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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 113 (2021)

Heft: 3

Artikel: Optimierung der Fischaufstiegshilfe am Wasserkraftwerk Bannwil mittels 3D-CFD-Simulation

Autor: Deller, Matthias / Corbe, Steffen / Krähenbühl, Sandra

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-966189

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: 15.07.2025

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

Optimierung der Fischaufstiegshilfe am Wasserkraftwerk Bannwil mittels 3D-CFD-Simulation

Mattias Deller, Steffen Corbe, Sandra Krähenbühl, Carl Robert Kriewitz-Byun

Zusammenfassung

Technische Fischaufstiegshilfen (FAH) werden in der Regel mithilfe analytischer Lösungsansätze dimensioniert, die einer über 100-jährigen Forschungshistorie entstammen. Das im deutschsprachigen Raum bekannteste Regelwerk ist das «Merkblatt DWA-M 509 – Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke» *(DWA, 2014)*. Die darin formulierten Dimensionierungsansätze zeigen für Standardbauweisen gute Übereinstimmung mit der Realität, stossen aber für Sonderbauwerke und spezifische Anforderungen an die hydraulischen Verhältnisse an ihre Grenzen. Dieser Beitrag stellt 3D-CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) als geeignetes Werkzeug für die vertiefte Analyse und Optimierung von FAH vor. Am Beispiel der geplanten FAH des Wasserkraftwerks Bannwil an der Aare wurden die signifikanten Fliesscharakteristika räumlich und zeitlich berechnet und visualisiert. Ihre Funktionalität wurde überprüft und in einem Variantenstudium optimiert. Zudem wurden die simulierten Resultate mit analytischen Ansätzen nach DWA *(DWA, 2014)* verglichen und nach Erkenntnissen der aktuellen Forschung diskutiert. Mit dem vorgestellten Verfahren kann die Hydraulik von FAH und insbesondere von Sonderbauwerken bereits vor dem Bau mit grosser Genauigkeit verstanden und optimiert werden.

1. Einleitung

Das Wasserkraftwerk (WKW) Bannwil wurde gemäss Interkantonaler Aareplanung (IKAP) *(IKAP, 2014)* im Hinblick auf die flussauf- und -abwärts gerichtete Fischwanderung als sanierungspflichtig im Sinne des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) *(Bundesgesetz, 1991)* eingestuft. Im Jahr 2016 startete die BKW Energie AG mit der Projektierung einer neuen FAH. Dank des parallel geführten, partizipativen Prozesses wurden die Anliegen der beteiligten Akteure (Bundes- und kantonale Behörden, Gemeinden, Fischerei und Umweltschutzverbände) berücksichtigt. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) bestätigte in der materiellen Vorprüfung im Jahr 2018 die eingereichte Bestvariante. Diese wurde anschliessend auf Stufe Bauprojekt ausgearbeitet. Ergebnis der umfangreichen Arbeiten ist der Neubau der FAH an der linken Uferseite mit zwei Einstiegen, an welche sich Vertikalschlitzpässe (VSP) anschliessen. Die beiden Einstiegsstränge (VSP 1+2) kommen in einem Verteilbecken zusammen, an das sich ein grösserer Vertikalschlitzpass (VSP 3) mit doppelter Abflussmenge anschliesst. Dieser verläuft bis auf Höhe der Kraftwerksgebäude und ist an ein Fischzählbecken angeschlossen. Die Anbindung des Ausstiegs in das Oberwasser erfolgt durch ein naturnahes Gerinne *(Bild 1)*.

Die Vorbemessung der VSP-Becken erfolgte nach den Vorgaben des DWA-Regelwerks *(DWA, 2014)*, wobei für VSP 3 bewusst eine reduzierte Beckenlänge gewählt wurde. Es wurde dabei schnell klar, dass die Becken mit Richtungswechsel, das Verteilbecken und auch der obere Teil der FAH (VSP 3) nicht hinreichend mit den analytischen Ansätzen bemessen werden können. Zudem wurde im partizipativen Prozess durch alle Akteure das Ziel formuliert, im gesamten VSP strömungsstabile (SST) Strömungsmuster (SM) anzustreben. Mit der analytischen Standardbemes-

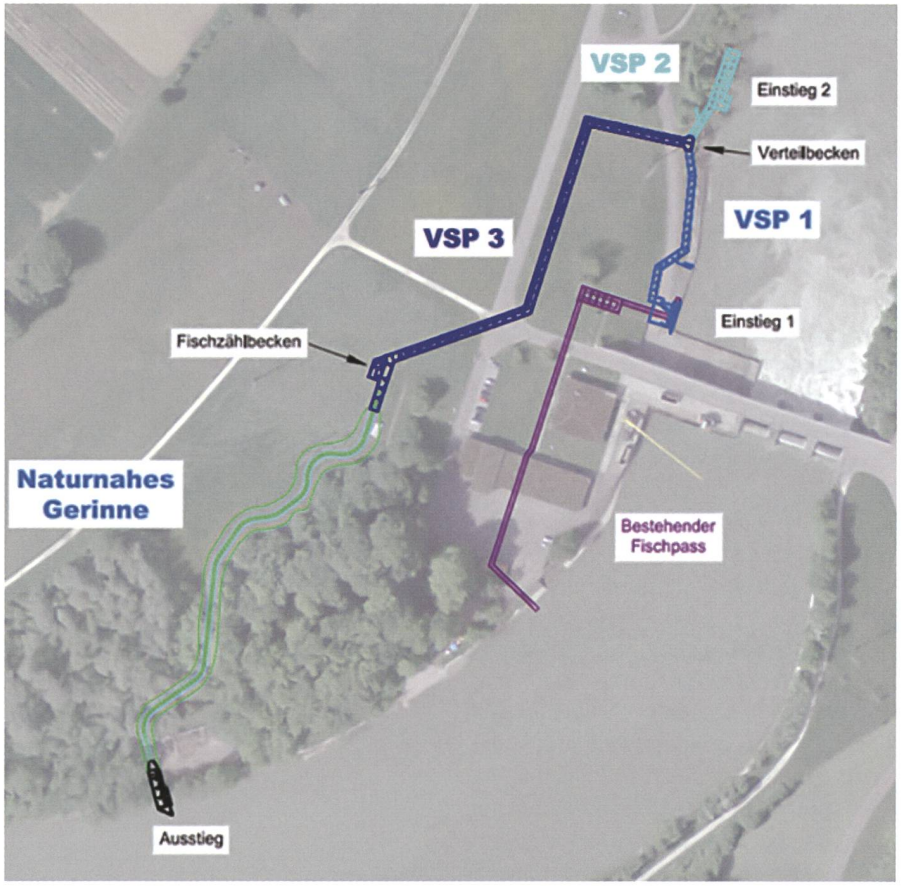

Bild 1: Situation des geplanten Neubaus der FAH.

sung konnte die Umsetzung dieses Ziels nicht garantiert werden. Um die Funktionstüchtigkeit des zukünftigen Bauwerks sicherzustellen, entschied sich die Planerin (BKW Engineering) dazu, die Sonderbauteile der Anlage und die SM-Prognose numerisch verifizieren zu lassen. Im Zentrum der hier beschriebenen Untersuchung standen das Verteilbecken und die homogene Aufteilung der Abflüsse auf die VSP-Stränge zu beiden Einstiegen (VSP 1+2).

2. Methodik und Vorgehensweise

2.1 Planungsgrundlagen

Die Planungsgrundlage für sämtliche FAH an der Aare in den Kantonen Bern, Solothurn und Aargau liefert die interkantonalen Aareplanung (IKAP). Ihre Dimensionierungsgrundsätze beruhen auf den anerkannten Regelwerken für technische FAH. Die IKAP *(IKAP, 2014)* definiert an der Aare zwei Zielfischarten:

(i) Der Lachs, als Vertreter der Grosssalmoniden, ist mittelfristig wieder im Aaresystem zu erwarten. Zukunftssichere FAH müssen bereits heute auf seine Bedürfnisse ausgelegt und die Beckenabmessungen entsprechend grosszügig angelegt werden.

(ii) Die Barbe ist an der Aare Leitart und namensgebend für die fischökologische Zonierung (Barbenregion). Sie ist anders als der Lachs auch aktuell ein typischer Vertreter der Fischpopulationen in der Aare. Ihre Ansprüche definieren, stellvertretend für andere häufige epipotamale Fischarten, die hydraulischen Verhältnisse an eine FAH.

Abgeleitet aus diesen Randbedingungen sind die in *Tabelle 1* gelisteten Vorgaben zur Bemessung von VSP an der Aare mindestens einzuhalten.

Die Tabelle verdeutlicht, dass bei der Dimensionierungsvorgabe für die zukünftigen VSP an der Aare ein Kompromiss aus geometrischen und hydraulischen Ansprüchen beider Zielfischarten angestrebt wurde. Die Beckendimensionen wurden auf einen ausgewachsenen Lachs (Körperlänge 1 m) ausgelegt, während die hydraulischen Parameter auf die Barbe ausgerichtet wurden. Dieser Umstand gab den Anstoss für die oben erwähnte Entscheidung, konsequent SST-SM in der FAH anzustreben, um schwimmstarken Arten einen durchgehenden Strömungskorridor zu bieten, dem sie ohne Verzögerung ins Oberwasser folgen können.

Kenngrösse	Wert	Zielart (Vertreterart)
Lichte Länge Becken [m]	≥3,0	Lachs/Grosssalmoniden
Lichte Breite Becken [m]	≥2,25 (=¾ x Länge)	Lachs/Grosssalmoniden
Wassertiefe Becken [m]	≥0,8	Lachs/Grosssalmoniden
Wasserspiegeldifferenz zw. Becken [m]	≤0,13	Barbe
Schlitzbreite Becken [m]	≥0,30 – 0,35	Barbe/Lachs
Leistungsdichte Bekcen [W/m³]	100 – 120	Barbe
max. Fliessgeschwindigkeit [m/s]	1,3	Barbe
min. Fliessgeschwindigkeit [m/s]	0,3	Barbe/Lachs
Fliessgeschwindigkeit beim Einstieg [m/s]	ca. 1,0	Barbe/Lachs
Dicke Sohlensubstrat [m]	≥0,2	Barbe/Lachs
Beschaffenheit Sohlensubstrat	2 bis 3 Fraktionen: 35 – 45 cm 5 – 15 cm (0,8 – 3 cm)	

Tabelle 1: Bemessungsvorgaben der IKAP (IKAP, 2014) für VSP an der Aare.

Die Geometrie der VSP 1+2 wurde mit einer Schlitzweite von 0,35 m und einer lichten Beckenlänge von 3 m entsprechend den Anforderungen der IKAP *(IKAP, 2014)* festgelegt. Gemäss den analytischen Bemessungsansätzen nach DWA *(DWA, 2014)* kann mit einem Abfluss von 0,40 m³/s die minimal geforderte Wassertiefe *(h)* eingehalten werden. VSP 3 wurde so ausgelegt, dass mit der doppelten Abflussmenge von 0,80 m³/s vergleichbare Fliessverhältnisse wie in VSP 1+2 herrschen. Die lichte Beckenlänge wurde bewusst auf 4 m begrenzt, um den VSP 3 mit ähnlicher Leistungsdichte wie die VSP 1+2 realisieren zu können. In der Konsequenz lagen die Abmessungen ausserhalb der Empfehlungen nach DWA *(DWA, 2014)* und wurden zur Minimierung der Projektrisiken numerisch verifiziert.

2.2 Numerisches Modell

Modellperimeter und Berechnungsgitter

Für die Beantwortung der Fragestellung wurden elf Becken vom VSP 3 und je vier Becken von VSP 1+2 betrachtet *(Bild 2)*.

Die exakte Abbildung der Geometrie mit dem Berechnungsgitter ist für die 3D-CFD-Simulation zentral. Bereits kleine Abweichungen bei der Schlitzbreite oder bei den Einbauten können einen wesentlichen Einfluss auf die berechneten Strömungsgrössen und das Strömungsmuster haben. Um die Unabhängigkeit der berechneten Strömungsgrössen von der Gitterdiskretisierung zu gewährleisten, wurde eine Sensitivitätsanalyse mit verschiedenen Gitterauflösungen durchgeführt. Für die folgenden Simulationen wurde dieje-

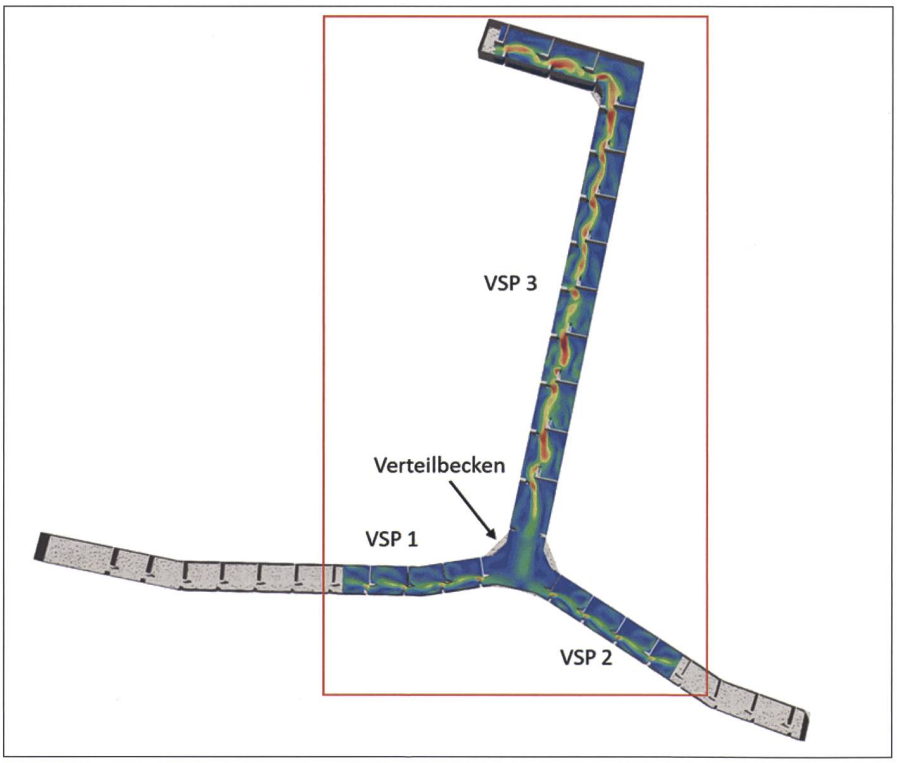

Bild 2: Modellperimeter der 3D-CFD-Modellierung (rot umrandet).

nige Diskretisierung verwendet, welche gegenüber der nächstfeineren keine Veränderung der Strömungsgrössen und -muster verzeichnete.

Sohle und Rauheit

Um den Einfluss des groben Sohlsubstrats auf die Strömung zu evaluieren, wurden Simulationen ohne und mit grobem Sohlsubstrat, welches Expositionen von bis zu 0,15 m über der mittleren Sohllage aufwies, durchgeführt. Diese wurden im Berechnungsgitter als physische Fliesshindernisse abgebildet *(Bild 3)*. Es kann festgehalten werden, dass bis auf lokale Effekte im Sohlbereich keine relevanten Veränderungen der Strömungsgrössen zu verzeichnen waren. Zwischen den Steinen, an den Steinen selbst und an den Wänden wurde die Sohlreibung über die äquivalente Sandrauigkeit berücksichtigt.

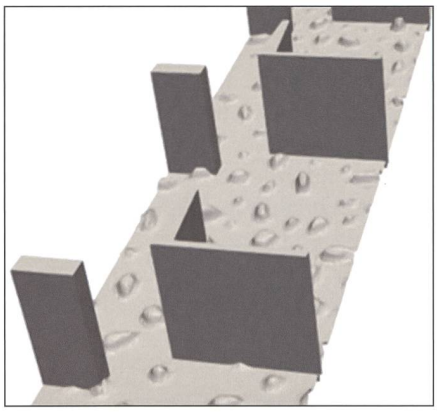

Bild 3: Ausgestaltung der Sohle.

Randbedingungen

An den Modellrändern (Zufluss- und Ausflussränder) müssen hydraulisch sinnvolle Randbedingungen (RB) definiert werden. Bei der Zufluss-RB wurden der Abfluss *Q* sowie die Wassertiefe *h* und am Ausflussrand ein fixes *h* über eine Druck-RB vorgegeben. Unter Einhaltung von *h* kann das zuströmende Wasser aus dem System fliessen. Die Berechnung von *Q* und *h* erfolgte anhand der Dimensionierung nach DWA *(DWA, 2014)*, was in diesen Bereichen als hinreichend erachtet werden kann.

Software und Solver

Die hydrodynamisch-numerischen Modellierungen wurden mit dem Softwarepaket OpenFoam *(OpenFOAM)* durchgeführt, welches die dreidimensionalen Strömungsvorgänge anhand der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen berechnet. Unter Anwendung der Finiten-Volumen-Methode kann eine Lösung der dreidimensionalen Strömungsgleichung berechnet werden. Für die Beschreibung der Fliessvorgänge im VSP wurden der InterFoam-Solver und das Zweigleichungs-Turbulenzmodell k-ω-SST verwendet. Der InterFoam-Solver berechnet die Wasseroberfläche über die Volume of Fluid Methode (VoF).

	Zufluss [m³/s]	Ausfluss Randbedingung	Wassertiefe beim Ausfluss	Bemerkung
Variante 1.1	0,80	Druck Randbedingung	VSP 1: 1,15 m VSP 2: 1,15 m	Hauptsimulation SST-SM (nach DWA)
Variante 1.2	0,80	Druck Randbedingung	VSP 1: 0,80 m VSP 2: 0,80 m	Hauptsimulation SD-SM (nach DWA)
Variante 2	0,80	zeroGradient	–	Verifikationssimulation Druckrandbedingung
Variante 3	0,80	wall	–	Verifikationssimulation Druckrandbedingung
Variante 4.1	0,80	Druck Randbedingung	VSP 1: 0,80 m VSP 2: 0,75 m	Sensitivität Verteilbecken auf unterschiedliche *h* bei VSP 1+2
Variante 4.2	0,80	Druck Randbedingung	VSP 1: 0,80 m VSP 2: 0,70 m	Sensitivität Verteilbecken auf unterschiedliche *h* bei VSP 1+2
Variante 4.3	0,80	Druck Randbedingung	VSP 1: 0,80 m VSP 2: 0,60 m	Sensitivität Verteilbecken auf unterschiedliche *h* bei VSP 1+2

Tabelle 2: Übersicht über die untersuchten Varianten.

2.3 Übersicht Varianten

Anhand unterschiedlicher Varianten wurden die generelle Funktionalität sowie die Sensitivität des Verteilbeckens auf unterschiedliche RB untersucht *(Tabelle 2)*. Die Verteilung des Zuflusses von VSP 3 auf VSP 1+2 wurde mit zwei verschiedenen *h* am Modellrand (strömungsdissipierendes (SD)-SM und SST-SM) nach Dimensionierung DWA *(DWA, 2014)*) untersucht (Variante 1.1+1.2). Zwei zusätzliche Varianten wurden simuliert, um eine Beeinflussung der Verteilung durch die Vorgabe des *h* am Modellrand auszuschliessen. Bei Variante 2 konnte das zuströmende Wasser ohne Rückstaueffekte frei aus dem Modell fliessen. Weiter wurden bei Variante 3 die Modellränder von VSP 1+2 als nicht durchströmbar definiert und der Anstieg von *h* an den Modellrändern über die Zeit beobachtet.

Die Einstiege von VSP 1+2 liegen ca. 90 m voneinander entfernt. Deshalb können diese durch unterschiedliche Wasserspiegel (WSP) in der Aare beeinflusst sein. Um die Sensitivität der unterschiedlichen Aare-WSP auf die Abflussverteilung in VSP 1+2 zu beurteilen, wurde *h* in VSP 2 gegenüber VSP 1 um -0,05 m, -0,10 m und -0,20 m reduziert (Varianten 4.1 – 4.3).

2.4 Bewertungskriterien der Fischdurchgängigkeit

Für die quantitative Beurteilung der Simulationsergebnisse wurden die Zielgrössen gem. IKAP nach *Tabelle 1* verwendet. Die Leistungsdichte ist dabei eine integrale Grösse, welche die durchschnittliche Turbulenz in einem VSP-Becken beschreibt. Anhand dieser vereinfachten Betrachtung können allerdings keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Turbulenz gemacht werden, welche ein Fisch beim Durchschwimmen der Schlitze erfährt. Deshalb wurde als weitere Zielgrösse die turbulente kinetische Energie (TKE) bei der Auswertung berücksichtigt. Die TKE beschreibt die Schwankung der kinetischen Energie in der Strömung. Die verwendeten Grenzwerte basieren auf unterschiedlichen Studien *(IKAP, 2014; Ana et al., 2012; Marriner et al., 2016)*, optimalerweise sollten die TKE-Werte kleiner 0,05 m²/s² sein und 0,10 m²/s² nicht überschreiten *(Ana et al., 2012; Marriner et al., 2016)*. Zu hohe TKE-Werte können die Passage erschweren *(Ana et al., 2012)*. Das SM wurde qualitativ über die Strömungsvektoren an der Wasseroberfläche bewertet. Bei einem SD-SM verläuft die Strömung aus dem Schlitz in die diagonal gegenüberliegende Ecke. Bei einem SST-SM verläuft die Strömung hingegen mehrheitlich als bauchiger, durchgehender Strömungsfaden von einem zum nächsten Schlitz *(BAW, 2020)*.

3. Berechnungsergebnisse Planzustand

3.1 Verteilbecken

Die Funktionsfähigkeit des Verteilbeckens wurde anhand des Volumenstroms über die Ausflussränder von VSP 1+2 ausgewertet. Ziel war die Gleichverteilung des Zuflusses auf VSP 1+2 von je 0,40 m³/s. In *Bild 4* sind der zeitliche Verlauf des Volumenstroms und das Volumenstromverhältnis (prozentuale Verteilung) zu VSP 1+2 für ausgewählte Varianten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl für die Hauptsimulation Variante 1.2 als auch die Verifikationssimulationen eine Gleichverteilung gegeben ist. Die Sensitivitätsanalyse bzgl.

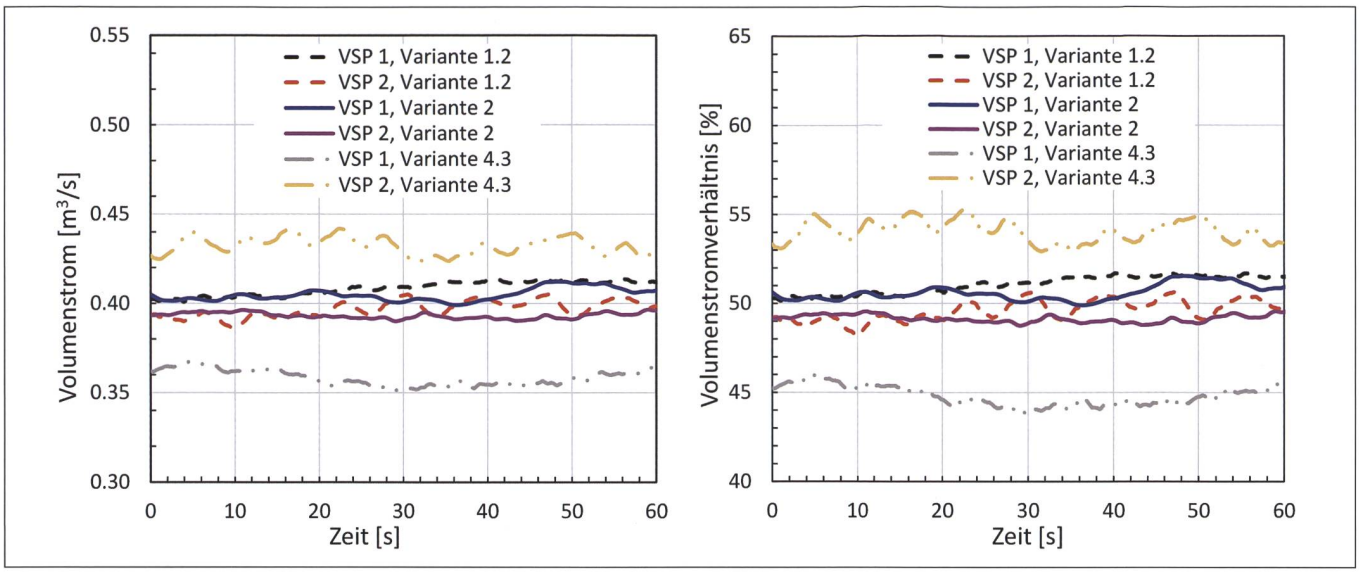

Bild 4: Links: Volumenstrom durch VSP 1+2. Rechts: Volumenstromverhältnis zwischen VSP 1+2.

unterschiedlicher Aare-WSP bei den Einstiegen VSP 1+2 zeigte lineare Zusammenhänge von *h* für VSP 2 und der Änderung des Volumenstroms. Eine Reduktion von *h* im VSP 2 um jeweils 0,05 m führt jeweils zu einer Erhöhung des Volumenstroms von ca. 3 Prozent.

3.2 Beurteilung der Fischgängigkeit

3.2.1 Wasserspiegel und Strömungsmuster

Auf Basis der Dimensionierung nach DWA *(DWA, 2014)* wurde im Unterwasser der Trennwände *h* mit 1,15 m (SST-SM) bzw. 0,80 m (SD-SM) und Wasserspiegeldifferenzen (*Δh*) zwischen den Becken von 0,12 m als Zielgrösse vorgegeben. In *Bild 5* sind die WSP entlang eines Schnittes durch die Mitte der Trennwände von VSP 2+3 für die Varianten 1.1+1.2 dargestellt. Bei der Variante 1.1 senkt sich das am Modellrand von VSP 2 fixierte *h* von 1,15 m sukzessive bis auf ca. 0,80 m in VSP 3 ab. Die *Δh* zwischen den Becken sind im VSP 2 deutlich kleiner als 0,12 m, im VSP 3 höher. Bei Variante 1.2 bildet sich im VSP 2 ein konstantes *h* von 0,80 m aus, die *Δh* betragen ca. 0,12 m. Im VSP 3 liegt das *h* im Mittel auf 0,75 m und somit unterhalb der vorgegebenen 0,80 m. Der WSP im VSP 3 unterliegt starken Schwankungen von +/- 0,12 m. Diese sind nicht auf numerische Phänomene zurückzuführen.

Die Ursache der WSP-Schwankungen in den Becken von VSP 3 sind mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass sich die Strömung im Übergangsbereich zweier SM befindet. Dies lässt sich ggf. über das Verhältnis von Schlitzbreite zu Beckenlänge resp. Beckenlänge zu Beckenbreite erklären, welches von den Vorgaben der DWA *(DWA, 2014)* abweicht. Im Zeitintervall von ca. 10 s wechselt das SM zwischen eher SST-SM und einem hydraulischen Kurzschluss (HKS). Die Strömungsvektoren an der Wasseroberfläche in *Bild 6* zeigen die Form beider SM. Beim eher

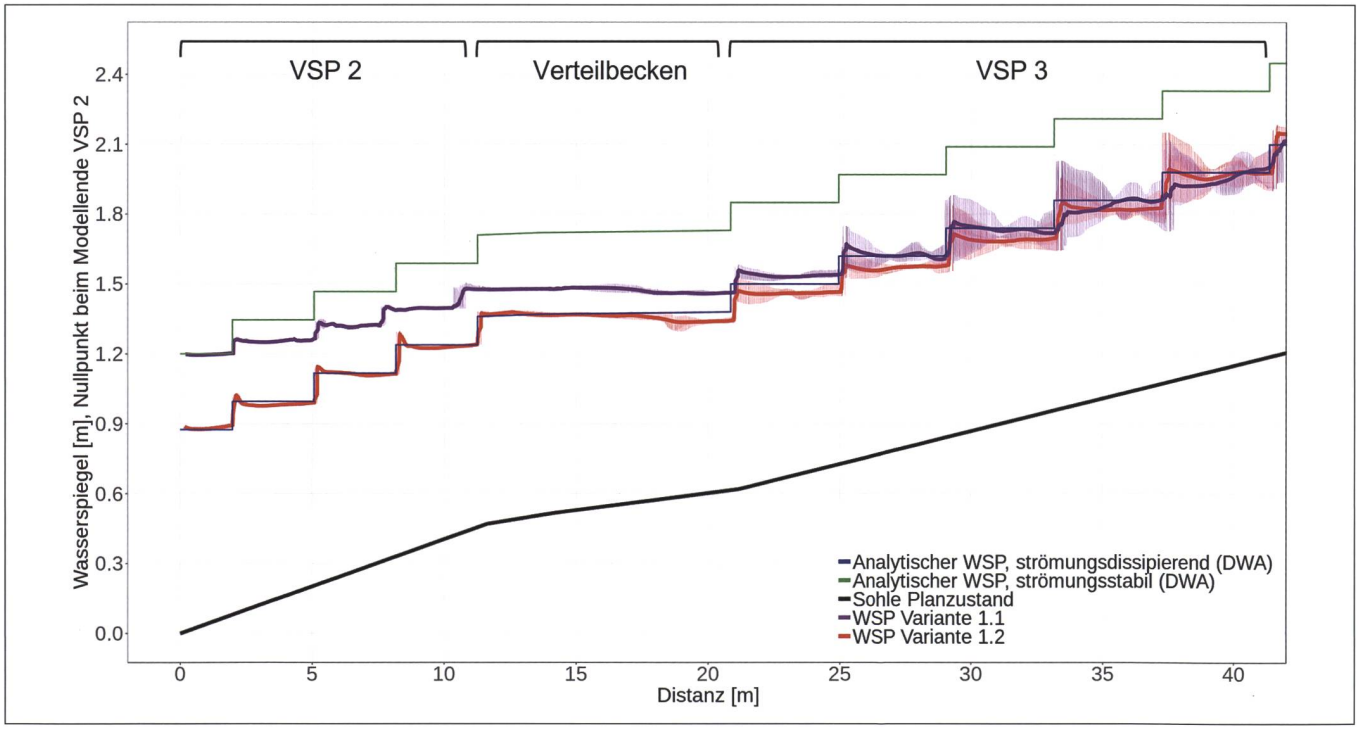

Bild 5: WSP entlang VSP 2+3. Die fetten Linien entsprechen dem WSP gemittelt über 10 s. Feine Linien zeigen die Schwankungsbreite.

SST-SM teilt sich der Strömungsfaden an der Leitwandspitze auf und bildet links und rechts des Strömungsfadens ausgeprägte Rezirkulationszonen *(Bild 6, links)*. Beim HKS verbindet der Strömungsfaden die Schlitze geradlinig, die Rezirkulationszonen sind bei diesem SM weniger ausgeprägt *(Bild 6, rechts)*. *Bild 7* zeigt links den WSP bei tendenziell SST-SM und rechts bei einem HKS. Im ersten Fall liegt er deutlich höher als im zweiten. Die Beobachtung legt nahe, dass die hydraulischen Verluste und die Energiedissipation bei einem SST-SM grösser sind als beim HKS. Das zeitlich variable Auftreten zweier SM mit unterschiedlichen hydraulischen Verlusten erklärt die zeitliche Variabilität des WSP im VSP 3. Wichtig ist in diesem Kontext, dass die mittleren, analytisch berechneten *h* für ein SST-SM gemäss DWA *(DWA, 2014)* ca. 0,35 m höher liegen als die Resultate der 3D-CFD-Simulation. Demgegenüber zeigt sich eine gute Übereinstimmung von *h* für ein SD-SM.

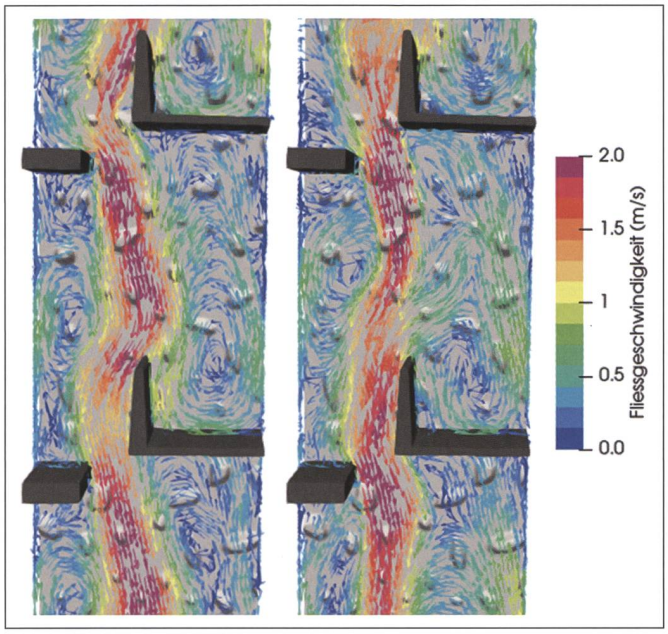

Bild 6: Strömungsvektoren (links: SST-SM, rechts: HKS) an der WSP-Oberfläche im VSP 3 zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten für die Variante 1.2.

3.2.2 Fliessgeschwindigkeiten und TKE in den Schlitzen

Für die optimale Passierbarkeit der FAH darf die Fliessgeschwindigkeit *(v)* 1.5 m/s nicht überschreiten *(DWA, 2014)*. *Bild 8* zeigt *v* und TKE in einem Schlitz von VSP 2+3 als Diagramm und in *Bild 9* als Konturplot. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die maximalen *v* in den Schlitzen von VSP 2+3 die Grenzwerte deutlich übersteigen. Die mittleren *v* liegen im Zielbereich.

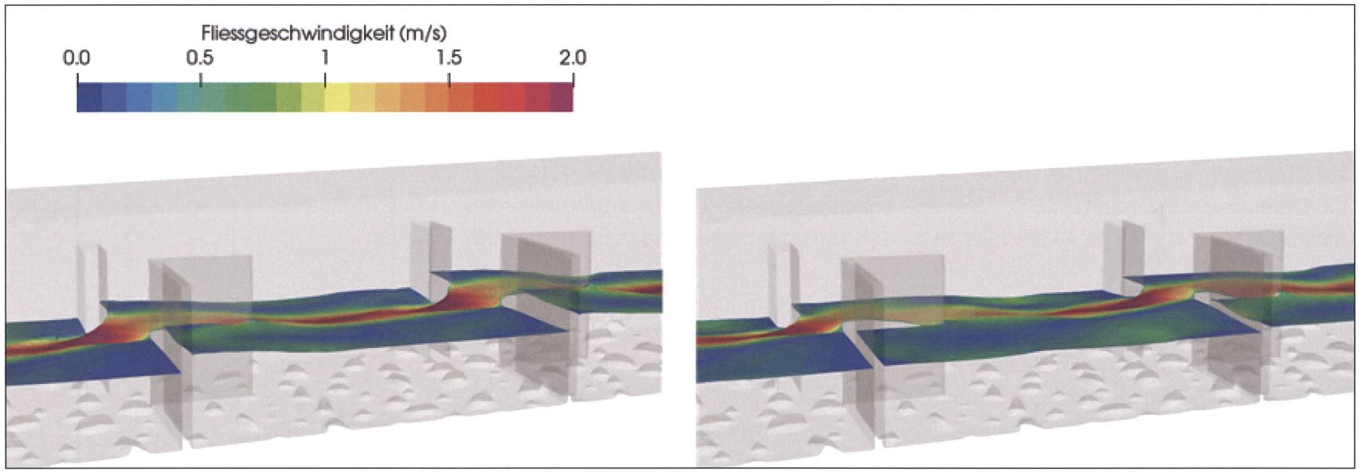

Bild 7: WSP im VSP 3 für die Variante 1.2, Fliessrichtung von rechts nach links. Die linke Abbildung zeigt den WSP bei einem SST-SM, die rechte bei einem HKS.

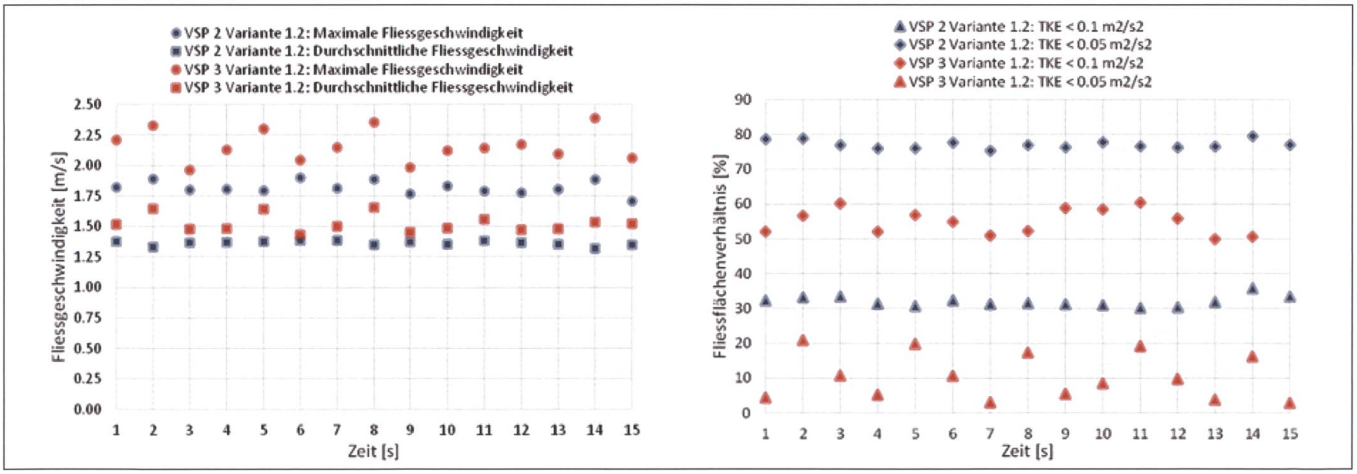

Bild 8: Links: QS-gemittelte *v* im Schlitz von VSP 2+3. Rechts: Prozentualer Anteil der QS-Fläche im Schlitz von VSP 2+3 mit TKE-Werten kleiner 0,05 m²/s² resp. 0,10 m²/s².

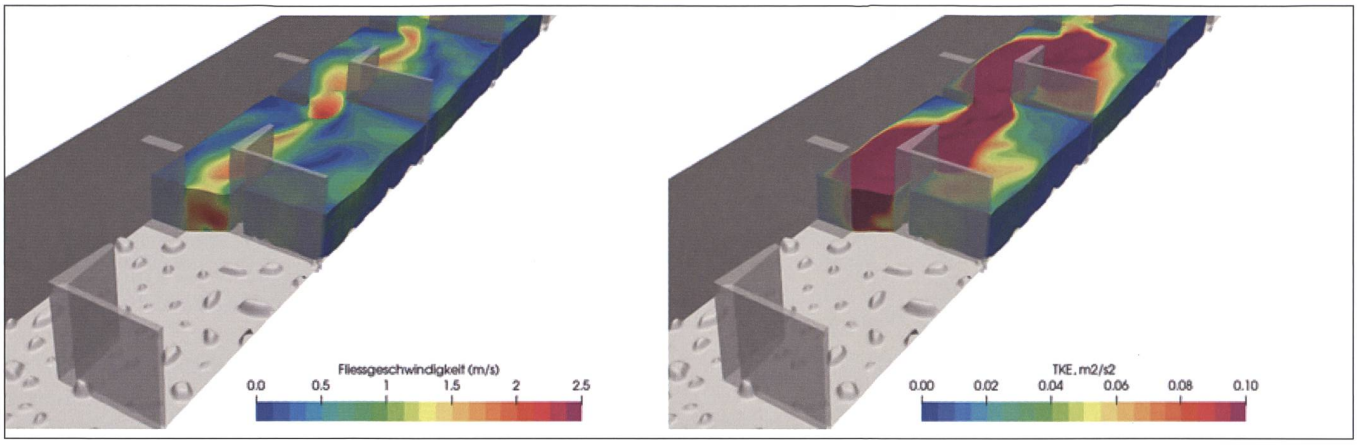

Bild 9: *v* (links) und TKE-Werte (rechts) an der Wasseroberfläche und durch den Schlitz für die Variante 1.2 (VSP 3).

Als weiteres Kriterium zur Beurteilung der Passierbarkeit wurde die TKE herangezogen. Anhand zweier Grenzwerte (0,05 m^2/s^2 und 0,10 m^2/s^2) kann jeweils der Flächenanteil im Querschnitt (QS) der Schlitze bestimmt werden, der unterhalb der Grenzwerte liegt. Die QS-Anteile im VSP 3 variieren über die Zeit, da diese von schwankenden WSP beeinflusst werden. In den Schlitzen von VSP 3 werden die Grenzwerte von 0,05 m^2/s^2 resp. 0,10 m^2/s^2 auf 3–20 Prozent resp. 50–60 Prozent der QS-Fläche in den Schlitzen eingehalten. Bei VSP 1+2 können die Grenzwerte hingegen auf rund 35 Prozent resp. 80 Prozent der QS-Flächen eingehalten werden *(Bild 8)*.

3.3 Diskussion Planzustand

Die Simulationsresultate von VSP 1+2 zeigen bezüglich *h* und Δh eine gute Übereinstimmung mit der analytischen Dimensionierung für ein SD-SM. Allerdings stellt sich in der Simulation in den Becken von VSP 1+2 ein SST-SM ein. Im VSP 3 wechselt das Strömungsmuster über die Zeit zwischen eher SST-SM und HKS. Dieser Wechsel verursacht Schwankungen bei *h*, welche im Mittel ca. 0,05 m unterhalb der analytischen Dimensionierung für ein SD-SM liegen. Die Ergebnisse zeigen für SST-SM deutlich geringere *h* als die analytische Berechnung. Bei der Dimensionierung nach DWA *(DWA, 2014)* wird für ein SD-SM ein Durchflussbeiwert verwendet, welcher einen geringeren hydraulischen Verlust ausgibt als für SST-SM. Demnach sollte bei der analytischen Dimensionierung *h* bei SD-SM kleiner sein als bei SST-SM. Dies widerspricht nicht nur den Erkenntnissen der 3D-CFD-Simulationen, sondern auch der Erwartung, durch SD-SM höhere hydraulische Verluste zu generieren. Die vorliegenden Berechnungsergebnisse können die Erkenntnisse aus Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zu Durchfluss- und Fliesstiefenbeziehungen in Fischpässen *(BAW, 2020)* bestätigen. Anhand eines physikalischen Fischpassmodells wurden Durchflussbeiwerte für SST-SM und SD-SM berechnet und mit den Werten gemäss DWA *(DWA, 2014)* verglichen. Eine gute Übereinstimmung konnte bei SD-SM festgestellt werden, für SST-SM hingegen ergaben sich in den physikalischen Versuchen deutlich grössere Durchflussbeiwerte als beim analytischen Ansatz gemäss DWA *(DWA, 2014)*. Die vorliegenden Berechnungsergebnisse sowie die Resultate der Studien der BAW/KIT *(BAW, 2020)* legen nahe, dass die DWA-Dimensionierungsansätze *(DWA, 2014)* für SST-SM zu hohe *h* ausgeben. Da die Dimensionierung des vorliegenden Fischpasses nach DWA *(DWA, 2014)* für SST-SM durchgeführt wurde, ist *h (Bild 5)* grundsätzlich zu gering und es kommt im VSP 3 zu hohen WSP-Schwankungen.

4. Strömungsoptimierung

4.1 Geometrie Optimierungsvariante

Die Planvariante des VSP 3 wurde aus den o.g. Gründen überarbeitet. Das Ziel der Optimierung war eine Erhöhung von *h* und eine Reduktion von *v* und TKE in den Schlitzen. Dazu wurde entsprechend der gewählten Beckenlänge von 4 m die Schlitzweite gemäss Empfehlung nach DWA *(DWA, 2014)* ermittelt und *h* mit dem analytischen Ansatz für ein SD-SM berechnet. Damit die neu berechnete Wassertiefe *h* im VSP 3 mit *h* in den VSP 1+2 harmoniert, wurde die Sohle im VSP 3 relativ zur Sohle von VSP 1+2 und dem Verteilbecken um 0,30 m herabgesetzt. Bei einer Schlitzbreite von neu 0,50 m statt 0,70 m entspricht gemäss der analytischen Berechnung das resultierende *h* 1,14 m bei einem *Δh* von 0,12 m. Die detaillierten Abmessungen der ursprünglichen und der optimierten Geometrie sind in *Bild 10* zu finden.

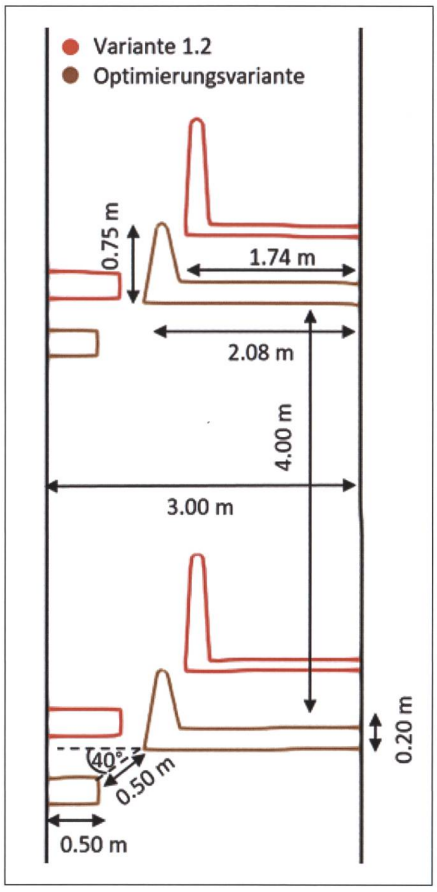

Bild 10: Beckenabmessungen VSP 3, Optimierungsvariante (braun), Variante 1.2 (rot).

4.2 Wasserspiegel und Strömungsmuster

Bild 11 zeigt den zeitlichen Verlauf der WSP entlang eines Schnittes durch die Mitte der Trennwände von VSP 2+3 für die Optimierungsvariante und die Variante 1.2. Im VSP 2 zeigen die beiden Simulationen keine wesentlichen Unterschiede. Das analytisch ermittelte *h* von 0,80 m und das *Δh* von 0,12 m werden eingehalten. Im VSP 3 zeigt die Optimierungsvariante eine deutliche Verbesserung gegenüber der Variante 1.2. Zum einen nehmen die zeitlichen WSP-Schwankungen deutlich ab und das simulierte *h* zeigt eine

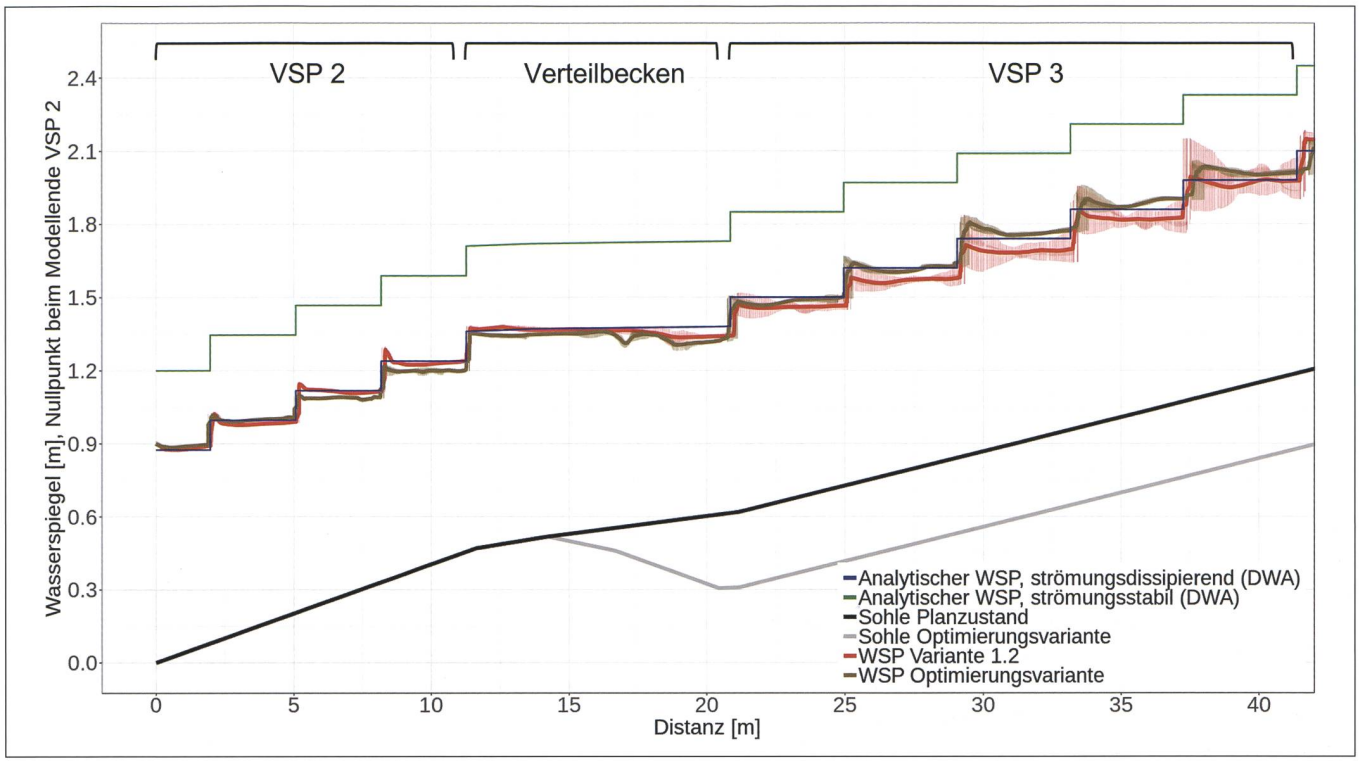

Bild 11: WSP entlang VSP 2+3. Die fetten Linien entsprechen dem WSP gemittelt über 10 s. Feine Linien zeigen die Schwankungsbreite.

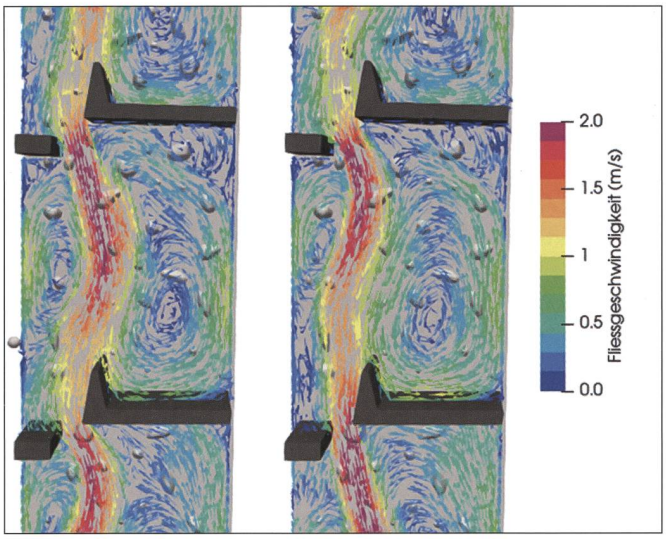

Bild 12: Strömungsvektoren an der WSP-Oberfläche im VSP 3, zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten für die Optimierungsvariante.

gute Übereinstimmung mit der analytischen Berechnung. Δh liegt zwischen 0,12–0,14 m.

Bild 12 zeigt die Strömungsvektoren im VSP 3 für die Optimierungsvariante zu zwei Zeitpunkten. Die zeitlichen Schwankungen des SM wurden deutlich reduziert und es wurde eher ein SST-SM erreicht. Links und rechts des Strömungsfadens formen sich Rezirkulationszonen.

4.3 Fliessgeschwindigkeiten und TKE in den Schlitzen

Bild 13 zeigt v und TKE in einem Schlitz des VSP 3 als Diagramm und *Bild 14* als Konturplot. Die Optimierungsvariante zeigt signifikant bessere Ergebnisse als Variante 1.2. Der Grenzwert für das maximale v wird noch nicht im gesamten QS des Schlitzes eingehalten, der Flächenanteil mit $v < 1{,}5$ m/s konnte aber von 53 Prozent auf 63 Prozent erhöht werden. Die Abflussflächenanteile mit TKE-Werten kleiner 0,05 m²/s² erreichen bei der Optimierungsvariante 15–30 Prozent und sind damit fast doppelt so gross wie bei Variante 1.2. Keine klare Verbesserung zeigen die Abflussflächenanteile mit TKE-Werten kleiner 0,1 m²/s², einige Zeitschritte sind mit ca. 80–90 Prozent deutlich besser, andere sind mit Variante 1.2 vergleichbar. Insgesamt konnten die hydraulischen Parameter durch die geometrischen Anpassungen des VSP 3 deutlich verbessert werden und es ist zu erwarten, dass die Passierbarkeit signifikant erhöht wird.

5. Zusammenfassung

Am WKW Bannwil wird eine neue Fischaufstiegshilfe mit dem Ziel geplant, die Längsvernetzung für alle Fischarten und -grössenspektren der Aare zu gewährleisten. Im Rahmen einer 3D-CFD-Simulation wurde untersucht, welche Einflüsse das geplante Verteilbecken und die Forderung nach strömungsstabilen Abflussverhältnissen auf die Passierbarkeit haben. Die Simulationen haben gezeigt:

- Die Gleichverteilung des Abflusses im Verteilbecken bei identischen vorgegebenen Fliesstiefen an den Modellrändern der beiden Vertikalschlitzpässe (VSP) 1+2 ist eingehalten.
- Es stellt sich eine lineare Zunahme der Ungleichverteilung des Abflusses zwischen VSP 1+2 von 3 Prozent, für jede Zunahme der vorgegebenen Fliesstiefenunterschiede an den Modellrändern um 0,05 m, ein.
- Für strömungsstabile Strömungsmuster unterschreiten die Fliesstiefen im numerischen Modell die analytisch nach DWA *(DWA, 2014)* dimensionierten um bis zu 0,35 m.
- Eine gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse gemäss Dimensionierung nach DWA *(DWA, 2014)* für ein strömungsdissipierendes Strömungsmuster wird demgegenüber bestätigt, obwohl ein strömungsstabiles Strömungsmuster beobachtet wird.

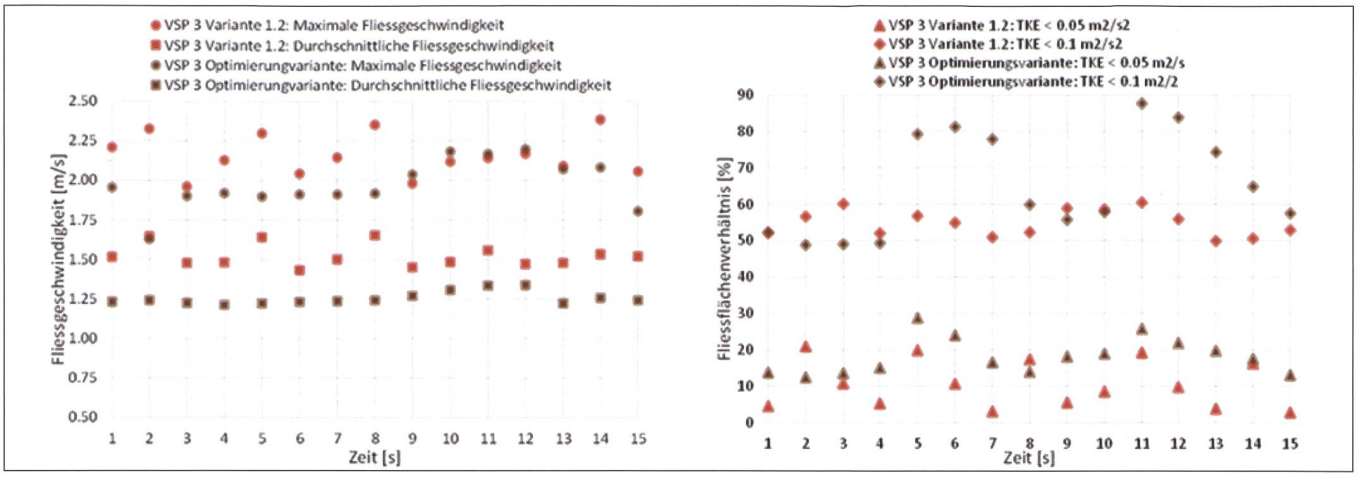

Bild 13: Links: QS-gemittelte *v* in einen Schlitz von VSP 3. Rechts: prozentualer Anteil der QS-Fläche im Schlitz von VSP 3 mit TKE-Werten kleiner 0,05 m²/s² resp. 0,10 m²/s².

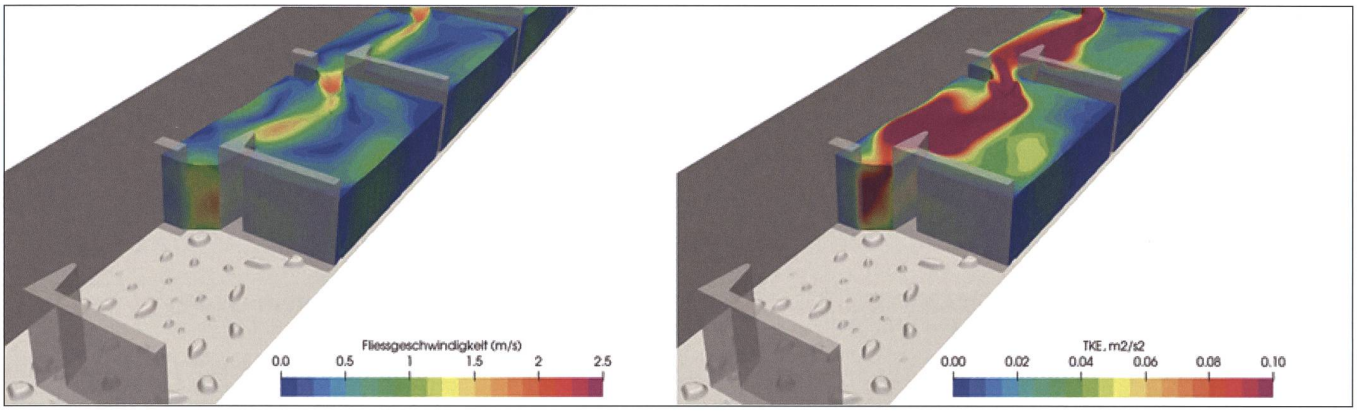

Bild 14: *v* (links) und TKE-Werte (rechts) an der Wasseroberfläche und durch den Schlitz für die Optimierungsvariante (VSP 3).

- Die vorliegenden Berechnungsergebnisse sowie die Resultate der Studien der BAW/KIT *(BAW, 2020)* legen nahe, dass die DWA *(DWA, 2014)* Dimensionierungsansätze für strömungsstabile Strömungsmuster in Vertikalschlitzpässen zu hohe Fliesstiefen bzw. zu geringe Abflüsse ausgeben.

Bei der analytischen Dimensionierung werden viele Details der komplexen Hydraulik in Vertikalschlitzpässen durch eine gemittelte Betrachtung vernachlässigt. Dies, obwohl das resultierende Strömungsmuster und die Fliesscharakteristiken von genau diesen Details abhängig sind. Bei der Planung sollten diese Aspekte berücksichtigt werden, insbesondere wenn Sonderbauwerke vorhanden sind oder strömungsstabile Strömungsmuster angezielt werden. 3D-CFD-Simulationen können als Planungsunterstützung zusätzliche Sicherheit geben und Risiken minimieren. Wird die Funktionalität bereits vor der baulichen Umsetzung gewährleistet, können teure Umbaumassnahmen verhindert werden. Mit der Unterstützung von 3D-CFD-Simulationen können Fischaufstiegshilfen bestmöglich optimiert und ihr fischökologischer Nutzen kann kostengünstig maximiert werden.

Danksagung

Die Autoren danken *Stephan Egli* (BKW Energie AG, Grid-&Hydro-Engineering, Leiter Ressort Ingenieurbau&Umwelt) für die Hinweise und die kritischen Anmerkungen.

Quellen:

Ana T. Silvaa, Christos Katopodis, José M. Santos, Maria T. Ferreira, António N. Pinheiro, (2012). Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. Ecological Engineering, 40, 314–328

Bryan A. Marriner, Abul Basar M. Baki, David Z. Zhu, Jason D. Thiem, Steven J. Cooke, Chris Katopodis, (2014). Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in avertical slot fishway. Ecological Engineering, 63, 88–101

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). BAW Mitteilungen Nr. 106, Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise, September 2020

Bundesgesetz vom 24.01.1991 (Stand 01.01.2011) über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG; SR 814.20)

DWA (2014): Merkblatt 509, Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hg.), Hennef

Interkantonale Aareplanung (IKAP): Strategische Planung Sanierung Fischgängigkeit, Fischwanderhilfen bei Aarekraftwerken, Einheitliche Grundsätze der Kantone. Version 1.1., 15.08.2014

Marriner, B. A., Baki, A. B., Zhu, D. Z., Cooke, S. J., & Katopodis, C. (2016). The hydraulics of a vertical slot fishway: A case study on the multi-species Vianney-Legendre fishway in Quebec, Canada. Ecological Engineering, 90, 190–202

OpenFOAM, v.1912, www.openfoam.com

Salim, Salim M. & Cheah, S.C. (2009). Wall y+ strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows. Int. MultiConf. Eng. Comput. Sci. (IMECS). 2. 1–6

Autoren:

Mattias Deller, TK CONSULT AG, mattias.deller@tkconsult.ch

Steffen Corbe, TK CONSULT AG, steffen.corbe@tkconsult.ch

Sandra Krähenbühl, BKW Energie AG, Ingenieurbau & Umwelt, sandra.kraehenbuehl@bkw.ch

Dr. sc. ETH Zürich Carl Robert Kriewitz-Byun, Kanton Zürich, AWEL, robert.kriewitz@bd.zh.ch