

Wasserbauliche Untersuchungen zum Rückhalteraum IMO mittels hybrider Modellierung

Frank Seidel, Christin Kannen, Thomas Grafmüller und Peter Oberle

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit der Planung des Rückhalterausms Ichenheim-Meißenheim-Ottenheim (IMO) als Bestandteil des Integrierten Rheinprogramms haben sich auf Grund der komplexen hydraulischen und wasserwirtschaftlichen Randbedingungen am Standort Fragestellungen ergeben, die rein auf Basis von theoretischen Ansätzen nicht mit einer ausreichenden Sicherheit zu beantworten waren. Um sicherzustellen, dass das Einlass- und Auslassbauwerk optimal funktionieren und eine hohe Betriebssicherheit aufweisen wurden umfassende Untersuchungen in einem hybriden Modellansatz durchgeführt.

In der angewendeten hybriden Vorgehensweise wurden bereits existierende numerische Modelle mit physikalischen und neu aufgesetzten numerischen Modellen kombiniert. Notwendige Modellrandbedingungen konnten hiermit erarbeitet werden und das für die jeweilige Fragestellung am besten geeignete Modell konnte genutzt werden. Kernstück der Untersuchungen waren die physikalischen Modelle vom Einlass- und Auslassbauwerk im Maßstab 1:30.

Im Rahmen der umfassenden Untersuchungen konnte die Funktionsfähigkeit des Einlaufbauwerks im Hochwasserbetrieb bestätigt werden. Die Realisierung von ungesteuerten Ökologischen Flutungen konnte nur durch eine detaillierte geometrische Überarbeitung und Optimierung des Zulaufgerinnes, sowie durch die Entkopplung des Abflusses von Rhein und Rückhalteraum mittels einer Einlaufschwelle erreicht werden.

Mit den Modelluntersuchungen konnte eine Gesamtkonzeption erarbeitet werden, die für die optimale Funktionsfähigkeit des Rückhalterausms IMO notwendig ist. Die Modelluntersuchungen bilden damit die Grundlage für die Planungssicherheit und die Betriebssicherheit der Anlage

1 Projekthintergrund

Mit dem im Jahr 1996 ins Leben gerufene „Integrierte Rheinprogramm (IRP)“ wird eine Verringerung der Hochwassergefahr mit der gleichzeitigen ökologischen Aufwertung der Rheinauen entlang des Oberrheins angestrebt. Ziel ist die Wiederherstellung des 200-jährlichen Schutzniveaus am Oberrhein. Innerhalb des IRP sind in Frankreich, in Rheinland-Pfalz und in Baden-Württemberg 21 Rückhalteräume mit einem Gesamtvolumen von 267 Mio. m³ vorgesehen. Baden-Württemberg trägt mit 13 Rückhalteräumen und einem neu geschaffenen Retentionsvolumen von 164,2 Mio. m³ maßgeblich zu diesem ehrgeizigen internationalen Projekt bei.

Der Rückhalteraum IMO (Ichenheim-Meißenheim-Ottenheim) im Zuständigkeitsbereich des Regierungspräsidiums Freiburg ist einer von 13 Rückhalteräumen (RHR) des Integrierten Rheinprogramms auf Baden-Württembergischen Gebiet und ist als sogenannter Fließpolder geplant. Er erstreckt sich von Ottenheim im Süden bis nördlich von Meißenheim und ist in drei Teilräume unterteilt. Da das Einlass- und das Auslassbauwerk des Rückhalterausms IMO innerhalb einer Stauhaltung angeordnet sind, führt dies zu komplexen wasserwirtschaftlichen Fragestellungen.

So kann z. B. für seine Füllung und Entleerung im Hochwasserbetrieb oder bei Ökologischen Flutungen kein nennenswerter Potentialunterschied genutzt werden. Das Abflussverhalten ist daher maßgeblich von den kontinuierlichen (Rauheitseinfluss) und lokalen Fließwiderständen (z.B. Linienführung, Umlenkverluste im Bauwerk) beeinflusst.

2 Modellkonzept

Auf Grund der oben beschriebenen komplexen wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen beim Betrieb als Fließpolder wurden im Zusammenhang mit der Genehmigungsplanung umfassende wasserbauliche Untersuchungen mit eingeplant. Zum Einsatz kamen hierbei sowohl numerische als auch physikalische Modelle zum Einlass- bzw. Auslassbauwerk. Die räumliche Ausdehnung der jeweiligen Modelle sind in Abbildung 1 dargestellt.

Auf Basis dieses Modellkonzeptes konnten alle projektrelevanten Fragestellungen eingehend untersucht werden. Darüber hinaus bot die hybride Herangehensweise und die Überlappung der Modellbereiche die Möglichkeit der Ableitung von Randbedingungen für z. B. den Betrieb benachbarter Modelle.

In den folgenden Kapiteln werden die im Zusammenhang mit der Überprüfung der hydraulischen Funktionalität des Einlass- und Auslassbauwerkes vom IWG eingesetzten Modelle und die zu Grunde liegenden Modellkonzepte vorgestellt.

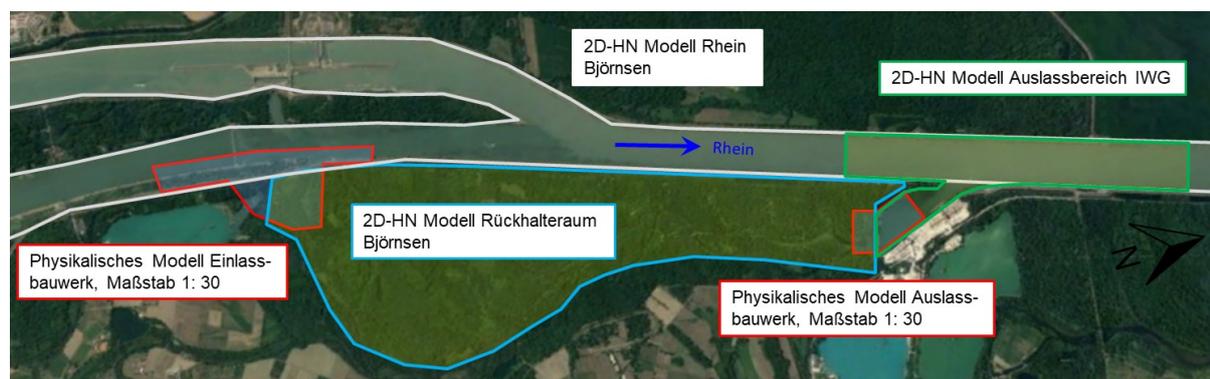


Abb. 1 Projektgebiet sowie Lage und Ausdehnung der eingesetzten Modelle

2.1 Physikalisches Modell Einlassbauwerk

In Bezug auf die hydraulische Funktionalität des Einlassbauwerkes wurden im Projektverlauf die folgenden Fragestellungen identifiziert, die mittels der Modelluntersuchungen beantwortet werden sollten.

- Nachweis der Funktionalität des Bauwerks bei allen Betriebszuständen („Ökologische Flutung“ und „Retention“)
- Optimierung einzelner Bauwerkskomponenten
- Untersuchung des Strömungsgeschehens im Zulaufgerinne und im Kolksee sowie Ermittlung der Strömungsbelastung in den verschiedenen Bereichen.

Im Bereich des Einlassbauwerks des Rückhalteraums IMO weist der Rhein ein ausgeprägtes Vorland auf und die Dammachse des Hochwasserdamms VIII ist um ca. 100 m von der Mittelwasserlinie abgerückt. Dementsprechend schließt auch das Einlassbauwerk nicht direkt an die Mittelwasserlinie an, sondern ist über ein ca. 170 m langes, S-förmiges Zulaufgerinne verbunden. Bei den Ökologischen Flutungen wird der Abfluss über dieses Zulaufgerinne dem Rückhalteraum ungesteuert zugeführt. Im Hochwasserfall ist das Vorland überstaut und der Rhein steht direkt am Einlassbauwerk an. In diesem Fall wird der Zufluss zum Rückhalteraum über drei Schütze im Einlassbauwerk gesteuert.

Mit Blick auf den gewählten Modellbereich des physikalischen Modells mussten die komplexen wasserwirtschaftlichen Randbedingungen mitberücksichtigt werden. Aufbauend auf einer Analyse der ähnlichkeitsmechanischen Randbedingungen und dominierenden Kräfte wurde das Modell im Maßstab 1:30 im Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium errichtet und nach dem Froud'schen Modellgesetz betrieben.

Im Sinne einer effizienten Ausnutzung der Laborflächen wird allgemein angestrebt, nur den hydraulisch relevanten Ausschnitt mit in den Modellbereich zu integrieren. Die Entnahme von Abfluss in den Rückhalteraum (RHR) wirkt sich auf Grund der im Vergleich zum Rheinabfluss relativ geringen Entnahmemengen nur im ufernahen Bereich des Rheins aus. Bei der Modellbildung kann dies berücksichtigt und nur eine Teilbreite des Rheins abgebildet werden (IWG 2007). Für den Modellbetrieb ist es dann erforderlich, die Abflussmenge sowie die Fließgeschwindigkeiten in diesem ufernahen Bereich zu kennen.

Für das Einlassbauwerk wurde auf Basis von theoretischen Vorüberlegungen eine Abbildung einer Breite des Rheins von 50 m anvisiert. Unter Zuhilfenahme der Ergebnisse eines 2D-HN Modells (Björnsen Beratende Ingenieure) wurde nun für die untersuchungsrelevanten Betriebszustände (Ökologische Flutungen und Retentionsbetrieb) der Abflussanteil im Modellbereich (50 m Streifen) bestimmt. Die im physikalischen Modell einzustellenden unterwasserseitigen Wasserstandsrandbedingungen wurden ebenfalls aus dem 2D-HN Modell extrahiert. Abbildung 2 zeigt das angewendete Modellkonzept mit der Definition der Randbedingungen.

Neben dem Rhein durchfließen zwei Kanäle (Rappenkopfkanaal und Vogelkanaal) das im Modell abgebildete Gebiet. Für den Modellbetrieb wurden die Abflüsse der Kanäle geregelt. Der Zulauf des Teilabflusses Rhein wurde über einen Wasserstandsregler in der Regelungssoftware entsprechend zugegeben. Am unteren Modellrand konnte jeweils der Wasserstand im Rhein bzw. im Kolksee eingestellt werden. Mittels der Abflussmessung am Auslauf des Kolksees konnte die Abflussaufteilung zwischen Rhein und Rückhalteraum ermittelt werden.

Alle Zu- und Abflüsse sowie die Werte von fünf festinstallierten Wasserstandssonden wurden in die vom IWG entwickelte Modellregelungssoftware eingespeist und stellten die Grundlage für den Modellbetrieb dar.

Der Aufbau des Modells mit fester Sohle im Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium erfolgte in klassischer Bauweise anhand von eingemessenen Profilblechen und deren Verfüllung mit Sand. Abschließend wurde eine ca. 5 cm dicke Betonschicht aufgebracht. In Tabelle 1 sind wesentliche Kennwerte des Modells in Natur- und Modellgrößen wiedergegeben.



Abb. 2 Abfluss- und Wasserstandsrandbedingungen für den Modellbetrieb

Tab. 1 Technische Daten Modellbetrieb

Kennwert	Natur	Modell (1:30)
Länge Modellbereich	450 m	15 m
minimaler Abfluss in den RHR	5,0 m ³ /s	1,01 l/s
maximaler Abfluss in den RHR	80 m ³ /s	16,2 l/s
maximaler Abfluss Teilbereich Rhein	252 m ³ /s	51,1 l/s

2.2 Auslassbauwerk

Das Auslassbauwerk des Rückhalteraums IMO ist als 4-züiges Bauwerk mit Planschützen ausgelegt und entwässert am unterstromigen, nördlichen Ende den Rückhalteraum in ein Hafenbecken mit Umschlagsanlagen der angrenzenden Kieswerksbetreiber. Als untersuchungsrelevant wurden die folgenden Fragestellungen identifiziert:

- Sedimentumlagerungen im Kieshafen und Sedimenteintrag in den Kieshafen infolge des Betriebs des Rückhalteraums.
- Leistungsfähigkeit Bauwerk
- Einfluss des Betriebes des RHR auf den nautischen Bedingungen im Kieshafen

Die Untersuchungen zum Auslassbauwerk wurden in zwei Phasen durchgeführt. Mittels eines 2D-HN Modells wurden unterschiedliche geometrische Randbedingungen (z.B. Position des Auslassbauwerkes, Linienführung der Seiten- und Zwischenwände, siehe Kapitel 3.2) hinsichtlich der Entwicklung des Strömungsfeldes untersucht. Die auf Basis der numerischen Simulationen entwickelte Vorzugsvariante wurde in einem zweiten Schritt im physikalischen Modell verifiziert und in Bezug auf die Detailgestaltung weiter optimiert.

Das 2D-HN Modell wurde in der Programmumgebung Flumen (fluvial.ch) aufgesetzt und löste den Projektraum mit ca. 22.000 Zellen in einem unstrukturierten Gitter auf. Hydraulisch relevante Bereiche wurden durch die Definition von Verdichtungspolygonen mit kleineren Zellen feiner aufgelöst. Die Kantenlängen der einzelnen Zellen variieren von ca. 1 m für hochaufgelöste Bereiche in Bauwerksnähe bis hin zu ca. 15 m im Rhein. Die Gesamtfläche des Modellgebiets beträgt ca. 0,6 km².

Das physikalische Modell zum Auslassbauwerk wurde wie das Modell zum Einlassbauwerk im Maßstab 1:30 errichtet und nach dem Froud'schen Modellgesetz betrieben.

3 Ausgewählte Ergebnisse

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der hybriden Untersuchung zur hydraulischen Funktionalität des Einlass- und Auslassbauwerkes vorgestellt.

3.1 Einlassbauwerk

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wird das Wasser über das Zulaufgerinne dem Einlassbauwerk zugeführt. Die Betriebsweise sieht vor, dass bei den Ökologischen Flutungen keine Abflussregelung mit den Schützen erfolgt, vielmehr soll sich entsprechend der Rheinwasserführung und den dazugehörigen Wasserständen im Entnahmbereich der dazugehörige Abfluss für die Ökologischen Flutungen einstellen. Aus hydraulischer Sicht bedeutet dies, dass das Widerstandsverhalten (kontinuierliche und lokale Verluste) der Zulaufstrecke und des Bauwerkes die Abflusssteuerung übernimmt.

Diese Funktionalität konnte durch Entkopplung des Rheinabflusses vom Zulaufgerinne durch Hinzufügen einer Einlaufschwelle am Beginn des Zulaufgerinnes sowie durch eine geometrische Optimierung der Linienführung und Höhenentwicklung des Zulaufgerinnes sichergestellt werden. Eine besondere Herausforderung war hierbei die Einhaltung der geforderten Abflüsse der Ökologischen Flutungen im Spektrum von 5 bis 60 m³/s. Da bei den Ökologischen Flutungen kein Schützbetrieb vorgesehen ist, musste dies durch die besondere Ausgestaltung des Zulaufgerinnes (Linienführung, Höhenlagen innerhalb des Zulaufgerinnes, usw.) erreicht werden.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch das Strömungsverhalten im Zulaufgerinne im Ausgangsentwurf bei 20 m³/s. Deutlich ist zu erkennen, dass in Folge der Trägheitseffekte die Linienführung noch nicht optimal angepasst ist. Mit der modifizierten Geometrie wird die Strömung jedoch gut geführt und die Entwicklung der Wasserspiegellagen bzw. das Widerstandsverhalten im Zulaufgerinne entspricht nun bei allen untersuchungsrelevanten Zuständen den Anforderungen an die Abflusssteuerung bei den Ökologischen Flutungen.

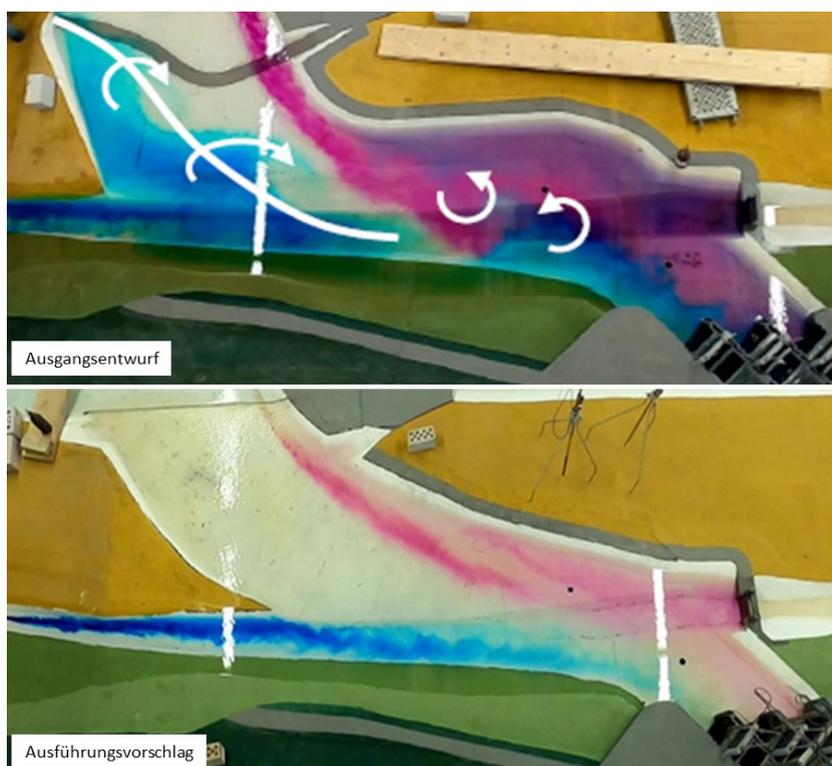


Abb. 3 Anströmsituation Zulaufgerinne, Ausgangsentwurf und optimierte Geometrie

In einem weiteren Untersuchungsbaustein wurde das Abströmverhalten des Einlassbauwerkes in den Kolksee bei Retentionsbetrieb ($80 \text{ m}^3/\text{s}$ Zulauf in den RHR) untersucht. Mittels Strömungsvisualisierungen und Geschwindigkeitsmessungen konnte aufgezeigt werden, dass es im Ausgangsentwurf zu einer ungünstigen Konzentration des austretenden Strahles kommt. Zusätzlich zeigte sich, dass je nach Betriebsweise der drei Schütze ein Pendeln des Strahles bzw. ein starkes Anlegen des Strahls am linken Ufer des Kolksees erfolgt. Die im Auslaufbereich auftretenden Fließgeschwindigkeiten hätten eine massive Sohlsicherung nach sich gezogen (Abbildung 4, links).

Durch eine Detailoptimierung der Auslaufkulisse und dem Einbau von drei Strömungsteilern konnte das Abströmverhalten maßgeblich verbessert und der Strahl in seiner Abströmrichtung stabilisiert werden. Die maximal auftretenden Fließgeschwindigkeiten konnten hierdurch signifikant reduziert werden (Abbildung 4, rechts).

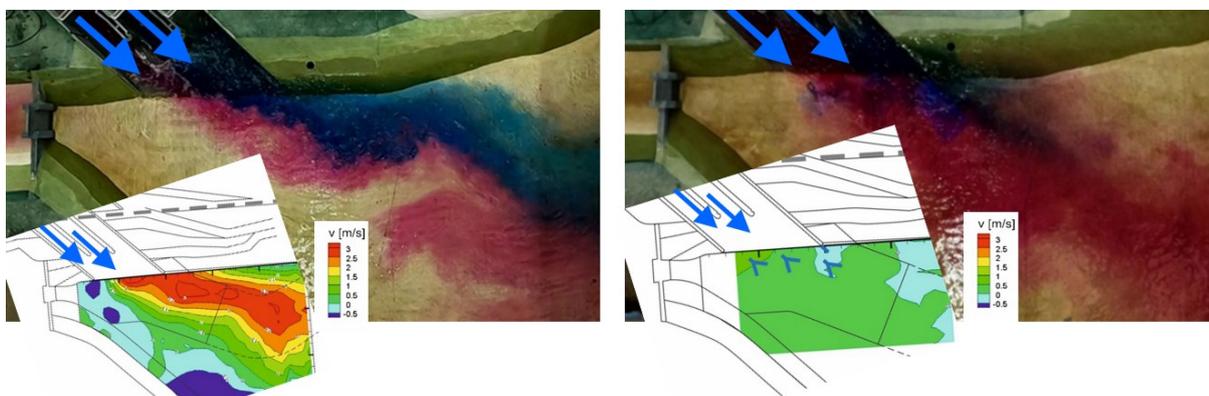


Abb. 4 Abströmung in den Kolksee bei beginnendem Retentionsbetrieb, Ausgangszustand (links) und optimierte Abströmstrecke (rechts)

3.2 Auslassbauwerk

Der Fokus der Untersuchungen zum Auslassbauwerk lag auf der Bewertung und Optimierung des Strömungsgeschehens im Kieshafen. Durch den Betrieb des Rückhalterums sollten sich die nautischen Bedingungen gegenüber dem heutigen Zustand nicht verändern.

Das Auslassbauwerk wurde im Ausgangsentwurf am südwestlichen Ende des Kieshafens platziert und die Leitwände in einem Winkel von 22° gegenüber der Dammachse verschwenkt. Hierdurch wurde der Austrittsstrahl nach links geleitet und der für die Schifffahrt vorgesehene Manövrierbereich möglichst wenig tangiert. In der numerischen Simulation zeigte sich jedoch, dass die Fließgeschwindigkeiten im Manövrierbereich großflächig über $0,3 \text{ m/s}$ lagen, was in Bezug auf die nautischen Bedingungen als ungünstig angesehen wurde (Abbildung 5, rechts).

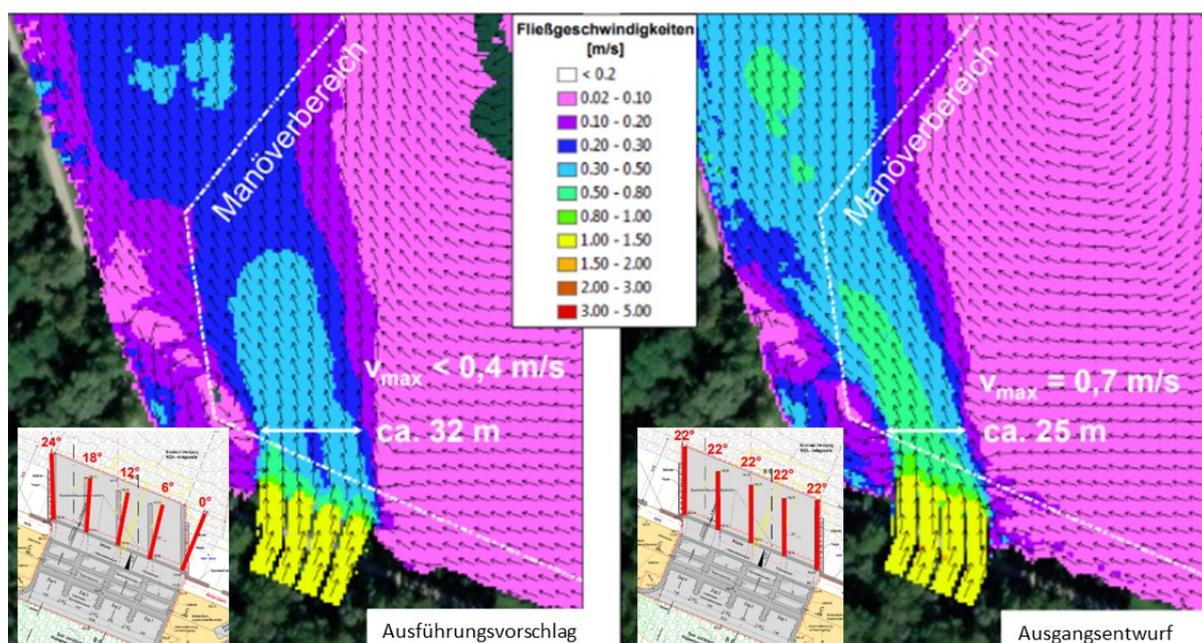


Abb. 5 Strömungsgeschehen im Kieshafen bei $60 \text{ m}^3/\text{s}$, Ausgangsentwurf (rechts) und numerisch optimierte Variante (Konzept 10a) (links)

Im Rahmen eines geometrischen Variantenstudiums wurden verschiedene Leitwandgeometrien numerisch simuliert. Als zielführend stellte sich eine Variante heraus, bei der die Leitwände fächerartig angeordnet werden. Hierdurch wird der Austrittsstrahl schon im Bauwerksbereich aufgefächert und die Fließgeschwindigkeiten im Kieshafen signifikant verringert. Die Auffächerung der Leitwände wirkt wie ein Diffusor und wurde gemäß dem Ansatz nach Renau (1967) dimensioniert.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgte im physikalischen Modell in einer zweiten Phase die Detailoptimierung des Bauwerkes. Ausgehend von einer messtechnischen Bestimmung der Verlusthöhe im Bauwerk konnte z.B. eine Verringerung der Zugbreite von $6,4 \text{ m}$ auf $6,0 \text{ m}$ vorgenommen werden. Zur weiteren Verbesserung der Abströmung in den Kieshafen wurde ein Strömungsteiler als Spundwandkonstruktion entwickelt und dimensioniert. Abbildung 6 zeigt ein Ergebnis dieses Optimierungsprozesses.

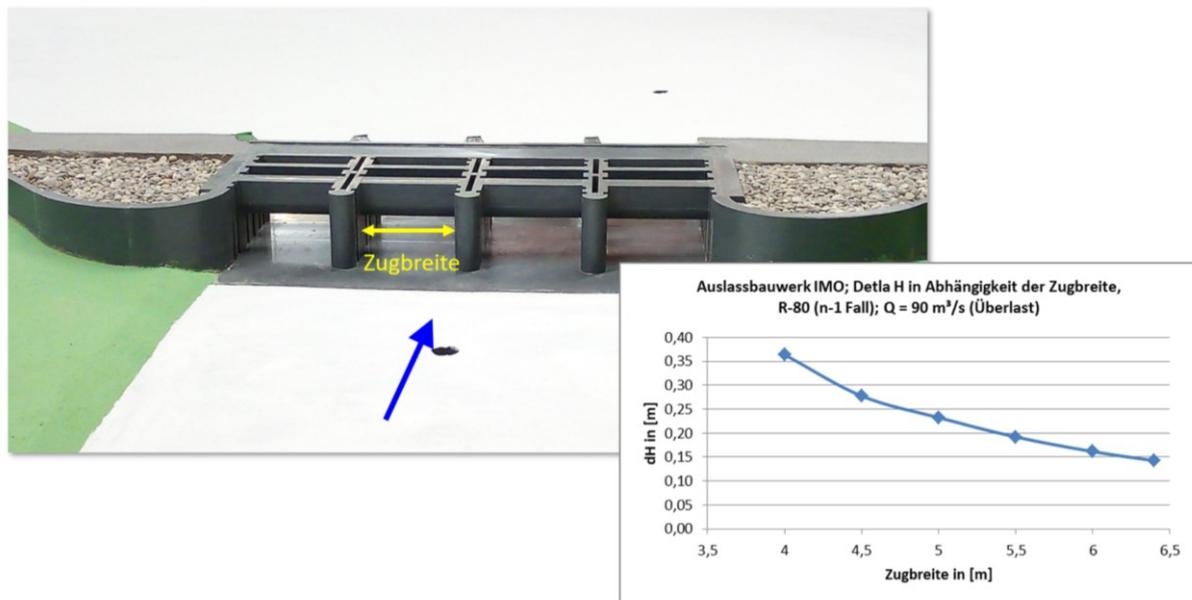


Abb. 6 Detailansicht Auslassbauwerk (links) und ermittelte Wasserspiegeldifferenz ober- und unterstrom des Bauwerkes in Abhängigkeit der Zugbreite.

4 Fazit

Auf Grund der komplexen hydraulischen und wasserwirtschaftlichen Randbedingungen am Standort des Rückhalteraums IMO wurden an Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT umfassende wasserbauliche Untersuchungen in einem hybriden Modellansatz durchgeführt. Vorteile dieses Ansatzes ergaben sich bei der Definition von Modellrandbedingungen, der gegenseitigen Validierung und der Ausnutzung der modell-spezifischen Vorteile.

Mit den Untersuchungen konnte die grundlegende Konzeption des Einlassbauwerkes für den Hochwasserbetrieb bestätigt werden. In Bezug auf die geplanten ökologischen Flutungen wurden wichtige geometrische Überarbeitungen und Optimierungen des Zulaufgerinnes entwickelt. Im Bereich des Auslassbauwerkes wurden geometrische Veränderungen vorgenommen, die eine verbesserte Abströmung in den Kieshafen sicherstellen. Mit den Modelluntersuchungen konnte insgesamt die Planungssicherheit verbessert und die Funktions- und Betriebssicherheit des Rückhalteraum IMO erhöht werden.

Literatur

IWG (2007); Rückhalteraum Elzmündung, Physikalische Modellversuche zur Gestaltung des Einlaufbauwerkes und des Kolksees, Bericht, unveröffentlicht

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2016); Das Integrierte Rheinprogramm, Hochwasserschutz und Auenrenaturierung am Oberrhein, Informationsbrochure

Renau, L. R.; Johnston, J. P ; Kline, S. J.(1967). Performance and Design of Straight, Two-Dimensional Diffusers. Journal of Basic Engineering 3 (1967), Nr. 1, S. 141_150

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Frank Seidel

Christin Kannen

Dr.-Ing. Peter Oberle

Thomas Grafmüller

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung

Kaiserstraße 12, 76199 Karlsruhe

frank.seidel@kit.edu

