

Arne Hoffmann, Matthias Mende, Ulf Helbig

Wendebecken in Mäanderfischpässen – hydraulische Optimierung mittels 3D-HN-Simulation

Zusammenfassung

Der Fachartikel beschreibt die hydraulische Optimierung eines Mäanderfischpasses an der Zulg in Steffisburg. Im Zuge des Umbaus der Müllerschwelle wurden Hochwasserschutz und Fischdurchgängigkeit sichergestellt. Aufgrund eines notwendigen Richtungswechsels entstanden im Wendebecken ungünstige Strömungsverhältnisse mit hoher Turbulenz.

Es wurden vier Optimierungsvarianten mithilfe von 3D-hydronumerischen Simulationen (OpenFOAM) untersucht. Die beste Lösung (Variante V4) verbessert durch eine angepasste Schlitzgeometrie, ein optimiertes Umlenkelement und eine geringe Sohlenanhebung die Strömungsführung deutlich.

Die Umsetzung führte zu einem gleichmässigen, fischfreundlichen Strömungsbild und reduzierte gleichzeitig den Unterhaltsaufwand. Das Projekt zeigt den Mehrwert von 3D-HN-Simulationen für die Planung und Optimierung von Fischaufstiegshilfen unter komplexen Randbedingungen.

Résumé

Le projet de réhabilitation du seuil de la Zulg à Steffisburg visait à améliorer simultanément la protection contre les crues et la continuité écologique pour les poissons. En raison d'un changement de direction imposé dans la passe à poissons de type méandre, des conditions d'écoulement défavorables, caractérisées par une forte turbulence, sont apparues dans le bassin de retournement.

À l'aide de simulations hydrodynamiques 3D (OpenFOAM), quatre variantes d'optimisation ont été étudiées. La variante retenue (V4), combinant une géométrie de fente adaptée, un élément de déviation optimisé et un léger rehaussement du fond, a permis d'améliorer sensiblement l'écoulement.

Après sa mise en œuvre, la passe présente un écoulement plus homogène et plus favorable à la migration des poissons, tout en réduisant les besoins d'entretien. Ce projet démontre l'intérêt des simulations 3D-HN pour la conception et l'optimisation des passes à poissons dans des conditions hydrauliques complexes.

Ausgangssituation

Die Zulg ist ein geschiebe- und schwemmholzreicher Gebirgsfluss, der das dicht bebaute Gemeindegebiet von Steffisburg durchfliesst. Historische Nutzungen – insbesondere die für die Wasserkraftnutzung erstellte Müllerschwelle – führten zu einer angehobenen Gerinnesohle, unzureichenden Abflusskapazitäten bei Hochwasser und seit 1480 zu einer Unterbrechung des Fischaufstiegs *[1]*. Das Umbauprojekt an der Müllerschwelle *(Bild 1)* verfolgte daher zwei grundlegende Ziele:

1. eine deutliche Verbesserung des Hochwasserschutzes durch Absenkung der Schwellenkrone sowie
2. die Wiederherstellung der ökologischen Längsvernetzung an der abgesenkten Schwelle mit einer Fischaufstiegshilfe (FAH).

Diese Doppelstrategie reduziert einerseits das Risiko innerörtlicher Überflutungen und stellt anderseits die Durchgängigkeit für die Leitfischarten Bachforelle und Groppe wieder her *[1]*.

Fischaufstiegshilfe

Zur Überwindung der nach der Kronenabsenkung verbleibenden Fallhöhe ist im Rahmen eines Variantenstudiums ein Mäanderfischpass des Bautyps C zur Bestvariante gewählt und im Jahr 2024 fertiggestellt worden. Es handelt sich hierbei um den ersten Mäanderfischpass im Kanton Bern und somit um eine Pilotanlage. Der Mäanderfischpass Typ C stellt eine Schlitzpassbauweise dar, die durch nebeneinander angeordnete und ineinandergreifende Rundbecken gekennzeichnet ist *[3]*. Wie bei allen Mäanderfischpässen wird die (Haupt-)Strömung entlang der Beckenwände geführt. In den Beckenzentren bildet sich ein strömungsberuhigter Kernbereich aus (Ruhezone). Die Strömungsverhältnisse ähneln somit denen in gewässertypischen Prall-Gleitufer-Strukturen, woraus sich auch der Name «Mäanderfischpass» ableitet. Verwendet werden ausschliesslich runde und glatte Anlagenteile *[3]*.

Die Anlage überwindet eine Fallhöhe von ca. 2,80 m über insgesamt 17 Rundbecken. Jedes Becken besitzt einen Innendurchmesser von 1,80 m. Die Schlitzöffnungen sind 0,18 m breit und können bei Bedarf durch einfaches Lösen von Schrauben vergrössert oder verkleinert werden. Die mittlere Wassertiefe bei tiefem Abfluss (Q_{330}) beträgt 0,70 m. Damit entspricht die hydraulische und geometrische Auslegung den Empfehlungen des Merkblatts DWA-M 509 *[4]*.

Der Fischpass ist kompakt am linken Ufer unterhalb des Sandfangs angeordnet und damit vor Geschiebeeintrag sowie Abrasion infolge Geschiebetransports geschützt. Durch die linksseitig abgetiefte Vorschwelle verläuft die Hauptströmung zuverlässig am Einstiegsbereich des Fischpasses vorbei, wodurch eine gute Auffindbarkeit aus dem Unterwasser der Zulg gewährleistet wird *(Bild 2) [1]*.



Bild 2: Abgesenkte Müllerschwelle mit neu erstelltem Sandfang inkl. Wasserschöpfrad und anschliessendem Mäanderfischpass (Blick gegen die Fliessrichtung; Foto: Mark van Egmond).

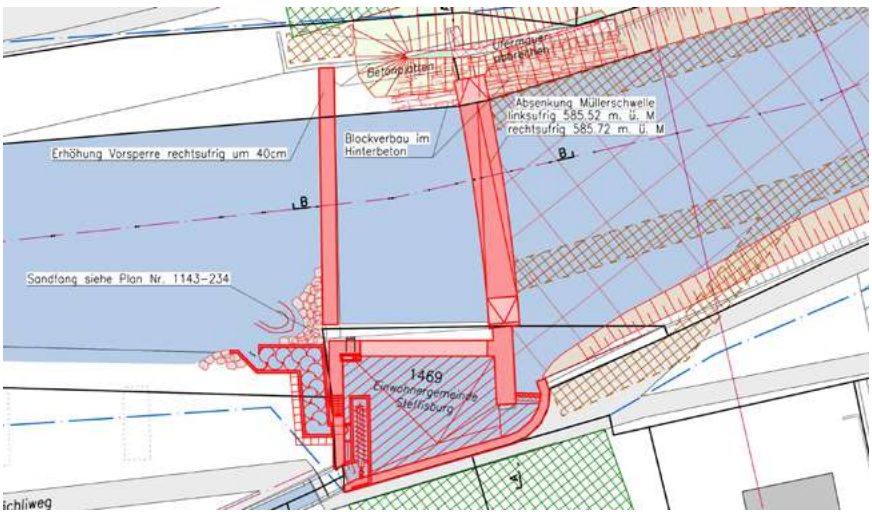

Bild 1: Projektperimeter und Lage der Müllerschwelle/Sandfang (schematisch, Ausschnitt) [2].

Problematik und Zielsetzung

Die örtliche Einbindung der Anlage erforderte im mittigen Abschnitt der FAH einen nahezu rechtwinkligen Richtungswechsel nach links *(Bild 3)*. Wie auch bei anderen Bauformen ist die Gestaltung von Richtungswechseln anspruchsvoll. Bei nicht idealer Gestaltung können für die Fischpassierbarkeit ungünstige Strömungsverhältnisse auftreten (z. B. Kurzschlussströmungen). Beim Mäanderfischpass wird auch bei Richtungswechseln eine Führung der Strömung entlang der Beckenwände angestrebt, um aufsteigenden Fischen durchgängig im gesamten Bauwerk eine gute Orientierung und strömungsberuhigte Bereiche in den Beckenzentren zu bieten *[4]*, *[5]*. Um diesem Anspruch nachzukommen, wurde im vorliegenden Fall in das Wendebecken (B7) ein ergänzendes Umlenkelement eingebaut, das jedoch noch kein optimales Strömungsbild ergab *(Bild 3)*. Die Fliessverhältnisse in Becken B7 waren durch hohe Turbulenz und eine starke Weisswasserbildung im Bereich des Wasserspiegels gekennzeichnet *(Bild 3)*.

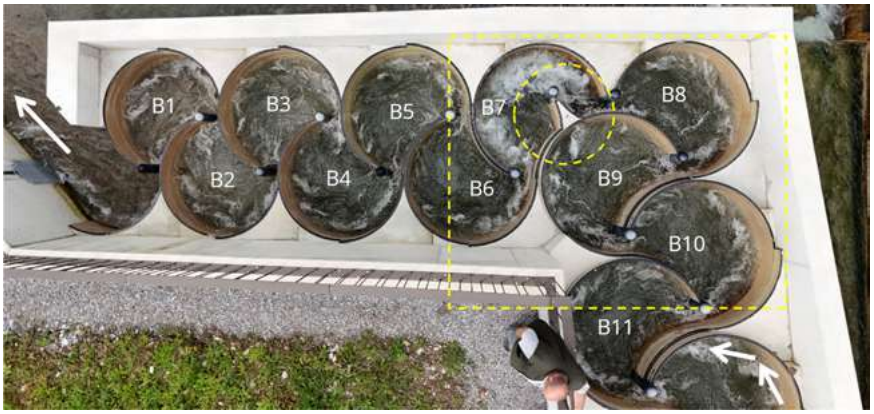

Bild 3: Draufsicht des Fischpasses mit Wendebecken B7 vor der Optimierung, Bereich Richtungswechsel und Umlenkelement umrahmt (Ausgangsvariante V0).

Von der in *Bild 3* dargestellten Ausgangsvariante der FAH wurde im Auftrag der Peters Ökofisch GmbH & Co. KG ein digitales 3D-Modell erstellt. Die vorhandenen Strömungsverhältnisse wurden mittels 3D-HN-Simulation im Bereich des Richtungswechsels (Becken B6–B10) ermittelt und visualisiert. Abgesehen vom Wendebecken B7 zeigten sich in den Becken die charakteristischen Strömungsverhältnisse des Mäanderfischpasses mit einem ausgeprägten, durchgehenden äusseren Strömungspfad entlang der Beckenwände und den deutlich strömungsberuhigten Beckenzentren *(Bild 4)*.

Im Wendebecken B7 konnten hingegen die vorab beobachteten Effekte *(Bild 3)* durch die Simulation identifiziert werden, die v. a. aus einer Ablösung der Hauptströmung vom Beckenrand und einer beckenmittigen Frontalanströmung der gegenüberliegenden Beckenwand resultierten *(Bild 4)*. Hieraus ergaben sich deutlich höhere Turbulenzen, verbunden mit einem stärkeren Lufteintrag sowie zwei strahlbedingt voneinander entkoppelten strömungsberuhigten Zonen.

Ob sich diese Strömungsverhältnisse allenfalls negativ auf die Fischwanderung ausgewirkt hätten, wurde nicht geprüft. Da sie aber vom charakteristischen und aus fischökologischer Sicht positiv bewerteten Strömungsbild des Mäanderfischpasses stark abweichen, wurden Einschränkungen befürchtet und folglich eine Optimierung des Wendebeckens B7 angestrebt.

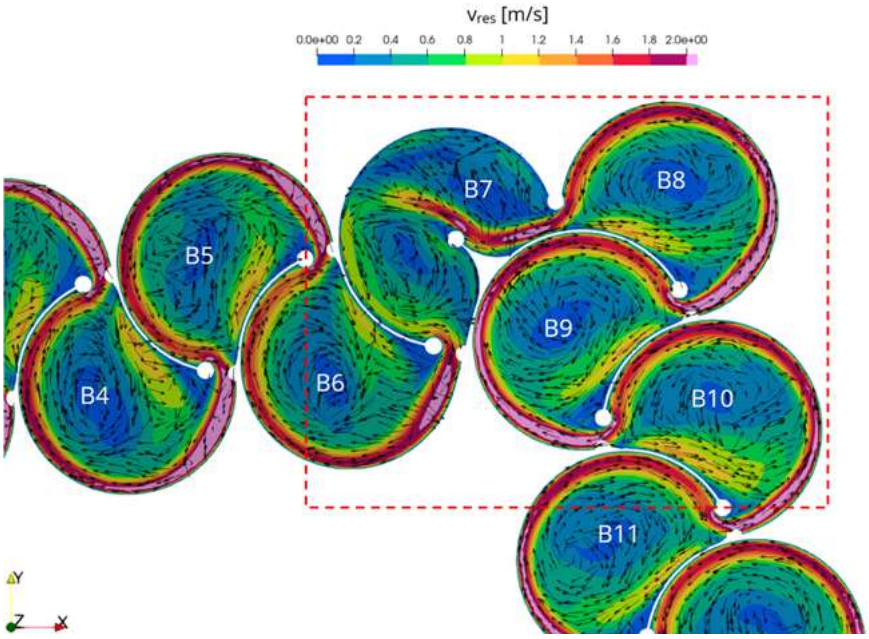

Bild 4: 3D-HN-Simulation der Ausgangsvariante V0 im Bereich des Richtungswechsels (Becken B6–B10) – resultierende Fliessgeschwindigkeiten v_{res} [m/s], Darstellung der Strömungsrichtung mittels Pfeilen, ca. 0,5 m über Sohle.

Lösungsansätze und Simulation

In enger Zusammenarbeit zwischen der Peters Ökofisch GmbH & Co. KG, der IUB Engineering AG und der TU Dresden/Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik wurden zur hydraulischen Optimierung vier weitere Varianten (V1–V4) erarbeitet und ihre Strömungsbilder mit Hilfe der 3D-HN-Simulation beurteilt *(Bild 5)*. Die in *Bild 5* mittels grüner und violetter Kreise gekennzeichneten Bereiche stellen die jeweils vorgenommenen Modifikationen gegenüber der Ausgangsvariante V0 dar. Ziel der Variantenstudie war es, unter weitestgehender Beibehaltung der bereits vorhandenen Konstruktion der FAH sowie bei minimalem baulichen Aufwand eine hinreichende hydraulische Verbesserung der Strömungsverhältnisse im Wendebecken B7 zu erreichen.

Die Variante V1 umfasst eine Verschiebung der rechten Flanke des Schlitzes B8/B7 zur rechten Aussenseite der Anlage sowie weiter in Richtung Becken B8. Dies führt zu einer Streckung des äusseren Beckenrands von B7, vergleichbar mit dem Mänderfischpass Typ H (vgl. *[5]*). Gleichzeitig wird eine Verschiebung des vorhandenen Umlenkelements zum Becken B8 vorgenommen, sodass ein zum Beckenaussenrand von B7 ausgerichteter Schlitz entsteht *(Bild 5, oben)*.

Die Variante V2 basiert auf der Verschiebung des Umlenkelements in Richtung des Schlitzes zum höher gelegenen Becken B8, verbunden mit einer sohlnahen Schlitzbreitenverengung mittels eines sog. «Strömungskeils» (vgl. *[5]*) auf der Beckenwand zu B9. Die Variante zielt auf eine kontrollierte Umlenkung der Strömung aus dem Schlitz in Richtung der äusseren Beckenwand von B7 ab *(Bild 5, mittig)*.

Die dritte Variante V3 *(Bild 5, mittig)* greift die Ansätze der vorgenannten Varianten auf. Bei dieser wird, ähnlich der ersten Variante V1, die Flanke des Schlitzes B8/B7 zur rechten Aussenseite der Anlage verschoben. Gleichzeitig erhält sie eine stärkere Ausrundung mittels eines Kreissegmentstücks, gekoppelt mit einem Strömungskeil zur sohlnahen Schlitzeinengung. Zudem wird das Umlenkelement ähnlich der Variante V2 verschoben.

Durch die Kombination der beiden Anpassungen werden der Winkel der Strömungsumlenkung und der verengte Wanderkorridor gegenüber der zweiten Variante reduziert.

Eine Weiterentwicklung der Variante V3 stellt die Variante V4 dar *(Bild 5, unten)*, die in der Geometrie und Schlitzanordnung identisch mit der dritten Ausführung ist, jedoch auf eine sohlennahe Schlitzbreitenverengung mit Hilfe des Strömungskeils verzichtet.

Die Ableitung der vorgenannten Lösungsvarianten V1–V4 zielte primär auf einen gleichmässigen hydraulischen Übergang zwischen Becken B8 und B7 und ein ähnliches Strömungsregime in allen Becken ab. Insbesondere der bereits o. g. Strahleintrag in Becken B7, verbunden mit den auftretenden Turbulenzverhältnissen (*Bild 3* und *4*), sollten abgemindert, bestenfalls vermieden werden.

Die Strömungsverhältnisse wurden für alle vier Optimierungsvarianten (V1–V4) mittels eines exemplarischen Anlagendurchflusses von Q = 250 l/s bei stationären Bedingungen unter Verwendung des Softwarepakets OpenFOAM simuliert. Eine Anpassung der Sohlenverhältnisse der FAH, v. a. im Übergangsbereich zwischen den Becken B8 und B7, wurde zunächst nicht vorgenommen. Unter diesen Randbedingungen ergab sich, dass die Strömungsverhältnisse der kombinierten Variante V4 der formulierten Zielsetzung am nächsten kommen (*Bild 6, [6]*). In der Simulation zeigte diese Variante in allen Becken die für Mäanderfischpässe typischen qualitativen Strömungsverhältnisse (Leitströmung entlang der äusseren Beckenwände und eine Ruhezone in der Beckenmitte) sowie v. a. geringere Turbulenzverhältnisse im Becken B7.

Im Mäanderfischpass werden die Becken i. d. R., wie auch an der Zulg, auf einer Betonrampe mit gleichmässiger Neigung montiert. Bei gleichem Abstand der Beckenschlitze zueinander ist die Höhendifferenz der Sohlenkoten und somit auch die Beckenfallhöhe von Schlitz zu Schlitz überall identisch. Da der Schlitz B8/B7 im Modell jedoch auf der Rampe nach unterstrom verschoben wurde, ergab sich eine abweichende Höhendifferenz. In *Bild 6* kann daher auch beobachtet werden, dass im Vergleich zu anderen Becken die Geschwindigkeiten der äusseren Randströmung in Becken B8 sichtbar höher und die in Becken B7 niedriger liegen. Begründet wird dies durch einen zu niedrigen Beckenwasserspiegel in B8, was zu grösseren Beckenfallhöhen zwischen den Becken B9 und B8 (ca. 0,23 m) bzw. zu kleineren Beckenfallhöhen zwischen B8 und B7 (ca. 0,13 m) führt, woraus wiederum grössere bzw. kleinere Randströmungsgeschwindigkeiten resultieren. Um an diesen Stellen eine mittlere Soll-Beckenfallhöhe von 0,18 m zu erreichen, wurde im Schlitz B8/B7, wie nachfolgend erläutert, eine Sohlenanhebung im Schlitzbereich um 0,05 m notwendig. Damit geht eine Wasserspiegelanhebung im Becken B8 einher, wodurch sich letztlich eine Vergleichmässigung der Fallhöhen- und Randströmungsgeschwindigkeiten einstellt.

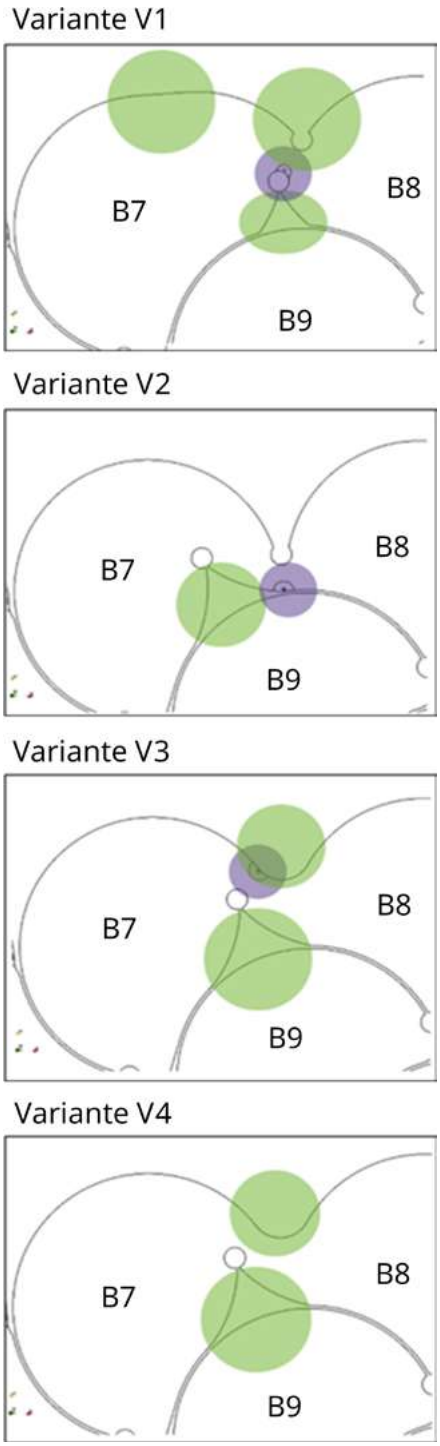

Bild 5: Erarbeitete und mittels 3D-HN-Simulation untersuchte Optimierungsvarianten V1 bis V4.

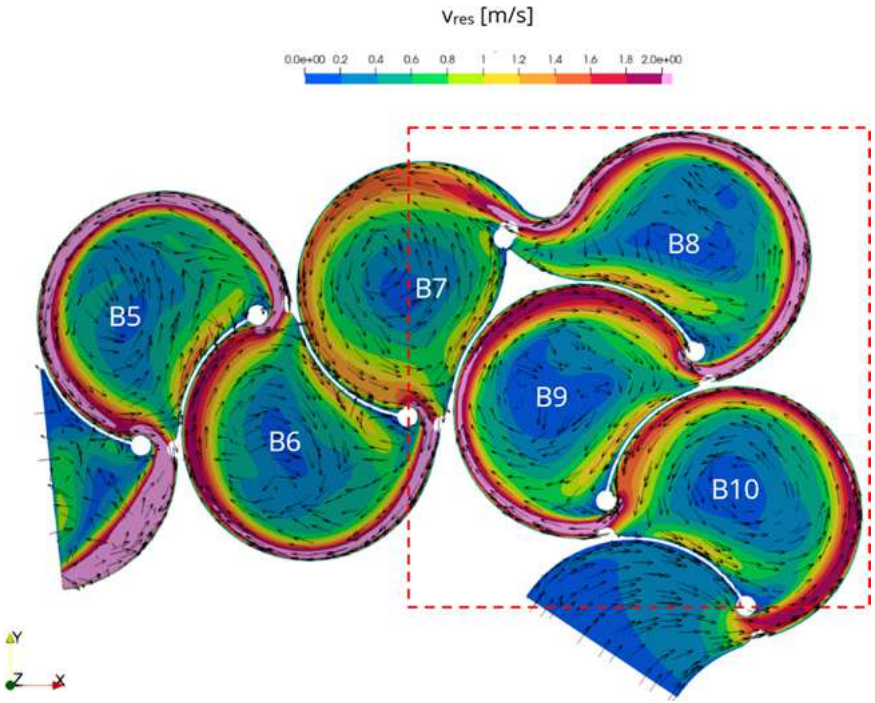

Bild 6: 3D-HN-Simulation der optimierten Variante V4 im Bereich des Richtungswechsels (Becken B6–B10) – resultierende Fliessgeschwindigkeiten vres [m/s], Darstellung der Strömungsrichtung mittels Pfeilen, ca. 0,5 m über Sohle.

Umsetzung und Ergebnisse

Im Ergebnis der hydronumerischen Simulation ist eine Bestvariante V4 identifiziert worden, die als Referenzbeispiel für derartige Richtungswechsel dienen kann. Bei der baulichen Realisierung wurde die bereits vorhandene Grundkonstruktion der Ausgangsvariante (V0) weitestgehend beibehalten, jedoch die Geometrieanpassung im Übergang der Becken B8/B7 vollumfänglich übernommen *(Bild 7)*. Zusätzlich wurde die Sohle im Bereich des Schlitzes B8/B7, ähnlich einer Grundschwelle, um 0,05 m angehoben. Ziel war es hierbei eine Vergleichmässigung der Beckenfallhöhen und Randströmungsgeschwindigkeiten zu erreichen.

In der vor Ort baulich angepassten FAH zeigen sich nach Umsetzung der Optimierung ein signifikant verbessertes und gleichmässiges Strömungsbild im Bereich des Richtungswechsels sowie deutlich geringere Turbulenzverhältnisse im Wendebecken B7. Gemäss den Angaben des Bauherrenvertreters der Gemeinde Steffisburg war der Unterhaltsaufwand des Mäanderfischpasses, trotz des Wildbachcharakters der Zulg, bereits vor der Optimierung gering. Durch die Massnahme konnte er noch weiter gesenkt werden.

Die technische Wirkungskontrolle soll bis Herbst 2026 abgeschlossen werden. Anschliessend ist vorgesehen, in den Wintermonaten 2026/2027 die biologische Wirkungskontrolle vorzunehmen.

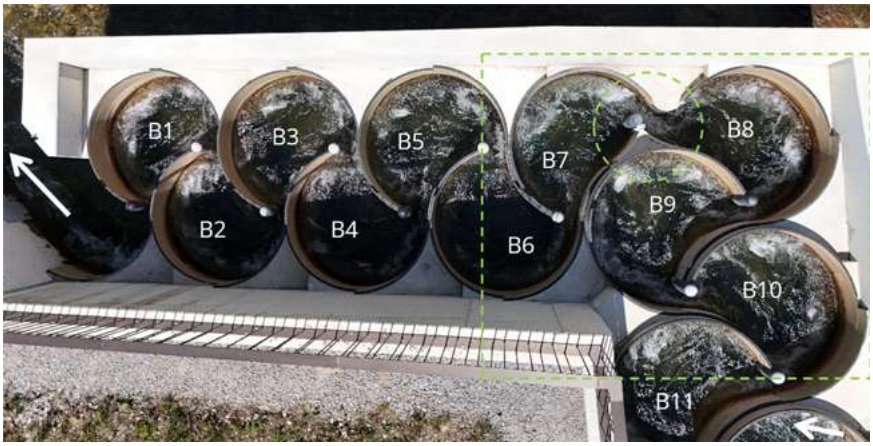

Bild 7: Draufsicht des modifizierten Fischpasses als Umsetzung der optimierten Variante V4, Bereich Richtungswechsel und Umlenkelement umrahmt.

Fazit

Die interdisziplinäre Entwicklung und Optimierung des Mäanderfischpasses in Steffisburg zeigt, welchen Mehrwert die enge Verzahnung von wissenschaftlicher Analyse und praktischer Ingenieurserfahrung bietet. Erst durch das Zusammenspiel aus hydraulischer Modellierung (3D-HN-Simulation), praxisnaher Bewertung vor Ort und konstruktiver Feinplanung konnte eine Lösung gefunden werden, die sowohl hydraulisch robust als auch ökologisch funktional ist.

Das Beispiel verdeutlicht zudem, dass sich das System des Mäanderfischpasses gut an unterschiedliche örtliche und hydraulische Randbedingungen anpassen lässt. Die Grundgeometrie ermöglicht es, sowohl bei begrenztem Raumangebot als auch bei variierenden Gefällen oder komplexen Strömungssituationen geeignete Lösungen zu entwickeln, ohne die funktionalen Prinzipien des Konzepts zu verändern.

Quellen:

- [1] Herzog Ingenieure AG: Technischer Bericht «Hochwasserschutz und LängsvernetzungZulg», Gemeinde Steffisburg / Herzog Ingenieure AG, Version 4.0, Stand Auflageprojekt: 21.06.2018
- [2] Herzog Ingenieure AG: Ausschnitt «Hochwasserschutz und Längsvernetzung Zulg - Müllerschwelle bis Dorfbrücke m 400 bis m 790», Gemeinde Steffisburg, Stand Auflageprojekt, Situation 1:500. Plandatum: 20.06.2018
- [3] Peters Ökofisch GmbH & Co. KG: Funktionsprinzip Mäander-Fischpass, System- und Projektinformationen; Herstellerangaben
- [4] DWA M 509 (2014): Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, Merkblatt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef
- [5] Mende, M.; Dönni, W.; Helbig, U.; Rathke, K. (2019): Der Rundbeckenfischpass – eine Alternative zum konventionellen Schlitzpass, Wasser Energie Luft – 111. Jahrgang, 2019, Heft 4, Baden
- [6] Helbig, U.; Roth, M. (2026): Fischaufstiegsanlage Steffisburg/Zulg – 3D-hydronumerische Simulation zur Anpassung des Wendebeckens B7, Bericht, Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Dresden

Autoren:

- **Arne Hoffmann,** Peters Ökofisch GmbH & Co. KG, Höxter, arne.hoffmann@oekofisch.com
- **Matthias Mende,** IUB Engineering AG, Bern, matthias.mende@iub-ag.ch
- **Ulf Helbig,** Technische Universität Dresden, ulf.helbig@tu-dresden.de