). Conceptual Approach for Positioning of Fish Guidance Structures Using CFD and Expert Knowledge. Sustainability 2019, 11, 1646. <https://doi.org/10.3390/su11061646>
- 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.
- Kriewitz, C.R. (2015). Leitrechen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz. VAW-Mitteilungen Nr. 230, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), R. M. Boes, ed., ETH Zürich, Schweiz.
- 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.
- U.S. Department of the Interior. Fish Protection at Water Diversions - A Guide for Planning and Designing Fish Exclusion Facilities; Water Resources Technical Publication, Bureau of Reclamation: Denver, Colorado: 2006.
- Wolter, C. und 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

Dr. David Vetsch

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich

Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich

[dvetsch@ethz.ch](mailto:dvetsch@ethz.ch)

Stephan Kammerer

Hunziker Betatech AG

Pflanzschulstrasse 17, CH-8400 Winterthur

[Stephan.Kammerer@hunziker-betatech.ch](mailto:Stephan.Kammerer@hunziker-betatech.ch)

Romeo Arnold

Emch+Berger AG Bern, NL Spiez

Seestrasse 7, CH-3700 Spiez

[romeo.arnold@emchberger.ch](mailto:romeo.arnold@emchberger.ch)