

Optimierte Auslegung von beckenartigen Fischaufstiegsanlagen - Strömungssimulation als Hilfsmittel

Dr.-Ing. Stephan Heimerl
EnBW Kraftwerke AG, Bereich Bautechnik und Wasserkraftplanung (TB)
Lautenschlager Straße 20, 70173 Stuttgart, S.Heimerl@enbw.com
Mitglied des DWA-Fachausschusses „Durchgängigkeit von Fließgewässern“

Dipl.-Ing. Margit Hagemeyer
Uracher Str. 10, 73312 Geislingen/Steige, Margit.Hagemeyer@gmx.de

Fischaufstiegsanlagen werden gebaut, um die aufwärtsgerichtete Durchgängigkeit von Fließgewässern zu gewährleisten. Um beurteilen zu können, ob der Aufstieg aus hydraulischer Sicht überhaupt funktionieren kann, ist es von Vorteil, wenn man die Strömungsverhältnisse darin detailliert kennt. Beobachtungen der Anlagen und dabei insbesondere der sichtbaren Wasseroberfläche lassen lediglich erahnen, was im Becken genau vor sich geht.

Gerade für die Zusammenarbeit mit den in diesem Feld tätigen Fischereibiologen und anderen Fachleuten, die häufig nicht über entsprechende Detailkenntnisse verfügen, kann die Visualisierung des numerisch simulierten Abflusses in beckenartigen Fischaufstiegsanlagen eine bedeutende Erleichterung darstellen. Durch die anhand von umfangreichen Messungen kalibrierten Simulationen können die meist nicht trivialen Strömungsmuster für jeden sichtbar gemacht werden.

Seit über 20 Jahren wird die Hydraulik in Fischaufstiegen untersucht. Bei den beckenartigen Anlagen lag das Hauptaugenmerk der Forscher auf Schlitz-Pässen, die vor allem in Nordamerika weit verbreitet sind. In Veröffentlichungen von Rajaratnam et al. (1986) [9] wurden mehrere Bauarten von Schlitz-Pässen und die Hauptströmung näher betrachtet. Weiterführend analysierten Wu et al. (1999) [10] und Puertas et al. (2004) [8] für spezielle Schlitz-Pässe die Geschwindigkeitsverteilung und die Oberflächengeometrie. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden mehr oder weniger umfangreiche Geschwindigkeitsmessungen in einzelnen Becken durchgeführt.

Von Nachteil ist, dass die Aufnahme der Messdaten aufgrund des großen Aufwandes nie für alle Punkte gleichzeitig geschehen kann, weshalb letztlich nicht bekannt ist, wie die einzelnen turbulenten Geschwindigkeiten im Gesamtsystem miteinander verbunden sind. Die Ergebnisse stellen somit allenfalls die Komponenten der Geschwindigkeiten in den betrachteten Ebenen dar, nicht aber wie das Wasser durch das gesamte Becken oder gar die aufeinander folgende Beckenkaskade fließt.

Seit einigen Jahren werden auch vereinzelt numerische Modelle eingesetzt, um die Strömung darzustellen. In Japan verwendeten Fujihara et al. (2002) [2] ein zweidimensionales Modell. In Australien wurde von Barton et al. (2003) [1] der von Wu et al. (1999) [10] untersuchte Schlitzpass offensichtlich dreidimensional und mit freier Oberfläche modelliert. Die bisher veröffentlichten numerischen Berechnungen wurden jedoch nur mittels Geschwindigkeitsvektoren analog zu den herkömmlichen Laboruntersuchungen visualisiert.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes der EnBW Energie Baden-Württemberg AG (EnBW) [6]/[7] wurde in einer Diplomarbeit [3]/[4] nun vorrangig für den Becken-Schlitz-Pass (BSP) aber auch für klassische Schlitz-Pässe (SP) geklärt, welchen Weg das Wasser durch die Becken nimmt. Mit Unterstützung des Instituts für Strömungsmechanik und hydraulische Strömungsmaschinen der Universität Stuttgart wurden in einem ersten Schritt vereinfachte numerische Modelle der Fischaufstiegsanlagen erstellt, berechnet und die Ergebnisse visualisiert. Anhand von Beobachtungen, Messkampagnen und Erkenntnissen über diese Typen

von beckenartigen Fischaufstiegsanlagen konnten die Randbedingungen des Modells so angepasst werden, dass die Realität beeindruckend genau abgebildet wird. Die Berechnungsergebnisse wurden anschließend u. a. mittels Stromlinien visualisiert, die die Bewegungen des Wassers im Becken dreidimensional wiedergeben.

Die sich daraus schließlich ergebende Visualisierung der numerischen Simulationen zeigt anschaulich, wie das Wasser durch die Becken der Fischaufstiegsanlagen strömt. Die Erstellung eines Modells ist allerdings keineswegs trivial, sondern birgt mannigfaltige zu lösende Probleme, wie beispielsweise die Umsetzung der freien Oberfläche, des Einflusses des Sohlensubstrats und der weiteren Randbedingungen mit sich. Trotz aufschlussreicher Bilder kann die Numerik Modellversuche bzw. Messungen in Natur noch nicht gänzlich ersetzen. Umgekehrt reicht aber die alleinige Darstellung der Messdaten bisher nicht dazu aus, die Strömungsmuster vollständig zu verstehen. Die auch weiterhin betriebenen Untersuchungen sollen hier zu weiteren Erkenntnissen führen.

1 Motivation

Zahlreiche Untersuchungen beckenartiger Fischaufstiegsanlagen wurden am Schlitz-Pass durchgeführt. Die Ergebnisse der physikalischen oder numerischen Studien wurden immer als Ebenen mit Geschwindigkeitsvektoren präsentiert, die keinen Aufschluss über den Weg des Wassers durch das Becken geben. Für den speziell entwickelten Becken-Schlitz-Pass gibt es bisher keine Messungen an einem physikalischen Modell oder eine numerische Simulation. Aufgrund der Geometrie der Einbauten im Unterschied zum Schlitz-Pass sind Untersuchungen der Hydraulik in jedem Fall von Interesse, um genau kennen zu lernen, wie sich die Strömung ausbildet.

Im Rahmen eines EnBW-Forschungsprojekts [6]/[7] wurden in einem Becken der Fischaufstiegsanlage Rastatt-Niederbühl umfangreiche Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Die alleinige Visualisierung dieser Messdaten gibt jedoch keinen Aufschluss über den Weg des Wassers durch die Becken der Fischaufstiegsanlage.

2 Grundsätzliches zur numerischen Modellierung

Die wesentliche Aufgabe der Einbauten in Fischpässen ist es, für die aufsteigenden Fische Bereiche mit reduzierten Strömungsgeschwindigkeiten zu schaffen. Die Trennwände erzeugen dabei große Turbulenzen im Becken, durch die die Energie des Wassers abgebaut wird. Dabei bewegt sich das Wasser auf verschiedenen Wegen je nach Geometrie der Bauweise durch das Becken. Zahlreiche Autoren haben bereits versucht, diese Strömungsverhältnisse darzustellen, meistens jedoch nur im ein- oder zweidimensionalen Fall. Um die komplexen Vorgänge und Zusammenhänge für jeden verständlich darstellen zu können, wurden im Rahmen des Forschungsprojekts 3D-Simulationen der Beckenströmungen vorgenommen.

Die gesamten Simulationen verlaufen nach einem Grundschemata: Zuerst wird eine Beckengeometrie mit einer CAD-Software (ProEngineer) erstellt, deren Geometriedaten an eine Software zur Diskretisierung (ANSYS ICEM CFD) übergeben wird. Nachdem Randbedingungen und Gittergeometriedaten erstellt sind, wird alles an einen Gleichungslöser (FENFLOSS) übergeben. Abschließend kann das Rechenergebnis mit einer Graphiksoftware (Visual3p) ausgewertet werden.

2.1 Probleme bei der numerischen Modellierung

Ein numerisches Modell korrekt an die Realität anzupassen ist nicht trivial. Mehrere Schwachstellen des hier verwendeten Modells wurden erst im Laufe der Arbeit erkannt und soweit möglich beseitigt. Die Hauptprobleme stellten das starre Gitter der finiten Elemente

und dabei die Überfallgeometrie sowie die Anzahl der zu berechnenden Becken und der Durchfluss dar.

Der Abfluss in offenen Gerinnen ist immer durch eine freie Oberfläche charakterisiert. Sie bildet zwischen dem Fluid Wasser und dem Fluid Luft eine Grenzschicht, an der besondere Randbedingungen herrschen. FENFLOSS ist für starre Gitter ausgelegt und wird fast ausschließlich für die Berechnung geschlossener sowie mit Wasser voll gefüllter Systeme wie Turbinen und Saugrohre verwendet. Dies hat zur Folge, dass die Geometrie der Fischaufstiegsanlagen einem Rohr entspricht, bei der nicht nur die Wände, sondern auch die eigentlich freie Oberfläche als feste Berandung betrachtet wird. Um die freie Oberfläche nicht ganz zu vernachlässigen, kann dieser Fläche die Eigenschaft reibungsfrei zugeordnet werden.

Den Übergang von einer Beckenoberfläche zur nächsten bildet der Überfall. Die Form und Ausbildung der Überfälle stellt eine Schwierigkeit und auch einen weiteren Schwachpunkt in der Umsetzung dar, für den unterschiedliche Lösungen gefunden werden mussten.

Zu Beginn wurden die Berechnungen mit einem halben und einem ganzen Becken erstellt. An der Eintrittsfläche wurde das Wasser gleichmäßig verteilt in das Becken geleitet, weshalb sich auf der relativ kurzen Strecke keine realen Einströmungsverhältnisse ausbilden können. Um diesen Einfluss zu vermeiden wurde die Anzahl der Becken variiert. Anhand der Ergebnisse wurde deutlich, dass nicht nur der Eintritt, sondern auch der Austritt die Strömung maßgeblich beeinflusst. Daher wurde eine Beckenkaskade betrachtet, um die Becken zu bestimmen, deren Strömung von Ein- und Austritt unbeeinflusst sind. Mit diesen Erkenntnissen wurde die minimale Anzahl der Becken für die konkreten Berechnungen festgelegt. Für den Becken-Schlitz-Pass sowie den Schlitz-Pass hat sich neben dem halben Anströmbecken eine Anzahl von mindestens vier ganzen Becken herauskristallisiert. Die ersten und letzten Becken sollten jeweils nicht in der anschließenden Auswertung berücksichtigt werden, um eventuelle Aus- und Eintrittseinflüsse auszuschließen.

Bei Fischaufstiegen ist neben der maximal zulässigen Geschwindigkeit auch der Durchfluss zu beachten. Für die verschiedenen Beteiligten an der Planung eines Fischaufstiegs ist der Abfluss wichtig, entweder um den Fischaufstieg zu sichern oder aber im Sinne der für die Stromerzeugung verlorenen Wassermenge.

Bei den ersten Berechnungen flossen immer 20 % mehr Wasser pro Becken hinaus als hinein. Bei der Anordnung mehrerer Becken hintereinander addierten sich die Mehrwassermengen. Mit angepassten Parametern in FENFLOSS konnte diese Abweichung reduziert werden, jedoch gelang das nicht so weit, dass nur die Wassermenge wieder austritt, die auch in die Geometrie eintritt (s. a. Abbildung 1). Als Erklärung für diese verbleibende Differenz kann neben dem Einfluss aus numerischen Problemen am Austritt derzeit nur die von der Realität abweichende Oberflächengeometrie genannt werden.

Die schließlich in der Visualisierungssoftware dargestellte maximale Geschwindigkeit des Ergebnisses lag über dem aus den Naturmessungen erwarteten Wert. Dieser Spitzenwert trat jedoch nicht an einer maßgebenden Stelle auf, sondern resultiert offensichtlich aus numerischen Problemen.

Das Ergebnis einer Berechnung liegt im Allgemeinen vor, wenn z. B. der Durchfluss weitgehend konstant bleibt, die Rechnung also auskonvergiert, wie ca. ab Punkt B in Abbildung 1. Zunächst wurden die Rechnungen nur stationär durchgeführt, wobei bereits zahlreiche Rechnungen abbrachen. Der Abbruch einiger Rechnungen kam durch verschiedene Ursachen zustande, wie beispielsweise in der Zwischeniteration oder durch nicht zu lösende Turbulenz- oder Geschwindigkeitsgleichungen. Einige der Geometrien konnten nach einigen Versuchen dennoch stationär berechnet werden. Diese Berechnungen wurden infolge des Durchflussproblems bei dem Durchfluss im Austrittsquerschnitt abgebrochen, der auch in die Geometrie eintritt, wie beispielsweise am Punkt A in Abbildung 1. Andere Rechnungen hingegen zeigten einen für instationäre Vorgänge typischen Abbruch, indem diese mit Hilfe der

Gleichungen für stationäre Strömungen nicht gelöst werden können. Daraufhin wurden die Geometrien instationär berechnet, die bei stationären Verhältnissen abbrechen bzw. nicht konvergiert sind. Aber auch bei instationären Fließvorgängen konnte das Durchflussproblem nicht abschließend gelöst werden (Abbildung 1). Deshalb wird für alle Berechnungen darauf hingewiesen, dass die Geschwindigkeitsverteilungen und deren Betrag der Realität zwar sehr nahe kommen, ein optimiertes Modell jedoch noch bessere Ergebnisse erzielen dürfte.

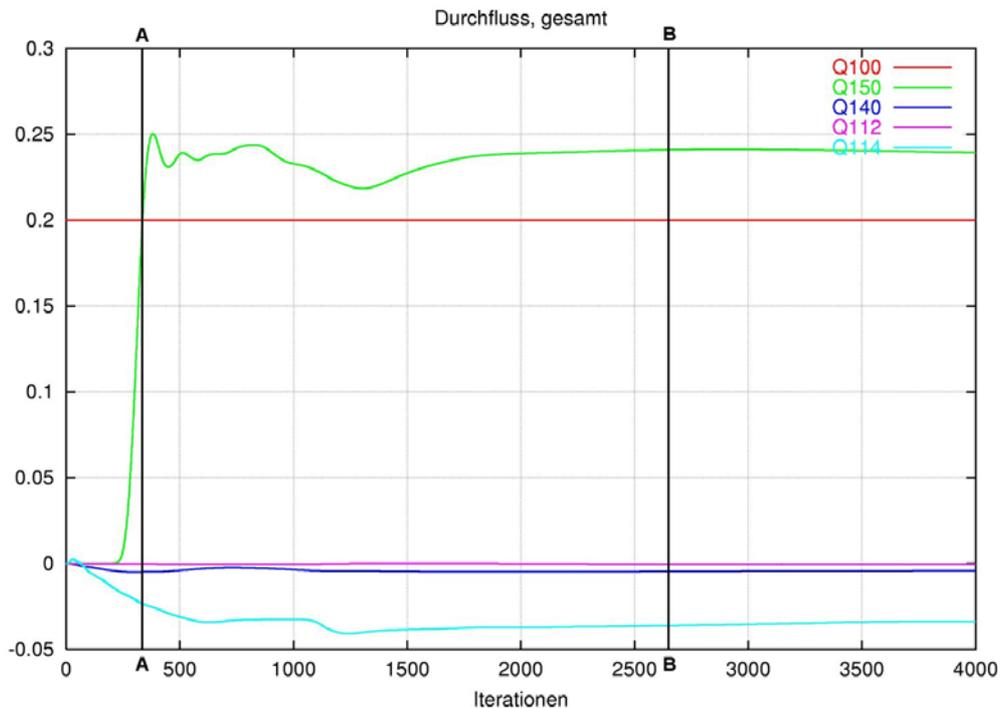


Abbildung 1: Gesamtdurchfluss bei einer instationären Berechnung (BSP Rastatt-Niederbühl)

2.2 Modellierung des Becken-Schlitz-Passes

Die Becken des exemplarisch untersuchten Becken-Schlitz-Passes in Rastatt-Niederbühl nahe Karlsruhe in Südwestdeutschland haben eine Länge von 2,60 m, eine Breite von 1,20 m und bauen bei einer mittleren Wassertiefe von 0,90 m pro Becken eine Wasserspiegeldifferenz von 20 cm ab. Der Durchfluss der Anlage liegt bei 200 l/s. Einen ersten Eindruck der Strömung erhält man aus einer Gesamtansicht der visualisierten Ergebnisse in Abbildung 2. Die beiden Hauptströme aus den Öffnungen in der Trennwand sind deutlich zu erkennen. Das erste Becken wird wegen des Einlaufeinflusses nicht in die genaueren Betrachtungen einbezogen. Der Strahl aus dem Schlitz bewegt sich hauptsächlich an der Oberfläche und der rechten Außenwand entlang. Das Wasser aus dem Schlupfloch strömt ebenso direkt am Boden auf die Trennwand zu. Es bilden sich großflächige Rückströmwirbel unterhalb des Überfallstrahls, neben und über dem Schlupflochstrahl, die in den Stromliniendarstellungen besser zu erkennen sind.

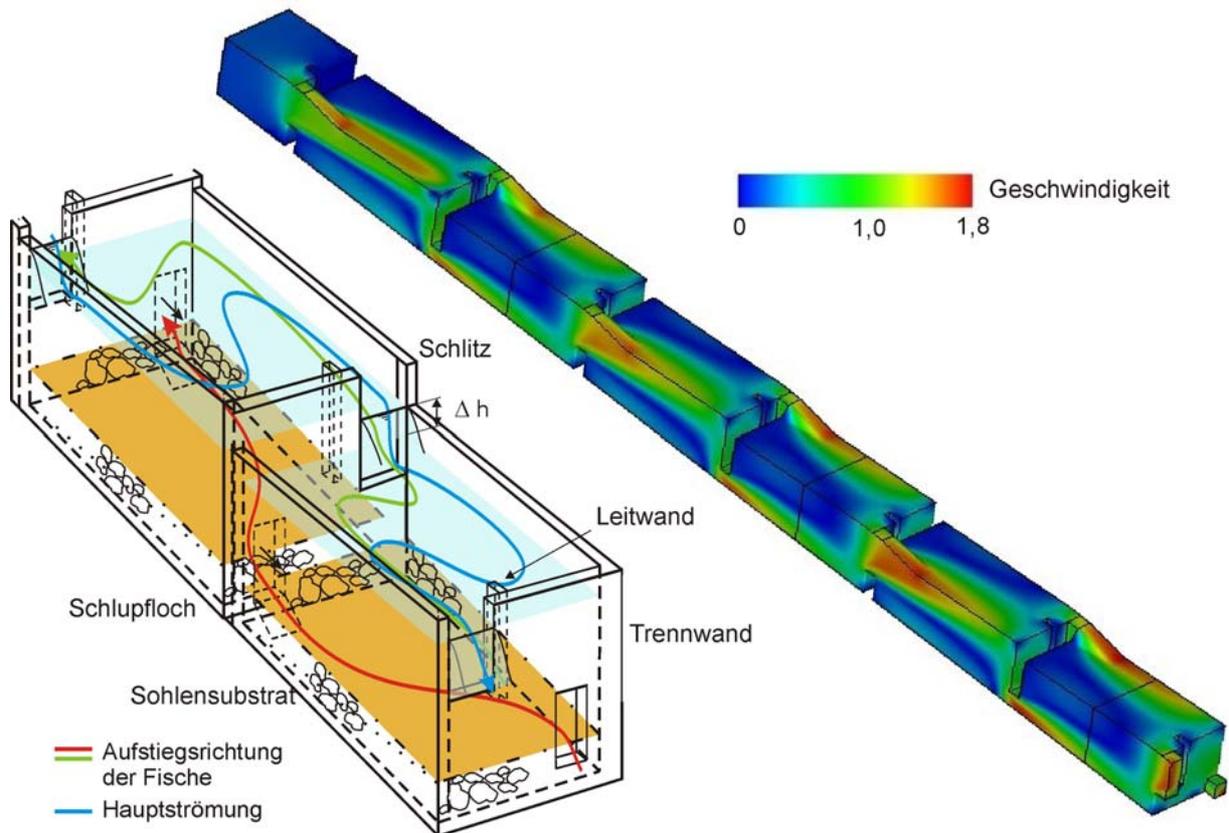


Abbildung 2: Grundschemata des Becken-Schlitz-Passes: Visualisierte Berechnungsergebnisse des Becken-Schlitz-Passes auf der Berandungsfläche

In Abbildung 3 ist gut zu erkennen, wo sich die Hauptströmungen im Becken befinden und wie diese durch die Wände gebremst und umgelenkt werden. Durch die Größe der Pfeile ist gut sichtbar, dass nur die Hauptströmungen aus den Öffnungen heraus hohe Geschwindigkeiten haben. Im Rest des Beckens ist die Farbe blau vorherrschend und somit überwiegen kleine Geschwindigkeiten, die für die beruhigten Zonen wichtig sind.

Die genaueste Aussage über den Weg des Wassers kann mit Stromlinienbildern getroffen werden. Die Stromlinien zeigen den Weg der Wasserteilchen, die zum Zeitpunkt t auf der Erzeugenden liegen, durch die Geometrie. Stromlinien können von Linien oder Flächen erzeugt werden. In Abbildung 4 ist zu erkennen, dass sich das Wasser aus dem Überfallstrahl zum einen Teil direkt hin zum nächsten Schlitz und zum anderen Teil auf die Trennwand (Wand 1) zu bewegt, wo es nach unten abgelenkt wird. Ein Teil dieses umgelenkten Wassers fließt durch das Schlupfloch, ein weiterer Teil in den Wirbel unter dem Strahl und der letzte Teil geht unter der Leitwand hindurch und durch den Schlitz.

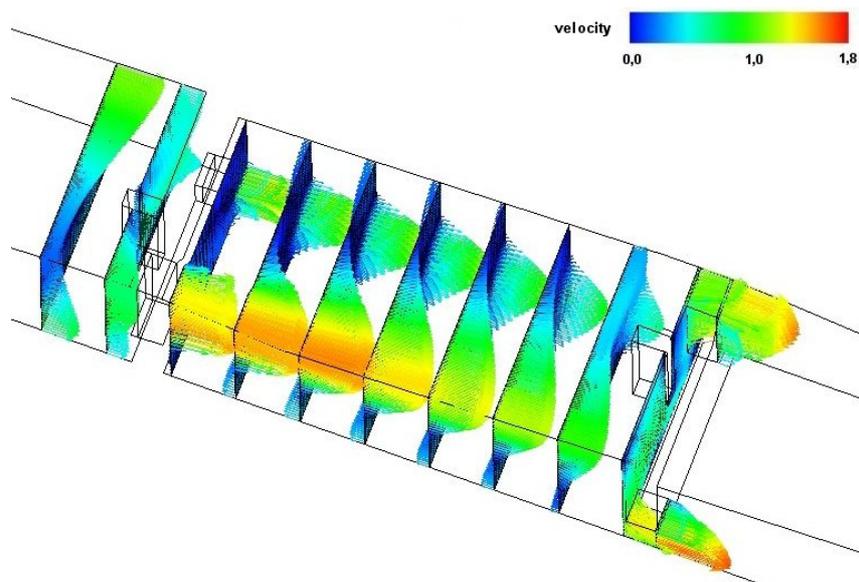


Abbildung 3: Darstellung der 3D-Strömungsvektoren in verschiedenen Schnittebenen

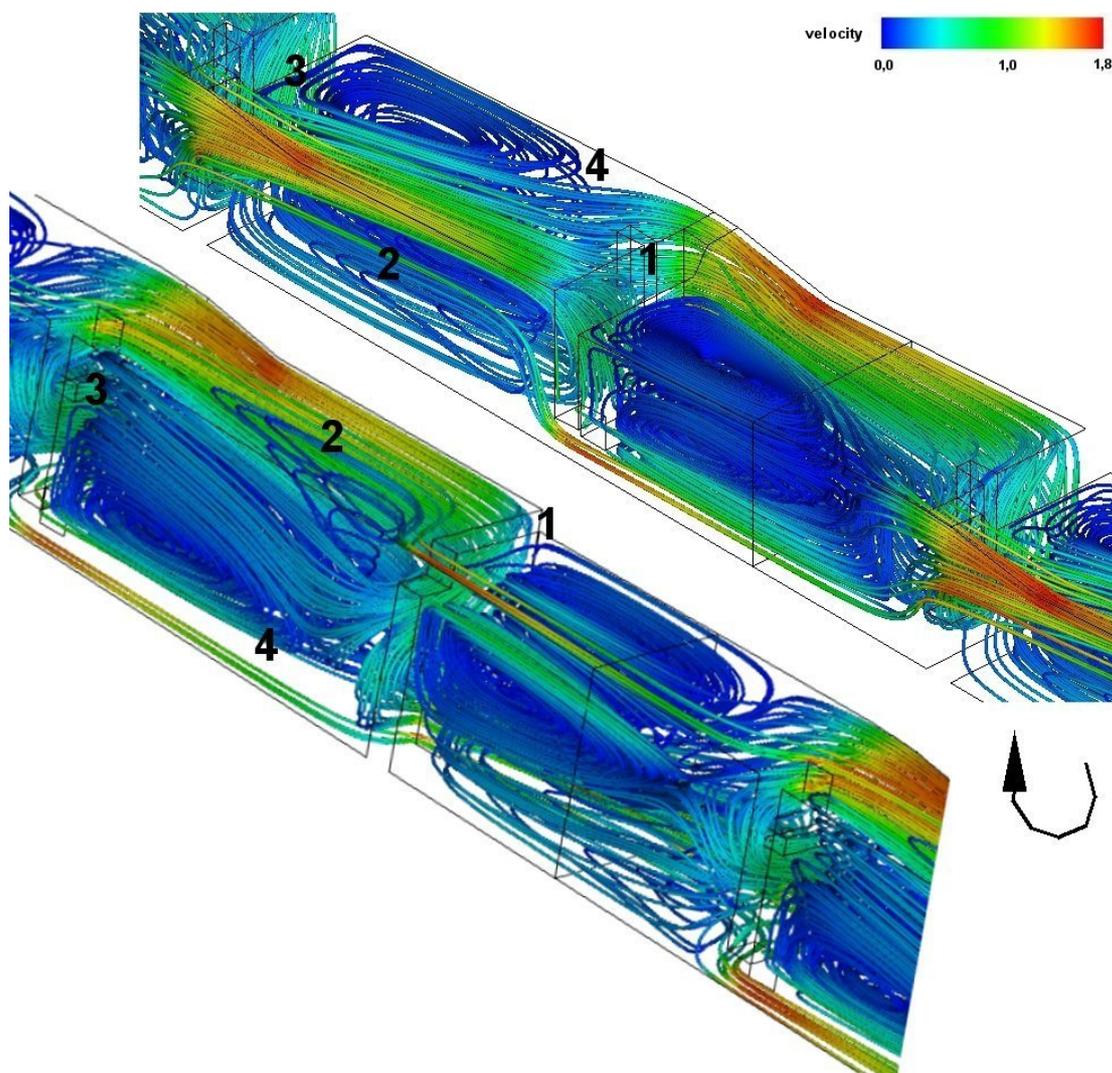


Abbildung 4: Stromlinien im untersuchten Becken: Ansicht von oben (oben) und gedrehte Ansicht von unten (unten)

Das Wasser, das durch das Schlupfloch in das Becken strömt, geht zum einen in den Wirbel rechts davon und zum anderen direkt auf Wand 1 zu und durch den nächsten Schlitz, wie Abbildung 4 zeigt. Deutlich zu erkennen sind die Augen des Wirbels rechts und über dem Schlupflochstrahl. Dort bildet sich ein großer Wirbel mit gekrümmter Achse aus, der durch die beiden charakteristischen Hautströme aus Schlupfloch und Schlitz angeregt wird.

3 Variantenuntersuchung einer Fischaufstiegsanlage

Um die Funktionsweise und die Strömungsbildung des Becken-Schlitz-Passes und des Schlitz-Passes besser vergleichen und unterscheiden zu können, wird an einer Gerinnegeometrie eine Variantenuntersuchung durchgeführt. Dafür wird eine gesamte Anlage mit Ein- und Auslauf sowie einigen repräsentativen Problemzonen in Form von typischen Knicken im Längsverlauf bei der Umgehung einer Wehranlage o. ä. nachgebildet, in die verschiedenen Trennwände eingebaut werden. Neben der sich jeweils ergebenden Strömung soll hier die Modellierung einer gesamten Anlage und die Auswirkung der unterschiedlichen Bauweisen betrachtet werden. Nach einem gekrümmten Einlauf folgen fünf Becken, wobei nach Becken 3 ein Knick mit 30° vorhanden ist.

Die abgebildeten Becken haben eine Länge von 2,90 m und eine Breite von 1,20 m bei einer mittleren Wassertiefe von 0,90 m. Als Becken-Schlitz-Pass benötigt die Anlage 300 l/s, als Schlitz-Pass 350 l/s. Da der Becken-Schlitz-Pass in dieser Arbeit vorrangig untersucht wird, werden zuerst zwei Varianten als Becken-Schlitz-Pass betrachtet. Sie unterscheiden sich in der Anordnung des ersten Schlitzes, der entweder an der inneren oder äußeren Wand liegt. Anschließend werden zwei Schlitz-Pass-Bauweisen jeweils mit den Schlitz auf dem Innen- bzw. Außenbogen untersucht. In den jeweiligen Abbildungen werden stets eine Ansicht der Strömung an der Oberfläche und darunter ein Stromlinienbild dargestellt.

3.1 Becken-Schlitz-Pass

3.1.1 Modellierung als Becken-Schlitz-Pass mit erstem Überfall außen

Bei der ersten Variante der Fischaufstiegsanlage als Becken-Schlitz-Pass (BSP) ist der erste Überfall außen angeordnet. Wie bei der Modellierung des BSP Rastatt-Niederbühl (Abbildung 2) sind in Abbildung 5 die beiden Hauptströmungen durch den Schlitz und das Schlupfloch gut sichtbar.

Wie bereits erläutert, treten die höchsten realistischen Geschwindigkeiten beim BSP bei der Umströmung der Schlupflochoberkante sowie an der Schlitzunterkante auf. Die hohen Geschwindigkeiten am Eintritt des Überfalls in das nächste Becken sind wahrscheinlich auf die Umlenkung an dieser Stelle im numerischen Modell zurückzuführen. Der Strömungsverlauf in den Becken stimmt insgesamt recht gut mit dem Verlauf der Stromlinien der exemplarischen Modellierung der Fischaufstiegsanlage Rastatt-Niederbühl überein. Beim Grundmuster treffen die Hauptströmungen auf die Trennwand, wo sie in die Wirbel bzw. die nächsten Öffnungen umgelenkt werden.

Bei dieser BSP-Variante ist die Strömung in Becken 4 nach dem Knick etwas unvorteilhaft. Die Strömung aus dem Schlitz vor dem Becken trifft genau auf den nächsten Schlitz, da sie nicht umgelenkt wird. Das Wasser aus dem Schlupfloch wird durch die abknickende Wand ebenfalls in diese Richtung gelenkt. Infolge dessen entsteht nicht der typische Wirbel neben dem Schlitz und über dem Schlupfloch, sondern eine schräge, sehr unregelmäßige Verwirbelung.

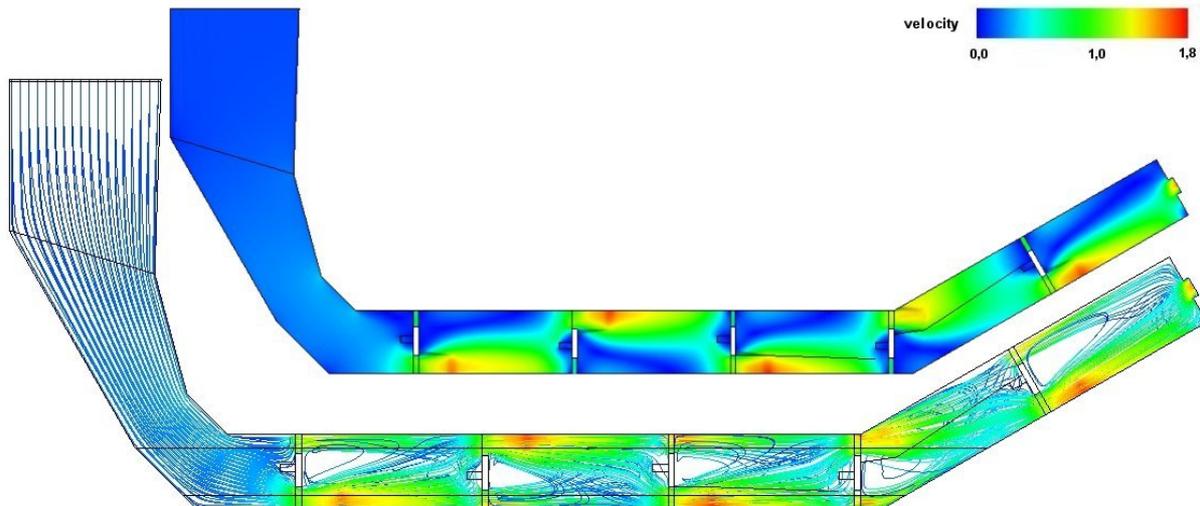


Abbildung 5: Becken-Schlitz-Pass mit erstem Überfall außen liegend

3.1.2 Modellierung als Becken-Schlitz-Pass mit erstem Überfall innen

Bei der zweiten Becken-Schlitz-Pass-Variante ist der erste Überfall innen angeordnet. Die Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung an der Oberfläche und der Stromlinien durch die gesamte Geometrie sind in Abbildung 6 zu sehen. Im Vergleich mit der BSP-Variante 1 in Abbildung 5 fällt die unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilung an der Oberfläche ins Auge. In Abbildung 6 geht die Hauptströmung aus dem Schlitz mit ihren höheren Geschwindigkeiten nicht so weit an der Beckenwand entlang wie in Abbildung 5, sondern verteilt sich auf die gesamte Beckenbreite.

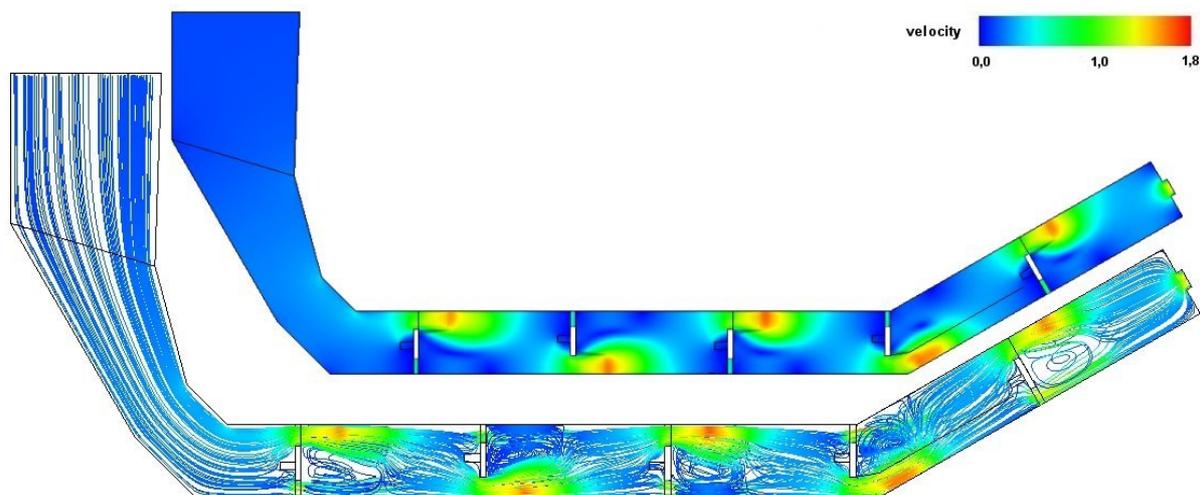


Abbildung 6: Becken-Schlitz-Pass mit erstem Überfall innen liegend

Auch in der Stromliniendarstellung in Abbildung 6 ist zu erkennen, dass sich das Wasser aus dem Schlitz schneller in die Beckenmitte orientiert als bei der ersten Variante in Abbildung 5. In den Stromlinienverläufen in den einzelnen Becken, vor allem der Becken 1–3, ist dies im Vergleich mit den Verläufen der Variante 1 gut zu erkennen.

Interessant ist hier nun auch die Ausbildung der Strömung in Becken 4. Hier wird die Strömung aus dem Schlitz durch die abknickende Wand umgelenkt und erzeugt dadurch ein Strömungsbild, das nahezu dem der anderen Becken entspricht. Die nicht umgelenkte Strömung aus dem Schlupfloch zielt zwar genau auf das nächste Schlupfloch, wird jedoch durch die sich ausbildenden Wirbel im Becken beeinflusst und zum nächsten Schlitz gelenkt. Der

Wirbel nach der Trennwand vor dem vierten Becken ist besser ausgebildet als bei Variante 1, aber ebenfalls etwas unregelmäßig.

Bei beiden Varianten sollte weiter untersucht werden, wie eine näher am Schlitz angebrachte Leitwand die Strömung beeinflusst. In den berechneten Geometrien wird an der Trennwand das Wasser hauptsächlich nach unten umgelenkt. Von Interesse wäre daher, ob sich ohne oder mit einer anderen Leitwandanordnung dasselbe Strömungsbild einstellen würde.

3.2 Schlitz-Pass

3.2.1 Modellierung als Schlitz-Pass mit außen angeordneten Schlitzten

Die erste Variante des Schlitz-Passes (SP) wird mit außen angeordneten Schlitzten berechnet. In Abbildung 7 ist eine Schwachstelle dieser Ausführung sofort erkennbar, da in Becken 4 Strömungen auftreten, die fast direkt zum nächsten Schlitz führen.

Der Vergleich zwischen der Geschwindigkeitsverteilung an der Oberfläche (Abbildung 7 oben) und den Stromlinien (Abbildung 7 unten) verdeutlicht, dass bereits die Oberflächenansicht beim Schlitz-Pass eine Aussage über den Verlauf der Hauptströmung erlaubt. In der Stromliniendarstellung ist noch deutlicher zu sehen, dass sich in den ersten drei Becken eine fast identische Strömung ausbildet, die vom gekrümmten Einlauf nicht beeinflusst wird. Außerdem ist hier nun zu erkennen, dass die Länge des Beckens 4 ausreicht, um die hohe Geschwindigkeit der Strömung aus dem Schlitz zu reduzieren. Trotz der ungünstigen Voraussetzungen durch den Knick wird ein Teil des Wassers vor der nächsten Trennwand noch umgelenkt.

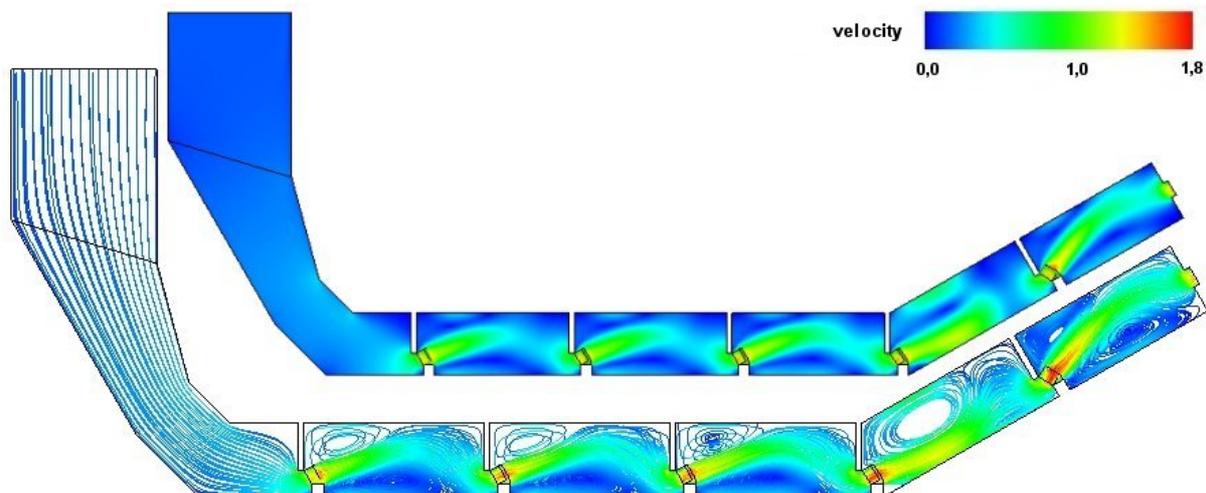


Abbildung 7: Visualisierung des Berechnungsergebnisses für den SP mit außen liegenden Schlitzten ohne Leitwände

Da bei den außen angeordneten Schlitzten die Strömung in Becken 4 nicht ganz günstig verläuft, wurde der Einfluss von Leitwänden auf den Strömungsverlauf untersucht. Der Einbau der Leitwände soll die Strömung grundsätzlich besser in und durch die Becken leiten, um hydraulische Problemstellen zu vermeiden.

Die zusätzlichen Leitwände an den Trennwänden sind in einem Abstand von 10 cm zum Schlitz angebracht, sind 10 cm breit und 15 cm lang. Im Vergleich mit dem Ergebnis ohne Leitwände in Abbildung 7 ist die Strömung in den Becken 1-3 in Abbildung 8 nahezu identisch, etwas anders stellt sich lediglich die Leitwandumströmung im Detail dar. Sie beschreibt einen Bogen im Becken, wie er idealerweise auftreten soll. In Becken 4 hat sich jedoch ein hydraulischer Kurzschluss ausgebildet, obwohl die Leitwand die Strömung so beeinflussen

sollte, dass diese gebremst wird. Hier könnte eine strömungsgünstigere Form des unterwasserseitigen Umlenkblockes am Strömungseintritt in das vierte Becken eventuell eine positive Änderung der Hauptströmung bewirken.

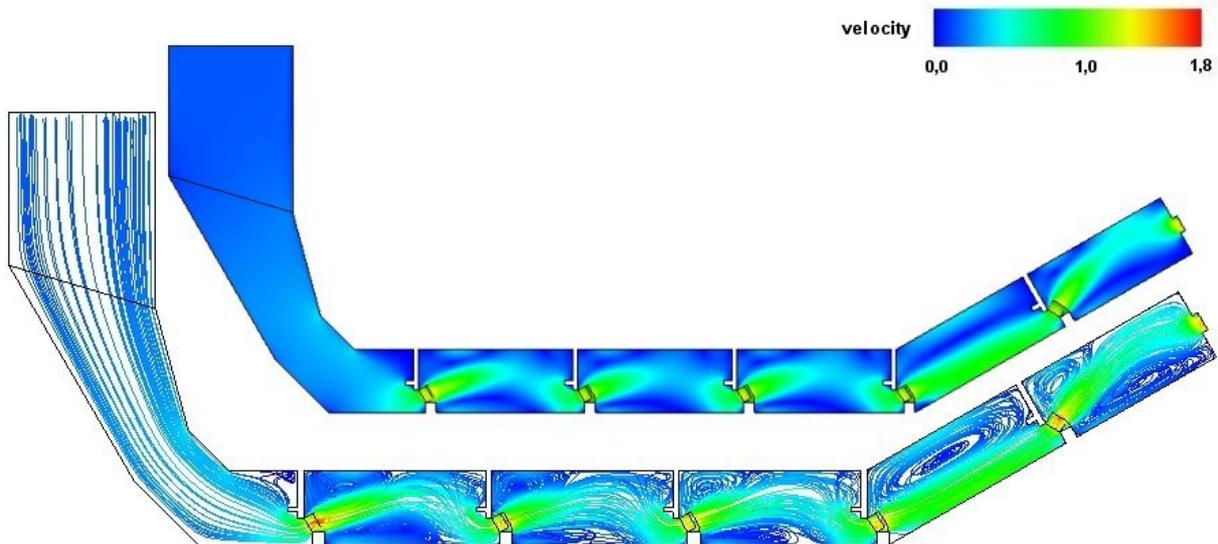


Abbildung 8: Visualisierung des Berechnungsergebnisses für den SP mit außen liegenden Schlitz mit Leitwänden

Weitere Untersuchungen sind nötig und vorgesehen, um die unterschiedlich ausgebildeten Strömungen der beiden Varianten – mit und ohne Leitwände – genauer zu untersuchen.

3.2.2 Modellierung als Schlitz-Pass mit innen angeordneten Schlitzten

Um die wenigen hydraulisch kritischen Punkte bei außen liegenden Schlitzten zu vermeiden, werden die Schlitzte zusätzlich auf der Innenseite angeordnet. Zu erwarten ist nun, dass sich die Strömung gut ins Becken hinein orientiert und keine hydraulischen Kurzschlüsse entstehen.

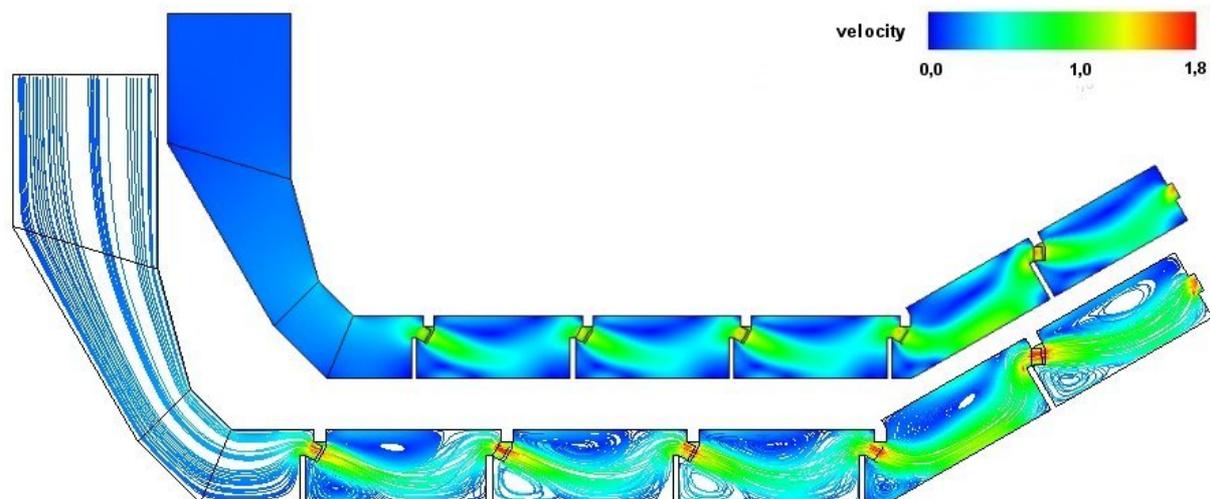


Abbildung 9: Visualisierung des Berechnungsergebnisses für den SP mit innen liegenden Schlitzten

An der Farbverteilung und den Stromlinien in Abbildung 9 ist gut ersichtlich, dass diese Anordnung der Schlitzte an der Innenwand eine gleiche, regelmäßige Strömung in fast allen Becken erzeugt. Das hydraulische Problem in Becken 4 tritt bei dieser Variante nicht auf, auch wenn das Wasser aus dem Schlitz auf die gegenüberliegende Wand prallt. Aus diesem

Grund ist diese Variante derjenigen mit außen liegenden Schlitten vorzuziehen. Diese Darstellungen bestätigen, dass die Strömung in allen Becken weitestgehend gleich verläuft, mit kleinen Abweichungen im Becken 4 nach dem Knick und Becken 5 vor dem Austritt.

Bei der Variante des Schlitz-Passes mit innen angeordneten Schlitten soll ebenfalls der Einfluss zusätzlicher Leitwände an den Trennwänden verdeutlicht werden. Im Vergleich mit der Anordnung ohne Leitwände unterscheidet sich hier die Strömung (Abbildung 10) nur in der lokalen Umströmung der Leitwände.

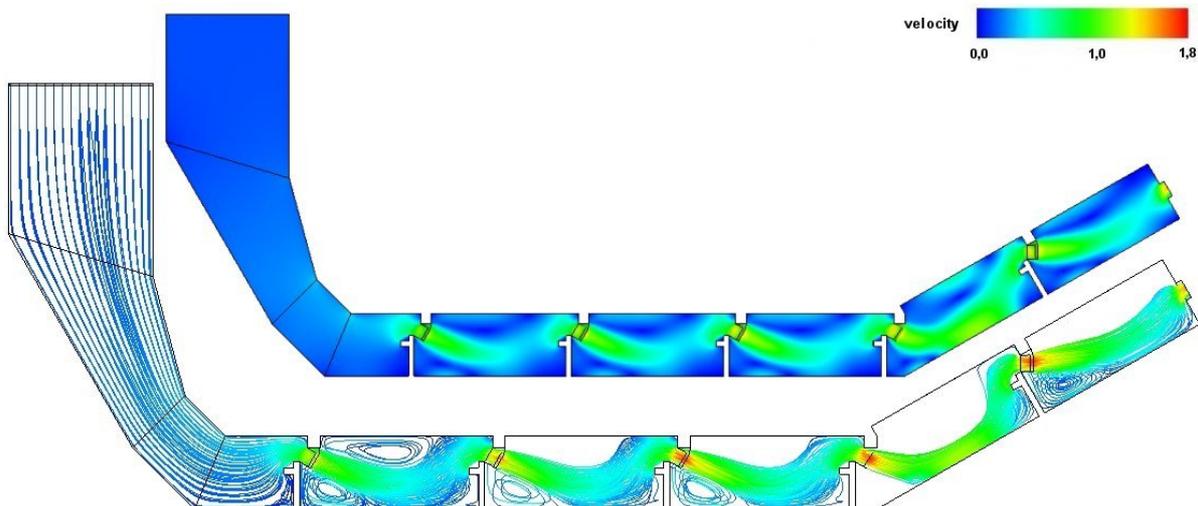


Abbildung 10: Visualisierung des Berechnungsergebnisses für den SP mit innen liegenden Schlitten und Leitwänden

4 Untersuchung des Einflusses von Leitwänden bei Schlitz-Pässen anhand einer geraden Gerinnegeometrie

Um die Strömung in den einzelnen Becken und insbesondere bei der Schlitzdurchströmung positiv zu beeinflussen, werden wie bereits erwähnt häufig Leitwände eingebaut. Die Ergebnisse in den vorgehenden Abschnitten zeigen, dass einerseits die Leitwände an der Trennwand die Hydraulik in einzelnen Becken verändern, aber andererseits nicht jedes hydraulische Problem lösen können. Mit Untersuchungen an einer geraden Gerinnegeometrie mit und ohne Leitwände soll deren Einfluss geklärt werden.

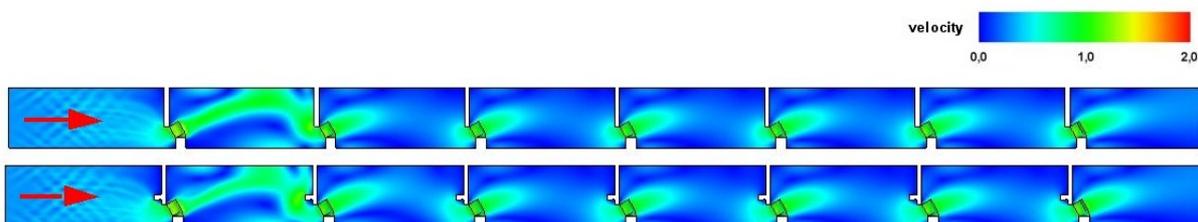


Abbildung 11: Gerades Schlitz-Pass-Modell: oben: ohne Leitwände; unten: mit Leitwänden

Die Geometrie des Gerinnes und der Trennwände entspricht derjenigen, die in den Becken 2 und 3 in der Variantenuntersuchung verwendet wurde. In Abbildung 11 ist auch wieder gut zu erkennen, dass das erste Becken durch den Einlauf und das letzte Becken durch den Auslauf beeinflusst wird, sich aber im Rest der Kaskade ein identisches Strömungsmuster einstellt – unabhängig von den Leitwänden.

Um besser erkennen zu können, was im Bereich der Trennwand und bei der Umströmung der Leitwand passiert, werden in einer horizontalen Ebene Strömungsvektoren eingeblendet. Die betrachtete Ebene ist in beiden Geometrien gleich und liegt etwa in der Mitte des Beckens. Wie in Abbildung 12 (oben) deutlich erkennbar ist, entsteht durch die Umlenkung des Wassers an der Trennwand eine Querströmung in die Hauptströmung hinein. Der Einbau einer Leitwand beeinflusst das umgelenkte Wasser bereits vor dem Schlitz so, dass es gleichmäßiger in diesen Schlitz fließt.

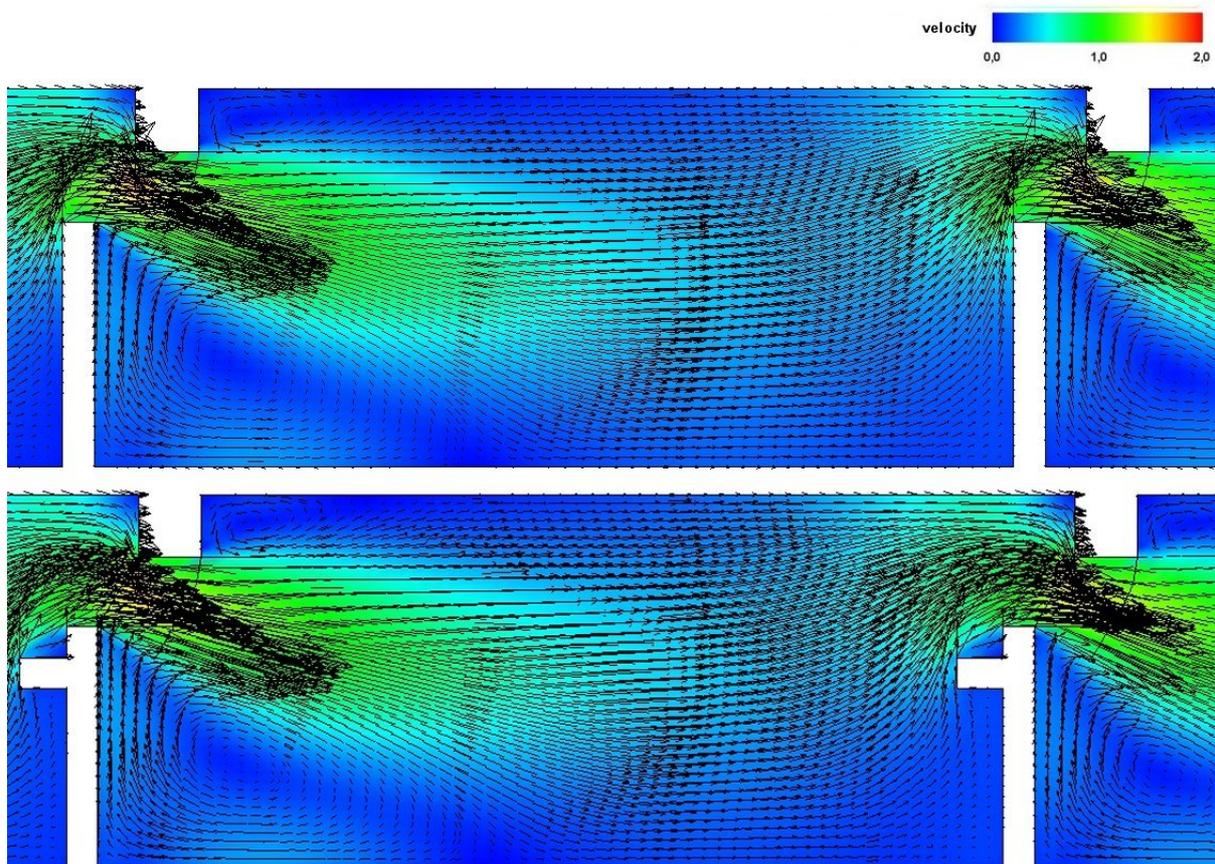


Abbildung 12: *Geschwindigkeitsvektoren in einer horizontalen Ebene in etwa halber Beckenhöhe bei identischem Maßstab: oben: ohne Leitwände; unten: mit Leitwänden*

Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Wirkungen ist in Abbildung 13 eine Stromliniendarstellung der beiden Fälle wiedergegeben. Ohne Leitwand (Abbildung 13 li.) beschreiben die Stromlinien eine enge Kurve, fast einen Knick, vor dem Schlitz und der Überfallstrahl fällt sehr steil in das Becken, was zu einem unruhigen Eintauchen führt. Mit Leitwand (Abbildung 13 re.) hingegen fließt das Wasser gleichmäßig in einem ausgeprägten „weichen“ Bogen in den Schlitz und durch diesen hindurch.

Dieser Unterschied zwischen Trennwänden mit und ohne Leitwand wurde auch an einem gebauten Fischpass in situ ausprobiert, wobei die Ergebnisse aus den numerischen Untersuchungen bestätigt wurden.

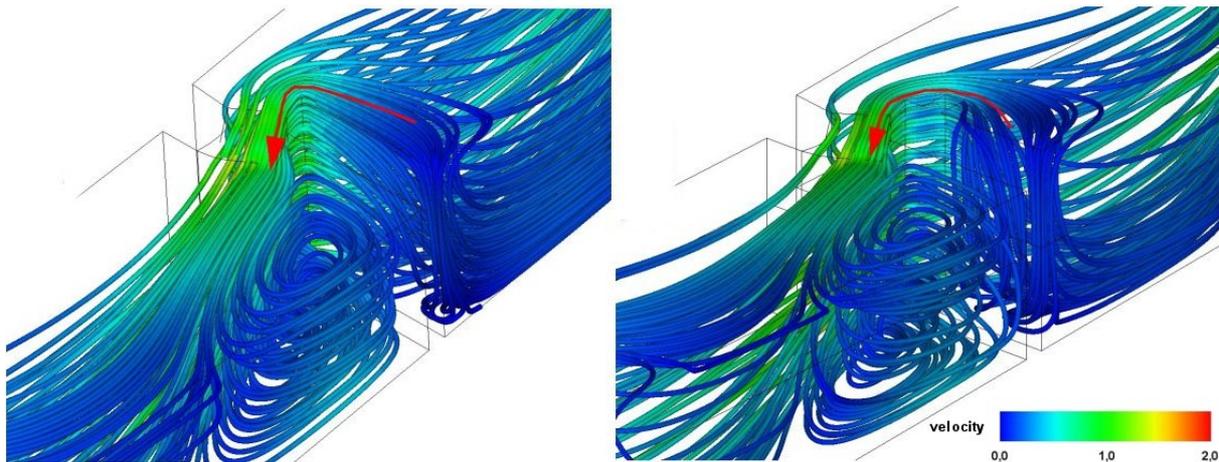


Abbildung 13: Stromlinien am Schlitz li.: ohne Leitwand und re.: mit Leitwand

Aus den Untersuchungen ergibt sich, dass die Anordnung von Leitwänden eine positive Wirkung auf die Beckenströmung hat. Die weniger abrupte Umlenkung des Wassers durch die Leitwand in den Schlitz beruhigt und formt den Überfall, wodurch auch der Bereich geringerer Strömung für den aufsteigenden Fisch positiv beeinflusst wird. Der Einbau kann daher empfohlen werden.

5 Einfluss der Sohlengeometrie auf die Ergebnisse der Schlitz-Pass-Modellierung

5.1 Beckendurchströmung ohne Einfluss von Sohlensubstrat

Um zusätzlich den grundsätzlichen Strömungsverlauf und den Einfluss von Sohlensubstrat weiter zu untersuchen, wurde exemplarisch die Geometrie der Fischaufstiegsanlage am Rheinkraftwerk Iffezheim [5] modelliert. Die Trennwände sind mit so genannten Hammerköpfen anstatt von Leitwänden versehen. Um das bekannte Eintrittsproblem zu umgehen, wurde eine verlängerte Einlaufstrecke vorgeschaltet. Für die Auswertung der Rechnung wird darüber hinaus lediglich das dritte, vorletzte Becken mit dem davor liegenden Schlitz betrachtet.

Die Berechnungen wurden zuerst stationär durchgeführt, wobei sie abgebrochen wurden, als der Austrittsdurchfluss gleich dem Eintrittsdurchfluss war. Anschließend wurde zur Kontrolle eine instationäre Berechnung bis zur Konvergenz durchgeführt. Die Stromlinien der instationären Ergebnisse unterschieden sich nur unwesentlich von den stationären. Jedoch traten unrealistisch hohe Geschwindigkeiten über 3 m/s auf, deren Ursache bisher nicht feststellbar war, weshalb hier nur die Ergebnisse der stationären Berechnung betrachtet werden.

Bereits in der Visualisierung des gesamten Anlagenausschnitts in Abbildung 14 ist das Hauptströmungsbild gut zu erkennen. Die durch den Schlitz und Umlenkblock in die Beckenmitte geleitete Hauptströmung fließt in einem Bogen durch das Becken und zum nächsten Schlitz hinaus. Zu beiden Seiten dieser Hauptströmung entstehen großflächige Wirbel.

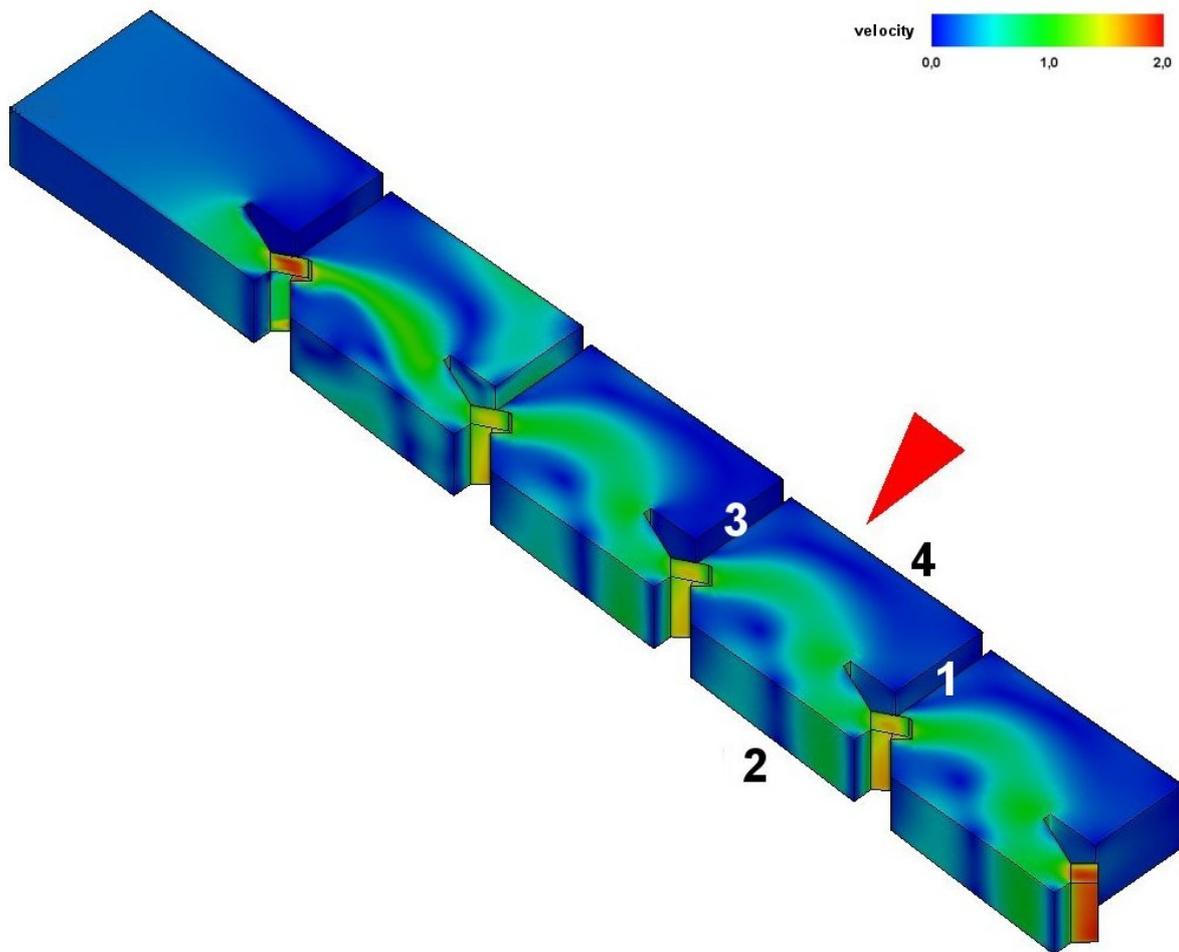


Abbildung 14: Visualisiertes Ergebnis der Modellierung des Schlitz-Passes Iffezheim

Anhand der Abbildung 15 wird die Bewegung des Wassers durch den Schlitz-Pass deutlich. Durch den Schlitz sind die Stromlinien beim Eintritt in das Becken zu einem Strahl gebündelt. Dieser Hauptstrahl teilt sich dann auf dem Weg durch das Becken in verschiedene Richtungen auf. In Bodennähe prallt zuerst ein Teil des Wassers an die Wand 4 und geht in den Wirbel links des Überfallstrahls über. Ein weiterer Teil steigt an Wand 1 auf und teilt sich dort nochmals, um sich zum einen über den zuvor genannten Wirbel in der Ecke zwischen den Wänden 3 und 4 und zum anderen direkt mit dem Hauptstrahl wieder zu vereinen. Der Hauptstrahl prallt nach dem Bogen durch das Becken auf die Wand 2 und wird dort geteilt, wovon ein Teil den großen Wirbel rechts des Überfalls erzeugt und der andere Teil durch den nächsten Schlitz strömt.

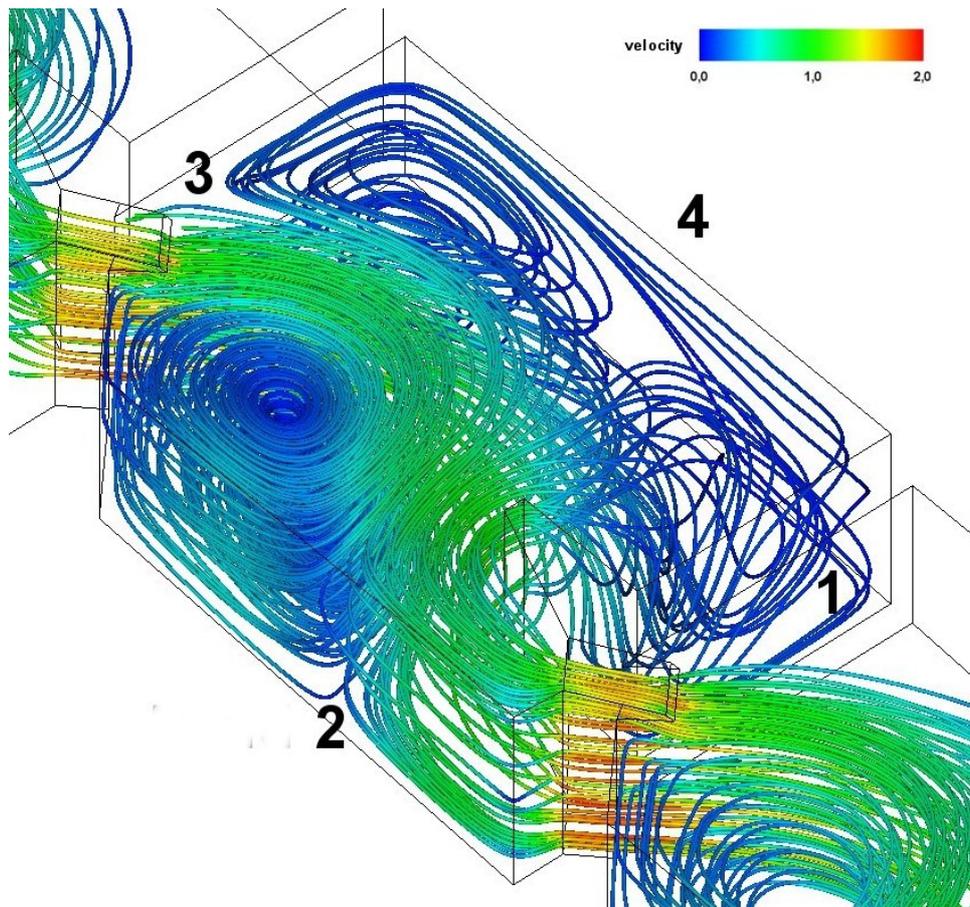


Abbildung 15: Schlitz-Pass Iffezheim: Verlauf der Stromlinien im dritten Becken ohne Sohlensubstrat

Die höchsten Geschwindigkeiten treten beim Schlitz-Pass ohne Sohlensubstrat, wie zu erwarten, in der Mitte des Schlitzes in Bodennähe auf, wie die Farbverteilung auf den Schnittebenen in Abbildung 16 erkennen lässt. Durch die Steine sollen diese Geschwindigkeiten reduziert werden, was im folgenden Abschnitt auch numerisch überprüft wurde.

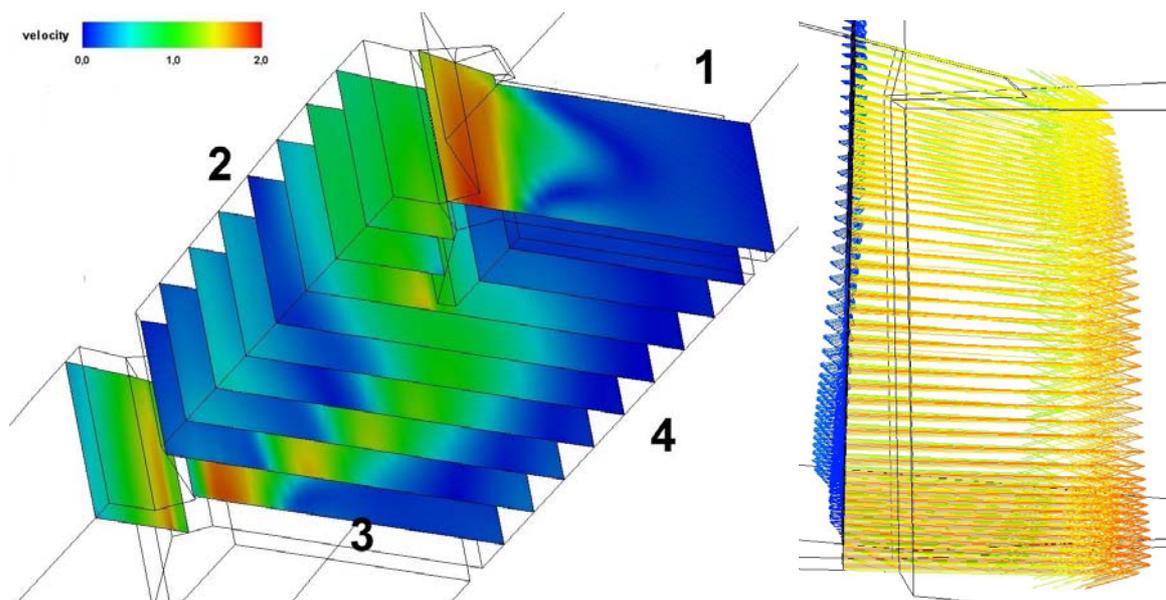


Abbildung 16: Geschwindigkeitsverteilung im Schlitz-Pass Iffezheim: li.: in mehreren Schnittebenen, Ansicht von unten; re.: im Schlitz

5.2 Beckendurchströmung mit Sohlensubstrat

Im deutschsprachigen Raum wird in nahezu allen Typen von Fischaufstiegsanlagen in der Regel Sohlensubstrat eingebaut, um dem Benthos und schwimmschwächeren Fischarten einen Aufstieg zu ermöglichen. Die gebrochenen Steine, die dazu verwendet werden, unterliegen verständlicherweise keiner Normierung bezüglich ihrer Formgebung. Beim Einbau der Steine entsteht eine erhöhte Rauheit in Bodennähe, die daher nicht einfach in ein Modell übertragbar ist, da sie sehr unregelmäßige Konturen besitzt. Als einfachste Lösung wurden kleine Würfel am Boden der Modellgeometrie verwendet, die aber nicht vollständig eingebunden werden. Das Programm (ICEM) versuchte, die Flächen selbst zu erkennen, wodurch keine Würfel auf dem Boden abgebildet sind, sondern kleine unregelmäßige „Pyramiden“. Die eigentlich durchströmte bodennahe Schicht des Sohlensubstrats entspricht somit dem Bereich mit den willkürlichen „Pyramidenspitzen“.

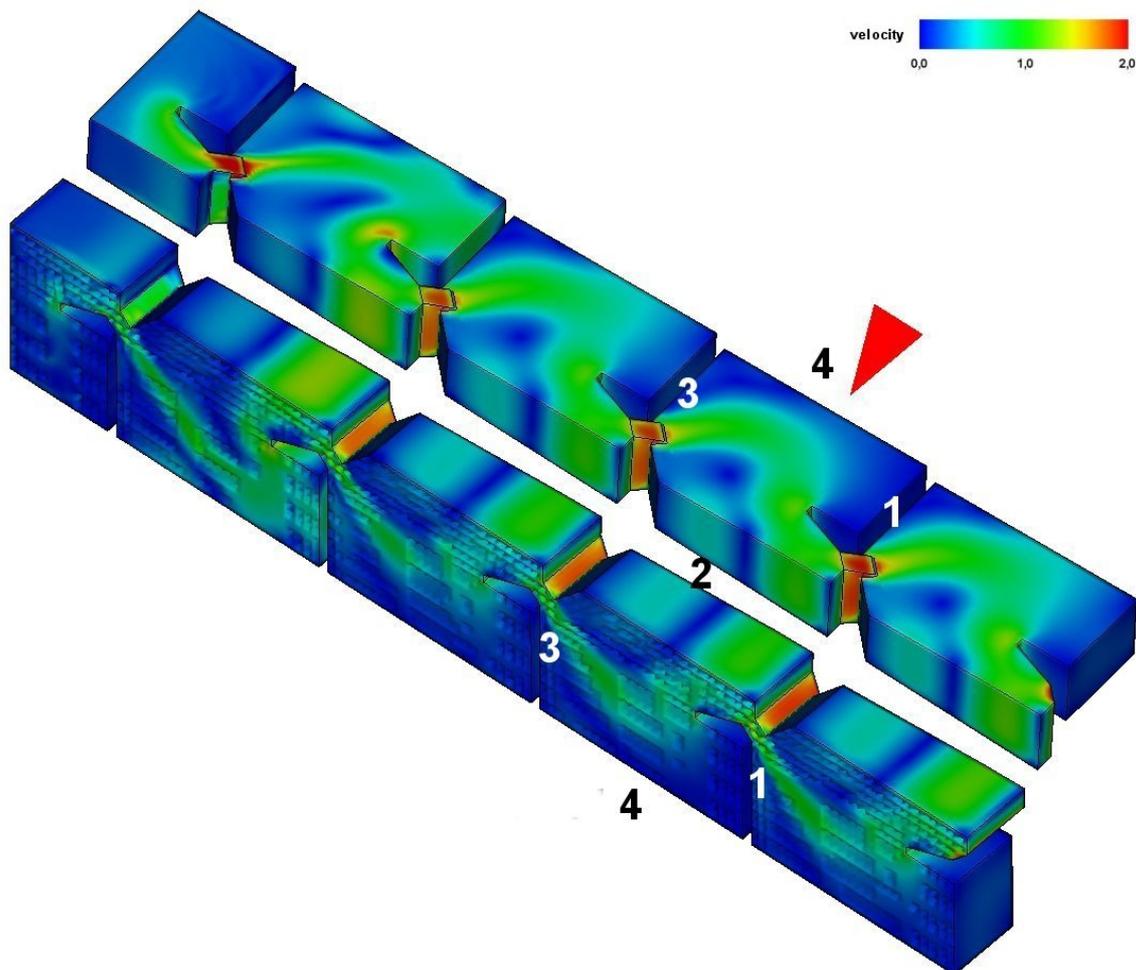


Abbildung 17: Visualisiertes Ergebnis des Schlitz-Passes Iffezheim mit Sohlensubstrat: Blick auf die Oberseite sowie die Unterseite

Der Strömungsverlauf im Becken wird durch den Einbau des Sohlensubstrats ein wenig beeinflusst, was aber auch auf das kleinere Wasservolumen infolge des Sohlensubstrateinbaus zurückzuführen sein könnte (Abbildung 17). Der Wirbel rechts des Überfalls ist nach wie vor sehr stark ausgebildet, die Rückströmzone links des Überfalls ist fast nicht mehr vorhanden. Das Hauptaugenmerk dieser Betrachtung liegt aber auf dem Einfluss der Rauheit auf das Geschwindigkeitsprofil im Schlitz. An den Darstellungen in Abbildung 18 ist zu erkennen, dass die kleinen Pyramidenspitzen die Geschwindigkeiten in Bodennähe deutlich verringern. Trotz des vereinfachten Modells der Steine zeigt sich der Einfluss des Sohlensubstrats sehr deutlich.

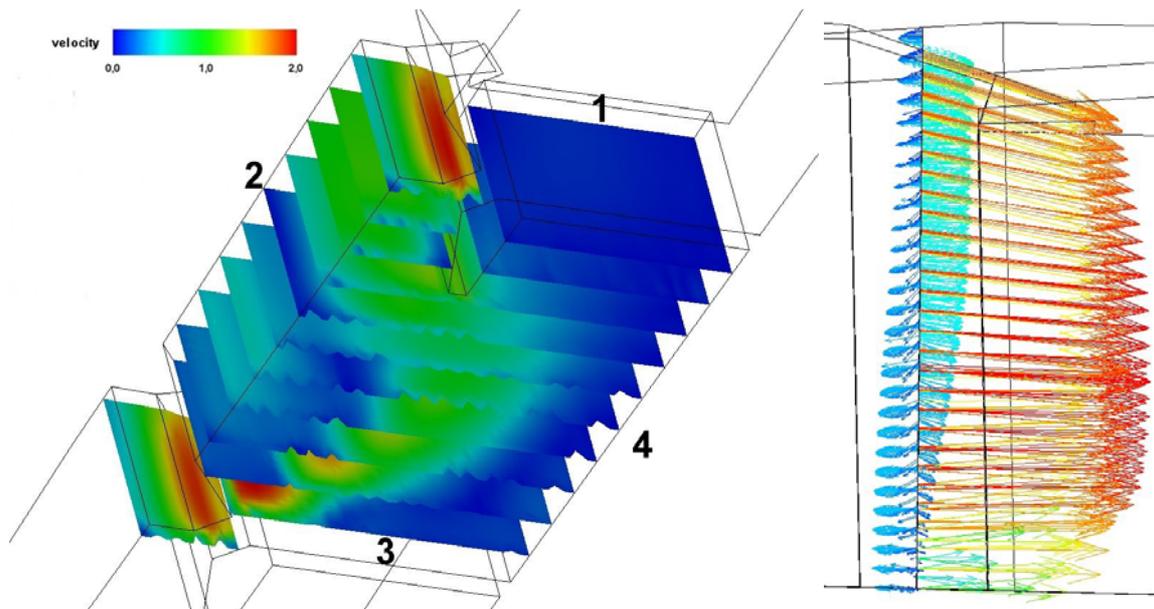


Abbildung 18: Geschwindigkeitsverteilung des Schlitz-Passes Iffezheim mit Sohlensubstrat: li.: auf verschiedenen Ebenen im Becken und re. auf der hintersten Ebene

7 Zusammenfassung

Die erfolgreiche Inbetriebnahme einer Fischaufstiegsanlage ist das Ziel eines jeden Wasserbau-Ingenieurs, der mit einer derartigen Planung und dem Bau betraut ist. Bereits in der Planungsphase können bei einem fachübergreifenden Projekt, wie dem Bau einer Fischaufstiegsanlage, Schwierigkeiten nicht immer vermieden werden. Die beteiligten Fachkreise sind oft unterschiedlicher Meinung über dasselbe Problem. Eine der entscheidenden Fragen ist dabei, was in einer beckenartigen Fischaufstiegsanlage eigentlich passiert. Um bereits im Voraus dies für jeden verständlich zu erklären, wurden numerische Simulationen verschiedener Anlagentypen durchgeführt, die einen ersten, äußerst wirklichkeitsnahen und detailreichen Eindruck von der Beckenströmung ermöglichen.

Die numerische Modellierung der beckenartigen Fischaufstiegsanlagen hat einige sehr interessante Erkenntnisse über den tatsächlichen Strömungsverlauf des Wassers durch die Becken ergeben. Diese konnten anhand von Versuchen an bestehenden Anlagen bestätigt werden. Die Ergebnisse und insbesondere die Geschwindigkeitsangaben müssen infolge der erläuterten Grenzen des numerischen Rechenmodells vorsichtig interpretiert werden.

Die Modellierung der Becken-Schlitz-Pass-Geometrie hat gezeigt, dass sich im Gegensatz zum Schlitz-Pass eine andere Form der Ruhezone im Becken ausbildet, deren Geschwindigkeiten im Verhältnis zum Hauptstrom durch das Becken deutlich geringer sind. Im Becken-Schlitz-Pass hat der Fisch lediglich die schnellere Strömung aus und in den Öffnungen zu überwinden. Die beiden Strömungen aus den Trennwandöffnungen sind zuerst zweidimensional, werden aber durch die Wände und Wirbel beeinflusst, wodurch die Strömung im Becken dreidimensional wird. Beim Schlitz-Pass hingegen wird ein größerer Teil des Beckens von der Schlitzströmung erfasst. Die Hauptströmung des Schlitz-Passes verläuft in einem Bogen durch das Becken und ist vor allem zweidimensional, die dreidimensionalen Fließvorgänge sollten jedoch nicht vernachlässigt werden.

Auch die Untersuchung mehrerer Varianten im selben Gerinne als Becken-Schlitz-Pass und Schlitz-Pass hat die unterschiedlichen Auswirkungen und Einflüsse der Trennwände sowie

potentieller Leitwände auf die Beckenhydraulik eindrucksvoll gezeigt, woraus eindeutige Empfehlungen abgeleitet werden konnten.

Schließlich wird auch deutlich, dass ausführliche Parameterstudien zum besseren Verständnis der hydraulischen Randbedingungen in den Becken empfehlenswert sind, um optimale Fischaufstiegsanlagen zu bauen.

Im Laufe der durchgeführten Analysen wurden gleichfalls zahlreiche interessante Aspekte angeschnitten, die in bereits begonnenen weiteren Untersuchungen im Rahmen des EnBW-Forschungsprojekts intensiver verfolgt werden sollen. Dabei sollen u. a. auch andere numerische Rechenmodelle eingesetzt werden, um die jeweiligen Stärken und Schwächen im relevanten Anwendungsfall zu erfassen und insgesamt eine der Realität am besten nahe kommende numerische Modellierung von beckenartigen Fischaufstiegsanlagen zu erreichen.

Literatur

- [1] Barton, A.; Keller, R.: 3D Free Surface Model for a Vertical Slot Fishway. In: Ganoulis, J.: Proceedings of the XXX IAHR congress, AUTH, Thessaloniki, Greece. S. 409-416, 2003
- [2] Fujihara, M.; Fukushima, T.; Tachibana, K.: Numerical Modelling of Flows in Vertical Slot Single-Slot and Double-Slot Fishways. In: Guo, J.: Advances in Hydraulics and Water Engineering: Proceedings 13th IAHR-APD Congress, Singapore. World Scientific, Vol. II, S. 1019-1024, 2002
- [3] Hagemeyer, M.: Hydraulische Aspekte beckenartiger Fischaufstiegsanlagen. Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, Diplomarbeit, Juli 2005 (unveröffentlicht)
- [4] Heimerl, S.; Hagemeyer, M.; Kohler, B.: En route with water particles in fishways - how to explain flow structure in a pool-type fishway? In: Hydro 2005 - policy into practice. Conference Proceedings, Villach, 2005
- [5] Heimerl, S.; Ittel, G.; Urban, G.: First operational experiences with one of the largest fish passage structures in Europe and applicability to other sites. In: Hydro 2001 - Opportunities and Challenges, Conference Proceedings, Riva del Garda, 2001, S. 313-322
- [6] Heimerl, S.; Ittel, G.: Becken-Schlitz-Pässe als zukunftssträchtige Bauweise für technische Verbindungsgewässer. In: Wasserwirtschaft 92 (2002), Heft 4/5, Seite 54-55
- [7] Heimerl, S.: Standardisierung technischer Verbindungsgewässer. Statusbericht zum Forschungsbericht Nr. 87/01. EnBW, 2004 (unveröffentlicht)
- [8] Puertas, J.; Pena, L.; Teijeiro, T.: Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways. J. Hydraulic Engineering, 130 (1), S.10-23, 2004
- [9] Rajaratnam, N.; Van der Vinne, G.; Katopodis, C.: Hydraulics of Vertical Slot Fishways. In: J. Hydraulic Engineering, 112 (10), S. 909-927, 1986
- [10] Wu, S.; Rajaratnam, N.; Katopodis, C.: Structure of Flow in Vertical Slot Fishways. In: J. Hydraulic Engineering, 125 (4), S. 351-360, 1999