



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff (Hrsg.)
LuFG „Wasserwirtschaft und Wasserbau“
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
Bergische Universität Wuppertal

Jessica Mohlfeld

Einfluss unterschiedlicher Leitelemente
auf die Hydraulik in flach geneigten Schlitzpässen

Bericht Nr. 23, 2021



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

EINFLUSS UNTERSCHIEDLICHER LEITELEMENTE
AUF DIE HYDRAULIK
IN FLACH GENEIGTEN SCHLITZPÄSSEN

von der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
der Bergischen Universität Wuppertal

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von

Jessica Mohlfeld, M. Eng.

aus Neumünster

©LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal
Vervielfältigung nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Autors

Eingereicht am: 28.03.2020

Prüfung am: 16.11.2020

Erster Gutachter Prof. Dr.-Ing. habil. M. Oertel
Wasserbau, Wasserbaulabor
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
ehemals Technische Hochschule Lübeck

Zweiter Gutachter Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff
LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau
Bergische Universität Wuppertal

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Rinklebe
LuFG Boden- und Grundwassermanagement
Bergische Universität Wuppertal

Weiteres Mitglied Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort
LuFG Geotechnik
Bergische Universität Wuppertal

Bericht – Lehr- und Forschungsgebiet
Wasserwirtschaft und Wasserbau

Band 23

Jessica Mohlfeld

**Einfluss unterschiedlicher Leitelemente auf die
Hydraulik in flach geneigten Schlitzpässen**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7983-8

ISSN 0179-9444

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort (Hrsg.)

Stauhaltungen und Querbauwerke gehören seit Generationen zu den wichtigsten wasserwirtschaftlichen Maßnahmen zur Bewirtschaftung der heutigen Kulturlandschaft. Die häufigste Aufgabe dieser Bauwerke kommt der Regulierung der Wasserstände und der Begrenzung der Sohlerosion zu, die nach Veränderungen der Fließgewässerstruktur, wie Begradigung und Uferbefestigung, häufig erforderlich sind. Die entstandene Fallhöhe machte in der Regel auch eine Nutzung der Wasserkraft möglich.

Der Bedeutung der Durchgängigkeit von Fließgewässern für die Erhaltung und Entwicklung der Lebensbedingungen von Fischen und Kleinstlebewesen wurde im Wasserbau lange Zeit zu wenig Aufmerksamkeit entgegengebracht. Erst gegen Ende des letzten Jahrhunderts wurden Fischaufstiegsanlagen auch planerisch im Zuge von Sanierungsmaßnahmen konzipiert, um den wandernden Fischen den Aufstieg zu den angestammten Laichplätzen der größeren Flüsse zu ermöglichen. Die ersten Fischpässe waren dabei eher technisch konzipiert und vielleicht zu sehr von einem Bild von aufsteigenden Lachsen und anderen Salmoniden geprägt. Erst in den letzten Jahrzehnten konnten systematische Untersuchungen zeigen, wie die Durchgängigkeit der Fließgewässer mit Fischpässen verbessert werden kann. Als eine bewährte Bauweise hat sich der Fischpass mit vertikalen Schlitten, die sogenannte Schlitzpassbauweise, erwiesen. Für diese Bauweise liegen zahlreiche Untersuchungen und Feldversuche vor. Allerdings zeigt die Sicht auf die Untersuchungen und die gängigen Regelwerke, dass diese Bauwerke vor allem in Gewässern der Mittelgebirge zum Einsatz kommen und die Regelwerke sich entsprechend auf die dort vorzufindenden hydraulischen und morphologischen Verhältnisse ausrichten. Diese Bauweise wurde aber wegen der einfachen bautechnischen Herstellung und des geringen Raumbedarfs gerne auch in Gewässern des Norddeutschen Flachlandes eingesetzt, ohne dass für diesen Raum und diese Gewässer entsprechend genügend viele Untersuchungen vorliegen.

Zudem musste bei Funktionskontrollen an einigen Gewässern des Norddeutschen Tieflandes und an verschiedenen Stellen festgestellt werden, dass die Durchgängigkeit nicht in dem erhofften Maße geschaffen werden konnte, bzw. die Fische die Strukturen nicht ausreichend

annehmen. Als Gründe hierfür können biologische, morphologische, hydraulische oder etho-hydraulische Ursachen vermutet werden. Insbesondere die hydraulischen Verhältnisse in den Fischpässen können leicht von dem gewünschten Wertebereich abweichen, weil die Strömung bzw. die Turbulenz- und Energieverteilung in den Becken sehr sensibel auf die Änderung von Randbedingungen reagiert. So beeinflussen die geometrische Form und die Ausbildung der Schlitzte nicht nur die sich einstellenden Wasserspiegeldifferenzen, sondern auch die gesamte Strömung in den Becken. Dabei ist allerdings nicht hinreichend geklärt, welche geometrische Form der Schlitzte eine optimale Ausbildung der gewünschten Strömung in den Becken begünstigt und ob bei vorliegenden Defiziten diese durch eine Anpassung der geometrischen Ausbildung positiv beeinflusst werden kann.

Die vorliegende Dissertation greift diese Fragestellung auf und zeigt in detaillierten Untersuchungen den Einfluss von Leitelementen auf die hydraulischen Verhältnisse sowie insbesondere auf die Turbulenz- und Energieverteilung. Die umfangreichen Modellversuche wurden im Wasserbaulabor der Technischen Hochschule Lübeck durchgeführt und zeigen, wie sensibel die Strömung auf Änderungen von Randbedingungen reagiert. Die Dissertation ist in enger Kooperation zwischen der Technischen Hochschule Lübeck und der Bergischen Universität Wuppertal erarbeitet worden.

Wuppertal, 12.03.2021

Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff

Lübeck/Hamburg, 12.03.2021

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. M. Oertel

„WIR KÖNNEN DEN WIND NICHT ÄNDERN,
ABER WIR KÖNNEN DIE SEGEL RICHTIG SETZEN.“

Aristoteles

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Zuge meiner Anstellung als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Wasserbaulabor der Technischen Hochschule Lübeck. Ich möchte mich also zunächst herzlich bei meinem Vorgesetzten, Gutachter und Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Mario Oertel für die Betreuung und Unterstützung in den letzten Jahren bedanken. Schon vor Beginn meiner wissenschaftlichen Laufbahn stand er mir mit fachlichem Rat beiseite und entfachte mein Interesse an der Forschung und dem Wasserbau. Er unterstützte mich seitdem nicht nur mit den nötigen zeitlichen und finanziellen Mitteln, die für die Arbeit an der Dissertation nötig waren, sondern darüber hinaus auch in meiner fachlichen Entwicklung. Ebenso bedanke ich mich bei meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff sowie Prof. Dr.-Ing. Jörg Rinklebe für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Nicht zu vergessen sind meine Kollegen im Fachbereich Bauwesen an der TH Lübeck. Insbesondere Frederik Bremer, der immer ein offenes Ohr für fachliche Diskussionen und private Gespräche hatte. Allen studentischen Hilfskräften möchte ich danken für die Unterstützung bei Laborarbeiten und Messungen; hervorzuheben sind hier Finn Witt und Christoph Felzer für die unzähligen Stunden an und im Modell.

Danke auch an meine neuen Vorgesetzten Sebastian Stoll, Niels Wittorf und Thomas Weist und meine Kollegen, die bei der Vollendung der Dissertation auf den letzten Metern hinter mir standen.

Meiner Familie und meinen Freunden gilt mein Dank für die Unterstützung und das Verständnis für die arbeitsreiche Zeit. Meinen Eltern und meinem Mann Felix, die immer an mich glauben, bin ich besonders dankbar. Zudem ein großes Danke an Janna, Kristin, Finn, Malika und Carolin, die mir jede/r auf ihre Weise mit Rat und Tat beiseite standen und dabei freiwillig oder unfreiwillig viel über Schlitzpässe lernen konnten. Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich auf dem Weg zur Vollendung dieser Dissertation begleitet haben.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Hydraulik von flachgeneigten Schlitzpässen und den Einfluss unterschiedlicher Leitelementgeometrien auf diese. Es wurden physikalische Modellversuche ausgewählter Leitelementformen an Schlitzpässen mit einer Sohlneigung von $S = 2,5$ und $5,0\%$ analysiert.

Die vorliegende Arbeit analysiert die Veränderung der Hydraulik, einerseits der Strömung (-smuster) in den Becken, andererseits der Bemessung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung, durch die Anpassung der Leitelemente in flachgeneigten Schlitzpässen. Das Ziel liegt hierbei in der Entwicklung einfacher geometrischer Veränderungen in bestehenden Schlitzpassbecken, welche die Strömung und so den Aufstiegserfolg beeinflussen. Da das Strömungsmuster in der Bemessung wenig Beachtung findet und bisher nur bedingt vorhergesagt werden kann, wird es so ermöglicht das Strömungsmuster im Betrieb einer Anlage zu verändern und auf die Anforderungen der lokalen Fischpopulation anzupassen.

In physikalischen Modellversuchen im Maßstab von etwa 1:2,5 werden Messungen der Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten unterschiedlicher Modellaufbauten durchgeführt, welche die Analyse der Wasserstands-Abfluss-Beziehung sowie der vielfältige dreidimensionale Strömung im Schlitzpassbecken ermöglichen. Hinsichtlich der Strömung werden sowohl Fließgeschwindigkeiten als auch Turbulenzen jeweils einzeln sowie in Kombination miteinander analysiert.

Die etablierten Bemessungsformeln der Wasserstands-Abfluss-Beziehung werden auf die Messergebnisse sowie auf Literaturdaten angewandt und bestätigt werden. Für flachgeneigte Schlitzpässe ist die Anwendbarkeit der Bemessungsformeln bestätigt worden. Die Änderung der Leitelementform bedingt entsprechend geringe Wasserstandsänderungen (bei gleichem Durchfluss), sodass diese nicht ausschlaggebend für die Bemessung sind. Es konnte zusammenfassend aus den durchgeführten Modellversuchen sowie Literaturdaten nachgewiesen werden, dass verschiedene Beckengrößen, Sohlneigungen und Leitelementformen sowie Strömungs-

muster über einen Abflussbeiwert abgebildet werden können. In der Ergebnisanalyse werden Abflussbeiwerte und Anwendungsgrenzen definiert.

Die Abflussbemessung nach der Poleni-Gleichung zeige sich in der Ergebnisanalyse mit einer geringeren Variation zwischen den vorliegenden Wasserstands-Abfluss-Daten und wird daher für die Bemessung von Schlitzpässen empfohlen.

Es hat sich zudem herausgestellt, dass die Form der Leitelemente einen entscheidenden Einfluss auf den Einströmwinkel der Strömung in das Becken ergibt. Des Weiteren resultieren unterschiedliche Einströmwinkel in Abhängigkeit der Sohlneigung. Der Einströmwinkel wurde als maßgebliche Einflussgröße auf Strömung im Schlitzpassbecken hinsichtlich der Fließgeschwindigkeits- und Turbulenzverteilung identifiziert. Die klassische Einteilung in Strömungsmuster 1 und Strömungsmuster 2 kann entsprechend der Einströmwinkel erfolgen, verallgemeinert die Strömungsverhältnisse in den Schlitzpassbecken jedoch stark. So zeigt sich, dass bei geringen Änderungen des Leitelements zwar das Strömungsmuster stabil bleiben kann aber eine Veränderung der Strömungsumlenkung im Mittel als auch in der zeitlichen Schwankung des Strömungsstrahls im Becken eintritt. Die Wirbel am Leitelement leiten dabei die Strömung in das Folgebecken und beeinflussen die gesamte Durchströmung des Beckens. Die alleinige Veränderung des Leitelementes kann in der Folge sogar zu einem Schwankungen des Strömungsmusters zwischen Strömungsmuster 1 und 2 führen. Der Einfluss des Leitelementes auf die Strömung ist dabei stärker je flacher die Sohlneigung des Schlitzpasses ist.

Basierend auf einer umfassenden Literaturstudie wurden Aufstiegszonen aus der kombinierten Wirkung von Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzen definiert, welche auf die Ergebnisse der Modellversuche angewandt wurden. Da Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzen beim durchschwimmen der Fischeaufstiegsanlage gleichzeitig auf den Fisch wirken, ist eine kombinierte Betrachtung dieser zielführend für die Bewertung der Aufstiegswahrscheinlichkeit. So konnten Aufstiegs- und Ruhezone sowie nicht passierbare Zonen definiert und der Einfluss unterschiedlicher Leitelementformen sowie unterschiedlicher Sohlneigungen quantifiziert werden. Es zeigt sich allerdings lediglich die Verlagerung der einzelnen Zonen, während die Flächenanteile dieser in etwa gleich bleiben.

Die Ergebnisse dieser Arbeit ermöglichen es, die Strömung in bestehenden Schlitzpässen in der Praxis mit minimalem konstruktiven Eingriff, der Formänderung der Leitelemente, zu verändern und so auf die Bedürfnisse der lokalen Fischpopulation zu reagieren. Die Bemessung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung bleibt dabei unberührt.

Abstract

The present work deals with hydraulics of low sloped vertical slot fishways and the influence of different designs of flow guiding elements on it. Physical models of a vertical slot fishway with selected flow guiding element designs and two slopes ($S = 2,5$ and $5,0\%$) were analyzed.

The present work analyzes the influence of different flow guiding elements in low slope vertical slot fishways on the hydraulic features such as the flow in it's distribution and flow pattern on one hand and the design formula concerning the waterlevel-discharge-equations in the other hand. The aims lies in developing simple changes in shape at existing vertical slot fishways, which influence the flow and thereby the success of migration. While the flow pattern seems to have an essential effect on the migration success, its prediction is limited. Therefore the aforementioned changes in the flow guiding element's shape can be utilized to influence the flow pattern in existing vertical slot fishways to achieve hydraulics, which meet demands of the local fish population.

Water-surface and -velocity measurements were performed in a physical model experiments (scale 1:2,5) with different configurations. Thus waterlevel-discharge-relations as well as the various three-dimensional flow, such as velocity and turbulence, were analyzed.

The established design formulas concerning waterlevel-discharge-curves showed good agreement with the available data. Applicability of the design formulas for low slope vertical slot fishways was proven. Varying flow guiding elements lead to minimal changes in water level (at constant discharge), which are irrelevant for the hydraulic design. A constant discharge coefficient was proven to be sufficiently accurate for several pool sizes, slopes, flow guiding elements as well as flow pattern. Threshold values for the vertical slot fishway geometry concerning the discharge coefficients are given.

The results showed good agreement and lower errors by calculation the waterlevel-discharge-relation using the Poleni-equation. The Poleni-equation is therefore recommended for design purposes in contrast to the Torricelli-equation.

On the other hand, major influence by the flow guiding element's shape on the inflow angle of the flow in the pool was found. Also, the inflow angle changes with varying fishway slopes. The inflow angle was identified as a significant influencing parameter on the flow in the fishway's pool as well as on the velocity and turbulence distributions. The common definition of flow pattern 1 and flow pattern 2 can be linked to the inflow angle. Whereas the classification with flow pattern oversimplify the complex flow structure in the fishway's pool. The vortex near the flow guiding element routes the flow jet in the next pool and thus the overall flow in the adjacent pool. Changing exclusively the flow guiding element can result in an oscillating flow between both flow pattern. The influence gets stronger with lower slope fishways.

Migration zones, which combine the effect of velocity and turbulence on the migration fish, were defined based on a comprehensive literature review and implemented on the present model results. This combined evaluation is a productive estimation on the migration success because its weights velocity and turbulence in its impact on the migrating fish. Hence, migration and resting zones as well as migration barriers were defined and quantified in the present investigation for varied flow guiding elements and slopes. The analysis showed, that while the zone's areas are constant between the variation, the zone's position changes and thus different resting zones are formed.

The results of the present work enable flow modification in existing vertical slot fishways with minimal constructional measures. Changing the flow guiding element's shape can provide a method to alter the flow structure in the vertical slot fishway in relation to the demands of the local fish population.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	x
Abbildungsverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xix
Variablenverzeichnis	xxi
I Einführung	1
1 Einleitung	3
2 Stand der Forschung	9
2.1 Bemessung der Abflusskapazität	9
2.1.1 Allgemeines	9
2.1.2 Durchfluss einer Gerinneeinengung – Venutri/ Poleni	11
2.1.3 Rückgestauter Ausfluss aus einer Seitenöffnung – Torricelli	13
2.1.4 Lineare, dimensionslose Abflussgleichung	15
2.1.5 Diskussion Abflussbemessung	16
2.2 Hydraulik von Schlitzpässen	18
2.2.1 Allgemeines	18
2.2.2 Wasserspiegellagen und charakteristische Wassertiefen	18
2.2.3 Fließgeschwindigkeiten	21
2.2.4 Turbulenzen	31

2.3	Theorie des Fischverhaltens	36
2.3.1	Schwimmgeschwindigkeit	37
2.3.2	Turbulenzen	41
2.4	Fischreaktion auf die Hydraulik in Fischaufstiegsanlagen	44
3	Forschungsansatz	53
3.1	Forschungsnotwendigkeit	53
3.2	Ziel der Arbeit	56
II	Physikalisches Modellwesen	59
4	Physikalisches Modell	61
4.1	Ähnlichkeitsmodell	61
4.2	Modellgeometrie	62
4.3	Messprogramm	65
4.4	Diskussion Maßstabeffekte	67
5	Messtechnik	69
5.1	Magnetisch induktives Durchflussmessgerät	69
5.2	Ultraschallsensoren	69
5.2.1	Allgemeines	69
5.2.2	Filtermethode für USS-Daten	70
5.3	Geschwindigkeitsmessungen mit ADV	71
5.3.1	Funktionsprinzip	71
5.3.2	Einstellungen	71
5.3.3	Filtermethode für ADV-Daten	74
6	Voruntersuchungen	77
6.1	Schlitzwinkel	77
6.2	Gleichförmigkeit	77
6.3	Charakteristische Wassertiefen	78
6.3.1	Allgemeines	78
6.3.2	Oberwasserstand	80
6.3.3	Unterwasserstand	82
6.3.4	Mittlerer Wasserstand	84
6.3.5	Theoretische Wassertiefen	84

III Ergebnisanalyse	89
7 Wassertiefenverteilung	91
8 Abflussbeiwerte	95
8.1 Allgemeines	95
8.2 Wasserstands-Abfluss-Beziehung	95
8.3 Allgemeines zur Abflussbemessung	99
8.4 Abflussbemessung nach Poleni	100
8.5 Abflussbemessung nach Torricelli	110
8.6 Fazit Abflussbeiwerte	116
9 Fließgeschwindigkeiten	119
9.1 Allgemeines	119
9.2 Maximale Fließgeschwindigkeit	122
9.3 Schlitzgeschwindigkeit	128
9.4 Strömungsmuster und Geschwindigkeitsprofil	131
9.5 Fazit Fließgeschwindigkeiten	152
10 Turbulenzen	157
10.1 Allgemeines	157
10.2 Turbulenzprofile	160
10.3 Leistungsdichte der Energiedissipation	167
10.4 Fazit Turbulenzen	169
11 Diskussion möglicher Aufstiegszonen	173
11.1 Definition von Aufstiegszonen	173
11.2 Lage und Größe der Aufstiegszonen	176
11.3 Fazit Aufstiegszonen	180
IV Schlussbetrachtung	183
12 Zusammenfassung und Fazit	185
13 Weiterer Forschungsbedarf	193
Literaturverzeichnis	204

V	Anhang	205
A	Stand der Forschung	207
B	Modellwesen	209
B.1	Modellgeometrie	209
B.2	Voruntersuchungen	211
B.2.1	Messzeiten	211
B.2.2	Filtermethode ADV-Messungen	213
B.2.3	Gleichförmigkeit	226
C	Wassertiefen	227
C.1	Exemplarische Ganglinien der Wassertiefen	227
C.2	Isolinien der Wassertiefenverteilung	230
C.3	Isolinien der Wassertiefenänderung	240
C.4	Standardabweichung der Wassertiefen	250
D	Fließgeschwindigkeiten	261
D.1	Vergleich der Messhöhen maximale Fließgeschwindigkeit	261
D.2	Fließgeschwindigkeitsprofile im Schlitz	266
D.3	Vergleich der Messhöhen der Geschwindigkeitsprofile	268
D.4	Fließgeschwindigkeiten (dimensionslos)	273
D.5	Fließgeschwindigkeiten (dimensionsbehaftet)	284
E	Turbulenzen	293
E.1	Turbulenzen (dimensionslos)	293
E.2	Turbulenzen (dimensionsbehaftet)	298
F	Aufstiegszonen	303