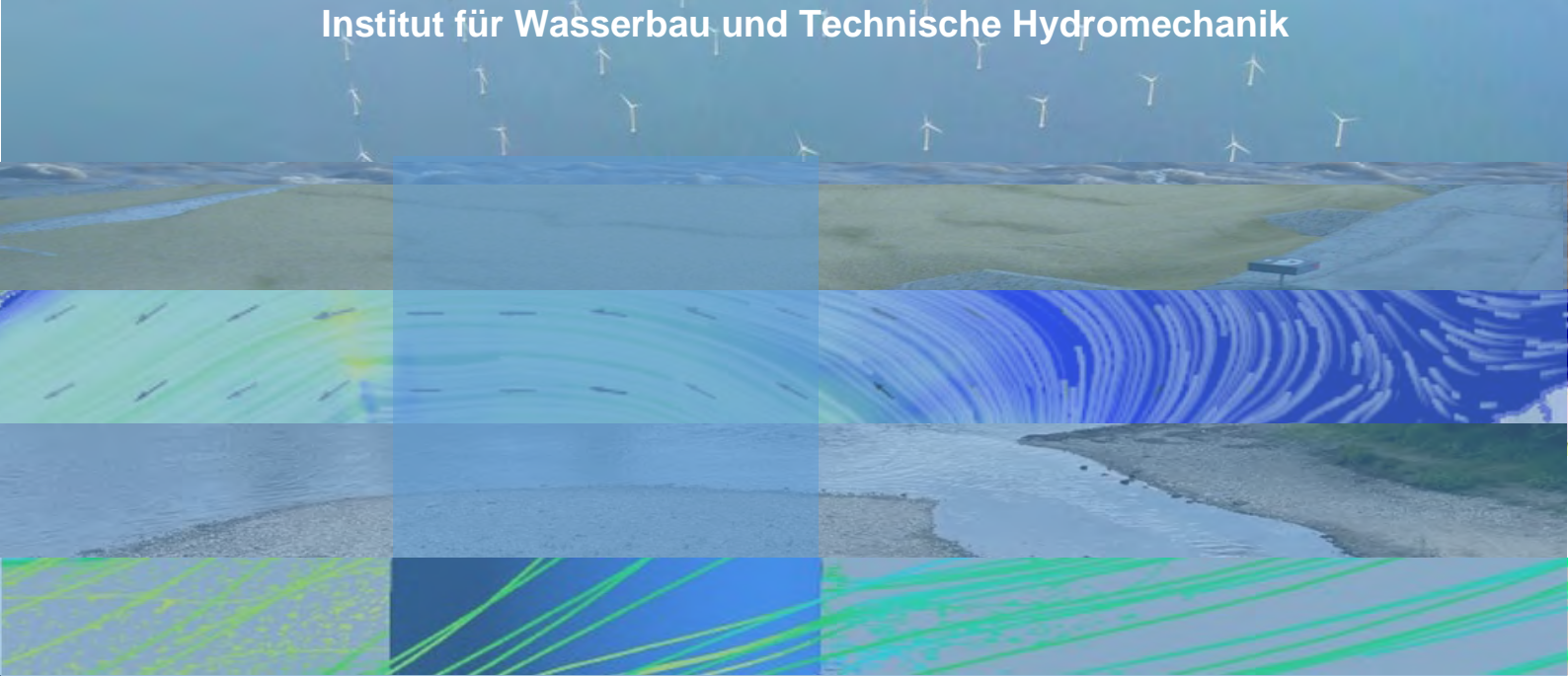




**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik



WASSERBAULICHE MITTEILUNGEN

**Von der Technischen Hydromechanik
zu Environmental Fluid Dynamics**

From technical hydromechanics towards environmental fluid dynamics

47. Dresdner Wasserbaukolloquium am 7. und 8. 3. 2024



Von der Technischen Hydromechanik zu Environmental Fluid Dynamics

From technical hydromechanics
towards environmental fluid dynamics

47. Dresdner Wasserbaukolloquium
Erweiterte Abstracts
Dresden, 7. und 8. März 2024



Gesellschaft der Förderer des
Hubert-Engels-Instituts
für Wasserbau und Technische Hydromechanik
der Technischen Universität Dresden e. V.

Bibliografische Informationen

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie. Die bibliografischen Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Von der Technischen Hydromechanik zu Environmental Fluid Dynamics

From technical hydromechanics towards environmental fluid dynamics

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen,
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.

Dresden: Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, 2024
(Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen; Heft 72)
Zugl.: Dresden, Techn. Univ., 2024
ISBN 978-3-86780-766-1

Herausgegeben im Auftrag der Rektorin der Technischen Universität Dresden von:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stamm

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
01062 Dresden

Tel.: +49 351 463 34397
Fax: +49 351 463 37120
E-Mail: wasserbau@tu-dresden.de
www: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/iwd>

Redaktion: Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Pohl

Redaktionsschluss: 18. Februar 2024

Verlag: Selbstverlag der Technischen Universität Dresden

Der Nachdruck des Heftes bedarf der Genehmigung durch die Redaktion und ist nur mit Quellenangabe gestattet.

ISSN 0949-5061
ISBN 978-3-86780-766-1

A 1

Vorwort

Die Strömungsmechanik ist eine faszinierende Fachdisziplin, die seit Jahrhunderten Wissenschaftler und Ingenieure gleichermaßen in ihren Bann zieht und herausfordert. Insbesondere im Bereich des Wasserbaus hat die Technische Hydromechanik eine lange und bedeutende Geschichte. Von den frühen Versuchen, Wasserströmungen zu verstehen und zu kontrollieren, bis hin zu den komplexen modernen Bauwerken sowie urbane und rurale Infrastrukturen, die in unserem Alltag so selbstverständlich funktionieren und unseren Lebensraum gestalten, hat sich die Technische Hydromechanik als unverzichtbare Grundlage erwiesen.

Während sich erst vor etwas mehr als 50 Jahren auch bei hydraulischen Berechnungen der Übergang von der Nutzung des Rechenstabes zum Taschenrechner vollzog, erlaubte die sich in der Folge schnell entwickelnde Computertechnik numerische Berechnungen in einem Umfang und mit einer Auflösung des Strömungsgebietes, welche bis dato nicht möglich gewesen waren. Mit der sich rasant entwickelnden Hard- und Software konnten tiefere Einblicke in das Wesen von Strömungen gewonnen werden und die Modellierung hydraulischer Vorgänge ist heute hochauflösend in Raum und Zeit auch unter Erfassung transienter kleiner Wirbel machbar. Zunehmend sind nicht nur Strömungsvorgänge an und in Wasserbauwerken unter Beachtung der Interaktionen von Fluid und Struktur, sondern auch in komplexen Biotopen und Ökosystemen modelliert worden, von der Ökohydraulik bis zur Ethohydraulik.

Die Einführung der Künstlichen Intelligenz (KI) hat diese Entwicklung weiter beschleunigt. KI-Algorithmen ermöglichen es, komplexe Strömungsmuster zu erkennen und vorherzusagen, was zu einer noch präziseren Modellierung und Simulation hydraulischer und morphologischer Prozesse führt. Von der Optimierung wasserbaulicher Anlagen bis hin zur Vorhersage von Hochwasserereignissen werden KI-basierte Ansätze zukünftig eine zunehmend wichtigere Rolle spielen.

Diese Entwicklung markiert nicht nur einen technologischen Fortschritt, sondern auch eine Erweiterung des Anwendungsbereichs der Strömungsmechanik. Der Übergang von der traditionellen Hydromechanik im Wasserbau hin zur Umweltströmungsmechanik spiegelt die wachsende Notwendigkeit wider, Strömungen nicht isoliert, sondern im Kontext ihrer Wechselwirkungen mit der natürlichen Umgebung zu betrachten, wie es z. B. die Interaktionen zwischen Strömung – Vegetation – Morphologie und deren Auswirkungen auf die vorherrschenden Habitatverhältnisse eindrucksvoll belegen.

Im Rahmen des 47. Dresdner Wasserbaukolloquiums unter der Überschrift „Von der Hydromechanik im Wasserbau zu Environmental Fluid Dynamics“ werden Beiträge zu einer Vielzahl von Themen vorgestellt und diskutiert, die insbesondere den vorangestellten Bezug der Technischen Hydromechanik zur Umwelt und deren Modellierung aber auch Erfahrungen im Bau und Betrieb ansprechen.

Unser Ziel ist es, ein Verständnis dafür zu vermitteln, wie die Strömungsmechanik als Bindeglied zwischen Wasserbau und Ökologie fungieren kann. Indem wir Methoden der Umweltströmungsmechanik (Environmental Fluid Dynamics) entwickeln und nutzbare Werkzeuge bereitstellen, wollen wir dazu beitragen, nachhaltige Lösungen für die Herausforderungen unserer Zeit zu finden.

Ich hoffe, dass dieses Dresdner Wasserbaukolloquium nicht nur Fachleute aus dem Ingenieurwesen und der Wissenschaft anspricht, sondern auch all jene, welche ein Interesse besitzen, die komplexen Prozesse unserer natürlichen Umwelt zu verstehen. Möge es dazu beitragen, eine Brücke zwischen Theorie und Praxis zu schlagen und neue Ideen und Innovationen zu stimulieren, die uns helfen, die Herausforderungen des 21. Jahrhunderts zu meistern und eine nachhaltige Zukunft für kommende Generationen zu gestalten.

Ihr



Jürgen Stamm

Inhalt

A1

Vorwort Stamm, J. 3
-----------------------------	---------

A2

Zum Einsatz künstlicher Intelligenz für die optische Bestimmung von Wasserstand und Durchfluss in natürlichen Fließgewässern Grundmann, J., Kutscher, A., Eltner, A., Blanch, X., Hedel, R.	..... 11
Ein Rückblick auf 20 Jahre dreidimensionaler Strömungssimulation an Wasserbauwerken Thorenz, C.	..... 19
BAW-Mitteilung 105: Feste Wehre an Bundeswasserstraßen: Untersuchungen zur Machbarkeit sowie Empfehlungen zur Umsetzung Belzner, F., Gebhardt, M.	..... 29

A3

Anthropogene Entwicklung naturnaher Süßwasserwatten und seiner Prielsystem im natürlich-dynamischen Gleichgewichtszustand mithilfe Hydrodynamischer Modelle Gönnert, G, Müller, J.-M.	..... 39
Möglichkeiten und Grenzen hydro- und morphodynamischer Simulationsmodelle bei der Optimierung von Renaturierungsmaßnahmen und der Nachweisführung am Beispiel der Unteren Havelwasserstraße Milbradt, P., Buchta, R.	..... 43
Experimentelle Untersuchungen von Dünnschichtabfluss auf natürlichem Grasland Oberle, P., Jakobs, T., Franca, M.	..... 45
Entwurf und Erfolgsprognose der Revitalisierungsmaßnahmen im Projekt Agile Iller Schneider, M., Kopecki, I., Haegele, T., Ortlepp, J.	..... 55

A4

Hybride Untersuchung zur Hydraulik und Morphodynamik an einem Laufwasserkraftwerk Popp, F., Theobald, S.	..... 61
Probabilistische Bewertung der Böschungsstabilität von Flussdeichen auf Basis numerischer Strömungssimulationen für die praktische Anwendung Öttl, M. A., Bender, J., Stamm, J.	..... 71
Ein Wechselsprung im Zulaufbereich eines Wehres – Wie geht das denn? Hornbogen, M. Sickert, M., Lehmann, M.	..... 79
HRB Straßberg – Optimierung der Betriebseinrichtungen im hydraulischen Modellversuch Haufe, H., Rudolf, A., Wewer, M.	..... 87
Geohydraulische Analyse der Auswirkungen von Schiffswellen auf die Stabilität von Gewässersohle und -ufer Montenegro, H., Dechant, L., Maier, D.	..... 95

B1

Untersuchungen zum Transportverhalten von Mikroplastik auf der Gewässersohle Ding, J., Musche, F., Adomat, Y., Grischek, T.	..... 97
Totholz in der Fließgewässerrevitalisierung: Experimentelle Analyse wirkender Strömungskräfte auf horizontale Zylinder Balmes, J. P.	..... 105
Untersuchung ökologischer Effekte von unterströmten Totholzstrukturen - Strömungsdiversität Rieger, K., Weber, M., Saenger, N.	..... 107
Bauwerksanpassungen in der Erosionsstrecke der Elbe aus hydraulischer, ökologischer und morphologischer Sicht am Beispiel der Pilotmaßnahme Klöden Kühne, E.	..... 117

B2

Zur Entwicklung der ethohydraulischen Modellierung auf verschiedenen Skalen 129
 Bensing, K., Lehmann, B.

Nicht zu schnell und nicht zu langsam: Ethohydraulische Untersuchungen zur Analyse und Ableitung von Bemessungsempfehlungen für Fischaufstiegsanlagen 139
 Scholten, M., Herbst, M., Pitsch, M., Schuetz, C., Weichert, R.

Einführung von Erschöpfung und Schwimmkapazität von Fischen in Schädigungsrisikomodellen durch CF 145
 Powalla, D., Kerikous, E., Hoerner, S.

Wohin des Weges Sturgeon Steve? Vorplanung von Fischauf- und Fischabstiegsanlagen am Eisernen Tor der Donau mittels Telemetrie und Hydronumerik (This project is funded by the European Union) 153
 Redeker, M., Gatzweiler, J., Meister, S.

Fischverhalten in Turbinen und Pumpen – Ergebnisse ethohydraulischer Modellversuche RETERO 161
 Wagner, F., Kopecki, I., Elling, J., Rößger, T., Salgueiro Roth, M., Stamm, J., Hoerner, S.

B3

Leitwerke und Einschwimmsperren für Fische an Wehranlagen 181
 Schwiersch, N., Frener, T., Heimerl, S., Grünzner, M.

Hydronumerische Optimierung von Wasserbauwerken im Bestand am Beispiel der Wehranlage Pulverweiden in Halle/Saale 189
 Jacob, K., Richter, R., Kanne, S., Velasco, D.

Gesteuerter Flutungspolder Außig - Physikalischer Modellversuch Einlaufbauwerk 197
 Matzke, A., Biebach, D.

Kolkbildung durch Voith-Schneider-Propeller 207
 Schwartpaul, C., Aberle, J., Berndt, J., Abdel-Maksoud, M., Pinkenburg, P., Drude, O., Palm, M.

Integratives Monitoring zur Realisierung eines angepassten Hochwasserbewirtschaftungskonzeptes in einem alpinen Einzugsgebiet 215
 Moser, M., Puschmann, L., Janu, S., Shire-Peterlechner, D., Holzapfel, P., Rindler, R.

Bisher erschienene Institutsmitteilungen 231

Technische Hydromechanik

Technische Hydromechanik 1 Grundlagen

von Gerhard Bollrich
8., aktualisierte Auflage 2019.
448 S. A5. Gebunden.
62,00 EUR
ISBN 978-3-410-29169-5

Aus dem Inhalt:

- Physikalische Eigenschaften des Wassers
- Stationäre Strömung in Druckrohrleitungen
- Stationäres Fließen in offenen Gerinnen
- Instationäre Strömungen
- Ausfluss aus Gefäßen und unter Schützen; Retention
- Abfluss über Wehre und Überfälle

Technische Hydromechanik 2 Spezialfälle

Herausgeber: Detlef Aigner, Dirk Carstensen
2., vollständig überarbeitete Auflage 2015. ca. 384 S. A5. Gebunden.
ca. 59,00 EUR
ISBN 978-3-410-22209-5

Aus dem Inhalt:

- Plötzlich veränderliche Strömungen in offenen Gerinnen
- Theorie der Wellenbewegung
- Dichteströmungen
- Geschiebe
- Flüssigkeitsstrahlen
- Druckrohrnetzrechnungen
- Feststofftransport
- Eis im Wasserbau

Technische Hydromechanik 3 Aufgabensammlung

von Helmut Martin, Reinhard Pohl
4., überarbeitete und erweiterte Auflage 2014.
260 S. A5. Gebunden.
28,00 EUR
ISBN 978-3-410-24130-0

Aus dem Inhalt:

- über 80 Aufgaben und Lösungen
- hydraulische Modellbildung
- Anwendung von Berechnungsalgorithmen
- analytische und grafische Lösungsverfahren

Technische Hydromechanik 4 Numerische und hydraulische Modelle

Herausgeber: Helmut Martin, Reinhard Pohl
3., überarbeitete Auflage 2015.
406 S. A5. Gebunden.
74,00 EUR
ISBN 978-3-410-24172-0

Aus dem Inhalt:

- Hydraulisches Versuchswesen
- Gerinneströmung
- Hydraulik der Wasserbehandlungsanlagen
- Hydraulische Probleme an ausgewählten Betriebseinrichtungen



Mehr Infos und Bestellung:

beuth.de/go/hydraulik

E-MAIL kundenservice@beuth.de

TELEFON +49 30 58885700-70

Zum Einsatz künstlicher Intelligenz für die optische Bestimmung von Wasserstand und Durchfluss in natürlichen Fließgewässern

Jens Grundmann, Anette Eltner, Xabier Blanch,
André Kutscher, Ralf Hedel

Stichworte: Optische Messung, künstliche Intelligenz, Wasser-
stand, Durchfluss

1 Motivation

Die Bewältigung von Naturkatastrophen, speziell von Starkregen und Hochwasser, stellt besondere Anforderungen an die Einsatzkräfte des Katastrophenschutzes. Aus Sicht von Einsatzleitungen sind im Hochwasserfall Beobachtungen der Fließgewässer für ein möglichst genaues Lagebild wünschenswert. Optische Messverfahren mit Hilfe von Kameras bieten hier Vorteile, da sie ohne Kontakt mit dem Wasser auskommen und gefahrlos einsetzbar sind. Aufgrund der wissenschaftlich-technischen Entwicklungen in den zurückliegenden Jahren im Hinblick auf Kamerasensorik, Bildauswertungsalgorithmen, Frameworks zur Nutzung künstlicher Intelligenz, PC-Rechenleistung und Mobilfunk besteht ein großes Potential, aktuelle Messwerte der hydrologisch/hydraulischen Kenngrößen in Fließgewässern anhand von Kameraaufnahmen nahezu in Echtzeit ermitteln zu können. Vor diesem Hintergrund entwickelt das Projekt „KIWA: Künstliche Intelligenz(KI) für die Hochwasserwarnung“ (<http://kiwa.hydro.tu-dresden.de/>) KI-basierte Werkzeuge für die robuste Quantifizierung von Wasserständen, Fließgeschwindigkeiten und Durchflüssen aus Überwachungskameras. Im Beitrag präsentieren wir den Arbeitsablauf für eine vollständig optische Messung von Zeitreihen des Wasserstandes und des Durchflusses aus Einzelbildern und kurzen Videosequenzen.

2 Methoden

2.1 Datengewinnung

Für die Entwicklung der Methoden wurden an drei langjährigen Messpegel der Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Sachsen (BfUL) Überwachungskameras installiert und die Messstellenumgebung für die optische Messung vorbereitet. Dazu zählen das Anbringen von Kontrollpunkten, um Bewegungen der Kamera im Bild detektieren zu können sowie die Erarbeitung eines hochpräzisen, georeferenzierten 3D-Geländemodells der Messstellenumgebung und des Flussbettes in Zentimetergenauigkeit. Hierfür wurde die Structure-from-Motion (SfM)-Technik eingesetzt, bei der Kamerabilder der Messstellenumgebung aus verschiedenen Perspektiven zu einem 3D-Modell verarbeitet werden. Gelingen dabei auch Aufnahmen der Gewässersohle (z.B. bei Niedrigwasser), können unter Berücksichtigung der Lichtbrechung (*Maas 2015*) auch die Unterwasserbereiche rekonstruiert werden (Abb. 1, links). Die Georeferenzierung erfolgt abschließend durch Einmessen der Kontrollpunkte mit einem Multiband GNSS Empfänger. Im Ergebnis liegt ein 3D-Geländemodell vor (Abb1., rechts), das einem Vergleich mit einer LiDAR-Vermessung mit Abweichungen im cm-Bereich standhält und die erforderliche Genauigkeit aufweist.

Die Kameras liefern jede 15 min ein Bild und eine kurze Videosequenz für die optische Messung. Deren Güte kann durch den Vergleich mit den Messwerten der Pegel ermittelt werden und sukzessive zur Verbesserung der Methoden beitragen.

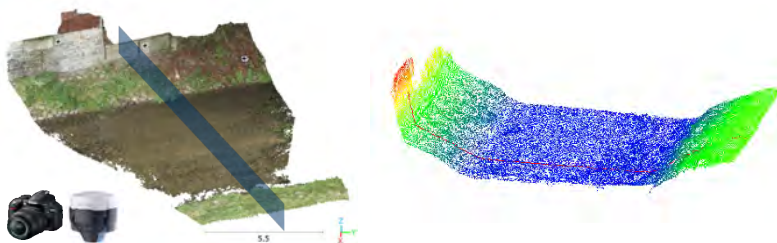


Abbildung 1: Links: 3D-Punktwolke im RGB Farbraum der Messstelle am Pegel Elbersdorf/Wesenitz mittels SfM-Technik; Rechts: 3D-Geländemodell des Messstellenbereiches

2.2 KI-basierte, automatisierte Wasserstandsmessung aus Kamerabildern

Zur Bestimmung des Wasserstandes wird in den Kamerabildern (Abb. 2 links) zunächst die Wasserfläche automatisiert mit einer KI detektiert und segmentiert (Abb. 2 Mitte). Zur Bestimmung des besten Modells für die Wassersegmentierung wurde die Toolbox AiSeg - Easy Pytorch Segmentation (Wagner *et al.* 2023) eingesetzt, die 32 unterschiedliche Architekturen basierend auf CNNs (convolutional neural networks) beinhaltet. Das Training der KI's zur Erkennung der Wasserflächen erfolgte mit 1.337 Bildern unterschiedlicher Gewässer, in denen die Wasserflächen manuell maskiert wurden. Der Trainingsdatensatz umfasste zu etwa 10 % Bilder von KIWA-Kamerastandorten. Die übrigen 90 % der Trainingsbilder stammten von anderen Standorten. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um eine möglichst robuste KI zu erhalten, die übertragbar und an mehreren Standorten einsetzbar ist. Die beste Performance der Segmentierung zeigte das CNN mit der Bezeichnung UPerNet + ResNeXt50. Im Pixel-weisen Vergleich mit unabhängigen Testdaten wurden die Wasserflächen mit einer Genauigkeit von 97,8 % detektiert. Die segmentierte Wasserfläche wird anschließend mit dem Geländemodell für die Messung des Wasserstandes verschnitten. Dies erfolgt durch eine Projektion des 3D-Geländemodells in den 2D-Bildraum zur Identifikation der nächsten Geländemodellpunkte zur Wasserlinie im Uferbereich (Abb. 2 rechts), entlang der nun die enthaltenen punktwisen Höheninformationen ausgewertet werden können. Der Langzeitbetrieb der Kamera zeigte, dass die Kamera in ihrer äußeren Position und Orientierung und der inneren Geometrie über die Zeit nicht hinreichend stabil ist, was zu zunehmenden Messungenauigkeiten im Vergleich zur Referenz führt. Deshalb wurde ein Algorithmus entwickelt, der ebenfalls KI-basiert Passpunkte in den Kamerabildern automatisiert detektiert, um basierend auf einem räumlichen Rückwärtsschnitt die Kameraposition für jede Messung neu zu bestimmen.



Abbildung 2: Bildaufnahme (links), automatisierte Segmentierung der Wasserfläche (Mitte) und Verschneidung der Wasserfläche mit dem projizierten DGM (rechts) am Beispiel des Pegels Elbersdorf/Wesenitz

2.3 Bestimmung der Durchflussmenge aus Videosequenzen mit KI-Unterstützung

Die Ermittlung des Durchflusses erfolgt auf Grundlage des Kontinuitätsgesetzes. Die hierfür benötigte Fließfläche wird anhand des optisch bestimmten Wasserstandes im Verschnitt mit dem Geländemodell bestimmt. Als weitere Eingangsgröße wird die Oberflächengeschwindigkeit verwendet, welche anhand kurzer Videosequenzen mit der FlowVelo-Toolbox (*Eltner et al. 2020*) und dem darin implementierten Partikel Tracking Verfahren (PTV) bestimmt wird. Der Arbeitsablauf umfasst folgende Schritte:

- Partikeldetektion: Partikel werden auf der Wasseroberfläche detektiert. Hierbei dient die zuvor KI-basiert segmentierte Wasserfläche als Suchraum.
- Tracking: Die detektierten Partikel werden in einem Video-Clip von Bild zu Bild verfolgt um ihre Bewegung zu erfassen.
- Filtern: Partikel die sich zu schnell, zu langsam oder in die falsche Richtung bewegen werden gefiltert.
- Transformation: Umrechnung der Ergebnisse aus dem Bildraum in den Objektraum mit Hilfe der bestimmten Kamerageometrie (2.1), dem 3D-Modell und dem Wasserstand, indem die Partikel im Bild in die Wasseroberfläche projiziert werden.

Die Genauigkeit des Verfahrens hängt einerseits vom Vorhandensein verfolgbarer Partikel auf der gesamten Fließbreite des Gewässers ab, was nicht zu allen Jahreszeiten und Abflussverhältnissen gegeben ist. Andererseits können die vorherrschenden Licht- und Sichtbedingungen, beeinflusst z.B. durch Reflektionen, Abschattungen, Dunkelheit, Nebel, starker Niederschlag oder Schneefall, die Messungen zusätzlich erschweren. Um unter derartigen Bedingungen kontinuierliche Durchflussganglinien aus den PTV-Messungen zu erhalten, wurde der neuartige Modellansatz „OptiQ“ entwickelt (*Kutscher et al. 2023*). Die Methode beinhaltet einen statistischen Ansatz, der aus zurückliegenden Messungen lernt. Hierbei werden die Messergebnisse einer Zeitreihe zu gleichen Wasserstands- und Abflussverhältnissen unter Verwendung des Geschwindigkeitsflächenverfahrens (*DIN 2022*) statistisch analysiert, gefiltert und in einer Datenbank zusammengefasst. Auftretende Messlücken in der Oberflächengeschwindigkeitsverteilung eines Querschnitts, die aufgrund von fehlenden Partikeln entstanden sind, können mit den Daten aus der Datenbank ergänzt werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

Beispielhaft zeigen die folgenden Abbildungen Ergebnisse für die optische Messung am Referenzpegel Elbersdorf/Wesenitz für das hydrologische Abflussjahr 2022. Abbildung 3 illustriert die Wasserstandsmessung bei Tag und bei Nacht. Die Nachtaufnahmen werden mit Unterstützung von Infrarot-Strahlern erzielt. Die Wasserflächensegmentierung erfolgt dabei mit einer eigens an Nachtbildern trainierten KI, die eine ähnliche Genauigkeit wie die KI für Tagbilder aufweist. Eine kontinuierliche Zeitreihe der optischen Wasserstandsmessung im Vergleich zur Referenz ist Abbildung 4 zu entnehmen. Basierend auf der Auswertung von ca. 17.600 gültigen Einzelmessung im Analysezeitraum konnte eine mittlere Abweichung von 1,35 cm der täglich gemittelten Werte erzielt werden. Die Genauigkeit der Wasserstandsmessung an weiteren Referenzpegeln liegt ebenfalls im Zentimeterbereich, wobei am

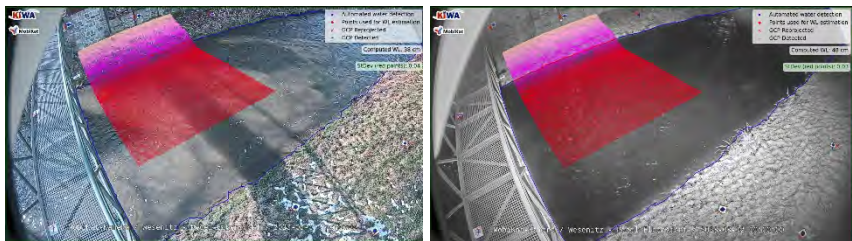


Abbildung 3: Messergebnis des Wasserstandes bei Tag (links) und Nacht (rechts) mit zusätzlichem IR-Strahler am Pegel Elbersdorf/Wesenitz

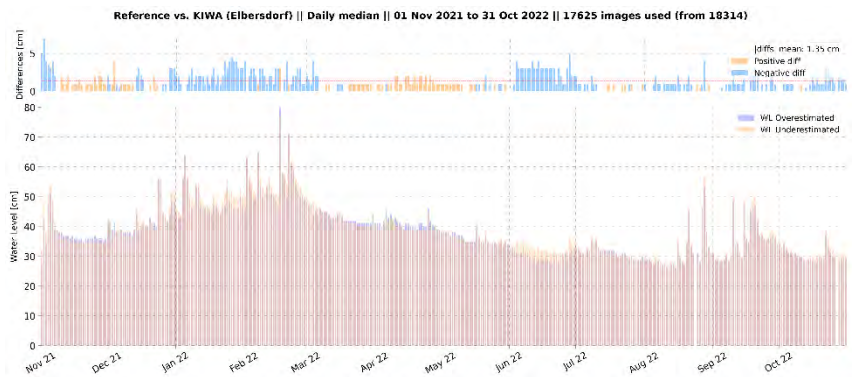


Abbildung 4: Messergebnis der optischen Wasserstandsmessung im Vergleich zur Referenz am Pegel Elbersdorf/Wesenitz für das Abflussjahr 2022

Pegel Lauenstein/Müglitz geringere und am Pegel Großschönau/Mandau etwas höhere mittlere Abweichungen gegenüber Elbersdorf zu verzeichnen sind. Die Ursachen sind zum einen im Messprinzip begründet, da die Referenzpegel den Wasserstand im Pegelschacht messen, der kurzzeitige Wasserstandsschwankungen dämpft. Zum anderen führt stark variierender Bewuchs entlang der Uferlinie zu Messungenauigkeiten des optischen Systems.

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Durchflussbestimmung nach Anwendung der OptiQ-Methode inklusive Lückenfüllung. Messlücken treten vor allem im Mittel- und Niedrigwasserbereich aufgrund fehlender Partikel auf, während bei Hochwasser häufig ein voll entwickeltes Strömungsbild ersichtlich ist. Generell zeigen die Ergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung mit der Referenz (siehe Vergleich zur Schlüsselkurve im kleinen Bild). Die mittlere quadratische Abweichung (RMSE) im Analysezeitraum liegt bei $0,045 \text{ m}^3/\text{s}$.

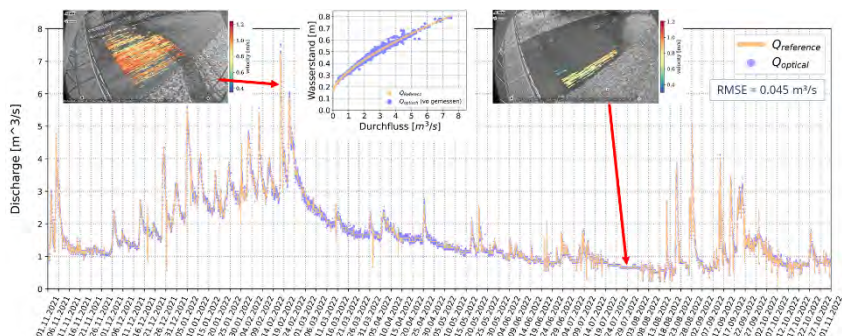


Abbildung 5: Vergleich der optischen Ermittlung des Durchflusses zur Referenz am Pegel Elbersdorf/Wesenitz anhand der Zeitreihe (großes Bild) und der Schlüsselkurve (kleines Bild). Die kleinen Bildaufnahmen enthalten die gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten mit PTV bei Hochwasser (links) und Niedrigwasser (rechts) in Abhängigkeit verfügbarer Partikel.

Ähnlich gute Ergebnisse wurden an den anderen Referenzpegeln erzielt. Allerdings können derart gute Ergebnisse nur erzielt werden, wenn Vergleichsmessungen vorliegen, weil beim Einsatz von Messmethoden der Oberflächengeschwindigkeit für die Durchflussbestimmung ein Korrekturfaktor erforderlich ist, um von der mittleren Oberflächengeschwindigkeit auf die mittlere Geschwindigkeit zu schließen (DIN 2022). Dieser Korrekturfaktor kann anhand der Vergleichsmessungen messstellenspezifisch optimal bestimmt werden. Andernfalls ist mit größeren Abweichungen beim Durchfluss zu rechnen.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Beitrag präsentierten wir den Arbeitsablauf für eine vollständig optische Messung von Zeitreihen des Wasserstandes und des Durchflusses aus Einzelbildern und kurzen Videosequenzen. Ein Kernstück der entwickelten Methoden ist der Einsatz künstlicher Intelligenz für die Bilderkennung und -segmentierung (Kontrollpunkte und Wasserflächen). Die entwickelten KI's haben sich auf andere Standorte übertragbar erwiesen und zeigen robuste Ergebnisse bei unterschiedlichen Umweltbedingungen und Belichtungsverhältnissen, allerdings noch nicht bei allen (z.B. extrem starker Schneefall). Sie leisten einen wesentlichen Beitrag, um Ergebnisse mit einer ausreichend hohen Genauigkeit über den gesamten Variationsbereich des Wasserstandes und Durchflusses zu erzielen, die deutlich über unseren Erwartungen liegen. Gegenüber dem ursprünglichen Projektziel, der Hochwasserwarnung, besteht ein großes Potential für weitere Anwendungsbereiche in der Hydrometrie und Gewässerüberwachung, da zusätzlich ein optischer Eindruck der Messstelle vermittelt wird. Eine Übertragung und Test der Methoden auf bislang unbeobachtete Messstellen werden derzeit im Rahmen des KIWA-Projekts durchgeführt. Damit einher geht die Integration der KI's in einen Demonstrator zur Einsatzführung und Überwachung bei der Bewältigung von Schadenslagen infolge Hochwasser und die Operationalisierung in einem Kamera-Dashboard mit aktuellen Messwerten der optischen Messung.

Weiteres Anwendungspotential ergibt sich aus der Tatsache, dass die Methoden prinzipiell auch mit low-cost Kamerasystemen und UAV-gestützt funktionieren (*Eltner et al. 2020*). Eine damit einhergehende Visualisierung von Fließmustern der Oberflächengeschwindigkeit könnte einen potentiellen Beitrag zur Kalibrierung hydrodynamischer Modelle leisten.

Danksagung

Die Projektergebnisse sind nur durch die Unterstützung der assoziierten Projektpartner erzielbar. Das Projektkonsortium dankt ihnen für ihr großes Engagement, speziell der BfUL Sachsen.

Das Projekt KIWA wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Richtlinie „Künstliche Intelligenz in der zivilen Sicherheitsforschung - Forschung für die zivile Sicherheit 2018 – 2023“.

5 Literatur

- DIN (2022): DIN EN ISO 748:2022-12, Hydrometrie - Durchflussmessung in offenen Gerinnen mittels Fließgeschwindigkeitsmessgeräten (ISO 748:2021).
- Eltner, A., Sardemann, H., Grundmann, J. (2020): Technical Note: Flow velocity and discharge measurement in rivers using terrestrial and unmanned-aerial-vehicle imagery. Hydrol. Earth Syst. Sci., 24, 1429–1445, 2020.
- Kutscher, A., Grundmann, J., Eltner, A., Blanch, X., and Hedel, R. (2023): Application of optical Particle Tracking Velocimetry (PTV) to determine continuous discharge time series, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 23–28 Apr 2023, EGU23-9946, 2023.
- Maas, H.-G. (2015): On the Accuracy Potential in Underwater/Multimedia Photogrammetry. Sensors 2015, 15, 18140-18152. 2015.
- Wagner, F., Eltner, A., Maas, H.-G. (2023): River water segmentation in surveillance camera images: A comparative study of offline and online augmentation using 32 CNNs, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 119, 2023.

Dr. Jens Grundmann
André Kutscher
Technische Universität Dresden
Professur für Hydrologie
Bergstr. 66
01069 Dresden
Tel.: +49 351 46335556
E-Mail: jens.grundmann@tu-dres-
den.de
andre.kutscher1@tu-dres-
den.de

JProf. Anette Eltner
Dr. Xabier Blanch
Technische Universität Dresden
Juniorprofessur für Geosensorsysteme
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden
Tel.: +49 351 46332737
E-Mail: Anette.Eltner@tu-dres-
den.de
xabier_blanch.gorritz@tu-
dresden.de

Dr. Ralf Hedel
Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und
Infrastruktursysteme IVI
Zeunerstraße 38
01069 Dresden
Tel.: +49 351 4640679
E-Mail: ralf.hedel@ivi.fraun-
hofer.de

Ein Rückblick auf 20 Jahre dreidimensionaler Strömungssimulation an Wasserbauwerken

Carsten Thorenz

Stichworte: Wasserbauwerke, Strömungssimulation, CFD

1 Einführung

Für die Beurteilung der hydraulischen Funktion von Wasserbauwerken sind Modelle ein unverzichtbares Werkzeug, da sie vertiefte Einblicke in das Strömungsgeschehen erlauben. Im Gegensatz zu Bemessungsformeln aus Lehrbüchern können auch ungewöhnliche und komplexe Geometrien beurteilt werden. Ohne Modelle lässt sich ein komplexes Strömungsverhalten, wie das in Abbildung 1 gezeigte Füllen einer Schleusenammer, nur grob beschreiben. Zwar ließe sich mit einfachen Formeln der Volumenstrom recht genau abschätzen, die Ausbreitung des Strahls in der Kammer und die Auswirkung auf in der Kammer liegende Schiffe wäre jedoch nicht beurteilbar.



Abbildung 1: Füllung einer Schleusenkammer am Saimaa-Kanal (Finnland) durch spaltbreites Öffnen eines Segmenttorpaares

Bereits vor über einhundert Jahren wurden daher in Wasserbaulaboratorien wie dem Hubert-Engels-Labor in Dresden oder der Königlich-Preußischen Versuchsanstalt in Berlin gegenständliche Modelle von Wasserbauwerken erstellt, um genauere Kenntnisse über die Strömungsverhältnisse zu erlangen. Etwa seit Beginn des 21. Jahrhunderts stehen auch numerische Methoden zur Verfügung, die ähnliche Betrachtungen erlauben. Die Anwendung dieser Methoden in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in den letzten zwei Jahrzehnte soll hier beleuchtet werden.

2 Methoden

2.1 Numerische Verfahren

Ein Großteil der heute in der Praxis verwendeten numerischen Verfahren wurden bereits vor längerer Zeit in ihren theoretischen Grundlagen erarbeitet. Die heute im Ingenieurwesen wohl am häufigsten eingesetzte Methode für die räumliche Diskretisierung der dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen ist die Finite-Volumen-Methode (FVM, Launder & Spalding, 1972). Diese zeichnet sich gegenüber der in anderen Wissenschaftsbereichen verbreiteten Finite-Differenzen-Methode dadurch aus, dass beliebig komplexe unstrukturierte Berechnungsgitter verwendet werden können. Im Gegensatz dazu setzen Finite-Differenzen immer eine Strukturiertheit voraus, was die Anpassung des Berechnungsgitters an die Vorstellungen des Modellierers (Geometrie-Abbildung) und an die notwendigen Genauigkeitsanforderungen schwierig machen kann. Andere Methoden, wie bspw. die Finite-Elemente-Methode oder auch partikelbasierte Methoden sind derzeit nur wenig verbreitet.

Wesentlich zum Erfolg der FVM hat die Verfügbarkeit von (semi-)automatischen Gitternetzgeneratoren beigetragen. Anfang der 2000er Jahre wurden vielfach noch blockstrukturierte Gitter eingesetzt (Abbildung 2, links). Bei diesen musste mit großem Aufwand die Struktur des Gitters so an die Geometrie angepasst werden, dass überall stetig durchlaufende Gitternetzlinien vorhanden sind. Dies ist bei komplexen dreidimensionalen Geometrien kaum möglich, so dass die Geometrie vereinfacht werden musste. Bald darauf setzten sich unstrukturierte Gitter durch, die die Geometrieanpassung erheblich

vereinfachen. Abbildung 2 (rechts) zeigt einen Anschnitt eines Berechnungsgitters im Bereich eines Drucksegmenttores (gelb). Die CAD-Geometrie konnte hier mit allen Details importiert und das Gitter entsprechend der Geometrie lokal verfeinert werden. Dadurch wird es möglich, auch die Einflüsse kleiner Geometrieelemente auf die Strömung korrekt zu erfassen.

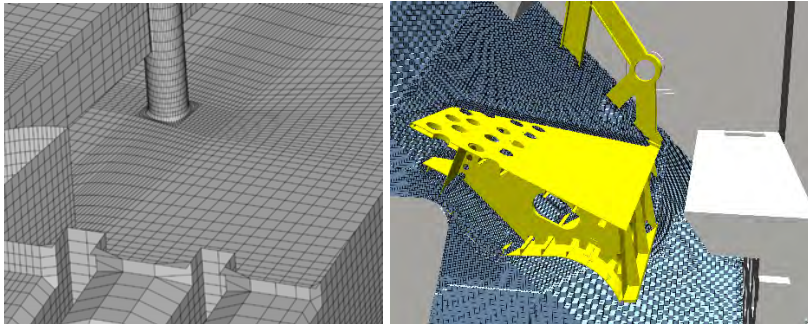


Abbildung 2: Blockstrukturiertes Berechnungsgitter eines Auslaufbeckens mit aufgeständerter Tauchwand (links) und unstrukturiert vernetztes Drucksegment (rechts)

Bei der numerischen Beurteilung der Strömung im Nahfeld von Wasserbauwerken ist die Abbildung der freien Wasseroberfläche eine besondere Herausforderung. Im Gegensatz zu flussbaulichen Modellen ist im Umfeld von Wasserbauwerken keine eindeutige vertikale Staffelung "Sohle-Wasser-Luft" gegeben. Dies erfordert komplexere Simulationsmethoden, die eine beliebige Anordnung im Raum erlauben. So können beispielsweise Überfallstrahlen auftreten, die auf Ober- und Unterseite Kontakt zur Luft haben (s. Abbildung 1). Ebenso kann das Wasser zunächst vollständig vom Bauwerkskörper umgeben sein (bspw. in einem Schleusenfüllsystem), um dann in einen Bereich mit Kontakt zur Luft zu kommen. Dies erfordert numerische Verfahren, die eine beliebige Anordnung von Baukörper, Luft und Wasser im Raum erlauben. Für diese Fragen hat sich im Wesentlichen die Volume-of-Fluid Methode (VoF) durchgesetzt (Hirt & Nichols, 1981). Diese beschreibt die Bewegung der Fluide Luft und Wasser mit einer einzelnen Impulsgleichung mit variablen Koeffizienten für Dichte und Viskosität. Die wesentliche Einschränkung dieser Methode besteht darin, dass die Luft-Wasser-Grenzflächen erheblich größer sein müssen als die Gitterweite, d.h. der Transport von Blasen oder Tröpfchen kann in wasserbaulichen Größenskalen nicht korrekt be-

rechnet werden. Neuere Entwicklungen (Thorenz & Grefenstein, 2022), versuchen diese Einschränkung zu begegnen, indem die Bewegung von Blasen auf kleinerer Skala als eigener Prozess modelliert wird.

Teilweise wird in numerischen Verfahren auf die Betrachtung der Luft verzichtet und angenommen, dass Unterdruckbereiche automatisch zu einer perfekten Belüftung führen. Dies ist nur dann zutreffend, wenn sichergestellt wird, dass dies auch in der Realität tatsächlich der Fall ist. Es kann beispielsweise auf der Rückseite von Klappen durchaus zu Unterdruckbereichen kommen, die zu einem Ansaugen des Strahls führen. Hier ist der fachkundige Modellierer gefordert, der dieses ggf. vorhandene Manko seines Modellverfahrens kennt und ggf. die Ergebnisse gezielt daraufhin prüft.

2.2 Visualisierung

Sowohl bei der fachwissenschaftlichen Bearbeitung als auch bei der Ergebniskommunikation kommt der Visualisierung eine wichtige Rolle zu. Entscheidend ist es hierbei, diese Anforderungen sauber zu durchdenken und ggf. auch zu trennen. Für die fachliche Beurteilung und Diskussion sollten Datensätze so unverfälscht wie möglich verwendet werden, d.h. das Glätten oder Interpolieren der Daten sollte vermieden werden, damit eventuelle numerische Einschränkungen (bspw. die Gitterauflösung oder numerische Instabilitäten) in den Ergebnissen sichtbar bleiben. Für die Präsentation gegenüber Laien kann es jedoch hilfreich sein, eine möglichst „realistisch“ wirkende Darstellung zu wählen (Abbildung 3).

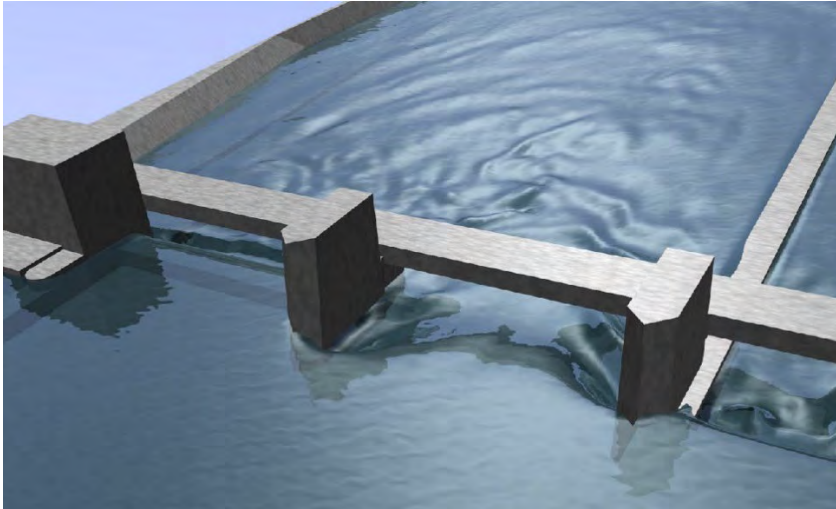


Abbildung 3: Fotorealistisches Rendering der Strömungssimulation an einer Wehranlage im (n-1)-Fall (Farrel, unveröffentlicht)

3 Hardware

Seit dem Beginn der IT-Technologie in den 1950er Jahren ist die Weiterentwicklung der Hardware rasant. Das als „Moore’s Law“ bekannte exponentielle Wachstum der Packungsdichte von Computerchips hat sich im Wesentlichen weiter fortgesetzt und führt dazu, dass Computerleistungen die Anfang der 2000er Jahre noch in schrankwandgroßen Systemen zu finden waren (Abbildung 4), heute in leistungsfähigen Desktopcomputern erhältlich sind.



Abbildung 4: Computersystem der BAW 2006: SGI-Altix mit 304 Itanium2-Prozessoren

Dies bedeutet jedoch nicht, dass heutzutage Desktopcomputer für umfangreiche wasserbauwerksnahe Simulationen ausreichend sind. Dies ist meist nur für einfache Fragestellungen der Fall. Auch dann muss sehr kritisch hinterfragt werden, ob die verwendete Gitterauflösung tatsächlich alle relevanten Strömungsstrukturen abbilden kann. In der BAW werden weiterhin große Rechnersysteme betrieben, die jedoch bei ähnlichem Platz- und Strombedarf wie das oben gezeigte System eine mehr als hundertfach höhere Rechenleistung aufweisen. Dies ist erforderlich, um die Genauigkeitsmängel zu grober Berechnungsgitter zu vermeiden, die Unsicherheiten aus der Turbulenzmodellierung mit fortgeschrittenen Methoden („Large-Eddy-Simulation“) zu minimieren und um die Anzahl der betrachteten Varianten zu erhöhen.

4 Qualitätssicherung

Ein wesentlicher, und in seiner Wichtigkeit oft unterschätzter Punkt in der numerischen Modellierung ist die Qualitätssicherung. Insbesondere kommerziell vertriebene Modellverfahren liefern auf den ersten Blick plausibel erscheinende Ergebnisse auch dann, wenn die Qualität fragwürdig ist. Hier

ist es die Aufgabe des fachkundigen Modellierers, die physikalischen und numerischen Grundannahmen des verwendeten Modellverfahrens zu kennen und zu beurteilen, ob das Verfahren für die Fragestellung valide Ergebnisse liefern kann. So ist es beispielsweise unabdingbar, wandnah verfeinerte Berechnungsgitter zu verwenden, wenn Reibungseinflüsse korrekt prognostiziert werden sollen oder es auf konvexen Wänden zu Ablösungen kommen kann. Wenn bspw. der Saugschlauch einer Turbine untersucht wird, ist ein Verfahren, dass die Geometrie lediglich aus dem Gitter „ausschneidet“, ungeeignet. Auch darf die erforderliche Gitterauflösung nicht unbeachtet bleiben. In Anbetracht der ggf. großen erforderlichen Rechenleistung ist die Versuchung groß, diesen Aspekt zu vernachlässigen, um das Problem überhaupt rechenbar zu machen. Die oft verwendete Methode des „grid convergence index“ kann nur dann korrekt funktionieren, wenn das Modell bereits so fein aufgelöst ist, dass alle wesentlichen Aspekte des Strömungsregimes erfasst sind. Die approximierte Lösung befindet sich also bereits im sogenannten „asymptotischen Bereich“ der wahren Lösung.

Ebenso müssen die verwendeten Diskretisierungsschemata so gewählt werden, dass sie zu den verwendeten physikalischen Annahmen passen. Um bspw. hochauflösende Wirbelsimulationen durchführen zu können, sind qualitativ hochwertige (und damit ggf. langsame oder instabile) Advektions-schemata erforderlich. Dies ist zusammen mit der Überprüfung der physikalischen Grundannahmen zu sehen. Ein kritischer Punkt ist die korrekte Modellierung des turbulenten Geschehens. Abbildung 5 zeigt den zur Ergebnisabsicherung durchgeführten Vergleich zweier Modellverfahren mit verschiedenen Turbulenzansätzen. Erkennbar ist, dass die Detailstrukturen sich unterscheiden, das großräumige ingenieurlich maßgebliche Ergebnis jedoch dasselbe ist.

Ein oft gemachter Fehler in hochaufgelösten dreidimensionalen Modellen ist die „falsche Kalibrierung“. Bei dieser werden bekannt korrekte Daten verwendet, um Fehler im numerischen Modell wegzukalibrieren. Dies wird auffällig, wenn nicht die nur tatsächlich unbekannte Größen kalibriert werden (wie die Rauigkeit von Vorländern), sondern eigentlich bekannte Größen verändert werden (Rauigkeit von Betonoberflächen), bis das Ergebnis „passt“.

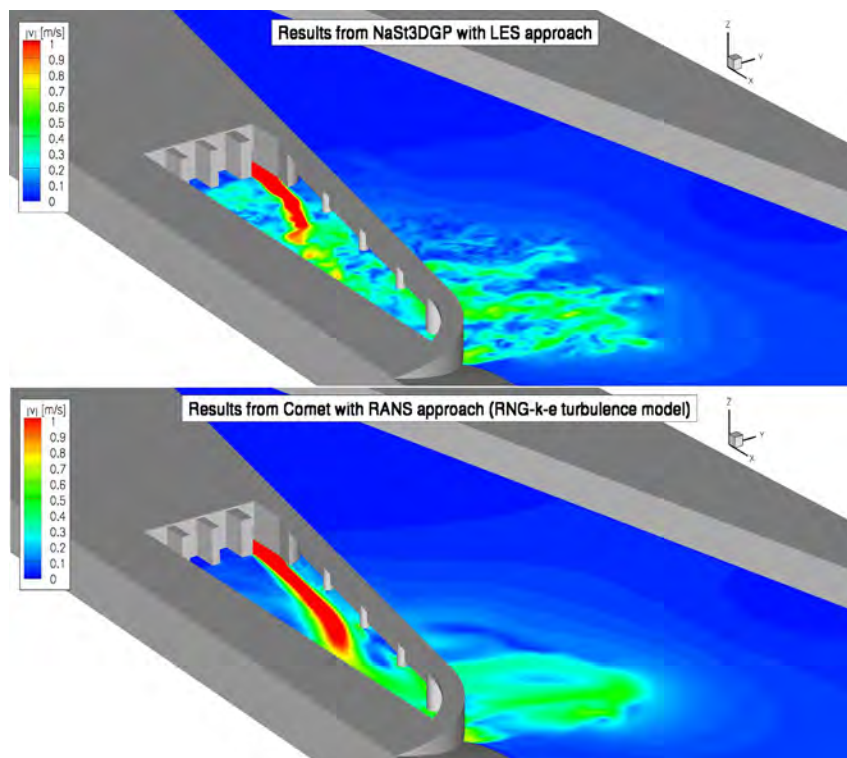


Abbildung 5: Horizontale Scheibe im Bereich eines Auslaufbauwerks an einem Schleusenvorhafen. Oben: Berechnung mit LES-Turbulenzmodell, unten Berechnung mit RANS-Turbulenzmodell

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

In den letzten Jahrzehnten haben die numerischen Simulationsverfahren einen rasanten Aufstieg erlebt. Dieser wurde jedoch im Wesentlichen nicht durch neue technologische Entwicklungen im Bereich der Numerik, sondern durch die steigende Rechenleistung ausgelöst. Dadurch hat die dreidimensionale numerische Simulation die akademische Nische verlassen und ist zu einem unentbehrlichen Werkzeug in der wasserbaulichen Beratung geworden. Durch vielfältige Praxisanwendungen konnten in der BAW Erfahrungen über die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendbarkeit gewonnen werden.

Dabei zeigte sich besonders, dass die Einschätzung der Qualität numerischer Modellergebnisse eine große Herausforderung darstellt. Ingenieure, die über kein strömungsmechanisches Hintergrundwissen verfügen laufen dabei Gefahr "bunten Bildern" zu trauen, welche die Simulationsverfahren auch dann produzieren, wenn die gewählten physikalischen Modellansätze unzureichend sind oder die numerische Qualität nicht ausreichend ist.

Die weiter steigende Rechenleistung lässt erwarten, dass zukünftig verstärkt physikalisch komplexere Phänomene betrachtet werden können. Dies sind beispielsweise der Umgang mit Luft-Wasser-Durchmischungen, Dichteströmungen oder Feststofftransport.

Derzeit noch nicht absehbar ist, wie schnell sich die Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) auch in diesem Bereich etablieren. Im Bereich der Wetersimulation haben KI-Verfahren im letzten Jahr beeindruckende Fortschritte gemacht und werden erkennbar schon sehr bald das Portfolio der Simulationsverfahren ergänzen. Ebenso wenig absehbar ist, ob oder wann Quantencomputer im Bereich der Strömungssimulation eine Rolle spielen werden. Hier scheint derzeit die Anwendungsreife jedoch noch deutlich weiter entfernt als bei KI-Anwendungen.

6 Literatur

- Launder, B.E., Spalding, D.B. (1972): Mathematical models of turbulence. Academic Press, Massachusetts
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries" Journal of Computational Physics, 39, 201.
- Thorenz, C. and Grefenstien, A. (2022): "Numerical Modeling of Air Bubble Transport Behind a Model Scale Weir", In: Ortega-Sánchez, M. (ed.): Proceedings of the 39th IAHR World Congress, Granada, IAHR, Madrid, Spain, <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC252171192022308>

Autor:

Dr.-Ing. Carsten Thorenz

Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstr. 17
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726 3560
E-Mail: carsten.thorenz@baw.de

BAW Mitteilungen Nr. 105: „Feste Wehre an Bundeswasserstraßen: Untersuchun- gen zur Machbarkeit sowie Empfehlungen zur Umsetzung

Fabian Belzner
Michael Gebhardt

Stichworte: Wasserstraße, Wehr, Festes Wehr, Labyrinth-Wehr

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) betreibt an den Bundeswasserstraßen über 300 Wehranlagen. Diese dienen meist der Aufrechterhaltung eines Staus und ermöglichen die Nutzung der Wasserstraße für die Binnenschifffahrt und die Wasserkrafterzeugung. Gleichzeitig müssen diese Anlagen über eine genügende Leistungsfähigkeit verfügen, um Hochwasserereignisse schadenfrei abzuführen. Der Großteil dieser Wehranlagen verfügt über bewegliche Verschlüsse, die eine Regelung des Oberwasserstands innerhalb planfestgestellter Staulamellen von wenigen Zentimetern ermöglichen. Typischerweise wird hierzu der Abflussquerschnitt der Verschlüsse dem Abfluss angepasst, um über ein möglichst großes Abflussspektrum einen konstanten Oberwasserstand zu garantieren.

Betrieb und Unterhalt dieser beweglichen Verschlüsse bedeuten erhebliche finanzielle und personelle Aufwände. Stahlwasserbauteile unterliegen beispielsweise einem kontinuierlichen Verschleiß. Ebenso muss der Korrosionsschutz regelmäßig erneuert werden.

1.2 Feste Wehre

Um Kosten für Betrieb und Unterhalt dieser beweglichen Verschlüsse zu sparen, können Wehre mit beweglichen Verschlüssen unter bestimmten Randbedingungen durch feste Wehre ersetzt werden. Hierfür kommen neuere Wehrtypen wie Labyrinth- oder Piano-Key-Wehre sowie etabliertere Typen wie Streichwehre oder Raue Rampen in Frage (Abbildung 1).

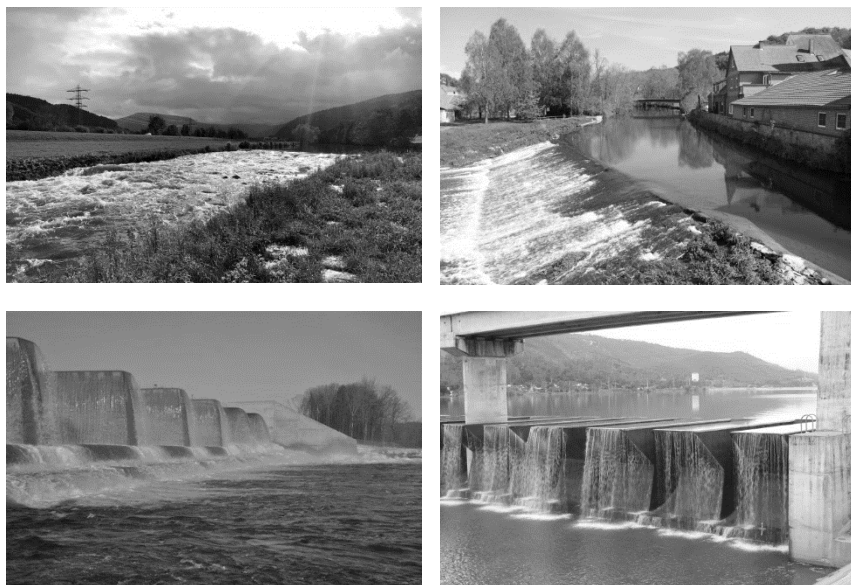


Abbildung 1: Feste Wehrtypen bzw. Sohlenbauwerke: a) Sohlengleite; b) Streichwehr; c) Labyrinth-Wehr (zur Verfügung gestellt von Brian Crookston, Utah State University) und d) Piano-Key-Wehr

Im Gegensatz zu beweglichen Wehren ist der Oberwasserstand bei festen Wehren eine Funktion der Geometrie und des Abflusses und steigt mit zunehmendem Abfluss an.

In Abbildung 2 ist ein schematischer Vergleich der Wehrkennlinien eines beweglichen Wehrs mit den Wehrkennlinien zweier Labyrinth-Wehre unterschiedlicher Kronenhöhen dargestellt. Die Wehrkennlinie des beweglichen Wehrs ist zunächst horizontal und unabhängig vom Abfluss, da eine Erhöhung des Abflusses mit einer zusätzlichen Freigabe von Abflussquerschnitt

kompensiert werden kann. Mit steigendem Unterwasserstand treten Rückstaueffekte auf und der Oberwasserstand folgt dem Unterwasserstand. Die Überfallkrone des Labyrinth-Wehrs entspricht in diesem Beispiel der Mitte der Toleranzlamelle. Mit zunehmendem Abfluss steigt der Oberwasserstand kontinuierlich an. Die Kennlinie ist aufgrund der für Labyrinth-Wehre typischen langen Überfallkrone und der damit einhergehenden Leistungsfähigkeit vergleichsweise flach. Die graue gestrichelte Linie zeigt ein Labyrinth-Wehr mit tieferer Überfallkrone. Auch hier steigt der Oberwasserstand mit zunehmendem Abfluss an, allerdings überschreitet er erst bei einem größeren Abfluss die obere Toleranzgrenze. Das heißt, dass der Oberwasserstand über einen größeren Zeitraum innerhalb der Toleranz gehalten werden kann und damit der Wehrkennlinie eines beweglichen Wehres sehr nahe kommt.

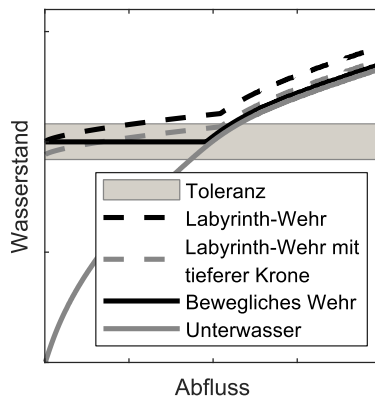


Abbildung 2: Schematischer Vergleich der Wehrkennlinien eines beweglichen Wehres mit den Kennlinien von Labyrinth-Wehren unterschiedlicher Kronenhöhen.

Umso größer die vorhandene Toleranz, umso eher kann ein Labyrinth-Wehr realisiert werden. Feste Wehre sind daher meist für Wasserstraßen mit nachrangiger verkehrlicher Bedeutung geeignet, an denen auf eine zentimetergenaue Regelung des Oberwasserstandes verzichtet werden kann.

Weitere Überlegungen zur generellen Machbarkeit von Festen Wehren an Bundeswasserstraßen und eine Diskussion von für spezifische Standorte geeigneten Wehrtypen können Gebhardt (2020) entnommen werden.

2 Untersuchungen

2.1 Ziel der Untersuchungen

Streichwehre werden bereits seit dem Mittelalter genutzt und sind auch an den Bundeswasserstraßen, u. a. an der Lahn und am Main, zu finden. Piano-Key-Wehre werden heute primär zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit bestehender Hochwasserentlastungsanlagen an Talsperren eingesetzt.

Bislang bestehen noch keine Erfahrungen mit der Nutzung von Labyrinth- und Piano-Key-Wehren an staugeregelten Wasserstraßen. Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) untersuchte daher im Auftrag des BMDV (damals: BMVI) Labyrinth- und Piano-Key-Wehre im Hinblick auf ihre grundsätzliche Eignung. Hierfür wurden die bisherigen Erkenntnisse zusammengetragen aber auch eigene Untersuchungen durchgeführt (z.B. Belzner 2020). Die Untersuchungen hatten das Ziel, Empfehlungen zur hydraulischen Bemessung und zur konstruktiven Ausführung zu geben. Die Ergebnisse sind in den BAWMitteilungen Nr. 105 (Bundesanstalt für Wasserbau 2020) zusammengefasst.

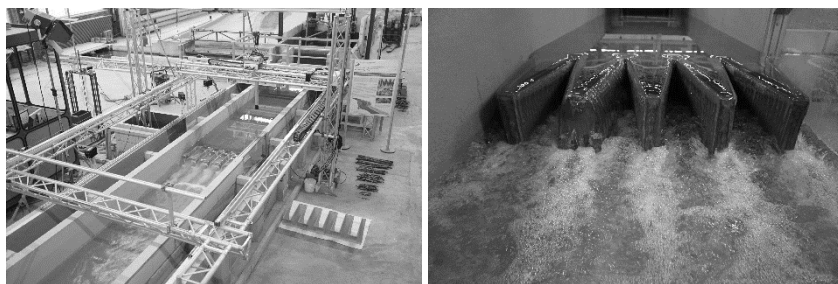


Abbildung 3: Links: Versuchsaufbau im Labor der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe. Rechts: Vollkommener Überfall über ein Labyrinth-Wehr

2.2 Hydraulische Leistungsfähigkeit

Beim Abfluss über ein Wehr ist zwischen freiem und rückgestautem Abfluss zu unterscheiden. Freier Abfluss liegt dann vor, wenn der Oberwasserstand eine Funktion der Geometrie und des Abflusses ist. In diesem Fall kann der

Abfluss Q mit der Formel von DuBuat (u.a. Aigner und Bollrich 2012) in Abhängigkeit von dem Abflussbeiwert C_d , der Überfalllänge L und der Energiehöhe oberhalb der Krone H_u bestimmt werden:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot H_u^{\frac{3}{2}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Eine Formel zur Bestimmung der Abflussbeiwerte C_d für trapezförmige Labyrinth-Wehre wurde von Crookston und Tullis (2013) entwickelt.

Bei auftretenden Rückstauinflüssen muss die Energiehöhe im Unterwasser H_d berücksichtigt werden. Die Energiehöhe H_u^* des rückgestauten Abflusses kann dann mit den Ansätzen von Tullis et al. (2007) bestimmt werden.

Zur Ergänzung führte die BAW eigene Untersuchungen im Labor durch (Abbildung 3). Eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Versuche sowie eine kritische Diskussion der Ergebnisse kann Belzner et al. (2017) entnommen werden.

2.3 Feststoffdurchgängigkeit

Bei festen Wehren können im Oberwasser akkumulierte Feststoffe, wie Sediment, Eis und Treibholz, nicht aktiv abgeführt werden. Daher stellt sich die Frage, welche Auswirkungen das auf die hydraulische Leistungsfähigkeit hat und welcher Aufstau daraus ggf. resultiert.

In der BAW wurden Versuche mit Sedimenten verschiedener Korngröße und Korndichte in Kombination mit unterschiedlichen Abflüssen durchgeführt. Abbildung 4 zeigt den Versuchsaufbau mit einem trapezförmiges Labyrinth-Wehr (Blick in Fließrichtung). Dabei ist zu erkennen, dass sich die Sedimentmenge in einem Inlet-Key mit steigendem Abfluss verringert und das Sediment schließlich vollständig über das Wehr ins Unterwasser transportiert wird. Die verbleibende Sedimentmenge hängt dabei maßgeblich von der densimetrischen Froude-Zahl ab (vgl. Gebhardt et al. 2018).

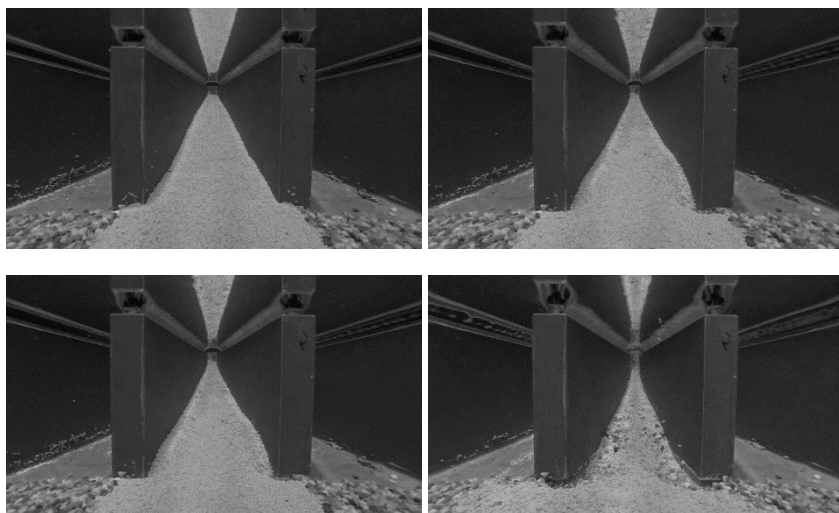


Abbildung 4: Versuche zur Sedimentdurchgängigkeit an einem trapezförmigen Labyrinth-Wehr. In der zeitlichen Abfolge von links nach rechts und von oben nach unten.

Weiterhin wurden Versuche zur Abfuhr von Treibeis und Treibholz durchgeführt, die zu einem ähnlichen Ergebnis führten: Bei geringen Überfallhöhen kommt es zu einer Akkumulation von Eis und Treibholz auf der Überfallkrone des Labyrinth-Wehrs, was zu einer messbaren, aber sehr kleinen Erhöhung des Oberwasserstands führt. Steigt der Abfluss und damit der Oberwasserstand, hebt sich dieser Treibgutteppich an und wird ins Unterwasser abtransportiert. Die weitere Reduktion der Leistungsfähigkeit durch noch verbleibendes Treibgut ist vernachlässigbar klein.

3 Labyrinth-Wehre an Bundeswasserstraßen

In der WSV werden aktuell drei bewegliche Wehre durch Labyrinth-Wehre in Kombination mit einer überströmten Klappe ersetzt. Dabei wird jeweils ein Labyrinth-Wehr mit einer Wehrfeldbreite von 10,25 m (Kronenlänge: 35,70 m) mit einer parallel angeordneten Klappe (Breite: 1,40 m) kombiniert (Abbildung 5, links). Die Klappe wird mit steigendem Abfluss kontinuierlich geöffnet, sodass das bisherige Stauziel über einen Großteil des

Jahres gehalten werden kann. Gleichzeitig dient die Klappe als Bypass für absteigende Fische. Erst wenn die Klappe vollständig gelegt ist, beginnt der Überfall über das Labyrinth-Wehr und der Oberwasserstand steigt mit dem Abfluss an.

Abbildung 5 (rechts) zeigt das Zusammenwirken von Labyrinth-Wehr und Klappe in Abhängigkeit vom Abfluss. Der Gesamtabfluss ist dabei auf der y-Achse dargestellt.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Feste Wehre sind im Vergleich zu beweglichen Wehren eine kostengünstige Lösung mit reduziertem Unterhaltungsaufwand. Mit Labyrinth-Wehren kann aufgrund der großen Überfalllänge eine flache Wehrkennlinie erreicht werden, sodass sich bei Niedrig- bis Mittelwasser die bisherigen Oberwasserstände nicht wesentlich ändern und gleichzeitig die Hochwasserneutralität gewährleistet werden kann. Insbesondere in Kombination mit einer Klappe kann über einen Großteil des Jahres der Oberwasserstand geregelt und gleichzeitig ein Abstiegskorridor für Fische angeboten werden.

Die BAWMitteilungen Nr. 105 enthalten, neben generellen Überlegungen zur Machbarkeit von Festen Wehren, Bemessungshinweise und Konstruktionsempfehlungen für neuere Wehrtypen wie Labyrinth- und Piano-Key-Wehre, aber auch für klassische feste Wehre wie z.B. Streichwehre.

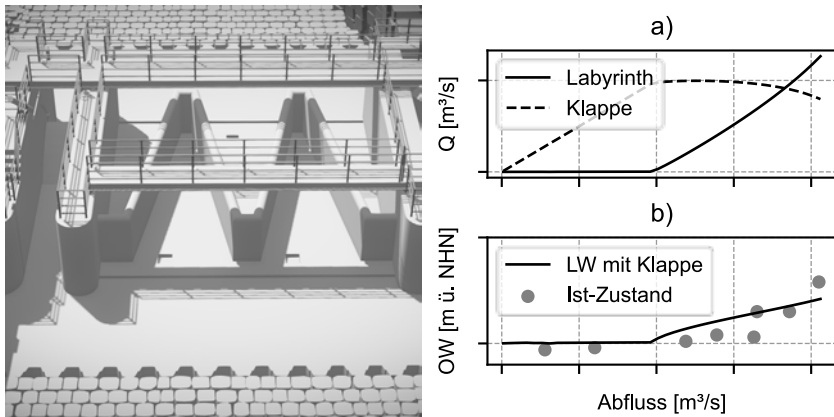


Abbildung 5: Geplante Wehranlage bestehend aus Labyrinth-Wehr und Klappe. Links: Rendering der Anlage, rechts: a) Abfluss über Klappe und Labyrinth-Wehr (LW). b) Oberwasserstad im Ist-Zustand im Vergleich mit den zukünftigen Wasserständen.

4 Literaturverzeichnis

Aigner, Detlef; Bollrich, Gerhard (2012): Handbuch der Hydraulik. 1., Aufl. Berlin: Beuth (Bauwesen : Wissen).

Belzner, F.; Merkel, J.; Gebhardt, M.; Thorenz, C. (2017): Piano Key and Labyrinth Weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW. In: Sébastien Erpicum, Frédéric Laugier, Michel Ho Ta Khanh und Michael Pfister (Hg.): Labyrinth and Piano Key Weirs III. PKW 2017. Boca Raton: CRC Press, S. 167–174.

Belzner, Fabian (2020): Labyrinth-Wehre. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen. Feste Wehre an Bundeswasserstraßen. Karlsruhe: im Eigenverlag (105).

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2020): BAWMitteilungen. Feste Wehre an Bundeswasserstraßen. Karlsruhe: im Eigenverlag (105).

Crookston, B. M.; Tullis, B. P. (2013): Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships. In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139 (5), S. 363–370.

Gebhardt, Michael (2020): Feste Wehre an Bundeswasserstraßen. Geeignete Wehrtypen und mögliche Standorte. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen. Feste Wehre an Bundeswasserstraßen. Karlsruhe: im Eigenverlag (105), S. 7–26.

Gebhardt, Michael; Herbst, Jakob; Merkel, Jennifer; Belzner, Fabian (2018): Sedimentation at labyrinth weirs – an experimental study of the self-cleaning process. In: *Journal of Hydraulic Research* 90, S. 1–12. DOI: 10.1080/00221686.2018.1494053.

Tullis, B. P.; Young, J. C.; Chandler, M. A. (2007): Head-Discharge Relationships for Submerged Labyrinth Weirs. In: *J. Hydraul. Eng.* 133 (3), S. 248–254. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:3(248).

Fabian Belzner, M.Eng.

Dr.-Ing. Michael Gebhardt

Bundesanstalt für Wasserbau
Kussmaulstr. 17
76187 Karlsruhe

Bundesanstalt für Wasserbau
Kussmaulstr. 17
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726-2220
Fax: +49 721 9726-4540
E-Mail: fabian.belzner@baw.de

Tel.: +49 721 9726-3410
Fax: +49 721 9726-4540
E-Mail: Michael.gebhardt@baw.de

Handbuch der Hydraulik

für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Das »Handbuch der Hydraulik« bildet das gesamte Spektrum der Hydraulik in Wasserbau und Wasserwirtschaft ab. Es ist als erweitertes Nachschlagewerk für Ingenieure, Studierende und Auszubildende konzipiert und die ideale Ergänzung zu der vierbändigen Fachbuchreihe »Technische Hydromechanik«. Speziell auf die Lösung von praktischen hydromechanischen Aufgabenstellungen ausgerichtet, enthält das Handbuch die wichtigsten Berechnungsgrundlagen, mathematische Formeln einschließlich der notwendigen geometrischen und physikalischen Tafelwerte.

Aus dem Inhalt:

- Mathematische Grundlagen der Hydraulik
- Physikalische Größen und Einheiten
- Hydrostatik
- Hydrodynamische Grundgleichungen
- Druckrohrströmung
- Freispiegelströmung
- Überfälle und Hochwasserentlastungsanlagen
- Wasserstrahlen
- Sicker- und Grundwasserströmungen



Auch als E-Book unter:
beuth.de/go/hydraulik

2. Auflage



2., überarbeitete Auflage 2021.
528 S. 24 × 17 cm. Gebunden.
86,00 EUR | ISBN 978-3-410-30748-8

Die Autoren Prof. Dr.-Ing. Detlef Aigner und Dr. Gerhard Bollrich benennen typische Probleme, beschreiben sie kurz und führen die zur Lösung erforderlichen Gleichungen und Beiwerte auf. Die Lösung eines Problems ist einerseits mit Hilfe von Diagrammen oder Tabellen möglich, kann aber auch andererseits aus Gleichungen und Beiwerten selbst gefunden werden.

Anthropogene Entwicklung naturnaher Süßwasserwatten und seiner Prielsysteme im natürlich-dynamischen Gleichgewichtszustand mithilfe Hydrodynamischer Modelle

Prof. Dr. Gabriele Gönner
Jan-Moritz Müller

Morphodynamik, Süßwasserwatt

1 Einführung

Die Freie und Hansestadt Hamburg plant im Rahmen seiner Hochwasserschutzstrategie Deichrückverlegungen als Kohärenzmaßnahmen, weil Deicherrhöhungen mitunter notwendiger Weise in schützenswerte Naturgebiete im Deichvorland greifen. Eine Möglichkeit sind die Bildung von Süßwasserwatten mit entsprechendem Prielsystem im Ästuar, die durch Deichrückverlegungen im Deichvorland gebildet werden. Dabei werden zunächst anthropogen Prielsysteme mit Anschluss an die Tideelbe angelegt. Diese sind in ihrer topographischen Ausformung planerisch so zu gestalten, dass sie mittel- und langfristig morphologisch in einem möglichst stabil hydrodynamischen Gleichgewicht bleiben, um die Kohärenzwirkung der Maßnahme dauerhaft sicherzustellen.

2 Methoden

Ziel des vorliegenden Konferenzbeitrages ist es, Methoden zur Abschätzung morphodynamischer Entwicklungen und Anpassungsprozesse künstlich angelegter Prielsysteme vorzustellen. Von besonderem Interesse dabei ist, auf welchen Zeitskalen Veränderungen an den Prielen zu erwarten sind. Dar-

über hinaus wird untersucht, wie groß der Zeitraum ist, bis sich ein morphologisch stabiler Gleichgewichtszustand einstellt und wie dieser identifiziert werden kann.

Der LSBG Hamburg wendet hierfür das Modellsystem Delft3D FM von Deltares an. Die durchgeführten hydrodynamisch-numerischen und morphodynamischen Simulationen erstrecken sich dabei über Zeiträume von wenigen Wochen (Spring-Nipp Zyklus) bis hin zu 20 Jahren. Begleitend zu den Modellrechnungen kommen dabei empirische Methoden wie Berechnung von Schubspannungen zur Erosionsstabilität, das MORAN - Verfahren (SIEFERT, 1987) oder die Gleichung von Exner zur Anwendung. Mit ihnen werden die berechneten zeitlichen Veränderungen der Prielgeometrie sowie ihr jeweiliger Zustand in Bezug auf eine Entwicklung hin zu einer morphologischen Gleichgewichtssituation analysiert.

3 Fazit

Die Kombination von morphodynamischen Berechnungen und empirischen Analysen soll dazu dienen, die Belastbarkeit der Simulationsergebnisse über mehrere Jahre zu erhöhen. Durch die empirischen Verfahren werden flächenhafte Umsatzanalysen durchgeführt und kann zudem erfasst werden, in welchem Teil des Vorland-Priel-Systems die größte Morphodynamik zu erwarten ist und wo das System über die Einstellung eines dynamischen Gleichgewichtszustandes langfristig erhalten bleibt.

4 Literatur

- SIEFERT, W. (1987): Umsatz- und Bilanz-Analysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht – Grundlagen und erste Auswertungen. Die Küste, Heft 45, 1987
Meier, A. (2000): Die verrückte Datei im Zeichen der Zeit – wollen die Leute diese Hinweise nicht verstehen. Aufbau Verlag, Berlin 2000

Autoren:

Prof. Dr. Gabriele Gönnert

Jan-Moritz Müller

Freie und Hansestadt Hamburg

Freie und Hansestadt Hamburg

Landesbetrieb für Straßen,
Brücken und Gewässer (LSBG)
Gewässer und Hochwasserschutz
Sachsenfeld 3-5
20097 Hamburg

Landesbetrieb für Straßen,
Brücken und Gewässer (LSBG)
Gewässer und Hochwasserschutz
Sachsenfeld 3-5
20097 Hamburg

Tel.: +49 40 428 26 2510

Tel.: +49 40 428 26 2566

E-Mail:
nert@LSBG.Hamburg.de

Gabriele.Goen-

E-Mail:
ler@LSBG.Hamburg.de

Jan-Moritz.Muel-

e Einreichung der Manuskripte erfolgt ausschließlich via E-Mail an

Technische Hydromechanik

Technische Hydromechanik 1

Grundlagen

von Gerhard Bollrich
8., aktualisierte Auflage 2019.
448 S. A5. Gebunden.
62,00 EUR
ISBN 978-3-410-29169-5

Aus dem Inhalt:

- Physikalische Eigenschaften des Wassers
- Stationäre Strömung in Druckrohrleitungen
- Stationäres Fließen in offenen Gerinnen
- Instationäre Strömungen
- Ausfluss aus Gefäßen und unter Schützen; Retention
- Abfluss über Wehre und Überfälle

Technische Hydromechanik 2

Spezialfälle

Herausgeber: Detlef Aigner, Dirk Carstensen
2., vollständig überarbeitete Auflage 2015. ca. 384 S. A5. Gebunden.
ca. 59,00 EUR
ISBN 978-3-410-22209-5

Aus dem Inhalt:

- Plötzlich veränderliche Strömungen in offenen Gerinnen
- Theorie der Wellenbewegung
- Dichteströmungen
- Geschiebe
- Flüssigkeitsstrahlen
- Druckrohrnetzrechnungen
- Feststofftransport
- Eis im Wasserbau

Technische Hydromechanik 3

Aufgabensammlung

von Helmut Martin, Reinhard Pohl
4., überarbeitete und erweiterte Auflage 2014.
260 S. A5. Gebunden.
28,00 EUR
ISBN 978-3-410-24130-0

Aus dem Inhalt:

- über 80 Aufgaben und Lösungen
- hydraulische Modellbildung
- Anwendung von Berechnungsalgorithmen
- analytische und grafische Lösungsverfahren

Technische Hydromechanik 4

Numerische und hydraulische Modelle

Herausgeber: Helmut Martin, Reinhard Pohl
3., überarbeitete Auflage 2015.
406 S. A5. Gebunden.
74,00 EUR
ISBN 978-3-410-24172-0

Aus dem Inhalt:

- Hydraulisches Versuchswesen
- Gerinneströmung
- Hydraulik der Wasserbehandlungsanlagen
- Hydraulische Probleme an ausgewählten Betriebseinrichtungen



Mehr Infos und Bestellung:

beuth.de/go/hydraulik

E-MAIL kundenservice@beuth.de

TELEFON +49 30 58885700-70

Möglichkeiten und Grenzen hydro- und morphodynamischer Simulationsmo- delle bei der Optimierung von Renaturierungsmaß- nahmen und der Nachweisführung am Beispiel der Unteren Havelwasserstraße

P. Milbradt, R. Buchta

An vielen großen sandgeprägten Flüssen des norddeutschen Tieflandes sind naturnahe Strukturen, wie Altarme und Flutrinnen, durch Begrädigung und Ausbau in der Vergangenheit verloren gegangen. Dies hat negative Auswirkungen auf die ökologischen Funktionen der Flüsse, wie die Gewässergüte, die Artenvielfalt und die Hochwasserschutzfunktion.

Die Ziele der Renaturierung sind u.a. die Verbesserung der ökologischen Qualität, der Vernetzung von Fluss und Aue sowie die Schaffung einer naturnahen Morphodynamik im Fluss.

Die Identifikation und Bewertung solcher ehemaligen Strukturen kann zu einer Priorisierung von Renaturierungsmaßnahmen führen. Im Rahmen dieses Beitrages wird auf einige Aspekte eines solchen geeigneten Ziel- und Bewertungssystems zur Schaffung nachhaltiger naturnaher Strukturen in großen sandgeprägten Flüssen des norddeutschen Tieflandes vorgestellt.

Bei der Planung und Umsetzung von Renaturierungsmaßnahmen an schiffbaren Flüssen sind hydro- und morphodynamische Simulationsmodelle ein wichtiges Werkzeug. Sie können dabei helfen, Maßnahmen bzgl. ihrer ökologischen Wirkung unter Einhaltung der regionalen Restriktionen zu optimieren. Im Rahmen einer wasserbaulichen Systemanalyse ermöglichen numerische Simulationen die Auswirkungen der Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen auf den Fluss und die Aue vorherzusagen.

Ergebnisse

In diesem Beitrag werden die Möglichkeiten und Grenzen hydro- und morphodynamischer Simulationsmodelle bei der Optimierung von Renaturierungsmaßnahmen anhand der Unteren Havelwasserstraße diskutiert.

Im Ausblick wird auf das neu gestartete Renaturierungsprojekt "Allerviel-falt Verden" im Rahmen des Blauen Bandes Deutschland eingegangen.
Fazit

Die Erfahrungen im Rahmen der Planung und Umsetzung von Maßnahmen in den letzten 10 Jahren zeigen, dass hydro- und morphodynamische Simulationsmodelle ein unverzichtbares Werkzeug für die Renaturierung von schiffbaren Flüssen darstellen. Sie können dabei helfen, die Auswirkungen der Maßnahmen auf den Fluss und die Aue zu bewerten und sicherzustellen, dass die Maßnahmen die ökologischen Ziele und Restriktionen erfüllen.

Autoren

P. Milbradt
smile consult GmbH, Hannover

R. Buchta
NABU-Institut für Fluss- und Auenökologie, Rathenow, Brandenburg,

Experimentelle Untersuchungen von Dünnschichtabfluss auf natürlichem Grasland

Peter Oberle
Tim Jakobs
Mário J. Franca

Stichworte: Starkregen, Feldlabor, Dünnschichtabfluss,
Rauheitsparametrisierung

1 Hintergrund

Aufgrund des Klimawandels ist mit einer Zunahme der Schadensrisiken infolge Starkregen zu rechnen. Starkregengefahrenkarten auf Basis hochaufgelöster 2D-Strömungsmodelle können eine wichtige Grundlage für zielgerichtete Vorsorgemaßnahmen darstellen (LUBW 2020). Die hierzu in der Praxis eingesetzten Simulationsverfahren wurden ursprünglich jedoch für die Fließgewässerhydraulik entwickelt. Ihre Anwendung zur Modellierung des Oberflächenabflusses u.a. auf steilen Hanglagen mit Fließtiefen von teilw. wenigen Zentimetern unterliegt noch großen Unsicherheiten. So gibt es insbesondere zur Festlegung der Widerstandsparameter kaum Erfahrung und es ist davon auszugehen, dass hierbei auch kleinskalige Prozesse und Vegetationseinflüsse in besonderem Maße zu berücksichtigen sind (Oberle et al 2021). Die Bestimmung der Rauheitsparameter für Dünnschichtabfluss basiert bisher hauptsächlich auf Feldversuchen oder Laborexperimenten. In Feldversuchen mit Beregnungsmaschinen (Seibert 2011) wurden jedoch i.d.R. hydrologische Parameter (z.B. Infiltration, Erosion) untersucht und hydraulische Prozesse vernachlässigt. In Laborexperimenten hingegen wurden diese zwar detailliert untersucht, allerdings unter Verwendung zumeist synthetischer Materialien (z.B. Kunstrasen) und abstrahierter Randbedingungen (Rodriguez & Trost, 2017, Yörük 2020).

Der Einfluss kleinskaliger Inhomogenitäten einer realen Oberfläche auf das Fließwiderstandsverhalten (Abflusskonzentration und -rückhalt, morphodynamische Prozesse) wird im Rahmen eines von der LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) finanzierten Forschungsvorhabens (WiPaD) untersucht.

2 Aufbau und Messtechnik des mobilen Feldlabors

Vor diesem Hintergrund wurde ein neuartiger Versuchsaufbau (Abbildung 1) für hydraulische Messungen auf natürlichen Oberflächen entwickelt (Jakobs et al. 2023). Das modular konzipierte Feldlabor ermöglicht kontrollierte Randbedingungen und Messungen, deren Genauigkeit mit denen in Wasserbaulaboren vergleichbar sind. Das Feldlabor ist adaptierbar und kann für Naturparzellen mit einer maximalen Breite von 3 Metern und flexibler Länge eingesetzt werden. Um die Versuchsfläche vor ungünstigen Witterungseinflüssen während der Messphasen zu schützen, kann zusätzlich eine Überdachung installiert werden.

Das Versuchsfeld wird mit Hilfe einer Pumpe mit bis zu 33 l s^{-1} beschickt. Das Wasser hierfür wird aus Speichertanks mit einem effektiven Volumen von ca. 6.000 Litern entnommen und im Kreislauf geführt. Der Durchfluss wird mit einer Absperrklappe und einem Schieber gesteuert und mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser erfasst. Dieser ist in einem Messmodul aus Edelstahlrohren mit verjüngtem Querschnitt (DN 80) installiert. Die verschiedenen Komponenten sind mit Druckschläuchen (DN 125) untereinander verbunden und enden in einem Einlaufbecken. Dort wird das Wasser über ein gelochtes T-Stück gleichmäßig in einem Tosbecken zugegeben, welches durch eine Tauchwand von einem gelochten Überfallblech getrennt ist. Bei dem anschließenden Überfall wurde großer Wert auf eine möglichst homogene Anströmung der Versuchsfläche gelegt. Nachdem das Wasser über die Versuchsfläche geflossen ist, wird es in einer Sammelrinne wieder aufgefangen. Anschließend passiert es einen Strömungsgleichrichter und wird über ein kalibriertes Messwehr wieder den Speichertanks rückgeführt. Die präzisen Abflussmessungen vor und nach dem Messfeld ermöglichen eine Erfassung der (variablen) Infiltrationsrate. Darüber hinaus sind zur Bestimmung der Volumenänderungen im Einlaufbecken sowie in der Sammelrinne Wasserstandssonden (Magnetostriktive Lineare Positionssensoren) installiert.

Über dem Untersuchungsbereich ist eine Kamera installiert. Damit können relevante Prozesse (Umlegen von Gras, Fließpfade, Step-Pools, ...) dokumentiert werden. Installierte ArUco-Marker, die zuvor mit einem terrestrischen Laserscanner (TLS) eingemessen wurden, können später zur Auswertung des Bildmaterials (Übertragung der geometrischen Randbedingungen sowie dem Abgleich von Bildmaterial verschiedener Perspektiven) genutzt werden. In ausgewählten Experimenten werden fluoreszierende Farbstofftracer verwendet, die mit Hilfe von 2 UV-Lichtern sichtbar gemacht werden. Die Zugabe des naturverträglichen Tracers erfolgt dabei direkt am Einlaufbereich über ein horizontales Rohr mit Bohrungen von 1,7 mm und einem Luftventil zur gleichmäßigen Dosierung. Alternativ kann warmes Wasser mit einer Wärmebildkamera als Tracer verwendet werden.

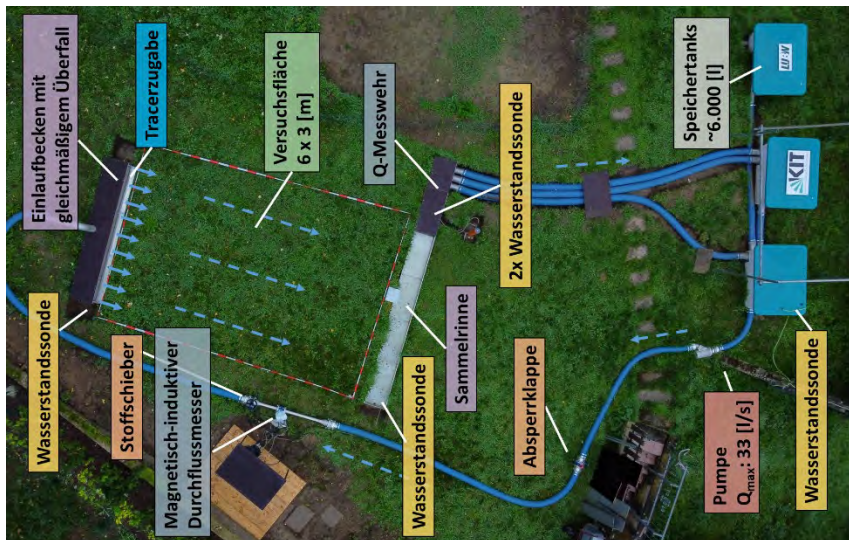


Abbildung 1: Das mobile Feldlabor und die einzelnen Komponenten

3 Messkonzept und bisherige Experimente auf natürlichem Grasland

3.1 Versuchsfläche und Zielgrößen

Im konkreten (ersten) Untersuchungsfall handelt es sich um eine Parzelle mit natürlichem Grünland und überwiegendem Mischbewuchs aus Gräsern und krautigen Pflanzen. Die bisher untersuchte Fläche mit Abmessungen von ca. 3 x 6 m weist eine Neigung von 14 % auf. Auf dieser Testfläche wurden 7 (X1 – X7) verschiedene Vegetationszustände (Abbildung 2) in insgesamt 378 Einzelerperimenten beprobt. Für jeden Vegetationszustand wurde eine Versuchsreihe (insgesamt 2 Vorläufe und 54 Einzelerperimente) an zwei aufeinanderfolgenden Messtagen durchgeführt.

Basierend auf diesen Versuchen können pauschale Widerstandsbeiwerte bzw. Vegetationsparameter für die 2D Strömungsmodellierung berechnet werden. Wesentlich hierfür ist die möglichst exakte Ermittlung des Wasservolumens auf der Versuchsfläche in Abhängigkeit des Abflusses und des Flächenzustandes. Zudem werden weitere relevante Größen bzw. Prozesse wie Fließgeschwindigkeitsverteilung, Fließpfade und dynamische Veränderungen von Vegetation und Oberflächenstrukturen dokumentiert und analysiert.

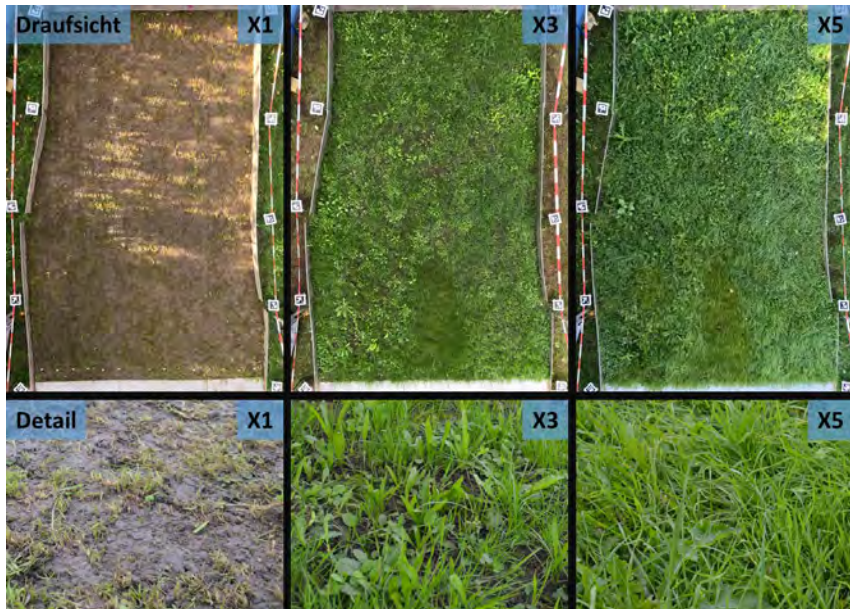


Abbildung 2: Exemplarische Versuchszustände mit unterschiedlichen Bewuchsstadien

3.2 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Experimente folgt jeweils einem strikten Ablaufschema (vgl. Abbildung 3). Zunächst wird die Oberfläche an Tag 1 vor dem ersten Versuch fotografiert und hochauflösend mit einem TLS vermessen. Aus diesen Daten lassen sich für jede Versuchsreihe Dichte und Verteilung der Vegetation ableiten. Im Anschluss wird das Versuchsfeld mit geringem Durchfluss (3 ls^{-1}) für eine Dauer von 25 min beschickt, bis der Boden vollständig gesättigt bzw. die Versickerungsrate konstant ist.

Anschließend beginnt der eigentliche Messvorgang. Für 9 verschiedene Abflüsse im Bereich $Q: 1,2 - 33 \text{ ls}^{-1}$ werden unter konstanten Abflussbedingungen Messungen durchgeführt. Dabei wird jeder Versuch mit einer Kamera (4k, 60 fps), welche über der Versuchsfläche hängt, gefilmt. Zur Minimierung von Messfehlern werden jeweils 3 Messungen mit gleichen Randbedingungen für jeweils 5 Minuten durchgeführt. Nach dem Vorlauf sowie nach jedem redundanten 3-Set wird die Oberfläche erneut mit dem TLS erfasst. Ziel ist

hierbei die Dokumentation möglicher morphologischer Veränderung. Bei jeweils dem 2. Versuch ausgewählter Abflüsse (3, 12, 22, 32 ls^{-1}) wird zusätzlich Tracer während dem Versuchsstart (First Flush) sowie zu einem späteren Zeitpunkt unter stationären Fließbedingungen zugegeben. Mit Hilfe eines eigens entwickelten Algorithmus können aus der Tracer-Bewegung Informationen über die Fließgeschwindigkeitsverteilung abgeleitet werden.

An Tag 1 wird der Durchfluss mit jeder weiteren Messreihe gesteigert. An Tag 2 verlaufen die Messungen analog zu Tag 1, jedoch in umgekehrter Reihenfolge um mögliche Unterschiede des hydraulischen Widerstandsverhaltens zwischen an- und abschwellender Überströmung zu erlangen. Abschließend wird eine Messung zur Rekalibrierung des Messwehrs vorgenommen, um möglichen Auswirkungen von potentiellen Setzungen der Sammelrinne ausschließen zu können.

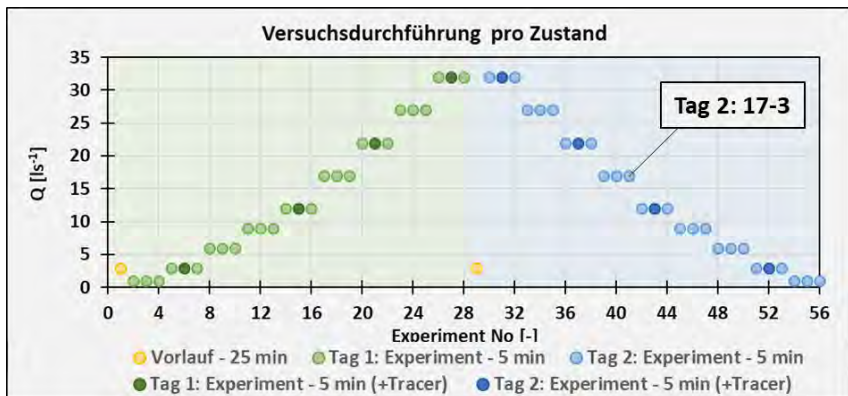


Abbildung 3: Darstellung einer Versuchsreihe, welche für sieben verschiedene Vegetationszustände durchgeführt wurde

3.3 Auswertung

Die Aufzeichnung einer dieser Einzelmessungen ist exemplarisch in Abbildung 4 wiedergegeben. Über die Versuchsdauer sind die Wasserstandsänderungen im Zulaufbecken und der Sammelrinne aufgetragen. Außerdem ist der Zufluss auf die Fläche und der Abfluss am Messwehr dargestellt. Um die maßgeblichen Zielgrößen zu ermitteln, kann das Experiment nun in 3 charakteristische Zeitabschnitte unterteilt werden. Bei Betrachtung von Phase II lässt sich der mittlere Abfluss auf der Versuchsfläche, die Infiltrationsrate der Gesamtfläche (bzw. pro m^2) sowie die Volumenänderung im Zulaufbecken

und der Sammelrinne unter stationären Bedingungen bestimmen. Über Integration der Abflusswerte in Betrachtungszeitraum III und unter Annahme einer abnehmenden Versickerungsrate (bzw. weiterer Adaption auf Basis der gesamten Versuchsreihen) während der Ablaufphase ergibt sich das in Phase II auf der Versuchsfläche stationär vorhandene Wasservolumen:

$$\text{III: } \text{Volumen}_{\text{Versuchsfläche}} = \int Q_{\text{Messwehr}} + \int Q_{\text{Infiltration}} - \int Q_{\text{Zufluss}} - \sum \text{Volumen}_{\text{Becken}} - \sum \text{Volumen}_{\text{Bleche}}$$

Basierend auf diesen Ergebnissen kann anschließend bei der Volumenbilanzierung von Phase I auch noch das Muldenvolumen der Versuchsfläche abgeschätzt werden.

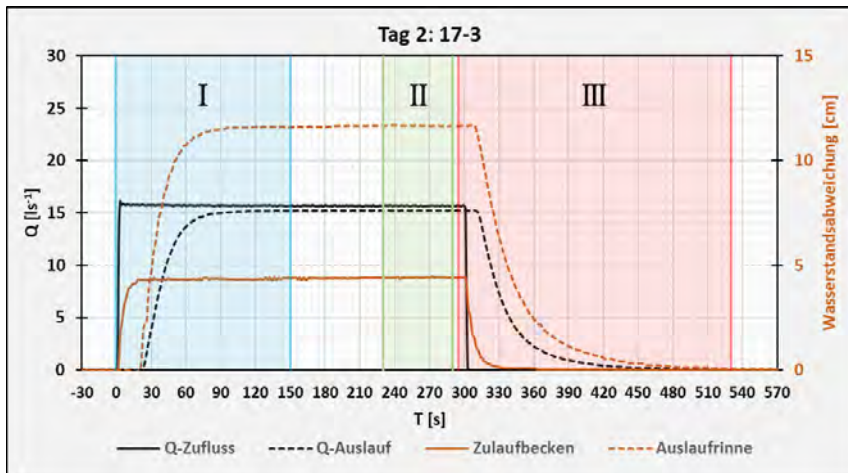


Abbildung 4: Exemplarisches Versuchsergebnis eines Einzelversuchs

Mit den so ermittelten Parametern (mittlerer Abfluss und Volumen auf der Fläche) sowie den geometrisch bekannten Randbedingungen (Flächenmaß und Neigung) können nun hydraulische Parameter berechnet werden, welche pauschal für die Gesamtfläche gelten. Hierbei wird (analog dem 2D Strömungsmodell) die abstrahierende Annahme getroffen, dass das Wasservolumen gleichmäßig auf der Versuchsfläche verteilt ist. So ergeben sich die für die Modellierung maßgeblichen Werte für einheitliche Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit aus welchen wiederum abfluss- und zustandsabhängige Widerstandsparameter abgeleitet werden können.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das vorgestellte Feldlabor ermöglicht eine umfassende Analyse der hydraulisch relevanten Prozesse bei Dünnschichtabfluss auf natürlichen Flächen unter kontrollierten Randbedingungen. Auf dieser Basis lassen sich reproduzierbare Experimente durchführen, welche eine zuverlässige Datenbasis u.a. zur Bestimmung relevanter Widerstandsbeiwerte für die Strömungsmodellierung bieten.

In Abbildung 5 ist deutlich zu erkennen, dass auf natürlichen Flächen je nach topographischer Beschaffenheit und ggf. Bewuchs zumeist sehr ungleichmäßige Fließbedingungen vorherrschen. Eine differenzierte Auflösung der kleinskaligen Varianzen ist in der Praxis der Starkregenmodellierung jedoch weder möglich noch sinnvoll. Zur belastbaren Prognose der dynamischen Abflussentwicklung eines Untersuchungsgebietes muss insbesondere das auf den 2D-Flächenelementen in Abhängigkeit der zeitabhängigen Abflussmenge vorhandene Wasservolumen naturähnlich abgebildet werden. Eine Größe, die im Strömungsmodell wiederum ganz maßgeblich über den Fließwiderstand beeinflusst wird und entsprechend adäquat zu bilanzieren ist.



Abbildung 5: Versuchsaufbau und -durchführung auf einer naturnahen Wiese

Auch wenn zur Ermittlung von Starkregengefahrenkarten die realen kleinskaligen Prozesse auf natürlichen Oberflächen nur näherungsweise bzw. in ihrer flächenpauschalen Wirkung abgebildet werden müssen, so sind ihre

Ausprägungen für weitergehende Fragestellungen durchaus von Belang (z.B.: Erosion, Stofftransport oder Infiltration).

Im weiteren Projektverlauf sollen die aufgenommen Datensätze zur Analyse der Fließgeschwindigkeitsverteilungen genutzt werden. Zusätzlich wird derzeit auf Basis der hochaufgelösten Laserscans ein 3D numerisches Modell aufgebaut. Dieses kann mit den Naturdaten validiert werden und ermöglicht eine flächige Auswertung aller Fließvariablen. In 2024 erfolgt die Beprobung weiterer Wiesenflächen mit unterschiedlichem Gefälle. Abschließend sollen die so gewonnen Erkenntnisse der Weiterentwicklung bisheriger Modellansätze in 2D-Verfahren dienen.

5 Literatur

- Jakobs, T., Oberle, P., Franca J. M. (in Druck): Novel Experimental Setup to Analyze Natural Thin Layer Surface Flow. IAHR Congress 2023.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2020): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe: LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg.
- Oberle, P., Kron, A., Kerlin, T., Ruiz Rodriguez, E., Nestmann, F. (2021): Diskussionsbeitrag zur Fließwiderstandssparametrisierung zur Simulation von Oberflächenabflüssen infolge Starkregen. 44. Dresdner Wasserbaukolloquium 2021 „Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel“.
- Ruiz Rodriguez E., Trost, L. (2017): Umgang mit Starkniederschlägen in Hessen. Auszug aus dem 3. Zwischenbericht. KLIMPRAX Starkregen Arbeitspaket 2. Hochschule RheinMain. Wiesbaden.
- Seibert, S., Auerswald, K., Fiener, P., Disse, M., Martin, W., Haider, J., Michael, A., Gerlinger, K. (2011): Surface runoff from arable land - a homogenized data base of 726 rainfall simulation experiments. CRC/TR32 Database.
- Yörük, A. (2020): Empfehlung zur Modellparametrisierung von Sturzflutsimulationsmodellen. HTW Saar. Professur Wasserbau und Wasserwirtschaft. Saarbrücken.

Autoren:

Dr.-Ing. Peter Oberle

Institut für Wasser und Umwelt
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstraße 12

M.Sc. Tim Jakobs

Prof. Dr. Mário J. Franca
Institut für Wasser und Umwelt
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

Tel.: +49 721 608-4-8094
Fax: +49 721 608-4-2991
E-Mail: p.oberle@kit.edu

76131 Karlsruhe

E-Mail: tim.jakobs@kit.edu
mario.franca@kit.edu

Entwurf und Erfolgsprognose von Revitalisierungsmaßnahmen im Projekt Agile Iller

Matthias Schneider
Johannes Ortlepp
Janina Kopecki
Tobias Hägele

Stichworte: Habitat, Modellierung, Fische, CASiMiR, Agile Iller

1 Das Projekt "Agile Iller"

Das Projekt "Agile Iller" ist ein Gemeinschaftsprojekt der Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg zur Verbesserung des ökologischen Zustandes der Unteren Iller durch hydromorphologische Maßnahmen (<https://www.agile-iller.de/>). Im Arbeitsprogramm „Agile Iller“ aus dem Jahr 2017 sind hierzu auf einer Länge von ca. 60 km zwischen Aitrach und Neu-Ulm insgesamt 59 Maßnahmen vorgesehen. Diese umfassen im Einzelnen Maßnahmen zur Verbesserung

- des Strömungsverhaltens im Mutterbett,
- der Habitatstrukturen im Mutterbett,
- des Geschiebehaushalts im Mutterbett,
- der Durchgängigkeit im Mutterbett,
- der Aueanbindung, Regenerierung der Aue und des GW-Körpers,
- des Temperaturhaushalts im Mutterbett (besonders Staubereiche)

und zur Ergänzung/ zum Ersatz für die im Mutterbett nicht realisierbaren Lebensräume.

Diese Verbesserungen sollen durch unterschiedliche Maßnahmentypen erreicht werden, insbesondere

1. Strömungsverbesserungen (Stauabsenkung mit Instream-Maßnahmen),

2. Aufweitungen des Mutterbetts und
3. Anlage von Seitenarmen.



Abbildung 1: Typischer begradigter und gestauter Abschnitt der Unteren Iller mit Rückstau durch eine unterhalb gelegene Rampe bei Fkm 19,100

2 Untersuchungsansatz und Hauptergebnisse

2.1 Habitatmodellierung

Habitatmodellierungen mit dem Simulationssystem CASiMiR (Noack et al. 2013, Schneider 2001) - auf Basis von 2D-HN Berechnungen - wurden sowohl für die Analyse der Defizite im Ist-Zustand als auch für die Optimierung der im Grobentwurf vorliegenden Maßnahmen verwendet. Dabei wurden anstatt von Habitaten für einzelne Arten und Altersstadien sechs Habitattypen mit erweiterter Übertragbarkeit auf unterschiedliche Fischarten verwendet.

Die Habitattypen entsprechen den hydromorphologischen Strukturtypen aus der Landesstudie Gewässerökologie (LSGÖ 2022) des Landes Baden-Württemberg (Tabelle 1).

Tabelle 1: Habitattypen und zugeordnete Strukturtypen (LSGÖ 2020)

	Strukturtyp	Habitattyp
Typ 1:	Flache, strömungsarme Uferbereiche	Larvalhabitate z.B. Äsche larval
Typ 2:	Flach abfallende, angeströmte Hänge	Jungfischhabitate z.B. Nase juvenil
Typ 3:	Überströmte Kiesflächen	Kieslaichhabitate z.B. Laichhabitat Äsche
Typ 4:	Stark überströmte Kies-/Steinflächen / Furten	Laich-/Refugialhabitat z.B. Laichhabitat Nase
Typ 5:	Fließrinnen	Adulthabitate z.B. Äsche adult
Typ 6:	Ausgedehnte Kolke	Wintereinstände z.B. Nase adult

2.2 Entwicklung von Referenzmaßnahmen und Übertragung auf die Gesamtstrecke

Die im Programm "Agile Iller" geplanten Maßnahmen können weitgehend den oben genannten drei Maßnahmentypen zugeordnet werden. Für jeden Maßnahmentyp wurde jeweils eine Referenzmaßnahme als „Vorbild“ für weitere Maßnahmen desselben Typs ausgearbeitet. Die Planung wurde mit Hilfe von Habitat- und Geschiebmodellierungen auf die Erstellung bislang defizitärer Habitate und deren Dauerhaftigkeit hin optimiert.

Abbildung 2 zeigt die Auswirkung der Referenzmaßnahme „Aufweitung“ M46 auf die Qualität und das Angebot des Habitattyps 2 „Flach abfallende angeströmte Hänge“. Aufweitungen im Mutterbett sind für die Schaffung von diesen Jungfischhabitaten besonders prädestiniert. Nach durchgeführter Aufweitung ist der Habitattyp sowohl entlang der Ufer als auch an Inselstrukturen vorhanden, und bleibt im Gegensatz zum Istzustand auch bei hohen Abflüssen erhalten. Im Istzustand fehlt dieser Strukturtyp nahezu vollständig.

Die durch die drei Referenzmaßnahmen erzielten Verbesserungen für das Habitatangebot wurden auf die vergleichbaren geplanten Maßnahmen entlang der gesamten Unteren Iller übertragen. Dadurch lässt sich das zu erwartende Habitatangebot nach Durchführung der „Agile Iller“ - Maßnahmen für die 6 Habitattypen in Form von Habitat-Längsschnitten darstellen (Abbildung 3).

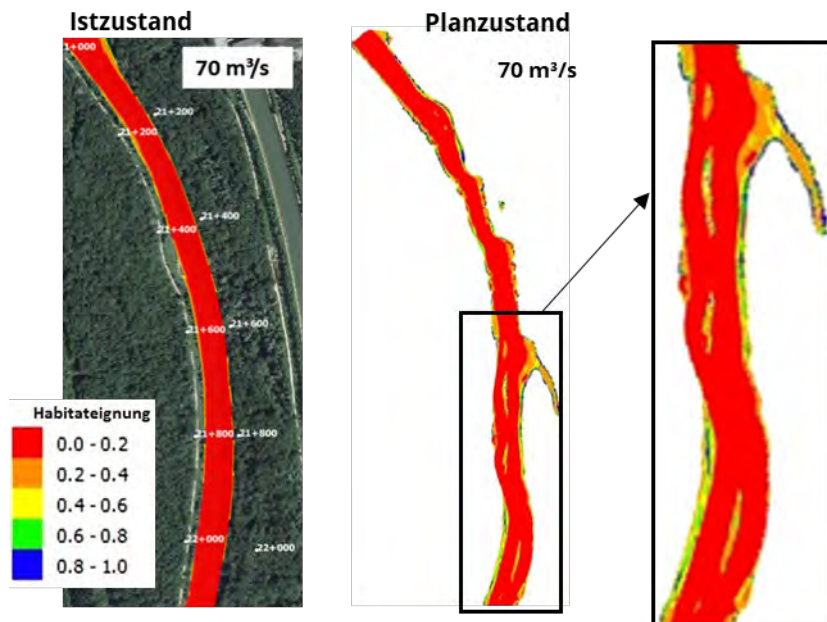


Abbildung 2: Auswirkung der Referenzmaßnahme M46 „Aufweitung“ auf das Angebot an flach abfallenden, angeströmten Hängen (Habitattyp 2) bei 70 m³/s; Istzustand (li.), Planzustand (re.)

Diese Habitatlängsschnitte wurden für alle 6 Habitattypen bei 10 unterschiedlichen Abflüssen erstellt und damit die Basis für die Bewertung des abflussabhängigen Habitatangebots geschaffen. Dadurch, dass die Längsschnitte auch für den Istzustand erstellt werden, lässt sich zusätzlich der Vergleich des Habitatangebots für das Gesamtsystems vor und nach Durchführung der Maßnahmen vornehmen.

Dieser Vergleich ist für den Habitattyp 5 „Fließrinnen“ in Abbildung 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass gut ausgeprägte „Fließrinnen“ im Istzustand, vor Durchführung der Maßnahmen, bei 9 m³/s über lange Abschnitte kaum vorhanden sind (Abbildung 3 oben). Im Planzustand nach Durchführung der Maßnahmen sind bei 11 m³/s dagegen nur noch in einigen Staubereichen Defizite festzustellen (Abbildung 3 unten).

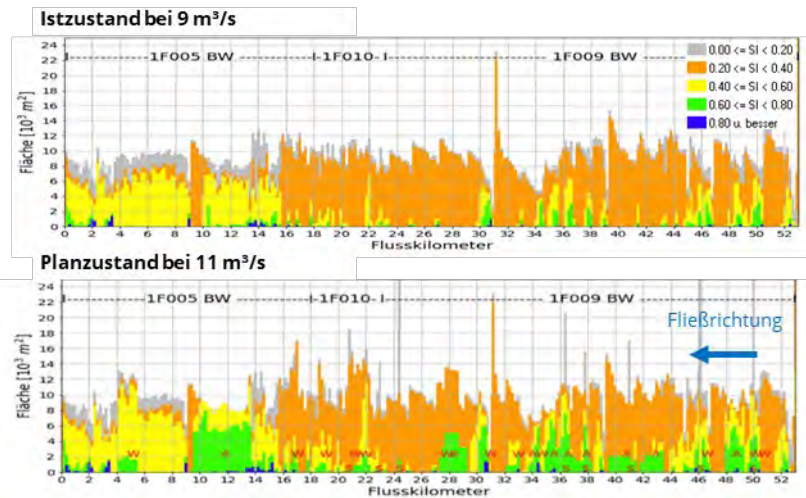


Abbildung 3: Habitat-Längsschnitte Untere Iller, Strukturtyp 5: „Fließbrinnen“ (z.B. Nahrungshabitate adulte Äsche) im Istzustand bei 9, im Planzustand bei 11 m³/s, **blau:** sehr gute; **grün:** gute; **gelb:** nutzbare, **orange:** ungünstige, **grau:** gemiedene Habitate, Habitatflächen in 200 m Abschnitten

2.3 Bilanzierung und Bewertung der geplanten Maßnahmen

Die ermittelten Flächen der neu geschaffenen Habitattypen wurden verglichen mit Zielwerten, die für verschiedene Fischarten vorliegen (LSGÖ 2022). Anhand dieser Werte wurde beurteilt, inwieweit die geschaffenen Habitate ausreichen, eine angestrebte, naturnähere Fischbesiedlung zu ermöglichen. Ergänzt wurde diese Bewertung durch eine Berücksichtigung der Habitatverteilung im Gewässerverlauf sowie des Angebots an Hochwasserrefugien.

2.4 Ableitung von ökologisch erforderlichen Mindestabflüssen

Die Habitatmodellierungen zeigen auf, inwieweit neue Habitate und Gewässerstrukturen durch morphologische Maßnahmen geschaffen werden können und in welchem Ausmaß ihr Vorkommen und ihre Qualität vom Iller-Abfluss abhängen. Damit ist es möglich, die bei optimierten Gewässerstrukturen ökologisch erforderlichen Mindestabflüsse zu bestimmen. Im vorliegenden Fall wird prognostiziert, dass eine Erhöhung des Sommerabflusses von 9 auf 11 m³/s die Funktionalität der Laich- und Adulthabitate für typische rheophile Flussfische gewährleistet. Kiesstrukturen und Hochwasserrefu-

gien sind weiterhin defizitär, die weiteren wesentlichen Struktur-/Habitattypen sind insgesamt ausreichend vorhanden aber weisen in Teilabschnitten Lücken auf.

3 Fazit

Der erstmals für einen derart langen Gewässerabschnitt verwendete Mikrohabitatansatz liefert detaillierte Informationen zu Umfang und räumlicher Verteilung der wichtigsten Fischlebensräume. Damit lassen sich sowohl die Auswirkungen von morphologischen Verbesserungsmaßnahmen als auch die Höhe von ökologisch erforderlichen Mindestabflüssen ermitteln. Er ist wegweisend für die zukünftige Planung und Optimierung von Revitalisierungen.

4 Literatur

- LSGÖ (2022): Fischökologisch funktionsfähige Strukturen in Fließgewässern.- Landesstudie Gewässerökologie (LSGÖ), Handreichung im Auftrag der Geschäftsstelle Gewässerökologie des Regierungspräsidiums Tübingen, Wiesloch 2020, Bearbeitung: Unter Arbeitsgruppe Fische (UAG Fi-sche), Becker A. & Ortlepp J., 2. Aufl. (<https://rp.baden-wuerttemberg.de/themen/wasserboden/gsgoe-download/>)
- Noack, M., Schneider, M., Wieprecht, S. (2013): The Habitat Modelling System CASiMiR: A Multivariate Fuzzy-Approach and its Applications. In: Ecohydraulics: An integrated approach. John Wiley & Sons, 8/2013.
- Schneider, M. (2001): Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen. Dissertation, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Heft 108, Universität Stuttgart, Eigenverlag.

Autoren:

Dr.-Ing. Matthias Schneider

Dr.-Ing. Ianina Kopecki

MSc. Tobias Hägele

SJE Ecohydraulic Engineering GmbH

Dilleniusstraße 13

71522 Backnang

Tel.: +49-(0)7191-3455-123

E-Mail: schneider@sjeweb.de

Dipl.-Biol. Johannes Ortlepp

Büro f. Gewässerökol. Mürle/Ortlepp

Mühlweg 17

75223 Öschelbronn

Tel.: +49-(0)7233 81495

E-Mail: ortleppj@gmail.com

Hybride Untersuchung betrieblicher Maßnahmen zur Reduzierung von Anlandungen vor einem Laufwasserkraftwerk

Fabian Popp
Stephan Theobald

Stichworte: Sedimenttransportmodellierung, Wasserkraft, 3D-HN-Modellierung, gegenständliche Modellierung

1 Einleitung und Hintergrund

Im Jahr 2010 wurde das neue Laufwasserkraftwerk Rheinfelden am Hochrhein bei Basel in Betrieb genommen. Mit einer Ausbauwassermenge von $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer installierten elektrischen Leistung von 100 MW gehört es zu den größten Laufwasserkraftwerken Deutschlands. Die vier Kaplanrohturbinen erzeugen jährlich rund 600 Mio. kWh Strom. Abbildung 1 zeigt ein Luftbild der Stauanlage mit der Wehranlage auf der rechten Rheinseite und dem Kraftwerk mit der betonierten Einlaufplatte auf der linken Rheinseite. (Energiedienst Holding AG 2011)



Abbildung 1: Luftbild der Stauanlage Rheinfelden (Luftbild: Bing Maps (2024), bearbeitet)

Im Juli 2013 wurde bei einer Echolotvermessung nach einem Hochwasserereignis erstmals eine größere Verlandung aus Sand auf der Einlaufplatte des Kraftwerks festgestellt (siehe Abb. 2). Anschließende hydrodynamisch-numerische (HN) und gegenständliche Untersuchungen am Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel zeigten keine nennenswerte Auswirkung der Anlandung auf die Anströmung und Leistungsfähigkeit des Kraftwerks. Von einer kostenintensiven manuellen Räumung der Einlaufplatte wurde abgesehen. Bei regelmäßigen Kontrollen bis in das Jahr 2017 waren keine größeren Änderungen der Anlandung festzustellen. Im Zuge des ausgeprägten Juli-Hochwassers 2021 (Juli-HW 2021) (ca. HQ₅ - HQ₁₀) folgte jedoch erneut eine deutliche Vergrößerung der Anlandung. Dabei kam es während des Hochwasserereignisses zu einer größeren Verlandung des Kraftwerksrechens, bevor über die folgenden Wochen wieder ein teilweiser Abtrag der Anlandung stattfand (nicht dargestellt).

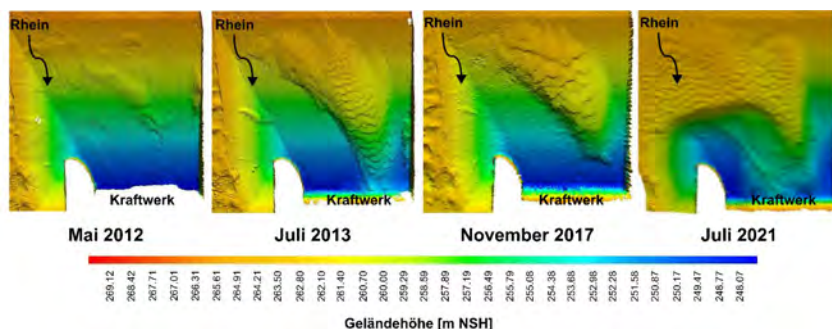


Abbildung 2: Echolotvermessungen der Einlaufplatte zwischen Mai 2012 und Juli 2021 (IngenieurTeam Geo GmbH (2021), bearbeitet)

Vor dem Hintergrund der starken Verlandung des Kraftwerkseinlaufs im Zuge des Juli-HW 2021 finden am Fachgebiet derzeit weiterführende Untersuchungen zu den hydraulischen und morphodynamischen Verhältnissen im Oberwasser der Stauanlage statt. Dabei wird ein hybrider Untersuchungsansatz verfolgt, der den Einsatz eines gegenständlichen Modells sowie mehrerer HN-Modelle vereint. Ziel der Untersuchungen ist zunächst die modelltechnische Erfassung der hydraulischen und morphodynamischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Darauf aufbauend sollen Möglichkeiten zur Reduzierung der Anlandungstendenz auf der Einlaufplatte eruiert werden, um bei

zukünftigen Hochwasserereignissen eine erneute Verlandung des Kraftwerksrechens und der Turbineneinläufe möglichst zu vermeiden. Die besondere Herausforderung besteht dabei in der hinreichend genauen Abbildung der komplexen morphodynamischen Prozesse, bei der die zur Verfügung stehenden Modellverfahren an ihre Einsatzgrenzen stoßen.

2 Untersuchungskonzept und Methodik

Das grundlegende Konzept der durchgeführten Untersuchungen, die eingesetzten Modelle sowie die hybride Nachbildung eines ausgewählten Naturzustandes wurden in Popp und Theobald (2023) bereits ausführlich beschrieben und werden an dieser Stelle deshalb nur kurz zusammengefasst.

Die Untersuchungen finden in zwei Maßstäben statt. Das Untersuchungsgebiet wird mit einem 2D-HN-Modell und einer 3D-HN-Modellkette im Naturmaßstab nachgebildet. Parallel finden Untersuchungen an einem gegenständlichen Modell im Labormaßstab (Labormodell) statt. Das 2D-HN-Modell umfasst die gesamte Stauhaltung und dient einer ersten groben Abschätzung der Transportprozesse im Untersuchungsgebiet. Für die eigentlichen morphodynamischen Untersuchungen kommen das 3D-HN-Modell und das Labormodell zum Einsatz. Bei beiden handelt es sich um Ausschnittsmodelle, die sich räumlich auf die Stauanlage und einige 100 m des Oberwassers beschränken.

Für die 3D-HN-Modellierung wird eine kommerzielle Software eingesetzt, mit der am Fachgebiet bereits erfolgreich verschiedene hydraulische und morphodynamische Fragestellungen untersucht wurden (z.B. Kostić 2023, Kostić und Theobald 2021a und 2021b). Aufgrund der stark dreidimensionalen Strömungsverhältnisse vor der Stauanlage ist der Einsatz eines 3D-HN-Verfahrens unerlässlich.

Die gegenständlichen Untersuchungen basieren auf einem Froude-Modell im Maßstab 1:50. Als Modellsediment wird Kunststoffgranulat (Polystyrol, $d_m \approx 2,1 \text{ mm}$, $\rho_K \approx 1055 \text{ kg/m}^3$) verwendet, da eine maßstäbliche Verkleinerung des Natursediments ($d_m \approx 0,3 \text{ mm}$, $\rho_K \approx 2650 \text{ kg/m}^3$) aufgrund des geringen Korndurchmessers nicht möglich ist. Von einer Modellüberhöhung wurde abgesehen, da die unverzerrte Nachbildung der dreidimensionalen

Strömungsprozesse in Bauwerksnähe unerlässlich ist. Zur quantitativen Erfassung der Modellsohle im laufenden Betrieb kommt ein Laserscanner zum Einsatz.

Vor der Identifizierung und Analyse potentieller Maßnahmen zur Reduzierung der Anlandungsentstehung im Kraftwerkseinlauf wurden umfangreiche Untersuchungen zur Nachbildung eines gut dokumentierten Naturereignisses (Juli-HW 2021) durchgeführt. Die Verlandung auf der Einlaufplatte wird von den beiden Ausschnittsmodellen hinsichtlich Lage, Form und Größe gut reproduziert. Auch die Anlandungsvolumina stimmen zwischen der Natur und den beiden Modellen gut überein (Popp und Theobald 2023).

3 Betriebliche Maßnahmen zur Reduzierung der Anlandungsentstehung – Kontext und Anforderungen

Die Sedimentation von Stauräumen ist ein weltweit an Stauanlagen auftretendes Phänomen, welches die Wasserwirtschaft vielerorts zunehmend vor Herausforderungen stellt (Annandale et al. 2016). Die aus der Verlandung resultierenden Probleme sind vielfältig und reichen vom Verlust des nutzbaren Stauraums über die Verlandung von Betriebseinrichtungen hin zu ökologischen Aspekten wie dem Verlust von kiesreichen Gewässerstrecken als Laich- und Lebensraum (Habersack et al. 2013, Harb et al. 2015). Mögliche Gegenmaßnahmen sind begrenzt und oft sehr aufwändig. Zudem bestehen meist Einschränkungen durch ökologische, wirtschaftliche, technische und rechtliche Aspekte (Knoblauch et al. 2007). Potentielle Gegenmaßnahmen müssen deshalb für jeden Stauraum und jede Problematik individuell identifiziert und bewertet werden. So auch für die untersuchte Problemstellung am Kraftwerk Rheinfelden.

Anlass der vorgestellten Untersuchungen ist die verstärkte Verlandung der Einlaufplatte des Kraftwerks Rheinfelden im Hochwasserfall. Die Auswertung von Echolotvermessungen des gesamten Stauraums deutet darauf hin, dass die beobachteten Verlandungsprozesse im Wesentlichen auf den Bereich vor dem Kraftwerk begrenzt sind. Eine gesamtheitliche Verlandung des Stauraums ist nicht zu erkennen. Der Fokus potentieller Maßnahmen richtet sich somit auf die Reduzierung der Verlandung im Nahbereich der Stauanlage.

Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den bisher verstärkt betroffenen Turbineneinläufen. Folgende Anforderungen bestehen an potentielle Verbesserungsmaßnahmen:

- Reduzierung der Verlandungstendenz auf der Einlaufplatte, insbesondere an neuralgischen Punkten im Kraftwerkseinlauf,
- Verhinderung übermäßiger Verlandung andernorts vor der Stauanlage,
- möglichst geringe Produktionseinbußen, somit möglichst keine Kraftwerksdrosselung,
- möglichst geringer Eingriff in die Umwelt,
- geringer baulicher, finanzieller und betrieblicher Aufwand.

Aufgrund der lokal begrenzten Verlandungsproblematik im Nahbereich der Stauanlage und unter Berücksichtigung der zuvor aufgelisteten Anforderungen sind betriebliche Maßnahmen (bM) gegenüber baulichen Eingriffen zu bevorzugen. Aus diesem Grund lag der Fokus bei der Erarbeitung geeigneter Maßnahmen hauptsächlich auf einer gezielten Anpassung der Stauanlagenbeaufschlagung im Hochwasserfall. Um Einbußen bei der Produktion zu minimieren, wurden zunächst betriebliche Maßnahmen analysiert, die ohne nennenswerte Kraftwerksdrosselung auskommen, im Wesentlichen also auf einer Anpassung der Wehrbeaufschlagung beruhen.

4 Untersuchungsergebnisse zu betrieblichen Maßnahmen

Abbildung 3 (links) zeigt schematisch die untersuchten Wehrbeaufschlagungen bei einem Gesamtabfluss von $Q_{\text{ges}} = 3045 \text{ m}^3/\text{s}$ und Betrieb aller vier Turbinen. Folgende Beaufschlagungen wurden untersucht:

- 1: symmetrisch, zu den Seiten gleichmäßig abnehmend (\triangle bisherige Standardbetriebsweise, auch Juli-HW 2021)
- 2: gleichverteilt über alle Wehrfelder,
- 3: asymmetrisch links, W5 - 7 geschlossen, max. Abfluss über W1,
- 4: asymmetrisch rechts (1), W1 - 3 geschlossen, max. Abfluss über W7,
- 5: asymmetrisch rechts (2), W1 und 2 geschlossen, max. Abfluss über W4 und W5.

Alle Varianten wurden im 3D-HN-Modell (Abb. 3 Mitte) und im Labormodell (Abb. 3 rechts) untersucht. Wie in Popp und Theobald (2023) beschrieben, orientiert sich die Verteilung der Sedimentzugabe im 3D-HN-Modell dabei am 2D-HN-Modell und variiert damit leicht zwischen den Anlagenbeaufschlagungen. Im Labormodell wurde die Zugabeverteilung dagegen nicht verändert, da die geringen Unterschiede mit der zur Verfügung stehenden Zugabemethode für die meisten Varianten nicht zuverlässig abbildbar sind. Tabelle 1 zeigt die Auswertung der Anlandungsvolumina für die Zonen 1 und 2 (vgl. Abb. 3) sowie in Klammern die jeweilige prozentuale Volumenänderung gegenüber der bisherigen Standardbeaufschlagung (1).

Tabelle 1: Anlandungsvolumen [m³] in den Zonen 1 (Z1, Abb. 3 rot) und 2 (Z2, Abb. 3 schwarz) sowie prozentuale Änderung ggü. Variante 1 in Klammern

	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5
3D-HN: Z1	15.960	19.900 (+25%)	24.940 (+56%)	10.600 (-34%)	11.820 (-26%)
Labor: Z1	14.800* ¹	16.200 (+9%)	20.870 (+41%)	11.050 (-25%)	13.210* ² (-11%)
3D-HN: Z2	3.960	5.510 (+39%)	8.960 (+126%)	1.810 (-54%)	2.300 (-42%)
Labor: Z2	3.530* ¹	4.060 (+15%)	8.400 (+138%)	1.630 (-54%)	2.260* ² (-36%)
* ¹ Mittelwert aus 4 Versuchen; * ² Mittelwert aus 2 Versuchen					

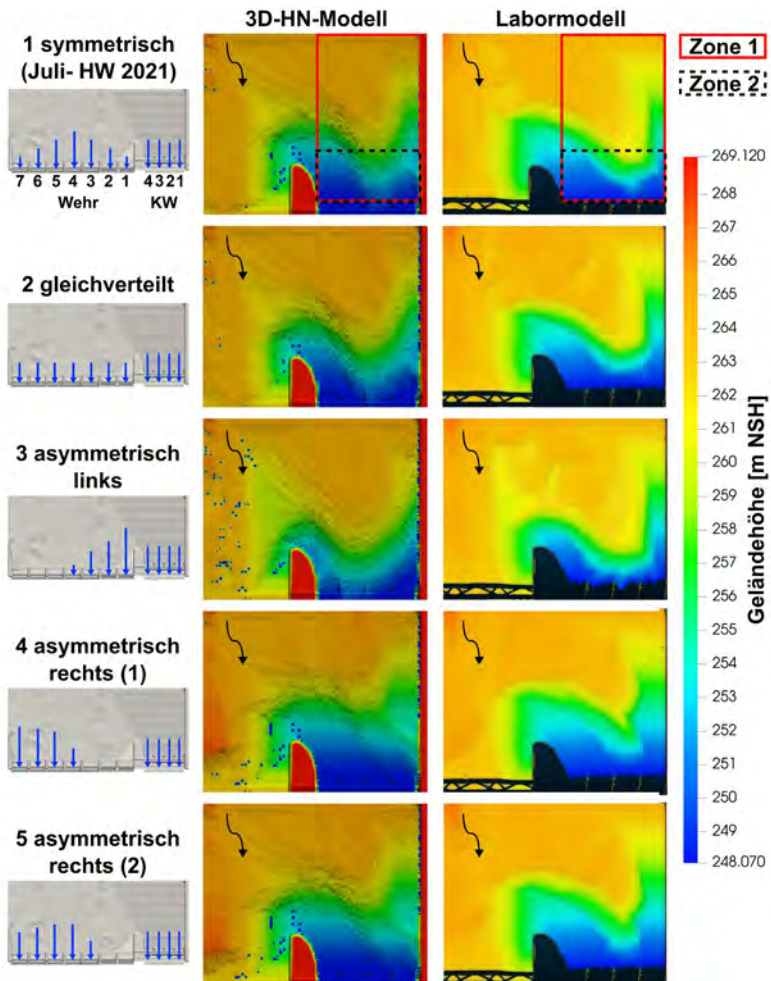


Abbildung 3: Schematische Darstellung der untersuchten Wehrbeaufschlagungen (links), Anlandung im 3D-HN-Modell (Mitte) und im Labormodell (rechts)

Sowohl der visuelle als auch der quantitative Ergebnisvergleich machen deutlich, dass die Wehrbeaufschlagung einen ausgeprägten Einfluss auf die Größe, Lage und Form der Anlandung vor dem Kraftwerk hat. Beide Modelle zeigen für 2 und 3 eine deutliche Zunahme der Verlandung vor den Turbinen.

Die beiden Varianten sind damit gegenüber der bisherigen Standardbeaufschlagung (1) keine Verbesserung. Für 4 und 5 ist vor dem Kraftwerkseinlauf dagegen ein deutlicher Rückgang der Anlandung festzustellen. Die Sedimentzunge endet weiter oberstrom und ist kleiner. Vor W2 (in 4 und 5 geschlossen) ist jedoch eine bisher nicht beobachtete Anlandung festzustellen. Diese ist für 4 stärker ausgeprägt als für 5. Durch den niedrigeren Abfluss über W7 resultiert für 5 zudem eine geringere Belastung des Uferbereichs als für 4. Zum aktuellen Zeitpunkt der Untersuchungen liefert somit Variante 5 die vielversprechendsten Ergebnisse.

Insgesamt zeigen das 3D-HN-Modell und das Labormodell trotz gewisser Unterschiede bei der quantitativen Ergebnisauswertung (Tab.1) die gleichen übergeordneten Tendenzen bezüglich der Veränderung der Verlandung in Abhängigkeit der untersuchten Wehrbeaufschlagung. Die Volumenänderung gegenüber der bisherigen Standardbeaufschlagung fällt dabei im HN-Modell für die meisten Varianten etwas größer aus als im Labormodell. In Anbetracht der hohen Komplexität der untersuchten Prozesse sowie der Vielzahl an Einflussfaktoren stimmen die Ergebnisse der beiden Modellverfahren zufriedenstellend überein.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Anpassung der Wehrbeaufschlagung einen deutlichen Einfluss auf die Anlandung vor dem Kraftwerk hat. Die untersuchten rechtsseitigen Beaufschlagungen (4 u. 5) führen dabei zu der angestrebten Verringerung des Anlandungsvolumens, wohingegen sich die beiden linksseitigen Beaufschlagungen (2 u. 3) gegenteilig auswirken. Zusammenfassend zeigt Variante 5 zum aktuellen Zwischenstand der Untersuchungen die vielversprechendsten Ergebnisse. Die erarbeiteten Erkenntnisse werden durch beide Modellverfahren gestützt, die trotz der hohen Komplexität der untersuchten Prozesse sowie einer Vielzahl an potentiellen Einflussfaktoren gut vergleichbare Ergebnisse liefern. Die Auswirkung einer zusätzlichen Drosselung des Kraftwerks sowie der Einfluss der Verteilung der Sedimentzugabe auf die Anlandungssituation sind derzeit Gegenstand weiterführender Untersuchungen.

6 Danksagung

Das in diesem Beitrag beschriebene Forschungsprojekt wird durch die naturenergie hochrhein AG unterstützt und finanziert, wofür an dieser Stelle ausdrücklich gedankt sei. Unser besonderer Dank gilt zudem allen Beteiligten der naturenergie hochrhein AG für die gute und konstruktive Zusammenarbeit. Die Verantwortung für die dargestellten Inhalte liegt bei den Autoren.

7 Literatur

- Annandale, G. W.; Morris, G. L.; Karki, P. (2016): Extending the life of reservoirs – Sustainable sediment management for dams and run-of-river hydropower, World Bank E-Library Archive, The World Bank, Washington, D.C
- Energiedienst Holding AG (2011): Energie für die Zukunft. Das neue Wasserkraftwerk Rheinfelden. Verfügbar unter <https://www.energiedienst.de>. [03.04.2023].
- Habersack, H.; Wagner, B.; Schoder, A.; Hauer, C. (2013): Die Bedeutung von Feststoffhaushalt und Sedimentdurchgängigkeit für eine nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 65 (2013), 9-10, S. 354-361.
- Harb, G.; Badura, H.; Schneider, J.; Zenz, G. (2015): Verlandungsproblematik bei Wasserkraftanlagen mit niedrigen Fallhöhen. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 67 (2015), 7-8, S. 315-324.
- Knoblauch, H.; Hartmann, S.; & De Cesare, G. (2007). Maßnahmen gegen die Verlandung von Stauräumen im Alpenraum. In *14. Deutsches Talsperrensymposium* (pp. 234-238). Eigenverlag.
- Kostić, T. (2023): 3D-hydrodynamisch-numerische Untersuchungen des Geschiebetransports in Verzweigungsgerinnen. In: Kasseler Wasserbau Mitteilungen, Heft 24, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel, ISBN: 978-3-7376-1130-5
- Kostić, T.; Theobald, S. (2021a): 3-D-hydrodynamisch-numerische Analyse der Strömungsverhältnisse in Verzweigungsgerinnen. In: WasserWirtschaft 111, Heft 12, S. 36 - 42.
- Kostić, T.; Theobald, S. (2021b): Simulation des Geschiebetransports in Verzweigungsgerinnen mit 3-D-Morphodynamik. In: WasserWirtschaft 111, Heft 12, S. 43 - 49.
- Popp, F.; Theobald, S. (2023): Hybride Untersuchung zur Hydraulik und Morphodynamik an einem Laufwasserkraftwerk – Methodik und erste

Ergebnisse, In: Rüther, Nils (Hg.): Wasserbau-Symposium 2023.
Wasserbau – krisenfest und zukunftsweisend, Tagungsband 2 S. 11 – 20

Autoren:

Fabian Popp, M. Sc.

Univ. Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

Universität Kassel

Kurt-Wolters-Straße 3,

34125 Kassel

Tel.: +49 (0)561 804 3538

E-Mail: f.popp@uni-kassel.de
s.theobald@uni-kassel.de

Probabilistische Bewertung der Böschungsstabilität von Flussdeichen auf Basis numerischer Strömungssimulationen für die praktische Anwendung

Marco A. Öttl
Jens Bender
Jürgen Stamm

Stichworte: *Probabilistische Methoden, Numerische Strömungssimulationen, Praktische Anwendung*

1 Motivation und Zielsetzung

Zur Beurteilung der Stabilität eines Systems werden dessen Widerstände mit den vorherrschenden Einwirkungen verglichen. Dieses Vorgehen erfolgt i.d.R. über die Beschreibung von Grenzzuständen, z.B. Zuverlässigkeit $z = R - S \geq 0$ (DWA-M 520, 2023). Betrachtet man nun die landseitige Böschungsstabilität von Flussdeichen, so wird diese u. a. von den Strömungskräften der Sickerströmung beeinflusst. Dieses Phänomen wird in der Praxis größtenteils unter Annahme stationärer oder quasi-stationärer Randbedingungen berücksichtigt (Haselsteiner, 2007). In dieser Betrachtungsweise erreicht die Sickerlinie ihre maximale Ausprägung im Deich und bildet somit einen kritischen Lastfall, welcher aus technisch-konservativer Sicht für die Bemessung der relevante Fall ist. Im Gegensatz dazu, ermöglicht eine instationäre numerische Strömungsanalyse die Berücksichtigung einer zeitlich veränderlichen Deichdurchsickerung, die gegenüber stationären Annahmen Standsicherheitsreserven aufdecken kann.

Werden an dieser Stelle zusätzlich probabilistische Verfahren berücksichtigt, können im Gegensatz zur bisherigen Praxis detailliertere Aussagen über das

Systemverhalten und dessen Zuverlässigkeit getroffen werden. In der probabilistischen Analyse werden sowohl die Einwirkungen (z.B. der Wasserstand) als auch die Widerstände (z.B. auf einen Gleitkörper stabilisierend wirkende Kräfte und Momente) als stochastische Zufallsvariablen betrachtet und mithilfe von Verteilungsfunktionen beschrieben. Dieses Vorgehen ermöglicht, dass jedem Wert eine Unter- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann. Im Ergebnis resultiert auch für die Zuverlässigkeit eine Wahrscheinlichkeitsverteilung. Bei Werten von $z < 0$ tritt ein Versagen des Bauwerks ein. Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f des Bauwerks ergibt sich so zu $P_f = P(z < 0)$.

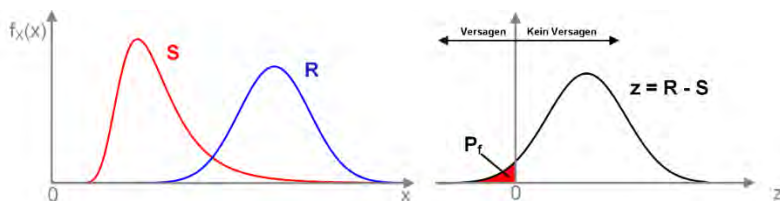


Abbildung 1: Definition der Versagenswahrscheinlichkeit für P_f (rot) über die Grenzzustandsfunktion $z = R - S$

So wird im folgenden Beitrag vor dem Hintergrund der vorangestellten Ausführungen ein Modell auf Basis hydronumerischer Simulationen vorgestellt. Dabei besitzt die zeitliche Verortung der Sickerlinie eine entscheidende Rolle, um eine genauere Aussage über die Stabilität des Deiches zu treffen. Durch eine entwickelte Routine kann der Verlauf der Durchsickerung für bemessungsrelevante Hochwasserganglinien zu unterschiedlichen Zeitpunkten in einem instationären, geohydraulisch-numerischen Modell simuliert (Abschnitt 2) werden. Anschließend werden funktionale Ansätze für die praktische Umsetzung hinsichtlich der Verortung der Sickerlinie (Abschnitt 3) vorgestellt. Basierend auf synthetischen Bemessungsganglinien lassen sich im Ergebnis Aussagen hinsichtlich der Verhaltensmuster der resultierenden Sickerlinien ableiten. Diese Erkenntnisse können einer Zuverlässigkeitsanalyse zugeführt werden, ermöglichen eine probabilistisch gestützte Bewertung der Standsicherheit des Deichabschnitts und verbessern die Bestimmung von Systemversagenswahrscheinlichkeiten auf Basis numerischer Strömungssimulationen.

2 Methodik

Für die in diesem Beitrag vorgestellte Methodik zur probabilistisch gestützten Bewertung der Böschungsstabilität von Flussdeichen ist zunächst der grundlegende methodische Aufbau (vgl. 2.1) und eine neue Variable (vgl. 2.2) zu definieren.

2.1 Untersuchungsmodell

Für die Studie wird ein homogenes Referenzdeichsystem (Abbildung 2) mit folgenden geometrischen Randbedingungen analysiert: Deichlagerbreite $b_D = 15$ m, Kronenhöhe $h_K = 2$ m, Kronenbreite $b_K = 3$ m und Böschungsneigung 1:3. Dazu werden sechs Bodenarten als Füllmaterial getrennt voneinander untersucht. Der Anwendungsbereich der Durchlässigkeit k_f des Bodens liegt zwischen $1 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$ (Ton) und $5 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ (Sand).

Die Einwirkung definiert sich aus der Höhe des Wasserstandes sowie der zugehörigen Dauer eines Hochwasserereignisses. Im Vergleich zu deterministischen Ansätzen, in denen der ungünstigste Zustand für die Stabilitätsanalyse des Deiches aus der resultierenden Belastungssituation berücksichtigt wird und die Stabilitätsbestimmung lediglich für diesen Anwendungsfall erfolgt, kann in einem instationären numerischen Modell die natürliche Variabilität unterschiedlicher Einwirkungen (z.B. Wasserstandshöhe und bemessungsrelevante Ganglinien über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten) berücksichtigt werden. Im vorliegenden Untersuchungsmodell werden 12 Referenzganglinien mit verschiedenen Anlaufzeiten t_a (1, 5, 10 und 20 Tage) über eine konstante Scheiteldauer t_p (20 Tage) als Grundlage dienen. Der Wasserstand h (Einstaugrad) variiert wie folgt: 1.50 m (0.75), 1.75 m (0.875) und 1.90 m (0.95). Im nächsten Entwicklungsschritt soll der nach Öttl et al. (2023) entwickelte flussgebietsbezogene Hochwassergangliniengenerator in die Analyse integriert werden.

Diese Grundlage, in Form einer Hochwasserganglinie, wird in eine instationäre numerische FEM-Analyse (z.B. GeoStudio) eingesteuert und gelöst. Fortfolgend kann das gesamte Porenwasserdruckprofil (PWD-Profil) des Referenzsystems für jeden gewählten Zeitschritt der Ganglinie extrahiert werden. Dabei erfolgt die Interpolation der Sickerlinie für jeden Punkt auf der Abs-

zisse zwischen dem positiven und negativen Porenwasserdruck. Im Anschluss wird eine vergleichende Betrachtung zu den jeweiligen stationären Verhältnissen generiert.

2.2 Variable κ

Sowohl im stationären Fall als auch die Lage der Sickerlinie bei homogenen Deichen von der äußeren Kubatur in das System eingepreßt (Davidenkoff, 1957). Durch den maximalen Wasserstand wird dabei der höchste Eintrittspunkt der Sickerlinie definiert. Im instationären Fall ist ihre Lage von den geometrischen und geotechnischen Eigenschaften der Deichbaumaterialien, aber auch von der Charakteristik der Hochwasserganglinie abhängig (Schwiersch, 2021). Hier besitzt die zeitliche Verortung der Sickerlinie eine entscheidende Rolle, um eine genaue Aussage über die Stabilität des Deiches treffen zu können. Aufgrund dessen wird im folgenden Untersuchungsmodell, basierend auf der beschriebenen Methodik (vgl. 2.1), eine neue Variable κ definiert. κ (grün) repräsentiert dabei die Differenz zwischen den Winkeln α_{stat} und α_{inst} . Diese resultieren aus den geltenden mathematischen Zusammenhängen am Dreieck und beschreiben den skizzierten Winkel unterhalb der jeweiligen approximierten Sickerlinie (blau: stationär; rot: instationär) in Form einer Gerade. Dieser Zusammenhang ermöglicht die Darstellung von κ (Abbildung 2).

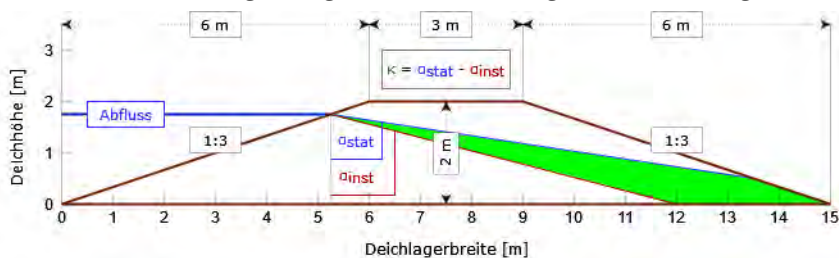


Abbildung 2: Definition von κ (blau: vereinfachte stationäre Annahme, rot: vereinfachte instationäre Annahme)

Somit kann die Abweichung zwischen der stationären und instationären Darstellung in Abhängigkeit vom jeweiligen Zeitpunkt t_i der Hochwasserganglinie mithilfe von κ visualisiert werden. Mit zunehmender Dauer der Belastung

wird κ gegen null konvertieren und es werden stationäre Verhältnisse eintreten. In Abbildung 3 stellt der Ordinateneneintrittspunkt den Beginn der Welle nach unterschiedlichen Anlaufzeiten t_a (1, 5, 10 und 20 d) für verschiedene Bodenarten über die Scheiteldauer t_p (20 d = const.) dar.

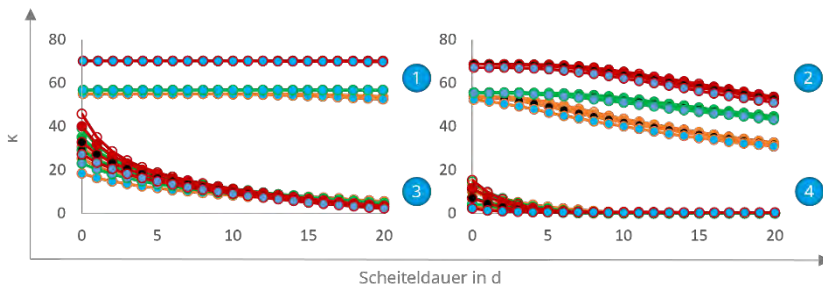


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung von unterschiedlichen κ -Verläufen für 4 Bodenarten (1: $1 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$ (Ton), 2-4: $1 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ (Schluff))

Es kann geschlussfolgert werden, dass Böden mit geringer Durchlässigkeit (z.B. Ton) nicht zu stationären Verhältnissen führen, während mit zunehmendem Sandanteil ($k_f \geq n \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$) bereits am Scheitelbeginn der Hochwasserganglinie quasi-stationäre Bedingungen vorliegen. Des Weiteren ist zu beachten, dass bei einem erhöhten Wasserstand (Einstaugrad) der Wert von κ am Ordinateneneintrittspunkt größer wird. Dies ist auf das höhere vorhandene Sättigungsvolumen des Deiches zurückzuführen. Darüber hinaus ist festzustellen, dass die Anlaufzeit t_a , besonders im Hauptkorn Schluff (3), eine bedeutende Rolle für κ am Ordinateneneintrittspunkt darstellt. Denn längere Anlaufzeiten t_a führen tendenziell dazu, dass der Deich bereits eine deutlich erhöhte Vorsättigung besitzt.

3 Analytische Untersuchungen für die mathematische Beschreibung von κ

Die Einbindung der beschriebenen Vorgehensweise in eine probabilistische Bemessung ist aufgrund des benötigten Rechenbedarfs nicht zielführend. Daher liegt ein weiteres Augenmerk auf der Ableitung einer allgemeingültigen

gen Funktionsgleichung zur Beschreibung der zuvor entwickelten Analyseergebnisse (Winkeldifferenz κ) unter Berücksichtigung der betrachteten Eingangsbedingungen (t_a , t_p , h , k_f).

Besonders lineare Funktionen, z.B. $\kappa = m \cdot x + b$, eignen sich aufgrund ihrer einfachen mathematischen Anwendung und nur zwei Unbekannten (m : Steigung, b : Schnittpunkt der Geraden mit der y -Achse) im Bereich stark durchlässiger (z.B. Sand) und gering durchlässiger (z.B. Ton) Böden besonders. Jedoch erweist sich die Anwendung im Bereich der schluffigen Böden ($n \cdot 10^{-8} - n \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$), aufgrund der Stauchung im Verlauf der Graphen (Abbildung 3), als unzureichend. So wird im nächsten Entwicklungsschritt beispielhaft eine umgekehrte e-Funktion ($\kappa = A \cdot e^{-b \cdot x}$) an alle Daten angepasst. Die Struktur der Unbekannten (A : Schnittpunkt des Graphen mit der y -Achse; b : Streckung und Stauchung) bleibt nahezu unverändert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird ein Brute-Force-Algorithmus integriert, der auf Basis der Kombinationen verschiedener Standardoperatoren und -funktionen die Lösung mit der besten Eignung findet. Zusätzlich wird die Funktion ($\kappa = A \cdot e^{-b \cdot x}$) mit Faktoren (γ und δ) verknüpft, um die Anpassungsgüte in der analytischen Beschreibung ($\kappa = (A \cdot \gamma) \cdot e^{-b \cdot x \cdot \delta}$) zu verbessern.

Im vorliegenden Fall wird Schluff ($k_f = 5 \cdot 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$) exemplarisch als Beispiel präsentiert, um die Anpassungsgüte der Gleichung für gestauchte Verläufe (Abbildung 4) vorzustellen. Dazu werden in ersten Untersuchungen für A (k_f , t_a und h) und b (k_f) die maßgebenden funktionalen Einflussparameter definiert. Im Anschluss werden zwei simulierte κ -Verläufe mit folgenden Randbedingungen über eine konstante Scheiteldauer ($t_p = 20$ Tage) auf der Abszisse abgebildet: $h = 1.50$ m (0.75), $t_a = 10$ Tage (links) sowie $h = 1.90$ m (0.95), $t_a = 20$ Tage (rechts). Die funktionale Beschreibung der Graphen mittels Brute-Force-Algorithmus wird im vorliegenden Anwendungsfall wie folgt entwickelt: $\kappa = A \cdot \gamma \cdot e^{-b \cdot x \cdot \delta}$ mit $A = e^h + \log(t_a) + e^{k(f)}$ und $b = k_f$. Dies liefert eine solide Grundlage für die weitere Entwicklung. Die jeweiligen Faktoren (γ und δ) werden derzeit noch individuell angepasst (1: $\gamma = 11.52$ und $\delta = 130756.28$ und 2: $\gamma = 23.98$ und $\delta = 244567.37$).

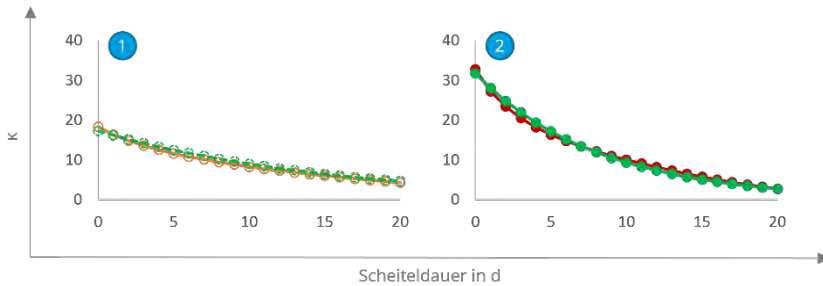


Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung (grün) des κ -Verlaufes von Schluff ($k_f = 5 \cdot 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$) mit der Gleichung ($\kappa = A \cdot \gamma \cdot e^{-b \cdot x \cdot \delta}$) für die oben beschriebenen Randbedingungen

Für die zukünftigen Untersuchungen bedarf es einer weiteren Brute-Force-Entwicklung, um die abhängigen Größen in einem ganzheitlichen Modell zusammenzuführen und einer probabilistisch gestützten Bewertung der Böschungsstabilität (z.B. nach Bishop, 1958) zugänglich zu machen.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Dass die Charakteristik der Hochwasserganglinie Einfluss auf die Böschungsstabilität von Flussdeichen besitzt, ist allgemeiner Konsens. Wie diese als Zufallsvariable in Untersuchungen der Sickerströmung eingehen kann, wird mithilfe der vorgestellten Methodik gezeigt. Anhand von einem homogenen Untersuchungsmodell mit sechs Bodenarten wird ein neuer Ansatz präsentiert, den instationären Verlauf der Sickerlinie analytisch abzuleiten. Dabei ist es das Ziel, den Einfluss der Hochwasserganglinie einer probabilistisch gestützten Bewertung zugänglich zu machen und die Erkenntnisse, um die Berücksichtigung ungewisser Sickerlinien sowie der Bestimmung von Systemversagenswahrscheinlichkeiten für die Praxistauglichkeit zu verbessern.

Für eine methodische Weiterentwicklung sind die abhängigen Größen in einer ganzheitlichen analytischen Lösung zusammenzuführen und z.B. in das an der RWTH Aachen entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem ProMalDes (Bachmann, 2012) zu integrieren.

5 Literatur

- Bishop, A. W. (1955): The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. In: Géotechnique 5 (1), S. 7-17
- Bachmann, Daniel (2012): Beitrag zur Entwicklung eines Entscheidungs-Unterstützungssystem zur Bewertung und Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- DWA-Merkblatt, DWA-M 520 (2023): Probabilistische Methoden im Wasserbau. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef
- Davidenkoff, R. (1957): Durchsickerung durch Deiche und Erddämme (I). In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (8), S. 70-84
- Haselsteiner, Ronald (2007): Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung. Dissertation. Technische Universität München, München. Institut für Wasserwesen.
- Öttl et al. (2023): An Extended Flood Characteristic Simulation Considering Natural Dependency Structures. In: Hydrology 10(12), doi: <https://doi.org/10.3390/hydrology10120233>
- Schwiersch et al. (2021): Probabilistische Verortung der stationären Sickerlinie in Flussdeichen unter Verwendung analytischer Berechnungsverfahren. In: Tagungsband 44. Dresdner Wasserbaukolloquium, S.21-29

M.Eng. Marco Albert Öttl
Prof. Dr.-Ing. Jens Bender
Lehrgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau

Duale Hochschule Baden-Württemberg
Mosbach
Neckarburkener Straße 8
74821 Mosbach

Tel.: +49 6261 939 173
+49 6261 939 528
E-Mail: marco.oettl@mosbach.dhbw.de
jens.bender@mosbach.dhbw.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

Institut für Wasserbau und
Technische Hydromechanik
Technische Universität Dresden

August-Bebel-Straße 30
01219 Dresden

Tel.: +49 351 463 34397
Fax: +49 351 463 37120
E-Mail: Juergen.Stamm@tu-dresden.de

Ein Wechselsprung im Zulaufbereich eines Wehrs - Wie geht das denn?

Marco Hornbogen
Eberhard Pötschke
Mechthild Lehmann
Michael Sickert

Stichworte: Wechselsprung, Wehranlage, Kolk, Wehrsteuerung

1 Funktion und Steuerung der Wehranlage Brischko

Die LTV betreibt das Wehr Brischko zur Abflussregulierung zwischen dem Altlauf der Schwarzen Elster und der Flutmulde Wudra, welche die Ortslage Wittichenau vor Hochwasser schützt. Im Jahr 2007 begann der Ersatzneubau des auffälligen Schützenwehrs Brischko. Aufgrund von signifikanten Setzungen des neuen Wehrkörpers während der Baumaßnahme sowie anschließenden Rechtsstreitigkeiten blieb der Bauzustand bis 2013 bestehen. Erst 2014 wurde die Wehranlage mit einer angepassten Wehrkörpergeometrie durch die LTV in Betrieb genommen.



Abbildung 1: Baustelle Wehr Brischko während des Hochwassers 2013 (links) und die oberwasserseitige Wasserhaltung kurz vor Fertigstellung des Wehrs 2014 (Bilder: LTV)

Zur Sicherung des oberwasserseitigen Stauziels von 125,04 m NHN dient ein luftgefüllter Schlauch in Richtung Wudra-Flutmulde, welcher über eine automatische Regelungseinrichtung gesteuert wird. Erst bei über 20 m³/s steigt der Wasserspiegel im Oberwasser an. Der Abfluss zur Schwarzen Elster wird parallel durch ein fest eingestelltes Hubschütz im Seitenschluss auf max. 3,5 m³/s begrenzt.

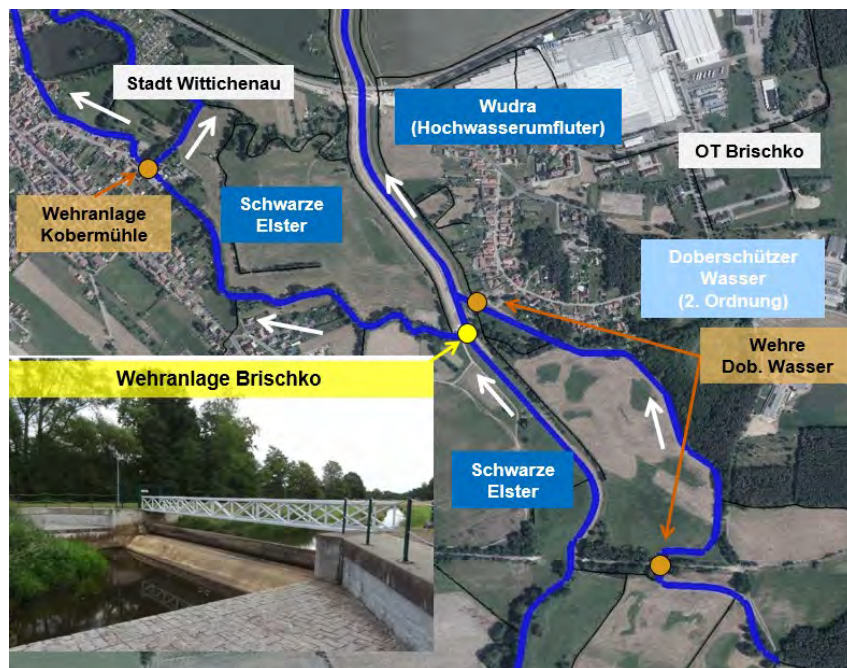


Abbildung 2: Übersichtsplan mit der fertigen Wehranlage Brischko (Quelle: FWT 2016) und dem umliegenden Gewässersystem mit Wehranlagen

Zur Steuerung der Wehranlage Brischko wurden mehrere Pegel mit digitaler Messaufnahme installiert. Eine Schrägpegelanlage befindet sich ca. 80 m stromaufwärts des Wehrs Brischko. Dieses erfasst den Wasserstand sowie die Fließgeschwindigkeiten mittels eines SLD-Doppler-Systems und bildet daraus den Abfluss der Schwarzen Elster.

Im linken Uferbereich, ca. 7 m im Oberstrom des Schlauchwehrs, ist ein elektrischer Messpegel installiert. Über diesen wird das Stauziel gemessen und das Schlauchwehr gesteuert.

Zusätzlich befindet sich ein Pegel- bzw. Schwimmerschacht unterhalb des Pegelhauses, der mittels 3x DN100-Leitungen direkt mit dem Oberwasserbereich des Schlauchs bzw. dem Stauraum verbunden ist. Über diesen erfolgt die Notentlastung des Schlauchwehrs, wenn die Messpegel ausgefallen sind und ein kritischer Wasserstand von 0,15 m über dem voll ausgefahrenen Schlauchwehr überschritten ist.

Unterhalb des Abschlagsbauwerks der Schwarzen Elster erfolgt zusätzlich eine Wasserstandserfassung mittels OTT RLS Radarsensor. Zusammen mit dem Messpegel im Oberwasser des Schützes erfolgt iterativ eine Umrechnung der Abflüsse der Schwarzen Elster in Richtung Wittichenau. Durch alle Messpegel wird dann die Abflussaufteilung zwischen Schwarzer Elster und Wudra durch die LTV erfasst.



Abbildung 3: Zustand während der Bauausführung (Bild: LTV 2013): Zulaufpunkte zum Schwimmerschacht im Oberstrom (roter Rahmen), Steuerungsrelais der Wehranlage im Pegelhaus am Wehr Brischko (Bild: FWT 2017)

2 Abflussmodellierung und Ergebnisse

Die Abflussaufteilung zwischen dem Altlauf und der Wudra wurde anhand eines 2D-HN-Lupenmodells auf der Grundlage der Bestandsvermessung 2014 nach der Wehrfertigstellung analysiert, da bei hoher Wasserführung weniger Wasser in den Altlauf der Schwarzen Elster abgeschlagen wurde. Hierbei zeigte sich, dass sich der Abfluss in der Schwarzen Elster mit zunehmendem Hochwasserabfluss in Richtung Wittichenau verringert. Dabei blieben aber das eingestellte Stauziel des Wehrs am Schlauch und die Schützstellung konstant. Die Auswertung der Wasserspiegellagen an den Messpunkten ergab

eine deutliche Absenkung des Wassers (ab $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$) am oberwasserseitigen Zulaufpunkt zum Schwimmerschacht (s. Abbildung 4).

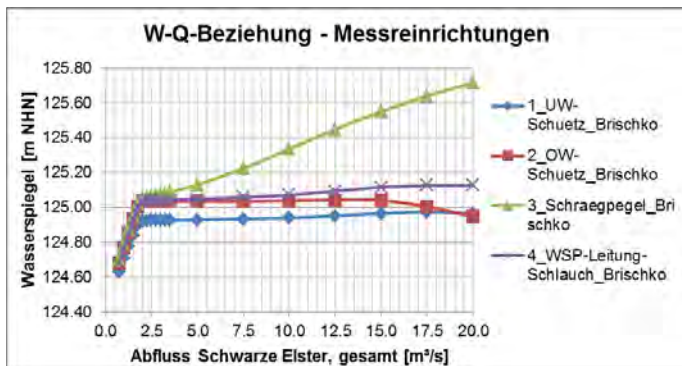


Abbildung 4: Wasserstands-Abfluss-Beziehungen an den Messpunkten, entnommen aus dem 2D-HN-Modell (Grafik: FWT 2017)

Eine intensive Modellprüfung ergab schließlich durch die Auswertung der Froude-Zahlen (Froude nahe 2,0), dass sich im Oberwasser ein Wechselsprung bildet. Die Strömung ähnelt hierbei der in einem Venturigerinne.



Abbildung 5: Berechnete Strömungsvektoren und Froude-Zahlen bei $20,0 \text{ m}^3/\text{s}$ Abfluss im Zulauf, blaue Linie: Überschwemmungsgebiet, gelbe Linie: Grenze Sohlbefestigung, Messpunkte am Wehr (Bild: FWT 2017)

3 Fragestellungen durch den Wechselsprung

Neben der Absenkung der Wasserspiegellage entstehen bei einem Wechselsprung hohe Verluste, die sich auf die Sohle als Schubspannung übertragen. Beim Wehr Brischko ist hierfür ein betoniertes Tosbecken zur Energieumwandlung im Unterwasser vorgesehen. Im Oberwasser endet jedoch die Sohlbefestigung aus Wasserbausteinen mit einer Pfahlreihe in Höhe der Wehrwangen, so dass die berechneten Schubspannungen bis zu 150 N/m^2 auf eine unbefestigte Sohle treffen.

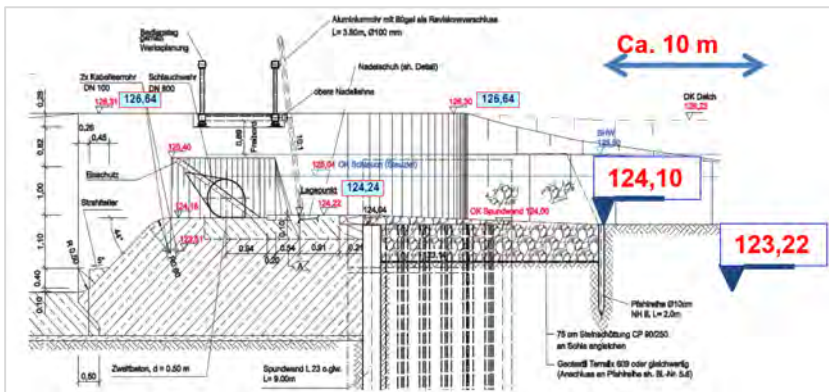


Abbildung 6: Vermessene Sohlhöhen (rot) im Jahr 2018 mit dem Bauwerksquerschnitt der Ausführungsplanung 2013 (Quelle: LTV)

Eine erneute Vermessung im Jahr 2018 ergab eine Sohlabsenkung im Oberwasser bis zu 1,20 m gegenüber der Bestandsvermessung von 2014 (s. Abbildung 6), was die berechnete Sohlbeanspruchung in diesem Bereich bestätigte. Teile der erodierten Sohle lagerten sich rechtseitig im Tosbecken und am rechten Ufer im Oberwasser des Wehrs ab (s. Abbildung 7).

Neben der Gefahr der Kolkbildung oberhalb des Wehrs entsteht eine unklare Wasserstands-Abfluss-Beziehung, die aber für eine automatisierte Wehrsteuerung stabil sein muss.

Von der LTV wurden daher weitergehende Maßnahmen durchgeführt und Untersuchungen beauftragt.



Abbildung 7: Sedimentablagerungen im Tosbecken und Auflandungen in Fließrichtung rechts im Oberwasser (Bilder: FWT 2021)

4 Maßnahmenplanung und Umsetzung

Um eine weitere Auskolkung der Sohle zu verhindern, wurden mehrere Maßnahmen zur Optimierung des Einlaufbereichs anhand des 2D-HN-Modells untersucht. Als Vorzugslösung ergab sich eine rechtsseitige Aufweitung des Fließquerschnittes vom Schrägpegel bis zum Wehr auf einer Länge von ca. 200 m (s. Abbildung 8).

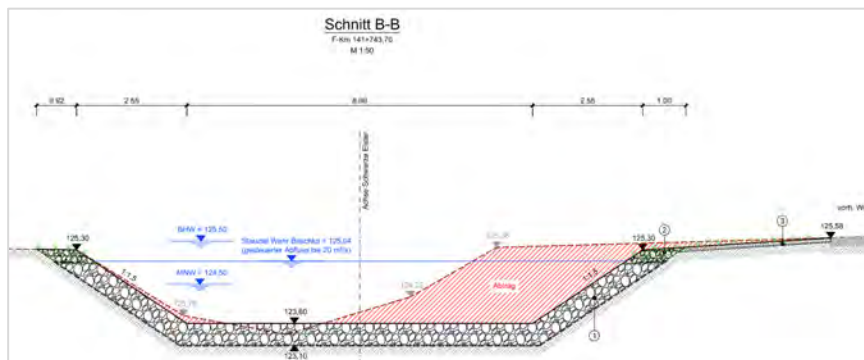


Abbildung 8: Uferabtrag und Befestigung an einem Entwurfsprofil der Ausführungsplanung (Grafik: FWT 2021)

Die Sohle und beide Ufer wurden aufgrund der berechneten Schubspannungen in diesem Bereich mit Wasserbausteinen ausgekleidet (s. Abbildung 10).

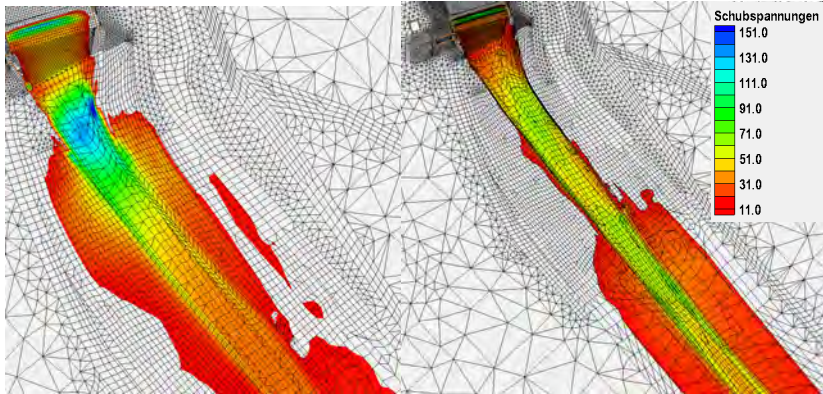


Abbildung 9: Berechnete Schubspannungen [N/m²] des Ist-Zustands (links) und des Planzustands (rechts) bei ca. 41,6 m³/s (HQ100_{neu}) (Grafik: FWT)

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die bauliche Umsetzung eines Venturigerinnes im Zulaufbereich eines Wehres zeigt einmal mehr wie wichtig hydraulische Berechnungen mit 2D-HN- bzw. 3D-HN-Modellen in der wasserbaulichen Praxis sind. Bei der Planung des Wehres (vor 2006) lagen nur 1D-HN-Modelle vor, die diese Strömungssituation unzureichend darstellen konnten.



Abbildung 10: Uferabtrag im Bau (in Fließrichtung links) und fertige Befestigung mit Wasserbausteinen (gegen die Fließrichtung) (Bilder: FWT 2021)

Mit den dargestellten Maßnahmen konnte eine eindeutige W-Q-Beziehung für die Wehrsteuerung und die Dauerhaftigkeit des Wehres wiederhergestellt werden. Das Wehr Brischko erfüllt nun weiter seinen Zweck.

Ich bedanke mich beim Betrieb Spree/Neiße der Landestalsperrenverwaltung Sachsen für dieses spannende Projekt und möchte mit folgenden Worten schließen:

„Nicht bei jedem unplausiblen Modellierungsergebnis sitzt der Fehler vor dem Rechner.“

6 Quellen

LTV (2019): „Hydraulisches Gutachten zum Wehr Brischko sowie dem entwidmeten Hochwasserschutzdeich“, erstellt von FWT, Leipzig April 2019.

LTV (2020): „Herstellung der hydraulischen Leistungsfähigkeit, Abtrag rechtes Ufer vom Wehr Brischko, Entwurfs- und Ausführungsplanung, erstellt von FWT, Leipzig August 2020.

M. Eng. Marco Hornbogen

Dipl.-Ing. Eberhard Pötschke

Dipl.-Ing. Michael Sickert

Dipl.-Ing. Mechthild Lehmann

Fichtner Water & Transportation GmbH
Standort Leipzig
Löbauer Straße 68
04347 Leipzig

Landestalsperrenverwaltung
des Freistaates Sachsen
Betrieb Spree/Neiße
Am Staudamm 1
02625 Bautzen

Tel.: +49 341 24293-34

Tel.: +49 3591 6711-114

E-Mail: Marco.Hornbogen
@fwt.fichtner.de

E-Mail: Eberhard.Poetschke
@ltv.sachsen.de

www.fwt.fichtner.de

www.wasserwirtschaft.sachsen.de

HRB Straßberg – Optimierung der Betriebseinrichtungen im hydraulischen Modellversuch

Holger Haufe
Andreas Rudolf
Manuel Wewer

Stichworte: Hochwasserrückhaltebecken, Betriebseinrichtungen, Modellversuch

1 Veranlassung

An der Selke führten Hochwasserereignisse, wie im Jahr 1994, immer wieder zu hohen volkswirtschaftlichen und gesellschaftlichen Schäden. Das Einzugsgebiet der Selke liegt im nordöstlichen Teil des Harzes und im Harzvorland in den Landkreisen Harz und Salzlandkreis. Im Hochwasseraktionsplan Selke wurden deshalb im Auftrag des Landes Sachsen-Anhalt durch den Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz seit 1999 Schutzkonzepte untersucht und bewertet.

Nach der Analyse von Hochwasserentstehung und -ablauf sowie der im Einzugsgebiet bestehenden Hochwasserrückhalteräume wurde ein Maßnahmenbündel erarbeitet, das den gesamten Selkelauf von der Quelle bis zur Mündung berücksichtigt. Das geplante Hochwasserrückhaltebecken (HRB) Straßberg, mit einem Rückhaltevolumen von ca. 2,5 Mio. m³, ist ein wesentlicher Bestandteil. Der Standort befindet sich oberhalb der Ortslage Straßberg in einem Abschnitt der Selke mit einer Talbreite von ca. 115 m. Die Selke fließt in diesem Bereich unmittelbar am Fuß des rechten Talhangs neben der Trasse der Harzer Schmalspurbahn (HSB).

Im Ergebnis von Ausschreibungsverfahren hat der Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt 04/2022 die Tractebel Hydroprojekt GmbH mit der Erstellung der Ausführungsplanung und weiterer HOAI-Leistungsphasen beauftragt. Das

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden startete 09/2023 mit der Durchführung hydraulischer Modellversuche.



Abbildung 1: Übersichtskarte

2 Hydrologische Grundlagen

Das Teileinzugsgebiet des HRB Straßberg ist ca. 46 km² groß. Die Flächenanteile im Einzugsgebiet betragen: Forst 60 %, Ackerland 15 %, Wiesenflächen 20 % und Siedlungsflächen 5 %. Die derzeit geltenden Kenngrößen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Hydrologische Kenngrößen der Selke D = 72 h

	BHQ3	BHQ1	BHQ2	PMF (vorläufig)
max. Zufluss	20,69 m ³ /s	32,86 m ³ /s	44,21 m ³ /s	ca. 120 m ³ /s
max. Abfluss nach Retention	9,00 m ³ /s	30,26 m ³ /s	43,25 m ³ /s	ca. 120 m ³ /s

3 Absperrbauwerk und Betriebseinrichtungen

3.1 Absperrbauwerk

Die als HRB ohne Teildauerstau („grünes HRB“) geplante Stauanlage mit ökologischer Durchgängigkeit, soll als kombiniertes Absperrbauwerk (Steinschüttdamm mit mineralischer Innendichtung und Staumauer) errichtet werden (Höhe ca. 20 m, Kronenlänge ca. 270 m).

3.2 Betriebseinrichtungen und sonstige Durchlässe

In der Gewichtsstaumauer werden die Betriebseinrichtungen (Hochwasserentlastungsanlage, Betriebsauslässe, Gewässerdurchlass) sowie - als Novum im Stauanlagenbau - der Bahndurchlass für die HSB, integriert.

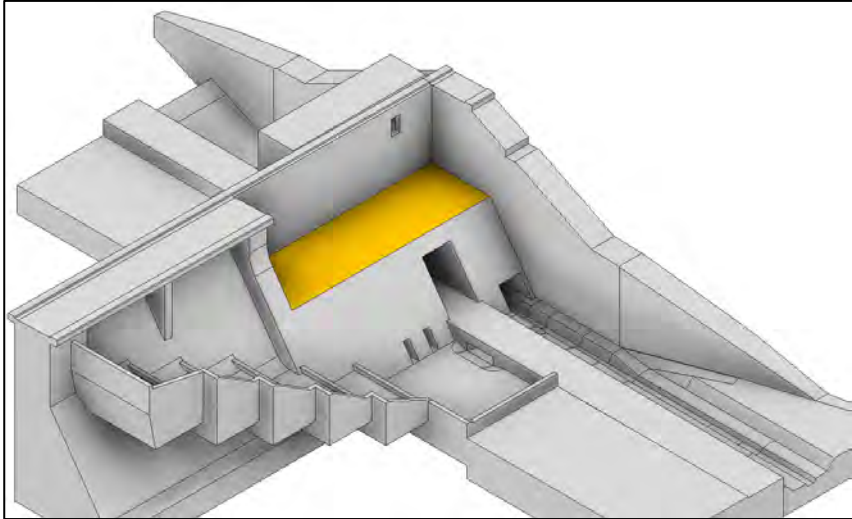


Abbildung 2: 3-D-Modell für Versuchsstand (Quelle: IWD)

4 Modellversuch

4.1 Modellierungsbereich

Auf Grundlage o. g. hydrologischer Angaben und der Größe des Untersuchungsraumes wurde ein Modellmaßstab von $M 1 : 20$ vorgesehen. Die messbaren geometrischen, kinematischen und dynamischen Größen wurden nach dem Froude'schen Ähnlichkeitsgesetz ins Verhältnis gesetzt, siehe Tabelle 2. Das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz findet Anwendung, sofern der Einfluss der Schwere- und Trägheitskräfte gegenüber Kräften infolge Viskositätseffekten überwiegt. Bei Fließvorgängen mit freiem Wasserspiegel, über Wehre oder bei Wellenbewegungen – wie im Modellversuch HRB Straßberg vorliegend - ist dies der Fall.

Tabelle 2: Natur- und Modellgrößen nach dem Froude'schen Ähnlichkeitsgesetz

	Natur 1:1	Modell 1:20
Höhe [m] ca.	20	1,00
Länge [m] ca.	290	14,50
Breite [m] ca.	150	7,50
Überfallhöhe BHQ2 [m]	0,66	0,033
Überfallhöhe PMF [m]	2,10	0,105
Durchfluss PMF max. [m³/s]	120,00	0,067
Durchfluss BHQ1 nach Retention [m³/s]	30,26	0,017
Durchfluss BHQ2 nach Retention [m³/s]	43,25	0,024
Durchfluss BHQ3 nach Retention [m³/s]	9,00	0,005
Durchfluss je BA max. [m³/s]	13,52	0,008
Steuerdurchfluss BA max. [m³/s]	9,00	0,005
Steuerdurchfluss BA min. [m³/s]	1,00	0,001

4.2 Modellbau

Das Modell wurde aus festen und veränderlichen Anlagenbestandteilen errichtet. Um evtl. erforderliche Änderungen infolge der Ergebnisse der Versuchsreihen oder der parallel laufenden Ausführungsplanung mit geringem Aufwand im Modell umsetzen zu können, wurden die veränderlichen Anlagenbestandteile als Module vorgesehen. Das physikalische Modell wurde im Hubert-Engels-Labor der TU Dresden auf einer Grundfläche von ca. $B \times L = 5 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ aufgebaut. Zur Profilierung der maßstabsgetreuen Geländeoberfläche sind Querprofile aus Holzschablonen senkrecht zur Fließachse aufgestellt worden. Die Zwischenräume sind mit einer ca. 20 cm hohen Sandauffüllung versehen. Den Abschluss bildet eine 4 - 5 cm dicke Betonschicht, welche bündig mit den Querprofilen abschließt, siehe Abbildung 3. Für den Modellaufbau der Staumauer wurden 3D-Modelle erstellt und diese anschließend mit Hilfe einer CNC-Maschine aus FOREX®-Material herausmodelliert bzw. in einem 3D-Druckverfahren erstellt. Die Verschlüsse der Betriebsauslässe (BA) sowie des Gewässerdurchlasses wurden als höhenverstellbare Schütze ausgebildet.



Abbildung 3: Geländemodellierung des physikalischen Modells (Quelle: IWD)

Die Herstellung des hydraulisch relevanten Innenausbaus (BA, Gewässerdurchlass, Belüftung) erfolgte aus Plexiglas mit unterwasserseitigem Sichtfenster in der luftseitigen Maueroberfläche zur visuellen Erfassung der Strömungsverhältnisse im Bauwerk, siehe Abbildung 4. Zur Überprüfung der Modellgenauigkeit wurde nach Abschluss des Modellaufbaus als Qualitätssicherungsmaßnahme das Modell mittels einer MS60 LEICA® Multi-Station aufgemessen. Dazu wurden 3D-Laser-Scans in Verbindung mit dem absoluten, internen Koordinatensystem des Hubert-Engels-Labors von fünf verschiedenen Standorten aus aufgenommen.

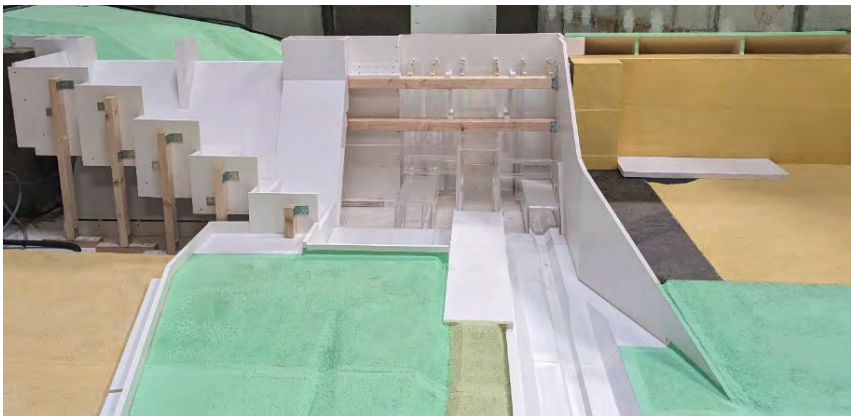


Abbildung 4: Ausgangszustand Umbau mit Blick vom Unterwasser (Quelle: IWD)

4.3 Geländemodellierung und Untersuchungsschwerpunkte

Zu ermitteln ist die hydraulische Leistungsfähigkeit der Betriebsauslässe, der Hochwasserentlastungsanlage mit Überlauf und Kaskade und des gemeinsamen Tosbeckens sowie das hydraulische Verhalten aller Betriebseinrichtungen. Nachzuweisen sind außerdem die Strömungsverhältnisse im Bereich Zu- und Ablauf einschließlich Pegelanordnung sowie die Geländegestaltung mit Höhenlage der Wendeplätze, Wegeföhrung und Gerinneführung.

5 Ergebnisse

5.1 Optimierungen vor Modellaufbau

Erste Optimierungen der bisher geplanten Betriebseinrichtungen erfolgten noch vor Versuchsbeginn (HWE Pfeileranzahl und Kronenprofil, Kaskadenoptimierung), um die erforderliche Anzahl der vorgesehenen Optimierungsschritte (Modellumbau) zu reduzieren.

5.2 Defizite und Optimierungen Tosbecken

Bereits zu Beginn der Versuche wurde deutlich, dass eine unzureichende Energieumwandlung im Tosbecken vorliegt und die Rückleitung in die Selke nicht optimal war. Es kam bereits bei BHQ1 zum massiven Wasserübertritt über die HSB-Trasse und zur Energieumwandlung im Selkegerinne.

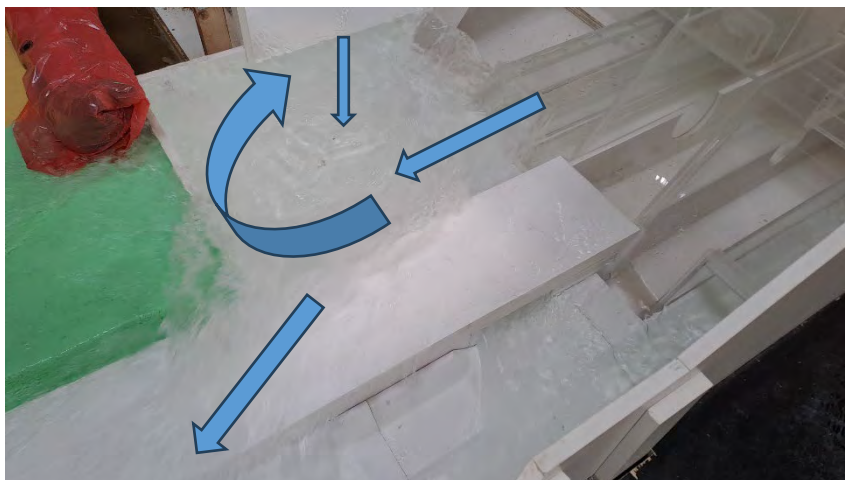


Abbildung 5: Überlastung Tosbecken

Um die hydraulische Belastung des Gewässerbettes der Selke zu reduzieren und Abflussverhältnisse zu erzeugen, die der DIN 19700-11 Pkt. 8.4 entsprechen („Durch Energieumwandlungsanlagen wird der schießende Abfluss in strömenden Abfluss überführt ...“), wurde die Vergrößerung des Tosbeckens (Länge, Eintiefung, Endschwelle) in Verbindung mit einem Ableitungskanal in die Selke empfohlen und umgesetzt.



Abbildung 6: Tosbecken nach Vergrößerung und Ableitungskanal

5.3 Optimierungen HWE-Kaskade

Aufgrund des hydraulischen Verhaltens der HWE-Kaskade im Modell (Unter- auslastung insbesondere der oberen Stufen) und Erkenntnissen aus der Nacherkundung des Baugrunds (höherer Felshorizont), erfolgte auch hier eine Optimierung der Geometrie. Die Kaskadenstufen wurden angehoben und verkleinert. Damit kann der Massivbau und dadurch Kosten und Bauzeit reduziert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem hydraulischen Modellversuch zum HRB Straßberg wurde die hydraulische Leistungsfähigkeit der Betriebseinrichtungen nachgewiesen. Die Funktionssicherheit der geplanten Anlage wurde durch die Optimierung des Tosbeckens und die Ergänzung des Ableitungskanals verbessert. Der Modellversuch ist noch nicht abgeschlossen und wird mit verschiedenen Schwerpunkten fortgesetzt. Die Ergebnisse werden in die weitere Planung übernommen. Der Modellversuch leistet damit einen wichtigen Beitrag bei der Dimensionierung eines wichtigen Teiles für den Hochwasserschutz an der Selke. Er dient dem Ziel aller Beteiligten und der Erwartung der Öffentlichkeit – eine sichere Stauanlage für einen nachhaltigen Hochwasserschutz – zu erreichen bzw. zu erfüllen.

Autoren:

Dr.-Ing. Holger Haufe

Tractebel Hydroprojekt GmbH
Geschäftsbereich Dresden
Mendelssohnallee 8
01309 Dresden

Tel.: +49 351 211230
Fax: +49 351 2112388
E-Mail: holger.haufe@tractebel.engie.com

Dipl.-Ing. Andreas Rudolf

Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt
Timmenröder Straße 1a
38889 Blankenburg

Tel.: +49 3944 9420
Fax: +49 3944 94200
E-Mail: rudolf@talsperren-lsa.de

Dipl.-Ing. Manuel Wewer

Technische Universität Dresden
Institut für Wasserbau und Technische
Hydromechanik
August-Bebel-Straße 30
01219 Dresden

Tel.: +49 351 463-35437
Fax: +49 351 463 37120
E-Mail: manuel.wewer@tu-dresden.de

Geohydraulische Analyse der Auswirkungen von Schiffswellen auf die Stabilität von Gewässersohle und -ufer

H. Montenegro¹, L. Dechant¹, D. Maier¹

ABSTRACT

Infolge immer größerer und stärker motorisierter Fahrzeuge nimmt die Wellenbelastung von Gewässersohle und -ufer auf vielen Bundeswasserstraßen zu. Schiffswellen stellen sich in Wasserstraßen als schnell variierende Wasserstände dar und bewirken, je nach Durchlässigkeitseigenschaften von Gewässersohle/Sediment, ein Druckungleichgewicht (Porenwasserüberdrücke) zwischen Wassersäule und Sohle. Diese Druckunterschiede bauen sich vorwiegend in der Absinkphase auf und lösen im Porenraum der Gewässersohle aufwärts gerichtete Strömungsvorgänge aus. Aufgrund des Impulsaustauschs zwischen Porenwasserströmung und Kornmatrix (Strömungskräfte) kommt es zu einer Reduzierung der effektiven Spannungen im oberen Bereich des Gewässerbetts. Die Abnahme der effektiven Spannungen geht einher mit einer Verringerung der Scherfestigkeit, was bis hin zum Abgleiten von Uferböschungen oder bis zur vollständigen Verflüssigung des Gewässerbetts führen kann. Obwohl die Abnahme an Scherfestigkeit nur während einer vergleichsweise kurzen Zeitdauer auftritt, kann diese für die Bemessung von Böschungssicherungen und/oder Uferspundwände aber auch für die Beurteilung von Sedimenttransportvorgänge von Relevanz sein. Im Beitrag wird auf die maßgebenden Eigenschaften der Gewässersohle sowie auf die hydraulischen Randbedingungen eingegangen, die das Gewässerbett von Kanälen und Flüssen destabilisieren können. Mittels einer 1D-Analyse der Wellenbeanspruchung am Erdwiederlager einer Uferspundwand werden diese instationären Vorgänge exemplarisch aufgezeigt und im Kontext einer Spundwandbemessung basierend auf die vereinfachten Wasserdruckansätze nach EAU diskutiert. Um die welleninduzierten Strömungs- und Spannungsänderungen in Sohle und Ufer eines typischen Schifffahrtskanals mit trapezförmigem Querschnitt

in ihrer zeitlichen und räumlichen Dimension zu erfassen, wurden aus der HN-Modellierung eines fahrenden Binnenschiffs das instationäre Druck- und Geschwindigkeitsfeld auf ein 3D geohydraulisches Modell des entsprechenden Kanals übertragen und die Auswirkungen der Schiffswellen auf die Kanalsohle und die schräge Uferböschung ausgewertet.



Nord-Ostsee-Kanal

Der Nord-Ostsee-Kanal durchquert auf seiner Länge von knapp 100 Kilometern das Land Schleswig-Holstein zwischen Brunsbüttel und Kiel-Holtenau. Damit erspart er die Fahrt um die Kimbrische Halbinsel (Jütland) durch Nordsee, Skagerrak und Kattegat. Infolge immer größerer und stärker motorisierter Fahrzeuge nimmt die Wellenbelastung von Gewässersohle und -ufer auf vielen Bundeswasserstraßen zu.

H. Montenegro, L. Dechant, D. Maier
Bundesanstalt für Wasserbau, Geotechnik, Karlsruhe

Untersuchungen zum Transportverhalten von Mikroplastik auf der Gewässersohle

J. Ding¹, F. Musche¹, Y. Adomat¹, T. Grischek¹

Stichworte: Mikroplastik, Transport, Gewässersohle, Elbe

1 Einführung

Mikroplastik (MP), definiert als polymere Partikel mit einer Größe < 5 mm (Arthur et al., 2009), gelangt hauptsächlich durch punktuelle Eintragsquellen in Flüsse und wird infolgedessen größtenteils ins Meer transportiert (Alimi et al., 2018). Schmidt et al. (2017) untersuchten die weltweite MP-Belastung in Flusseinzugsgebieten und kamen zu dem Schluss, dass 88-95 % der globalen Belastung aus den zehn Flüssen mit dem größten Einzugsgebiet in die Ozeane transportiert werden. In Anbetracht der weiten Verbreitung von MP ist es wichtig, die verschiedenen Eintragsquellen bzw. Anwendungen zu betrachten.

Der Eintrag von MP erfolgt aus vielfältigen Quellen. MP wird z. B. in Kosmetika, Reinigungsmitteln und Körperpflegeprodukten verwendet, sowie als Roh- und Ausgangsstoff in der Kunststoffproduktion und als Kunstharzpulver beim Druckluftstrahlen (Cole et al., 2011; Duis & Coors, 2016; Rochman, 2018). Nach dem Gebrauch im Haushalt oder in der Industrie gelangt MP häufig in das Abwasser und gelangt somit in kommunale und industrielle Abwasserkanäle (Browne, 2007; Van Emmerik & Schwarz, 2020). Infolge Mischwasserüberläufen bei Regenereignissen und unvollständiger Entfernung in der Abwasserbehandlung gelangen die Partikel in die Oberflächengewässer, wo sie aufgrund ihrer diversen Eigenschaften ein unterschiedliches Verhalten zeigen.

MP-Partikel werden im Gewässer vertikal und horizontal transportiert (Van Emmerik & Schwarz, 2020), in Abhängigkeit von ihrer Dichte und Partikelgröße (Isachenko & Chubarenko, 2022; Waldschlaeger, 2020). In Flusssohlsedimenten wurden sowohl MP-Partikel mit einer höheren Dichte, als auch Partikel mit einer geringeren Dichte als Wasser gefunden (Enders et al., 2019). MP-Partikel nehmen am Geschiebetransport auf der Flusssohle teil

(Chanson, 2004). Durch Wechselwirkung mit Oberflächen und Sedimentpartikeln und Zerfallsprozesse bilden sich kleinere MP-Fragmente, die auch als sekundäres Mikroplastik bezeichnet werden (Waldschläger et al., 2022).

Bei der Analyse von Elbesedimenten mit der an der HTWD optimierten Nachweismethode wurde MP insbesondere in strömungsarmen Bereichen gefunden (Kurzweg et al., 2022, 2024). Das Transportverhalten von MP wurde parallel dazu von der ESF Nachwuchsforschergruppe VEMIWA an der HTWD in zwei Fließrinnen unter kontrollierten Randbedingungen untersucht. Die Ergebnisse der Laborversuche zum MP-Transport wurden verglichen mit einer Simulation unter Nutzung von HEC-RAS.

2 Methodik

Das Transportverhalten von MP-Partikeln wurde in einer kleinen und einer großen Fließrinne untersucht. Die MP-Partikel, die sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, Größe und Dichte unterschieden, wurden entweder im Zulauf dosiert oder direkt auf der Gerinnesohle platziert (Tab. 1). Eine Herausforderung war die Probenahme aus verschiedenen Tiefen des Sohlsediments (Abb. 1). In der kleinen Fließrinne wurde mit Metallschalen gearbeitet, die nach dem Versuch aus dem Gerinne ausgebaut, eingefroren und mittels warmer Luft schichtweise aufgetaut und beprobt wurden. In der großen Fließrinne wurden fluoreszierende Partikel verwendet, um die Zählung zu erleichtern.

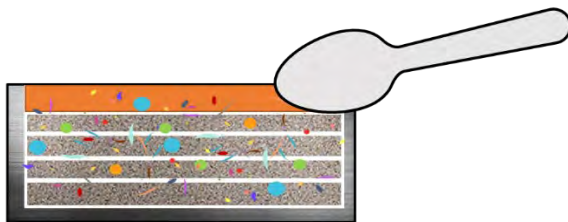


Abbildung 1: Schema der Probenahme aus aufgetautem Sediment (der orangefarbene Block kennzeichnet die 1 cm mächtige obere Sedimentschicht)

Es wurden Versuche mit vier Korngemischen ($d_{50} = 0,25; 1,4; 3$ und 6 mm) geringer Ungleichförmigkeit durchgeführt. Ziel war es zu analysieren, wie sich die Sedimentzusammensetzung, die MP-Eigenschaften Größe und

Dichte, sowie die Platzierung auf den Transport auswirken. 'Platzierung' bezieht sich auf die Methode des Einbringens von MP, entweder mit oder ohne Pumpenbetrieb, was für die Unterscheidung zwischen frisch emittierten MP-Partikeln und solchen, die in der Nähe von Mischwasserüberläufen abgelagert wurden, entscheidend ist.

Die Fließrinnen bestehen aus Zulauf, Gleichrichter, Rinne, Auslauf, Wasserbehältern, Pumpen, Ventilen und auf der Sohle eingesetzten, mit Sediment gefüllten Metallkästen (Abb. 2). Die kleine Fließrinne hat eine Länge von 1,7 m, die große Fließrinne eine Länge von 4,6 m. Es wurden 96 Versuche mit mittleren Fließgeschwindigkeiten von 0,01 bis 0,25 m/s durchgeführt. Die große Fließrinne wurde nach den einstündigen Versuchen jeweils über Nacht langsam entleert, das Sohlsediment in Segmente von 30 cm geteilt, entnommen und im Trockenschrank getrocknet. In der kleinen Fließrinne variierte die Versuchsdauer (15 bis 60 min). Hier wurden die Metallschalen mit dem Sediment entnommen. Für die Untersuchung des horizontalen Transports wurde das Sediment in Abschnitten von 10 cm Länge ausgebaut. Zur Untersuchung des vertikalen Transports wurde ein Gefrier-Auftau-Verfahren zur schichtweisen Analyse des Eintrags von MP in die Tiefe genutzt, gefolgt von einer Zählung der Partikel unter einer UV-Lampe.

Tabelle 1: Eigenschaften der in den Versuchen verwendeten MP-Partikel

Kurzbez.	Polymer	Größe mm	Dichte g/cm ³	Farbe	Fluores- zierend
POM	Polyoxy- methylen	3	1,41	weiß	ja
		2		gelb	nein
		1		weiß	ja
PA	Polyamid	2	1,15	beige	schwach
PE	Polyethylen	0,5 – 0,6	1,13	blau	ja
PP	Polypro- pylen	0,6 – 0,8	0,88	trans- par- ent	nein

Mit den an der großen Fließrinne erhaltenen Ergebnisse wurde versucht, den Partikeltransport mittels HEC-RAS mit dem Wilcock-Crowe-Geschiebetransportmodell, der Thomas-(Exner5)-Methode und der Rubey-Sinkgeschwindigkeitsberechnung zu simulieren. Die MP-Partikel wurden als Sedimentpartikel betrachtet und mit Kontrollvolumina und -massen modelliert. Der kritische Zustand der MP-Erosion wurde nach Waldschläger & Schüttrumpf (2019a) und Enders et al. (2019) berechnet.

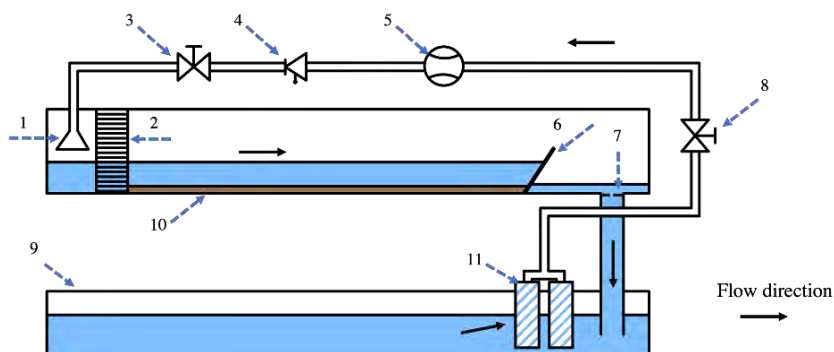


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Abmessungen der großen Fließrinne in der Vorderansicht: 1 - Zulauf, 2 - Gleichrichter, 3 & 8 - Ventil, 4 - Belüftungsventil, 5 - Durchflussmesser, 6 - rechteckiges Wehr, 7 - Metallgaze, 9 - Vorratsbehälter, 10 - eingebautes Sediment, 11 - Pumpen

3 Ergebnisse

In den Untersuchungen zum vertikalen Eintrag in das Sohlsediment wurde erwartungsgemäß festgestellt, dass die Häufigkeit des Nachweises von MP mit zunehmender Sedimenttiefe abnahm. MP-Partikel gleicher Größe drangen in Sand tiefer ein (ca. 50 %) als in Kies und erreichten Tiefen von bis zu 4 cm. Die Größe der MP beeinflusst die Infiltrationstiefe. So wurden beispielsweise 4 % der 1 mm großen POM-Partikel in tieferen Schichten des Sandes ($d_{50} = 0,25 \text{ mm}$) gefunden. Dies wird auf die Erosion, den Transport und die Ablagerung von Sand auch über den MP-Partikeln zurückgeführt (Riffelbildung).

Beim horizontalen Transport legten MP-Partikel mit höherer Dichte und Größe kürzere Strecken zurück und lagerten sich weiter vorn in der Fließrinne ab. MP-Partikel mit höherer Dichte zeigten unter gleichen Bedingungen (Größe und Sedimenttyp) eine geringere Mobilität als leichtere MP-Partikel. So wurden beispielsweise von den auf der Sohle platzierten MP-Partikeln 85 % der 2 mm großen POM-Partikel in den ersten 3 Segmenten (Länge jeweils 30 cm) in Fließrichtung nachgewiesen, während von den leichteren 2 mm großen PA-Partikeln nur 36 % in den ersten drei Segmenten in der großen Fließrinne wiedergefunden wurden. Nach der Waldschläger-Korrektur für die kritische MP-Schubspannung wird für dichtere MP-Partikel eine höhere Fließgeschwindigkeit benötigt, um erodiert zu werden, was darauf schließen lässt, dass sie sich eher in der Nähe der Eintragsquelle ansammeln. Dies ist relevant für die Auswahl von Probenahmestellen in Umweltmonitoring-Programmen. Der MP-Transport war stärker abhängig von der Dichte und nicht so stark abhängig von der Größe der Partikel.

Bemerkenswert ist, dass bei einer MP-Partikelgröße, die etwa der mittleren Sedimentkorngröße entspricht (z. B. 2 mm POM und Sediment mit $d_{50} = 1,4$ mm), die Tendenz dieser MP-Partikel, an der Eintragsquelle zu verbleiben, um 16 % höher war als bei den mit 3 mm größeren POM-Partikeln. Dies deutet darauf hin, dass Partikel nahe der mittleren Korngröße des Sohlmaterials eine geringe Mobilität aufweist. Allerdings beeinflussen auch die Verweilzeit in der Wasserphase und die Biofilmbildung das Absetzverhalten und den Bewegungsbeginn der MP-Partikel (Long et al., 2015).

Mit den den Autoren bekannten Konzepten zur Simulation des Sedimenttransports konnte der Transport von MP-Partikeln nicht nachvollzogen werden. Bei dem Ansatz nach Thomas-Wilcock für den Sedimenttransports in HEC-RAS sind MP-Partikel aufgrund ihrer geringen Masse und ihres geringen Anteils an der Sedimentfracht begrenzt. Im Experiment machten die 2 mm großen Kieskörner eine um 5 Größenordnungen höhere Masse an der Geschiebebewegung aus als die wenigen zugegebenen 2 mm großen PA-Partikel. Die Verwendung eines particle-tracking Moduls ist hier vermutlich erfolgversprechender.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Größere und schwerere MP-Partikel sind im Fließgewässer weniger mobil und können bei Gewässersedimentprobenahmen auf nahegelegene Eintragsquellen hindeuten. Probenahmen zur Erstbewertung der Belastung sollten vorzugsweise in Sedimentationsbereichen, Hafeneinfahrten und Bühnenfeldern erfolgen. Erste Ansätze zur Nutzung von Gleichungen zur Beschreibung des Geschiebetransports und deren Übertragbarkeit auf den MP-Partikeltransport waren nicht erfolgreich. Hier besteht Bedarf an Erfahrungsaustausch und weiteren Untersuchungen.

Basierend auf der noch geringen Datengrundlage wird die Belastung der Elbe durch MP im Vergleich zu anderen größeren Flüssen (Literaturangaben) als eher gering bewertet.

Die Autoren bedanken sich für die Finanzierung der ESF Nachwuchsforschergruppen VEMIWA 2020-2022 (FKZ 100382142) und SEMUWA 2023-2024 (FKZ 100649438) durch den ESF und den Freistaat Sachsen.

5 Literatur

- Alimi, O.S. et al. (2018): Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport. *Environmental Science & Technology*, 52(4), 1704–1724. doi:10.1021/acs.est.7b05559
- Arthur, C., Baker, J., Bamford, H. (2009): Proc. Int. Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris. NOS-OR&R-30. National Oceanic and Atmospheric Administration. https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/TM_NOS-ORR_30.pdf
- Browne, M.A. (2007): Environmental and biological consequences of microplastic within marine habitats. PhD thesis, University of Plymouth. doi:10.24382/3851
- Chanson, H. (2004): *Hydraulics of Open Channel Flow*. 2nd ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 3–8. doi:10.1016/B978-075065978-9/50006-4
- Cole, M. et al. (2011): Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.09.025
- Duis, K., Coors, A. (2016): Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products),

- fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 2. doi:10.1186/s12302-015-0069-y
- Enders, K. et al. (2019): Tracing microplastics in aquatic environments based on sediment analogies. *Scientific Reports*, 9(1), 15207. doi:10.1038/s41598-019-50508-2
- Isachenko, I., Chubarenko, I. (2022): Transport and accumulation of plastic particles on the varying sediment bed cover: Open-channel flow experiment. *Marine Pollution Bulletin*, 183, 114079. doi:10.1016/j.marpolbul.2022.114079
- Kurzweg, L. et al. (2022): Application of electrostatic separation and differential scanning calorimetry for microplastic analysis in river sediments. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1032005. doi:10.3389/fenvs.2022.1032005
- Kurzweg, L. et al. (2024): Microplastic Analysis in Sediments of the Elbe River by Electrostatic Separation and Differential Scanning Calorimetry. SSRN. doi:10.2139/ssrn.4700937
- Long, M. et al. (2015): Interactions between microplastics and phytoplankton aggregates: Impact on their respective fates. *Marine Chemistry*, 175, 39–46. doi:10.1016/j.marchem.2015.04.003
- Rochman, C.M. (2018): Microplastics research—from sink to source. *Science*, 360(6384), 28–29. doi:10.1126/science.aar7734
- Schmidt, C., Krauth, T., Wagner, S. (2017): Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environmental Science & Technology*, 51(21), 12246–12253. doi:10.1021/acs.est.7b02368
- Van Emmerik, T., Schwarz, A. (2020): Plastic debris in rivers. *WIREs Water*, 7(1), e1398. doi:10.1002/wat2.1398
- Waldschlaeger, K. (2020): Transport Processes of Microplastic Particles in the Fluvial Environment - Erosion, Transport and Deposition. Dissertation, RWTH Aachen. doi:10.18154/RWTH-2020-12172
- Waldschläger, K. et al. (2022): Learning from natural sediments to tackle microplastics challenges: A multidisciplinary perspective. *Earth-Science Reviews*, 228, 104021. doi:10.1016/j.earscirev.2022.104021.
- Waldschläger, K., Schüttrumpf, H. (2019a): Effects of Particle Properties on the Settling and Rise Velocities of Microplastics in Freshwater under Laboratory Conditions. *Environ. Sci. Technol.*, 53(4), 1958–1966. doi:10.1021/acs.est.8b06794.
- Waldschläger, K., Schüttrumpf, H. (2019b): Erosion Behavior of Different Microplastic Particles in Comparison to Natural Sediments. *Environ. Sci. Technol.*, 53(22), 13219–13227. doi:10.1021/acs.est.9b05394.

Autoren:

M. Eng, Jiaying Ding

Dipl.-Ing. (FH) Fabian Musche

M. Sc. Yasmin Adomat

Prof. Dr.-Ing. Thomas Grischek

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

Friedrich-List-Platz 1

01069 Dresden

Tel.: +49 351 4622687

E-Mail: jjaxing.ding@htw-dresden.de

fabian.musche@htw-dresden.de

yasmin.adomat@htw-dresden.de

thomas.grischek@htw-dresden.de

Totholz in der Fließgewässerrevitalisierung: Experimentelle Analyse wirkender Strömungskräfte auf horizontale Zylinder

J. P. Balmes

Einführung

Totholz ist eins der Schlüsselemente in unseren Bächen und Flüssen und wird zunehmend als Maßnahme für ökologische Revitalisierungsprojekte eingesetzt. Es existieren jedoch derzeit keine gültigen Stabilitätsnachweise. Um Wissenslücken bei der Berechnung der wirkenden Kräfte zu schließen, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Strömungskraft in Richtung der Fließrichtung auf einzelne Holzstrukturen. Zur Vereinfachung wurden diese meist stammähnlichen Strukturen durch runde Zylinder ersetzt. Zu berücksichtigende Parameter sind die relative Größe des Zylinders zur Fließquerschnittsfläche, das Verhältnis von Länge zu Durchmesser, die Form und Ausrichtung des Zylinders, die Strömungsgeschwindigkeit und die hydraulischen Bedingungen.

Methoden

Untersuchungen wurden in einer Acrylglasrinne mit einer rauen Sohle durchgeführt, um ein vollständig turbulentes Geschwindigkeitsprofil im Untersuchungsbereich sicherzustellen. Glatte PVC-Zylinder mit festem Durchmesser und Längen zwischen 20 und 60% der Gerinnebreite wurden mit Rotationswinkeln zwischen 0 und 90 Grad zur Strömung installiert. Verschiedene unterkritische und überkritische Bedingungen mit unterschiedlichen Fließtiefen und Strömungsgeschwindigkeiten wurden untersucht. Die Reynolds-Zahlen reichten von 4×10^4 bis zu 2.6×10^5 .

Für den experimentellen Aufbau wurde eine dynamische Wägezelle verwendet, um die Strömungskräfte in Fließrichtung zu messen. Hochpräzise Ultraschallsensoren waren an einer fahrbaren Traverse angebracht, um die Fließtiefe entlang des Gerinnes zu messen. Zusätzliche 3D-Strömungsgeschwindigkeitsmessungen wurden mit einem akustischem Doppler Velocimeter durchgeführt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen wurden verwendet, um verschiedene Methoden zur Berechnung der Strömungskraft miteinander zu vergleichen. Für die unter-

kritischen Fälle wurde die allgemeine Gleichung für die Strömungskraft verwendet. Das Ergebnis ist der hydrodynamische Druck, der auf die Zylinder wirkt. Der Verbaugrad und die Rotation der Zylinder wurden hierbei berücksichtigt. Für die überkritischen Fälle wurde die Gleichung um Terme für die hydrostatische Druckkomponente ergänzt. Zum Vergleich wurde die Impulsbilanzgleichung verwendet, die keinen empirischen Strömungswiderstandskoeffizienten erfordert.

Fazit

Neben einer Empfehlung für die Auswahl der geeignetsten Gleichungen zeigt der Vergleich der verschiedenen Ansätze die Anwendungsgrenzen für die untersuchten Fälle auf.

Autor(en):

J. P. Balmes

Universität Duisburg-Essen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Untersuchung ökologischer Effekte von unterströmten Totholzstrukturen

Martin Weber
Kevin Rieger
Johannes H. Uhl
Nicole Saenger

Stichworte: Totholz, Strömungsdiversität, Fließgewässer-
renaturierung, Morphodynamik

1 Hintergrund

Durch bauliche Veränderungen haben viele Gewässer ihre natürliche Form verloren. Meistens sind die gewässerumgebenden Flächen bis ans Ufer bebaut oder unterliegen einer anderen Flächennutzung, weshalb diese nicht als Entwicklungsraum für in der Regel flächenfordernde Renaturierungen zur Verfügung stehen. Dennoch legte die Europäische Wasserrahmenrichtlinie fest, dass Oberflächengewässer mindestens in einen guten ökologischen Zustand zu versetzen sind. Für die Bewertung von Fließgewässern ist die Gewässerstruktur von Relevanz. Die Gewässerstruktur kleiner bis mittelgroßer Fließgewässer lässt sich gemäß der Gewässerstrukturgütekartierung der *LAWA (2000)* quantitativ einordnen. Insbesondere Gewässer im urbanen oder stark landwirtschaftlich geprägten Raum oder auch Fließgewässer mit direkt angeordnetem Hochwasserschutz können diese Forderung nicht erreichen. Gewässer dieser Art haben oft nachfolgend genannte Charakteristika, welche sich negativ auf die Gewässerstruktur auswirken. Oft steht wenig bis kein Platz in der Fläche zur Verfügung, weshalb die Möglichkeit der Laufentwicklung eingeschränkt ist. Die Laufkrümmung ist daher gestreckt bis geradlinig. Längsbänke, Krümmungserosionen oder Laufstrukturen sind nicht vorhanden. Auch haben diese Gewässer im Hinblick auf das Längsprofil nur geringe bis keine Strömungsdiversität und Tiefenvarianz. Darüber hinaus besitzen sie wenig bis keine Querbänke. Zumeist sind deren Querprofile als Trapez- oder Kastenprofile ausgebildet und die Ufer bautechnisch gesichert, weshalb

sich keine Breitenvarianz ausbilden kann. Besondere ökologisch hochwertige Uferstrukturen sind in der Regel nicht vorhanden. Durch monotone Strömungsprofile bildet sich in den meisten Fällen eine einheitliche Sohlenstruktur aus.

Die hier vorgestellten Untersuchungen beruhen auf Aspekten der Handlungsempfehlung zur Bewertung der Gewässerstrukturgüte der LAWA. Ziel soll es sein, mit geringem bautechnischem Aufwand möglichst viele Parameter der Strukturgüte von kleinen bis mittelgroßen Fließgewässern im urban geprägten Raum mit Methoden angelehnt an das Instream River Training (IRT) zu verbessern. Es werden hydromorphologische Veränderungen der Gewässersohle aufgrund von eingebrachten Totholzelementen mit einem gegenständlichen Modell mit beweglicher Sohle hinsichtlich der zwei sohlbezogenen Hauptparameter Längsprofil und Sohlenstruktur, sowie dem uferbezogenen Hauptparameter des Querprofils untersucht (LAWA, 2000, S. 15). Es wird eine Totholzanordnung (horizontal und vertikal zusammengesetzt) getestet. In dieser Analyse werden insbesondere die Auswirkungen auf das Erosions- und Sedimentationsverhalten, das Entmischungsverhalten des Sedimentgemisches und die Strömung untersucht, da diese Punkte die Gewässerstruktur erheblich beeinflussen.

2 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Analyse der hydromorphologischen Veränderungen wurde ein Versuchsaufbau mit einer Länge von 15 m und einer Sohlenbreite von 1 m entwickelt. Der Querschnitt des Gewässers ist dabei trapezförmig (Böschungsneigung 1:1.15) gestaltet. Der konstante Durchfluss von 25 l/s in Kombination mit dem Totholzelement bestehend aus einem horizontalen und vertikalen Kunststoffrohr mit einem Durchmesser von 30 mm erzeugt eine Fließtiefe von 84,4 mm im Oberwasser und 71,8 mm im Unterwasser (jeweils 1 m vor und hinter der Rohrachse). Jedoch wird das horizontale Rohr nur unterströmt und nicht überströmt. Dieser Betriebspunkt soll eine Niedrigwassersituation abbilden. Der untere Rohrscheitel des horizontalen Rohrs ist 65 mm von der Sohloberfläche entfernt. Das vertikale Rohr ist mittig im Gerinnequerschnitt angeordnet und am horizontalen Rohr bündig befestigt. Das untere Ende des vertikalen Rohrs steht auf der Sohle der Versuchsrinne auf und wird rundum vom Versuchssediment bedeckt. Die Mächtigkeit des Versuchssediments beträgt 12 cm. Die nachfolgende Abbildung zeigt den

Aufbau schematisch im Quer- und Längsschnitt mit den relevanten Größen. Im Querschnitt erfolgt die Bemaßung nur bis zur Symmetrieachse (vertikales Rohr).

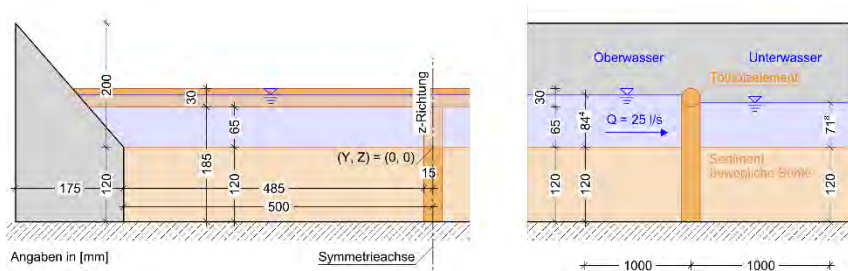


Abbildung 1: Quer- und Längsschnitt des Versuchsaufbaus

Die für den Ähnlichkeitsnachweis eines natürlichen Sediments herangezogenen Kenngrößen Mittlerer Durchmesser (d_m) = 1,04 mm, Ungleichförmigkeitszahl C_u = 3,39 und Krümmungszahl C_c = 0,96 werden innerhalb der jeweiligen Gültigkeitsbereiche eingehalten (Zanke, 2002, S. 176). Mit einem Plattenschieber und einem MID wird der Durchfluss des Versuchs eingeregelt. Die Fließtiefen werden durch Anmessen der Sohloberfläche und des Wasserspiegels mit einem Stechpegel mit Nonius ermittelt. Die Fließgeschwindigkeiten werden an ausgewählten Stellen (vgl. Abbildung 2) mit einem Messflügel gemessen.

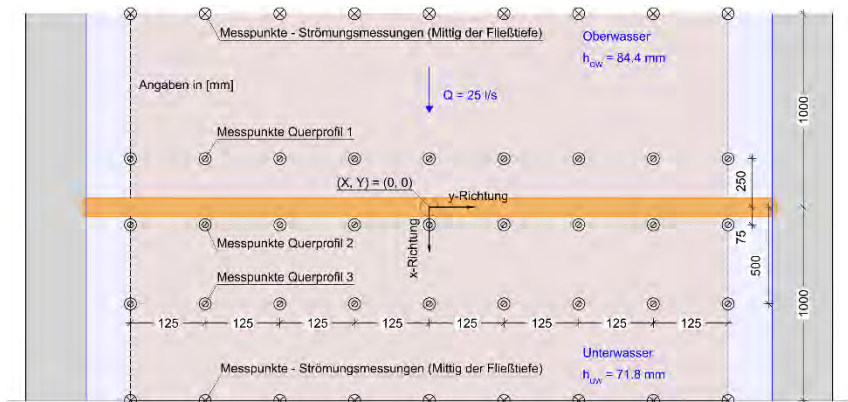


Abbildung 2: Messpunkte bezogen auf die Achse des horizontalen Rohrs

Die Hydromorphologie des Gewässerbetts wird mit einem 3D-Laserscanner erfasst. Um Entmischungen des Sohlsubstrats quantitativ festzustellen, wird die Oberfläche der Sohle fotografisch aufgenommen und die Geometrie der Oberfläche wie auch ein Orthomosaik mittels photogrammetrischer Methoden erstellt. Durch einen geringen Abstand von 3D-Laserscanner und Kamerasystem zur Sohloberfläche können hohe Auflösungen (jeweils $\sim 0,25$ mm) der Sohle erreicht und als digitales Raster-Höhenmodell (DEM) exportiert werden. In einem nächsten Schritt wird das DEM mittels Computer Vision analysiert, um differenziert Kornfraktionen auf der Oberfläche zu detektieren und ggf. in Bereiche zu unterteilen.

Vor einem Versuch wird das Sedimentgemisch mittels Schaufel und Rechen durchmischt, neu eingeebnet und anschließend mit dem 3D-Laserscanner vermessen. Das aus den Scandaten gewonnene äquidistante Raster-DEM dient zum einen als Kontrolle, ob ausreichend genau gearbeitet wurde und zum anderen als Nullzustand (Zustand vor einem Versuch), der im weiteren Verlauf vom Nachherzustand (Raster-DEM der Sedimentoberfläche nach einem Versuch) des Versuchs abgezogen wird, um den sogenannten Differenzplot zu erstellen.

Für die vorgestellten Untersuchungen wurde der physikalische Versuch mit einer Versuchsdauer von 8 h durchgeführt. Um den gewünschten Durchfluss von $Q = 25$ l/s einzustellen, wurde der Durchfluss stufenweise erhöht. Somit werden Erosionseffekte aufgrund unerwünschter hydraulischer Bedingungen vermieden. Anschließend beginnt die offizielle Versuchsdauer. Gegen Ende des Versuches sind die Strömungsmessungen mit dem Messflügel durchgeführt worden, um die Auswirkungen der veränderten Sohloberfläche bei der Strömungsanalyse zu berücksichtigen. Nach dem Versuch wird der Nachherzustand mit dem 3D-Laserscanner eingemessen wie auch die fotografischen Aufnahmen für die Photogrammetrie durchgeführt. Für Letzteres müssen vorab Passpunkte sinnvoll im Untersuchungsbereich verteilt und tachymetrisch vermessen werden. Die Aufbereitung der Laserscan-Punktwolke, die photogrammetrische Auswertung, die Weiterverarbeitung zu einem Raster-DEM wie auch deren Auswertung erfolgt mittels entsprechender Software.

3 Ergebnisse

Um Erosions- und Sedimentationserscheinungen grafisch darstellen zu können, wird das Raster-DEM des Nullzustands von dem des Nachherzustands subtrahiert und ein Differenzplot erstellt. Bereiche mit Erosion haben negative Werte und sind nachfolgend blau dargestellt, Bereiche mit Sedimentation besitzen positive Werte und eine rote Darstellung.

Abbildung 3 zeigt den Differenzplot mit Fließrichtung von links nach rechts. Dargestellt sind die Bereiche der Sohle über die gesamte Breite von 1 m (y-Achse). In x-Richtung ist ein Ausschnitt von 0,2 m vor bis 1,0 m nach dem Totholzelement abgebildet. Der Koordinatenursprung liegt in der Mitte des vertikalen Stamms.

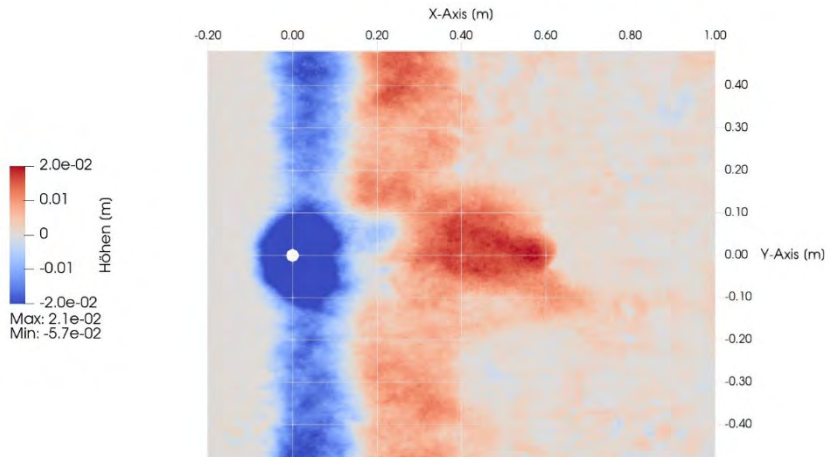


Abbildung 3: Differenzplot als Ergebnis der Subtraktion beider DEM

Um den vertikalen Stamm ist ein stark ausgeprägter Kolk erkennbar. Weiter verläuft direkt stromab des horizontalen Totholzelements ein linienförmiger Kolk, senkrecht zur Fließrichtung über die komplette Sohlbreite. Dieser erstreckt sich in x-Richtung von 0,00 m bis 0,15 m. Unmittelbar stromab (x-Richtung von 0,15 m bis 0,40 m) erstreckt sich eine Furt, die ebenfalls senkrecht zur Fließrichtung in der vollständigen Sohlbreite ausgebildet ist. Unterbrochen wird diese Furt mittig im Strömungsschatten des vertikalen Tot-

holzelements durch einen Kolkausläufer bis ca. $x = 0,25$ m. Dahinter entwickelte sich jedoch eine stark ausgeprägte Furt bis $x = 0,60$ m mit einer Breite von ca. $0,15$ m.

Um die Entmischung des natürlichen Sedimentgemisches an der Sohloberfläche detektieren zu können, werden die aus der photogrammetrischen Auswertung gewonnenen Daten verwendet. Durch die hohe Auflösung der beiden Datensätze können einzelne Körner über das DEM bzw. das Orthomosaik abgetastet und mittels „Blob Detection“ ausgewertet und verglichen werden. Die Blob Detection ist eine Technik der Bildverarbeitung und Computer Vision, die Regionen in einem Bild (oder DEM) identifiziert, die sich von ihrer Umgebung durch ihre Helligkeit oder Farbe unterscheiden. Im Rahmen der dieser Untersuchung ist ein erster Test an einem kleinen Teilausschnitt des Untersuchungsfeldes durchgeführt worden, um den möglichen Einsatz dieser Methodik zu beurteilen.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der jeweiligen Zwischenschritte wobei die obere Zeile die Auswertung des Orthomosaiks und die untere Zeile die des DEM zeigt. Die letzte Spalte stellt jeweils die detektierten Sedimente dar. Im Vergleich der beiden Plots zeigen sich deutlich unterschiedliche Ergebnisse. Dies kann nach aktuellem Kenntnisstand an unterschiedlichen Faktoren liegen, die noch weiter untersucht werden müssen.

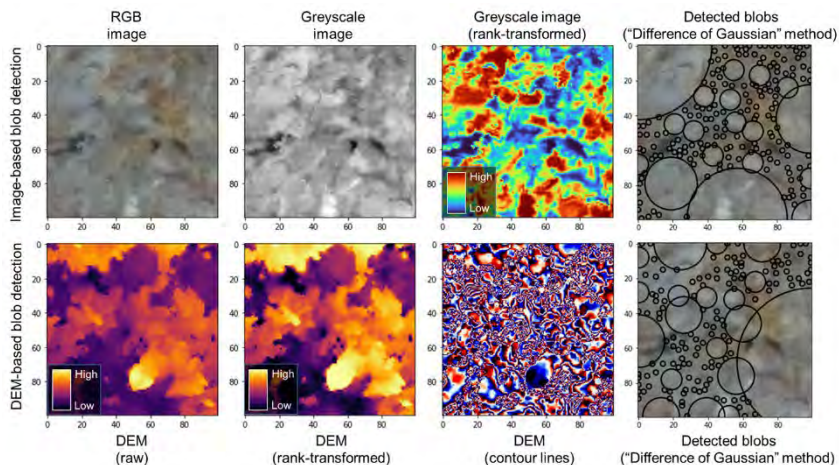


Abbildung 4: Exemplarische Ergebnisse der Datenverarbeitung und Blob Detection basierend auf Bilddaten (obere Reihe) und dem DEM (untere Reihe)

Bei der Untersuchung der Auswirkungen des Tothholzelements auf die Strömung wurden die Fließgeschwindigkeiten in x-Richtung für drei ausgewählte Querprofilen gemessen (siehe Abbildung 5). Im Oberwasser ist ein Querprofil vor dem direkten turbulenten Bereich angeordnet ($x = -0,25$ m; Querprofil 1). Ein weiteres Querprofil zeigt die Fließgeschwindigkeiten im Bereich des linienförmigen Kolkes hinter dem horizontalen Stamm ($x = 0,075$ m; Querprofil 2). Das Querprofil in der Ebene $x = 0,5$ m (Querprofil 3) liegt im Bereich der höchsten Stelle der Furt. In jedem Querprofil sind in y-Richtung neun Messlotrechten mit einem Versatz von je 12,5 cm gewählt. In z-Richtung wurden Messungen an jeweils 4 Messpunkten durchgeführt. Je ein Messpunkt direkt über der Sohle und unter dem Wasserspiegel, die anderen beiden Messpunkte sind jeweils gleichmäßig dazwischen angeordnet. Zur besseren Übersicht sind in Abbildung 5 die Geschwindigkeitsvektoren auf eine Länge normiert. Die farbliche Skalierung visualisiert die Fließgeschwindigkeiten in x-Richtung in m/s. Hohe Fließgeschwindigkeiten sind in Rot, niedrige Fließgeschwindigkeiten in Blau dargestellt.

Die Strömungsgeschwindigkeiten zeigen, dass sich diese in den drei Strömungsprofilen jeweils unterscheiden. Das Strömungsprofil im Oberwasser weist geringere Fließgeschwindigkeiten als die beiden anderen Querprofile auf. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des linienförmigen Kolkes sind deutlich höher. Jedoch treten an der Wasserspiegeloberfläche direkt hinter dem Stamm geringe Fließgeschwindigkeiten auf. Die Fließgeschwindigkeiten in der Ebene bei $x = 0,5$ m sind niedriger als im Bereich des Kolkes, aber immer noch höher als im Oberwasser der Tothholzanordnung.

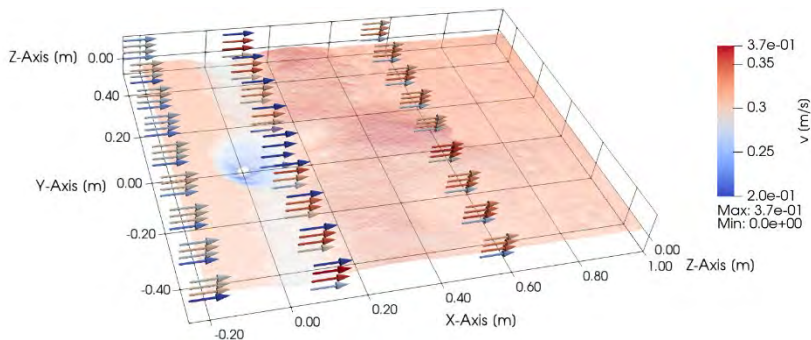


Abbildung 5: Gemessene Fließgeschwindigkeiten der ausgewählten Querprofile

Neben den Strömungsgeschwindigkeiten in Fließrichtung, sind auch die Strömungsgeschwindigkeiten im Querprofil hinsichtlich der Gewässerstruktur wichtig. So zeigt Querprofil 1 ein sehr homogenes Geschwindigkeitsfeld auf. In z-Richtung sind für kastenförmige Gerinne typische Geschwindigkeitsverteilungen vorhanden.

In Querprofil 2 herrschen insbesondere hohe Fließgeschwindigkeiten dort vor, wo das Totholzelement den Strömungsquerschnitt nicht versperrt. Die Fließgeschwindigkeiten, welche unmittelbar hinter dem Totholzelement gemessen wurden, sind hingegen niedriger. Abbildung 5 zeigt, dass das Querprofil 2 eine deutlich größere Strömungsdiversität besitzt als Querprofil 1. In Querprofil 3 homogenisiert sich die Strömungsverteilung bereits transversal, wird aber immer noch durch das Totholzelement beeinflusst. Es treten stellenweise noch erhöhte Fließgeschwindigkeiten auf.

4 Fazit und Ausblick

Trotz begrenzter Versuche zeigen sohlennahe Totholzelemente positive Auswirkungen auf Gewässerstrukturen und Strömungsverhältnisse in urbanen Fließgewässern. Sie schaffen Kolke und Furtbereiche, verbessern die Tiefenvarianz und fördern die Substratdiversität für aquatische Lebensräume. Diese Elemente erhöhen die lokale Strukturgüte und die Strömungsdiversität im Vergleich zu klassischen Trapezgerinnen. Weiter wurde gezeigt, dass die Blob Detection grundsätzlich für eine granulometrische Analyse geeignet ist. Es bedarf jedoch noch weiterer Untersuchungen.

Zukünftige Pläne umfassen eine tiefere CFD-Analyse der Strömungssituation unter Verwendung von am Modell gemessenen Fließgeschwindigkeiten zur Kalibrierung. Weiter werden umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich einer zusätzlichen Überströmung des horizontalen Rohrs durchgeführt, um eine Aussage hinsichtlich Mittelwasser- und Hochwassersituationen treffen zu können.

5 Literatur

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2000):
Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik

Deutschland - Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer.
Kulturbuch-Verlag, Berlin
Zanke, Ulrich C. E. (2002): Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer. Für
Bauingenieure, Umwelt- und Geowissenschaftler. Vieweg+Teubner
Verlag, Wiesbaden 2000

Autoren:

Martin Weber, M.Eng.
Kevin Rieger, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Nicole Saenger

Johannes H. Uhl, Ph.D.

Joint Research Centre
European Commission

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen
Hochschule Darmstadt – University of Applied Sciences 21027 Ispra (VA), Italien
Schöfferstraße 3
64295 Darmstadt

Tel.: +49 6151 533-5000
E-Mail: martin.weber@h-da.de
kevin.rieger@h-da.de
nicole.saenger@h-da.de

Technische Hydromechanik

Technische Hydromechanik 1

Grundlagen

von Gerhard Bollrich
8., aktualisierte Auflage 2019.
448 S. A5. Gebunden.
62,00 EUR
ISBN 978-3-410-29169-5

Aus dem Inhalt:

- Physikalische Eigenschaften des Wassers
- Stationäre Strömung in Druckrohrleitungen
- Stationäres Fließen in offenen Gerinnen
- Instationäre Strömungen
- Ausfluss aus Gefäßen und unter Schützen; Retention
- Abfluss über Wehre und Überfälle

Technische Hydromechanik 2

Spezialfälle

Herausgeber: Detlef Aigner, Dirk Carstensen
2., vollständig überarbeitete Auflage 2015. ca. 384 S. A5. Gebunden.
ca. 59,00 EUR
ISBN 978-3-410-22209-5

Aus dem Inhalt:

- Plötzlich veränderliche Strömungen in offenen Gerinnen
- Theorie der Wellenbewegung
- Dichteströmungen
- Geschiebe
- Flüssigkeitsstrahlen
- Druckrohrnetzrechnungen
- Feststofftransport
- Eis im Wasserbau

Technische Hydromechanik 3

Aufgabensammlung

von Helmut Martin, Reinhard Pohl
4., überarbeitete und erweiterte Auflage 2014.
260 S. A5. Gebunden.
28,00 EUR
ISBN 978-3-410-24130-0

Aus dem Inhalt:

- über 80 Aufgaben und Lösungen
- hydraulische Modellbildung
- Anwendung von Berechnungsalgorithmen
- analytische und grafische Lösungsverfahren

Technische Hydromechanik 4

Numerische und hydraulische Modelle

Herausgeber: Helmut Martin, Reinhard Pohl
3., überarbeitete Auflage 2015.
406 S. A5. Gebunden.
74,00 EUR
ISBN 978-3-410-24172-0

Aus dem Inhalt:

- Hydraulisches Versuchswesen
- Gerinneströmung
- Hydraulik der Wasserbehandlungsanlagen
- Hydraulische Probleme an ausgewählten Betriebseinrichtungen



Mehr Infos und Bestellung:

beuth.de/go/hydraulik

E-MAIL kundenservice@beuth.de

TELEFON +49 30 58885700-70

Bauwerksanpassungen in der Erosionsstrecke der Elbe aus hydraulischer, ökologischer und morphologischer Sicht am Beispiel der Pilotmaßnahme Klöden

Elke Kühne

Stichworte: Flussbau, Buhnen, Erosion, Elbe

1 Veranlassung

Das Stromregelungssystem eines Flusses bedarf der regelmäßigen Überprüfung und Anpassung an die sich ändernden Bedingungen, sei es aus hydrologisch-morphologischer oder auch gesellschaftlicher Sicht. So erfolgen an der Deutschen Binnenelbe regelmäßig Messungen zur Bestimmung von Wasserspiegel, Flusssohle, Durchfluss und Geschiebe. Ebenfalls werden regelmäßig Erfassungen von Makrozoobenthos und Fischen durchgeführt. Der Großteil dieser Untersuchungen erfolgt auf Veranlassung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, die für die Elbe als Bundeswasserstraße zuständig ist.

Speziell an der Mittel-elbe zwischen der Ortschaft Mühlberg und der Saalemündung, wo sich das Gewässerbett der Elbe über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren um durchschnittlich einen Meter eingetieft hat, ist zunehmend eine Gefährdung für die Standsicherheit und somit für die Funktionsfähigkeit des Stromregelungssystems zu verzeichnen. Auch wirkt sich die großräumige und langfristige Erosion nachteilig auf den ufernahen Grundwasserhaushalt und die Flussauen aus.

Grundlage für jegliche Änderung oder Anpassung eines Regelungssystems ist die Erfassung des Ist-Zustandes. Dieser dient zum einen als Vergleich zum früheren Planungsziel und zeigt mögliche Erfolge oder auch Defizite auf. Gleichzeitig werden die Erfassungen als Grundlage für künftige Planungen

Dieser Abschnitt ist durch eine starke Sohlerosion gekennzeichnet, die negative Auswirkungen auf die Nutzung der Elbe als Wasserstraße wie auch auf den Naturraum Elbe hat. Zur Erosionsstrecke der Elbe, den wasserbaulichen Herausforderungen und Lösungswegen sowie zur Pilotmaßnahme Klöden wurde bereits mehrfach zum Dresdner Wasserbaukolloquium - letztmalig 2019 - vorgetragen (Kühne, E.; 2019).

Zur Veranschaulichung der Problematik sei hier auf die Abbildung 2 verwiesen, die noch einmal einen Eindruck von der vorhandenen Eintiefungsrate im Bereich der oberen Mittelelbe geben soll.

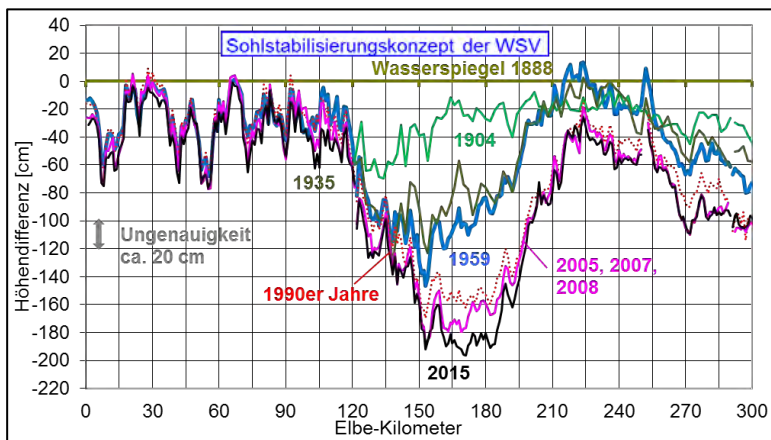


Abbildung 2: Längsschnitt der Wasserspiegellagenentwicklung der Elbe über den Gesamtvergleichszeitraum 1888/2015 (normierte Wasserspiegel bei MNQ) (BMVI, 2017)

Der Streckenabschnitt unterliegt schon seit mehreren Jahrhunderten menschlichen Eingriffen mit unterschiedlichen Zielen wie dem Hochwasserschutz, dem Uferschutz für Landwirtschaft und allgemeinen Eigentum oder der Schifffahrt.

Der hier betrachtete strombauliche Ausbauzustand lässt sich wie folgt zusammenfassen und umfasst:

- 189 Buhnen, davon 98 Buhnen linkes Ufer, 91 Buhnen rechtes Ufer,
- 7.830 m Deckwerke, davon 3.900 m linkes Ufer und 3.930 m rechtes Ufer,

- 550 m Parallelwerke linkes Ufer,
- 12 Grundswellen zwischen El-km 189,1 und El-km 190,2 (Klöden Bogen).

Ziele der jetzigen Maßnahmenplanung sind:

- die Reduzierung der Strömungsbelastung auf die Sohle,
- die Vergleichmäßigung der hydraulischen Verhältnisse durch Beseitigung lokaler Engstellen,
- die Stabilisierung der Fahrrinnenverhältnisse und Vergleichmäßigung des Geschiebetransportes,
- die Wiederherstellung der hydraulischen Wirksamkeit der Buhnen durch Beräumung der Buhnenfelder,
- die bessere Vernetzung von Fluss und Aue durch hydromorphologische Anpassung der Bauwerke,
- der Erhaltung und die Entwicklung naturnaher Ufer- und Gewässerstrukturen,
- die langfristige Wiederherstellung und Förderung eigendynamischer Prozesse,
- die Förderung fluss- und auetypischer Lebensräume, insbesondere FFH-Lebensraumtypen.

3 Durchgeführte Erfassungen und Messungen

3.1 Allgemeines

Für die Maßnahmenfindung sind zahlreiche Erfassungen von biotischen und abiotischen Parametern erforderlich. So dient die Erfassung der biotischen Parameter wie Bestandserfassungen von Biotoptypen, Fischen, Laufkäfern oder dem Makrozoobenthos zur Beweissicherung und Erfolgskontrolle der Maßnahmenumsetzung und bildet die Grundlage für die maßnahmengbegleitende Umweltfachplanung. Hier gibt es bewährte Erfassungsmethoden, auf die hier im speziellen nicht eingegangen wird. So war es eine Besonderheit neben der Durchführung der Befischung des Projektgebietes eine erstmalige Erfassung der Fischfauna in Flusskolken der Elbe durchzuführen, die hier vorgestellt wird.

Standardmäßig wird die geplante Ausführungsvariante anhand einer hydro-numerische Modellierung hinsichtlich ihrer möglichen Wirkung bewertet

und erforderlichenfalls optimiert. Als eine Grundlage dafür dient ein digitales Geländemodell, welches hier aus Daten einer Laserscan-Befliegung und der Gewässervermessung erzeugt wurde. Dabei wurde 2015 erstmals eine neue Messmethode mittels bALS-Befliegung (grüner Laser) genutzt. Damit wurden speziell die Flachwasserbereiche wie Bühnenfelder genau erfasst.

Für die Modellierung mussten ebenfalls die Wasserstands-, Durchfluss- und Strömungsverhältnisse im Streckenabschnitt erfasst und der Geschiebetransport ermittelt werden.

Besonderheiten zu diesen Messungen und deren Ergebnisse werden ebenfalls im Folgenden dargestellt.

3.2 Kolkmonitoring

Vor allem in großen Gewässern können Kolke Schlüsselhabitate bzw. -strukturen für Fische darstellen. Insbesondere für die Bundeswasserstraßen liegen bisher kaum gesicherte Informationen zur fischökologischen Bedeutung von Kolken vor. Einschätzungen zu den Auswirkungen relevanter Vorhaben wie in der Erosionsstrecke mit Sohlsicherungsmaßnahmen auf Fische sind bisher stets spekulativer Natur. Die Untersuchungen wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren Juni 2019 bis September 2021 mittels mobilen Echolot und stationären Echolottonne durchgeführt (siehe Abbildungen 3 und 4).



Abbildung 3: Surveyboot mit installierter EK15-Harke und Kartenplotter mit Kartengrundlage der Elbe (Ausschnitt zeigt digitalen Umriss eines Bühnenkopfs) (LFV Hydroakustik GmbH; 2023)

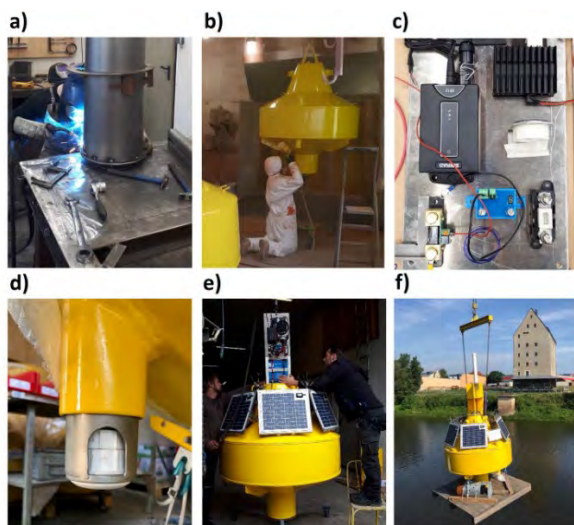


Abbildung 4: Details des Fertigungsprozesses der Boje: a) Schweißarbeiten am Bogenkörper b) Lackierung c) Platzierung der Steuerkomponenten d) Schwingermontagerohr e) Einkranen des fertigen „Technikeinschubs“ f) Verladung der Boje auf ein Schiff (LFV Hydroakustik GmbH; 2023)

Ziel der Untersuchung war es, die Rolle der Kolke als wichtige Habitatstruktur darzustellen, die Fischen Lebensraum und Rückzugsmöglichkeiten bieten, Unterschiede im Fischeaufkommen bei Tag und bei Nacht zu bestimmen sowie den möglichen Einfluss des Kolk-Types auf das Lebensraumpotential darzustellen. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob es neben der tagesperiodischen Nutzung auch saisonale und wasserstandsabhängige Effekte gibt.

Im Ergebnis der durchgeführten Erfassungen lässt sich ableiten, dass die Art des Kolkes einen Einfluss auf die Lebensraumqualität hat, da insbesondere Bühnenkopfkolke und ein Sonderkolk mit unmittelbarer Nähe zum Auen-Nebengewässer als Habitate mit ökologischer Bedeutung für Fische identifiziert werden konnten. Es gibt deutliche Unterschiede in der Nutzung der Kolke zwischen Tag und Nacht. (LFV Hydroakustik GmbH; 2023).

Für zukünftige sohlstabilisierende Maßnahmen ist wesentlich, dass im Vergleich von Prallhang- zu Bühnenkopfkolken ein höheres Fischeaufkommen in den Bühnenkopfkolken dokumentiert wurde. Damit wurde ein Nachweis geführt, dass die erforderlichen Sohlsicherungen bei Berücksichtigung einiger

Gestaltungsgrundsätze keine erheblichen negativen Auswirkungen auf die Fischfauna und damit auf eine der biologischen Komponenten zur Einhaltung der WRRL haben.

3.3 Erstellung des digitalen Geländemodells (DGM)

Wie bereits im Kapitel 3.1 ausgeführt, wurde ein DGM des Gewässerabschnittes für die HN-Modellierung benötigt. Mittels einer bALS-Befliegung wurden 2015 das Vorland sowie weitere Teil des Gewässerbettes erfasst.

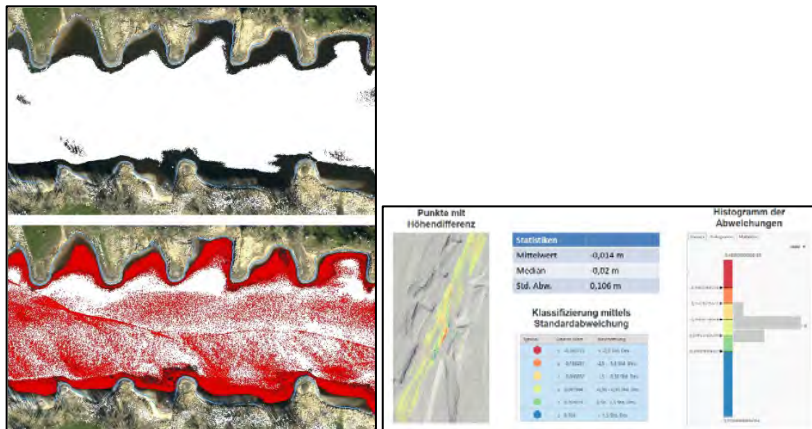


Abbildung 5: Detailansicht entlang der Elbe bALS-Geländepunkten der Online-Prozessierung eingefärbt (oben) und zusätzlich mit den offline-prozessierten Sohlpunkten rot (unten) AHM (2018); Vergleich Echolotpeilung mit Befliegungsdaten (rechts) (ARC GREENLAB, 2019)

Hier wurde erstmals eine nachträgliche Auswertung der Full Waveform der aufgezeichneten Messdaten (reflektierter Laserstrahl) durchgeführt. An Hand der Auswertung im Projektgebiet wird der Mehrwert durch die nachträgliche Offline-Prozessierung der FWF-Daten sehr deutlich (siehe dazu Abbildung 5). Eine Beschreibung der Erfassungsmethode einschließlich deren Auswertung findet sich auch in Steinbacher ff., 2021.

Die Laserdaten wurden im Anschluss mit einer Mehrfachschringer-Echolotpeilung des Gewässerbettes für die tieferen Bereiche der Elbe verschnitten und in den Überlappungsbereichen in Lage und Höhe auf Passgenauigkeit abgeglichen (Abbildung 5 – rechts).

3.4 Erfassung der Wasserstands-, Durchfluss- und Strömungsverhältnisse sowie des Geschiebetransportes

Neben den routinemäßig auszuführenden Wasserspiegelfixierungen und den dazugehörigen Durchflussmessungen ist es für die mehrdimensionale numerische Modellierung immer mehr von Interesse auch Geschwindigkeits- und Durchflussverteilungen über den gesamten Querschnitt zu erhalten. Dies spielt umso mehr eine Rolle bei der Ausbildung strukturierter Strombauwerke mit Senken, Rinnen, in geknickter oder gestaffelter Bauweise und damit der Initiierung von Seiten- und Nebenströmungen. Dazu müssen bereits umgesetzte Maßnahmen beobachtet und deren Veränderungen dokumentiert werden. Als Beispiel wurden im Bereich Gallin verschiedene Bühnenkerben und die Hinterströmung eines Parallelwerkes bei Mittelwasser mittels ADCP gemessen. Einen Eindruck des Gebietes und der Arbeiten gibt Abbildung 6.



Abbildung 6: Schrägaufnahme des Messgebietes bei Gallin und Messeinsatz am Parallelwerk (WSA Elbe 2023)

Diese Messungen dienen zur Kontrolle berechneter Durchflussanteile in HN-Modellen und können zur weiterer baulichen Anpassungen führen.

Als weiteres Beispiel für die Durchführung umfangreichen Naturmessungen an der Elbe und Anwendung neuer Messmethoden soll hier ein Versuch der Erfassung des Geschiebetransportes mittels Seismometer vorgestellt werden. Dieses Prinzip wurde und wird bereits an stark geschiebeführenden Flüssen eingesetzt. Die Herausforderung an der Elbe besteht im hier vorhandenen feinkörnigeren Geschiebematerials und den Umwelteinflüssen (Verkehr usw.). Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wurde die Messstelle durch Kollegen des GFZ Potsdam am Elbe – km 190,2 am rechten Ufer im Februar 2021 eingerichtet über 2 Jahre betrieben.



Abbildung 7: Einrichtung der Messstation bei Klöden (Dietze, 2023)

Nach der Erfassungsphase erfolgt nun die Interpretation und Auswertung der Daten. In diesen Prozess müssen nun zahlreiche lokale Parameter wie Wassertiefen, Wasserspiegelgefälle und Querschnitt der Elbe oder auch Korngrößen von Sohle und Geschiebe sowie die Lage der Messstelle zur Elbe, um die markantesten Werte zu nennen, berücksichtigt werden. Bei der weiteren Plausibilisierung der Daten müssen Frequenzbereiche bestimmt und eliminiert werden, die durch menschliche und andere Umwelteinflüsse entstanden sind und nicht dem Sedimenttransport zuzuschreiben sind. Am Ende soll eine kontinuierliche Abschätzung der Geschiebefracht im Elbabschnitt bei Klöden möglich werden.

4 Modellierung und Planung

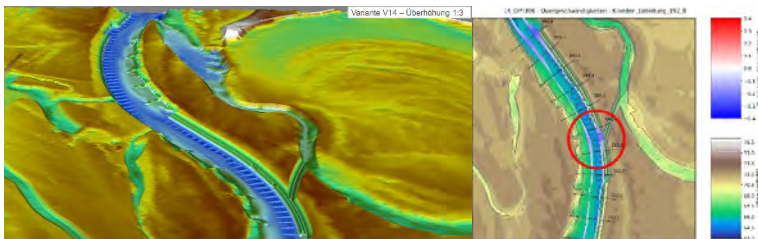


Abbildung 8: Modellausschnitt im Bereich Überleitung zum Klödner Riß (links) Darstellung von Querströmungen (rechts) (BAW 2024)

Die o.g. Untersuchungen und Messungen sind Grundlage für die Modellberechnung und Planung von strukturierten Buhnen, Parallelwerken sowie Überleitungen in Nebenrinnen. So werden zur Stabilisierung der niedrigen Wasserspiegellagen in tiefen Bereichen Sohlschwellen eingebaut. Alle Buhnen werden gekerbt oder in ihrer Ausrichtung so verändert, dass eine bessere Buhnenfelddurchströmung erfolgt. Uferdeckwerke werden zu Parallelwerken umgestaltet.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Grundlage für das Umsetzen von strukturverbessernden Maßnahmen an Bundeswasserstraßen sind heute mehr denn je umfangreiche Naturmessungen, die die Grundlage für die Lösung immer komplexer werdender Aufgabenstellungen bilden. Speziell an Bundeswasserstraßen müssen unterschiedliche Nutzungs- und Zielkonflikte miteinander in Übereinstimmung gebracht werden.

Besonderer Dank gilt den vielen Kolleginnen und Kollegen im WSA Elbe, bei BAW und BfG sowie den beauftragten Firmen, die durch ihren Einsatz und ihre Kreativität bei den Messeinsätzen einen wesentlichen Beitrag zur Planung der Pilotmaßnahme beigetragen haben.

6 Literatur

- AHM (2018): Aktualisierung des Digitalen Geländemodells des Elbewasserlaufes bei Klöden – 2013 (DGM-W Elbe/Klöden-2013) Abschlussbericht von Airborne HydroMapping GmbH, Auftraggeber WSA Dresden (unveröffentlicht), 2018.
- AHM (2018): Technischer Bericht: Full Waveform Analyse DGM-W Elbe/Klöden-2013, Auftraggeber WSA Dresden (unveröffentlicht), 2018.
- ARC-GREENLAB (2019): Pilotprojekt Klöden - Vergleich der DGMW-Erstellung, Echolot vs. Airborn Laserscanning (QS-Präsentation); Auftraggeber WSA Dresden (unveröffentlicht), 2019.
- BMVI (2017): Gesamtkonzept Elbe, Strategisches Konzept für die Entwicklung der deutschen Binnenelbe und ihrer Auen. Bonn: BMVI, BMUB, 2017.
- Dietze (2023): Seismisches Monitoring von Hydrodynamik und Sedimenttransport – Elbe bei Klöden; Präsentation im Rahmen der 40. Arbeitsgruppensitzung zur Umsetzung des Sohlstabilisierungskonzeptes an der Elbe, Dresden (unveröffentlicht), 2023.

Kühne,E. (2019): Umsetzung des Sohlstabilisierungskonzeptes der Elbe – die Pilotmaßnahme Klöden im Wandel der Zeit.Wasserbauliche Mitteilungen Heft 62, S 325 – 335, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, 2019.

LFV Hydroakustik GmbH (2023): Untersuchung zur fischökologischen Bedeutung von Kolken in der Elbe von El-km 180 bis 240 (Abschlussbericht). Auftraggeber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe (unveröffentlicht), 2023.

Steinbacher, Baran, Dobler, Aufleger (2021): Luftgestützte Topo-Bathymetrie als effizientes Dokumentations- und Monitoring-Werkzeug bei Hoch- und Niedrigwasser. Wasserbauliche Mitteilungen Heft 65, S. 197 – 204, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, 2021.

Autor:

Dipl.-Ing. Elke Kühne
Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe
Moritzburger Straße 3
01129 Dresden

Tel.: +49 351 8432-420
Fax: +49 351 8432-381
E-Mail: elke.kuehne@wsv.bund.de

Technische Hydromechanik

Technische Hydromechanik 1 Grundlagen

von Gerhard Bollrich
8., aktualisierte Auflage 2019.
448 S. A5. Gebunden.
62,00 EUR
ISBN 978-3-410-29169-5

Aus dem Inhalt:

- Physikalische Eigenschaften des Wassers
- Stationäre Strömung in Druckrohrleitungen
- Stationäres Fließen in offenen Gerinnen
- Instationäre Strömungen
- Ausfluss aus Gefäßen und unter Schützen; Retention
- Abfluss über Wehre und Überfälle

Technische Hydromechanik 2 Spezialfälle

Herausgeber: Detlef Aigner, Dirk Carstensen
2., vollständig überarbeitete Auflage 2015. ca. 384 S. A5. Gebunden.
ca. 59,00 EUR
ISBN 978-3-410-22209-5

Aus dem Inhalt:

- Plötzlich veränderliche Strömungen in offenen Gerinnen
- Theorie der Wellenbewegung
- Dichteströmungen
- Geschiebe
- Flüssigkeitsstrahlen
- Druckrohrnetzrechnungen
- Feststofftransport
- Eis im Wasserbau

Technische Hydromechanik 3 Aufgabensammlung

von Helmut Martin, Reinhard Pohl
4., überarbeitete und erweiterte Auflage 2014.
260 S. A5. Gebunden.
28,00 EUR
ISBN 978-3-410-24130-0

Aus dem Inhalt:

- über 80 Aufgaben und Lösungen
- hydraulische Modellbildung
- Anwendung von Berechnungsalgorithmen
- analytische und grafische Lösungsverfahren

Technische Hydromechanik 4 Numerische und hydraulische Modelle

Herausgeber: Helmut Martin, Reinhard Pohl
3., überarbeitete Auflage 2015.
406 S. A5. Gebunden.
74,00 EUR
ISBN 978-3-410-24172-0

Aus dem Inhalt:

- Hydraulisches Versuchswesen
- Gerinneströmung
- Hydraulik der Wasserbehandlungsanlagen
- Hydraulische Probleme an ausgewählten Betriebseinrichtungen



Mehr Infos und Bestellung:

beuth.de/go/hydraulik

E-MAIL kundenservice@beuth.de

TELEFON +49 30 58885700-70

Zur Entwicklung der ethohydraulischen Modellierung auf verschiedenen Skalen

Katharina Bensing
Boris Lehmann

Stichworte: Neuroethologie, sensorische Ökologie, Lokomotion, Kausalität

1 Einleitung

Die Wanderung der Fische und die Herstellung der Durchgängigkeit an verbauten Gewässerquerschnitten sind langjährige Themen in den Bereichen Fischerei und Ingenieurwesen. Bereits im 18. Jahrhundert gab es Versuche, den Fischen an solchen Querschnitten eine Passage zu ermöglichen. *Mason (1823)* berichtete von einem 1714 gegrabenen Kanal am "River Pawtucket", der ursprünglich für die Fischwanderung gebaut wurde, seinen Zweck jedoch verfehlte.

Im Fischereigesetz für den preußischen Staat von 1874 wurden Anforderungen an die Durchgängigkeit gestellt, sowohl für Fischpässe als auch zum Schutz der Fische vor Turbinenschäden. Die Notwendigkeit von Maßnahmen zum Erhalt der Arten war somit bereits im 19. Jahrhundert ein relevanter Aspekt, wenn auch zunächst vorrangig aufgrund der Fischerei.

Der Wasserwirtschaftler Hermann *Keller* veröffentlichte 1885 ein umfangreiches Werk zur Umsetzung von Fischwegen, in dem er auf die Relevanz der Standörtlichkeit, die Positionierung des Ein- und Ausstieges von Fischwegen sowie auf unterschiedliche Bauweisen einging. Seine Erkenntnisse bezogen sich folglich vorrangig auf den Aspekt der Auffindbarkeit.

Der deutsche Baubeamte und Wasserbauingenieur sowie mehrjähriger Oberfischmeister Paul *Gerhardt* hob 1904 erstmals die Bedeutung der Fischbiologie und deren Verbindung mit dem Ingenieurwesen hervor. Auch ging

er – womöglich erstmals – auf die Durchgängigkeit für die Kleintierwelt und für „Standfische“ ein.

Der schweizerische Zoologe Hans Walter *Schmassmann* führte in den 1920er Jahren Versuche zum Strömungswiderstand verschiedener Fischkörper durch, um Rückschlüsse auf zulässige Geschwindigkeiten in Fischpässen ziehen zu können. Er folgerte aus seinen Untersuchungen, dass der Niveauunterschied zwischen einzelnen Becken in Fischpässen begrenzt werden muss, um die maximale Schwimmleistung aller an der Wanderung teilnehmenden Größen und Arten nicht zu überschreiten (*Schmassmann* 1928). Durch diese Untersuchungen wurde also bereits die Passierbarkeit einer Anlage als wichtige Funktionsbedingung hervorgehoben.

Es knüpften zahlreiche weitere Untersuchungen an (siehe Ausführung in *Adam und Lehmann* 2011), die auch zunehmend ins Labor verlagert wurden und woraus letztendlich die Ethohydraulik als Methode und Transdisziplin entstand. Der aktuelle Kenntnisstand und zugehörige Handlungsempfehlungen sind in Regelwerken wie dem DWA-Merkblatt 509 sowie in bundeslandspezifischen Leitfäden zusammengefasst.

Die Ausführungen zeigen deutlich die stetige Entwicklung im Bereich der Durchgängigkeit und den mit der Zeit steigenden Grad der Interdisziplinarität. Jedoch zeigt sich ebenso, dass einige Herausforderungen noch heute nicht an Aktualität verloren haben.

2 Der Fisch und die Strömung

Die beschriebenen Untersuchungen zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit an Gewässern waren zunächst stärker fischereilich sowie ingenieurtechnisch geprägt und stark anwendungsorientiert. Gleichzeitig fanden auch in anderen Disziplinen stärker grundlagenorientierte Studien zur Reaktion von Fischen auf Strömungsreize in unterschiedlichen Skalen statt, wobei die folgenden Auflistungen nicht abschließend sind.

2.1 Von den Sinnessystemen bis zur Wanderung

Die Sinnessysteme fungieren als wichtige Schnittstelle zwischen dem Reiz aus der Umwelt und dem Lebewesen. Durch die Identifikation adäquater

Reize und vorhandener Reizschwellen können mögliche verhaltensauslösende Größen ermittelt werden. In Bezug auf aquatische Lebewesen sind hier vor allem die komplexen Charakteristika der Strömung von Bedeutung.

Im Jahr 1908 identifizierte der Ichthyologe Bruno *Hofer* erstmals das Seitenlinienorgan der Fische als Strömungssinn, was den Beginn zahlreicher Entwicklungen in der Seitenlinienorganforschung markierte. Umfangreiche Studien führte auch der niederländische Zoologe Sven Dijkgraaf durch, der unter anderem die Bedeutung von „Stauungserscheinungen“ und damit des Parameters Druck hervorhob (*Dijkgraaf 1947, Dykgraaf 1933*). Einen wesentlichen Beitrag leistete auch der Biophysiker Adrianus Kalmijn, der u.a. stark auf das multimodale Zusammenspiel der Sinne einging (z.B. *Kalmijn 1988*).

Die Forschergruppe des deutschen Zoologen und Neurobiologen Horst Bleckmann analysierte ebenfalls schwerpunktmäßig das Seitenlinienorgan. Die Studien konzentrierten sich u. a. auf die Wahrnehmungsunterschiede hydraulischer Reize zwischen den Epidermal- und Kanalneuromasten (*Engelmann et al. 2002*), die Erfassung der hydrodynamischen Wirbelfährte von Fischen (*Hanke und Bleckmann 2004*) sowie die neuronale Antwort auf einen entlang des Fischkörpers transportierten Wirbel (*Chagnaud et al. 2008*).

Im Bereich der sensorischen Ökologie beschäftigte sich David B. *Dusenbery* (1992) mit den codierten Signalen aus der Umwelt, möglichen Störeinflüssen (Rauschen) und Strategien der Lebewesen zur Nutzung dieser Informationen bspw. bei der Nah- und Fernorientierung. Das komplexe Orientierungsverhalten ist für die aquatische Durchgängigkeit von großer Bedeutung, um den Körper in der Strömung auszurichten, ein definiertes Ziel anzusteuern und beispielsweise an Querbauwerken eine geeignete Passage zu finden. Es beinhaltet damit z.B. die Einnahme der normalen Körperlage im Raum, die Taxis (z.B. die Rheotaxis) und Kinesen sowie die Navigation (siehe *Kühn 1919, Schöne 1983*).

Die Überlagerung von sensorisch aufgenommenen, externen Umweltreizen und internen Faktoren (z.B. Alter, Fitness, Hunger) im Gehirn führt zu einer Handlungsbereitschaft, Motivation oder zentralen Disposition des Lebewesens (*Schöne 1983*), aus der wiederum eine motorische Reaktion resultieren kann. Mit Bezug zum erwähnten Orientierungsverhalten kann dann ein gezielter, klein- oder großräumiger Ortswechsel durchgeführt werden. Bei ihrer großräumigen zeit- und ortsabhängige Wanderung suchen Fische ein best-

geeignetes, zweckgebundenes Habitat auf – z.B. zur Erhöhung ihrer Wachstums-, Überlebens- und Reproduktionschancen (siehe *Lucas und Baras 2001*). Die kleinräumige Betrachtung der Bewegung findet hingegen u.a. in der vergleichenden Verhaltensforschung (Ethologie) statt.

2.2 Ethologie, Lokomotion und Biomechanik

In der Ethologie wird das Verhalten von Lebewesen unter möglichst natürlichen Bedingungen beobachtet, wobei auch experimentelle Untersuchungen im Labor stattfinden. Zur Analyse der komplexen Bewegungsmuster fließen zusätzliche Disziplinen wie Lokomotion, Biomechanik und Bioenergetik ein.

Grundlegende Untersuchungen zur Schwimmleistung und dem Stoffwechsel von Fischen führten z.B. *Bainbridge (1958)*, *Brett (1964)* und *Beamish (1978)* durch. Die Verwendung von Schwimmtunnel-Respirometern als abgeschlossene Systeme ermöglichte die Aufzeichnung, Steuerung und Überwachung der Umgebungsbedingungen, um Rückschlüsse auf den Stoffwechsel der Probanden zu ziehen. Die aktuell in der Anlagenplanung verwendete Einteilung der Schwimgeschwindigkeiten wurde unter anderem von diesen Studien abgeleitet. Die eingesetzte Methodik wird heute jedoch von einigen Wissenschaftler:innen als kritisch angesehen (siehe *Bensing 2023*).

Die Bewegungsmuster der Tiere und die auf den Körper wirkenden Kräfte sind ebenso wichtig, da Lebewesen bestrebt sind, sich energieeffizient fortzubewegen. *Weihs (1973)* ging beispielsweise auf die hydraulischen Vorteile beim Schwimmen in einem Schwarm ein. *Webb (1998)* beschrieb unter anderem das sogenannte „entrainment“ als seitliches Anordnen neben Körpern, um Bereiche geringen Drucks zum energieeffizienten Verharren auszunutzen. Die Nutzung hydrodynamischer Effekte konnten auch *Liao et al. (2003)* in ihren Untersuchungen beobachten: z.B. bei Bereichen mit Druckanstieg stromauf eines Körpers („bow riding“) oder auch bei der Synchronisation der Körperbewegung mit der Wirbelfrequenz in einem gewissen Abstand stromab eines Körpers, wodurch ein Vortrieb generiert werden konnte („Kármán-gaiting“). Diese Auflistung ist nicht abschließend.

Die Lokomotionstypen (anguilliform, subcarangiform usw.) innerhalb des Artenspektrums wurden erstmals von *Breder (1926)* aufgestellt und später erweitert, was zu *Lindsey's (1978)* häufig zitierten Darstellung führte. Diese Einteilung hilft, Verhalten an hydraulischen Strukturen zu interpretieren und angemessen darauf zu reagieren.

Paul W. Webb beschäftigte sich mit seiner Arbeitsgruppe ebenfalls umfangreich mit der Lokomotion von Fischen (z.B. *Webb 1975*). Seine Ideen bezüglich der Definition verschiedener Schwimmmodi und deren Verknüpfung mit bestimmten ökologischen Zusammenhängen wurden jedoch bisher selten in deutscher Literatur wiedergefunden (*Webb 1994*).

3 Ethohydraulische Modellierung

Der Begriff "Ethohydraulik" wurde im Jahr 2011 von *Adam und Lehmann* geprägt und bezeichnet die transdisziplinäre Verknüpfung von Ethologie und Hydraulik. Diese Konzeption erstreckt sich auf sämtliche aquatische Lebewesen, obwohl bisherige Erläuterungen stark auf Fische fokussiert waren.

Die ethohydraulische Modellierung definiert eher eine Handlungsweise im Sinne der Ethohydraulik und wird hier allgemein folgendermaßen beschrieben: „Ethohydraulische Modellierung ist die Nutzung physikalischer und numerischer Modelle sowie interdisziplinärer Methoden zum Verständnis komplexer kausaler Zusammenhänge bei der Interaktion von Strömung und aquatischem Lebewesen.“ Die Vorgehensweise ist nicht strikt vorgegeben und es wird die Anwendung neuer Ansätze, wie zum Beispiel der Einsatz von Methoden künstlicher Intelligenz und Biorobotik, sowie innovativer, bioinspirierter Messtechniken als zielführend erachtet.

Weiterhin liegt bei der ethohydraulischen Modellierung ein noch stärkerer Fokus auf der transdisziplinären Anwendung, indem nicht rein das kleinräumige Verhalten an hydraulischen Strukturen betrachtet wird. Die Ansätze und Erkenntnisse unterschiedlicher Skalen greifen ineinander und beeinflussen sich gegenseitig (siehe Abbildung 1). Die zuvor genannten Disziplinen spielen dabei alle eine essentielle Rolle, angefangen bei der Sensorik (Was kann wahrgenommen werden und wo liegen die Grenzen? Wie werden Informationen aus der Umwelt decodiert?) über die Lokomotion (Wie bewegt sich das Lebewesen? Warum bewegt es sich an einem Ort im Raum auf diese Art und Weise? Wo befinden sich Leistungsgrenzen?) bis hin zur Orientierung und großräumigen Wanderung (Was sind auslösende Reize? Woran orientiert sich das Tier? Welche Strategien werden dabei eingesetzt?).

Auf der anderen Seite besteht die große Herausforderung darin zu verstehen, wie Informationen über die räumliche Umgebung möglicherweise in

der Strömung codiert sind und beispielsweise eine hydrodynamische Bildgebung ermöglichen. Dabei darf jedoch nicht vernachlässigt werden, dass nicht allein die Strömung für das Verhalten ausschlaggebend ist, sondern auch der Einfluss anderer externer Faktoren (z.B. Licht, Temperatur) berücksichtigt werden muss.

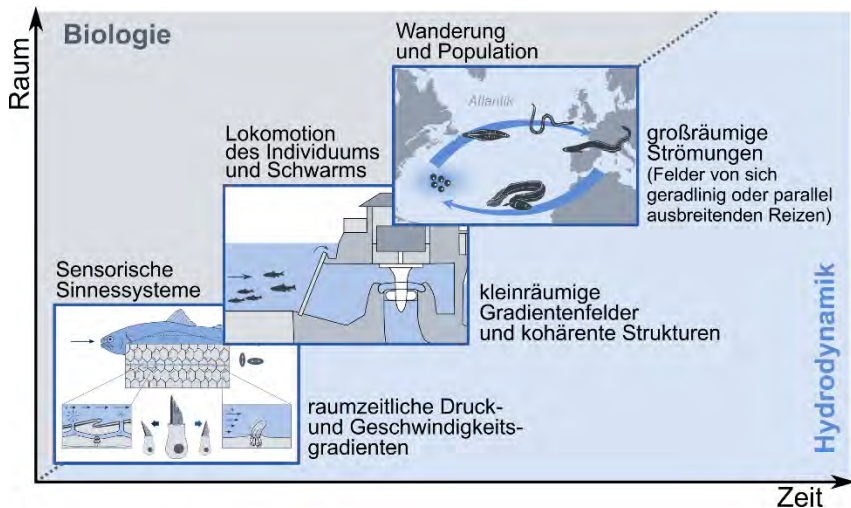


Abbildung 1: Die ethohydraulische Modellierung auf verschiedenen Skalen

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

In der ethohydraulischen Modellierung werden verschiedenste Disziplinen transdisziplinär auf verschiedenen Skalen zusammengeführt. Dadurch soll ein Beitrag zum besseren Verständnis aquatischer Lebewesen geleistet werden, um dieses Wissen gezielt für die Wiederherstellung der Durchgängigkeit der Binnengewässer zu nutzen. Außerdem soll der Blick für bisher weniger berücksichtigte Fachdisziplinen geweitet und die Theorie zukünftig gezielt auf die Praxis angewendet werden. Für den Einsatz sowie die Weiterentwicklung der ethohydraulischen Modellierung sind folgende Aspekte dabei besonders relevant:

- Herstellung der Transdisziplinarität: Verschiedene Disziplinen sowie Theorie und Praxis stärker verknüpfen,

- Weiterentwicklung und Anwendung neuer Methoden: Messtechnik, Numerik und Künstliche Intelligenz,
- eindeutige Definitionen: Einheitliches Verständnis von Begriffen, Parametern und Methoden herstellen,
- systematische, transdisziplinäre Grundlagenforschung,
- keine doppelte Forschung: Vergessenes Wissen wiederentdecken.

5 Literatur

- Adam, B.; Lehmann, B. (2011): Ethohydraulik. Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2011
- Bainbridge, R. (1958): The speed of swimming of fish as related to size and to the frequency and amplitude of the tail beat. *Journal of Experimental Biology* 35 (1), 109–133
- Beamish, F. W. H. (1978): Swimming capacity. In: Hoar, W. S.; Randall, D. J. (Hg.). *Locomotion*. Academic Press, New York, 101–187
- Bensing, K. (2023): Ethohydraulische Modellierung. Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt 2023. <https://doi.org/10.26083/tuprints-00024347>
- Breder, C. M. (1926): The locomotion of fishes. *Zoologica : scientific contributions of the New York Zoological Society* 4 (5), 159–297
- Brett, J. R. (1964): The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 21 (5), 1183–1226
- Chagnaud, B. P.; Brücker, C.; Hofmann, M. H.; Bleckmann, H. (2008): Measuring flow velocity and flow direction by spatial and temporal analysis of flow fluctuations. *Journal of Neuroscience* 28 (17), 4479–4487
- Dijkgraaf, S. (1947): Über die Reizung des Ferntastsinns bei Fischen und Amphibien. *Experientia* (3), 206–208
- Dusenbery, D. B. (1992): Sensory ecology. How organisms acquire and respond to information. Freeman, New York 1992
- Dykgraaf, S. (1933): Untersuchungen ber die Funktion der Seitenorgane an Fischen. *Journal of Comparative Physiology A* 20 (1-2), 162–214
- Engelmann, J.; Hanke, W.; Bleckmann, H. (2002): Lateral line reception in still- and running water. *Journal of comparative physiology. A, Neuroethology, sensory, neural, and behavioral physiology* 188 (7), 513–526
- Gerhardt, P. (1904): Fischwege und Fischteiche. Die Arbeiten des Ingenieurs zum Nutzen der Fischerei. Wilhelm Engelmann, Leipzig 1904
- Hanke, W.; Bleckmann, H. (2004): The hydrodynamic trails of *Lepomis gibbosus* (Centrarchidae), *Colomesus psittacus* (Tetraodontidae) and *Thysochromis*

- ansorgii (Cichlidae) investigated with scanning particle image velocimetry. *Journal of Experimental Biology* 207 (9), 1585–1596
- Hofer, B. (1908): Studien über die Hautsinnesorgane der Fische. I. Teil. Die Funktion der Seitenorgane bei den Fischen. *Berichte aus der Kgl. Bayerischen Biologischen Versuchstation in München* 1, 115–164
- Kalmijn, Ad. J. (1988): Hydrodynamic and acoustic field detection. In: Atema, J.; Fay, R. R.; Popper, A. N. et al. (Hg.): *Sensory biology of aquatic animals*. Springer, New York, 83–130
- Keller, H. (1885): Die Anlage der Fischwege. Sonderabdruck aus dem „Centralblatt der Bauverwaltung“. Verlag von Ernst & Korn, Berlin 1885
- Kühn, A. (1919): Die Orientierung der Tiere im Raum. Verlag von Gustav Fischer, Jena 1919
- Liao, J. C.; Beal, D. N.; Lauder, G. V.; Triantafyllou, M. S. (2003): The Kármán gait: novel body kinematics of rainbow trout swimming in a vortex street. *Journal of Experimental Biology* 206 (6), 1059–1073
- Lindsey, C. C. (1978): Form, function, and locomotory habits in fish. In: Hoar, W. S.; Randall, D. J. (Hg.). *Locomotion*. Academic Press, New York 1978
- Lucas, M. C.; Baras, E. (2001): *Migration of freshwater fishes*. Blackwell Science, Oxford 2001
- Mason, William P. (1823): Tyler v. Wilkinson. 24 F. Cas. 472, 4 Mason 397. Open Casebook. Harvard Law School Library.
<https://opencasebook.org/casebooks/510-open-source-property/resources/3.3.2.2-tyler-v-wilkinson/> (Abgerufen am 22.01.2024)
- Schmassmann, W. (1928): 13. Messungen über den Formwiderstand der Fische bei verschiedenen Wassergeschwindigkeiten und seine Berücksichtigung beim Bau der Fischpässe. *Schweizerische Fischerei-Zeitung* 36 (11), 337–376
- Schöne, H. (1983): Orientierung im Raum. Formen und Mechanismen der Lenkung des Verhaltens im Raum bei Tier und Mensch. 2. Auflage, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1983
- Webb, P. W. (1975): Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, Ottawa 1975
- Webb, P. W. (1994): The biology of fish swimming. In: Maddock, L. ; Bone, Q.; Rayner, J. M. V. (Hg.). *The mechanics and physiology of animal swimming*. University Press, Cambridge, 45–62
- Webb, P. W. (1998): Entrainment by river chub *Nocomis Micropogon* and smallmouth bass *Micropterus Dolomieu* on cylinders. *The Journal of experimental biology* 201 (16), 2403–2412
- Weihhs, D. (1973a): Hydromechanics of Fish Schooling. *Nature* 241 (5387), 290–291

Autoren:

Dr.-Ing. Katharina Bensing

Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik
Technische Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Straße 7
64287 Darmstadt

Tel.: +49 6151 16 21165
E-Mail: wabau@wb.tu-darmstadt.de

Handbuch der Hydraulik

für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Das »Handbuch der Hydraulik« bildet das gesamte Spektrum der Hydraulik in Wasserbau und Wasserwirtschaft ab. Es ist als erweitertes Nachschlagewerk für Ingenieure, Studierende und Auszubildende konzipiert und die ideale Ergänzung zu der vierbändigen Fachbuchreihe »Technische Hydromechanik«. Speziell auf die Lösung von praktischen hydromechanischen Aufgabenstellungen ausgerichtet, enthält das Handbuch die wichtigsten Berechnungsgrundlagen, mathematische Formeln einschließlich der notwendigen geometrischen und physikalischen Tafelwerte.

Aus dem Inhalt:

- Mathematische Grundlagen der Hydraulik
- Physikalische Größen und Einheiten
- Hydrostatik
- Hydrodynamische Grundgleichungen
- Druckrohrströmung
- Freispiegelströmung
- Überfälle und Hochwasserentlastungsanlagen
- Wasserstrahlen
- Sicker- und Grundwasserströmungen



Auch als E-Book unter:
beuth.de/go/hydraulik

2. Auflage



2., überarbeitete Auflage 2021.
528 S. 24 × 17 cm. Gebunden.
86,00 EUR | ISBN 978-3-410-30748-8

Die Autoren Prof. Dr.-Ing. Dettlef Aigner und Dr. Gerhard Bollrich benennen typische Probleme, beschreiben sie kurz und führen die zur Lösung erforderlichen Gleichungen und Beiwerte auf. Die Lösung eines Problems ist einerseits mit Hilfe von Diagrammen oder Tabellen möglich, kann aber auch andererseits aus Gleichungen und Beiwerten selbst gefunden werden.

Nicht zu schnell und nicht zu langsam: Ethohydraulische Untersuchungen zur Analyse und Ableitung von Bemessungsempfehlungen für Fischaufstiegsanlagen

Matthias Scholten
Roman Weichert
Marcus Herbst
Matthias Pitsch
Cornelia Schütz

Stichworte: Dotationszugabe, Schlitzpässe, Passierbarkeit von Engstellen, ethohydraulische Versuche

1 Einleitung

Die Bemessung und Planung von Fischaufstiegsanlagen (FAA) folgt vielfach den Empfehlungen des DWA Merkblatts 509. Obwohl dort für zahlreiche Bauteile einer FAA konkrete Bemessungsempfehlungen angegeben werden, bleiben einzelne, für die Funktionsfähigkeit zentrale Elemente hinsichtlich ihrer Bemessung unklar. Ein wichtiges Thema ist dabei die Leitströmung im Unterwasser einer FAA. Die Ausprägung der Leitströmung erfordert sowohl einen ausreichenden Durchfluss als auch eine adäquate Strömungsgeschwindigkeit, um ein wahrnehmbares hydraulisches Signal auszubilden und damit die Auffindbarkeit einer FAA zu gewährleisten (Heneka et al. 2021, Wiering et al. 2022).

Damit sind zwei Herausforderungen für die Passierbarkeit des Einstiegs verbunden: Wie kann die Zugabe einer größeren Dotationswassermenge in den Einstiegsbereich einer FAA erfolgen, ohne dass die Passierbarkeit der Anlage gefährdet wird? Wie hoch darf die Fließgeschwindigkeit im Einstieg sein, um der Passierbarkeit für schwimmschwächere Arten und Größenstadien nicht entgegen zu stehen.

2 Untersuchungsansatz

2.1 Ausgestaltung der Rechenanlage in Dotationsbecken

Um diese Planungsunsicherheiten für die FAA an den Bundeswasserstraßen zu schließen, haben die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in den vergangenen Jahren ethohydraulische Untersuchungen an der Versuchsrinne der BAW in Karlsruhe durchgeführt.

In einem ersten Versuchsansatz wurde die Ausgestaltung unterschiedlicher Rechensysteme auf die Passierbarkeit des Einstiegsbeckens analysiert. Dabei wurde das Verhalten größerer Fischarten wie Nase, Forelle aber auch kleinwüchsiger Arten wie Plötze, Schneider und Gründling untersucht. Anhand der Ergebnisse konnten konkrete Bemessungsempfehlungen für die Ausgestaltung der Rechenanlage in Dotationsbecken abgeleitet werden (Schütz et al. 2021).

2.2 Passierbarkeit der Engstelle am Einstieg

Die Frage der Passierbarkeit der Engstelle am Einstieg wurde in verschiedenen Schritten analysiert. In einer ersten Versuchsanordnung wurden die Passagewahrscheinlichkeiten von kleinen Fischarten (Gründling, Schneider und juvenile Rotaugen) bei unterschiedlichen Wasserspiegeldifferenzen (Δh) am Einzelschlitz und einer glatten Sohle ermittelt (Schuetz et al. eingereicht).

In einer zweiten Versuchsanordnung wurden die Strömungsverhältnisse in und unterhalb einer Engstelle im Vergleich einer rauen Sohle zu einer glatten Sohle untersucht (Wiering et al. eingereicht) und anhand von zwei ausgewählten Arten (Gründling und juvenile Rotaugen) die Auswirkungen auf die Passierbarkeit im ethohydraulischen Versuch analysiert.

Die Ausprägung der zeitlichen und räumlichen Schwankungen in einem Schlitz hängt maßgeblich von der Charakteristik der Anströmung und der geometrischen Ausgestaltung des Schlitzes ab (Henning & Weichert 2020, Höger et al. 2020). So weist der in der Laborrinne platzierte Einzelschlitz der ersten beiden Versuchsreihen zwar gleiche zeitliche Mittelwerte in der Engstelle wie in gebauten Anlagen auf, ist jedoch durch eine geringere zeitliche Variabilität der Messpunkte im Schlitz charakterisiert. Für die Frage der Passierbarkeit von Schlitzpässen, insbesondere durch schwimmschwache Arten, könnten solche Unterschiede in den hydraulischen Bedingungen ggf. einen Erklärungsansatz bieten, wie es schwimmschwachen Arten gelingt, trotz eigentlich zu hoher Bemessungsgeschwindigkeiten, derartige Engstellen zu passieren (Sokoray und Weichert 2020,

Sokoray-Varga et al. 2022). Beobachtungen von Wang et al. (2010) lassen vermuten, dass Fische ggf. kurze Phasen mit geringeren Geschwindigkeiten in den Engstellen nutzen könnten.

In einer dritten Versuchsanordnung wurden daher die Auswirkungen instationärer Zustände auf die Passierbarkeit von schwimmschwachen Arten in ethohydraulischen Untersuchungen analysiert (Habedank et al. in prep.). Neben den Strömungsbedingungen im Einzelschlitz der ersten beiden Versuchsreihen konnte u.a. durch die Entwicklung einer steuerbaren Lamellenwand Schwankungsgrößen erzeugt werden, die den Verhältnissen in realisierten Schlitzpässen entsprach. Zusätzlich wurde mit der Lamellenwand ein Szenario entwickelt, das gezielte periodische Schwankungen im Schlitz erzeugt (Focht & Heneka 2023).

Obwohl die Modellergebnisse keinen konkreten Geschwindigkeitsschwellenwert für eine optimale Passierbarkeit liefern können, gibt es artspezifische Ergebnisse, die als Grundlage für die Gestaltung von Fischaufstiegsanlagen herangezogen werden können.

3 Ausblick

Der Vortrag stellt die fachlichen Anforderungen und das methodische Vorgehen bei der Durchführung der ethohydraulischen Versuche vor (Pitsch et al. 2021, Schuetz et al. eingereicht), adressiert die Schnittstellen zwischen Fischverhalten und Hydraulik sowohl bei der Erfassung als auch bei der Datenanalyse und stellt erste Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen vor.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr für die finanzielle Förderung der Forschungsvorhaben sowie den Teams in der BfG und BAW für die großartige Unterstützung bei der Durchführung der ethohydraulischen Versuche an der grünen Rinne in der BAW.

4 Literatur

- Focht, L. Heneka, P. (2023): Providing Defined Velocity Fluctuations in Ecohydraulic Flumes Using Rotatable Fins. Proceedings of the 40th IAHR World Congress. Vienna, Austria.
- Habedank, M., Heneka, P., Schütz, C., Herbst, M., Focht, L., Wiering, V. (2024) Effect of velocity fluctuations on passage rates of small-bodied fish in a vertical slot. Manuscript in preparation.
- Heneka, P.; Zinkhahn, M.; Schütz, C.; Weichert, R.B. (2021): A Parametric Approach for Determining Fishway Attraction Flow at Hydropower Dams. *Water* 2021, 13, 743.
- Henning, M.; Weichert, R. (2020): Hydraulische Parameter von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise in Bemessung und Bestand. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 7-14.
- Höger, V.; Prinz, F.; von Melzer, J.; Weichert, R. (2020): Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 23-32
- Pitsch, M.; Heimann, W.; Burghardt, G.; Heynen, M. (2021). Colour marking of small fish with a marking stand for Dermojet®. *MethodsX*, 8, 5. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101510>
- Schütz, C.; Czerny, R.; Herbst, M.; Henning, M.; Pitsch, M. (2024 eingereicht): Passage through a fishway entrance at different velocities - results from flume experiments with small non-salmo. – *Rivers Research and Applications*
- Schütz, C.; Henning, M.; Czerny, R.; Herbst, M.; Pitsch, M. (2021). Addition of auxiliary discharge into a fishway – A contribution to fishway design at barrages of large rivers. *Ecological Engineering*, 167, 106257. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106257>
- Sokoray-Varga, B.; Weichert, R. (2020). Analyse turbulenter Strömungsmuster in Schlitzpässen aus Sicht der Fischpassage. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 59-65.
- Sokoray-Varga, B.; Kriegseis J.; Weichert, R.B. (2022) On the use of time coefficients of proper orthogonal decomposition for describing quasi-periodic flow processes in the highly turbulent flow of a fish pass, *Journal of Hydraulic Research*, 60:6, 922-934, DOI: 10.1080/00221686.2022.2067083.
- Wang, R.; David, L.; Larinier, M. (2010): Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes, *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* 396 (02), pp. 21.
- Wiering, V.; Weichert, R.; Kundruhn, M. (2024 eingereicht): Vergleich der Schlitzgeschwindigkeit über glatten und rauen Sohlen. *Wasserwirtschaft*.
- Wiering, V.; Heneka, P.; Henning, M.; Schütz, C. (2022): Bemessungsansatz für die Leitströmung von Fischaufstiegsanlagen. *Wasserbauliche Mitteilungen TU Dresden*, Heft 68, Nachhaltigkeit im Wasserbau - Umwelt, Transport, Energie, Dresdner Wasserbaukolloquium 2022.

Autoren:

Dr. Matthias Scholten
Dr. Marcus Herbst
Dipl. Biol. Matthias Pitsch
Dr. Cornelia Schütz

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Abteilung Ökologie
Referat Tierökologie
Projektgruppe
„Ökologische Durchgängigkeit“
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

Tel.: +49 261 1306 5937
Fax: +49 261 1306 5082
E-Mail: Scholten@bafg.de

Dr. Roman Weichert

Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Wasserbau im Binnenbereich
Referat Wasserstraße und Umwelt

Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726-2660
Fax: +49 721 9726-4540
E-Mail: Roman.Weichert@baw.de

Handbuch der Hydraulik

für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Das »Handbuch der Hydraulik« bildet das gesamte Spektrum der Hydraulik in Wasserbau und Wasserwirtschaft ab. Es ist als erweitertes Nachschlagewerk für Ingenieure, Studierende und Auszubildende konzipiert und die ideale Ergänzung zu der vierbändigen Fachbuchreihe »Technische Hydromechanik«. Speziell auf die Lösung von praktischen hydromechanischen Aufgabenstellungen ausgerichtet, enthält das Handbuch die wichtigsten Berechnungsgrundlagen, mathematische Formeln einschließlich der notwendigen geometrischen und physikalischen Tafelwerte.

Aus dem Inhalt:

- Mathematische Grundlagen der Hydraulik
- Physikalische Größen und Einheiten
- Hydrostatik
- Hydrodynamische Grundgleichungen
- Druckrohrströmung
- Freispiegelströmung
- Überfälle und Hochwasserentlastungsanlagen
- Wasserstrahlen
- Sicker- und Grundwasserströmungen



Auch als E-Book unter:
beuth.de/go/hydraulik

2. Auflage



2., überarbeitete Auflage 2021.
528 S. 24 × 17 cm. Gebunden.
86,00 EUR | ISBN 978-3-410-30748-8

Die Autoren Prof. Dr.-Ing. Dettlef Aigner und Dr. Gerhard Bollrich benennen typische Probleme, beschreiben sie kurz und führen die zur Lösung erforderlichen Gleichungen und Beiwerte auf. Die Lösung eines Problems ist einerseits mit Hilfe von Diagrammen oder Tabellen möglich, kann aber auch andererseits aus Gleichungen und Beiwerten selbst gefunden werden.

Einführung von Erschöpfung und Schwimmkapazität von Fischen in Schädigungsrisikomodellen durch CFD-DEM-Kopplung

Dennis Powalla
Emeel Kerikous
Stefan Hoerner

1 Einleitung

Die Zunahme von Starkniederschlägen und steigenden Meeresspiegeln erfordert die Notwendigkeit des Ausbaus und der Umrüstung von Pumpstationen, die zur Wasserstandsregulierung in Poldern und im Hochwassermanagement eingesetzt werden. Beim Pumpen der meist großen Volumenströme werden regelmäßig auch Fische eingesogen. Sie sind dabei einem erheblichen Schädigungsrisiko ausgesetzt, dass im schlimmsten Fall letal endet (*Bierschenk et al. 2018, Cox et al. 2023*). Um das Risiko für Fische zu mindern, entwickeln Pumpenhersteller zunehmend fischschonende Hydrauliken, da der Schutz der Fische vor dem Eindringen in Turbinen und Pumpen politisch eingefordert wird (u.a. *EU-WRRL*). Das Schädigungsrisiko von Fischen beim Passieren von hydraulischen Anlagen wurde in der Vergangenheit zumeist an Turbinen untersucht. So wurden Prognosemodelle für Schädigungswahrscheinlichkeiten entwickelt (*von Raben 1957*). Diese Prognosemodelle können in empirische (z.B. *Larinier, M. und Travade, F. (2002)*) und physikalische Modelle (z.B., *Geiger & Stoltz 2022*) eingeteilt werden. Bestehende Bewertungsmodelle für Pumpenanlagen beruhen im Wesentlichen auf denselben Ansätzen wie sie für axiale Turbinen entwickelt wurden (*von Esch et al. 2014*). Mit zunehmender Nutzung numerischer Strömungsmechanik sind neuen Ansätze hinzugekommen die Computational Fluid Dynamics (CFD) beruhen (*Klopries & Schüttrumpf 2020*). Eine zusätzliche Kopplung der Simulationen mit der Diskreten-Elemente-Methode (DEM), in denen die Fische als massenbehaftete Teilchen modelliert werden, erlauben eine bessere Abbildung der physikalischen Mechanismen in den Passagen der hydraulischen Maschinen (z.B. *Singh et al. 2022*). Alle diese Modelle nutzen unter anderem die Annahme, dass die Fische passiv mit der Strömung driften. Untersuchungen heben jedoch hervor, dass das aktive Verhalten der Fische einen starken Einfluss auf ihr Schädigungsrisiko hat (*Geiger et al. 2020*). Im Rahmen des

RETERO-Projekts wurde ein Schädigungsrisikomodell entwickelt, dass auf CFD-DEM-Kopplung beruht und aktives Schwimmverhalten der Fische berücksichtigt. In der vorliegenden Arbeit wurde das Modell an einer Pumpe des Herstellers KSB angewandt. Es sollte insbesondere untersucht werden, welchen Einfluss das Schwimmverhalten auf eine erhöhte Verweilzeit der virtuellen Fische in kritischen Regionen des Pumpenrotors und damit auf ihr Schädigungsrisiko hat.

2 Numerischer Aufbau

Geometrie und Pumpenkennwerte wurden für die Untersuchung von KSB bereitgestellt. Der Laufraddurchmesser der Pumpe beträgt 570 mm. Die Pumpe liefert bei einer Drehzahl von 490 U/min eine Durchflussrate von 1,4 m³/s, bei einer Förderhöhe von 3 m. Die Simulationen wurden mittels der Siemens PLM Software Simcenter™ STAR-CCM+ durchgeführt. Die Modellierung erfolgte über Finite-Volumen basierte Verfahren, instationär, mittels eines Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Ansatzes (RANS) für inkompressible, einphasige Medien. Die Turbulenzmodellierung erfolgte mit dem k- ω SST-Turbulenzmodell.

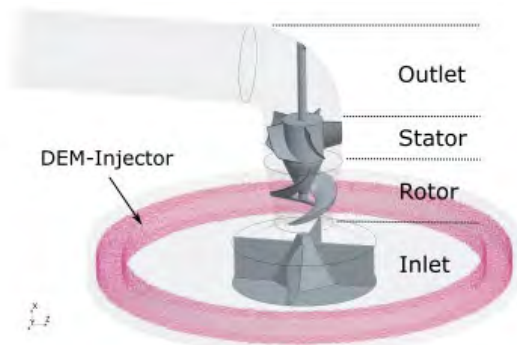


Abbildung 1: Simulationsbereich der Pumpenanlage mit Definition der spezifischen Pumpenbereiche und dem stochastischen DEM Injektor (pinker Bereich)

Die Pumpe wurde in drei Regionen unterteilt; Einlassbereich, Rotorbereich und Stator (inkl. Auslassbereich). Die Rotation des Rotors wurde mit dem Sliding-Mesh Ansatz realisiert. Die Verbindungen der rotierenden Netzregion

(Rotorbereich) zu den statischen Netzregionen (Einlass- und Statorbereich) wurden über Interfaces gekoppelt, die die Strömungsgrößen zwischen statischen und rotierenden Regionen in beide Richtungen austauschen und zwischen den einzelnen Zellen der Rechengitter interpoliert. Zur räumlichen Diskretisierung wurde ein Rechennetz aus Polyederelementen verwendet. Die Wandbereiche wurden mit jeweils 15 Schichten aus Hexaederelementen vernetzt, um die Grenzschichten ausreichend abzubilden (Kriterium $y^+ < 1$). Die Wachstumsrate des Netzes wurde auf 5 % eingestellt. Die so erzeugten Netze weisen eine Zellenzahl von ca. 3 Millionen für die vorhandene Konfiguration auf. Die zeitliche Diskretisierung des Modells erfolgte über eine feste Rotorwinkelauflösung von $0.25^\circ/\text{Zeitschritt}$. DEM-Solver und CFD-Solver wurde über eine Drei-Wege-Kopplung verbunden. Die DEM-Teilchen werden daher von dem Fluid beeinflusst, es erfolgt jedoch keine Rückkopplung von den Partikeln zum Fluid. Inter-Teilchen-Interaktionen sowie Teilchen-Wand-Interaktionen wurden berücksichtigt.

3 Methodik

Das Einsetzen der CFD-DEM-Methode erlaubt es, den massebehafteten Teilchen eine zusätzliche Körperkraft zuzuweisen. Mit der benutzerdefinierten Kraft ist es möglich, die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fluidkräfte zu beeinflussen. Eine detaillierte Beschreibung der Implementierung ist in *Powalla 2022* zu finden. In der vorliegenden Anwendung wurde für den virtuellen Fisch eine Meidungsreaktion gegenüber dem Rotoreinlauf definiert. Das bedeutet je näher der virtuelle Fisch der Rotor-nabe kommt, desto stärker erfolgt seine Schwimmbewegung gegen die Strömung. Die kritische Position, die der Meidungsreaktion zugeordnet wurde (Nabe), wurde zunächst willkürlich gewählt, da hierzu keine Daten bekannt sind: Die Festlegung einer realistischeren Position ist deshalb eine wichtige Forschungsfrage, die Thema ethohydraulischer Anschlussuntersuchungen sein sollte. Die im Modell implementierten Verhaltensbedingungen sind in *Abbildung 2* schematisch dargestellt. Zuerst wird geprüft, ob der virtuelle Fisch sich unterhalb der Nabe befindet. Trifft die Bedingung nicht zu verhält sich der virtuelle Fisch wie ein passiver Körper. Es wurde angenommen, dass Fische nach dem Rotor weitestgehend passiv die Pumpenanlage passieren, da die Fluidgeschwindigkeiten ihre Schwimmfähigkeiten weit überschreiten.

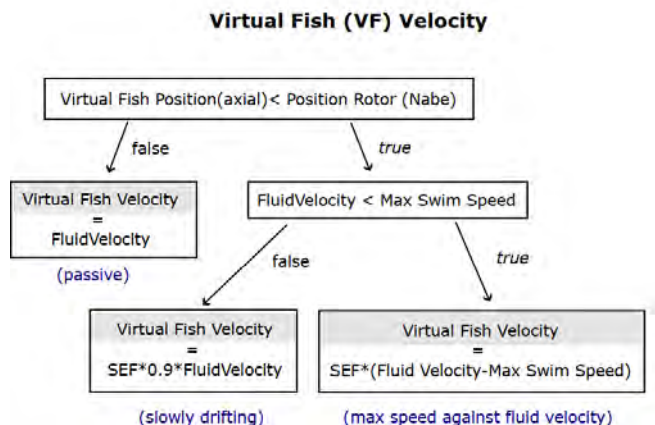


Abbildung 2: Logik-Schema der Geschwindigkeitssteuerung des virtuellen Fisches für die Meidungsreaktion

Trifft die Bedingung zu (Fisch vor dem Rotor), wird abgefragt ob die Fluidgeschwindigkeit die maximale Schwimmgeschwindigkeit der Spezies (Ebel 2013) überschreitet. Ist dies nicht der Fall, bewegt sich der virtuelle Fisch mit einem zuvor definierten Anteil der Fluidgeschwindigkeit gegen die Strömung. Da im Einlaufbereich Geschwindigkeiten herrschen, denen Fische über mehrere Stunden entgegenschwimmen können, wurde ein langsames Verdriften in den Rotor implementiert, um Rechenzeit einzusparen und die Ermüdung durch den Schwimmaufwand mit abzudecken. Übersteigt die Fluidgeschwindigkeit die maximale Schwimmgeschwindigkeit, schwimmt der virtuelle Fisch mit seiner maximalen Schwimmgeschwindigkeit gegen die Strömung an. Das Verdriften, sowie das aktive Schwimmen gegen die Hauptströmung wurde jeweils mit einem Aufwandsfaktor (Swimming Effort Factor – SEF) verknüpft. Dieser Faktor berücksichtigt eine sich verstärkende Meidungsreaktion, je näher der virtuelle Fisch dem kritischen Punkt kommt. Der Faktor wurde durch eine Funktion beschrieben die bei maximaler Entfernung zum Rotor 0 ist und logarithmisch bis zur minimalen Entfernung zur Rotornabe auf 1 ansteigt. Den Funktionsverlauf und der Funktionsbereich in der Simulationsumgebung wurden in *Abbildung 3* dargestellt.

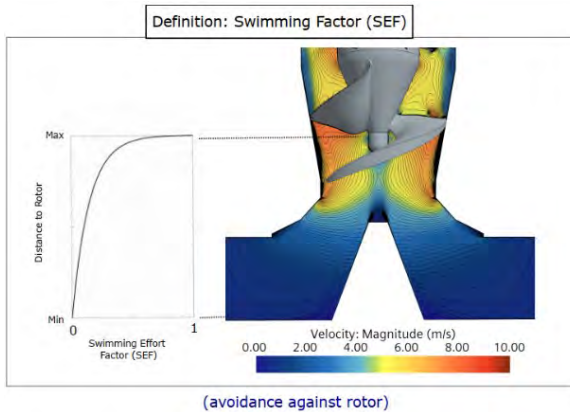


Abbildung 3: Verlauf des Schwimmaufwandfaktors über den Gehäuseboden bis zur Rotornabe (links). Detaillierter Ausschnitt des Geschwindigkeitsfeldes im Einlass und Rotorbereich

4 Ergebnisse

Um den Unterschied zwischen aktiven und passiven virtuellen Fischen aufzuzeigen, sind zwei Simulationen im Folgenden gegenübergestellt. Eine ist mit dem vorherig beschriebenen aktiven Verhalten initiiert, die andere ohne den aktiven Ansatz (die Teilchen folgen der Strömung passiv). Beide Simulationen sind unter denselben Bedingungen gestartet.

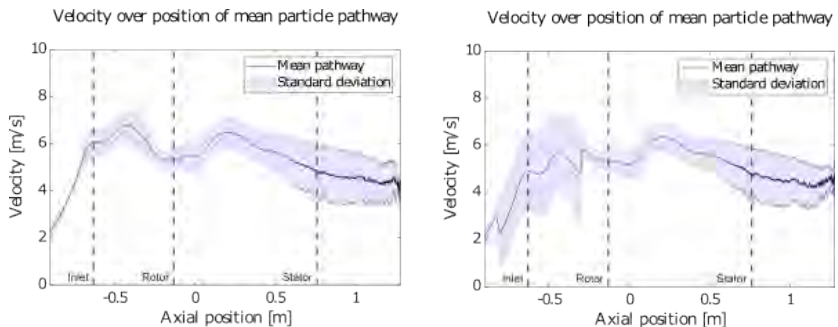


Abbildung 4: Geschwindigkeitsverlauf der mittleren Teilchen-Bahnlinie über die axiale Ausrichtung der Pumpe. Links der Verlauf mit passiv drifteten Teilchen und rechts der Verlauf mit aktiver Meidungsreaktion

Die DEM-Teilchen sind nach ausgebildeter Strömung mit gleicher Teilchenanzahl (ca. 500) über dieselbe Simulationszeit mit denselben Teilcheneigenschaften (Material, Durchmesser) injiziert worden. Die DEM-Teilchen zeichnen beim Durchlaufen individuell Daten der Fluideigenschaften (z.B. Druck, Geschwindigkeit) und Kollisionereignisse auf, die im Post Processing analysiert werden können. Die Auswertung bezieht sich zum einen auf die Auswirkung der reinen hydraulischen Einflüsse auf den virtuellen Fisch – es werden nur Bahnlinien ausgewertet, die keine Kollision aufweisen und zum anderen werden die Häufigkeiten der Kollisionereignisse zwischen virtuellem Fisch und Pumpe/Pumpengehäuse pro spezifische Region ausgewertet. *Abbildung 4* zeigt den Geschwindigkeitsverlauf der gemittelten Bahnlinie der virtuellen Fische über die axiale Position der Pumpe. In der zweiten Phase wurden die Häufigkeiten von Kollisionereignissen zwischen virtuellen Fischen und Pumpe bzw. dem Pumpengehäuse unterteilt nach Region ausgewertet.

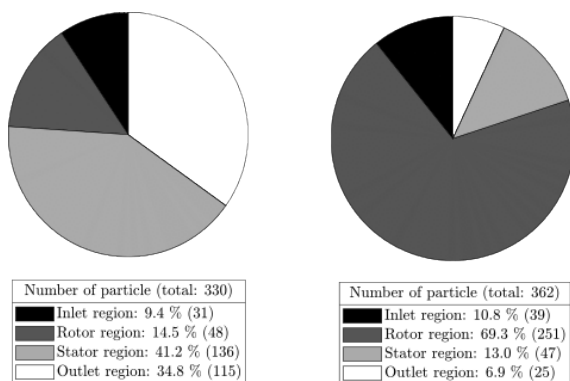


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der ersten Kollision der virtuellen Fische. Links: der Verlauf mit passiv drifteten Teilchen und rechts der Verlauf mit aktiver Meidungsreaktion. Die Gültigkeitsbereiche der Diagrammsegmente kann Abb.1 entnommen werden

Der Verlauf der aktiven virtuellen Fische spiegelt die Meidungsreaktion (Abfall und Anstieg der Geschwindigkeit) wider. Die absolute Geschwindigkeit (im stationären Bezugrahmen) sinkt zunächst, da der virtuelle Fisch gegen die Hauptströmung schwimmt. Daraus erfolgt eine höhere Verweilzeit in dem betreffenden Bereich. Nach dem Rotor driftet der Fisch passiv, Inertialkräfte verzögern jedoch die Geschwindigkeitsaufnahme. Die Gegenüberstellung der Kollisionsauswertungen ist in *Abbildung 5* gezeigt, in denen die

Häufigkeit des ersten Kontaktes für die spezifischen Region aufgetragen sind. Den Diagrammen kann entnommen werden, dass die Kollisionsereignisse in der Region in der die Verweilzeit durch die Meidungsreaktion erhöht wird stark ansteigen. Im Vergleich zu den virtuellen Fischen die die Pumpe passiv durchlaufen ist das Ergebnis signifikant (Rotorbereich: 69,3 % aktiv zu 14,5% passiv). Durch die willkürliche Parameterwahl aber nur qualitativ von Interesse. Kollisionen im Einlassbereich können vernachlässigt werden, da davon auszugehen ist, dass bei den geringen Geschwindigkeiten in diesem Bereich ($V < 0,3 \text{ m/s}$) so niedrig sind, dass Fische diese Kollisionen vermeiden können.

5 Diskussion

Die Methode zeigt eindeutig, dass Vermeidungsverhalten in kritischen Regionen (hier der Rotor) durch die erhöhte Verweilzeit auch zu höheren Kollisionsereignissen führt. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Berücksichtigung von aktiven Verhalten in Schädigungsprognosemodellen, wenn die Strömungsgeschwindigkeit eine Reaktion zulässt. Den Untersuchungen ist weiterhin zu entnehmen, dass die ausschließliche Betrachtung des Rotors bei bestehenden Blade-Strike-Modellen unzureichend ist, da der Stator und Auslassbereich ebenfalls zu Gefährdungen führen kann. Das vorliegende Modell der Meidungsreaktion soll auf der Basis zukünftiger Untersuchungen mit Versuchen mit besensorten Fischen in Pumpenpassagen kalibriert und validiert werden, um den Reaktionsbereich Von Fischen näher bestimmen zu können.

6 Literatur

- Bierschenk, B., Pander, J., Müller, M., Geist, J. (2018): Fish injury and mortality at pumping stations: A comparison of conventional and fish-friendly pumps. – Marine and Freshwater Research 70. (<https://doi.org/10.1071/MF18116>)
- EP, Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy, Dec. 2000
- Ebel, G. (2013): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen. Handbuch Rechen- und Bypasssysteme, Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie 4.

- Esch, B.P.M. van, Spierts, I.L.Y. (2014) Validation of a model to predict fish passage mortality in pumping stations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(12):1910–1923. doi:10.1139/cjfas-2014-0035
- Finch, O.-D., Vollmerding, J. (2021): Leitfaden zur Verwendung fischschonender Pumpen (Guideline for the Application of Fish Friendly Pumps; in German).
- Geiger, F., Cuchet, M., Rutschmann, P. (2020): Zur Berechnung der Schädigungsraten von Fischen bei der Turbinenpassage. *Wasserwirtschaft* 33–40. <https://doi.org/10.1007/s35147-020-0757-4>
- Geiger, F. and Stoltz, U. (2022) Guidelines for Application of Different Analysis Methods of Fish Passage Through Turbines—Impact Assessment of Fish Behavioural Aspects, pages 105–115. Springer International Publishing, Cham.. doi:10.1007/978-3-030-99138-8_9
- Klopries, E.-M. Schüttrumpf, H.. (2020) Mortality assessment for adult european eels (*Anguilla anguilla*) during turbine passage using CFD modelling. *Renewable Energy*, 147:1481–1490. doi:10.1016/j.renene.2019.09.112.
- Larinier, M. and Travade, F. (2002) Downstream migration: problems and facilities. *Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture*, pages 181–207.
- Powalla, D., Hoerner S., Cleynen O, Thevenin, D. (2020) A numerical approach for active fish behaviour modelling with a view toward hydropower plant assessment. *Renewable Energy*, 188, 02. doi:10.1016/j.renene.2022.02.064.
- Raben, K von (1957) Zur Frage der Beschädigung von Fischen durch Turbinen. *Die Wasserwirtschaft*, 4:97–100, 1957.
- Singh, R.K., Romero-Gomez, P Colotelo, A.H. Perkins, W.A., Richmond, M.C. (2022) Computational studies of hydraulic stressors for biological performance assessment in a hydropower plant with kaplan turbine. *Renewable Energy*, 199:768–781, 2022. doi:10.1016/j.renene.2022.09.016.

Autoren:

M.Sc. Dennis Powalla ^[1]

Dr.-Ing. Emeel Kerkious ^[1]

Dr.-Ing. Stefan Hoerner ^[1,2]

^[1] Otto von Guericke Universität
Magdeburg
Institut für Strömungstechnik und
Thermodynamik (ISUT)
Universitätsplatz 2
D-39106 Magdeburg

^[2] Grenoble Institute of Technology
Laboratoire LEGI
1209-1211 rue de la piscine
Domaine Universitaire
F-38400 Saint-Martin-d'Hères

Tel.: +49 391 67 57376

E-Mail: dennis.powalla@ovgu.de

Wohin des Weges Sturgeon Steve?

Vorplanung von Fischauf- und Fischabstiegsanlagen am Eisernen Tor der Donau mittels Telemetrie und Hydronumerik

Julia Gatzweiler
Selina Meister
Marq Redeker

Im Auftrag der EU werden aktuell Möglichkeiten zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit an den Staustufen Iron Gate 1 & 2 in der Donau untersucht. Es werden Fischaufstiegsanlagen, Fischschutz-/Fischabstiegsanlagen und betriebliche Strategien für den Fischschutz mithilfe von Ethohydraulik konzipiert und vorgeplant.

1 Projektrahmen

Das Einzugsgebiet der 2.857 km langen Donau ist mit einer Gesamtfläche von 801.463 km² - rund 10% des europäischen Festlands - das zweitgrößte Flusseinzugsgebiet in Europa. Es erstreckt sich über 19 Länder und ist damit das internationalste Flusseinzugsgebiet der Welt.

Über 100 Fischarten sind in der Donau nachgewiesen, darunter vier hochgradig gefährdete Störarten, die charakteristischen Flaggschiffarten der Donau (SCHIEMER ET AL. 2004). Die diadromen Donaufischarten (z. B. Störe (*Acipenser spp.*), Pontischer Maifisch (*Alosa immaculata*), Aowscher Maifisch (*Alosa tanaica*) und Schwarzmeerforelle (*Salmo labrax*)) sind zwingend darauf angewiesen ihren Lebenszyklus im Süß- und Salzwasser zu vollziehen. Einige Arten wandern bzw. wanderten dabei über sehr große Distanzen, beispielsweise der Beluga-Stör (*Huso huso*) vom Schwarzen Meer bis zu den Laichgründen >2.500 km ins Landesinnere (SCHMALL & FRIEDRICH 2014). Aber auch potamodrome Arten migrieren in der Donau über weite Strecken; für Döbel (*Leuciscus cephalus*), Barbe (*Barbus barbus*) und Nase (*Chondrostoma nasus*)

sind z. B. Wanderungen über 169, 318 und 446 km nachgewiesen (STEINMANN ET AL. 1937, VAN TREECK ET AL. 2022).

Die Fischartenzusammensetzung und der Fischbestand sind wichtige Indikatoren für die Gewässerqualität der Donau. Die Ergebnisse des jüngsten *Joint Danube Survey 4* zeigen, dass die Fischartengemeinschaft entlang des gesamten Flusslaufs bedroht ist. Andererseits ist die Vielfalt der Fischtaxa immer noch auf einem Niveau, als dass wirksame Gewässerentwicklungsmaßnahmen dazu beitragen können den ökologischen Zustand bzw. das ökologische Potential zu verbessern und die Ziele der EG-WRRL zu erreichen (BĂNĂDUC ET AL. 2014, ICPDR 2021).

2 Plan zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit an den Staustufen am Eisernen Tor

Auf der Grenze von Rumänien und Serbien wurden 1964-1972 und 1977-1985 zwei Staustufen (namens Porțile de Fier bzw. Đerdap – englisch: Iron Gate) errichtet, um die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt im Eisernen Tor (Durchbruchstal der Donau in den südlichen Karpaten) zu verbessern sowie Strom aus Wasserkraft zu erzeugen: Iron Gate 1 bei Donau-km 942 ($H = 27,16$ m, $Q_{WKA} = 10.080$ m³/s, 12 Turbinen) und Iron Gate 2 bei Donau-km 862,8 ($H = 7,45$ m, $Q_{WKA} = 8.950$ m³/s, 20 Turbinen) rund 80 km stromab.

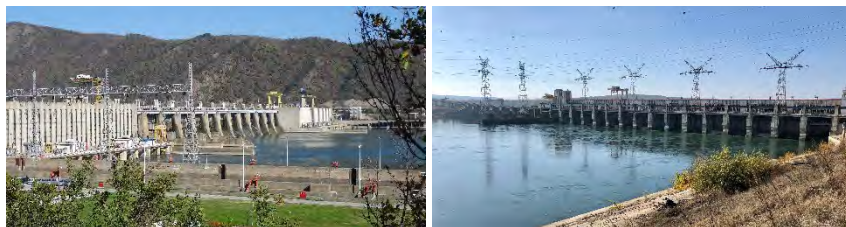


Abbildung 1: Unterwasserseitige Ansichten der Staustufen Iron Gate 1 (links) und Iron Gate 2 (rechts) (Fotos: DE BRUIJNE UND REDEKER)

Die beiden Staustufen unterbrechen als einzige Querbauwerke auf einer Länge von rund 1.700 km die aquatische Durchgängigkeit der Unteren und Mittleren Donau. Die Bauwerke sind weder mit Fischaufstiegsanlagen, noch mit Fischschutz- und Fischabstiegseinrichtungen ausgestattet. Unter ande-

rem haben diese Staustufen und ihre Wasserkraftanlagen (WKA) in den vergangenen Jahrzehnten zu einem starken Rückgang bzw. Aussterben der Populationen der ehemals sechs in der Donau heimischen Störarten geführt (GUTI 2021), deren (ehemalige) Habitate überwiegend stromauf der Iron Gate Staustufen liegen (HAIDVOGEL ET AL. 2021).

Es gibt zahlreiche anekdotische Berichte und wissenschaftliche Untersuchungen die belegen, dass noch immer adulte Störe an Iron Gate 2 versuchen flussaufwärts zu migrieren. Beispielsweise wurden in den Jahren 2014 und 2015 mittels fischtelemetrischer Untersuchungen adulte Störe direkt stromab von Iron Gate 2 nachgewiesen, die sich dort bis zu 20 Tage aufhielten (DDNI 2015). Die Wiederherstellung der Durchgängigkeit an Iron Gate 1 & 2 ist daher im Bewirtschaftungsplan 2021 für das Donaeinzugsgebiet als "äußerst vorrangig" eingestuft (ICPDR 2022A) und wurde von der ICPDR-Ministerkonferenz im Februar 2022 als Naturschutzmaßnahme priorisiert (ICPDR 2022B).

Seit 2018 werden die Möglichkeiten zur Wiederherstellung der stromauf- und stromabwärts gerichteten Fischgängigkeit im Projekt *WePass*, finanziert durch die Europäische Kommission, untersucht. Im Jahr 2022 wurden zahlreiche Optionen von Fischaufstiegsanlagen (FAA) und Fischabstiegsanlagen sowie betrieblichen Strategien für den Fischschutz an beiden Staustufen identifiziert und konzeptionell entworfen. Einige dieser Lösungen werden aktuell auf Vorplanungsniveau ausgearbeitet.

3 Ethohydraulische Arbeiten und Erkenntnisse hinsichtlich des Fischaufstiegs an der Staustufe Iron Gate 2

3.1 Einleitung

Angesichts der Größe der Iron Gate Staustufen (Gewässerbreite Hauptstrom >1 km) und deren Komplexität ist die Anwendbarkeit einschlägiger Regelwerke - wie z. B. des Merkblatts DWA-M 509 (2014) - begrenzt, z. B. wenn es um die Festlegung der erforderlichen Anzahl von FAA und ihrer Einstiege sowie deren Anordnung und Auslegung geht. Daher beinhaltet die Vorplanung der Fischwechseleinrichtungen u. a. (a) ein mehrjähriges Monitoring der Bewegungen verschiedener Fischarten stromauf und stromab von Iron Gate 2 mittels 2-D und 3-D hydroakustischer Telemetrie und (b) den Einsatz von hydrnumerischen 2-D- und 3-D-Modellen.

3.2 2-D hydronumerische Modellierung

Mit der Software HEC-RAS V6.2 wurde ein 2D-HN-Modell erstellt, welches mit ADCP-Messungen kalibriert und validiert wurde. Ziel des Modells war es die

- unterschiedlichen Strömungsmuster an der Staustufe bei verschiedenen Durchflüssen und Turbinenbetriebskonstellationen zu verstehen und
- hydraulischen Verhältnisse im Gewässer an potenziellen FAA-Einstiegsstellen zu untersuchen.

Mittels Analyse der stündlichen Durchflüsse (20-j. Datenreihe) der Turbinen in den drei WKA im Hauptstrom und Nebenarm Gogoşu wurden zehn Szenarien abgeleitet, die das Betriebs- und Abflussspektrum Q_{30} bis HQ_1 abdecken. Diese wurden stationär mit dem Modell simuliert (Abbildung 2).

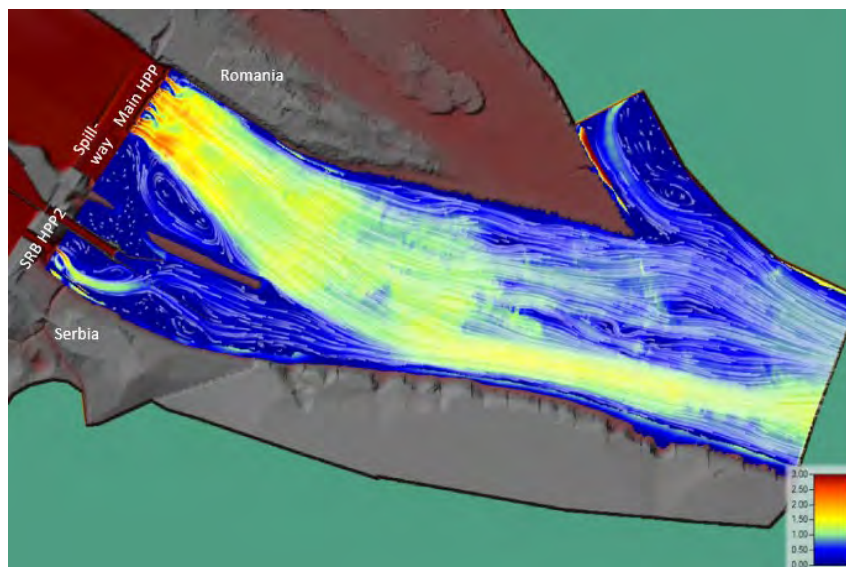


Abbildung 2: 2-D-HN-Modell des Hauptlaufs stromab der Staustufe Iron Gate 2. Strömungsbild Szenario $Q_{30} = 3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ und typische Durchflusskonstellation der 16 Turbinen im Hauptkraftwerk (Main HPP) und 2 Turbinen im serbischen Nebenkraftwerk (SRB HPP2).

Überdies wurde das 2-D Modell für die hydraulische Interpretation der 3-D Telemetrie-Ergebnisse verwendet (vgl. Kap. 3.4).

3.3 Fischtelemetrische Untersuchungen an Iron Gate 2

2-D Telemetrie

Im Herbst 2019 und Frühjahr 2021 wurden die Bewegungen von 185 besenderten Fischen aus sechs verschiedenen ana- und potamodromen Arten (Barbe, Karpfen, Nase, Pontischer Maifisch, Rapfen und Zährte) stromab und stromauf von Iron Gate 2 sowie in dessen nördlichen Flussarm Gogoşu mittels 2-D hydroakustischer Telemetrie untersucht. PARASCHIV ET AL. (2021) belegten u. a., dass die Fische sowohl stromab und stromauf von Iron Gate 2 weiträumige Bewegungen unternahmen, als auch die Stauhaltung komplett durchschwammen. Stromab zeigten die Fische individuelle Unterschiede, wo sie sich der Staustufe näherten. Überraschend war, dass die meisten Individuen im Hauptlauf von den Hydrophonen auf beiden Seiten des Flusses erfasst wurden. Eine Vorliebe für die Bewegung entlang einer bestimmten Flussseite konnte bei keiner der Arten festgestellt werden.

3-D Telemetrie

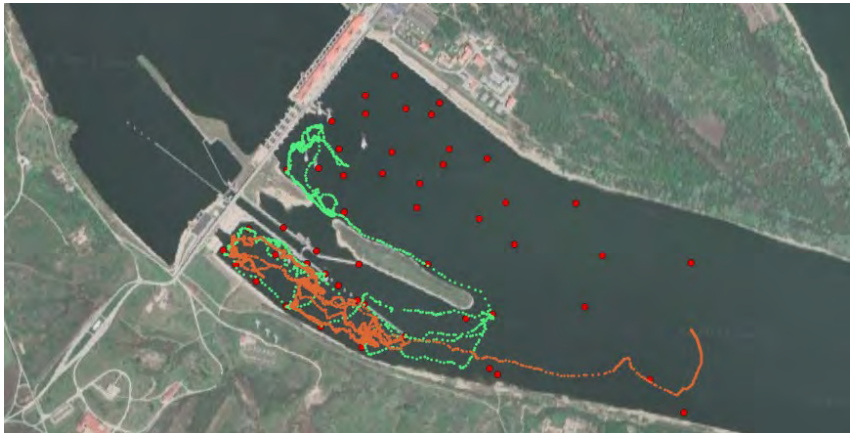


Abbildung 3: Bewegungsspuren eines Sterlets (orange) und einer Zährte (grün) stromab von Iron Gate 2. Die roten Punkte zeigen die Positionen der Hydrophone. (Luftbild: Google Earth)

Im Zeitraum Oktober 2021 bis August 2022 wurden die Bewegungen von 139 adulten Fischen aus fünf Arten (Barbe, Nase, Rapfen, Sterlet und Zährte) in einem rund 1,7 km langen Areal im Hauptlauf stromab von Iron Gate 2 mittels 3-D hydroakustischer Telemetrie genauer erforscht. Die besenderten Fi-

sche wurden in einem Setup von 53 Hydrophonen detektiert und aufgezeichnet. Für die räumlich und zeitlich genaue Verortung der Fische wurde die YAPS-Methodik (BAKTOFT ET AL. 2017) verwendet. Darüber hinaus konnten Bewegungsspuren erzeugt werden (*fish tracks*, Abbildung 3).

3.4 Verschneidung der fischtelemetrischen und hydronumerischen Ergebnisse

Mit instationären 2-D hydronumerischen Simulationen (mit den tatsächlichen stündlichen Turbinendurchflüssen) der Perioden mit den häufigsten Fischdetektionen wurden artspezifische Fließgeschwindigkeitspräferenzen (Wahrscheinlichkeitsdichten) bestimmt. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsdichten können „*heat maps*“ für stationäre Modellierungsergebnisse abgeleitet werden, die die Wahrscheinlichkeit von Aggregationsbereichen darstellen (Abbildung 4). So können artenspezifisch präferierte Fließgeschwindigkeits-/Gewässerbereiche für verschiedene WKA-Betriebszustände bzw. Abflüsse bestimmt werden.

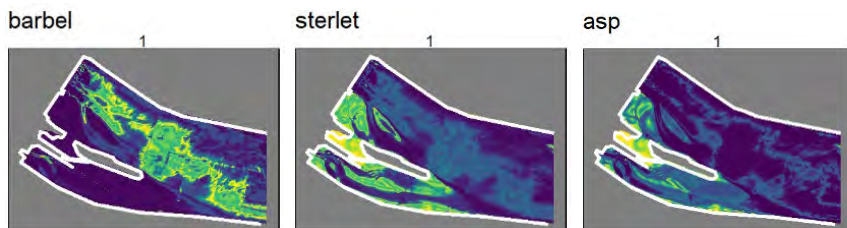


Abbildung 4: *Heat maps* mit Darstellung der Aggregationswahrscheinlichkeit (gelb: sehr wahrscheinlich, grün: wahrscheinlich, blau: nie detektiert) von Barbe, Sterlet und Räpfe für ein Szenario mit niedrigem Abfluss

Mit Hilfe dieser *heat maps* und weiteren Auswertungen wurden im Modellumriss drei prioritäre Bereiche für FAA-Einstiege lokalisiert, die eine gemäß einschlägigen Richtlinien geforderte FAA-Funktionsdauer von mindestens 300 Tagen pro Jahr ($Q_{30} - Q_{330}$) erwarten lassen.

3.5 3-D hydronumerische Modellierung

Weitere kleinräumigere 3-D hydronumerische Modelle, wovon eins aktuell im Aufbau ist, werden Vorplanung begleitend dazu verwendet

- die Anzahl, Position und konstruktive Gestaltung geeigneter FAA-Einstiege festzulegen und

Die entsprechend der vorgestellten Vorgehensweise identifizierten und vor-geplanten FAA-Vorzugsvarianten, eine Kostenschätzung der Herstellungskosten und Vorschläge zum weiteren Projektvorgehen werden der Europäischen Kommission im September 2024 präsentiert.

5 Literatur

- Seite 159

- Haidvogel, G., Munteanu, C., Reinartz, R. (2021): Strategy for ecological corridor conservation and restoration in the Danube catchment. 101 S.
- ICPDR (2021): Joint Danube Survey 4 Scientific report: A shared analysis of the Danube River. 565 S.
- ICPDR (2022a): Danube River Basin Management Plan. Final version, 251 S.
- ICPDR (2022b): Danube Declaration. Adopted at the ICPDR Ministerial Meeting 8th February 2022, 6 S.
- Paraschiv, M., Økland, F., Lenhardt, M., Paterson, R., Hont, S., Cvijanovic, G., Havn, T., Iani, M., Smederevac-Lalic, M., Nikčević, M., Neacșu, N., Nikolić, D. & Thorstad, E. (2021): Restoration of fish migration in the Danube River at Iron Gate Dams in Romania and Serbia - Studies of fish behaviour in 2019 and 2021. Norwegian Institute for Nature Research, NINA Report 2030, November 2021, 40 S., ISBN: 978-82-426-978-82-426-4812-9
- Schiemer, F., Guti, G., Keckeis, H., Staras, M. (2004): Ecological status and problems of the Danube and its fish fauna - A review. Proceedings of the 2nd international Symposium on the management of large rivers for fisheries, S. 273 – 299
- Schmall, B., Friedrich, T. (2014): Die Störarten der Donau. Österreichs Fischerei, 67. Jahrgang, Teil 1 S. 95 - 109, Teil 2 S. 129 – 143
- Steinmann, P., Koch, W., Scheuring, L. (1937): Die Wanderungen unserer Süßwasserfische, dargestellt auf Grund von Markierungsversuchen. In: Z. Fischerei 35, S. 369-467
- van Treeck, R., van Wichelen, J., Wolter, C. (2020): Fish species sensitivity classification for environmental impact assessment, conservation and restoration planning. Sci. Total Environ. 2020; 708:135173

Autoren:

Julia Gatzweiler M.Sc.

Selina Meister B.Eng.

Dipl.-Ing. (FH) Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Marq Redeker

CDM Smith SE

Kanzlerstr. 2

40472 Düsseldorf

Tel.: +49 211 93445-0

Fax: +49 211 93445-57

E-Mail: julia.gatzweiler@cdmsmith.com
selina.meister@cdmsmith.com
marq.redeker@cdmsmith.com



This project is funded
by the European Union.

Fischverhalten in Turbinen und Pumpen – Ergebnisse ethohydraulischer Modellversuche

Falko Wagner
Tom Rößger
Stefan Hoerner
Ilanina Kopecki
Jelger Elings
Dennis Powalla
Marcio Salgueiro Roth
Jürgen Stamm

Stichworte: Ethohydraulik, Fischverhalten, Turbinen, Pumpen

1 Einleitung

Die Fische in unseren Flüssen unterliegen im Laufe ihres Lebenszyklus aufgrund der intensiven Gewässernutzung durch den Menschen vielfältigen Verletzungs- oder Tötungsrisiken. Eine hohe Gefährdung geht von den in und an Flüssen befindlichen Strömungsmaschinen, also Turbinen und Pumpen, sowie der für deren Betrieb erforderlichen Infrastruktur aus. Die Gefährdung von Fischen bei der Turbinenpassage ist allgemein bekannt und seit langem Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen (z.B. *Monten 1955, Bell et al. 1967*). Das durchschnittliche Mortalitätsrisiko pro deutschem Wasserkraftwerksstandort wurde in einer Metastudie von *Radinger et al. (2021)* auf etwa 20 % geschätzt, wobei es große Unterschiede zwischen den Standorten gibt. Auch Schöpf- und Pumpwerke bringen erhebliche Schädigungsrisiken von Fischen mit sich (*Bierschenk et al. 2018, Cox et al. 2023*). Insbesondere zur Regulierung des Wasserstands in Poldern und für das Hochwasserrisikomanagement genutzte Pumpstationen befördern teilweise große Mengen an Fischen, mit ähnlichen Konsequenzen wie sie von Turbinenpassagen bekannt sind. Mit der Zunahme von Starkniederschlägen und steigendem Meeresspiegel ergibt sich verstärkt die Notwendigkeit des Ausbaus und der Umrüstung dieser Pumpstationen.

Hierbei aber auch beim Neubau von Wasserkraftanlagen gewinnt der Fischschutz zunehmend an Bedeutung und wird behördlich gefordert (*Keuneke &*

Massmann 2021, Finch & Vollmerding 2021, Keuneke et al. 2022, Wagner et al. 2023). Der Bedarf an innovativen, fischschonenden Technologien ist groß. Doch deren Praxistauglichkeit und Fischschutzwirkung müssen zunächst getestet werden. Hierfür finden derzeit in der Regel Lebendfischversuche statt, die mittel- bis langfristig durch alternative Methoden ersetzt werden sollen, bei denen keine oder deutlich weniger Fische erforderlich sind.

Das Projekt RETERO setzte sich das Ziel, neue Methoden zur Reduktion dieser Tierversuche zu entwickeln und deren Praxistauglichkeit zu testen. Hierfür sind genaue Kenntnisse zum Fischverhalten unverzichtbar, da dieses das Mortalitäts- und Verletzungsrisiko während der Turbinen- und Pumpenpassage erheblich beeinflusst (Vowles et al. 2014a, Geiger et al. 2020).

Ein Schwerpunkt von RETERO ist daher die Durchführung ethohydraulischer Experimente in einer Versuchsrinne im Hubert-Engels-Labor der Technischen Universität Dresden im 1:1-Maßstab zur Untersuchung des Fischverhaltens in hydraulischen Umgebungen analog denen in Turbinen- oder Pumpeneinläufen. Auf Grundlage der Ergebnisse im physikalischen Versuch werden allgemeingültige Regeln zum Fischverhalten in Abhängigkeit von den hydraulischen Einflussfaktoren wie Fließgeschwindigkeit und räumlicher Strömungsgradient (kurz SVG für engl. „spatial velocity gradient“) abgeleitet und in agentenbasierte numerische Modelle zu Schädigungsprognose implementiert.

2 Versuchstand und Methodik der ethohydraulischen Versuche

2.1 Planung und Umsetzung Versuchsstand

Um den Effekt der hydraulischen Umgebung in Strömungsmaschinen auf das Fischverhalten untersuchen zu können, mussten innerhalb einer Versuchsrinne Fließgeschwindigkeiten erreicht werden, die die theoretischen Sprintgeschwindigkeiten der sie stromab passierenden Fische überschreiten. Damit verbunden ist ein Abschnitt mit starker Beschleunigung und resultierend hohem SVG. Um die Effekte hoher Fließgeschwindigkeiten und des SVG auf die Fische getrennt untersuchen zu können, mussten beide Einflussfaktoren innerhalb der Rinne in räumlich getrennten Abschnitten wirken. Randbedingungen für die Konstruktion der Versuchseinrichtung waren die Leistungsfähigkeit der verfügbaren Pumpen von $Q = 500 \text{ l/s}$ sowie der

verfügbare Platz im Labor (Grundfläche 30,0 m x 4,0 m). Der Versuchsstand musste zudem einen Beobachtungsbereich mit uneingeschränktem optischen Zugang aufweisen, um die Schwimmpfade der Fische aus zwei Raumrichtungen erfassen zu können. Als Zielgröße für die zu erreichende maximale Fließgeschwindigkeit wurde unter Berücksichtigung der erwarteten Fischkörperlängen sowie der Wassertemperaturen, unter Verwendung der Modelle von *Ebel (2013)*, 3,0 m/s festgelegt, um eine Überschreitung der Sprintgeschwindigkeit zu garantieren. Unter Berücksichtigung der für die Zielart Bachforelle notwendigen Wassertiefe von mindestens 0,45 m ergab sich zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit (v_{\max}) anhand der allgemeinen Fließformel ($Q = v \times A$) ein Querschnitt von 0,45 m Höhe bei 0,4 m Breite.

Ziel war die Schaffung einer Zone mit maximalen Fließgeschwindigkeiten von etwa 3,0 m/s, in welcher der für Verhaltensreaktionen von Bachforellen beobachtete Grenzwert von $0,2 \frac{\text{m/s}}{\text{m}}$ im Hellen und $0,4 \frac{\text{m/s}}{\text{m}}$ im Dunkeln (*Vowles & Kemp 2012*) unterschritten wird. Hieraus resultierte eine Rinnengeometrie mit trichterförmiger Verjüngung (SVG-Zone), die in einem langen, schmalen Teil mit konstantem Querschnitt ausläuft (Hochgeschwindigkeitszone).

Anhand von 3D-HN-Simulationen (zweiphasig URANS) des Instituts für Strömungstechnik und Thermodynamik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurden verschiedene Geometrien untersucht und die Variante mit den besten hydraulischen Kenndaten baulich umgesetzt.

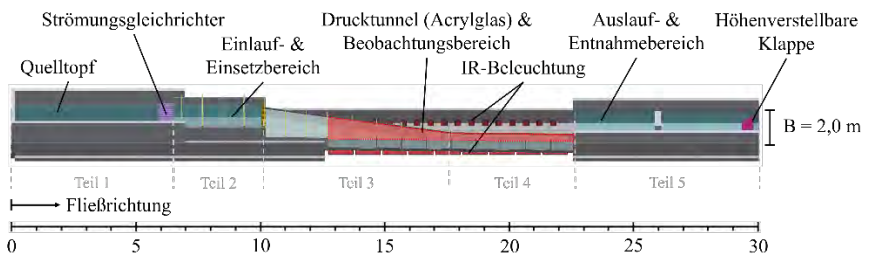


Abbildung 1: Versuchsrinne mit den fünf Teilbereichen, in Teilbereich 3 befindet sich die SVG-Zone, in Teilbereich 4 befindet sich die Hochgeschwindigkeitszone; Position x-Achse in m

Die Rinne mit einer Gesamtlänge von 30 m besteht aus 5 Teilbereichen (Abbildung 1). Auf den Quelltopf (Teil 1) mit Strömungsgleichrichter folgt der als

offenes Gerinne ausgeführte Einlaufbereich (Teil 2) mit einer Breite von 2,0 m. Es schließt sich der als geschlossener Drucktunnel ($H = 0,45$ m, $l = 1,7\%$) ausgelegte Beobachtungsbereich aus Plexiglas an. Dieser ist zweigeteilt. Auf den ersten 7,5 m Länge (Teil 3) verringert sich die Breite von 2,0 m linear auf 0,4 m (trichterförmige SVG-Zone). Der zweite Abschnitt (Teil 4) weist auf einer Länge von 5,0 m einen konstanten Querschnitt von $0,45$ m $[H] \times 0,4$ m $[B]$ auf (Hochgeschwindigkeitszone). Am Ende des Beobachtungsabschnittes geht die Rinne wieder in ein offenes Gerinne mit einer Breite von 2,0 m über (Teil 5). In diesem Auslaufbereich befinden sich Störkörper zur Strömungsberuhigung sowie ein Feinrechen zum Fischrückhalt. Am Ende der Versuchsrinne ist eine höhenverstellbare Klappe eingebaut, welche den Wasserstand in den offenen Rinnenteilen reguliert und damit den Druckabfluss steuert. Dies erfolgt, indem im offenen Rinnenteil im Oberwasser ein Wasserstand oberhalb der Höhe des Drucktunnels (Überstau) erzeugt wird.

2.2 Durchführung der Versuche und Konzept der Verhaltensanalyse

In Vorbereitung der ethohydraulischen Versuche in RETERO wurde verschiedene Hypothesen zur Reaktion von Fischen auf ausgewählte Einflussfaktoren formuliert. Eine betrifft die Fließgeschwindigkeit eine andere die Beleuchtungsverhältnisse.

H1 - Stromabwärts wandernde Fische reagieren unabhängig eines räumlichen Strömungsgradienten (engl. spatial velocity gradient – SVG) auf eine hohe Fließgeschwindigkeit, die ihre Sprintgeschwindigkeit (engl. burst speed) übersteigt, indem sie ihre Schwimmaktivität ändern.

H2 - Die Reaktion der Fische unterscheidet sich in Abhängigkeit von den Beleuchtungsverhältnissen (Tageslicht/Dunkelheit)

Ethohydraulische Laborversuche, basierend auf verbalen Verhaltensbeschreibungen, haben bereits wertvolle Erkenntnisse zum Verhalten der Fische beim Abstieg geliefert (*Haro et al. 1998, Enders et al. 2009, Enders et al. 2012, Vowles & Kemp 2012, Vowles et al. 2014b, Lehmann et al. 2016*). Das Ziel der hier vorgestellten Studie war es jedoch, das Fischverhalten ausschließlich auf Basis quantitativer Parameter zu charakterisieren. Dies ermöglicht eine hohe Reproduzierbarkeit sowie den Einsatz mathematischer Algorithmen bei der Datenanalyse. Der Charakterisierung des Verhaltens wurden dafür drei Ebenen von Verhaltenskomponenten zugrunde gelegt (Abbildung 2).

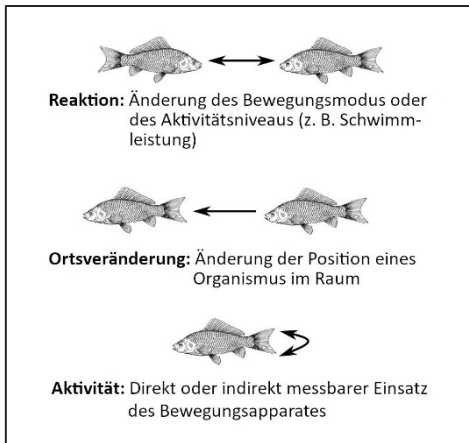


Abbildung 2: Aufeinander aufbauende Ebenen von Verhaltenskomponenten die der quantitativen Analyse des Fischverhaltens bei ethohydraulischen Untersuchungen zugrunde gelegt werden können

Die Basis bildet die Aktivität. Sie ist direkt über die Intensität des Einsatzes des Bewegungsapparates des Fisches (Schwanzschlagfrequenz, Schwimmgeschwindigkeit, Schwimmleistung) messbar. Aus der Aktivität kann eine Ortsveränderung des Fisches resultieren, die auf Basis der Positionsdaten der Fische während der Versuchsphase rechnerisch ermittelt werden kann. Die Messung der Fischaktivität und Ortsveränderung setzt voraus, dass Daten eines zeitlich hoch aufgelösten Videotrackings der Fische zur Verfügung stehen. Am Versuchsstand kommt hierfür ein Kamerasystem bestehend aus 8 Einzelkameras mit einer Frame-Rate von 60 Hz zum Einsatz, welches die Fische im dreidimensionalen Raum erfasst. Dies wird durch jeweils gepaarte Kameras über und seitlich der Versuchsrinne realisiert. Die Fische werden in den Videos als schwarze Silhouetten vor hellem Hintergrund abgebildet (Abbildung 3). Dies wurde erreicht, indem die gegenüber den Kameras befindlichen Seiten der Versuchsrinne mit Diffusorfolie versehen und mit für Salmoniden nicht sichtbarem Infrarotlicht einer Wellenlänge von 830 nm (Bowmaker & Kunz 1987, Matsuo et al. 2021) aktiv beleuchtet wurden (Abbildung 1). Auf diese Weise wird sowohl bei Tageslicht als auch im Dunklen ein einheitlich guter Kontrast zwischen Fisch und Hintergrund erzielt, was das automatisierte Tracking der Fische mit der Software Ethovision XT (Noldus, Netherlands) (Abbildung 2) ermöglichte.

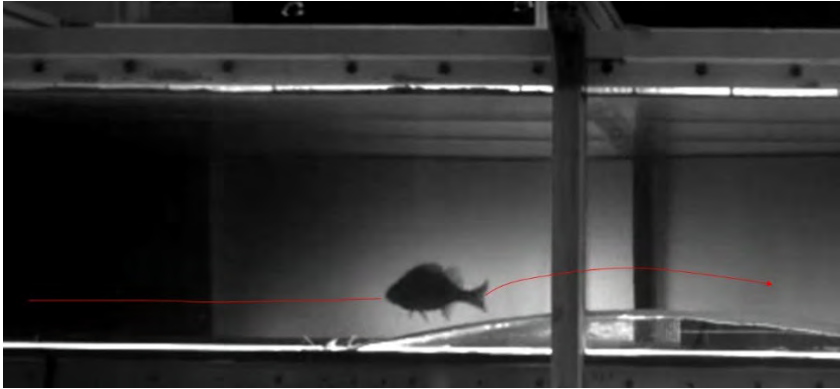


Abbildung 3: Beispiel einer Aufnahme einer der seitlichen Infrarotkameras der Versuchsrinne; der Fisch ist im Beobachtungsbereich als schwarze Silhouette vor hellem Hintergrund klar abgegrenzt.

Im Rahmen der Auswertung der durch Video-Tracking verfügbaren Fischpfade erfolgte eine Klassifikation der Aktivität der Fische in drei Stufen (passiv, schwache Aktivität, starke Aktivität).

Hinsichtlich der Bewegung wurden fünf Modi unterschieden, die sich aus dem Absolutwert der relativen Schwimmgeschwindigkeit (U_{rel}) beziehungsweise dessen Verhältnis zur Fließgeschwindigkeit (v_{flow}) ergibt (Abbildung 4). Eine Veränderung der Aktivitätsstufe oder des Bewegungsmodus der Fische wurde als Reaktionen interpretiert, die sowohl von intrinsischen als auch extrinsischen Reizen ausgelöst sein kann.

Über die raumbezogene Analyse der aus den Fischtracks abgeleiteten Verhaltensdaten gemeinsam mit den hydraulischen Daten aus der Versuchsrinne kann der Einfluss von Fließgeschwindigkeit und räumlichem Strömungsgradienten auf das Fischverhalten überprüft werden. Der Vergleich des Fischverhaltens bei den Versuchen bei Tageslicht und im Dunkeln ermöglicht Rückschlüsse über die verhaltensmodulierende Wirkung des Lichtes.

In den ethohydraulischen Versuchen wurden Bachforellen aus Wildfängen genutzt. Alle Fische hatten mindestens 48 h Zeit sich an die Bedingungen im Labor anzupassen. Die maximale Verweilzeit der Probanden im Labor betrug

14 Tage. Die Versuche wurden nach dem europäischen Tierschutzrecht beantragt und genehmigt (Genehmigungsnummer TVV 2/2020).

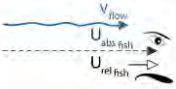


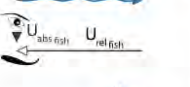
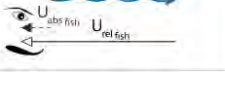
Nr.	Bewegungsmodus	Geschwindigkeiten	Kategorien (nach Pavlov et al. 2011)	Kriterien
1	Stromabaktiv		Negativaktiv	$U_{rel} > 0 \text{ m/s}$
2	Driftunkontrolliert		Negativpassiv	$U_{rel} = 0 \text{ m/s}$
3	Driftkontrolliert		Negativaktiv-passiv	$0 < U_{rel} < -1 * v_{flow}$
4	Stationär		Neutral	$U_{rel} = -1 * v_{flow}$
5	Stromauf		Positiv	$-1 * v_{flow} < U_{rel}$

Abbildung 4: Bewegungs-Modi (Movement Modes), welche die Fische, während der ethohydraulischen Versuche in der Versuchsrinne theoretisch zeigen können

3 Ergebnisse

3.1 Validierung hydraulische Parameter Versuchsstand

Zur Validierung der Hydraulik in der gewählten Modellgeometrie und damit der 3D-HN-Simulationen wurden Geschwindigkeitsmessungen mit drei verschiedenen Messtechniken durchgeführt. An fünf Querschnitten des Beobachtungsbereiches wurden mittels Laser-Doppler-Anemometrie (LDA; PowerSight 2D, TSI, USA) hochaufgelöst (Messraster 4 cm x 4 cm) die 2D-Geschwindigkeitskomponenten (X-Y-Komponenten) gemessen.

Weiterhin erfolgte mit Acoustic-Doppler-Velocimetry (ADV; POA Korrelations-Keilsensoren, Nivus GmbH, Deutschland) an 6 Messpunkten die Aufnahme eines Geschwindigkeitsprofils. Zur Validierung der Einlaufbedingungen in der 3D-HN-Simulation fanden weitere ADV-Messungen (*Vectrino Profiler, Nortek Group, Norwegen*) im Einlaufbereich zum Beobachtungsbereich statt.

Sowohl die Messergebnisse der LDA-, als auch der ADV-Messungen im geschlossenen Rinnenteil sind Abbildung 5 im Vergleich mit den Geschwindigkeiten der Simulation und den sich daraus ergebenden räumlichen Geschwindigkeitsgradienten zu entnehmen.

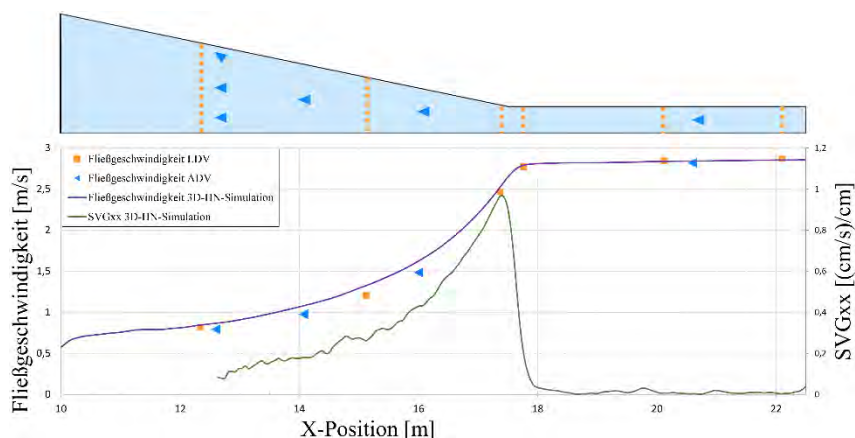


Abbildung 5: Messpositionen der ADV- und LDA-Messungen sowie Vergleich der Messergebnisse mit den Fließgeschwindigkeiten und SVGs aus der 3D-HN-Simulation, alle Größen sind zeitlich gemittelt dargestellt

Die Messergebnisse bestätigten die anhand der numerischen Simulationen prognostizierten hydraulischen Bedingungen. Die Strömungsgeschwindigkeit zu Beginn des Beobachtungsbereiches betrug $0,80 \text{ m/s}$ und stieg bis zum Erreichen des konstanten Rinnenquerschnitts auf $2,50 \text{ m/s}$. Im Drucktunnel mit konstanter Breite steigerte sich die Geschwindigkeit nur noch minimal von $2,70 \text{ m/s}$ auf $2,80 \text{ m/s}$. Im ersten Teil des Beobachtungsbereiches resultiert ein von $0,1 \frac{\text{m/s}}{\text{m}}$ auf nahezu $1,0 \frac{\text{m/s}}{\text{m}}$ ansteigender SVG. Diese SVG-Zone zieht sich noch circa 1 m in den vierten Rinnenteil. Erst ab dieser Position werden im Drucktunnel, wie erwünscht, $0,05 \frac{\text{m/s}}{\text{m}}$ nicht überschritten. Damit ist ein langer Abschnitt verfügbar, in welchem die Fließgeschwindigkeit die Sprintgeschwindigkeit der Versuchsfische übersteigt, ohne von einem

hohen SVG überlagert zu werden (Hochgeschwindigkeitszone). Die für die Überprüfung der ethohydraulischen Hypothesen benötigte Strömungsumgebung im Versuchsstand wurden somit erreicht.

3.2 Neue Ansätze zur Analyse des Fischverhaltens

Nach Überprüfung verschiedener Ansätze zeigte sich, dass für die quantitative Beschreibung der Fischaktivität die auf den Versuchsfisch und die Wassertemperatur normierte Schwimmleistung (P_{norm}) als fisch- und positionsunabhängiger Parameter sehr gut geeignet ist. Die maximale Sprintgeschwindigkeit der Fische wurde mit den Modellen von *Ebel (2013)* errechnet. Grundsätzlich wird die Schwimmleistung neben der Leistung zur Überwindung des Strömungswiderstandes auch von der Leistung für die Beschleunigung bestimmt (Formel 1). Da letztere in den Versuchen aber in der Regel sehr niedrig war, reichte die Leistung zur Überwindung des Strömungswiderstandes (P_{drag}) aus, um die Schwimmleistung der Versuchsfische an jedem Erfassungspunkt zu charakterisieren (Formel 1).

$$\text{Formel 1: } P_{norm} = \frac{P_{drag} + P_{acceleration}}{P_{burst}} \approx \frac{P_{drag}}{P_{burst}}$$

Während sich die Bewegungsmodi direkt aus den Werten der relativen Schwimmgeschwindigkeit und der Fließgeschwindigkeit berechnen lassen (siehe Abbildung 4), war für die Klassifikation der Fischaktivität vorab eine Analyse der Aktivitätsmuster der Fische nötig. Hierfür wurden Hidden Markov Modelle (HMM) genutzt, anhand derer, basierend auf der normierten Schwimmleistung, drei Aktivitätsintensitäten unterschieden und die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens entlang der Versuchsrinne (x-Achse) reproduzierbar vorhergesagt werden konnten (*Elings et al. eingereicht*).

Mit den Algorithmen zur Charakterisierung der Bewegungsmodi ist es allerdings nicht möglich, starke Beschleunigung oder Reduktion der Schwimmgeschwindigkeit innerhalb des Bewegungsmodus „Drift kontrolliert“ zu identifizieren, die ebenfalls als Reaktion zu werten sind. Basierend auf den Aktivitätsstufen ließen sich jedoch die Phasen mit starker Aktivität (SA) von denen mit niedriger Aktivität (WA & SD) abgrenzen (Abbildung 6). Im Ergebnis resultieren für „Drift kontrolliert“ zwei Submodi: „starke Aktivität“ und „schwache Aktivität“. Es stehen damit insgesamt sechs Bewegungsmodi zur Verfügung mit denen es gelang, Reaktionspunkte der Fische, charakterisiert durch einen Moduswechsel, zu lokalisieren (Abbildung 7).

3.3 Fischverhalten und Einfluss hydraulischer Parameter

Am Beginn des Beobachtungsbereiches war die Wahrscheinlichkeit einer starken Aktivität der Fische generell sehr gering. Die Fließgeschwindigkeit ist niedrig und nur ein minimaler SVG vorhanden. Im Hellen kommt es mit dem Anstieg des SVG stromabwärts vermehrt zu starker Aktivität, mit einem abrupten Anstieg kurz nach dem Meter 15 der x-Achse (Abbildung 6). Die Fließgeschwindigkeit unterschreitet hier die potenzielle Sprintgeschwindigkeit der Fische noch deutlich (Abbildung 7). Im Bereich des Übergangs des trichterförmigen Rinnenabschnitts (Teil 3 Abbildung 1) zum konstant schmalen Querschnitt (Teil 4 Abbildung 1) wird das erste Aktivitätsmaximum erreicht (Abbildung 6). In diesem Abschnitt befindet sich auch das SVG-Maximum und die Fließgeschwindigkeit beschleunigt über die Sprintgeschwindigkeit der Fische hinaus (Abbildung 7). Anschließend war ein Aktivitätsminimum bei Meter 20 zu verzeichnen, doch kurz vor dem Ende des Beobachtungsbereiches erhöht sich die starke Aktivität auf ein zweites Maximum (Abbildung 6). Minimum und letztes Maximum liegen im Rinnenabschnitt mit der höchsten Fließgeschwindigkeit. Diese ist hier in x-Richtung nahezu konstant. Ein SVG ist kaum vorhanden (Abbildung 7).

Im Dunkeln variierte das Verhältnis zwischen stark und schwach aktiven Fischen entlang der Rinne wesentlich weniger. Die im Hellen aufgetretene Abfolge von Minima und Maxima entlang der x-Achse, war nicht ausgeprägt. Es ist ein leichter Anstieg der Aktivität stromab vorhanden, jedoch ohne die beiden Bereiche starker Aktivität wie im Hellen. Das Minimum im zweiten Abschnitt der Versuchsrinne (Teil 4 Abbildung 1) fehlte (Abbildung 6).

Die Analyse der Bewegungsmodi im Verlauf der Rinne (Abbildung 7) zeigt, dass „Drift kontrolliert“ (Summe starke/schwache Aktivität) generell den mit Abstand dominierenden Bewegungsmodus bildete. Im konstant schmalen Bereich der Rinne, wo die Fließgeschwindigkeit die Sprintgeschwindigkeit der Fische überschreitet, kommt der Modus „Stromauf“, mit einer Ausnahme nicht mehr vor (Abbildung 7). Da die Fische hier nicht mehr in der Lage sein sollten, gegen die Hauptströmung stromaufwärts anzuschwimmen, ist dies plausibel. Nur selten bewegten sich Fische aktiv stromab oder verdrifteten unkontrolliert. Es überwog daher insgesamt die positiv rheotaktische Ausrichtung der Bachforellen in der Rinne (Abbildung 7). Im Hellen war die stärkste Variabilität entlang der Rinne im Modus „Stromauf“ und „Drift kontrolliert“ zu verzeichnen (Abbildung 7). Letzterer zeigte in Kombination mit „Starker Aktivität“ zwei Maxima. Eines beginnt etwa bei Meter 15,25, wo der

SVG erstmals den Wert von $0,3 \frac{m/s}{m}$ überschreitet. Hier waren auch besonders häufig Bewegungen stromauf, also aktive Flucht, zu beobachten. Während diese in x-Richtung mit Annäherung der Fließgeschwindigkeit an die Sprintgeschwindigkeit der Fische verschwanden, blieb der Anteil des Modus „Drift kontrolliert“ in der Zone mit Überlagerung des maximalen SVG und hoher Fließgeschwindigkeit lang auf hohem Niveau. Nach einem lokalen Abfall folgt dann ein zweiter Anstieg, bei konstant hoher Fließgeschwindigkeit und ohne SVG. (Abbildung 7)

Im Dunkeln ist die Dominanz des Bewegungsmodus „Drift kontrolliert“ über den gesamten Rinnenverlauf deutlich schwächer ausgeprägt als im Hellen. „Stromab aktiv“, „Stationär“ sowie „Stromauf“ kamen im vorderen, trichterförmigen Abschnitt, ohne SVG und mit niedriger Fließgeschwindigkeit, wesentlich häufiger vor. Im letzten Abschnitt der Versuchsrinne mit hoher Fließgeschwindigkeit nahm der Anteil des Modus „Drift kontrolliert“ zwar zu, die im Hellen hier völlig fehlenden Modi „Stromab aktiv“ und „Drift unkontrolliert“ waren aber ebenfalls vorhanden. Die Bewegungsmodi im Hellen und Dunkeln weichen somit über den gesamten Rinnenverlauf deutlich voneinander ab. (Abbildung 7).

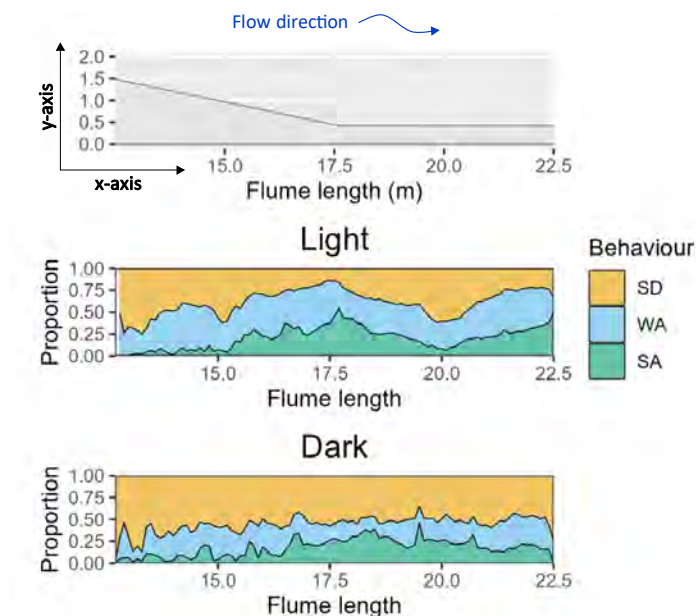
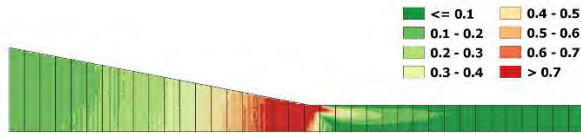


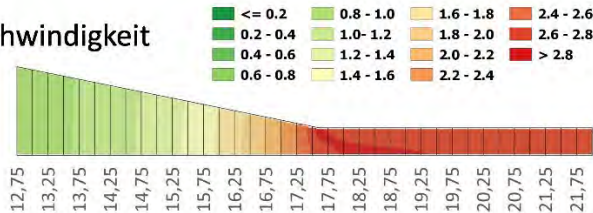
Abbildung 6: Anteile der drei Aktivitätsmodi „Starke Aktivität“ (SA), „Schwache Aktivität“ (WA) und „Nahezu passiv“ (SD) der Bachforellen entlang der x-Achse [m] des Beobachtungsbereiches der Versuchsrinne bei Tageslicht (Light - oben) und bei Dunkelheit (Dark - unten). Grafik übernommen aus *Elings et al. (eingereicht)*

Die Reaktionswahrscheinlichkeit im Hellen zeigte im ersten, trichterförmigen Abschnitt der Rinne stromabwärts (x-Achse) einen ansteigenden Trend, mit mehreren deutlichen und höheren Peaks ab Meter 15 bei einem $SVG > 0,3 \frac{m/s}{m}$ bis zum Übergang in den gleichmäßig engen Rinnenquerschnitt. Anschließend folgte eine etwa 1 m lange Strecke mit sehr geringer Reaktionswahrscheinlichkeit, bevor diese an Meter 19 erneut anstieg, obwohl sich die hydraulischen Verhältnisse in x-Richtung nicht änderten. Im Dunkeln reagierten die Fische insgesamt häufiger vor allem am Start des Beobachtungsbereiches, aber ohne deutliches räumliches Muster entlang der Versuchsrinne, außer dem Maximum bei Meter 15 wie im Hellen, wo der SVG den Wert von $0,3 \frac{m/s}{m}$ überschreitet. (Abbildung 8)

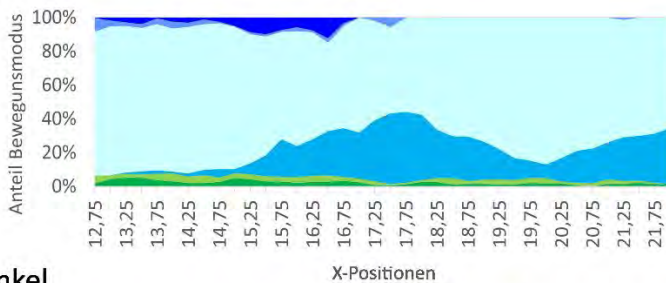
SVG



Fließgeschwindigkeit



Hell



Dunkel

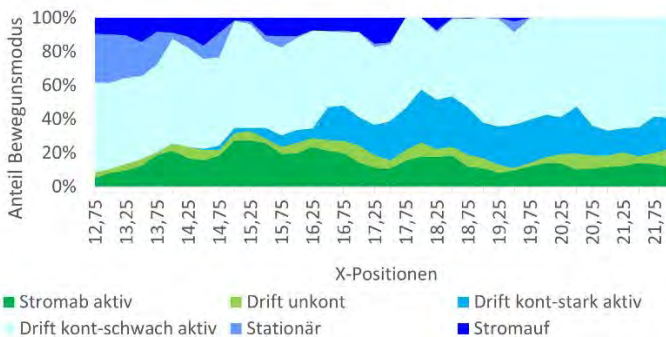
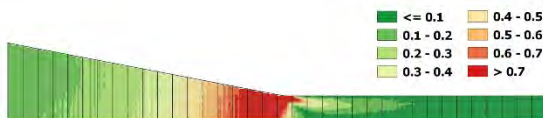
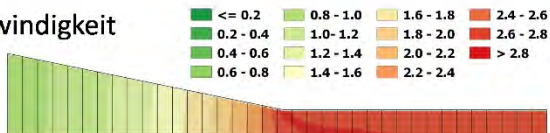


Abbildung 7: Fließgeschwindigkeit und SVG in der Versuchsrinne und die Anteile der Bewegungsmodi der Bachforellen entlang der x-Achse [m] bei Tageslicht (oben); Abkürzung „kont“ für „kontrolliert“

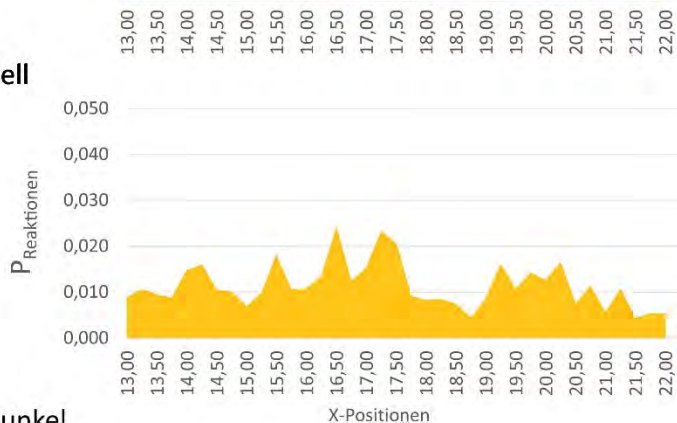
SVG



Fließgeschwindigkeit



Hell



Dunkel



Abbildung 8: Fließgeschwindigkeit und SVG in der Versuchsrinne und die Wahrscheinlichkeit einer Reaktion der Bachforellen entlang der x-Achse [m] bei Tageslicht (oben) und im Dunkeln (unten)

4 Diskussion

Das final umgesetzte Design der Versuchsrinne, in Kombination mit dem Infrarot-Videotracking, ermöglichte die Erfassung der Schwimmpfade der Bachforellen bei der Passage hydraulischer Bedingungen ähnlich denen in Turbinen- und Pumpeneinläufen unter Tageslichtbedingungen und im Dunkeln. Auf Basis der Auswertung der Trackingdaten mit mathematischen Algorithmen war das Verhalten der Fische anhand der beiden Komponenten Bewegungsmodus und Aktivität quantitativ beschreibbar und räumlich differenzierte Verhaltensmuster abgrenzbar. Die Klassifikation des Fischverhaltens durch die Kombination der erfassten Bewegungsmodi mit der Schwimmleistung als Aktivitätsmaß ermöglichte es, die Position von Fischreaktionen exakt zu lokalisieren und mit Bezug auf die hydraulischen Bedingungen in der Versuchsrinne zu analysieren. Die Plausibilität des verfolgten quantitativen Ansatzes zur Verhaltenscharakterisierung wird durch das Fehlen des Bewegungsmodus „stromauf“ im Hochgeschwindigkeitsbereich sowie die reproduzierbaren Verhaltensmuster bestätigt.

Die Bachforellen stiegen über die Rinne überwiegend positiv rheotaktisch orientiert ab. Im Dunkeln war allerdings der geringe Anteil negativ orientierter Phasen deutlich höher als im Hellen. Verhaltensänderungen der Bachforellen bei ihrem Abstieg über die Versuchsrinne standen in enger räumlicher Beziehung mit den hydraulischen Bedingungen. Sowohl im Hellen als auch im Dunkeln stieg der Anteil der Fische im Modus „Drift kontrolliert“ mit starker Aktivität, dort wo der SVG einen Wert von $0,3 \frac{m/s}{m}$ überschritt. Dieses deutet stark darauf hin, dass es sich hierbei um einen Grenzwert handelt, ab dem bei absteigenden Bachforellen von Verhaltensreaktionen, häufig verbunden mit erhöhter Schwimmaktivität auszugehen ist. VOWLES & KEMP (2012) kamen zu ähnlichen Ergebnissen, mit Meidungsreaktionen absteigender Bachforellen bei einem SVG von $0,2 \frac{m/s}{m}$ im Hellen und $0,4 \frac{m/s}{m}$ im Dunkeln.

Im Hellen waren im letzten Rinnenabschnitt (Teil 4) trotz Abwesenheit eines SVG, aber bei einer Fließgeschwindigkeit größer als der Sprintgeschwindigkeit der Fische vergleichbar viele Reaktionen sowie ein Wechsel von schwacher zu starker Aktivität zu verzeichnen wie im Abschnitt des maximalen SVG. Die eingangs formulierte Hypothese „Stromabwärts wandernde Fische reagieren unabhängig eines SVG auf eine hohe Fließgeschwindigkeit, die ihre Sprintgeschwindigkeit übersteigt, indem sie ihre Schwimmaktivität ändern“

ist auf Basis dieser Ergebnisse für die Tageslichtsituation bestätigt. Die dominierende Reaktion ist dabei der Wechsel zu starker Aktivität innerhalb des Bewegungsmodus „Drift kontrolliert“. Der überwiegende Anteil der Fische driftet allerdings kontrolliert mit schwacher Aktivität. Generell waren die Fische im Hellen fast ausschließlich positiv rheotaktisch orientiert. Wie lang die Dominanz des Bewegungsmodus „Drift kontrolliert“ unter diesen hydraulischen Bedingungen anhalten würde, ist anhand der vorliegenden Daten aufgrund der Verdriftung der Tiere und damit kurzen Aufenthaltszeit im Hochgeschwindigkeitsabschnitt nicht ableitbar.

Es gibt Belege dafür, dass Rheotaxis bei Fischen und vor allem der Verbleib an einer Stelle (station holding) auf verschiedenen Sinnen beruht (Coombs *et al.* 2020). Die Bedeutung visueller Reize wird dabei aktuell noch immer kontrovers diskutiert (Miles *et al.* 2023). Die Tatsache, dass in den Versuchen im Hellen im Gegensatz zum Dunkeln die Schwimmaktivität der Bachforellen im letzten Rinnenteil wieder steigt, ist ein klares Indiz für den Einfluss der optischen Wahrnehmung, da sich bis auf die Beleuchtungsverhältnisse die Umweltbedingungen zwischen den Versuchen nicht unterschieden. Im Hellen sind Fische in der Lage, ihre Positionsänderung anhand visueller Marken wahrzunehmen (Kubo *et al.* 2014, Matsuo *et al.* 2021). Eine hohe Schwimmaktivität zur Verlangsamung der Abdrift ist eine ökologisch sinnvolle Reaktion. Ist die optische Orientierung stark eingeschränkt, wie in den Dunkelversuchen, fehlt die räumliche Referenz und die Fische können nicht darauf reagieren. Ein weiteres Indiz für den starken Einfluss der Beleuchtungsverhältnisse auf das Verhalten der Fische sind die Unterschiede in den Bewegungen der Bachforellen zwischen Hell- und Dunkelversuchen. Während die Fische die Rinne im Hellen vor allem kontrolliert driftend und daher positiv rheotaktisch passierten, besonders wenn die Fließgeschwindigkeit ihre Sprintgeschwindigkeit überschritt, schwamm ein nicht unerheblicher Teil der Bachforellen im Dunkeln aktiv stromab oder driftete passiv, war also negativ rheotaktisch orientiert. Auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse können Verhaltensregeln (Algorithmen) formuliert werden, welche im Rahmen von RETERO zur weiteren Optimierung der numerischen Modelle (Powalla *et al.* 2021) für die Prognose von Fischschäden bei der Turbinen- und Pumpenpassage nutzbar sind. Durch Berücksichtigung der experimentell ermittelten Verhaltensmuster sollte sich die Prognosequalität weiter verbessern.

5 Literatur

- Bell, M.C., DeLacy, A.C., Paulik G.J. (1967): A compendium on the success of passage of small fish through turbines. Conducted under Contract No. DA-35-026-CIVENG-66-16 with Corps of Engineers.
- Bierschenk, B., Pander, J., Müller, M., Geist, J. (2018): Fish injury and mortality at pumping stations: A comparison of conventional and fish-friendly pumps. – *Marine and Freshwater Research* 70. (<https://doi.org/10.1071/MF18116>)
- Bowmaker, J.K., Kunz, Y.W. (1987): Ultraviolet receptors, tetrachromatic colour vision and retinal mosaics in the brown trout (*Salmo trutta*): Age-dependent changes. *Vision Research* 27, 2101–2108. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(87\)90124-6](https://doi.org/10.1016/0042-6989(87)90124-6)
- Coombs, S., Bak-Coleman, J., Montgomery, J., (2020): Rheotaxis revisited: a multi-behavioral and multisensory perspective on how fish orient to flow. *Journal of Experimental Biology* 223, jeb223008. <https://doi.org/10.1242/jeb.223008>
- Cox, R., Kingsford, R. Suthers, I., Felder, S. (2023): Fish Injury from Movements across Hydraulic Structures: A Review. – *Water* 15, S. 1888.
- Ebel, G. (2013): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen. Handbuch Rechen- und Bypasssysteme, Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie 4.
- Elings J., Kopecki I., Wagner F., Mawer R., Bruneel S., Pauwels I., Goethals P, (eingereicht): Categorizing fish reactions in a laboratory flume using Hidden Markov, *Applied Ecology*
- Enders, E. C., Gessel, M. H., Williams, J. G. (2009): Development of successful fish-passage structures for downstream migrants requires knowledge of their behavioural responses to accelerating flow. – *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 66, 2109–2117. (DOI:10.1139/F09-141)
- Enders, E., Gessel, M. H., Anderson, J. J., Williams, J. G. (2012): Effects of Decelerating and Accelerating Flows on Juvenile Salmonid Behavior. – *Transactions of the American Fisheries Society* 141, p. 357-364. (DOI: 10.1080/00028487.2012.664604)
- Finch, O.-D., Vollmerding, J. (2021): Leitfaden zur Verwendung fischschonender Pumpen (Guideline for the Application of Fish Friendly Pumps; in German).
- Geiger, F., Cuchet, M., Rutschmann, P. (2020): Zur Berechnung der Schädigungsraten von Fischen bei der Turbinenpassage. *Wasserwirtschaft* 33–40. <https://doi.org/10.1007/s35147-020-0757-4>
- Haro, A., Odeh, M., Noreika, J., Castro-Santos, T. (1998): Effect of water acceleration on downstream migratory behavior and passage of Atlantic salmon smolts and juvenile American shad at surface bypasses. – *Transactions of*

- the American Fisheries Society. 1/127: 118–127. (<https://afspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1577/1548-8659%281998%29127%3C0118%3AEOWAOD%3E2.0.CO%3B2.>)
- Keuneke, R., Massmann, E. (2021): Ziele für den Fischschutz und Fischabstieg in Deutschland. – Korrespondenz Wasserwirtschaft 14, 786–789.
- Keuneke, R., Massmann, E., Naumann, S. (2022): Fischschutzziele in Europa. – Korrespondenz Wasserwirtschaft 4, 238–242.
- Kubo, F., Hablitzel, B., Dal Maschio, M., Driever, W., Baier, H., Arrenberg, A.B. (2014): Functional Architecture of an Optic Flow-Responsive Area that Drives Horizontal Eye Movements in Zebrafish. *Neuron* 81, 1344–1359. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.02.043>
- Lehmann, B., Adam, B., Engler, O., Hecht, V., Schneider, K. (Eds.; 2016): Ethohydraulische Untersuchungen zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen, Ergebnisse des F+E-Vorhabens (FKZ 3513 85 0300) des Bundesamtes für Naturschutz. Bonn-Bad Godesberg.
- Matsuo, M., Kamei, Y., Fukamachi, S. (2021): Behavioural red-light sensitivity in fish according to the optomotor response. *Royal Society Open Science* 8, 210415. <https://doi.org/10.1098/rsos.210415>
- Miles, J., Vowles, A. S., Kemp, P. S. (2023): The influence of flow velocity on the response of rheophilic fish to visual cues. – *PLOS ONE* 18, e0281741. (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281741>)
- Monten (1955): Om utvandrande laxungars möjligheter att oskadda passera genom Kraftverksturbiner (preliminärt meddelande). *Vandringfiskutredningen, Meddelande*.
- Powalla, D., Hoerner, S., Cleyne, O. and Thévenin, D. (2022): A numerical approach for active fish behaviour modelling with a view toward hydropower plant assessment. *Renew. Energ.* 188, 957–966.
- Radinger, J., van Treeck, R., Wolter, C., (2021): Evident but context-dependent mortality of fish passing hydroelectric turbines. *Conservation Biology*. <https://doi.org/10.1111/cobi.13870>
- Vowles, A. S., Kemp, P. S. (2012): Effects of light on the behaviour of brown trout (*Salmo trutta*) encountering accelerating flow: Application to downstream fish passage. – *Ecological Engineering* 47, 247–253. (<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.021>)
- Vowles, A.S., Karlsson, S.P., Uzunova, E.P., Kemp, P.S. (2014a): The importance of behaviour in predicting the impact of a novel small-scale hydropower device on the survival of downstream moving fish. *Ecological Engineering* 69, 151–159.
- Vowles, A. S., Anderson, J. I., Gessel, M. H., Williams, J. G., Kemp, P.S. (2014b): Effects of avoidance behaviour on downstream fish passage through areas of accelerating flow when light and dark. *Animal Behaviour*. 0/92: 101–109. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003347214001237>)

Wagner, F., Keuneke, R., Kampa, E., Kemper, M., Naumann, S. (2023): UBA-Texte 113/2023 – Abschlussbericht: Forum Fischschutz und Fischabstieg: Ergebnisse und Ausblick. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18385.92000>

Autoren:

Dr. rer. nat. Falko Wagner ^[1]

^[1] Institut für Gewässerökologie und
Fischereibiologie (IGF) Jena
Sandweg 3
D-07745 Jena

Tel.: +49 3641 637745

Fax: +49 3641 219545

E-Mail: info@igf-jena.de

Dipl.-Ing. Tom Rößger ^[2]

Dr.-Ing. Stefan Hoerner ^[3,4]

Dr.-Ing. Ianina Kopecki ^[5]

Jelger Elings ^[6]

M.Sc. Dennis Powalla ^[4]

Dipl.-Ing. Márcio Salgueiro Roth ^[2]

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm ^[2]

^[2] Technische Universität Dresden
Institut für Wasserbau und Technische
Hydromechanik (IWD)
August-Bebel-Straße 30
D-01219 Dresden

^[3] Université Grenoble-Alpes
CNRS, Grenoble-INP, LEGI
1209-1211 rue de la piscine
Domaine Universitaire
F-38400 Saint-Martin-d'Hères

^[4] Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik
Universitätsplatz 2

^[5] SJE Ecohydraulic Engineering GmbH
Dilleniusstraße 13
D-71522 Backnang

^[6] Ghent University
Department of Animal Sciences and
Aquatic Ecology, Faculty of Biosystems
Engineering
Coupure links 653
B-9000 Gent

Technische Hydromechanik

Technische Hydromechanik 1 Grundlagen

von Gerhard Bollrich
8., aktualisierte Auflage 2019.
448 S. A5. Gebunden.
62,00 EUR
ISBN 978-3-410-29169-5

Aus dem Inhalt:

- Physikalische Eigenschaften des Wassers
- Stationäre Strömung in Druckrohrleitungen
- Stationäres Fließen in offenen Gerinnen
- Instationäre Strömungen
- Ausfluss aus Gefäßen und unter Schützen; Retention
- Abfluss über Wehre und Überfälle

Technische Hydromechanik 2 Spezialfälle

Herausgeber: Detlef Aigner, Dirk Carstensen
2., vollständig überarbeitete Auflage 2015. ca. 384 S. A5. Gebunden.
ca. 59,00 EUR
ISBN 978-3-410-22209-5

Aus dem Inhalt:

- Plötzlich veränderliche Strömungen in offenen Gerinnen
- Theorie der Wellenbewegung
- Dichteströmungen
- Geschiebe
- Flüssigkeitsstrahlen
- Druckrohrnetzrechnungen
- Feststofftransport
- Eis im Wasserbau

Technische Hydromechanik 3 Aufgabensammlung

von Helmut Martin, Reinhard Pohl
4., überarbeitete und erweiterte Auflage 2014.
260 S. A5. Gebunden.
28,00 EUR
ISBN 978-3-410-24130-0

Aus dem Inhalt:

- über 80 Aufgaben und Lösungen
- hydraulische Modellbildung
- Anwendung von Berechnungsalgorithmen
- analytische und grafische Lösungsverfahren

Technische Hydromechanik 4 Numerische und hydraulische Modelle

Herausgeber: Helmut Martin, Reinhard Pohl
3., überarbeitete Auflage 2015.
406 S. A5. Gebunden.
74,00 EUR
ISBN 978-3-410-24172-0

Aus dem Inhalt:

- Hydraulisches Versuchswesen
- Gerinneströmung
- Hydraulik der Wasserbehandlungsanlagen
- Hydraulische Probleme an ausgewählten Betriebseinrichtungen



Mehr Infos und Bestellung:

beuth.de/go/hydraulik

E-MAIL kundenservice@beuth.de

TELEFON +49 30 58885700-70

Leitwerke und Einschwimmsperren für Fische an Wehranlagen

Niklas Schwiersch
Markus Grünzner
Stephan Heimerl
Thorben Frener

Im Unterwasser von Wehranlagen kann es aus vielfältigen Gründen zu gewässerökologischen Sackgassen kommen. Um ein Einschwimmen stromauf wandernder Organismen in diese zu vermeiden, bedarf es geeigneter Leitwerke und Einschwimmsperren hin zum Einstieg der Fischaufstiegsanlagen. Dies kann u. a. mittels einer physikalisch-hydraulischen Barriere bewerkstelligt werden. Dieser Beitrag erläutert grundlegende Gedanken für eine derartige Barriere und veranschaulicht ihre hydraulische Optimierung anhand eines Anwendungsbeispiels.

Stichworte: Durchgängigkeit, Fischaufstieg, Leitströmung, Leitbühne, Ethohydraulik

1 Motivation und Zielstellung

Es ist unstrittig, dass Wehranlagen in Fließgewässern Einbauten darstellen, welche sowohl die aufwärts als auch die abwärts gerichtete Durchgängigkeit für die aquatische Fauna einschränken können. Daher werden in der Praxis seit Jahrzehnten große Anstrengungen unternommen, die sichere Durchgängigkeit (wieder-) herzustellen. Dafür werden u. a.

- auf die örtlichen Gegebenheiten angepasste Fischaufstiegsanlagen (FAA) errichtet,
- Maßnahmen im Anströmbereich von Wasserentnahmen vorgesehen, welche das Einschwimmen von Lebewesen z. B. in die Maschinensätze von Wasserkraftanlagen physikalisch unterbinden (Fischschutz) und

- Fischabstiegsbauwerke in Form von Bypässen (Rohrleitungen, Überfällen oder Rinnen) ins Unterwasser (UW) hergestellt.

Bei FAA spielt neben der Passierbarkeit der Anlage ihre Auffindbarkeit eine zentrale Rolle [1]. Denn ist eine FAA für aufwärts wandernde Organismen nicht oder unzureichend auffindbar, ist die Durchgängigkeit nicht gegeben oder trotz Bauwerk eingeschränkt. Entgegen der z. T. idealisierten Regelbauweisen (vgl. *DWA (2014)*) ist es aufgrund von räumlichen, gewässermorphologischen oder auch betrieblichen Gründen nicht immer möglich, den Einstieg in die FAA unmittelbar am Wehr vorzusehen. So muss dieser mancherorts ein Stück ins UW verschoben werden und es ergeben sich so potenzielle gewässerökologische Sackgassen.

Um die Auffindbarkeit dennoch herzustellen, bedarf es weiterer Strukturen, an welche folgende Anforderungen zu stellen sind:

- Es muss eine eindeutige hydraulische Leitwirkung hin zum Einstieg der FAA ausgebildet sein und
- das Einschwimmen aquatischer Organismen, z. B. Fische, in diese Sackgassen ist während der relevanten Betriebszeiten der FAA (i. d. R. Wasserspiegellagenbereich zwischen W_{30} und W_{330}) weitestgehend zu verhindern.

Die sogenannte physikalisch-hydraulische Barriere (Bild 1) stellt hierfür eine wirksame Struktur dar, welche als Sohlenschwelle einer physikalischen und mit ihrer Überfallströmung auch einer hydraulischen Barriere entspricht und gleichzeitig durch die Strömungslenkung die Auffindbarkeit der FAA nennenswert verstärken soll.

2 Grundlegende Gedanken

2.1 Gewässerökologische Barrierewirkung

Eine Barrierewirkung liegt hydraulisch dann vor, wenn die lokale Fließgeschwindigkeit die Sprintgeschwindigkeit der gewässertypischen Fischzönose übersteigt. Sie ergibt sich außerdem auch, wenn die Bedingungen im Bereich der Sperre so sind, dass die Fische diese auch nicht durch einen Sprung überwinden können, wozu u. a. eine fehlende Anlaufstrecke mit unzureichender Wassertiefe, eine entsprechende Wasserspiegeldifferenz zwischen OW zu UW oder hohe Fließgeschwindigkeiten im Überfallbereich zählen.

Für den Entwurf einer solchen Barriere bedeutet dies das Erfordernis eines begrenzten Aufstaus und der lokalen Beschleunigung des fließenden Wassers.

2.2 Hochwasserneutralität

Zwar dienen physikalisch-hydraulische Barrieren vornehmlich der gewässerökologischen Aufwertung eines Gewässers, doch gilt für sie - wie für eine Vielzahl weiterer Maßnahmen im Gewässer - das Verschlechterungsverbot nach europäischer Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie. Demnach dürfen derlei Maßnahmen keinen bzw. nur einen vernachlässigbar kleinen, negativen Einfluss auf die lokalen Hochwasserverhältnisse besitzen.

In der Folge sollte der stauende Effekt der Barriere bestenfalls nur für das Betriebsregime der FAA bestehen.

2.3 Unterhalt und Betrieb

Aus der betrieblichen Perspektive bestehen Anforderungen hinsichtlich Kosteneffizienz. Demnach sollte derlei Barriere nach den Herstellungskosten möglichst geringe, besser keine Unterhaltungs- oder gar Betriebskosten verursachen.

Daraus leitet sich die Anforderung einer robusten und nach Möglichkeit selbstreinigenden Konstruktion ab.

2.4 Vorauswahl eines Bauwerktyps

Vor dem Hintergrund der mannigfaltigen Anforderungen bietet sich die Konstruktion einer Sohlenschwelle an. Als Überfallbauwerk erzeugt sie eine gezielte Beschleunigungsströmung in Abhängigkeit der Überfallhöhe und ist bei großen Abflüssen dennoch sehr robust in Bezug auf die Überfallhöhe.

2.5 Entwurfsgrößen

Zur gleichzeitigen Induktion einer Barrierewirkung für die gewässerökologische Sackgasse und einer unterstützenden Leitströmung zum Einstieg in die FAA lassen sich u. a. folgende geometrische Entwurfsgrößen variieren:

- die Trassierung der Barriere im Gewässer,
- der Höhenverlauf der Überfallkante,
- der Querschnitt der Sohlenschwelle,
- die Abströmverhältnisse aus der FAA heraus und
- die Ausgestaltung des Nahbereichs im Unterwasser.

Weiterhin sind unterschiedliche Bauweisen, wie z. B. als monolithische Betonkonstruktion oder gesetzte Steinreihe, vorstellbar, die in geeigneter Weise dauerhaft in die Gewässersohle eingebunden werden müssen.

3 Anwendungsbeispiel

3.1 Allgemeines

Im Zuge eines Wasserkraftprojekts im Allgäu soll die gewässerökologische Durchgängigkeit an einem Wehrstandort hergestellt werden. Der Planung sind die Fischzönose der Barbenregion und zusätzlich der Huchen zugrunde zu legen. Folglich ist von schwimmstarken Fischarten auszugehen, von denen in Sonderfällen auch einige begrenzt springen können.

Es ist angedacht, eine FAA in Schlitzpassbauweise zu errichten. Aufgrund der örtlichen Verhältnisse wird die Positionierung der FAA am linksufrigen Gleitufer bevorzugt. Die FAA reicht bis zu ca. 90 m in das UW des Wehrstandorts, um nicht in den oberstrom bestehenden, besonders schützenswerten Auwald einzugreifen. Um der Entstehung einer gewässerökologischen Sackgasse vorzubeugen, wird daher am Einstieg in die FAA eine physikalisch-hydraulische Barriere vorgesehen, deren Entwicklung Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen ist.

Vor dem Erfahrungshintergrund zu Projekten ähnlicher gewässerökologischer Rahmenbedingungen werden die folgenden Parameter planerisch als nicht durchgängig angenommen:

- Fließgeschwindigkeit: >2,4 m/s
- Höhendifferenz der Wasserspiegellagen von OW zu UW: 0,30 m

3.2 Ausgangsentwurf

Unter Verwendung analytischer Ansätze wurde die physikalisch-hydraulische Barriere vordimensioniert (Abbildung 1). Hierbei wurde darauf geachtet, dass sie in einem Winkel von ca. 30° bis 45° gegenüber der Gewässerachse geneigt ist und so eine langgestreckte Leitwirkung für rechtsufrig aufwandernde Fische erzeugt. Darüber hinaus weist sie einen in der Höhe gegliederten Querschnitt auf, welcher insbesondere geringe Abflüsse im Einstiegsbereich der FAA konzentrieren soll. Die Schwelle ragt im Mittel ca. 0,30 m aus der UW-Sohle heraus.

Die Wirksamkeitsuntersuchung der entworfenen Barriere erfolgt für definierte Lastfälle (je zwei Lastfälle für Mindestwasser- und Mittelwasserverhältnisse) mittels 3-D-HN-Simulation unter Verwendung der Software FLOW-3D Hydro.

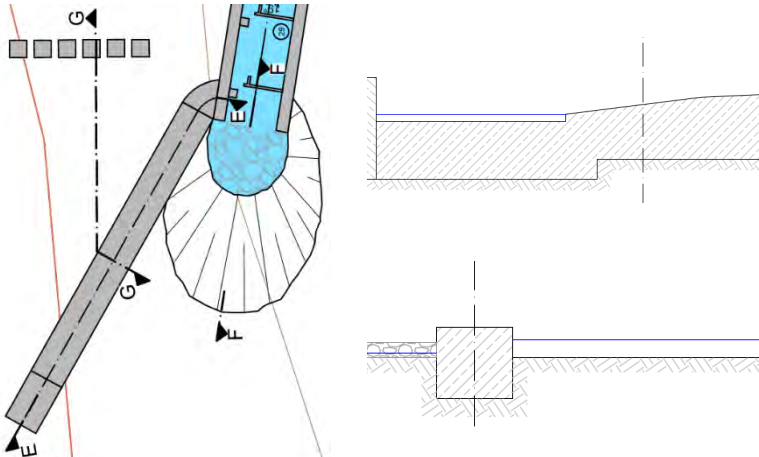


Abbildung 1: Ausgangsentswurf der physikalisch-hydraulischen Barriere im Grundriss (links) sowie im Quer- und Längsschnitt (rechts)

3.3 Hydraulische Optimierung

Die Simulationsergebnisse zum Ausgangsentswurf zeigen für geringe Abflüsse aus dem Wehrfeld die prinzipielle Wirksamkeit der Barriere. Für höhere Abflüsse deuten sich jedoch die Unwirksamkeit der oberstromigen Abflusskonzentration sowie flächig hohe Geschwindigkeiten im Unterwasser an. Insbesondere letztgenanntes unterbricht für stromauf wandernde Organismen die Leitwirkung vom rechten zum linken Ufer mit dem FAA-Einstieg. Wie in Abbildung 2 links anhand der roten Flächen verdeutlicht, werden diese nicht zur FAA geleitet, sondern tendenziell durch hohe Fließgeschwindigkeiten nach UW verdriftet. Ursächlich hierfür ist die gemeinsame Wirkung von kleinen Abflusstiefen bei einem durch die örtliche Topografie bedingten großen Längsgefälle. Im Hinblick auf die weitere Optimierung bedeutet dies, dass die Fließgeschwindigkeit im Unterwasser für derlei Lastfälle zu reduzieren ist. Um dem zu genügen, werden iterativ und chronologisch die folgenden Adaptionen vorgenommen:

- Entfernen der Steine im OW
- Steigerung der Barrierenneigung auf 45°

- Harmonisierung des Querschnitts
- Ergänzung einer Vertiefung im UW zur lokalen Energieumwandlung

Das Entfernen der Steine im Oberwasser mindert die Abflusskonzentration am linken Ufer insbesondere für die größeren Abflüsse. Daher wird die Buhne gleichmäßiger angeströmt.

Mit der Änderung der Barrierenneigung gehen zwei Effekte einher. Zum einen werden die Geschwindigkeitsvektoren der Überfallströmung um ca. 15° in Richtung der Gewässermitte gedreht und zum anderen die ufernahen Schubspannungen für hohe Abflüsse (so u. a. auch für Hochwasser) reduziert.

Durch die Harmonisierung des Barrierenquerschnitts ist die Überfallbreite für alle Lastfälle konstant. Dies bewirkt eine Verbreiterung des Abflussquerschnitts und eine Reduktion der Fließgeschwindigkeiten im UW. Gleichsam sinkt auch die Geschwindigkeit des Überfallstrahls bei kleinen Abflüssen, so dass die optimale Höhenlage der Oberkante diskret zu finden ist.

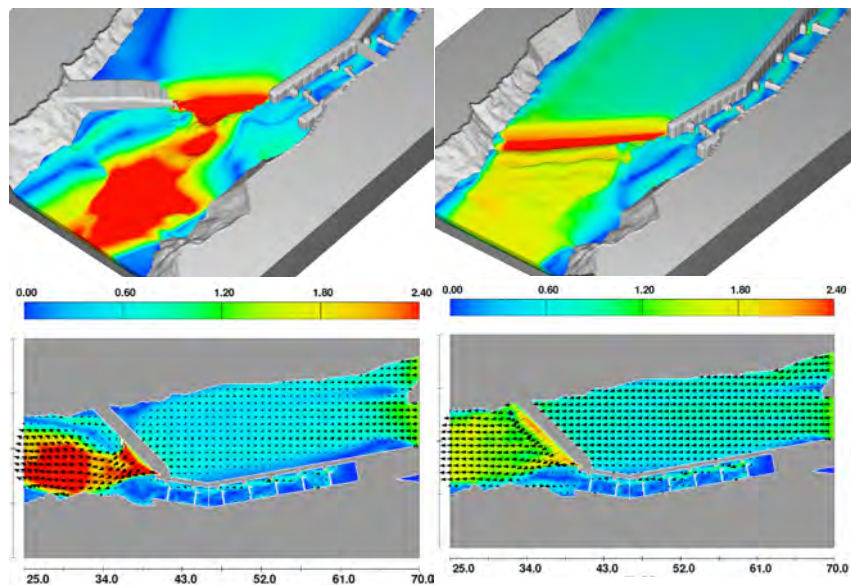


Abbildung 2: Fließgeschwindigkeit in [m/s] vor (links) und nach (rechts) der hydraulischen Optimierung (Quelle: Fichtner)

Aus der Vertiefung im UW resultieren die lokale Energieumwandlung unmittelbar hinter der Barriere und die weitere Minderung der Fließgeschwindigkeit im UW durch eine gleichmäßige Abströmung. Weiterhin unterstützt die entstehende Turbulenzwalze die Unpassierbarkeit der Barriere und die Bäumung von potenziellen Sedimenten.

Im Ergebnis der Optimierung (Abbildung 2, rechts) wird am Standort dieses Anwendungsbeispiels eine horizontale Sohlenschwelle geplant, welche sowohl die angestrebten Fließgeschwindigkeiten von über 2,4 m/s als auch eine Differenz der Wasserspiegellagen von über 0,30 m im relevanten Betriebsbereich erreicht.

Bei größeren Abflüssen und somit größeren Wassertiefen wirkt die Sohlenschwelle nur noch als lokales Rauheitsselement der Gewässersohle. Somit erzeugt sie keine negativen Auswirkungen z. B. hinsichtlich der HQ₁₀₀-Überflutungsflächen.

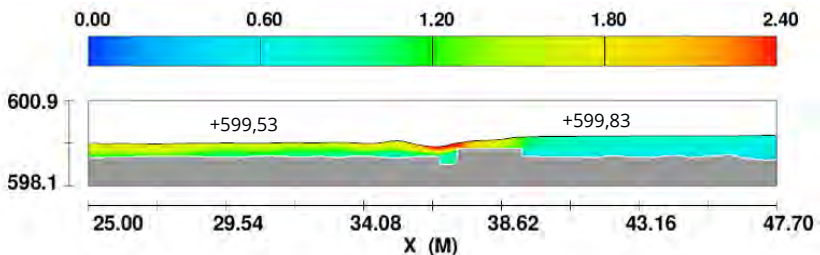


Abbildung 3: Wasserspiegellage in [m NHN] und Fließgeschwindigkeit in [m/s] nach der hydraulischen Optimierung für den kritischen Lastfall im Längsschnitt (Quelle: Fichtner)

4 Weiterführende Optimierungsansätze

Zusätzlich zu den beschriebenen Schritten der konstruktiven Optimierung sind weitere vorstellbar, welche sowohl den gewässerökologischen als auch den weiteren Anforderungen dienen. Diese sind u. a. die geometrische Optimierung des FAA-Einstiegs zur Stärkung des linksufrigen Strömungsimpulses und das Vorsehen einer aufgelösten Steinreihe im UW zur Freihaltung eines linksufrigen und präferierten Wanderkorridors.

Diese sind Gegenstand der aktuellen Planungsschritte, sodass ihre Wirkung noch aussteht.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Zur Vermeidung gewässerökologischer Sackgassen an Wehranlagen bedarf es mancherorts wirksame Leitwerke hin zum FAA-Einstieg und Einschwimmsperren.

Für diese Aufgaben stellt die hier sowohl konzeptionell als auch praktisch vorgestellte physikalisch-hydraulische Barriere eine geeignete Lösung dar.

Weiterhin zeigt sich, dass ihre konstruktive Ausgestaltung die örtlichen Randbedingungen einbeziehen muss und sie somit das Ergebnis einer planerischen Iteration sein kann.

Die ausstehenden Optimierungsschritte werden zu gegebenem Zeitpunkt zu präsentieren und zu diskutieren sein.

Literatur

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

Autoren:

Dr.-Ing. Niklas Schwiersch
Dipl.-Ing. Markus Grünzner
Prof. Dr.-Ing. Stephan Heimerl
Thorben Frener, M. Sc. (ehemals Fichtner)

Fichtner Water & Transportation GmbH
Sarweystraße 3
70191 Stuttgart

Tel.: +49 711 8995 1592
E-Mail: niklas.schwiersch@fwf.fichtner.de
markus.gruenzner@fwf.fichtner.de
stephan.heimerl@fwf.fichtner.de

Hydronumerische Untersuchungen zur Optimierung von Wasserbauwerken im Bestand am Beispiel der Wehranlage Pulverweiden in Halle/Saale

Karsten Jacob, Rüdiger Richter, Stefan Kanne, David Velasco

Stichworte: Strömungssimulation, Hydronumerische
Untersuchungen, Optimierung von
Wasserbauwerken, Schadensbeurteilung

1 Einleitung

Die Wehranlage Pulverweiden kommt einer wichtigen Bedeutung in der Wasserbewirtschaftung der Stadt Halle/Saale zu. Aufgrund ihrer Bauweise, Funktion sowie des Bauwerkszustandes handelt es sich bei der Wehranlage um ein „Systemkritisches Bauwerk“. Die Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebes hat höchste Priorität für die Region.

Das Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg beabsichtigt die Wehranlage Pulverweiden grundhaft instand zu setzen. Aufgrund mehrmaliger Hochwasserereignisse gingen zum Teil tiefreichende Schädigungen am Massivbau der Anlage hervor, die zur Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebes und zum Erreichen der geplanten Nutzungsdauer bauliche Maßnahmen erforderlich machen.

Anhand von hydronumerischen Voruntersuchungen konnten die im Rahmen der Bauwerksprüfung festgestellten Schäden im Bereich des Tosbeckens hinsichtlich der Ursachen beurteilt werden. Die Ergebnisse zeigten darüber hinaus bauliche Maßnahmen auf, die zur Optimierung der Anlage in hydraulischer Sicht und damit zur Gewährleistung der erforderlichen Dauerhaftigkeit notwendig werden. Die durchgeführten hydronumerischen Voruntersuchungen bilden eine wesentliche Grundlage für die weiterführenden Planungen zur Grundinstandsetzung der Wehranlage.

2 Bestandssituation

2.1 Standort

Das Wehr Pulverweiden befindet sich an einem komplex verzweigtem Gewässersystem in mitten des Stadtzentrums Halle und liegt am Südenende der langgestreckten Flussinsel „Pulverweiden“ (Abbildung 1). Die Topographie des Standortes in den saaleauen-typischen Niederungen sowie die verschiedenen Staustufen entlang der Saale haben maßgeblichen Einfluss auf die Abflussmengen und das Betriebsregime der Wehranlage.



Abbildung 1: Bauwerksansicht vom Unterwasser

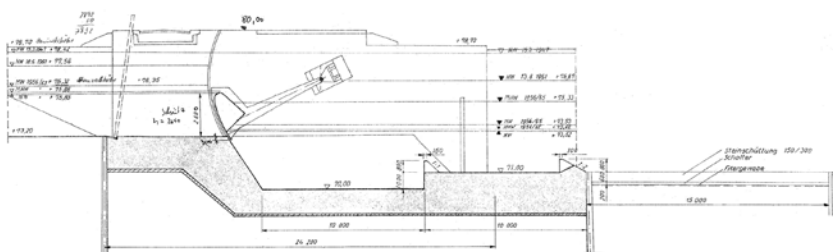


Abbildung 2: Längsschnitt, Bestandsunterlagen 1974

2.2 Bauwerk

Die Wehranlage Pulverweiden wurde 1986 als zweifeldriges Segmentwehr mit einer Breite von 17,50 m je Wehrfeld in Betrieb genommen. Der maximale Durchfluss der Anlage beträgt 300 m³/s. Das ca. 30 m lange Bauwerk setzt sich aus massiven, größtenteils unbewehrten Wehrwänden und einer bewehrten, auftriebssicheren Sohle zusammen. Zur Energieumwandlung wurde ein Tosbecken und eine Auslaufsohle mit zweireihiger Zahnschwelle gewählt (Abbildung 2). Als Verschlüsse dienen Drucksegmente in Stahlbauweise, die im Hochwasserfall vor Ort bedient werden müssen. Am Oberwasser der Anlage überführt ein Brückenbauwerk.

2.3 Bauwerkszustand

Im Rahmen der letzten Bauwerksinspektion 2019 wurde der Bauwerkszustand auf Grund von erheblichen Beschädigungen des Massivbaus mit einer Zustandsnote 4,0 bewertet. Dabei handelt es sich um Abrasionschäden im Bereich der Zahnschwelle mit tiefreichendem Materialabtrag in der Sohle des Tosbeckens (Abbildung 3). In der Wasserwechselzone der Wehrwände sind ebenfalls Schäden durch Abrasionen vorhanden.

Im selben Jahr führte die BAW Materialuntersuchungen an den geschädigten Bereichen des Wehrbauwerkes durch. Der Widerstand des vorhandenen Betons gegenüber Hydroabrasion wurde anhand des festgestellten Schadensbildes sowie der ermittelten Materialkennwerte als gering eingestuft. Die eigentliche Schadensursache konnte anhand der vorliegenden Strömungsverhältnisse grundsätzlich nachvollzogen werden. Die BAW empfahl dazu weitere Untersuchungen mit dem Ziel durchzuführen, die Einwirkungen aus Abrasionen zu minimieren und eine hydraulische Optimierung des Bauwerkes herbeizuführen.



Abbildung 3: Abrasionsschäden im Wehrfeld, BAW (2020)

3 Hydronumerische Simulationen

3.1 Methodik und Ziele

Mit einem 3D-HN-Modell werden die Strömungsverhältnisse im Bauwerk berechnet und sollen die Schadensmechanismen im Modell identifiziert sowie mögliche Umbauvarianten geprüft werden.

Die Ziele der Untersuchung sind eine funktionierende Energieumwandlung, ein Wehrumbau innerhalb des Bauwerksumgriffs sowie die Prüfung und ggf. Ermöglichung der Weiterverwendung der vorhandenen Verschlüsse. Die Mechanismen, die zur Bauwerksschädigung führen, sollen mit der neuen Geometrie vermieden oder zumindest minimiert werden.

Die Modellierung, Berechnung und Auswertung erfolgt mit dem Programm Flow-3D-Hydro, Version 2022R2. Es wird das Turbulenzmodell RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) mit dem „Renormalized Group RNG“-Ansatz verwendet. Dieser Ansatz stellt eine zeitliche Mittelung der Turbulenz dar.

Aufgrund der Symmetrie der Wehranlage zur Achse des Mittelpfeilers, sowohl im Oberwasser, im Bauwerk selbst als auch im Unterwasser wird für die 3D-Simulation nur das linke Wehrfeld modelliert und berechnet. Das Modell reicht von ca. 30 m oberhalb des Verschlusses bis ca. 60 m unterhalb davon. Die Zellgröße beträgt 20 cm in x-, y- und z-Achse, im Wehr- und Tosbeckenbereich nur 10 cm. Für die schnellere Untersuchung von Varianten wird zusätzlich ein Scheibenmodell in der Mitte eines Wehrfelds erstellt mit einer Zellgröße von 5 cm im Wehr- und Tosbeckenbereich.

Eine Sensitivitätsanalyse der Zellgröße mit unterströmtem Verschluss hat gezeigt, dass zwischen 10cm- und 5cm-Zellgröße nur sehr geringe Unterschiede im Strömungsbild bestehen und bei einer weiteren Verfeinerung auf 2,5 cm kein Unterschied mehr vorhanden ist. Die berechnete Strömung weist ebenfalls kaum Unterschiede zwischen Gesamt- und Scheibenmodell auf.

3.2 Randbedingungen

Für die Berechnungen war vorgegeben, dass beide Wehrverschlüsse gleichermaßen bewegt werden. Die Regelung des Wasserstands erfolgt derzeit durch das Absenken der Verschlüsse (Überströmung). Zur Abfuhr von Hochwasserabflüssen werden die Verschlüsse gezogen (Unterströmung). Die Regelung des Wasserstands muss in Zukunft weiter möglich sein.

Ein Wehrumbau muss innerhalb des Bauwerksumgriffs erfolgen.

Die Abfluss-Wasserspiegelbeziehung im Oberwasser und Unterwasser des Bauwerks sind wegen der Abflussaufteilung in zwei Gerinne sowohl vom Saaleabfluss als auch vom Abfluss über das Wehr abhängig. Die OW- und UW-Schlüsselkurven wurden mit einem großräumigen 2D-HN-Modell der Saale berechnet und durch das WNA Magdeburg zur Verfügung gestellt. Für die Beurteilung der Schadensursachen und die weitere Planung ist von Bedeutung, dass der Unterwasserstand heute deutlich höher liegt, als bei der Dimensionierung des Bauwerks 1974 ermittelt. Bei Hochwasserabflüssen ab ca. 400 m³/s in der Saale mit einem Wehrabfluss von 250 m³/s wird das Bauwerk durchströmt und es findet keine Energieumwandlung mehr statt.

Die Untersuchungen sollten nur für die aktuellen Wasserstände erfolgen.

3.3 Bestandssituation

Die Berechnungen sind für jeweils einen überströmten (Abbildung 4) und einen unterströmten Zustand (Abbildung 5) erfolgt. Im unterströmten Zustand löst sich die Strömung am Sohlknick von der Sohle ab. Der große Wirbel im Bereich des abgesenkten Tosbeckens drückt den Strahl nach oben. Das Tosbecken ist für die Energieumwandlung unwirksam. Eingetragenes Geschiebe verbleibt im Tosbecken und wirkt in dem Wirbel kontinuierlich abrasiv auf die Bauwerksoberfläche.

Im überströmten Zustand taucht der Strahl bis an die Tosbeckensohle ab und durchströmt die erste Zahnschwellenreihe. Die Fließgeschwindigkeiten betragen dort im untersuchten Zustand aber nur ca. 1,5 m/s.

Mit den angesetzten Randbedingungen sind die Schäden im Bereich des Tosbeckens teilweise nachvollziehbar, nicht jedoch an der zweiten Zahnschwellenreihe und auch nicht die festgestellte Erosion des Steinwurfs unterhalb der zweiten Zahnschwellenreihe. Für die Beurteilung der Schadensursachen sind jedoch die Betriebsbedingungen der gesamten Lebensdauer zu berücksichtigen. Der früher niedrigere UW-Stand sowie die teilweise gefahrene Öffnung nur eines Verschlusses führen zu deutlich niedrigeren Unterwasserständen als hier untersucht. Im beschriebenen unterströmten Zustand lag dabei der Unterwasserspiegel gut einen Meter niedriger. Die Wassertiefe über der Sohle mit den Zahnschwellen hat dann nur 3,50 m anstatt 4,50 m betragen. Die maximale Fließgeschwindigkeit im Strahl lag mit ca. 6 m/s (vs. ca. 4 m/s) zudem deutlich höher. Im unterströmten Zustand sind dann im Bereich der Zahnschwellen viel höhere Fließgeschwindigkeiten zu erwarten.

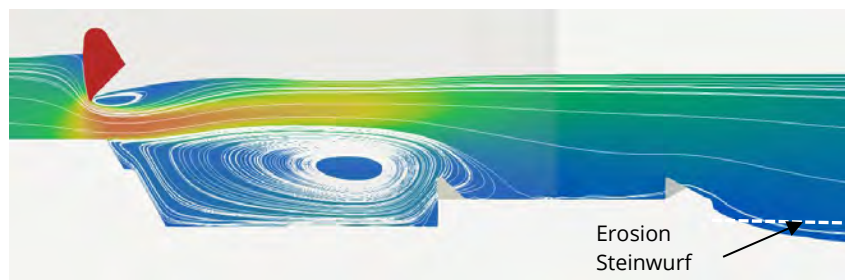


Abbildung 4: Wehröffnung 1,4 m, Abfluss ca. 200 m³/s

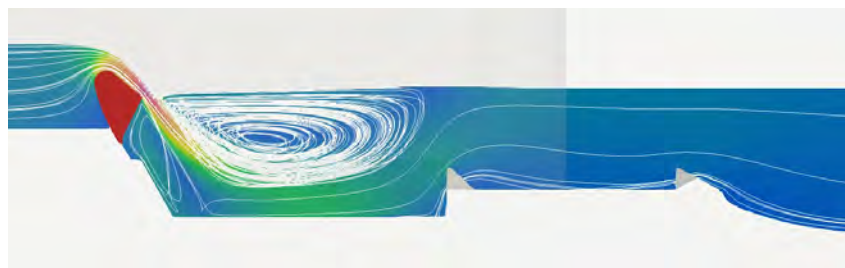


Abbildung 5: Wehrabsenkung 1,0 m, Abfluss ca. 80 m³/s

Eine Berechnung des erforderlichen Unterwasserspiegels zur Stabilisierung des Wechselsprungs im Tosbecken ergibt, dass eine Eintiefung des Tosbeckens nicht erforderlich ist, auch nicht für die früher niedrigeren Unterwasserstände. Voraussetzung ist jedoch die gleichmäßige Beaufschlagung beider Wehrfelder.

Damit kann im Zuge der Sanierung auf die Eintiefung des Tosbeckens verzichtet werden. Ebenfalls soll auf die Zahnschwellen verzichtet werden, die für die Stabilisierung des Wechselsprungs nicht erforderlich sind. Dadurch wird auf eine Angriffsfläche für das mitgeführte Geschiebe verzichtet sowie auf sich einstellende Sohlwirbel nach der zweiten Zahnschwellenreihe, die die Erosion des Steinwurfs verursacht haben können.

3.4 Ausführungsvariante

Die zur Ausführung vorgesehenen Maßnahmen basieren auf die bestmögliche Annäherung an die hydraulisch optimalste Variante, welche im Zuge der hydraulischen Modellierung als Vergleichsvariante berechnet worden ist.

In der Ausführungsvariante werden die Verschlüsse weiter verwendet und das Tosbecken wird nicht mehr eingetieft (Abbildung 6 und 7).

Beim Weiterbetrieb der vorhandenen Verschlüsse ist wegen des Erfordernisses zum Absenken der Verschlüsse weiterhin ein Sohlknick vorhanden, an dem eine Ablösung der Strömung stattfindet. Durch die Minimierung des Raums unter dem abgelösten Strahl, in dem sich ein Wirbel bilden kann, ist es gelungen, die Strömungskräfte, die bisher den Strahl nach oben abgelenkt haben, zu vermeiden. Der sich dann über dem Strahl ausbildende Wirbel drückt den Strahl im weiteren Verlauf wieder an die Sohle. Eingetragenes Geschiebe kann nach Unterstrom abtransportiert werden.

Mit dem Modell wurde die Sensitivität der Schützöffnung auf den Strömungsverlauf untersucht, wie beispielhaft in Abbildung 6 und 7 gezeigt. Weiterhin wurde die Sensitivität auf die Sohlform untersucht. Bei geringen Änderungen liegt der Strahl weiterhin an der Sohle an. Erst wenn die Absenkung auf die Tosbeckensohle früher und steiler erfolgt, bildet sich unter dem Strahl ein größerer Wirbel und der Strahl legt sich nicht mehr an die Sohle an.

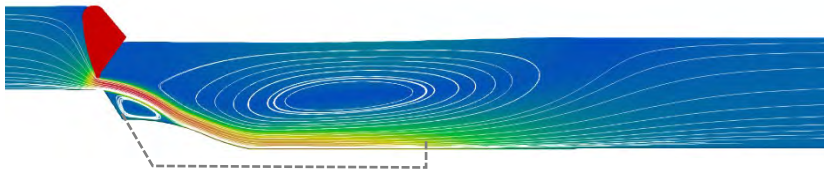


Abbildung 6: Wehröffnung 0,45 m, Abfluss ca. 70 m³/s

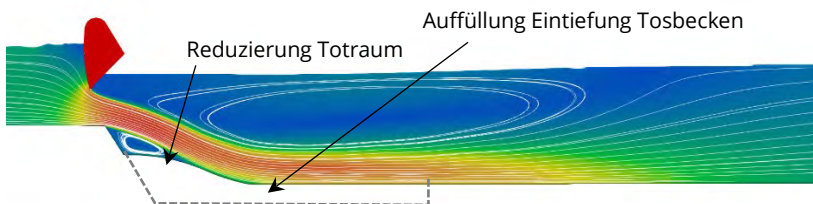


Abbildung 7: Wehröffnung 1,4 m, Abfluss ca. 200 m³/s

Mit den 3D-HN-Berechnungen konnte gezeigt werden, dass ein Weiterbetrieb der bestehenden Verschlüsse möglich ist und Hydroabrasion durch gefangenes Geschiebe durch eine bauliche Anpassung des Tosbeckens vermieden werden kann.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen des laufenden Planungsprozesses bedurfte es einer Entscheidung über die grundsätzliche Weiternutzung des Bauwerksbestandes unter den aktuellen Randbedingungen, aber auch unter dem Aspekt der künftigen Klimaveränderungen.

Der Beitrag zeigt aus Sicht des Bedarfs- bzw. Maßnahmenträgers und der Planenden ein gelungenes Beispiel für die Anwendung von hydraulischen Berechnungen im Rahmen einer frühen Projektphase. Anhand der Ergebnisse konnte gemeinsam eine wesentliche Grundlage für die weiteren Planungen geschaffen werden.

5 Literatur

BAW, (2020): Wehr Pulverweiden, Gutachten zum Betonwiderstand gegenüber Hydroabrasion, Karlsruhe 2002

Dipl.-Ing (FH) Karsten Jacob, M.Eng.
GRBV Ingenieure GmbH im
Bauwesen GmbH & Co.KG
Expo Plaza 10
30539 Hannover

Tel.: +49 511 98494 0
E-Mail: info@grbv.de

Dipl.-Ing. Rüdiger Richter
Sachbereichsleiter 4 – Brücken/Wehre
Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg
Kleiner Werder 5c
39114 Magdeburg

Tel.: +49 391 535 2250
E-Mail: Poststelle.WNA-MAG@wsv.bund.de

Dipl.-Ing. Stefan Kanne
Dr.-Ing. David Velasco
FICHTNER
Water & Transportation GmbH
Bothestraße 13
81675 München

Tel.: +49 89 4110942-0
E-Mail: info@fwf.fichtner.de

Elbe, Errichtung eines gesteuerten Flutungspolders bei Außig

Physikalischer Modellversuch Einlaufbauwerk Elbel

Antje Matzke
David Biebach

Stichworte: PolderAußig, Modellversuch Einlaufbauwerk

1 Veranlassung / Hintergrund

Die Einrichtung des gesteuerten Flutungspolders Außig ist Bestandteil des Hochwasserschutzes Elbe, welches per Erlass des SMUL vom 10.09.2004 bestätigt wurde. In diesem Konzept wurden 11 potentielle Standorte für Flutungspolder und Deichrückverlegungen an der Elbe im Freistaat Sachsen identifiziert. Vertiefende Untersuchungen zur Machbarkeit von Deichrückverlegungen, Poldern und Absperrbauwerken an der Elbe im Landkreis Nordsachsen wurden dazu im Rahmen der sogenannten Polderstunde in Auftrag gegeben. Im Ergebnis der Untersuchungen wurden insgesamt sechs potenzielle Standorte ausgewiesen, welche für die Errichtung von Flutungspoldern empfohlen werden. Neben den Poldern wurden auch priorisierte Deichrückverlegungen herausgearbeitet und zu Umsetzung empfohlen. Mit den empfohlenen Standorten für Flutungspolder an der Elbe bei Außig, Ammelgoßwitz, Döbeltitz, Dautzschen, Polbitz und Dommitzsch sollen steuerbare Retentionsräume in der Größenordnung von insgesamt mehr als 80 Mio. m³ gewonnen werden.

Infolge des Hochwasserereignisses im Mai / Juni 2013 an der Donau und im Einzugsgebiet der Elbe erfolgte die Erarbeitung eines bundesweiten nationa-

len Hochwasserschutzprogramms mit dem Ziel der beschleunigten Umsetzung prioritärer und überregional wirkender Maßnahmen des vorsorgenden Hochwasserschutzes im gesamten Bundesgebiet. Kernstück des Programms sind Maßnahmen, die eine überregionale Reduzierung der Hochwasserstände bewirken. Dazu gehören Maßnahmen wie Deichrückverlegungen zur Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen sowie der gesteuerte Hochwasserrückhalt durch Flutpolder und Hochwasserrückhaltebecken als auch die Beseitigung von Schwachstellen im Hochwasserschutzsystem.

Drei Polderstandorte im Freistaat Sachsen sind an der Elbe prioritär im Nationalen Hochwasserschutzprogramm gemeldet und umzusetzen. Dies umfasst die Flutungspolder Dommitzsch, Dautzchen und Außig.

Abbildungen werden laufend nummeriert. Abbildungsunterschrift nach der Abbildung schreiben, markieren und mit der Formatvorlage „Abbildung“ kennzeichnen. Schon erfolgt eine automatische Formatierung und Nummerierung.

2 Erläuterungen zum Bearbeitungsstand und zum Realisierungszeitraum

Der Flutungspolder Außig erstreckt sich linksseitig der Elbe zwischen den Ortslagen Seydewitz der Stadt Belgern-Schildau, der Ortslagen Außig, Schirrenitz der Gemeinde Cavertitz und der Ortslage Paußnitz der Stadt Strehla zwischen den Gewässern Elbe und Dahle.

Der Polder umfasst eine Fläche von ca. 370 ha und kann ein Volumen von ca. 11 Mio. m³ Wasser speichern.

Mit der Errichtung des Flutungspolders bei Außig an der Elbe soll sowohl der Hochwasserschutz der Ortslagen im Rückstaubereich der Elbe in die Dahle gewährleistet als auch die Scheitelkappung für Hochwasserereignisse ab einem HQ(100) der Elbe zum Schutz der Unterlieger umgesetzt werden.

Neben der Instandsetzung der bestehenden Deichsysteme zu Polderdeichen und dem Neubau von Deichanlagen auf einer Länge von ca. 10,6 km, werden ein Einlaufbauwerk und ein Auslaufbauwerk für den Poldereinsatz errichtet. Die Hochwasserschutzmaßnahmen an der Dahle umfassen zusätzlich die Errichtung eines Absperrbauwerkes und eines Schöpfwerkes in der Dahle, um den Rückstau der Elbe in die Dahle zu unterbinden sowie die Ortslagen in der Dahleniederung vor Hochwasser zu bewahren.

Für die Errichtung des gesteuerten Flutungspolders bei Außig an der Elbe liegt der Planfeststellungsbeschluss vom 11. März 2021 und damit die Genehmigung zur baulichen Umsetzung vor.

Mit der Umsetzung der vorgezogenen Ausgleichsmaßnahmen wurde bereits Ende 2022 begonnen. Der Beginn der baulichen Umsetzung des Flutungspolders ist ab dem IV. Quartal 2024 vorgesehen. Die bauvorbereitenden Maßnahmen beginnen bereits im Februar / März 2024.

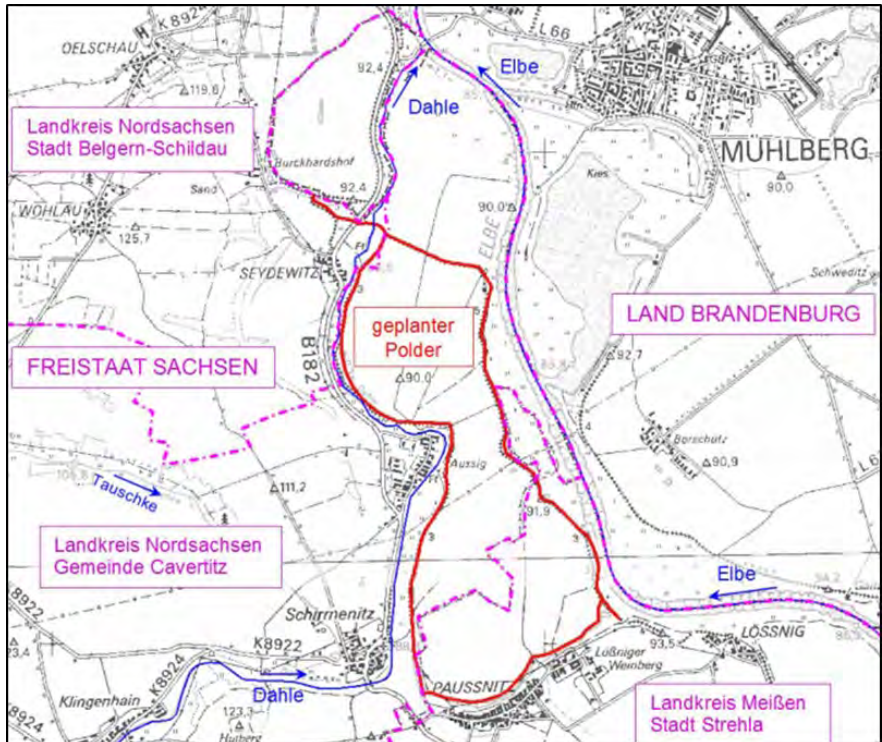


Abbildung 1: Lage des Vorhabens

3 Angaben zum Einlaufbauwerk

Das wichtigste Bauwerk für den Einsatz des Flutungspolders ist das Einlaufbauwerk an der Elbe. Im Rahmen der Planung wurde der Polder dafür ausgelegt, bei einem Hochwasserabfluss von 4.245 m³/s in der Elbe einen Anteil der Abflussspitze zwischenzuspeichern. Dies entspricht nach derzeitigem Stand einem Einsatz ab einem 100-jährlichen Ereignis in der Elbe, das z.B. in den Jahren 2002 und 2013 überschritten wurde.

Im Rahmen der Vorplanung und der Entwurfsplanung wurde begleitend eine 2D-HN-Modellierung der Elbe durchgeführt, mit der die TU Dresden beauftragt worden war. Mithilfe dieser wurde die Position und strömungsgünstige Lage des Einlaufbauwerkes optimiert und abschließend festgelegt.

Das EBW besitzt drei Wehrfelder, die mit beweglichen Verschlüssen ausgestattet werden. Das EBW ist, je nach Anströmsituation, in der Lage bis zu $180 \text{ m}^3/\text{s}$ abzuführen. Die Wehrfelder sollen bei Einsatz gestaffelt vollständig freigegeben werden, um die Füllung des Polders zu steuern. Das führt zu einer asymmetrischen Beaufschlagung des Tosbeckens mit räumlichen Strömungseffekten. Außerdem kommt es je nach Füllung des Polders zu instationären Prozessen bei der Energieumwandlung mit bisher unklaren Auswirkungen im Polderraum.

Zur Überprüfung der vorliegenden Ergebnisse der hydraulischen Berechnungen für das EBW und zur Optimierung der konstruktiven Ausbildung wurde im Jahr 2021 ein physikalischer Modellversuch in Auftrag gegeben. Den Zuschlag hatte das Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik an der TU Dresden erhalten. Die Untersuchungen wurden Ende 2022 abgeschlossen.

4 Untersuchungen an der TU Dresden

Das Einlaufbauwerk sowie die angrenzenden Vorlandbereiche und die Nachlaufstrecke wurden im Zuge der Planungen zur Neuerrichtung des Flutpolders „Außig“ einem umfangreichen physikalischen und hydronumerischen Versuchsprogramm am Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik unterzogen. Dabei wurde das Konzept der „hybriden“ Modellierung erfolgreich angewandt, dessen besondere Stärke in der gemeinsamen Ausnutzung der Vorteile aber auch Kompensation der Nachteile eines physikalischen und numerischen Modellversuchs zu verorten ist. So konnten die Randbedingungen zum Design des 3D-HN-Modells sowie des physikalischen Modellversuchs aus den bereits zuvor erstellten großflächigen 2D-HN-Modellierungen abgegriffen werden. Physikalische Versuche sind zwar von der Grundstruktur her verhältnismäßig aufwendig zu installieren, bieten danach aber den Vorteil einer zügigen Modifizierung sowohl der hydraulischen

als auch geometrischen Randbedingungen und können so sehr schnell für viele Versuchsvariationen dienen.

Bei der hydraulischen Modellierung wurden Variationen bei den Schützöffnungen, der Polderwasserstände, des hydraulischen Lastfalls (Hochwasser HQ 100, HQ 200) und der Geometrie des Einlaufbauwerks, des Tosbeckens sowie der Nachbettsicherung vorgenommen. Die 3D-HN-Modellierung ermöglichte zusätzlich eine nahezu lückenlose Messwerterfassung und flächige Darstellung von hydraulischen Variablen. Somit konnten auch Bereiche von besonderem Interesse für die Beprobung beim physikalischen Modell identifiziert werden.

Weiterhin lassen sich im physikalischen Modell nur schwer skalierbare Prozesse, wie die Lufteinmischung und der damit verbundene Anstieg des Wasserspiegels in turbulenten Bereichen darstellen. Trotzdem ist aufgrund der hohen Rechenzeiten und Anforderungen an die Modellerstellung der Aufwand für einen einzelnen Versuchsdurchlauf relativ hoch und komplexe Strömungsverhältnisse, wie z. B. Wirbelstrukturen lassen sich nur vereinfacht in großflächigen Modellgebieten auswerten.



Abbildung 2: Modellansicht, Blickrichtung von Polder zum EBW

5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

5.1 Lage und Anströmverhalten

Die Lage des Einlaufbauwerks und der angrenzenden Deiche wurde im Rahmen des Entwurfes und der damaligen 2D-HN-Modellierung bereits optimiert. Die Ausrichtung war damit weitestgehend festgelegt und wurde anhand des physikalischen Modellversuches abschließend überprüft und als strömungsgünstig bestätigt. Die hydraulischen Verhältnisse im Vorlandbereich waren unkritisch, kritische Sohlschubspannungen wurden nicht überschritten.

Die Anströmung der Pfeiler und die hydraulischen Verhältnisse im Bauwerk wurden ebenfalls näher untersucht. In Abhängigkeit der untersuchten Szenarien wurden teils erhebliche Einschnürungen und Verengungen des Fließquerschnitts aber auch asymmetrische Belastungen der Pfeiler festgestellt. Anpassungen an den Pfeilern oder Änderungen des Anströmwinkels wurden jedoch nicht untersucht, da die Leistungsfähigkeit der Wehrfelder mehr als ausreichend dokumentiert wurde.

Anpassungen an den Flügelwänden vor dem Einlauf sind jedoch empfohlen. So ist die linke oberwasserseitige Flügelwand bogenförmig zu erweitern und in den Deich einzubinden, um Hinterströmungen und Erosionen an der Deichböschung zu vermeiden.

5.2 Durchströmung Bauwerk und Leistungsfähigkeit

Die im Entwurf ermittelte Durchflussleistung je Schützöffnung von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (insgesamt $150 \text{ m}^3/\text{s}$) für das Bemessungsereignis HQ100 wurde im Modellversuch mit bis zu $180 \text{ m}^3/\text{s}$ deutlich überschritten. Beim Extremereignis HQ200 ist sogar eine Durchflussleistung von bis zu $270 \text{ m}^3/\text{s}$ erzielbar. In beiden Lastfällen wird das Bauwerk nicht überströmt.

Eine Ablösung des Überfallstrahls am Überfallrücken wurde nicht nachgewiesen, auch wenn sich die gemessenen Drücke für niedrigere Polderwasserstände zeitweilig dem negativen Bereich annähern.

Die bauliche Ausgestaltung des EBW aus dem Entwurf konnte damit bestätigt werden.

5.3 Tosbeckengestaltung und Energieumwandlung

Die Energieumwandlung am Bauwerk war Untersuchungsschwerpunkt nachdem die prinzipielle Leistungsfähigkeit nachgewiesen wurde. Im Idealfall geht das Wasser beim Passieren des Tosbeckens und der anschließenden Zahnschwelle vom schießenden in den strömenden Zustand über. Trotz gemessener niedrigerer Froudezahlen (Indikator für Schießen und Strömen) wurde in der ersten Versuchsreihe bei (HQ100) noch ein gewellter Wechselsprung nach der Zahnschwelle beobachtet, was einen Hinweis dafür liefert, dass der Übergang vom Schießen ins Strömen noch nicht abgeschlossen ist. Das Tosbecken in der ersten Versuchsreihe war somit zu flach und erforderte eine Eintiefung.

Die zweite Versuchsreihe mit einer Tosbeckeneintiefung von 1,0 m gegenüber der ersten Versuchsreihe ergab daraufhin befriedigende Ergebnisse. Ebenso wurde nachgewiesen, dass die planmäßige Zahnschwelle in Kombination mit dem vertieften Tosbecken eine gute Wirksamkeit hinsichtlich der Energieumwandlung aufweist. Eine geschlossene, glatte Endschwelle konnte hingegen nicht überzeugen.

Weitere Versuchsreihen mit Einbauten im Tosbecken (Störkörper, Strahlaufreiber) erbrachten ebenfalls keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Der Vorschlag des räumlichen Tosbeckens mit Zahnschwelle aus dem Entwurf konnte damit bestätigt werden. Einzig die Eintiefung des Tosbeckens ist anzupassen.

Einzig die Flügelwände links und rechts neben dem Tosbecken sind zu erhöhen, um einem beobachteten Überströmen bzw. auch einem höheren Wasserstand durch die in Natur zu erwartende höhere Luft-Wasserdurchmischung infolge der Energieumwandlung entgegenzuwirken. Die Länge der polderseitigen Flügelwände wurde hingegen als ausreichend bestätigt.

5.4 Abströmverhalten und Nachbettsicherung

Die für die Nachbettsicherung gewählte Kornfraktion erwies sich als lagestabil, mit Ausnahme des Bereiches direkt hinter der Zahnschwelle, wobei

Kolkbildung und ein Oberflächenabfluss am Übergang von Schießen ins Strömen in der ersten Versuchsreihe beobachtet wurde. In der zweiten Versuchsreihe hat sich die Notwendigkeit einer direkt hinter der Zahnschwelle angeordneten, verstärkten / verklammerten Nachbettsicherung bestätigt. Dies untermauerte die Annahmen aus dem Entwurf und konnte die Verklammerung auf einen 6 m breiten Bereich im Anschluss an die Zahnschwelle eingrenzen.

In der ersten Versuchsreihe erreichten die Sohlschubspannungen nach dem Tosbecken Werte von 40-50 N/m² und lagen damit oberhalb der kritischen Sohlschubspannung für eine Rasenfläche. Die höchsten Belastungen treten bei Szenarien mit leerem Polder auf, also zu Beginn des Flutungsvorganges. Die im Entwurf vorgesehene mit Oberboden abgedeckte flächige Nachbettsicherung im Anschluss an die Zahnschwelle und den verstärkten Bereiche wurde bestätigt. Einzig im Extremfall HQ200 sind Erosionen im Anschluss an die Nachbettsicherung auf den landwirtschaftliche genutzten Flächen nicht auszuschließen.

5.5 Steuerung Einlaufbauwerk

Die hydraulische Modellierung hatte ebenso die Unterstützung bei der Erarbeitung bauwerksoptimierter Betriebszustände zum Ziel. Der optimale Öffnungsvorgang eines EBW mit dem größtmöglichen Entlastungseffekt hängt v. a. vom Verlauf der auftretenden Hochwasserganglinie ab und ist ein instationärer Vorgang. Dieser ist außerdem abhängig vom sich über die Zeit einstellenden Wasserstand im Polder.

Generell wird das EBW prioritär auf das schnelle Erreichen der maximalen Leistungsfähigkeit hin angesteuert. Ein Öffnungsgrad von 100% ist jedoch nur gestaffelt, durch die schrittweise Freigabe der einzelnen Öffnungen möglich. Aus hydraulischer Sicht kann mit dem Öffnen des mittleren Schütz begonnen werden. Danach folgt das linke oberwasserseitig liegende Schütz und zuletzt das rechte unterwasserseitige Schütz. Diese Steuervorgabe ist insbesondere zu Beginn des Flutungsvorganges bei „leerem“ Polder empfehlenswert.

Ist eine für die Nachbettsicherung schonende Öffnung des Bauwerks gewünscht und lässt dies die Entlastungswirkung zu, ist zunächst mit dem lin-

ken oberwasserseitigen Schütz zu beginnen und bei Erreichen des Polderwasserstands von 91,0 m NHN das rechte unterwasserseitige Schütz zu öffnen. Bei Erreichen eines Polderwasserstands von 92,0 m NHN kann das dritte Schütz hinzukommen. Diese Steuervorgabe könnte dann relevant werden, wenn die Zuflussganglinie ausreichend flach bzw. der Hochwasserscheitel sehr breit ist.

Autoren:

Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Antje Matzke
LANDESTALSPERRENVERWALTUNG DES FREISTAATES SACHSEN
Betrieb Elbaue/Mulde/Untere Weiße Elster
Gartenstraße 34
04571 Rötha
Tel.: +49 34206 588-335
Fax: +49 34206 588-666
E-Mail: antje.matzke@ltv.sachsen.de

Dipl.-Ing. David Biebach
TRACTEBEL HYDROPROJEKT GmbH
Geschäftsbereich Weimar
Mendelssohnallee 8
01309 Dresden
Tel.: +49 351 21123-20
E-Mail: david.biebach@tractebel.engie.com

Kolkbildung durch Voith-Schneider-Propeller

Christian Schwartpaul
Jochen Aberle
Jannes Berndt
Moustafa Abdel-Maksoud
Pia Pinkenburg
Olaf Drude
Michael Palm

Stichworte: Kolk, Abstrahlungsfeld, Voith-Schneider-Propeller,
Modellversuche, Numerische Simulation,
Feldversuche

1 Einführung

Schiffe wickeln den größten Teil des weltweiten Warentransports ab. Als Antrieb der Schiffe dienen Propeller, welche das umgebende Wasser entgegen der Fahrtrichtung beschleunigen. Trifft dieser Propellerstrahl auf die Gewässersohle, kann es zur Kolkbildung kommen. Kolke an Kaianlagen können deren Standsicherheit gefährden. Zur Dimensionierung des Erosionsschutzes am Bauwerk wird daher detailliertes Wissen über die Propellerstrahlausbreitung sowie die induzierte Kolkentwicklung benötigt. Im IHATEC-Forschungsvorhaben Eros-VSP wird erstmals die Kolkbildung durch Voith-Schneider-Propeller (VSP) untersucht. Dieser Propeller unterscheidet sich von Schraubenpropellern durch die vertikale Rotationsachse, welche senkrecht zur Fortbewegungsrichtung des Schiffes liegt (Abb. 1). Die Propellerflügel oszillieren unabhängig voneinander und ermöglichen eine abrupte Änderung der Schubrichtung, wodurch eine hohe Manövrierbarkeit erreicht wird. Entsprechend werden Fähren und Schlepper mit VSP ausgestattet, also Schiffstypen, die häufig in der Nähe von Kaianlagen operieren.

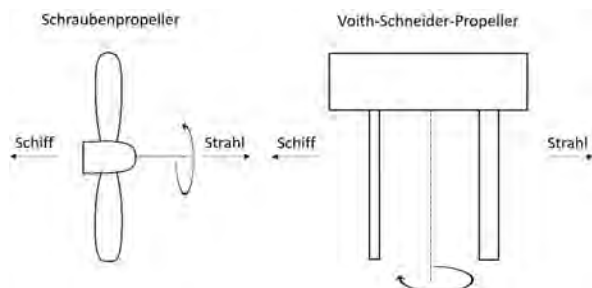


Abbildung 1: Vergleich des Funktionsprinzips: Schraubenpropeller (links) und Voith-Schneider-Propeller (rechts)

2 Methoden

Ein Schwerpunkt des Projekts Eros-VSP liegt in der Beschreibung des VSP-Strahls. Dafür werden numerische Simulationen des Strahls durchgeführt und durch physikalische Versuche mit einem Modellpropeller validiert. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in Kolkversuchen mit dem Modell-VSP. Schließlich werden die in den Versuchen erlangten Erkenntnisse zum Abströmfeld und zur Kolkbildung anhand von Feldmessungen an Schiffsanlegern auf Rügen, am Rhein und am Bodensee evaluiert.

Im Folgenden werden vorläufige Ergebnisse der laufenden Untersuchungen vorgestellt. Kolkversuche mit einem Modell-VSP im freien Szenario ohne den Einfluss von Kaimauern werden erläutert und mit den Erkenntnissen einer numerischen Simulation des VSP-Abströmfeldes verglichen.

2.1 Kolkversuche

Der linksdrehende Modell-VSP mit einem Durchmesser von $D = 0,2 \text{ m}$ wird in einem rechteckigen Kasten mit den Maßen $0,97 \text{ m}/0,4 \text{ m}/0,315 \text{ m}$ (L/B/H) installiert (Abb. 2). Ein Sandbett ($d_{50} = 0,8 \text{ mm}$) in einer 2 m breiten Versuchsrinne dient als mobile Gewässersohle. Der Abstand des Propellers zum Sandbett h_p beträgt je nach Versuch $0,18$ oder $0,24 \text{ m}$ bzw. das $0,9$ oder $1,2$ -fache des Propellerdurchmessers ($h_p/D = 0,9$ oder $1,2$). Die Eintauchtiefe des Propellers im Wasser wird in jedem Versuch durch einen angepassten Wasserspiegel konstant auf $h_u = 0,25 \text{ m}$ gehalten. Sowohl Abstand zum Sandbett als auch Eintauchtiefe beziehen sich dabei auf die halbe Flügelänge L . Für beide Sohlenabstände werden drei verschiedene

Vor dem Propeller wird als Randbedingung die Strömungsgeschwindigkeit definiert, hinter dem Propeller ein konstanter Druckgradient. Alle weiteren Berandungen werden durch Wände mit Gleitbedingungen (ohne Wandschubspannungen) beschrieben.

Das resultierende Berechnungsgitter ist in Abb. 3 dargestellt. Es besteht aus 30 Mio. Zellen. Hinter dem VSP wurde ein Bereich zusätzlich verfeinert, um den Propellerstrahl besser zu erfassen. Der Zeitschritt entspricht der notwendigen Zeit für eine Propellerumdrehung von 1° . Räumliche Terme der Erhaltungsgleichungen werden mit Approximationen 2. Ordnung diskretisiert, zeitliche Terme mit Approximationen 1. Ordnung.

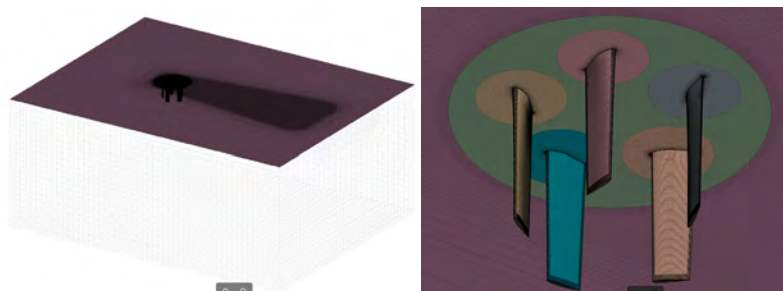


Abbildung 3: Berechnungsgitter für die numerische Simulation mit Gesamtansicht des Berechnungsgebiets (links) und Nahansicht des VSP (rechts)

Die Simulation erfolgt für einen feststehenden VSP (Fortschrittsgrad $J = 0$) bei einer Propellerdrehzahl von 1,2/s.

3 Ergebnisse

3.1 Kolkversuche

Abb. 4 zeigt die Kolkgeometrien des VSP beim Sohlenabstand von $h_p/D = 1,2$. Der Koordinatenursprung liegt in der Propellermitte, und der Strahl propagiert in der Abbildung nach oben. Kolklöcher sind bläulich eingefärbt, Kolkbänke gelblich. Grüne Bereiche haben sich in der Höhe nicht verändert. Bei $x = -0,6$ und $1,8$ m befindet sich der Übergang von der mobilen zur festen Sohle.

Jeder der Kolke besteht aus einem runden Kolkloch unterhalb der Position des VSP sowie ein bis zwei Kolkbänken unterschiedlicher Höhe dahinter. Mit

steigender Drehzahl wachsen Kolklochtiefe, -durchmesser und -volumen an. Damit einhergehend nehmen die Abmessungen der Kolkbänke ebenfalls zu. Außerdem bildet sich mit steigender Drehzahl eine zweite Kolkbank aus.

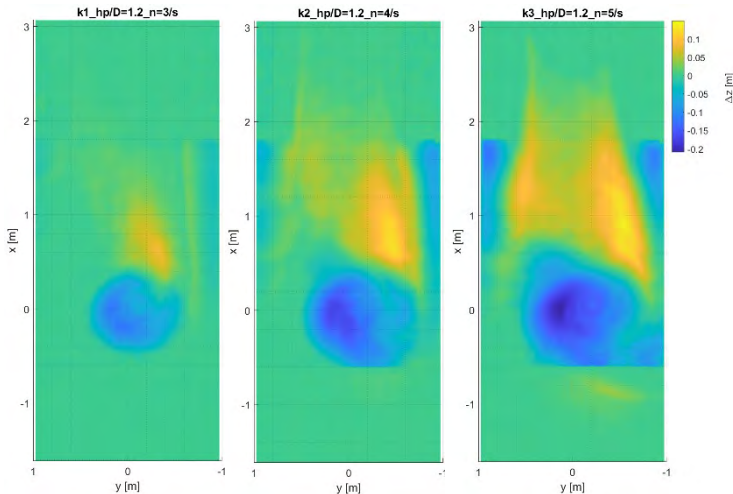


Abbildung 4: Kolkgeometrie eines VSP ohne Kaimauereinfluss im Laborversuch bei $h_p/D = 1,2$ und $n = 3$ (links), 4 (mittig) und 5/s (rechts)

Die zeitliche Kolklochtiefenentwicklung ist Abb. 5 zu entnehmen. Die Kolklochtiefen aller Versuche zeigen ein logarithmisches Wachstum über die Zeit. Zunächst erfolgt eine schnelle Zunahme der Tiefen, sodass nach 350 s ($n = 4$ & 5/s) bzw. 500 s ($n = 3$ /s) bereits 50 % der Kolklochtiefen erreicht werden, die sich nach 10240 s einstellen. Nach Erreichen der Hälfte der Kolklochtiefen klingt die Zunahme langsam ab, die Kolklochtiefen streben einem Grenzwert entgegen. Wird der Grenzwert erreicht, pendeln die Kolklochtiefen in geringem Umfang um diesen herum. Die maximalen Kolklochtiefen werden also nicht zwangsläufig nach 10240 s erreicht, sondern gegebenenfalls bereits davor. Der Grenzwert wird in den Versuchen mit $n = 5$ /s nach ~5000 s erreicht, mit $n = 4$ /s nach ~10000 s. Versuche mit $n = 3$ /s stabilisieren sich nicht innerhalb der Versuchsdauer.

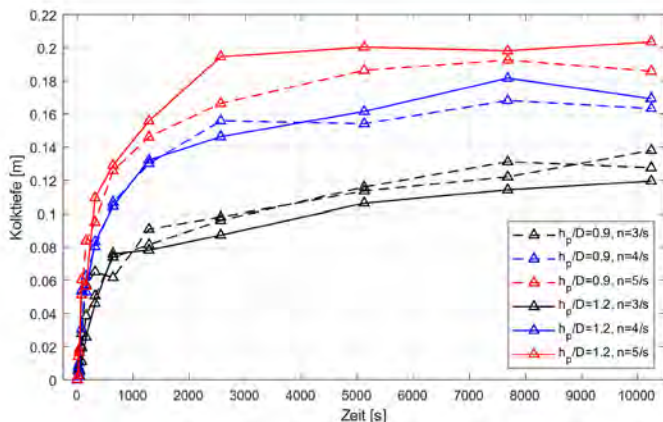


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der VSP-Kolklochtiefen ohne Kaimauereinfluss im Laborversuch bei $h_p/D = 0,9$ und $1,2$ sowie $n = 3, 4$ und $5/s$

Zwischen $n = 3$ und $4/s$ nimmt die Kolklochtiefe um etwa 30 % ($h_p = 0,9$) bis 50 % ($h_p/D = 1,2$) und zwischen $n = 4$ und $5/s$ für beide Sohlenabstände um ca. 10 % zu. Bei $n = 3/s$ ist die Kolklochtiefe für den kleineren Sohlenabstand größer, für $n \geq 4/s$ dagegen die Kolklochtiefe mit dem größeren Sohlenabstand des VSP. Der Einfluss des Sohlenabstands auf die Kolklochtiefe liegt aber im Bereich der Wiederholungsgenauigkeit der Versuche und ist somit nicht signifikant.

3.2 Numerische Simulation

Abb. 6 zeigt die berechneten Konturen der absoluten Geschwindigkeit und die Stromlinien des Strömungsfeldes.

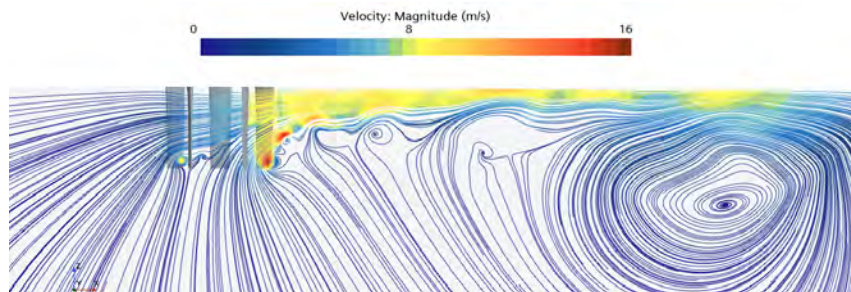


Abbildung 6: Konturen der absoluten Geschwindigkeit und Stromlinien auf einem Längsschnitt durch das Zentrum des VSP bei $n = 1,2/s$

Es zeigt sich, dass die Wasserzuführung zum Propeller nicht nur von vorn, sondern auch von unten erfolgt. Das Wasser wird zur Schuberzeugung vom Propeller beschleunigt und bildet den Strahl. Der VSP-Strahl ist zur Oberfläche gerichtet.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Erkenntnisse aus der Simulation des VSP-Strömungsfeldes decken sich mit den in den Laborversuchen beobachteten Kolkgeometrien. Durch den zur Oberfläche gerichteten Strahl führt dieser in Abwesenheit von Kaimauern zu keiner unmittelbaren Kolkbildung. Das Kolkloch wird hier, im Gegensatz zu Kolklöchern von Schraubenpropellern, nur durch den Sog des VSP verursacht.

Zur wirtschaftlichen Dimensionierung von Erosionsschutzmaßnahmen an Kaiwänden gegen VSP ist die Durchführung der weiteren im Projekt geplanten Versuche mit dem Einfluss von Kaiwänden nötig. Hier sollen auch der Einfluss von Schiffsrumpfgeometrie, Hintergrundströmung und Sedimentkorngröße auf den Kolk untersucht werden.

Danksagung - Das Projekt „Erosionserscheinungen im Hafenbereich durch Voith-Schneider-Propeller“ wird durch das Förderprogramm für Innovative Hafentechnologien (IHATEC II) vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert.



5 Literatur

- Ferziger, J.H. & Péric, M. (2002): Numerische Strömungsmechanik. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2002
- Menter, F.R. (1994): Two-Equation Eddy Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal, Volume 32, 1598-1605, 1994

Autoren:

Christian Schwartpaul, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Jochen Aberle

Leichtweiß-Institut für Wasserbau
Abteilung für Wasserbau und
Gewässermorphologie
TU Braunschweig
Beethovenstr. 51a
38106 Braunschweig

Tel.: +49 531 391 3995
E-Mail: c.schwartpaul@tu-bs.de

Jannes Berndt, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. M. Abdel-Maksoud

Institut für Fluidodynamik und
Schiffstheorie
TU Hamburg
Am Schwarzenberg-Campus 4
21073 Hamburg

Tel.: +49 40 42878 4848
E-Mail: j.berndt@tuhh.de

Pia Pinkenburg, M.Sc.
Dr.-Ing. Olaf Drude

WK Consultants GmbH
Veritaskai 8
21079 Hamburg

Tel.: +49 40 790001 583
E-Mail: pia.pinkenburg@
wk-consult.de

Dipl.-Ing. Michael Palm

J.M. Voith SE & Co. KG
St. Pöltener Straße 43
89522 Heidenheim

Tel.: +49 7321 37 2921
E-Mail: michael.palm@voith.com

Integratives Monitoring zur Realisierung eines angepassten Hochwasserbewirtschaftungskonzeptes in einem alpinen Einzugsgebiet

MARKUS MOSER, LISA PUSCHMANN, STEFAN JANU, DORIAN SHIRE-
PETERLECHNER, PATRICK HOLZAPFEL, ROLF RINDLER

Zusammenfassung

Der Feststoffhaushalt eines alpinen Gewässersystems bildet eine entscheidende Grundlage für dessen ökologischen und morphologischen Zustand. Gebirgsbäche stellen dabei das Bindeglied zwischen der Sedimentproduktion in den alpinen Einzugsgebieten (ein Resultat des Gebirgsabtrags) und dem Sedimentbedarf der tieferliegenden Gebirgs- und Flachlandflüsse dar (Rudolf-Miklau und Patek, 2004). Zur Bewirtschaftung der anfallenden Feststoffmengen im Rahmen des Hochwasserschutzes für die gefährdeten Siedlungsgebiete und Infrastruktureinrichtungen sind Maßnahmenkonzepte im alpinen Raum seit mehr als 100 Jahren entwickelt und umgesetzt worden. Diese Konzepte sind laufend – auch aufgrund der Veränderung der klimatischen Einflüsse – zu adaptieren. Anpassungen erfolgen entweder auf der lokalen Ebene mit der Modifizierung von einzelnen Bautypen oder durch eine Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes als integrales Bewirtschaftungskonzept. Mit einem umfassenden Monitoring werden die Grundlagen der Wasser-, Schwebstoff- und Geschiebeführung, der Bachmorphologie und der Habitate erfasst. Durch die Erhebung von abiotischen Faktoren (Durchfluss indirekt mittels Wasserstandserfassung mithilfe von Druckmesssonden, Geschiebetransport mit RFID-Tracern und Schwebstofftransport durch optische Sonden und Kalibrierproben, Feststoffmanipulation an den Bauwerken mittels UAV unterstützter Photogrammetrie) und biotischen Faktoren (Befischungen, Habitat- und Laichplatzkartierungen) und deren Analyse konnte ein umfassendes Bewirtschaftungskonzept für das gesamte Einzugsgebiet erstellt werden.

Stichworte: Bewirtschaftungskonzept für Feststoffe, Alpines Einzugsgebiet, Monitoring Abiotik und Biotik

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der Sedimenthaushalt eines alpinen Gewässersystems bildet eine entscheidende Grundlage für dessen ökologischen und morphologischen Zustand. Gebirgsbäche stellen dabei das Bindeglied zwischen der Sedimentproduktion in den alpinen Einzugsgebieten (ein Resultat des Gebirgsabtrags) und dem Sedimentbedarf der tieferliegenden Gebirgs- und Flachlandflüsse dar. Schutzmaßnahmen zur Stabilisierung oder temporären Rückhalt von Sedimenten und Geschiebe in Wildbächen führen - wie menschliche Wassernutzungsanlagen - stellenweise zu einer Unterbrechung des natürlichen Transportprozesses von Feststoffen. Im Falle von Hochwasser- und Murereignissen kommt es meistens zu einem Überschuss an Feststoffen (Sedimente, Geschiebe, Wildholz) und in hydrologischen Normaljahren bedingt durch Rückhaltmaßnahmen oftmals zu einem Feststoffdefizit in den Mittellaufstrecken der Wildbäche und in weiterer Folge auch in den Talflüssen (Rindler et al., 2019).

1.2 Zielsetzung

Zur Erzielung eines langfristig ausgeglichenen Gewässersystems hinsichtlich Gewässermorphologie, Ökologie und Hochwasserschutz sind einerseits Maßnahmen zum Erhalt der Gewässerdynamik und andererseits maßgeschneiderte Schutzkonzepte zur Erreichung eines Hochwasserschutzes für die Siedlungsgebiete und Infrastruktur notwendig. In vielen wasserwirtschaftlichen und -baulichen Planungen kommt deshalb der Sedimentdurchgängigkeit vermehrt eine hohe Bedeutung zu. Die Ziele des Projektes sind die Erfassung der Gewässermorphologie, Wildbachprozesse, Habitate und Laichplätze, Fließgeschwindigkeiten, Schwebstofftransportes und Transportgeschwindigkeiten des Geschiebematerials für das Einzugsgebiet des Strober Weissenbaches sowie dessen Vorfluter Ischler Ache.

2 Untersuchungsgebiet

Das Einzugsgebiet mit einer Größe von 45,5 km² und Gerinnelänge von 11,3 km liefert ein Bemessungshochwasser von 150 m³/s (Ganglinie über mehrere Stunden bis Tage mit Wasserfrachten von 1 – 2 Mill. Kubikmeter). Durch die geologische Ausgangslage mit stark verwitterbarem Gestein kann im Bemessungsfall eine Geschiebefracht von 105.000 – 210.000 m³ transportiert werden (in Abbildung 1 oben links dargestellt). Teile davon werden in den Wasser- und Geschiebedosiersperren im Oberlauf (Kammersbach und Werkstattgraben) zurückgehalten. Große Mengen entstehen jedoch erst unterhalb dieser Sperren, der Mittellauf ist geprägt durch massive Seitenerosion (Siehe Abbildung 1 oben rechts) und wird durch die zahlreichen Zubringergräben mit Feststoffen sowie dem Transportmedium Wasser dotiert. Große Hochwasserereignisse sind seit 1889 bekannt und die Hochwässer aus den Jahren 1966 und 1968 führten zum Beispiel zur Errichtung der ersten Schutzbauwerke in Form der Wasser- und Geschiebedosiersperren (siehe Abbildung 1 unten) sowie Grundschwellenstaffelungen im Unterlauf.



Abbildung 1: Einzugsgebietsabgrenzung und Gesamtgeschiebefracht je Teileinzugsgebiet (oben links), Uferanrisse (oben rechts), mit Sedimenten gefüllte Wasser- und Geschiebedosiersperre im Kammersbach (unten links) und die Wasser- und Geschiebedosiersperre im Ereignisfall am 28.06.2018 (unten rechts)

3 Methode

Das Monitoring Programm kann grundsätzlich in 3 Phasen gegliedert werden, die Ereignisdokumentation sowie ein Vorschlag für ein Bewirtschaftungskonzept runden die Methode ab:

1. Monitoringprogramm mit Niederschlag/Abfluss/Schwebstoff, Habitate, Laichplätze, Befischungen, Geländemodelle und Analysen der Bach- und Stauraumsohle
2. Phase 1: Aufnahme IST-Zustand (Premonitoring)
3. Phase 2 und 3: Monitoring während und nach Maßnahmen (Einfache und maschinelle Freilegung der Schlitzte, Redotation entlang der Bachstrecke im Mittellauf)
4. Dokumentation der Auswirkungen von Ereignissen (Anlandungsbereiche, Erosionsstrecken, Messung der Transportweiten von Geschiebe, Änderungen der Morphologie und Habitate ausgewählter Zeigerarten)
5. Vorschlag für ein Bewirtschaftungs- und Maßnahmenkonzept. Nach einer Laufzeit von 7 Jahren wird Ende 2024 ein generelles Bewirtschaftungskonzept unter Berücksichtigung der Abiotik und Biotik entlang der ca. 15 km langen Fließstrecke und Vorfluter entwickelt.

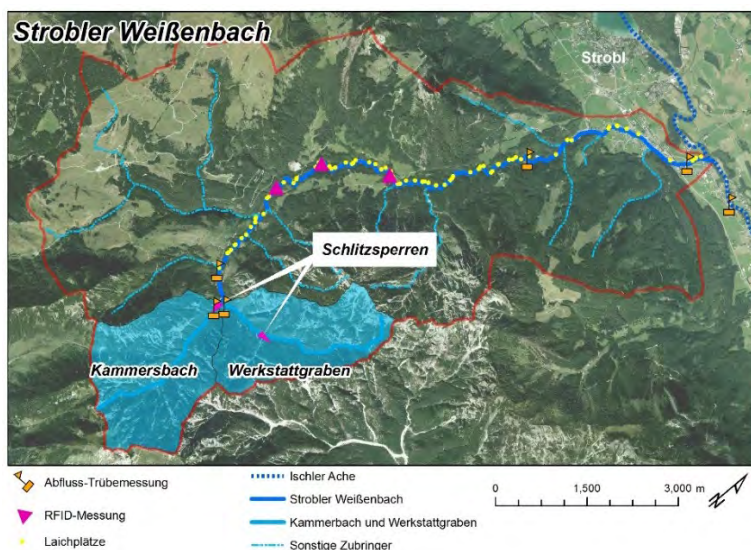


Abbildung 2: Einzugsgebiet des Stroblers Weißenbachs mit den Standorten der beiden Schlitzsperrungen Kammerbachsperrung und Werkstattgrabensperre, den Standorten der Messinstrumente, Laichplätze und RFID Tracer Messungen

3.1 Phase 1:

In der ersten Projektphase (Pre-Monitoring) ging es um die Erfassung des Ist-Zustandes. Für Aussagen zu den Auswirkungen von Maßnahmen zur Bauwerksbewirtschaftung ist es notwendig folgendes zu wissen:

- Welche Feststoffkonzentrationen bei natürlichen Abflussereignissen vorkommen
- Welche Lebensräume für die im Weißenbach heimischen Lebewesen zu Verfügung stehen
- In welchem Zustand die Habitate sich aktuell befinden

Zur Ermittlung des Wasserstandes und in weiterer Folge des Durchflusses sind an vier Stellen (M1-M4 in Abb. 2) keramisch-kapazitive Drucksonden der Firma Ott installiert worden. Die Drucksonden ermöglichen eine kontinuierliche Erfassung des Wasserstandes sowie der Temperatur und bieten zusätzlich die Möglichkeit der integrierten Datenfernübertragung.

Die Erfassung der Wasserstände erfolgt jeweils in Kombination mit Solitax TS-Line Feststoff-Prozesssonden mit Wischerreinigungsbuchsen der Firma Hach-Lange, die die Wassertrübung erfassen und somit Rückschlüsse auf die Schwebstoffkonzentration erlauben. Das Messprinzip beruht auf dem Infrarot Duo-Streulicht-Messverfahren und der Messbereich der Feststoffkonzentrationen liegt zwischen 0,001 mg/l bis 50 mg/l.

Der Geschiebetransport wird mittels RFID Tracern der Firma Oregon RFID dokumentiert. Hierfür werden Steine, welche die maßgebenden Korngrößen der Sohle des Strobler Weißenbachs aufweisen, angebohrt und mit RFID-Tags (Sonden zur „radio-frequency identification“) instrumentiert. Ein RFID System besteht aus einem Transponder, der eine bestimmte Kennung enthält und sich in unserem Fall im Stein befindet, sowie einem Lesegerät. Mit dem Lesegerät wird ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld erzeugt, das als Stromversorgung für den RFID Tag dient. Wenn der Tracerstein sich in diesem Feld befindet, wird er aktiviert und übermittelt seine Kennung an das Lesegerät. Die Tracersteine werden bei Begehungen mit einer mobilen Antenne gesucht und mittels GPS vermessen. Dadurch können Informationen über die Transportgeschwindigkeit, Transportweiten und Ablagerungsverhalten des Geschiebes gewonnen werden. Des Weiteren werden RFID Antennen stationär in das Bachbett eingebaut, für den Zweck alle Tracersteine zu registrieren, die diesen Kontrollquerschnitt passieren.

Für eine fachlich fundierte Aussage zur Bewertung der Habitatverfügbarkeit ist es notwendig Verschneidungen von Gewässermorphologie bzw. Hydraulik mit bestimmten Zeigerorganismen durchzuführen. Um die Gewässermorphologie und deren Veränderung zu erfassen, werden repräsentative Bachabschnitte (z.B. Furt-Kolksequenzen) regelmäßig vermessen und in weiterer Folge für die Erstellung von digitalen Geländemodellen herangezogen.

Hinsichtlich der Gewässertypologie bzw. der Fischregion befindet sich der Stobler Weißenbach großteils im Epirhithral (Obere Forellenregion), wobei in etwa die letzten zwei Kilometer vor der Einmündung in die Ischler Ache als Metarhithral (Untere Forellenregion) einzustufen sind (NGP, 2009). Aufgrund dessen wurde für das gesamte Projektgebiet die Bachforelle (*Salmo trutta*) als maßgebliche Zeigerart ausgewählt. Weiters werden in diesen Detailstrecken Kontrollprofile gelegt, die nach Hochwasserereignissen regelmäßig vermessen werden. Damit soll überprüft werden, ob sich diese Bereiche im morphologischen Gleichgewicht befinden oder ob es zu Erosionen oder Sedimentationen kommt. Eine weitere Maßnahme des Pre-Monitorings ist die Begehung und Kartierung der Laichplätze. Dies erfolgte zum Teil schon während der Laichzeit im Herbst 2015. Alle aufgefundenen Laichplätze wurden mittels GPS eingemessen und sind in Abb. 2 mit gelben Punkten gekennzeichnet.

3.2 Phase 2:

In der zweiten Projektphase wurde der Kalkschotter aus dem Rückhalteraum an ausgewählten Stellen in das Gewässer rückgeführt. Bei diesen Ablagerungsorten soll es sich um strömungsgünstige Bereiche von Umlagerungsstrecken (beispielsweise Außenbögen) handeln. Somit hat der Bach bei erhöhter Wasserführung die Möglichkeit, die Sedimente selbstständig zu mobilisieren und wieder in das System einzubringen. Für das erweiterte Monitoring dieser Maßnahme werden zusätzliche Vermessungsarbeiten durchgeführt und RFID-Tracersteinen dem deponierten Material beigegeben. Somit kann dokumentiert werden, ob das abgelagerte Material mobilisiert wird, wie weit es transportiert wird und wo es sich auf natürlichem Weg wieder ablagert. Im Zuge dieser Projektphase kommt es auch zu einer Aktualisie-

rung der morphologischen Aufnahmen (Detailstrecken), um mit Hilfe der Habitatmodellierung die mögliche Veränderung des potenziellen Lebensraums bewerten zu können.

3.3 Phase 2:

In der dritten Projektphase wurde die Sperre derart bewirtschaftet, sodass durch händische und maschinelle Freilegung der Öffnungen die Verklausungen gelöst wurden, und bei höherer Wasserführung eine selbständige Entleerung erfolgen konnte. Dabei wurden die Trübungen entlang der Bachstrecke an mehreren Messstellen kontinuierlich aufgezeichnet. Durch die Zugabe von Tacersteinen konnte der Transportweg des freigegebenen Geschiebes verfolgt und aufgezeichnet werden. Zusammen mit den regelmäßigen Vermessungsarbeiten in den verschiedenen Detailstrecken und den Ergebnissen aus der Habitatmodellierung kann der Einfluss der zusätzlichen Sedi-
mentzugabe auf diverse Lebensräume erfasst und bewertet werden.

Neben der maximalen Trübung und den Geschiebetransportspitzen ist auch die zeitliche Ausdehnung der Belastung sowie der Auftrittszeitpunkt (Larvenstadium) entscheidend für die negativen Auswirkungen auf die vorhandene Fischpopulation. Von besonderem Interesse ist die longitudinale Veränderung der Belastung infolge der gesetzten Maßnahmen und deren Auswirkung auf flussabgelegene Fließgewässer.

4 Ergebnisse

4.1 Hydrologie und Hydraulik:

Das Abflussregime wird als nivo-pluvial klassifiziert und zeichnet sich durch eine Schneeschmelzspitze im April bis Mai sowie zusätzlich in den Sommermonaten aus. Anhand der im Projekt durchgeführten Wasserstandsaufzeichnungen konnten auch immer wieder Winterhochwässer (meistens im Dezember) dokumentiert werden. Das Mittelwasser beträgt $1,93 \text{ m}^3/\text{s}$ und das Bemessungshochwasser ($BE_{\text{Wasser} + \text{Feststoffe}}$) liegt bei $\sim 150 \text{ m}^3/\text{s}$. Seit Projektbeginn konnten 33 Ereignisse in der Größenordnung eines HQ_1 bis HQ_5 zwischen 15 und $40 \text{ m}^3/\text{s}$ und weitere 2 Ereignisse mit einem Abflussscheitel von über $110 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen werden. Die beiden letzten Werte liegen in der Größenordnung eines HQ_{50} .

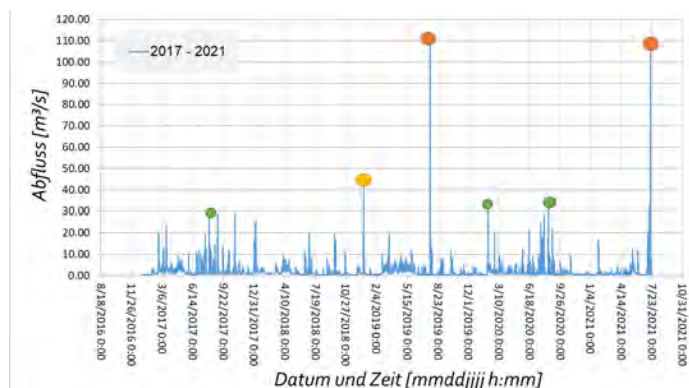


Abbildung 3: Auszug Pegelmessung Strobl Weißbach 2017-2021
(Quelle: HD Salzburg, adaptiert mit Ereignisspitzen)

4.2 Schwebstoffe

Die kontinuierliche Aufzeichnung der Trübungen durch die Schwebstoffsonden ist nicht nur für die hydrologischen Normaljahre und deren Bewirtschaftung wie etwa 2017 von Interesse, sondern im Speziellen die Auswertung und Analyse der Ereignisse 2019 und 2021. Im Jahresgang finden große Trübungen beginnend vom Monat Mai bis in den Oktober statt. Einzelereignisse im Winter liefern auch höhere Werte, sind jedoch eher selten.

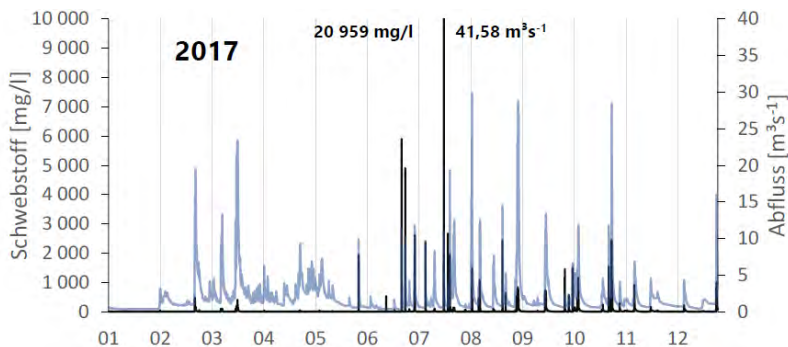


Abbildung 4: Jahresganglinie 2017; Blaue Linien sind die Abflussmengen und die schwarzen Linien jene der Schwebstoffmenge in mg/l

Beide Großereignisse zeigen ein ähnliches Bild. Die Schwebstoffkonzentration folgt dem Ganglinienverlauf des Abflusses, mit Erreichen des Abflussscheitels von je 110 m³/s werden um die 18.000 mg/l Schwebstoff aufgezeichnet.

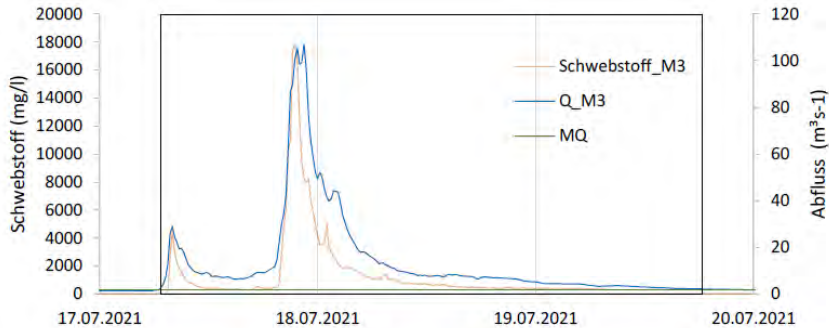


Abbildung 5: Ganglinie Extremereignis 2021; Blaue Linien sind die Abflussmengen

und die orangenen Linien jene der Schwebstoffmenge in mg/l

Unter Anwendung eines empirischen Modells zur Abschätzung der Folgen erhöhter Trübung auf Fische nach Newcombe (2003) kann festgestellt werden, dass die in hydrologischen Normaljahren gemessenen Trübungen nur eine temporäre Erhöhung von Stress für die betroffenen Fische zur Folge haben. Bei größeren und längeren Hochwässern wie im Zuge der beiden Ereignisse 2019 und 2021 erreichen die Trübungen höhere Werte mit langer Dauer und können gemäß dem Modell von Newcombe (2003) bereits letale, physiologische Auswirkungen zur Folge haben, da sowohl die Konzentration selbst als auch die Expositionsdauer maßgebend für die Modellschätzung sind.

Das für einen Kalkwildbach feinkörnige Sediment ($d_{50} = 23 \text{ mm}$; $d_{90} = 94 \text{ mm}$) wird in Form eines Geschiebebandes bachabwärts transportiert. Die Transportweiten und -geschwindigkeiten konnten durch den Einsatz von ca. 300 RFID-Tracersteinen ermittelt werden. Die jährlichen Transportweiten liegen je nach Korngröße zwischen 500 und 3000 m. Je Kornfraktion kann mit einer adaptierten Transportweitenformel die mittlere Transportweite in Abhängigkeit vom Durchfluss berechnet werden (Klösch und Habersack 2018).

4.3 Befischungsdaten – Biomasse und Individuenanzahl

In den untersuchten Strecken des Strobler Weißenbaches ist im Wesentlichen seit Beginn der Untersuchungen 2017 bis 2023 ein markanter Abfall im Jahr 2018 bzw. 2019 nach dem ersten großen Hochwasser zu erkennen. Die Zunahme in der Befischungsstrecke BS_4 im Herbst 2019 ist auf das Abwandern der Individuen und somit auch der Biomasse vom Sommerereignis 2019 zurückzuführen. Die leichte Erholung in den letzten 2 Jahren in der BS_3 und somit Resilienz gegenüber Störungen lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass BS_3 im Gegensatz zu BS_1, BS_Z1 und BS_2 keine unüberwindbaren Querbauwerke bis zur Einmündung in den Vorfluter Ischl aufweist. Als Folge dessen, können Fische bei extremen Abflussereignissen mit einhergehenden hohem Sedimenttransport (wie z.B. am 29.7.2019 und 17.07.2021), in dem sehr stabilen bzw. unbeeinflussten Bereich des Seeausrinnens (Ischl) oberhalb der Einmündung zurückziehen und nach Abklingen des Ereignisses das ursprüngliche Habitat wieder aufsuchen. Eine Besiedelung bzw. auch Rückbesiedelung von flussab ist an den Strecken BS_1, BS_Z1 und BS_2 aufgrund der unterbrochenen Durchgängigkeit durch Querbauwerke (z.B. Sohlschwellen) für Fische jedoch nicht möglich. Innerhalb beider Untersuchungsstrecken der Ischler Ache wurden im Jahre 2023 die bisher niedrigsten Werte für die Fischbiomasse erhoben (Anm.: Eine fischereiliche Bewirtschaftung findet in diesem Abschnitt seit 2019 nicht mehr statt!).

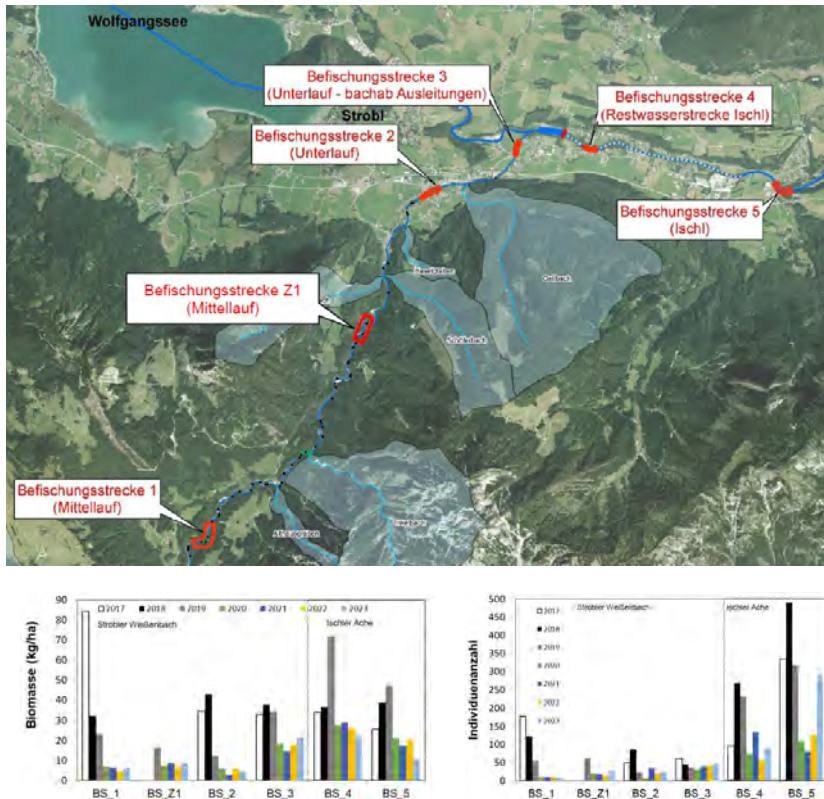


Abbildung 6: Vergleich der geschätzten Biomasse (unten links) und Individuenanzahl (unten rechts) zwischen den Jahren 2017 -2023

5 Ausblick/Schlussfolgerung

Im Projektzeitraum fanden 2 sehr große Hochwasserereignisse ($> HQ_{50}$ mit $> 110 \text{ m}^3/\text{s}$) statt. Diese Ereignisse im Juli 2019 und 2021 wurden im Detail dokumentiert und ausgewertet. Die Analyse der nachfolgenden Jahre 2022 bis 2024 gibt Aufschluss über die natürliche Reproduktion und Anpassung des Gewässerregimes nach solchen Extremereignissen.

Die gesammelten Messdaten im Rahmen des Projektes, das seit 2017 Aufzeichnungen zur Hydrologie, Hydraulik, Geschiebe, Schwebstoffe, Trübungen sowie zur Biotik durch Befischungen, Habitat- und Laichplatzkartierungen umfasst, zeigen keine klaren Hinweise auf eine standardisierte, allgemeingültige Bewirtschaftung.

Eine einseitige Betrachtung, wie zum Beispiel die Festlegung von ökologisch optimalen Zeitpunkten für bewirtschaftende Maßnahmen in Bezug auf Feststoffe sind bei Betrachtung von wirtschaftlichen Interessen, wie die Vergabe von Fliegenfischerkarten sehr stark eingeschränkt bzw. tageweise gar nicht möglich. Auf der anderen Seite führen natürliche Hochwasserereignisse im Stobler Weißenbach zu einer Ausdünnung der lokalen Fischpopulation. Dies ist darauf zurückzuführen, dass anthropogene Eingriffe ins Gewässer, wie beispielsweise Schutzbauten und Wehranlagen, eine Unterbrechung des Gewässerkontinuums verursachen und somit eine natürliche Wiederbesiedelung verhindern.

Ein möglicher Ansatz ist die jahreszeitliche Verknüpfung in Form eines Bewirtschaftungsjahreskreises (Abb. 7). Dieser umfasst die Monitoringmaßnahmen über das Betriebsjahr mit den Entwicklungsstadien sowie fischereilichen Bewirtschaftungszeiten verknüpft dargestellt. Weiters sind die Hochwasser Ereignisse nach Größe geordnet aufgetragen wodurch die Verfügbarkeit von Wasser als Transportmedium auch jahreszeitlich bzw. monatlich erfasst und mit den oben genannten Phänomenen ebenso verknüpft werden kann. In Summe kann dies als erster Ansatz für ein Bewirtschaftungskonzept herangezogen werden. Eine günstige Bewirtschaftung hinsichtlich ausreichender Transportkapazität (genügend Wasserführung) und geringem Einfluss auf fischereiliche Bedürfnisse (Fliegenfischen) ist im Monat September gegeben.

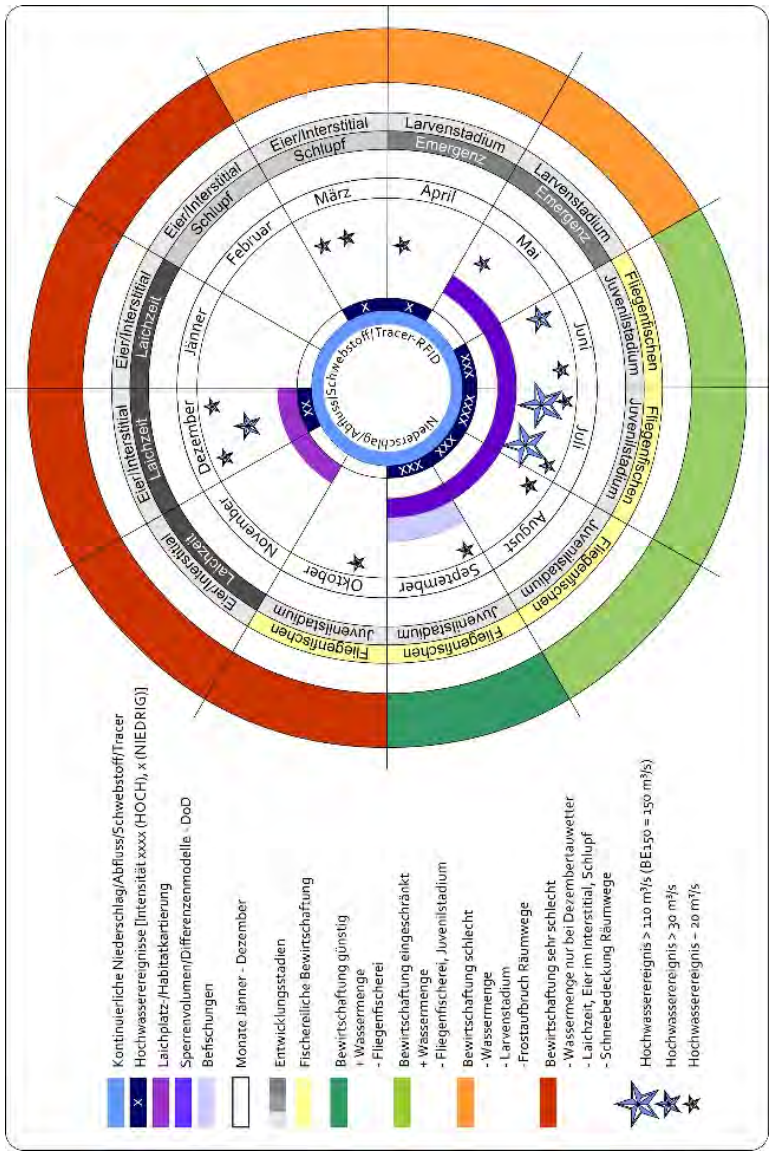


Abbildung 7: Bewirtschaftungsjahreskreis

6 Ausblick

Trotz der hohen Komplexität des Systems ermöglichen die im Zuge des Projektes gewonnenen Ergebnissen neue Erkenntnisse. Die einzelnen Phänomene der Naturgefahrenprozesse wurden erfasst und die Zusammenhänge der verschiedenen Teilprozesse werden im Zuge der letzten Projektphase noch detailliert analysiert. Klar ist in diesem Fachbereich noch weiterer Forschungsbedarf für ein verbessertes Prozessverständnis notwendig damit geeignete Maßnahmen für die Feststoffbewirtschaftung von Schutzbauwerken gesetzt werden können, die dazu dienen das Leben in alpinen Gebieten weiterhin zu ermöglichen. „Fit for the future“ ist auch im Zeichen der klimatischen Veränderungen sehr wesentlich.

DI Markus Moser
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Lungau
Johann Löcker Str. 3, 5580 Tamsweg
markus.moser@die-wildbach.at

Lisa Puschmann, BSc
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Lungau
Johann Löcker Str. 3, 5580 Tamsweg
lisa.puschmann@die-wildbach.at

DI Stefan Janu
Fachzentrum Wildbachprozesse
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Steiermark Nord
Schönaustraße 50, 8940 Liezen
stefan.janu@die-wildbach.at

DI Dorian Shire-Peterlechner
Institut für Wasserbau, Hydraulik und
Fließgewässerforschung (IWA), BOKU -
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU), Am Brigittenauer Sporn 3
1200 Wien
dorian.shire@boku.ac.at

DI Dr. Patrick Holzapfel
Institut für Wasserbau, Hydraulik und
Fließgewässerforschung (IWA), BOKU -
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU), Am Brigittenauer Sporn 3
1200 Wien
Am Brigittenauer Sporn 3
1200 Wien
patrick.holzapfel@boku.ac.at

DI Rolf Rindler
Institut für Wasserbau, Hydraulik und
Fließgewässerforschung (IWA), BOKU -
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU), Am Brigittenauer Sporn 3
1200 Wien
Am Brigittenauer Sporn 3
1200 Wien
rolf.rindler@boku.ac.at

7 Literatur

Newcombe, C. P. (2003). Impact assessment model for clear water fishes exposed to excessively cloudy water. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 39(3), 529-544.

Klösch, M. and Habersack, H. (2018) Deriving formulas for an unsteady virtual velocity of bedload tracers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(7), 1529-1541. Available at: DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4326>.

Rindler, R., Holzapfel, P., Hauer, C., Jury, G., Moser, M., Fischer, A., Gumpinger, C. and Habersack, H. (2019) Innovatives Feststoffmanagement für Wildbacheinzugsgebiete am Beispiel des Strobler Weißenbaches. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. Available at: DOI: 10.1007/s00506-019-0560-6.

Rudolf-Miklau, F. and Patek, M. *Geschiebebewirtschaftung in Wildbacheinzugsgebieten im Einklang mit der EU-Wasserrahmenrichtlinie*. INTERPRAEVENT. Riva / Trient, 2008.

Technische Hydromechanik

Technische Hydromechanik 1

Grundlagen

von Gerhard Bollrich
8., aktualisierte Auflage 2019.
448 S. A5. Gebunden.
62,00 EUR
ISBN 978-3-410-29169-5

Aus dem Inhalt:

- Physikalische Eigenschaften des Wassers
- Stationäre Strömung in Druckrohrleitungen
- Stationäres Fließen in offenen Gerinnen
- Instationäre Strömungen
- Ausfluss aus Gefäßen und unter Schützen; Retention
- Abfluss über Wehre und Überfälle

Technische Hydromechanik 2

Spezialfälle

Herausgeber: Detlef Aigner, Dirk Carstensen
2., vollständig überarbeitete Auflage 2015. ca. 384 S. A5. Gebunden.
ca. 59,00 EUR
ISBN 978-3-410-22209-5

Aus dem Inhalt:

- Plötzlich veränderliche Strömungen in offenen Gerinnen
- Theorie der Wellenbewegung
- Dichteströmungen
- Geschiebe
- Flüssigkeitsstrahlen
- Druckrohrnetzrechnungen
- Feststofftransport
- Eis im Wasserbau

Technische Hydromechanik 3

Aufgabensammlung

von Helmut Martin, Reinhard Pohl
4., überarbeitete und erweiterte Auflage 2014.
260 S. A5. Gebunden.
28,00 EUR
ISBN 978-3-410-24130-0

Aus dem Inhalt:

- über 80 Aufgaben und Lösungen
- hydraulische Modellbildung
- Anwendung von Berechnungsalgorithmen
- analytische und grafische Lösungsverfahren

Technische Hydromechanik 4

Numerische und hydraulische Modelle

Herausgeber: Helmut Martin, Reinhard Pohl
3., überarbeitete Auflage 2015.
406 S. A5. Gebunden.
74,00 EUR
ISBN 978-3-410-24172-0

Aus dem Inhalt:

- Hydraulisches Versuchswesen
- Gerinneströmung
- Hydraulik der Wasserbehandlungsanlagen
- Hydraulische Probleme an ausgewählten Betriebseinrichtungen



Mehr Infos und Bestellung:

beuth.de/go/hydraulik

E-MAIL kundenservice@beuth.de

TELEFON +49 30 58885700-70

Bisher erschienene Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Heft 1 (vergriffen)	1989	Klaus Römisch Empfehlung zur Bemessung von Hafeneinfahrten Eberhard Lattermann Bemessungsgrundlagen für Dichtungen und Deckwerke im Wasserbau
Heft 2 (vergriffen)	1990	Frank Krüger Schubspannungsverteilungen in offenen, geradlinigen Trapez- und Rechteckgerinnen Helmut Martin, Reinhard Pohl Überflutungssicherheit von Talsperren
Heft 3 (vergriffen)	1990	Reinhard Pohl Die Entwicklung der wasserbaulichen Lehre und Forschung an der Technischen Universität Dresden Reinhard Pohl Die Berechnung der auf- und überlaufvermindernden Wirkungen von Wellenumlenkern im Staudammbau
Heft 4 (vergriffen)	1991	Ellen Haufe Hydromechanische Untersuchungen von Mischungs-, Flockungs- und Sedimentationsprozessen in der Trinkwasseraufbereitung
Heft 5	1994	Wasserbaukolloquium 1993 Die Elbe - Wasserstraße und Auen
Heft 6 (vergriffen)	1995	Wasserbaukolloquium 1994 Wasserkraft und Umwelt ISBN 3-86005-154-7
Heft 7	1995	Wasserbaukolloquium 1995 Hydromechanische Beiträge zum Betrieb von Kanalnetzen ISBN 3-86005-155-5
Heft 8	1996	Detlef Aigner Hydrodynamik in Anlagen zur Wasserbehandlung ISBN 3-86005-164-4

Heft 9 (vergriffen)	1996	Wasserbaukolloquium 1996 Wellen: Prognosen - Wirkungen - Befestigungen ISBN 3-86005-165-2
Heft 10	1997	Wasserbaukolloquium 1997 Sanierung und Modernisierung von Wasserbauwerken, aktuelle Beispiele aus Deutschland, Polen, der Slowakei und Tschechien ISBN 3-86005-185-7
Heft 11 (vergriffen)	1997	Reinhard Pohl Überflutungssicherheit von Talsperren ISBN 3-86005-186-5
Heft 12 (vergriffen)	1998	Reinhard Pohl Die Geschichte des Institutes für Wasserbau an der Technischen Universität Dresden ISBN 3-86005-187-3
Heft 13	1998	Wasserbaukolloquium 1998 Hydraulische und numerische Modelle im Wasserbau, Entwicklung - Perspektiven ISBN 3-86005-201-2
Heft 14	1998	Uwe Müller Deformationsverhalten und Belastungsgrenzen des Asphaltbetons unter den Bedingungen von Staudammkerndichtungen ISBN 3-86005-213-6
Heft 15	1999	Wasserbaukolloquium 1999 Betrieb, Instandsetzung und Modernisierung von Wasserbauwerken ISBN 3-86005-223-3
Heft 16	1999	Dirk Carstensen Beanspruchungsgrößen in Fließgewässern mit geschwungener Linienführung ISBN 3-86005-236-5
Heft 17 (vergriffen)	1999	Ehrenkolloquium Prof. Martin anlässlich des 60. Geburtstages von Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Martin ISBN 3-86005-237-3

Heft 18	2000	Wasserbaukolloquium 2000 Belastung, Stabilisierung und Befestigung von Sohlen und Böschungen wasserbaulicher Anlagen ISBN 3-86005-243-8
Heft 19	2001	Seleshi B. Awulachew Investigation of Water Resources Aimed at Multi-Objective Development with Respect to Limited Data Situation: The Case of Abaya-Chamo Basin, Ethiopia ISBN 3-86005-277-2
Heft 20	2001	Stefan Dornack Überströmbare Dämme Beitrag zur Bemessung von Deckwerken aus Bruchsteinen ISBN 3-86005-283-7
Heft 21	2002	Wasserbaukolloquium 2002 Innovationen in der Abwasserableitung und Abwassersteuerung ISBN 3-86005-297-7
Heft 22	2002	Zelalem Hailu G. Chirstos Optimisation of Small Hydropower Sites for Rural Electrification ISBN 3-86005-304-3
Heft 23	2002	Ehrenkolloquium Prof. Wagner Zur Emeritierung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Harold Wagner ISBN 3-86005-307-8
Heft 24	2003	Wasserbaukolloquium 2003 Gewässer in der Stadt ISBN 3-86005-358-2
Heft 25	2003	Toufik Tetah Numerische Simulation des dynamischen Verhaltens von Caisson-Wellenbrecher-Gründungen unter Einwirkung brechender Wellen ISBN 3-86005-363-9
Heft 26	2003	Ehrenkolloquium Prof. Horlacher Zum 60. Geburtstag von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-B. Horlacher ISBN 3-86005-376-0

Heft 27 (vergriffen)	2004	Wasserbaukolloquium 2004 Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von Fließgewässern und Stauanlagen ISBN 3-86005-414-7
Heft 28	2004	Reinhard Pohl Historische Hochwasser aus dem Erzgebirge ISBN 3-86005-428-7
Heft 29 (vergriffen)	2005	Wasserbaukolloquium 2005 Stauanlagen am Beginn des 21. Jahrhunderts ISBN 3-86005-461-9
Heft 30	2005	Nigussie Teklie Girma Investigation on Sediment Transport Characteristics and Impacts of Human Activities on Morphological Processes of Ethiopian Rivers: Case Study of Kulfo River, Southern Ethiopia ISBN 3-86005-483-X
Heft 31	2006	Matthias Standfuß Druckwellenausbreitung in erdverlegten Rohrleitungen aus PE-HD ISBN 3-86005-495-3
Heft 32	2006	Wasserbaukolloquium 2006 Strömungssimulation im Wasserbau ISBN 3-86005-473-2
Heft 33	2006	Antje Bornschein Die Ausbreitung von Schwallwellen auf trockener Sohle unter besonderer Berücksichtigung der Wellenfront ISBN 3-86005-523-2
Heft 34	2007	Torsten Frank Hochwassersicherheit in sielbeeinflussten Gewässersystemen am Beispiel des Bongsieler Kanals ISBN 978-3-86780-019-8
Heft 35	2007	Wasserbaukolloquium 2007 Fünf Jahre nach der Flut ISBN 987-3-86005-571-7
Heft 36	2008	Aktuelle Forschungen 1993 – 2008 Zum 65. Geburtstag von Herrn Prof. Horlacher ISBN 978-3-86780-083-9

Heft 37	2009	Dirk Carstensen Eis im Wasserbau - Theorie, Erscheinungen, Bemessungsgrößen ISBN 978-3-86780-099-0
Heft 38 (vergriffen)	2009	Reinhard Pohl, Antje Bornschein, Robert Dittmann, Stefano Gilli Mehrzieloptimierung der Steuerung von Talsperren zur Minimierung von Hochwasserschäden im Unterwasser ISBN 978-3-86780-100-3
Heft 39 (vergriffen)	2009	Wasserbaukolloquium 2009 Wasserkraftnutzung im Zeichen des Klimawandels, angepasste Strategien - neue Technologien ISBN 978-3-86780-101-0
Heft 40 (vergriffen)	2010	Wasserbaukolloquium 2010 Wasserbau und Umwelt - Anforderungen, Methoden, Lösungen ISBN 978-3-86780-101-0
Heft 41	2010	Ralf Tackmann Erosion 2008 - Ein numerisches Modell zur Prognose des Bodenaustrages von kohäsiven Böden unter Berücksichtigung der Rillenerosion ISBN 978-3-86780-158-4
Heft 42	2010	Ulf Helbig Tragverhalten und Berechnung von mehrschichtigen Verbundrohren ISBN 978-3-86780-159-1
Heft 43	2010	Stefano Gilli Die Wirkung von Flussaufweitungen auf Hochwasserwellen - Parameterstudie einer Deichrückverlegung im Flussmittellauf ISBN 978-3-86780-160-7
Heft 44	2010	Negede Abate Kassa Probabilistic Safety Analysis of Dam - Methods and Applications ISBN 978-3-86780-161-4
Heft 45 (vergriffen)	2011	Wasserbaukolloquium 2011 Wasserkraft - Mehr Wirkungsgrad + Mehr Ökologie = Mehr Zukunft ISBN 978-3-86780-198-0

Heft 46	2011	Torsten Heyer Zuverlässigkeitsbewertung von Flussdeichen nach dem Verfahren der logistischen Regression ISBN 978-3-86780-197-3
Heft 47	2011	Wasserbaukolloquium 2012 Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben ISBN 978-3-86780-261-1
Heft 48	2013	Wasserbaukolloquium 2013 Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz - Bauwerke, Anforderungen, Modelle ISBN 978-3-86780-318-2
Heft 49	2013	Vinzent Sturm Simulation der Fluid-Struktur-Interaktion mit freier Oberfläche am Beispiel des Schlauchwehres unter Anwendung von Ansys/CFX ISBN 978-3-86780-348-9
Heft 50	2014	Wasserbaukolloquium 2014 Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft ISBN 978-3-86780-349-6
Heft 51	2014	Holger Haufe Zwischenauslässe an Talsperren - Beispiele, Bemessung, Konstruktion, Nachrüstung ISBN 978-3-86780-393-9
Heft 52	2014	Pohl/Bornschein u. a. Effect of very oblique waves on wave run-up and wave overtopping ISBN 978-3-86780-392-2
Heft 53	2015	Wasserbaukolloquium 2015 Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer ISBN 978-3-86780-420-2
Heft 54	2015	Mohammed Abdallah Developing a Multi-purpose Reservoir operating Model with Uncertain Conditions: a Case of Eastern Nile Reservoirs - Sudan ISBN 978-3-86780-431-8

Heft 55	2015	Paolo Dapoz Reinigung von Abwasserkanälen mittels Niederdruckspülverfahren ISBN 978-3-86780-432-5
Heft 56	2015	JuWi-Treffen 17. JuWi-Treffen: Fachbeiträge zur Tagung (26.-28.08.2015) ISBN 978-3-86780-448-6
Heft 57	2016	Wasserbaukolloquium 2016 Gewässerentwicklung & Hochwasserrisikomanagement ISBN 978-3-86780-475-2
Heft 58	2017	Wasserbaukolloquium 2017 Bemessung im Wasserbau - Klimaanpassung, Untersuchung, Regeln, Planung, Ausführung ISBN 978-3-86780-509-4
Heft 59	2017	Roberto Tatis Muvdi A contribution to the hydro morphological assessment of running waters based on habitat dynamics. ISBN 978-3-86780-512-4
Heft 60	2018	Wasserbaukolloquium 2018 Wasserbauwerke im Bestand - Sanierung, Umbau, Ersatz- neubau und Rückbau ISBN 978-3-86780-556-8
Heft 61	2018	Lydia Schulze Development of an Application-Oriented Approach for Two- Phase Modelling in Hydraulic Engineering 978-3-86780-571-1
Heft 62	2019	Wasserbaukolloquium 2019 Komplexe Planungsaufgaben im Wasserbau und ihre Lösungen 978-3-86780-577-3
Heft 63	2020	Wasserbaukolloquium 2020 Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel 978-3-86780-627-5

- | | | |
|---------|------|---|
| Heft 64 | 2020 | Rocco Zimmermann
Einbindung von turbulenten Zustandsgrößen der
Propulsionsbelastung des Bugstrahlruders in die Bemessung
von Schüttsteindeckwerken an Binnenschiffahrtsstraßen
978-3-86780-649-7 |
| Heft 65 | 2021 | Wasserbaukolloquium 2021
Wasserbau zwischen HochWASSER UND Wassermangel
(Hydraulic Engineering between Floods and Water Scarcity)
ISBN 978-3-86780-662-6 |
| Heft 66 | 2021 | Bashar Ismael
Fluid- und Feststofftransport in Rohrsystemen und
Pumpstationen
ISBN 978-3-86780-660-2 |
| Heft 67 | 2021 | Hellen Hammoudi
Modeling of Mixing in Cross Junction using Computational Fluid
Dynamics
ISBN 978-3-86780-668-8 |
| Heft 68 | 2022 | Wasserbaukolloquium 2022
Nachhaltigkeit im Wasserbau – Umwelt, Transport, Energie
(Sustainability in Hydraulic Engineering – Environment,
Transportation, Energy)
ISBN 978-3-86780-710-4 |
| Heft 69 | 2023 | Wasserbaukolloquium 2023
Wasserbau und Wasserwirtschaft im 'Stresstest' (Hydraulic
Engineering and Water Management under 'Stress Test')
ISBN 978-3-86780-731-9 |
| Heft 70 | 2023 | Muhammad Adnan Khan
Sustainable Reservoir Management Approaches under Impacts
of Climate Change - A Case Study of Mangla Reservoir, Pakistan
ISBN 978-3-86780-750-0 |
| Heft 71 | 2023 | Niklas Schwiersch
Ein risikobasierter Planungsansatz für homogene Flusssdeiche
ISBN 978-3-86780-751-7 |

Die Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen können bezogen werden über:

Technische Universität Dresden
Bereich Bau und Umwelt
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
01062 Dresden

Telefon: +49 351 463 34397
Fax: +49 351 463 37120
E-Mail: wasserbau@tu-dresden.de

Ein großer Teil unserer Hefte ist digitalisiert und im „Hydraulic Engineering Repository – HENRY“ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) einzusehen.

<https://henry.baw.de/>

Handbuch der Hydraulik

für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Das »Handbuch der Hydraulik« bildet das gesamte Spektrum der Hydraulik in Wasserbau und Wasserwirtschaft ab. Es ist als erweitertes Nachschlagewerk für Ingenieure, Studierende und Auszubildende konzipiert und die ideale Ergänzung zu der vierbändigen Fachbuchreihe »Technische Hydromechanik«. Speziell auf die Lösung von praktischen hydromechanischen Aufgabenstellungen ausgerichtet, enthält das Handbuch die wichtigsten Berechnungsgrundlagen, mathematische Formeln einschließlich der notwendigen geometrischen und physikalischen Tafelwerte.

Aus dem Inhalt:

- Mathematische Grundlagen der Hydraulik
- Physikalische Größen und Einheiten
- Hydrostatik
- Hydrodynamische Grundgleichungen
- Druckrohrströmung
- Freispiegelströmung
- Überfälle und Hochwasserentlastungsanlagen
- Wasserstrahlen
- Sicker- und Grundwasserströmungen



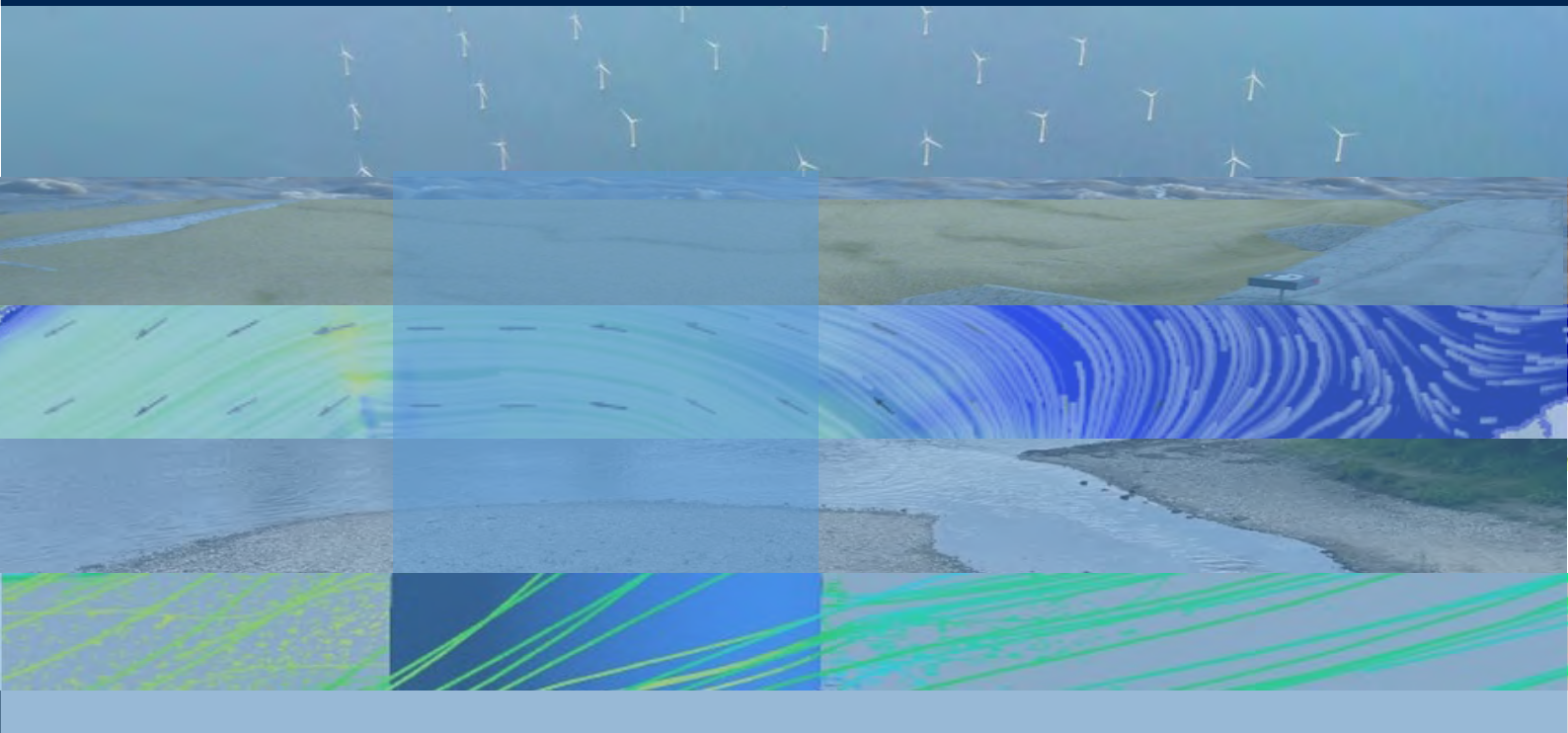
Auch als E-Book unter:
beuth.de/go/hydraulik

2. Auflage



2., überarbeitete Auflage 2021.
528 S. 24 × 17 cm. Gebunden.
86,00 EUR | ISBN 978-3-410-30748-8

Die Autoren Prof. Dr.-Ing. Detlef Aigner und Dr. Gerhard Bollrich benennen typische Probleme, beschreiben sie kurz und führen die zur Lösung erforderlichen Gleichungen und Beiwerte auf. Die Lösung eines Problems ist einerseits mit Hilfe von Diagrammen oder Tabellen möglich, kann aber auch andererseits aus Gleichungen und Beiwerten selbst gefunden werden.



ISSN 0949-5061
ISBN 978-3-86780-766-1