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

Daniel Brumme

Einflüsse und Auswirkungen von Lenkbuhnen auf die hydromorphologischen Prozesse einer beweglichen Gewässersohle

– Eine numerische Analyse –

Bericht Nr. 25, 2021

BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Einflüsse und Auswirkungen von Lenkbuhnen auf die hydromorphologischen Prozesse einer beweglichen Gewässersohle - Eine numerische Analyse -

von der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
der Bergischen Universität Wuppertal

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

von
Daniel Brumme, Dipl.-Ing.
geboren am 29.01.1982
aus Augsburg

©2021 LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal
Vervielfältigungen nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Autors

Eingereicht am:	14. Oktober 2020
Prüfung am:	28. Juni 2021
Erster Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau Bergische Universität Wuppertal
Zweiter Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Mario Oertel LuFG Wasserbau Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Vorsitzender:	Univ.-Prof. Prof. mult. Dr.-Ing. agr. Jörg Rinklebe LuFG Boden- und Grundwassermanagement Bergische Universität Wuppertal
Weiteres Mitglied:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Pulsfort LuFG Geotechnik Bergische Universität Wuppertal

Bericht – Lehr- und Forschungsgebiet
Wasserwirtschaft und Wasserbau

Band 25

Daniel Brumme

Einflüsse und Auswirkungen von Lenkbuhnen auf die hydromorphologischen Prozesse einer beweglichen Gewässersohle

– Eine numerische Analyse –

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., 2021

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 978-3-8440-8361-3
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.)

Viele kleinere Gewässer wurden im Zuge der Landschaftskultivierung zunächst begradigt und anschließend im Uferbereich befestigt. Mit der Begradigung bzw. der damit einhergehenden Gefällevergrößerung kommt es in der Regel zu einer unerwünschten Erosion. Die Sohlerosion lässt sich im Gegensatz zur Ufererosion nur bedingt durch wasserbauliche Befestigungsmaßnahmen verhindern. Eine mögliche wasserbauliche Alternative ergibt sich aus dem Einbau von Buhnen. Bei kleineren Gewässern steht allerdings nicht die Verbesserung der Schifffahrt im Fokus des Buhnenbaus, sondern die Begrenzung der Erosionsprozesse bei Hochwasserabfluss. Zudem sollen die Buhnen bei mittleren Abflüssen nicht sichtbar, unterhalb des Wasserspiegels, angeordnet werden und den Hauptstrom vom Ufer weg in die Mittelwasserlinie lenken.

Eine einfache Transformation der Erkenntnisse über die Wirkung von Buhnen aus den schiffbaren Gewässern in den Skalenbereich der kleinen Gewässer ist wegen der unterschiedlichen Randbedingungen nicht gegeben und somit ist der Themenbereich „Lenkbuhnen als naturnaher Uferschutz“ wie MENDE (2014) in seiner Dissertation den Ansatz bezeichnet hat, relativ neu. Die Wirkung der Lenkbuhnen auf die Strukturierung von Fließgewässern ist daher in der wasserbaulichen Praxis eher wenig bekannt und die bisher vorliegenden Umsetzungen in der Praxis belaufen sich auf nur wenige Gewässerausbaumaßnahmen, wie zum Beispiel an der Salza und der Mürz (Steiermark) in den 1990er Jahren, an der Taverna (Kanton Freiburg, 2012) sowie wie zuletzt vereinzelt an der Erft bei Eschweiler.

Grundlage für die vorliegende Arbeit sind systematische Laboruntersuchungen von Mende, die bis 2014 am Leichtweis Institut für Wasserbau in Braunschweig durchgeführt wurden. Die Versuche in einem Laborgerinne beschränkten sich allerdings auf eine gerade Linienführung und einen rechteckigen Querschnitt. Aufbauend auf diesen Laborversuchen und der Überzeugung, dass Lenkbuhnen einen substanziellen Beitrag zum Uferschutz der kleinen Gewässer bieten können, wird in dieser Arbeit anhand von numerischen Analysen aufgezeigt, wie die hydraulische und hydromorphologische Wirkung von Lenkbuhnen auch im gekrümmten Gewässerverlauf mit komplexer dreidimensionaler Grundströmung genutzt werden kann und somit einen breiteren Einsatz in der Praxis erlangen könnte.

Wuppertal, November 2021
Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff

„In der Natur geschieht nichts zufällig. Wir Menschen haben es in der Hand, die Natur zu kopieren, aber vorher müssen wir sie kapieren, um die guten Geister zu rufen“.

Viktor Schauberger (1885 – 1958)

Danksagung

Die nachstehende Arbeit ist parallel zu meiner Arbeitszeit bei Björnsen Beratende Ingenieure GmbH in den Jahren 2015 bis 2020 entstanden. Der betrachtete Naturversuch war Bestandteil eines durchgeführten Projektes.

Besonderen Dank gilt Herrn Univ.- Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff. Er hat sich stets Zeit genommen, von der Anmeldung dieser Dissertation über den Aufbau und Verfassung bis hin zur Fertigstellung der Arbeit. Bei Fragen und Problemstellungen konnte ich jederzeit Kontakt mit Ihm aufnehmen. Sein in mich gesetzte Vertrauen half umso mehr, diese Arbeit bestmöglich auszuführen.

Bei Herrn Univ.-Prof. Prof. mult. Dr.-Ing. agr. Jörg Rinklebe möchte ich mich für die Übernahme des Vorsitzes und bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Mario Oertel für die Begutachtung der Arbeit sowie die Beteiligung im Prüfverfahren recht herzlich bedanken.

Natürlich gilt mein weiterer Dank meinen Kollegen bei BCE, hier vor allem Herrn Dr.-Ing. Michael Probst, für all die Unterstützungen, seinen fachlichen sowie praktischen Ratschlägen und internen Weiterbildungsmöglichkeiten als Grundlage für die hydraulischen Programme. Frau Dr.-Ing. Svenja Kemper von der Bergischen Universität Wuppertal möchte ich herzlich für die umfangreiche und kritische Durchsicht dieser Arbeit danken.
Herrn Spinnreker von *DHI Wasy* gilt ebenso mein besonderer Dank, da ich mit seiner Hilfe das dreidimensionale Simulationsmodell MIKE3 erlernen und als Grundlage für meine Untersuchung nutzen konnte.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie sowie besonders bei meiner Frau Vivien bedanken, die mir permanent den Rücken freihielten und stets ein offenes Ohr für mich hatten. Danke!

Augsburg, im November 2021 Daniel Brumme

Kurzfassung

Mit dem Einbau von Querbauwerken im Gewässer kann das Strömungsverhalten in den größtenteils begradigten Gewässern gezielt beeinflusst werden. Dabei spielt neben den strömungsrelevanten Faktoren, wie der Fließgeschwindigkeit und Schubspannung, auch der Geschiebehaushalt eine wichtige Rolle. Zur exakten Strömungslenkung können verschiedene Bauwerke wie z. B. Schneckenbuhnen, Trichterbuhnen, Lenkbuhnen etc. eingesetzt werden.

Die Ausarbeitung zu dieser Dissertation befasst sich mit dem Thema der Strömungslenkung mittels naturnah verbauter Lenkbuhnen im Gewässer. Mit Hilfe dieser Bauwerke soll eine Verbesserung der Strömungslenkung sowohl bei Niedrigwasser als auch bei Hochwasser erzielt werden. Durch die Betrachtung unterschiedlicher Buhnengeometrien sollen hierbei die Auswirkungen auf das Strömungsgeschehen im Gewässer weiter optimiert werden. Die Untersuchung erfolgte in einem idealisierten Rechteckgerinne mittels zwei- und dreidimensionaler Strömungssimulationen. Die Modellvorgaben und dazugehörigen Randbedingungen entsprachen dabei den Ansätzen aus dem Naturversuch von MENDE (2014) sowie den Ergebnissen aus bereits umgesetzter Naturprojekte von WERDENBERG ET. AL (2012). Die Netzmodellierung (Preprocessing) erfolgte mit SMS 10 und 11 in Kombination mit Kalypso. Der Abfluss, das Sohlgefälle sowie die Materialeigenschaften (Rauheiten) für die Sohle, Böschung und geplante Einbauten (Lenkbuhnen) wurden im Anschluss definiert. Zur Plausibilisierung des Berechnungsnetzes erfolgte nach Aufbau des ersten Netzes eine zusätzliche Studie mit entsprechender Darstellung unterschiedlich feiner Netzvermaschungen und deren finalen Auswertung. Hierbei zeigte sich, dass die gesuchten Parameter der Gewässerströmung nahezu netzunabhängig sind.

Die eigentlichen hydrodynamischen Berechnungen (Solver) erfolgten anschließend mit Hilfe der Modelle Hydro_AS-2D sowie MIKE3, das Postprocessing, in derer die Berechnungsergebnisse ausgewertet sowie textlich und grafisch erläutert werden. Hinweisend die Anmerkung, dass die hydromorphologische Betrachtung mit der Software FLOW3D aufgrund von Sprüngen und Überlagerungen der Abflüsse an einem Knoten nach einem ersten Testlauf im Ergebnis nicht zielführend beziehungsweise aussagekräftig war und diesbezüglich deren Nutzung verworfen wurde.

Im Rahmen der hydromorphologischen Untersuchungen wurden neben dem Istzustand auch der Planzustand (Einbau von Lenkbuhnen) hinsichtlich Auswirkung der inklinanten Lenkbuhne

auf das Strömungsbild in geraden und in gekrümmten Gewässerabschnitten abgebildet. Für die Gewässergerade erfolgte in einem ersten Untersuchungsschritt die Ermittlung einer optimalen Lenkbuhnengeometrie. Die bereits definierten Bemessungsgrundlagen von MENDE (2014) konnten hierbei repliziert und nahezu bestätigt werden. Eine Leitbuhne als erstes Strömungselement hat sich ebenso vorteilhaft in der hydromorphologischen Simulation erwiesen, wie die variierende Anordnung des Inklinationswinkels α von 55° bis 65°. Die Buhnenlängsneigung wurde mit B_L = 3% final bestimmt. Die Berechnungen zu den Buhnenabständen sind identisch zu dem bereits postulierten Ansatz nach MENDE (2014).

Anhand des zweiten durchgeführten Schrittes wurden die Bemessungsgrundlagen für die Gewässergerade auf die Gewässerkrümmung transferiert. Durch zwei Szenarien im Anschluss die hydraulische Funktion und die exakte Lage im System bestimmt. Szenario 1 umfasste die Anordnung der Leitbuhne 5 m vor Beginn der Gewässerkrümmung sowie einen Buhnenabstand von 24 m ($A_B \geq 4$). In Szenario 2 wurde die Leitbuhne direkt im Übergang von Gewässergerade in Gewässerkrümmung angeordnet sowie ein Buhnenabstand von 18 m ($A_B \geq 3$) gewählt. Die Untersuchungen zeigten, dass die Bemessungsgrundlagen, bis auf den relativen Buhnenabstand, den Ergebnissen für die Gewässergerade entsprechen. Die Empfehlung von WERDENBERG ET. AL (2012), den relativen Abstand mit $A_B \geq 4$ zu wählen, ist auf $A_B \geq 3$ zu reduzieren.

Neben den strömungsrelevanten Faktoren spielt, wie eingangs bereits erwähnt, im Gewässersystem der Geschiebehaushalt (*FT*) ebenfalls eine entscheidende Rolle. Die morphologische Untersuchung im idealisierten Rechteckgerinne für die Gewässergerade und Gewässerkrümmung wurde mit den Programmen Hydro_FT-2D, BASEMENT und MIKE3 durchgeführt. Im Ergebnis konnte mit den gewählten Programmen das Geschiebeverhalten auf der Gewässersohle und -Böschung gut nachgebildet werden. Mittels analytischer Lösung dazugehöriger Erosions- und Sedimentationsgleichungen konnten diese bestätigt werden.

Basierend auf den ermittelten Bemessungsgrundlagen, welche im Nachgang zu den eigentlichen Simulationen in einer umfassenden Zusammenstellung übersichtlich gelistet und in einem eigens für die Lenkbuhnen erstellten Bemessungstool programmiert wurden, erfolgte im nächsten Schritt die vergleichende Betrachtung der Buhnenergebnisse anhand dreier bereits umgesetzter Buhnenprojekten. Diese wurden in der Ausarbeitung hydromorphologisch neu abgebildet und für den Ist- und Planzustand simuliert. Das Thema der Wirtschaftlichkeit von Lenkbuhnen spielte hierbei eine große Rolle.

Mit Hilfe von eingebauten Lenkbuhnen konnte eine signifikante Reduzierung der Schubspannung im Bereich der Uferböschung erzielt werden, gleichbedeutend, dass eine kostenaufwendige Böschungssicherung hinfällig ist. Das Ziel der Strömungslenkung auf die Gewässermitte respektive an das gegenüberliegende Ufer konnte ebenfalls nachgewiesen werden.

Bei allen drei Naturprojekten war eine Anpassung der Bestandsbuhnen nicht mehr notwendig, da die aktuell verbauten Buhnen die hydromorphologischen Belastungen im Gewässer von mittel auf schwach heruntergesetzt haben (Projekte Ohrn und Speyerbach) beziehungsweise die Böschungen bereits zusätzlich durch Wasserbausteine gegen negative Hochwassereinflüsse gesichert waren (Projekt Feuerbach). Eine Anpassung würde keine signifikanten Verbesserungen erzielen, jedoch weitere Kosten mit sich bringen.

Abstract

By installing transverse structures in the body of water, the flow behavior in largely straightened bodies of water can be specifically influenced. In addition to factors relevant to flow parameters, such as flow velocity and shear stress, the bed load balance also plays an important role. Various structures, e.g. snail platforms, funnel platforms, steering platforms, etc. can be used.

The elaboration for this dissertation deals with the topic of flow control by means of near-natural steering grooves in the water. With the help of these structures, an improvement in flow control is to be achieved both at low tide and at high tide. By considering different groyne geometries, the effects on the flow in the water should be further optimized.
The investigation was carried out in an idealized rectangular channel using two- and three-dimensional flow simulations. The model specifications and the associated boundary conditions corresponded to the approaches from the nature experiment by MENDE (2014) as well as the results from nature projects already implemented by WERDENBERG ET. AL (2012). The network modeling (preprocessing) was done with SMS 10 and 11 in combination with Kalypso. The runoff, bottom slope and material properties (roughness) for the bottom, embankment and planned fixtures (steering grooves) were accordingly defined. To check the plausibility of the calculation network, after a first network was set up, an additional study was carried out with a corresponding representation of different meshes of networks and their final evaluation. It was shown that the parameters of the water flow are almost independent of the network.

The actual hydrodynamic calculations (solver) were then carried out with the help of the Hydro_AS-2D and MIKE3 models, the post-processing, in which the calculation results are evaluated and explained in text and graphical form. As an indication, the comment that the hydromorphological analysis with the FLOW3D software was not expedient or meaningful in the result due to jumps and overlapping of the runoff at a node after a first test run and its use was rejected in this regard.

As part of the hydromorphological investigations, the current state and the planned state (installation of steering gates) with regard to the effect of the inclining steering gates on the flow pattern in straight and curved sections of water were mapped. In a first step of the investigation, an optimal steering platform geometry was determined for the straight line. The assessment bases already defined by MENDE (2014) could be replicated and almost confirmed. A guide bridge as the first flow element has proven to be just as advantageous in the

hydromorphological simulation as the varying arrangement of the inclination angle α from 55° to 65°. The longitudinal slope of the groyne was finally determined with B_L = 3%. The calculations for the groyne distances are identical to the previously postulated approach according to MENDE (2014).

On the basis of the second step that was carried out, the calculation bases for the straight line were transferred to the curvature of the water. The numerical function and the exact position in the system are then determined by two scenarios.

Scenario 1 included the arrangement of the guide groyne 5 m before the start of the bend in the water and a groyne distance of 24 m ($A_B \geq 4$).

In scenario 2, the lead groyne was placed directly at the transition from a straight line to a curvature and a groyne distance of 18 m ($A_B \geq 3$) was chosen.

The investigations showed that the calculation bases, except for the relative groyne distance, correspond to the results for the straight line. The recommendation from WERDENBERG ET. AL (2012) to define the relative distance with $A_B \geq 4$ should be reduced to $A_B \geq 3$.

In addition to the flow-related factors, as already mentioned, the bed load balance (FT) also plays a decisive role in the water system. The morphological investigation in the idealized rectangular channel for the straight line and curvature of the water body was carried out with the programs Hydro_FT-2D, BASEMENT and MIKE3. As a result, the sediment load behavior on the riverbed and embankment could be reproduced well with the selected programs. These could be confirmed by means of an analytical solution to the associated erosion and sedimentation equations.

Based on the calculated assessment bases, which were clearly listed in a comprehensive compilation after the actual simulations and programmed in a dimensioning tool specially created for the steering groynes, the next step was to compare the groyne results using three groyne projects that had already been implemented. These were numerically remapped in the elaboration and simulated for the actual and planned status. The issue of the profitability of steering platforms played a major role here.

With the help of built-in steering bridges, it was possible to achieve a significant reduction in the shear stress in the area of the embankment, which means that expensive embankment protection is no longer necessary. The aim of directing the current to the middle of the water or to the opposite bank could also be demonstrated.

In all three nature projects, it was no longer necessary to adjust the existing groynes, as the groynes currently built have reduced the hydromorphological loads in the water from medium to weak (Ohrn and Speyerbach projects) or the embankments were already additionally secured against negative flood influences by armor stones (Feuerbach project). Adjustments would not produce any significant improvements but would entail additional costs.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung I
Kurzfassung III
Abstract VI
Abbildungsverzeichnis XII
Tabellenverzeichnis XVII
Variablenverzeichnis XIX

Teil I
Einleitung
1 Motivation 1
2 Sekundärströmungen 4
2.1 Allgemeine Begriffserläuterung 4
2.2 Entstehung von Sekundärströmungen 4
2.3 Problemdarstellung der hydraulischen Simulation von Sekundärströmungen 5
2.4 Eruierung von Sekundärströmungen anhand der Fließgeschwindigkeit und Schubspannung 10
2.4.1 Fließgeschwindigkeiten 10
2.4.2 Schubspannungen 14
3 Sedimentmanagement 18
3.1 Allgemeine Differenzierung Sedimenttransport 18
3.2 Grundlagen der Sedimentation und Erosion 19
3.2.1 Sedimentation 19
3.2.2 Erosion 21
4 Aktueller Forschungsstand 29
4.1 Einleitung 29
4.2 Rückblick 29
4.3 Querbauwerke 30
4.3.1 Bauwerk Lenkbuhne 30
4.3.2 Weitere Buhnenarten 38
5 Forschungsansatz 43
5.1 Ziel der Arbeit 43
5.2 Erörterung der Fragestellung 44

Teil II

Hydromorphologische Modellierungen 47

6 Modellbeschreibung und – auswahl 49
6.1 Übersicht Kommerzielle Programme 49
6.1.1 Hydro_AS-2D (SMS/Kalypso) 49
6.1.2 MIKE 51
6.1.3 FLOW 3D 52
6.2 Open Source Programm Basement 53
6.3 Untersuchungsprogramme 54

7 Modell Rechteckgerinne 56
7.1 Modellgeometrie 56
7.2 Randbedingungen 62
7.2.1 Rauheiten 62
7.2.2 Anfangszustand 65
7.2.3 Einströmrand 66
7.2.4 Ausströmrand 66
7.3 Modellanalyse 66
7.3.1 Vorgehensweise 66
7.3.2 Strömungsberechnungen für den Istzustand 68
7.3.2.1 Abflussszenarien 68
7.3.2.2 Modellberechnungen & Ergebnisse 68
7.3.3 Strömungsberechnungen für den Planzustand 77
7.3.3.1 Gerinnestruktur – Lenkbuhnen 77
7.3.3.2 Abflussszenarien 81
7.3.3.3 Modellberechnungen und Ergebnisse 82
7.3.4 Geschiebetransportanalyse 91
7.3.4.1 Gewässergerade 91
7.3.4.2 Gewässerkrümmung 103
7.4 Ergebnisdiskussion 105
7.5 Ableitung Bemessungsansätze 107
7.5.1 Gerade Gewässerabschnitten 108
7.5.2 Bewegliche Sohle bei Gewässerkurven 108
7.5.3 Bemessungstool 109

Teil III

Vergleich Naturprojekte 111

8 Einführung Projekte 113

9 Projekt Ohrnrenaturierung 114
9.1 Grundlagendaten 117

9.2 Modellanalyse 120
9.2.1 Istzustand 120
9.2.2 Planzustand 1 121
9.2.3 Planzustand 2 126
9.3 Fazit und Ergebnisdiskussion 126
10 Projekt Feuerbach 128
10.1 Grundlagendaten 129
10.2 Modellanalyse 132
10.2.1 Istzustand 132
10.2.2 Planzustand 1 132
10.2.3 Planzustand 2 134
10.3 Fazit und Ergebnisdiskussion 135
11 Projekt Speyerbachrenaturierung 136
11.1 Grundlagendaten 136
11.2 Modellanalyse 139
11.2.1 Ist-Zustand 139
11.2.2 Planzustand 1 140
11.2.3 Planzustand 2 141
11.3 Fazit und Ergebnisdiskussion 142

Teil IV

Schlussbetrachtungen 143
12 Zusammenfassung 145
13 Weiterer Forschungsbedarf 150

Teil V

Anhang 155
14 Anhang 157
Anhang 1: Diagramme zur Fließgeschwindigkeit 158
Anhang 2: Diagramme zur Quergeschwindigkeit 159
Anhang 3: Grundlagendaten und Ergebnisse Rechteckgerinne 160
Anhang 4: Projekt Ohrn 171
Anhang 5: Projekt Feuerbach 177
Anhang 6: Projekt Speyerbachrenaturierung 185

Lebenslauf 193

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Lenkbuhne 2 Am Feuerbach (Foto 17.11.2017) 2
Abbildung 2-1: Sekundärströmung in der Kurve (HAFNER, 2008) 5
Abbildung 2-2: Behandlung der Sekundärströmung im Randbereich (HAFNER, 2008) 7
Abbildung 2-3: Darstellung von Geschwindigkeitsdifferenzen (WURMS, 2004) 8
Abbildung 2-4: Rauheitsbelegung der Buhnen (WURMS, 2004) 9
Abbildung 2-5: Gewässerquerschnitt Gerade 10
Abbildung 2-6: Verteilung der Geschwindigkeit u entlang eines Kanalbogens in schematischer Isotachendarstellung (MECKEL 1978, zitiert in MENDE, 2014) 11
Abbildung 2-7: Abschätzung der vertikalen Sekundärströmung in Gewässermitte 13
Abbildung 2-8: Abschätzung der vertikalen Sekundärströmung im Uferbereich 13
Abbildung 2-9: Verteilung der Wandschubspannung (SCHRÖDER & RÖMISCH, 2001) 15
Abbildung 3-1: Sohlstabilität nach Shields (UELTZHÖFFER, 2019) 21
Abbildung 3-2: Bestimmung der max. Gewässerbreite b* (SCHMAUTZ 2003, zitiert in 25
Abbildung 3-3: Materialumlagerung im Querprofil (HAFNER, 2008) 26
Abbildung 3-4: Prozesse in der Flusskurve (HAFNER, 2008) 28
Abbildung 4-1: Strömung und Verlandung bei deklinanten (a), rechtwinkligen (b) und inklinanten Buhnen (c) (MENDE & SINDELAR, 2016) 30
Abbildung 4-2: Schema inklinante Lenkbuhnen einseitig im Wechsel (BCE, 2015) 33
Abbildung 4-3: Schema inklinante Lenkbuhnen beidseitig (BCE, 2015) 33
Abbildung 4-4: Schematischer Querschnitte einer Lenkbuhne bei NQ (BCE, 2015) 34
Abbildung 4-5: Anordnung Lenkbuhnen in Gewässerkrümmung (GROBER, 1998) 35
Abbildung 4-6: Inklinationswinkel mit Abströmung (MENDE ET. AL 2016) 36
Abbildung 4-7: Gestaltungsmerkmale von Lenkbuhnen (HAMMER/MIERSCH, 2016) 37
Abbildung 4-8: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit 38
Abbildung 4-9: Darstellung einer inklinanten Trichterbuhne (BCE, 2015) 39
Abbildung 4-10: Darstellung einer Schneckenbuhne (BCE, 2015) 39
Abbildung 4-11: Darstellung einer inklinanten Hakenlenkbuhne (BCE, 2015) 40
Abbildung 4-12: Darstellung einer inklinanten Sichelbuhne (BCE, 2015) 40
Abbildung 4-13: Darstellung aus dem U.S. Patent von 1987 (ODGAARD, 1987) 41
Abbildung 4-14: Darstellung einer Pendelrampe (BCE, 2015) 42
Abbildung 4-15: Darstellung Pendelrampe im Riegelbereich – Querschnitt (BCE, 2015) 42
Abbildung 6-1: Simulationsvorgang mit SMS-Verwendung 54
Abbildung 7-1: Rechteckgerinne Ansatz 1 – Standardbereich 58

Abbildung 7-2: Rechteckgerinne Ansatz 1 –Verfeinerung 1 58
Abbildung 7-3: Rechteckgerinne Ansatz 1 – Verfeinerung 2 59
Abbildung 7-4: Rechteckgerinne Ansatz 1 – Verfeinerung 3 59
Abbildung 7-5: Vergleich Berechnungsnetze (BHQ) – grobe Skalierung 60
Abbildung 7-6: Vergleich Berechnungsnetze (BHQ) – feine Skalierung 60
Abbildung 7-7: Berechnungsnetz Rechteckgerinne mit Krümmungsbereich – Ansatz 2 62
Abbildung 7-8: Berechnung Wasserspiegelhöhe für NQ = 5 m³/s und BHQ = 100 m³/s 68
Abbildung 7-9: Darstellung der ausgewerteten Stellen im Gewässerquerschnitt 69
Abbildung 7-10: Modellnetz MIKE Zero 71
Abbildung 7-11: Aufbau eines MIKE3-Projektes 72
Abbildung 7-12: Maske der Ausgabedaten 75
Abbildung 7-13: Böschungsverfeinerung in MIKE3 76
Abbildung 7-14: Schnitt/Lage und Bezeichnungen Lenkbuhne (BCE, 2015) 77
Abbildung 7-15: Lenkbuhnen im Gewässersystem - 1. Dimensionierung (SMS) 78
Abbildung 7-16: Änderung tiefengemittelter Fließgeschwindigkeit (MENDE, 2014) 79
Abbildung 7-17: Ermittlung des maximalen relativen Abstandes (MENDE, 2014) 80
Abbildung 7-18: Schematische Darstellung Anordnung Buhnenkopf/-wurzel 81
Abbildung 7-19: Gewässersystem mit Netzverfeinerung (Hydro_AS-2D) 83
Abbildung 7-20: Planzustand mit Netzverfeinerung und Anpassung kst (SMS) 84
Abbildung 7-21: Planzustand Lenkbuhne 60°/BL=3% – Schubspannung (Hydro_AS-2D) 86
Abbildung 7-22: Planzustand BHQ – Schubspannungen Szenario 1 (MIKE3) 90
Abbildung 7-23: Planzustand BHQ – Schubspannungen Szenario 2 (MIKE3) 90
Abbildung 7-24: Parametereingabe Teil 1 -> Ermittlung nach MPM 94
Abbildung 7-25: Parametereingabe Teil 2 95
Abbildung 7-26: Geschiebevorgänge Istzustand (SMS) 97
Abbildung 7-27: Geschiebevorgänge Planzustand (SMS) 97
Abbildung 7-28: Istzustand – Ansatz 1 (SMS) 102
Abbildung 7-29: Planzustand Ansatz 1 - Schubspannungen (SMS) 103
Abbildung 7-30: Sedimentation- / Erosionsvorgänge – Planzustand (SMS) 103
Abbildung 7-31: Istzustand Krümmungsbeginn - Schubspannungen (SMS) 104
Abbildung 7-32: Planzustand Ansatz 2 - Schubspannungen (SMS) 104
Abbildung 7-33: Sedimentation- / Erosionsvorgänge Planzustand Ansatz 2 (SMS) 105
Abbildung 7-34: Bemessungstool Lenkbuhne 110
Abbildung 9-1: Lageplanausschnitt zum Untersuchungsbereich (BCE, 2013) 115

Abbildung 9-2: Kartierstrecke 3 an der Ohrn (BCE, 2016) 115
Abbildung 9-3: Querprofil Kartierstrecke 3 (BCE, 2018) 116
Abbildung 9-4: Substratkartierung Kartierstrecke 3 (BCE, 2018) 117
Abbildung 9-5: Vermessungsgrundlage für Erstellung DGM (OHNHAUS, 2016) 118
Abbildung 9-6: Abbildung 3D-Modellnetz Ohrn (SMS) 119
Abbildung 9-7: Längsschnitt Gewässerachse Ohrn (BCE, 2018) 123
Abbildung 9-8: Sedimentationsvorgänge im Gewässer (BASEMENT/SMS) 124
Abbildung 9-9: Modul Sand Transport (MIKE3) 124
Abbildung 9-10: Sedimentation- / Erosionsvorgänge Ohrn – Planzustand 1 (MIKE3) 125
Abbildung 10-1: Lageplanausschnitt Tektur Feuerbach mit Lenkbuhnen (BCE, 2016) 128
Abbildung 10-2: Digitales Geländemodell (BCE, 2017) 130
Abbildung 10-3: Abbildung Modellnetz Istzustand (SMS) 131
Abbildung 11-1: Abschnitt 2 aus Lageplan Vorhaben Speyerbach (BCE, 2018) 137
Abbildung 11-2: Abbildung Modellnetz Istzustand (SMS) 138
Abbildung 14-1: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit ũ bei y = 20 cm 158
Abbildung 14-2: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit ũ bei y = 32 cm 158
Abbildung 14-3: Abhängigkeit zwischen der relativen Quergeschwindigkeit c und 159
Abbildung 14-4: Abflussganglinie Rechteckgerinne - instationär 160
Abbildung 14-5: Schubspannung Ist-Zustand NQ – Ansatz 1 (SMS) 160
Abbildung 14-6: Schubspannung Istzustand BHQ – Ansatz 1 (SMS) 161
Abbildung 14-7: Schubspannung Istzustand BHQ – Ansatz 2 (SMS) 161
Abbildung 14-8: Schubspannung Istzustand BHQ – Ansatz 1 (MIKE3) 162
Abbildung 14-9: Planzustand Lenkbuhne 60° BHQ – Schubspannung (SMS) 163
Abbildung 14-10: Planzustand Lenkbuhne 60° BHQ - WSPmax (SMS) 163
Abbildung 14-11: Planzustand BHQ – Schubspannungen (SMS) 164
Abbildung 14-12: Planzustand BHQ – Schubspannungen (MIKE3) 164
Abbildung 14-13: Schubspannungsverlauf über Laufzeit für Pkt. 1 (MIKE3) 165
Abbildung 14-14: Istzustand BHQ – Schubspannungen (MIKE3) 165
Abbildung 14-15: Hjulström-Diagramm zum Bewegungsbeginn von Sedimenten 166
Abbildung 14-16: Fließgeschwindigkeit v (m/s) für Planzustand (SMS) 167
Abbildung 14-17: Stoffkonzentration (kg/m³) im Unterstrom Lenkbuhne 1 (SMS) 167
Abbildung 14-18: Programmstruktur für Ist- und Planzustand (BASEMENT) 168
Abbildung 14-19: Berechnungsmodell – Istzustand (BASEMENT) 168
Abbildung 14-20: Berechnungsmodell – Planzustand (BASEMENT) 169

Abbildung 14-21: Schubspannungen Istzustand Gerade (MIKE3) 169
Abbildung 14-22: Schubspannungen Istzustand Gewässerkrümmung (MIKE3) 169
Abbildung 14-23: Algorithmen zum Bemessungstool 170
Abbildung 14-24: Lageplanausschnitt Kartierbereich 3 (BCE, 2013) 171
Abbildung 14-25: Vermessungsausschnitt (OHNHAUS, 2016) 171
Abbildung 14-26: Kartierbereich 3, Blick nach Unterstrom (24.06.2015) 172
Abbildung 14-27: Kartierbereich 3, Blick nach Oberstrom (24.06.2015) 172
Abbildung 14-28: Einlaufbedingung SMS / Hydro_AS-2D 173
Abbildung 14-29: Wassertiefe Istzustand BHQ (SMS) 173
Abbildung 14-30: Darstellung Lenkbuhnen Planzustand 1 (SMS) 174
Abbildung 14-31: Modellablauf Geschiebe (BASEMENT) 174
Abbildung 14-32: 3D-Darstellung Lenkbuhnen (BASEMENT) 175
Abbildung 14-33: Schubspannungen HQ20 (MIKE3) 175
Abbildung 14-34: Darstellung Lenkbuhnen Planzustand 2 (SMS) 176
Abbildung 14-35: Hochwasserschäden (Foto Fa. Zehe GmbH, 13.05.2016) 177
Abbildung 14-36: Hochwasser im Feuerbach, Blick nach Oberstrom 177
Abbildung 14-37: Lageplan Tektur Feuerbach (BCE, 2016) 178
Abbildung 14-38: Querprofil Querriegel 1 Feuerbach (BCE, 2016) 179
Abbildung 14-39: Querprofil Übergangsbereich Feuerbach (BCE, 2016) 179
Abbildung 14-40: Foto in Richtung Oberstrom nach Fertigstellung (Foto 12.10.2016) 180
Abbildung 14-41: Strömungslenkung bei erhöhtem Abfluss (Foto 02.02.2017) 180
Abbildung 14-42: Blick auf die Lenkbuhnen 2 und 3 (Foto 17.11.2017) 180
Abbildung 14-43: Lenkbuhne 1 am ersten Querriegel (Foto 17.11.2017) 181
Abbildung 14-44: Lenkbuhne 2 (Foto 17.11.2017) 181
Abbildung 14-45: Lenkbuhne 3 (Foto 17.11.2017) 181
Abbildung 14-46: Einlaufbedingung (Hydro_AS-2D / SMS) 182
Abbildung 14-47: Darstellung Lenkbuhnen Planzustand 1 (SMS) 182
Abbildung 14-48: Schubspannungsverteilung BHQ – Planzustand 1 (MIKE3) 183
Abbildung 14-49: Darstellung Lenkbuhnen Planzustand 2 (SMS) 183
Abbildung 14-50: Schubspannungsverteilung BHQ – Planzustand 2 (MIKE3) 184
Abbildung 14-51: Lageplanausschnitt Ost (BCE, 2018) 185
Abbildung 14-52: Speyerbach, Blickrichtung Stromaufwärts (Foto 16.06.2018) 186
Abbildung 14-53: Lenkbuhne 15 und 16, Blickrichtung Stromabwärts (Foto 16.06.2018) 186
Abbildung 14-54: Lenkbuhnen 15-16 am linken Ufer (Foto 16.06.2018) 187

Abbildung 14-55: Vermessungsdaten Fa. Zehe GmbH (13.12.2019) 187
Abbildung 14-56: Einlaufbedingung (Hydro_AS-2D / SMS) 188
Abbildung 14-57: Istzustand – Verfeinerung Berechnungsnetz (SMS) 188
Abbildung 14-58: Schubspannungsverteilung BHQ – Istzustand (SMS) 189
Abbildung 14-59: Darstellung Lenkbuhnen Planzustand 1 (SMS) 189
Abbildung 14-60: Schubspannungsverteilung BHQ – Planzustand 1 (MIKE3) 190
Abbildung 14-61 Fließgeschwindigkeitsverteilung BHQ – Planzustand 1 (MIKE3) 190
Abbildung 14-62: Darstellung Lenkbuhnen Planzustand 2 (SMS) 191
Abbildung 14-63: Schubspannungsverteilung BHQ – Planzustand 2 (MIKE3) 191
Abbildung 14-64: Fließgeschwindigkeitsverteilung BHQ – Planzustand 2 (MIKE3) 192

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Kategorien des Parameters „hydraulische Belastung“ (STOWASSER 2011) 14
Tabelle 2-2: Zulässige Schubspannungen und Fließgeschwindigkeiten 15
Tabelle 2-3: Kritische Schubspannungen (PATT, 2008) 16
Tabelle 2-4: Verstärkungskoeffizient ε (SCHRÖDER & RÖMISCH, 2001) 17
Tabelle 4-1: Gewässerdaten Wiese (MENDE, 2014) 31
Tabelle 7-1: Modellgebiet und gewählte Ansätze 56
Tabelle 7-2: Diskretisierungsfehler anhand Wasserspiegelbetrachtung 61
Tabelle 7-3: Diskretisierungsfehler anhand Schubspannungsbetrachtung 61
Tabelle 7-4: Rauheitsklassen für natürliche Gewässer (KNAUF, 2003) 63
Tabelle 7-5: Äquivalente Sandrauheiten ks (LFU, 2003) 64
Tabelle 7-6: Angesetzte Rauheiten 65
Tabelle 7-7: Fließgeschwindigkeiten, WSP, Schubspannungen bei NQ = 5 m³/s 69
Tabelle 7-8: Fließgeschwindigkeiten, WSP, Schubspannungen bei BHQ = 100 m³/s 70
Tabelle 7-9: Vergleich 2D-3D für BHQ für Gewässergerade 75
Tabelle 7-10: Fließgeschwindigkeiten, WSP, Schubspannungen Planzustand (Ansatz 1) 82
Tabelle 7-11: Planzustand für BHQ (Ansatz 1 mit Verfeinerung Netz) 84
Tabelle 7-12: Planzustand für BHQ (Ansatz 1 mit Verfeinerung Netz und Rauheit) 84
Tabelle 7-13: Schubspannungen BHQ mit Längsneigungsanpassung von 0% - 5% 85
Tabelle 7-14: Schubspannungen mit Anpassung Inklinationswinkel mit B_L 3% 87
Tabelle 7-15: Planzustand - Schubspannungen Gewässergerade (MIKE3) 88
Tabelle 7-16: 3D-Berechnung für BHQ für Gewässerkrümmung (MIKE3) 89
Tabelle 7-17: Szenario 1 für BHQ - Gewässerkrümmung (MIKE3) 89
Tabelle 7-18: Szenario 2 für BHQ - Gewässerkrümmung (MIKE3) 90
Tabelle 7-19: Ansatz Berechnungsparameter und Ergebnisse 98
Tabelle 9-1: Statistische Abflüsse der Ohrn (BCE, 2018) 118
Tabelle 9-2: Angesetzte Rauheiten 120
Tabelle 9-3: Wassertiefe und Schubspannungen BHQ (Station 11+290) 121
Tabelle 9-4: Schubspannungen bei BHQ 122
Tabelle 9-5: Berechnung Leit- und Lenkbuhnen 126
Tabelle 9-6: Schubspannungen BHQ Planzustand 2 126
Tabelle 10-1: Statistische Abflüsse Feuerbach (BCE, 2016) 129
Tabelle 10-2: Angesetzte Rauheiten 132

Tabelle 10-3: Wassertiefe und Schubspannungen BHQ, Bereich geplanter Lenkbuhne 132
Tabelle 10-4: Schubspannungen bei BHQ 133
Tabelle 10-5: Berechnung Lenkbuhnen 1 - 3 134
Tabelle 10-6: Schubspannungen bei BHQ 134
Tabelle 11-1: Statistische Abflüsse Feuerbach (BCE, 2018) 136
Tabelle 11-2: Angesetzte Rauheiten 139
Tabelle 11-3: Schubspannungen bei BHQ, Bereich zw. Lenkbuhne 15 / 16 139
Tabelle 11-4: Schubspannungen bei BHQ Buhne 2 140
Tabelle 11-5: Berechnung Lenkbuhnen 14-17 141
Tabelle 11-6: Schubspannungen bei BHQ 141
Tabelle 14-1: Reibungswinkel unterschiedlicher Materialen 166

Variablenverzeichnis

Variable	Definition	Einheit
A	Parameter	-
A_B	relativer Abstand	-
a_v	Sekundärströmungskoeffizient	-
a_x	Relativer Abstand	-
a_y	lateraler Abstand	-
B	Gewässerbreite	m
B_L	Längsneigung Buhne	%
BHQ	Bemessungsabfluss Hochwasser (HQ_{100})	m³/s
b^*	erreichte Breite b	m
b^*_{eq}	Breite in halber Fließtiefe	m
$b_{m/u}$	hydrodynamisch wirksame Breite	m
c_d	Widerstandsbeiwert	-
c_f	dimensionsloser Reibungskoeffizient	-
c_{kurve}	relative kurveninduzierte Quergeschwindigkeit	m/s
c_w	Widerstandsbeiwert für Wind	-
d	Korndurchmesser	m
d_m	mittlerer/charakteristischer Korndurchmesser	m
e^*	dimensionslose Diffusivität	-
ε	Verstärkungskoeffizient	-
Fr	Froudezahl	-
g	Erdbeschleunigung	m/s²
h	Wassertiefe	m
h_B	mittlere Überströmungshöhe	m
h_{gr}	Grenzwassertiefe	m
h_m	mittlere Fließtiefe	m
I_E / I_R	Energieliniengefälle / Reibungsgefälle	m/m
k	Oberflächenrauheit	mm
k_B	Kalibrierkonstanten für die Abminderung der Sekundärströmung im Böschungsbereich	-

Variable	Definition	Einheit
k_1 , k_2	Konstanten in der Geschiebetransportformel	-
k_s	äquivalente Sandrauheit	m
k_{st}	Manning-Strickler Beiwert	$m^{1/3}/s$
L	charakteristische Länge	m
l_p	Relative Länge	-
NQ	Niedrigwasserabfluss	m^3/s
m	Abminderungsfaktor	-
p	Porosität	-
Q	Durchfluss	m^3/s
q_{B*}, q_B	Geschiebetransportkapazität, Geschiebetransport	kg/s
R	Radius	m
r	Krümmungsradius	m
$Re*$	Reynoldszahl	-
R_{sec}	Radius verwendet in den Sekundärströmungskorrekturtermen	m
u^*	Sohlschubspannungsgeschwindigkeit	m/s
u_m	querschnittsgemittelte Geschwindigkeit in Fließrichtung	m/s
u_{Ufer}	ufernahe Geschwindigkeit in Fließrichtung	m/s
u, v, w	Fließgeschwindigkeiten in x,y,z-Richtung	m/s
U, V	tiefengemittelte Geschwindigkeit in x, y-Richtung	m/s
U_c, V_c	tiefengemittelte Geschwindigkeit der Hauptströmung und senkrecht hierzu	m/s
v_{*c}	kritische kornbezogene Schubspannungsgeschwindigkeit	m/s
$v_{c,S}$	Sekundärströmung an der Wasserspiegeloberfläche	m/s
V	Volumen	m^3
v_m	mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt	m/s
$v_{m,zul}$	mittlere zulässige Geschwindigkeit	m/s
v_{max}	maximale Fließgeschwindigkeit	m/s
WSP	Wasserspiegelhöhe	m
w	Windgeschwindigkeit 10 m über Wasserspiegel	m/s
w_{max}	maximale Vertikalgeschwindigkeit	m/s
z	Raumrichtung, Dimension	m

Variable	Definition	Einheit
α	Winkel	°
β	Konstante zur Ermittlung Sekundärströmungs-entwicklungslänge oder Böschungsneigung	°
δ	Delta	-
κ	Karman-Konstante	-
λ	Wellenlänge oder Entwicklungslänge der Sekundärströmung	m
υ	kinematische Viskosität von Wasser	m²/s
ρ_F	Dichte des Fluids	kg/m³
ρ_L	Dichte Luft	kg/m³
ρ_w	Dichte Wasser	kg/m³
ρ_s	Dichte Sediment	kg/m³
θ_{cr}	kritischer Shieldsparameter	-
θ'	Shieldsparameter in Abhängigkeit vom Riffel-Faktor μ	
μ	Riffel-Faktor	-
τ	Schubspannung	N/m²
τ_B	Randschubspannung	N/m²
τ_C	kritische Schubspannung	N/m²
τ_f	Schubspannung an der Oberfläche	
τ_{zul}	zulässige Schubspannung	N/m²
φ	innerer Reibungswinkel	°